

Meinolf Lukei

***Systematik
zur integrativen Entwicklung
von mechatronischen Produkten
und deren Prüfmittel***

***Systematic
for Integrative Development
of Mechatronic Products
and their Inspection Equipment***

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Universität Paderborn – Paderborn – 2020

Das Werk einschließlich seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Herausgeber und des Verfassers unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Als elektronische Version frei verfügbar über die Digitalen Sammlungen der Universitätsbibliothek Paderborn.

Satz und Gestaltung: Meinolf Lukei

Geleitwort

Das übergeordnete Ziel unserer Forschungsaktivitäten ist die Steigerung der Innovationskraft von Unternehmen. Durch die Globalisierung sowie die zunehmende Individualisierung der Produkte und dem damit einhergehenden Wettbewerbsdruck ist es wichtiger denn je, innovative und qualitativ hochwertige Produkte in zahlreichen Varianten möglichst schnell und zu attraktiven Preisen auf den Markt zu bringen. Dabei ist besonders bei neuen Produkten, für die sich gerade erst ein Markt entwickelt, die zu produzierende Stückzahl schwer zu antizipieren. Dies erfordert neue Ansätze in der Produktentstehung, die die Aufgabenbereiche Strategische Produktplanung, Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung umfasst.

Vor diesem Hintergrund sind Produkt und Produktionssystem integrativ zu entwickeln. Das Produktionssystem beinhaltet u.a. die Prüfmittel zum Prüfen des mechatronischen Produktes. Die Prüfmittel werden oftmals speziell für diese Aufgabe konzipiert, entwickelt und gebaut. Dabei kommt es auf eine integrative Entwicklung von Produkt und Prüfmittel an, da zwischen diesen zahlreiche Wechselwirkungen bestehen.

Herr Lukei hat sich diesen Herausforderungen gestellt und eine Systematik zur integrativen Entwicklung von mechatronischen Produkten und entsprechenden Prüfmitteln erarbeitet. Die Systematik setzt bereits bei der Produktkonzipierung mittels Model-Based Systems Engineering (MBSE) an. Sie beinhaltet einen generischen integrativen Entwicklungsprozess, der durch ein Systemmodell und Hilfsmittel unterstützt wird. Zudem wird erläutert, wie der generische Prozess situationsspezifisch an die Randbedingungen des Entwicklungsprojektes und des Unternehmens angepasst werden kann. Die Anwendung der Systematik wird am Beispiel der Konzipierung eines innovativen modularen Wechselrichtersystems nebst zugehörigem Prüfmittel anschaulich erläutert. Insbesondere wird ausgeführt, wie das Prüfmittel so konzipiert werden kann, dass es mit den steigenden Absatzzahlen und Varianten des Produktes „mitwachsen“ kann.

Mit seiner Arbeit leistet Herr Lukei einen wertvollen Beitrag zu einer neuen Schule der Produktentstehung in der Mechatronik, die dem Aspekt der Prüfmittelentwicklung besondere Aufmerksamkeit schenkt.

**Systematik
zur integrativen Entwicklung
von mechatronischen Produkten
und deren Prüfmittel**

zur Erlangung des akademischen Grades
DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Meinolf Lukei
aus Paderborn

Tag des Kolloquiums:
Referent:
Korreferent:

12. April 2019
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier
Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Forschungstätigkeit am Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik (IEM). Grundlage dafür waren mehrere Industrie- und Forschungsprojekte sowie der intensive Austausch mit Firmen, die sich mit der behandelten Thematik befassen.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier für die sehr gute fachliche Aus- und Weiterbildung in meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter, die wesentlich zur Erweiterung meines Horizontes beigetragen hat. Ich danke ihm weiterhin für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Ausbildung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu danke ich für die Begleitung auf dem Weg zur Promotion. Weiterhin danke ich ihm für die Übernahme des Koreferats und das Vertrauen in meine Person und Arbeit.

Ferner danke ich allen ehemaligen Arbeitskollegen für den wertvollen Gedankenaustausch und die wertvollen Diskussionen, aber auch für eine schöne Zeit auch über das Berufliche hinaus. Hervorheben möchte ich hier Dr. Bassem Hassan und Christian Bremer.

Allen Studenten, die zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben, danke ich ganz herzlich, wobei ich hier Stefan Wecker besonders erwähnen möchte.

Der Firma KEB danke ich recht herzlich für das Stellen des Anwendungsbeispiels.

Ein ganz besonderer Dank gebührt der Firma Wöhler, in der meine berufliche Laufbahn begann. Dies hat mich sowohl fachlich als auch in meiner Arbeitsweise sehr geprägt. Namentlich möchte ich hier Thomas Wecker und Dr. Stephan Ester danken, die mich immer gefordert sowie gefördert haben und mich immer ermuntert haben mich weiter zu bilden. Wesentliche Teile des Grundverständnisses, die für diese Arbeit sehr hilfreich waren, habe ich hier erworben.

Abschließend gilt mein herzlichster Dank meinen Eltern und Freunden für ihre Unterstützung, insbesondere während der Zeit der Anfertigung der Dissertation.

Bad Wünnenberg, im Dezember 2019

Meinolf Lukei

Auflistung veröffentlichter Teilergebnisse:

- [LHD+16a] LUKEI, M.; HASSAN, B.; DUMITRESCU, R.; SIGGES, T.; DERKSEN, V.: Requirement Analysis of Inspection Equipment for Integrative Mechatronic Product and Production System Development – Model Based Systems Engineering Approach. In: Proceedings of IEEE International Systems Conference (SysCon2016), 13.-15. April, Orlando, USA, 2016
- [LHD+16b] LUKEI, M.; HASSAN, B.; DUMITRESCU, R.; SIGGES, T.; DERKSEN, V.: Modular Inspection Equipment Design for Modular Structured Mechatronic Products – Model Based Systems Engineering Approach for an Integrative Product and Production System Development. In: Proceedings of the 3rd International Conference on System-integrated Intelligence: New Challenges for Product and Production Engineering (SysInt2016). 13.-15. Juni, Paderborn, Germany, 2016
- [SDS+17] SIGGES, T.; DÜERKOP, C.; SCHULTE, T.; BROSE, M.; NEUMANN, A.; LUKEI, M.: Abschlussbericht Innovationsprojekt itsOWL-ImWR – Innovatives modulares Antriebswechselsrichtersystem für die Elektrifizierung von Nebenaggregaten in Fahrzeuganwendungen. 06.09.2017

Zusammenfassung

Bei der Produktion mechatronischer Systeme, welche oftmals modular aufgebaut sind, stellen Prüfungen der Produktqualität einen wesentlichen Bestandteil dar. Die dafür genutzten Prüfmittel sind dabei in der Regel ebenfalls (modulare) mechatronische Systeme. Diese Prüfmittel werden häufig für diese Aufgabe mit großem Zeitaufwand konzipiert, entwickelt und produziert. Klassischerweise erfolgt die im Wesentlichen für (mechanische) Komponenten gedachte Prüfplanung sehr spät im Produktentstehungsprozess. Zur Prüfplanung ist die Prüfmittelauswahl, oder falls notwendig die Prüfmittelentwicklung, zugehörig. Das Prüfmittel wird nicht als wesentlicher Teil des Produktionssystems integrativ zum Produkt entwickelt.

Die vorgestellte *Systematik zur integrativen Entwicklung von mechatronischen Produkten und deren Prüfmittel* soll Fachleute bei der Planung und Durchführung der Entwicklung von mechatronischen Produkten, deren Produktionssystemen und insbesondere der damit verbundenen Prüfmittelentwicklung, unterstützen. Die Prinzipiellösung mechatronischer Systeme – die oftmals auch im Sinne des Model-Based Systems Engineering (MBSE) genutzt wird – bildet dafür die Basis. Die Systematik beinhaltet einen generischen integrativen Entwicklungsprozess, der durch ein Systemmodell und Hilfsmittel, wie z.B. den Morphologischen Kasten und die für diesen Zweck angepasste Methode CONSENS, unterstützt wird. Weiterhin ist erläutert, wie der generische Prozess situationsspezifisch an projekt- und unternehmensspezifische Randbedingungen ausgeprägt werden kann. Die Systematik wird an einem Industriebeispiel beschrieben, für das ein modulares und erweiterbares Prüfmittel konzipiert wird.

Summary

Inspection of product quality is an essential part of producing mechatronic systems. These systems are often structured in a modular way. In general the inspection equipment used for the production of mechatronic systems is also a (modular) mechatronic system. This inspection equipment is often designed, developed and manufactured for this purpose necessitating considerable time resources. The classical approach for the product planning of mainly (mechanic) components takes place in a very late phase of the product creation process. The choice of inspection equipment, or if necessary the inspection equipment development, belongs to the inspection planning. The inspection system, as an essential part of the production system, is not developed integratively to the product.

The presented systematic – for integrative development of mechatronic products and its inspection equipment – is created to support experts to plan and realize the development of mechatronic products, their product systems and especially the included inspection equipment. Therefore, the principle solution of mechatronic systems creates the basis – often used in the sense of Model-Based Systems Engineering (MBSE). The systematic includes a generic integrative development process supported by a system model and different aids, for example the Morphological Box and the – for this purpose adapted – method CONSENS. Furthermore, it is explained how to adapt the generic process to the project and company specific boundary conditions in a specific way. An industrial example is used to describe the systematic. A modular and expandable inspection equipment is created for this industrial example.

Inhaltsverzeichnis

Seite

1 Einleitung.....	1
1.1 Problematik.....	1
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Vorgehensweise	5
2 Problemanalyse.....	7
2.1 Begriffsbestimmungen	7
2.1.1 Mechatronische Systeme	7
2.1.2 Systematik	10
2.1.3 Prüfungsbezogene Begriffe	11
2.2 Der Produktentstehungsprozess	14
2.3 Entwicklung mechatronischer Systeme und deren Produktionssysteme	20
2.3.1 Die Struktur des Entwicklungsprozesses.....	20
2.3.2 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme – VDI-Richtlinie 2206.....	22
2.3.3 Modellbasierte Entwicklung	28
2.3.3.1 Systems Engineering.....	29
2.3.3.2 Model-Based Systems Engineering (MBSE)	30
2.3.3.3 Spezifikationstechnik CONSENS	31
2.3.4 Fazit und Einordnung	40
2.4 Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung	42
2.4.1 Konventionelle Prüfplanung.....	42
2.4.2 Planung der Prüfungen von elektronischen Baugruppen	49
2.4.3 Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung für mechatronische Produkte im Kontext integrativer Entwicklungen.....	53
2.4.4 Rechnerunterstützte Planungstätigkeiten und wissensbasierte Werkzeuge	57
2.4.5 Fazit und Einordnung	57
2.5 Problemabgrenzung	59
2.6 Anforderungen.....	62

3 Stand der Technik	65
3.1 Planungsansätze für Prüfungen und Prüfmittel	65
3.1.1 Modulare Prüfplanung nach BERNARDS	65
3.1.2 Prüfplanung – Ein Prozessmanagement für Fahrzeugprüfungen nach FORCHERT	67
3.1.3 Prüfplattform für mechatronisch ausgestattete Fahrzeuge in Entwicklung und Produktion nach SCHENK.....	69
3.1.4 Offenes, integratives Rahmenwerk für die Qualitätsprüfung variantenreicher Serienprodukte nach SCHMITZ.....	70
3.1.5 Prüfsystementwicklung mittels Fahrzeugreferenzmodell nach GROHMANN	72
3.1.6 Leitfaden zur Gestaltung einer ganzheitlichen Prüfplanung	72
3.1.7 Kontinuierliche Prüfplanung.....	74
3.1.8 Modulares Konzept zur produktübergreifenden Prüfplanung	75
3.1.9 Prüfplanung mittels Entscheidungstheorie	76
3.1.10 Qualitätsmanagement in der Elektroindustrie – Konzept für die integrierte Prüfplanung in der modernen Elektronikproduktion nach BALTERS	77
3.1.11 Prüfverfahren für die Serienfertigung feldbusfähiger Automatisierungskomponenten nach HERTWECK.....	79
3.1.12 Methodik zur Integration der Prüfplanung in die Qualitätsplanung nach TUETE KWAM	80
3.1.13 Modell für ein integriertes Qualitäts- und Prüfplanungssystem in der Montage nach KRING	81
3.2 Integrative Entwicklung.....	82
3.2.1 Integrierte Gestaltung automatisierter Prüfmittel nach REITER...	82
3.2.2 Simultaneous Engineering.....	85
3.2.3 Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung nach EVERSHEIM/SCHUH	86
3.2.4 IPE-Methodik.....	89
3.3 Bewertung und Handlungsbedarf	91

4 Entwicklungssystematik.....	95
4.1 Einführung in die Entwicklungssystematik.....	95
4.1.1 Bestandteile der Systematik	95
4.1.2 Gemeinsame Spezifikation von Produkt, Produktionssystem und Prüfmittel	99
4.1.3 Beziehungen im Referenzprozess	100
4.1.4 Überblick über den generischen Referenzprozess	104
4.2 Beschreibung des generischen Referenzprozesses unter Zuhilfenahme des Systemmodells und dedizierter Hilfsmittel.....	112
4.2.1 Überblick über den ersten Durchlauf des Referenzprozesses.	112
4.2.2 Produktentwicklung – erster Durchlauf	114
4.2.2.1 Beschreibung des groben Vorgehens	114
4.2.2.2 Produktschnittstellen	116
4.2.3 Hauptprozess der Produktionssystementwicklung – erster Durchlauf	121
4.2.4 Vorgehen der Prüfplanung – erster Durchlauf	123
4.2.4.1 Gesamtüberblick über die Prüfplanung	124
4.2.4.2 Unterstützung der Produkt- und Produktionssystementwicklung.....	128
4.2.4.3 Identifikation von Informationsquellen	129
4.2.4.4 Ermittlung potentieller Prüfmerkmale.....	130
4.2.4.5 Ermittlung von NPB Anforderungen für Prüfmittel ...	133
4.2.4.6 Prüfplanung (insbesondere Prüfmerkmalsauswahl)	135
4.2.4.7 Unterstützung der Prüfmittelentwicklung	141
4.2.5 Prüfmittelentwicklung – erster Durchlauf	141
4.2.5.1 Unterstützung der Produkt- und Produktionssystementwicklung.....	141
4.2.5.2 Anforderungsanalyse und Konzipierung der Prüfmittel	142
4.2.6 Zweiter Durchlauf des Referenzprozesses	149
4.2.7 Dritter Teilprozess des Referenzprozesses	153
4.2.8 Vierter Teilprozess des Referenzprozesses	158
4.3 Projekt- und unternehmensspezifische Anpassungsmöglichkeiten des integrativen Entwicklungsprozesses	164

5 Anwendung der Entwicklungssystematik.....	171
5.1 Ausgangssituation des Unternehmens und Einführung in das Anwendungsbeispiel.....	171
5.1.1 Ausgangssituation des Unternehmens	171
5.1.2 Einführung in das Anwendungsbeispiel.....	173
5.2 Ableitung des projekt- und unternehmensspezifischen Entwicklungsprozesses	175
5.3 Anwendung des projekt- und unternehmensspezifischen integrativen Entwicklungsprozesses	179
5.3.1 Produktentwicklung	179
5.3.1.1 Anforderungsanalyse.....	179
5.3.1.2 Konzipierung auf System- und Modulebene.....	183
5.3.1.3 Domänenspezifische Planung	187
5.3.2 Hauptprozess der Produktionssystementwicklung	188
5.3.3 Prüfplanung	188
5.3.3.1 Identifikation von Informationsquellen	188
5.3.3.2 Ermittlung potentieller Prüfmerkmale.....	189
5.3.3.3 Ermittlung von NPB Anforderungen.....	191
5.3.3.4 Prüfplanung (insbesondere Prüfmerkmalauswahl) ..	193
5.3.4 Prüfmittelentwicklung.....	196
5.3.4.1 Umfeldanalyse.....	196
5.3.4.2 Anwendungsszenarien	198
5.3.4.3 Anforderungsliste erstellen	199
5.3.4.4 Aufstellen der Funktionshierarchie	201
5.3.4.5 Erstellung des Morphologischen Kastens.....	211
5.3.4.6 Wirkstruktur	215
5.3.4.7 Erstellen der Grobgestalt.....	217
5.3.4.8 Verhaltensbeschreibung.....	219
5.3.4.9 Ableiten von Anforderungen an andere Funktionsbereiche	220
5.3.4.10 Zusammenfassung des Prüfmittelkonzeptes	224
5.4 Abgleich der Entwicklungssystematik mit den Anforderungen	226
6 Zusammenfassung und Ausblick	229
7 Abkürzungsverzeichnis	235
8 Literaturverzeichnis	239

Anhang

A1	Beziehungen im Entwicklungsprozess.....	1
A1.1	Einfluss auf die Prüfplanung	2
A1.2	Einfluss der Prüfplanung auf die Funktionsbereiche	7
A1.3	Einfluss der Prüfplanung, Produkt- und Produktionssystementwicklung auf die Prüfmittelentwicklung	9
A1.4	Einfluss der Prüfmittelentwicklung auf die Entwicklungsbereiche	14
A2	Angepasste Prozess-FMEA zur Festlegung von Prüfmerkmalen....	18
A3	Alternative Verzahnung der V-Modelle von Produkt und Prüfmittel	20
A4	Ergänzende Informationen zum Anwendungsbeispiel.....	22
A5	Grundprinzip des Gesamtvorgehens in abstrahierter und komprimierter Form.....	25

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen von Forschungstätigkeiten am Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM. Grundlage dafür waren mehrere Industrie- und Forschungsprojekte, sowie der intensive Austausch mit Firmen, die Prüfmittel planen, herstellen und intensiv einsetzen. Ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt des Fraunhofer-Instituts für Entwurfstechnik Mechatronik ist die integrative Produkt- und Produktionssystementwicklung mithilfe von Model-Based Systems Engineering (MBSE) – mit Fokus auf die frühen Entwicklungsphasen. Diese Arbeit liefert einen Beitrag dazu. Sie beschreibt eine *Systematik zur integrativen Entwicklung von mechatronischen Produkten und deren Prüfmittel*.

1.1 Problematik

Moderne technische Erzeugnisse sind zunehmend mechatronische Systeme. Diese sind oftmals modular aufgebaut und zeichnen sich durch das enge Zusammenwirken von Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungstechnik und Informationstechnik aus [VDI2206]. Der interdisziplinären Zusammenarbeit bei der Entwicklung – und insbesondere bei der Konzipierung – kommt daher eine immer größere Bedeutung bei [VDI2206]. Der globale Wettbewerb ist dabei geprägt durch hohe Innovationsgeschwindigkeit, verkürzte Produktlebenszyklen und steigende Kundenerwartungen an Leistung, Qualität und Preis zukünftiger Produkte [VDI2206]. Die zunehmende Individualisierung der Produkte führt dabei zu zunehmender Variantenvielfalt und steigender Komplexität bei kürzeren Entwicklungszyklen [GLR+00], [GKK16, S. 111ff.]. Die zunehmende Komplexität wird dabei oft durch ein immer größeres Maß an Funktionen dargestellt.

In der Produktion mechatronischer Systeme stellen Prüfungen der Produktqualität einen wesentlichen Bestandteil dar. Insbesondere der Prüfung der Qualität am Fertigungsende kommt eine besondere Bedeutung bei High-End-Produkten bei. Die dazu notwendigen Prüfmittel werden oftmals für die Prüfung eines Produktes bzw. einer Produktgruppe speziell entwickelt und gebaut. Ein Prüfmittel hat dabei eine eigene Prüfmittelentstehungszeit. Dieses kann hier als ein Produkt mit einer eigenen Produktentstehung angesehen werden. Es müssen also zwei Entwicklungsprozesse miteinander verzahnt werden. Diese Verzahnung der Entwicklungsprozesse und deren Ablauf ist dabei abhängig von den situationsspezifischen Gegebenheiten vom Projekt und denen des Unternehmens. Diese Prüfmittel sind meist selbst wieder aufwändige mechatronische Systeme. Dadurch, dass das Prüfmittel zahlreiche Eigenschaften des Produktes überprüft, existieren zwischen Produkt und Prüfmittel zahlreiche Wechselwirkungen. Vor dem Hintergrund der immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen und des Simultaneous Engineering muss auch das System zur Prüfung der Produktqualität in der Fertigung – das oder die Prüfmittel – frühzeitig geplant und entwickelt werden, damit es zum Produkti-

onsstart (Start of Production – SOP) bereit steht. Zudem folgt aus der steigenden Komplexität und Variantenvielfalt der Produkte, dass auch die Prüfmittel für mechatronische Systeme immer komplexer werden. Dabei werden oftmals mehrere Prüfmittel bei der Fertigung eines Produktes benötigt, um Zwischenprüfungen – z. B. einzelner fertiggestellter Module – zu ermöglichen. Die zu prüfenden Merkmale müssen den damit entstehenden Prüfzeitpunkten, und damit den unterschiedlichen Prüfmitteln, zugewiesen werden. Moderne und insbesondere automatisierte Prüfmittel übernehmen heute Zusatzfunktionen wie z. B. Justier- und Kalibrierfunktionen, die Speicherung von Messwerten, das Aufspielen von Software oder die Erfassung und Zuordnung von Seriennummern.

Es kann beobachtet werden, dass die Prüfmittel bei vielen Unternehmen eine zunehmend strategische Bedeutung bekommen. Die Gründe dafür sind vielfältig. Das Prüfmittel kann einen großen Einfluss auf die ausgelieferte Qualität nehmen. Es stellt zudem sicher, dass in großer Stückzahl kostenoptimal geprüft werden kann. Eine weltweit verteilte Produktion, die ggf. auch durch Partner durchgeführt wird, kann durch gut geplante Prüfmittel überwacht werden. Dies gilt insbesondere, wenn die vom Prüfmittel erhobenen Daten automatisiert abgespeichert und ausgewertet werden können. Das Prüfmittel muss dabei alle zu prüfenden Produktvarianten berücksichtigen. Änderungen am Prüfmittel, verursacht durch neue Produktvarianten (z. B. kundenspezifische Variante) oder zusätzlich zu überwachende Prüfmerkmale, müssen schnell umgesetzt werden. Viele Unternehmen verfügen daher über einen eigenen Prüfmittelbau oder eine Funktionseinheit im Unternehmen, die zumindest Änderungen bzw. Erweiterungen an den vorhandenen Prüfmitteln selbst vornehmen kann, um somit selbst direkten Zugriff und Einfluss auf dieses wichtige Betriebsmittel zu haben.

Das mechatronische Produkt stellt in Form von Prüfmerkmalen Anforderungen an das Prüfmittel. Ebenfalls stellt im weitesten Sinne das Umfeld des Prüfmittels Anforderungen an das Prüfmittel, welches Teil des Produktionssystems ist. Demgegenüber stellt auch das Prüfmittel seinerseits Anforderungen an das Produkt. Daher sollte das Prüfmittel, welches Bestandteil des Produktionssystems ist, integrativ zum Produkt entwickelt werden. Anforderungen können so frühzeitig vom Prüfmittel an das Produkt gestellt werden und somit in die Produktentwicklung mit einfließen. Aufwändige Entwicklungsschleifen können so vermieden werden.

Weiterhin muss ein Prüfmittel, als Teil des Produktionssystems, auf die zu fertigende Stückzahl pro Zeiteinheit ausgelegt sein (z. B. Stückzahl pro Monat). Dieser Durchsatz ergibt sich im Wesentlichen aus den antizipierten Vertriebszahlen. Typischerweise steigen diese nach dem Beginn der Serienfertigung über eine gewisse Zeitdauer an. Es wird ein sogenannter „Ramp-up“ durchlaufen. Um anfangs nicht zu viel Kapital zu binden, kann es wünschenswert sein, das Prüfmittel mit den Vertriebs- bzw. Produktionszahlen mitwachsen zu lassen. Falls die antizipierten Vertriebszahlen – die oftmals auf unsicheren Schätzungen beruhen – nicht erreicht werden, kann somit eine unnötige Bindung von Kapital in Form eines teuren Prüfmittels verhindert werden. Oftmals muss das Prüfmittel also so konzipiert sein, dass es mit steigendem Durchsatz mitwächst und so-

mit selbst eine Art Modularität im Sinne der Erweiterbarkeit aufweist. Zudem kann es vorkommen, dass es verschiedene Varianten eines Prüfmittels geben soll – abhängig von der zu prüfenden Produktvariante. Dies kann z. B. der Fall sein, wenn an unterschiedlichen Produktionsstandorten (in verschiedenen Ländern) produziert und geprüft werden soll. Abhängig vom Standort können dort jeweils nur bestimmte Produktvarianten produziert und somit geprüft werden. Weiterhin können weitere Varianten des Prüfmittels notwendig sein – bspw. verursacht durch die verschiedenen Standorte. Die weiteren Varianten können dabei z. B. durch andere zur Verfügung stehende Versorgungsspannungen erforderlich werden. Gegebenenfalls in Zukunft angedachte und somit zu prüfende Produktvarianten, müssen ggf. bei der Konzipierung des Prüfmittels ebenfalls mit berücksichtigt werden. Das Prüfmittel muss also selbst eine Art Modularität aufweisen.

Modulare mechatronische Produkte sind also Chance und Komplexitätstreiber gleichermaßen. Ein Lösungsansatz für die beschriebene Problematik liegt in der integrativen Entwicklung von Produkt und Prüfmittel. Die Prüfmittelentwicklung ist dabei Teil der Produktionssystementwicklung. Die Problematik ist somit ein Spezialfall der integrativen Produkt- und Produktionssystementwicklung (vgl. auch [GDK+11] und [Nor12]). Ein geeigneter Startpunkt für die frühzeitige und integrative Entwicklung ist die Konzipierung des Produktes (vgl. auch [Nor12]). In der Produktkonzipierung werden der grundsätzliche Aufbau und die Funktionen des Produktes festgelegt (vgl. [Nor12]). Zur Konzipierung und Entwicklung mechatronischer Systeme wird ein disziplinübergreifender, modellbasierter Ansatz propagiert, um die Komplexität beherrschbar zu machen [Alt12], [GDS+13]. Dies kommt mit dem Ausdruck Model-Based Systems Engineering (MBSE) zum Ausdruck. Da das Prüfmittel selbst ein komplexes mechatronisches System ist, erscheint die Nutzung der gleichen Modelle für die Konzipierung des Prüfmittels, wie für das Produkt und das weitere Produktionssystem, sinnvoll. Alle beteiligten Akteure müssen bei dieser Aufgabe mit einbezogen werden. Es liegt daher nahe sich an etablierten Methoden und Vorgehensweisen zu orientieren, diese anzupassen und zu erweitern, so dass sie für die vorliegende Problematik genutzt werden können.

Klassischerweise werden die Tätigkeiten zur Prüfplanung erst nach der Produktentwicklung begonnen (vgl. Bild 2-19). Dies widerspricht dem integrativen Gedanken. Bei der Entwicklung elektronischer Baugruppen wird die Prüfplanung bereits frühzeitig mit einbezogen. Es existieren zwar Gedanken, dass parallel zur Produktentwicklung mechatronischer Systeme die Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung beginnen und abgestimmt werden soll, wie dies geschehen kann ist jedoch weitestgehend unbekannt. Es ist insbesondere unbekannt, wie ein frühzeitiger Übergang von der Produktkonzipierung zur Prüfmittelkonzipierung geschehen kann und wie sich dies in einen gesamten Entwicklungsprozess einordnen lässt.

1.2 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist eine *Systematik zur integrativen Entwicklung von mechatronischen Produkten und deren Prüfmittel*. Sie soll Entwickler¹, Planer und Fachleute unterstützen, die Entwicklung von mechatronischen High-End-Produkten, deren Produktionssystem und insbesondere der damit verbundenen Prüfmittelentwicklung zu planen und durchzuführen. Die Darstellung der Gesamtzusammenhänge ist dafür notwendig. Die wesentlichen Ein- und Ausgangsinformationen der einzelnen Schritte werden dazu beschrieben. In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt dabei auf den frühen Phasen der integrativen Produkt- und Prüfmittelentwicklung auf Basis der Prinzipiellösung mechatronischer Produkte und dem Zusammenspiel der beteiligten Funktionsbereiche. Dabei werden die ggf. vorhandene modulare Produktstruktur und ein ggf. modular zu strukturierendes Prüfmittel mit einbezogen. Es werden dabei zwei übergeordnete Ziele verfolgt. Erstens soll eine möglichst gute Abstimmung zwischen Produktentwicklung und Prüfmittelentwicklung stattfinden. Dazu muss insbesondere die Möglichkeit geschaffen werden, Anforderungen seitens des Prüfmittels möglichst frühzeitig in die Produktentwicklung einzuspielen, um so aufwändige Entwicklungsschleifen zu verhindern. Zweitens soll das zu entwickelnde Prüfmittel möglichst zu Produktionsstart (Start of Production) bereitstehen.

Die Basis der Entwicklungssystematik bildet ein generischer Entwicklungsprozess. Dieser Leitfaden kann an die projekt- und unternehmensspezifische Situation angepasst werden. Die Systematik ist somit selbst modular und damit skalierbar. Es wird die Planung der integrativen Entwicklung unterstützt. Der so entstehende spezifische Entwicklungsprozess bildet dann den organisatorischen Rahmen des gesamten Entwicklungsgeschehens. Dem Gedanken des Model-Based Systems Engineering (MBSE) folgend, wird modellbasiert gearbeitet. Diese Arbeitsweise wird durch weitere Hilfsmittel wie Methoden und spezifische Vorgehensweisen unterstützt. Der Fokus der Anwendung der Entwicklungssystematik liegt auf mechatronischen High-End-Produkten.

¹ Die Inhalte der vorliegenden Arbeit beziehen sich in gleichem Maße sowohl auf Frauen als auf Männer. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird jedoch die männliche Form (Entwickler, Konstrukteur etc.) für alle Personenbezeichnungen gewählt. Die weibliche Form wird dabei stets mitgedacht. Eine Ausnahme bilden Inhalte, die ausdrücklich auf Frauen bezogen werden.

1.3 Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel.

In **Kapitel 2** wird auf die in Kapitel 1.1 beschriebene Problematik detaillierter eingegangen. Es werden zunächst die wesentlichen Begriffe für diese Arbeit beschrieben. Anschließend wird die Prüfplanung, Prüfmittelauswahl und Prüfmittelentwicklung in den Produktentstehungsprozess eingeordnet. Weiterhin wird die Entwicklung mechatronischer Systeme und deren Produktionssysteme erläutert, wobei der Fokus auf dem Gesamtvorgehen und den darin enthaltenen frühen Entwicklungsphasen liegt. Die Prüfplanung mit ihren Aufgaben wird dargestellt. Aus den diskutierten Punkten und Zusammenhängen werden Anforderungen abgeleitet und zusammenfassend dargestellt.

In **Kapitel 3** wird der Stand der Technik in Hinblick auf die Anforderungen an die Systematik diskutiert. Zunächst werden Planungsansätze für Prüfungen und Prüfmittel dargestellt. Weiterhin wird auf integrative Entwicklung für Mechatronik eingegangen. Die bestehenden Ansätze werden bewertet und der Handlungsbedarf abgeleitet.

Kapitel 4 beschreibt die Entwicklungssystematik. Zunächst werden die Bestandteile der Systematik sowie die gemeinsame Spezifikation von Produkt, Produktionssystem und Prüfmittel beschrieben. Anschließend wird ein Überblick über die Beziehungen im Referenzprozess und den Referenzprozess selbst gegeben, der das Gesamtvorgehen der Systematik darstellt. Danach wird auf die vier Teilprozesse des Referenzprozesses detailliert eingegangen. Abschließend wird erläutert, wie der Referenzprozess als Prozessbausteinkasten interpretiert werden kann, um aus diesem, abhängig von projekt- und unternehmensspezifischen Randbedingungen, einen passgenauen Prozess abzuleiten. Dazu werden Randbedingungen, mögliche Handlungsoptionen und Stellschrauben aufgezeigt.

In **Kapitel 5** wird die entwickelte Systematik anhand eines Anwendungsbeispiels veranschaulicht. Dazu wird zunächst die Ausgangssituation des Unternehmens und das Anwendungsbeispiel selbst beschrieben. Es wird gezeigt, wie ein projekt- und unternehmensspezifischer Entwicklungsprozess abgeleitet wird. Anhand dieses Entwicklungsprozesses wird die Systematik durchlaufen. Dabei werden insbesondere Ausschnitte der wesentlichen Entwicklungsdokumente bzw. Modelle dargestellt, so dass ein praxisnaher Eindruck vermittelt wird.

Kapitel 6 fasst die wesentlichen Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Forschungsthemen.

Im **Anhang** sind ergänzende Informationen zur entstandenen Arbeit dargestellt.

2 Problemanalyse

In diesem Kapitel wird die in Kapitel 1.1 aufgezeigte Problematik detaillierter betrachtet. Ziel der Problemanalyse ist die Identifikation von Anforderungen an die *Systematik zur integrativen Entwicklung von mechatronischen Produkten und deren Prüfmittel*. Dazu werden zunächst in Kapitel 2.1 die zum Verständnis wesentlichen Begriffe erläutert und für diese Arbeit festgelegt. In Kapitel 2.2 wird der Produktentstehungsprozess beschrieben und die Prüfplanung, Prüfmittelauswahl und Prüfmittelentwicklung in diesen eingeordnet. In Kapitel 2.3 wird die Entwicklung mechatronischer Systeme und deren Produktionssysteme beschrieben. Der Fokus liegt dabei auf dem Gesamtverfahren bei der integrativen Entwicklung und den frühen Phasen der Konzipierung der mechatronischen Systeme. In Kapitel 2.4 wird auf die Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung eingegangen. In Kapitel 2.5 erfolgt eine Problemabgrenzung und in Kapitel 2.6 werden die Anforderungen an die Systematik zusammenfassend dargestellt.

2.1 Begriffsbestimmungen

Die wesentlichen für diese Arbeit relevanten Begriffe werden im Folgenden kurz erläutert. Damit soll ein einheitliches Verständnis erzeugt werden.

2.1.1 Mechatronische Systeme

Erfolgversprechende Produktinnovationen des modernen Maschinenbaus und verwandter Branchen beruhen zunehmend auf dem engen Zusammenwirken von Mechanik, Elektrik/Elektronik und Softwaretechnik, wobei der Begriff Mechatronik dies zum Ausdruck bringt [GLL12, S. 13], [GRS+11, S. 7]. Ein mechatronisches System ist dabei ein Beispiel für ein technisches Erzeugnis, welches Funktionen zur Verfügung stellt [GRS+11, S. 7]. Die VDI-Richtlinie 2206 definiert den Begriff Mechatronik wie folgt:

„Mechatronik bezeichnet das synergetische Zusammenwirken der Fachdisziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik beim Entwurf und der Herstellung industrieller Erzeugnisse sowie der Prozessgestaltung“ [VDI2206, S. 14].

Bild 2-1 bringt das Zusammenwirken der verschiedenen Fachdisziplinen zum Ausdruck.

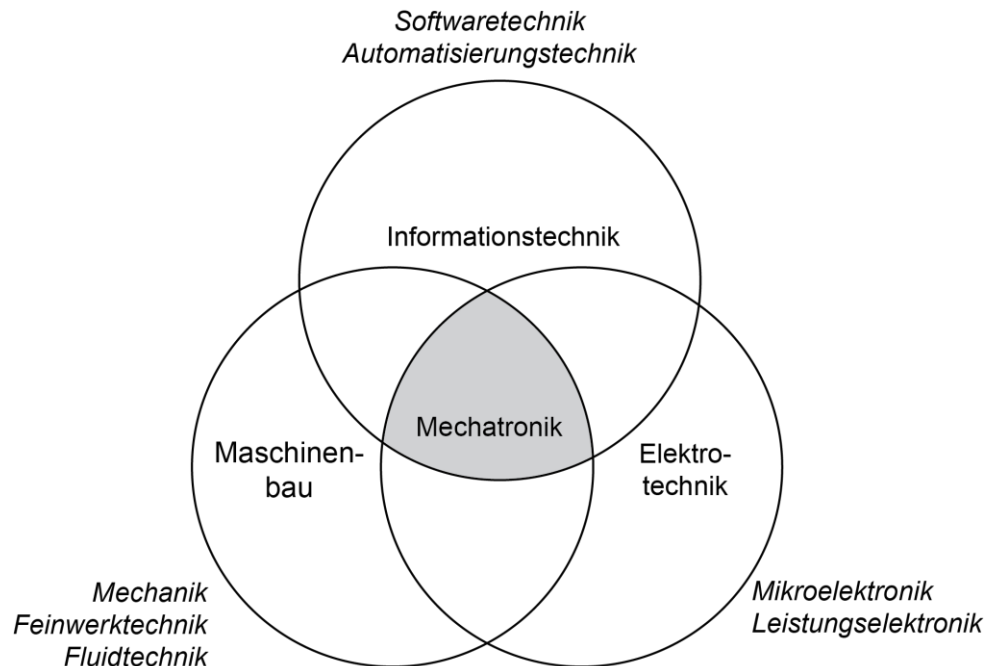


Bild 2-1: Mechatronik – Synergie aus dem Zusammenwirken verschiedener Disziplinen nach [VDI2206, S. 10] und [Ise99]

Die Grundstruktur eines mechatronischen Systems ist in Bild 2-2 dargestellt.

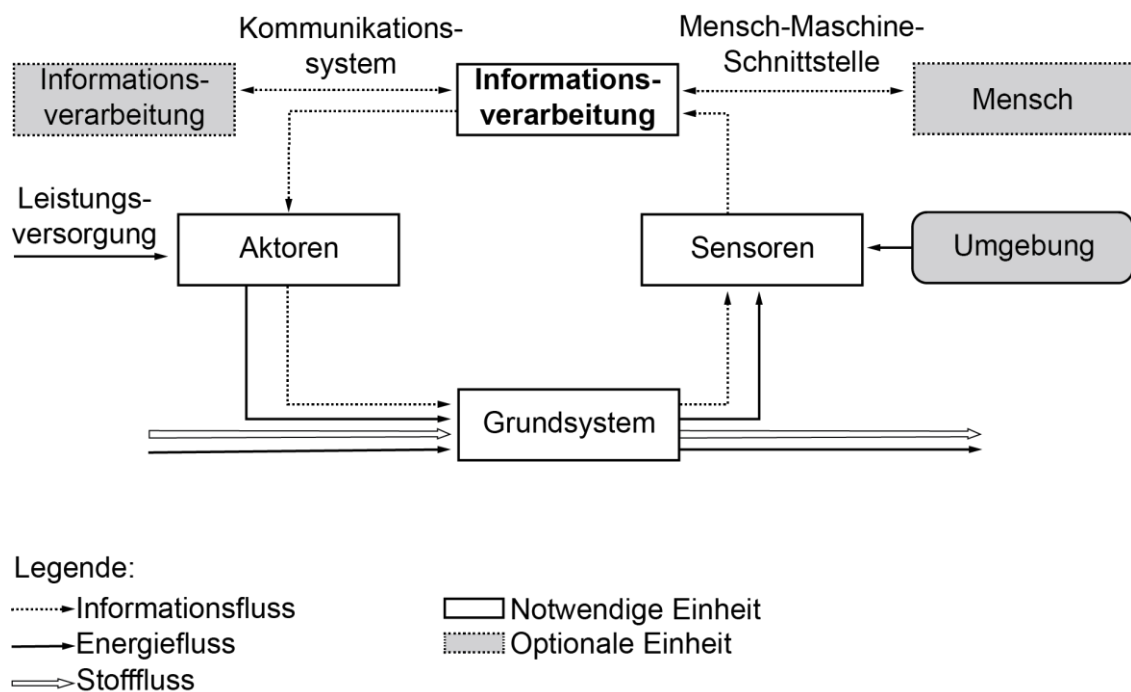


Bild 2-2: Grundstruktur eines mechatronischen Systems [VDI2206, S. 14]

Die Grundstruktur besteht dabei aus einem Grundsystem, Sensoren, Aktoren und der Informationsverarbeitung. Das Grundsystem ist allgemein ein beliebiges physikalisches

System. Beispiele dafür sind: mechanische, elektromagnetische, hydraulische und pneumatische Strukturen bzw. eine Kombination dieser. Die Sensoren erfassen ausgewählte Zustandsgrößen des Grundsystems und liefern somit die Eingangsgrößen der Informationsverarbeitung. Daraufhin bestimmt die Informationsverarbeitung die notwendigen Einwirkungen, um die Zustandsgrößen des Grundsystems in gewünschter Weise zu beeinflussen. Die Umsetzung der Einwirkungen erfolgt durch Aktoren am Grundsystem. [VDI2206, S.14ff.]

Die Beziehungen zwischen Grundsystem, Sensoren, Informationsverarbeitung und Aktoren sind mittels Flüssen dargestellt. Sie werden in der VDI2206 nach PAHL / BEITZ in die folgenden Flussarten unterschieden [PBF+07, S. 43]:

- **Stoffflüsse:** Beispiele für diese fließenden Stoffe sind feste Körper, Gase oder Flüssigkeiten.
- **Energieflüsse:** Beispiele hierfür sind mechanische, thermische, und elektrische Energie, aber auch Größen wie Kraft und Strom.
- **Informationsflüsse:** Beispiele für Informationen, die zwischen den Einheiten mechatronischer Systeme ausgetauscht werden, sind Messgrößen, Steuerimpulse oder Daten.

Komplexe mechatronische Systeme bestehen aus der synergetischen Integration verschiedener mechatronischer Module. Module werden dabei als Systemelemente oder Bauteile, die zu einer Gruppe zusammengefasst werden und gemeinsam eine bestimmte Funktion erfüllen, angesehen. [VDI2206]

Nach GAUSEMEIER können mechatronische Systeme in drei Klassen eingeteilt werden (Bild 2-3).

Charakteristisch für die erste Klasse, **Räumliche Integration von Mechanik und Elektronik**, ist die hohe Integration mechanischer und elektronischer Funktionsträger auf kleinem Bauraum. Die wesentlichen Erfolgspotentiale werden in der Miniaturisierung, Funktionsintegration, der höheren Zuverlässigkeit und den geringeren Herstellkosten gesehen. Ein Beispiel für ein solches System ist der Aufbau eines Schaltungsträgers mithilfe von MID (Molded Interconnect Devices). Die Systeme dieser Klasse, die auch als integrierte mechatronische Systeme bezeichnet werden, sind oftmals die Grundlage von Systemen der zweiten Klasse. Integrierte Sensoren sind hierfür ein Beispiel [Fel09] zitiert in [GGJ+13, S. 236]. [GGJ+13, S. 236ff.], [GTS14, S. 26]

Bei der zweiten Klasse, **Mehrkörpersysteme mit kontrolliertem Bewegungsverhalten**, wird das Systemverhalten insbesondere durch die Regelungstechnik verbessert. Es wird dabei das Gesamtsystem optimiert, indem sowohl das mechanische Grundsystem als auch die Informationsverarbeitung auf die erforderliche Bewegungsdynamik abgestimmt werden. [GGJ+13, S. 236ff.], [GTS14, S. 26]



Bild 2-3: Klassen mechatronischer Systeme [GGJ+13, S. 236], [GTS14, S. 26]

Die dritte Klasse stellen **intelligente, vernetzte Systeme** dar. Diese besitzen eine inhärente Teilintelligenz und sind somit in der Lage sich ihrer Umgebung und den Wünschen ihrer Anwender im Betrieb anzupassen. Charakteristisch ist darüber hinaus eine hohe informationstechnische Vernetzung untereinander als auch innerhalb der Systeme zu Subsystemen. Schlüsselwörter wie Selbstoptimierung, Cyber-Physical Systems und Industrie 4.0 repräsentieren faszinierende Perspektiven dieser intelligenten Mechatronik. [GGJ+13, S.236ff.], [GTS14, S. 26]

Alle drei Klassen weisen dabei die Grundstruktur nach VDI2206 (vgl. Bild 2-2) auf [GTS14, S. 27].

In der Praxis bestehen mechatronische Systeme häufig aus einer Kombination der ersten beiden Klassen [Nor12]. Die intelligenten, vernetzten Systeme bestehen allgemein aus mehreren (Sub-)Systemen. Ein mechatronisches Gesamtsystem kann also aus der Kombination aller drei Klassen bestehen. Da ein mechatronisches System sich aus den verschiedenen Klassen mechatronischer Systeme zusammensetzen kann, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht zwischen den verschiedenen Klassen unterschieden. Lediglich die Unterteilung in Module bzw. Subsysteme ist von Bedeutung, da diese ggf. einzeln geprüft werden sollen. Die Systematik soll für alle drei Klassen mechatronischer Systeme einsetzbar sein.

2.1.2 Systematik

Im DUDEN wird eine **Systematik** allgemein definiert als die „*planmäßige Darstellung; einheitliche Gestaltung nach bestimmten Ordnungsprinzipien*“. In der Zoologie und Botanik wird unter Systematik die Einordnung aller Lebewesen in ein System verstanden. [Dud15a]

Ausgehend von der Definition einer Konstruktionssystematik leitet DUMITRESCU eine Definition für eine Entwicklungssystematik ab:

„Eine Entwicklungssystematik [ist] ein universelles Rahmenwerk, das ein Vorgehensmodell sowie dedizierte Hilfsmittel zur erfolgreichen Umsetzung der Entwicklung technischer Systeme bereitstellt. Sie ermöglicht weder ein automatisiertes Entwickeln noch ist sie ein Ersatz für die kreative Leistung des Anwenders. Das Vorgehensmodell strukturiert den Entwicklungsprozess nach aufgabenspezifischen Gesichtspunkten. Hilfsmittel können bspw. Methoden, Richtlinien, Spezifikationstechniken / Modellierungssprachen, Konstruktionsprinzipien, Entwurfsmuster oder Werkzeuge sein.“ [Dum11, S. 6]

Die Definition nach DUMITRESCU wird in der vorliegenden Arbeit verwendet. Die zu erstellende Entwicklungssystematik umfasst ein Vorgehensmodell in Form eines generischen Entwicklungsprozesses und spezifische Vorgehen an den Stellen, an denen ein detaillierteres Vorgehen entscheidend ist. Der generische Entwicklungsprozess kann anhand von Randbedingungen spezifisch angepasst werden. Weiterhin umfasst die Entwicklungssystematik dedizierte Hilfsmittel zur Produktkonzipierung und Produktionssystemkonzipierung sowie zur Konzipierung von Prüfmitteln und der zugehörigen Prüfplanung. Bei den Hilfsmitteln sollen überwiegend vorhandene Hilfsmittel genutzt werden, welche in das Vorgehen zu integrieren sind. Sind die vorhandenen Hilfsmittel in ihrer ursprünglichen Form nicht geeignet, sind diese entsprechend zu adaptieren oder neue Hilfsmittel zu entwickeln.

2.1.3 Prüfungsbezogene Begriffe

Nachfolgend werden die wesentlichen prüfbezogenen Begriffe kurz erläutert bzw. ihre Definitionen dargestellt. Das Thema **Prüfen** wird in Kapitel 2.4 weiter vertieft.

Die **Prüfplanung** ist definiert als die Planung von Prüfungen und bezieht sich im Qualitätsmanagement üblicherweise auf Qualitätsprüfungen [DIN55350-11, S. 7], [VDI2619, S. 3], [DGQ93, S. 100]. Aufgabe der Prüfplanung ist die Planung der Qualitätsprüfung im gesamten Produktionsablauf vom Wareneingang bis zur Auslieferung [VDI2619, S. 2]. Ein wesentliches Ergebnis der Prüfplanung ist der Prüfplan [VDI2619, S. 2], [DGQ93, S. 100]. Die Prüfplanung ist dabei, wie auch das Prüfmittelmanagement, Bestandteil der Qualitätssicherung [SP15, S. 195], [SP10, S. 564]. In der klassischen Prüfplanung werden unter dem Begriff Prüfplanung definierte Aufgaben bzw. Tätigkeiten verstanden (vgl. Kapitel 2.4.1).

Eine **Prüfung** stellt fest, inwieweit ein Prüfobjekt eine Forderung erfüllt [DIN1319-1, S. 6.] bzw. bestimmt die Konformität mit festgelegten Anforderungen [DIN9000, S. 56]. Vielfach wird dabei das quantitative Prüfergebnis „inwieweit“ in ein quantitatives Prüfergebnis „ob“ oder „ob nicht“ umgewandelt [DIN1319-1, S. 6].

Eine **Messung** dagegen ist nur eine Prüfung, wenn festgestellt wird, inwieweit bzw. ob der ermittelte Messwert eine Forderung erfüllt [DIN1319-1, S. 6].

Ein **Prüfobjekt** ist der Gegenstand der Prüfung [VDI5703, S. 4]. Es kann z. B. ein Medizinprodukt sein [VDI5703, S. 4], ein Probekörper, eine Probe oder auch ein Messgerät selbst [DIN1319-1, S. 6]. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird das Prüfobjekt auch als **Prüfling** bezeichnet. DUDEN schreibt dazu, dass der Begriff Prüfling in der Fachsprache für „auf seine Eignung, Qualität, Funktionstüchtigkeit u.Ä. zu prüfendes Produkt, (Werk)stück oder Bau(teil)“ gebraucht wird [Dud15b].

Im Rahmen dieser Arbeit wird der im allgemeinen Sprachgebrauch übliche Begriff *Prüfling* anstelle des Begriffs *Prüfobjekt* genutzt.

Der Begriff **Prüfen** ist nach [DIN9001] allgemein definiert als:

„Überwachen und Messen von Prozessen und Produkten anhand der Politiken, Ziele und Anforderungen an das Produkt sowie Berichten der Ergebnisse.“ [DIN9001]

Im Kontext der Qualitätsprüfungen definiert HERTWECK **Prüfen**:

„Prüfen bedeutet die Feststellung der Lage eines Prüfmerkmals und der anschließende Vergleich mit vorgegebenen Sollmerkmalen. Der Vorgang des Prüfens umfasst die drei Grundschriffe Stimulieren des Prüfobjekts, Qualitätsdatenerfassung und Auswertung. Normalerweise werden diese Tätigkeiten in einem Prüfschritt ausgeführt. Eine Prüfung endet mit einer Gut- oder Schlecht-Entscheidung (Go/NoGo), d. h. mit der Beurteilung der Lage des Prüfmerkmals bezüglich eines Toleranzintervalls.“² [Her97, S. 10]

Im Rahmen dieser Arbeit gilt die auf Qualitätsprüfungen ausgerichtete Definition nach HERTWECK. In der industriellen Praxis werden zur Kennzeichnung eines für gut befundenen bzw. für nicht gut befundenen Prüflings anstatt Go/NoGo oftmals andere Abkürzungen wie z. B. OK/NOK, IO/NIO oder 1/0 verwendet.

Der Begriff „**Prüfen**“ ist dabei in der industriellen Praxis im Bereich der Fertigung und fertigungsbegleitenden Qualitätssicherung weit verbreitet. Der aus dem angelsächsischen stammende Begriff „**Test**“ besitzt prinzipiell dieselbe Bedeutung. Er wird im Deutschen jedoch vorzugsweise im Umfeld der Entwicklung gebraucht. [Her97, S. 9f.] Das vor allem im angloamerikanischen Sprachraum benutzte Wort „Test“ wird in vielen Bedeutungen benutzt. Häufig wird es in Kombination mit „inspection“ benutzt. Vorkommende Bedeutungen sind dabei Erprobung, Funktionsprüfung, Typprüfung, spezielle Qualifikationsprüfung oder auch Qualitätsprüfung. [DGQ93, S. 99]

² WESTERMANN folgt inhaltlich weitgehend der Definition: „*Mechatronische Erzeugnisse prüfen heißt, ihre Funktion anregen, die Reaktion messen, mit Soll-Antwort vergleichen und anhand des Ergebnisses über die Güte entscheiden*“. [Wes91, S. 14]

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff „Prüfen“ im Kontext der Qualitätsprüfungen in der Fertigung gebraucht und der Begriff „Testen“ wird im Kontext der Entwicklung benutzt (Eigenschaftsabsicherung, Qualifizierung).

Ein **Prüfmerkmal**³ stellt dabei ein Merkmal dar, an Hand dessen die Qualitätsprüfung durchgeführt wird [VDI2619, S. 3], [DIN55350-12, S. 4], [DGQ93, S. 99].

Ein **Prüfmittel** ist definiert als ein Messmittel für Prüfungen, wobei ein Messmittel ein Messgerät, eine Messeinrichtung, ein Referenzmaterial, ein Normal oder Hilfsmittel sein kann, das bzw. die zur Ausführung von Messungen notwendig ist. Die Hilfsmittel können dabei auch begleitende Dokumente und Programme (Software) sein. [DIN 1319-2, S. 4]

In der (mittlerweile zurückgezogenen) VDI-Richtlinie 2815, Blatt 5, sind Mess- und Prüfmittel definiert als *„Mittel, die bei der Durchführung von Fertigungsaufgaben zum Prüfen von Maßhaltigkeit, Funktionen, Beschaffenheit und besonderer Eigenschaften dienen“* [VDI2815-5].

Der Begriff **Prüfstrategie** wird sehr unterschiedlich verwendet, oft im Kontext der Prüfung elektronischer Baugruppen. BERGER versteht unter einer Prüfstrategie (bzw. Teststrategie) im Kontext seines Buches lediglich die Kombination von mehreren Prüfverfahren, wobei eine komplette Prüfstrategie wesentlich weiter reicht und unter anderem die Regelschleifen/internen Prozesse zum Einfluss der Fehlerhäufigkeiten auf das Design eines Produktes oder Betrachtungen der Qualitätssicherung in der Entwicklungsphase einer Baugruppe umfasst [Ber12 S. 39f.]. WESTERMANN versteht unter dem Begriff der Prüfstrategie die geeignete Art und Abfolge der Prüfungen [Wes91, S. 6]. WEISS versteht darunter eine *s*-stufige Verfahrensabfolge von Prüfverfahren, wobei *s* die Anzahl der Stufen repräsentiert [Wei90]. VDI/VDE verstehen darunter die Festlegung kostenoptimaler Prüfstufen⁴, um das definierte Qualitätsziel sicherzustellen [VDI90, S. 24]. LINß versteht darunter *„den Ablauf der Prüfung wie zu prüfen ist“*, wobei er angibt, dass die Angabe einer Prüfstrategie nur dann erforderlich ist, wenn komplizierte Prüfungen und komplizierte oder neue Prüfmittel einzusetzen sind [Lin14, S. 530f.]. HERTWECK versteht darunter die Festlegung von Art, Umfang und Reihenfolge der in der Serienprüfung eingesetzten Prüfmethoden, mit dem Ziel die geforderte Produktqualität sicherzustellen. BERENS versteht darunter *„die Gesamtheit der Festlegungen hinsichtlich der Anzahl und Orte (Stellen) einzurichtender Prüfstellen und Prüfplätze sowie hinsichtlich der Anweisungen, nach denen dort zu prüfen ist“* [Ber80, S. 4]. In der VDI-Richtlinie 5703, *Systematische Entwicklung modellbasierter Prüfungen für Medizinprodukte*, wird eine Prüfstrategie definiert als die *„Festlegung von Art, Anzahl und Umfang der geplanten Prüfungen sowie deren zeitliche Abfolge, der durchführenden Stelle und gegebenenfalls der erforderlichen Ressourcen gemäß den Prüfzwecken“* [VDI5703].

³ Prüfmerkmale sind häufig Qualitätsmerkmale, müssen es aber nicht sein [DGQ93, S. 99].

⁴ BALTERS unterteilt in diesem Kontext in vier Prüfstufen: Komponentenprüfung (ICs, passive Elemente, Leiterplatten, etc.), Modulprüfungen, Baugruppenprüfung, Systemprüfung [Bal97, S. 26].

Beim Vergleich der Definitionen der Prüfstrategien mit den Aufgaben der Prüfplanung (vgl. 2.4.1) ist festzustellen, dass die Prüfstrategie meist als eine Teilmenge der Prüfplanung angesehen werden kann. Allen Definitionen gemein ist, dass die Prüfstrategie immer auf die Kombination der Prüfungen bzw. deren Abfolge abzielt. Dem Kontext von [ZVEI06] ist zu entnehmen, dass der ZENTRALVERBAND DER ELEKTROTECHNIK UND ELEKTROINDUSTRIE (ZVEI) zu der gleichen Schlussfolgerung gelangt. Im Rahmen dieser Arbeit wird es vermieden den Begriff *Prüfstrategie* zu nutzen. Wird er dennoch gebraucht, so wird zum Verständnis mit angegeben, was gemeint ist.

Weitere Definitionen bzw. Hinweise zum Begriff der Prüfstrategie trägt BALTERS zusammen und listet diese auf [Bal97, S. 50].

2.2 Der Produktentstehungsprozess

Die Produktentstehung bezeichnet den Abschnitt des Produktlebenszyklus von der Geschäftsidee bis zum Serienanlauf bzw. zum Markteintritt. Die Produktentstehung unterteilt sich dabei in die Phasen Strategische Produktplanung, Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung (Bild 2-4) [GLR+00, S. 3], [GW11, S. 14].

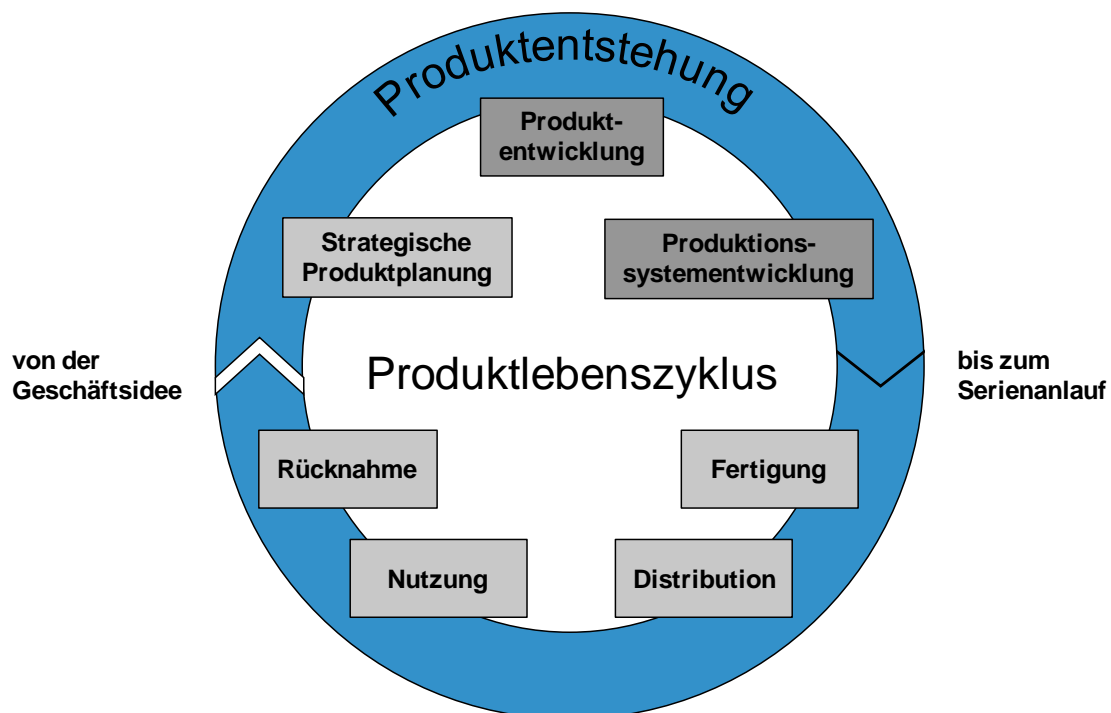


Bild 2-4: Produktentstehung im Produktlebenszyklus nach [GLR+00, S. 3], [GW11, S. 14]

Nach GAUSEMEIER kann die Produktentstehung nicht als stringente Folge von Phasen und Meilensteinen verstanden werden. Es handelt sich vielmehr um ein Wechselspiel von Aufgaben. Das 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung (Bild 2-5) stellt dieses Wechselspiel zwischen der Strategischen Produktplanung, der Produktentwicklung und der Produktionssystementwicklung dar. [GP14, S. 25]

Es existiert eine Erweiterung des 3-Zyklen Modells um den Zyklus Dienstleistungskonzipierung (vgl. [GEA16, S. 14f.]). Dies wird in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Das 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung ist nachfolgend erläutert [GP14, S. 25ff.], [Gau10, S. 22ff.], [GLL12, S. 14ff.]:

Der erste Zyklus entspricht der **Strategischen Produktplanung**. Er charakterisiert das Vorgehen und Finden von zukünftigen Erfolgspotentialen bis hin zur erfolgversprechenden Produktkonzeption – der sogenannten Prinziplösung. Der erste Zyklus besteht dabei aus den Aufgabenbereichen Potentialfindung, Produktfindung, Geschäftsplanung und Produktkonzipierung. Ziel der Potentialfindung ist das Erkennen zukünftiger Erfolgspotentiale sowie der Ermittlung entsprechender Handlungsoptionen. Die Produktfindung basiert auf den erkannten Erfolgspotentialen und befasst sich mit der Suche und der Auswahl neuer Produkt- und Dienstleistungsideen. In der Geschäftsplanung wird zunächst die Geschäftsstrategie erarbeitet. Sie beantwortet die Frage, welche Marktsegmente wann und wie bearbeitet werden sollen. Auf Grundlage der Geschäftsstrategie wird die Produktstrategie erarbeitet. Diese beinhaltet Aussagen: zur Gestaltung des Produktprogramms, zur wirtschaftlichen Bewältigung der vom Markt geforderten Variantenvielfalt, zu eingesetzten Technologien, zur Programmpflege über den Produktlebenszyklus. Aus der Produktstrategie wird ein Geschäftsplan abgeleitet, der den Nachweis erbringt, ob mit dem neuen Produkt bzw. der Produktkonzeption ein attraktiver Return on Investment erzielt werden kann. Die Produktkonzeption und die damit verbundene Produktionssystemkonzipierung wird in den ersten Zyklus mit einbezogen, um sicherzustellen, dass ein aus unternehmerischer Sicht erfolgversprechendes Produktkonzept entsteht.

Der zweite Zyklus entspricht der **Produktentwicklung**. Ausgangspunkt ist das Produktkonzept mit dem der fachdisziplinspezifische Entwurf und die entsprechende Ausarbeitung begonnen wird. Die Ergebnisse von Entwurf und Ausarbeitung werden in der Produktintegration integriert. Das Produktkonzept bildet dabei die Schnittstelle zwischen dem ersten und zweiten Zyklus.

Der dritte Zyklus entspricht der **Produktionssystementwicklung**. Sie geht aus von der Produktionssystemkonzipierung, die im Wechselspiel mit dem Produktkonzept zu erarbeiten ist. Die Produktionssystementwicklung hat dabei die vier Fachgebiete: Arbeitsablaufplanung, Arbeitsstättenplanung, Arbeitsmittelplanung und Produktionslogistik. Nach der Produktionssystemkonzipierung wird die Produktionssystementwicklung in der Arbeitsplanung konkretisiert und im anschließenden Schritt der Produktionssystemintegration integriert.

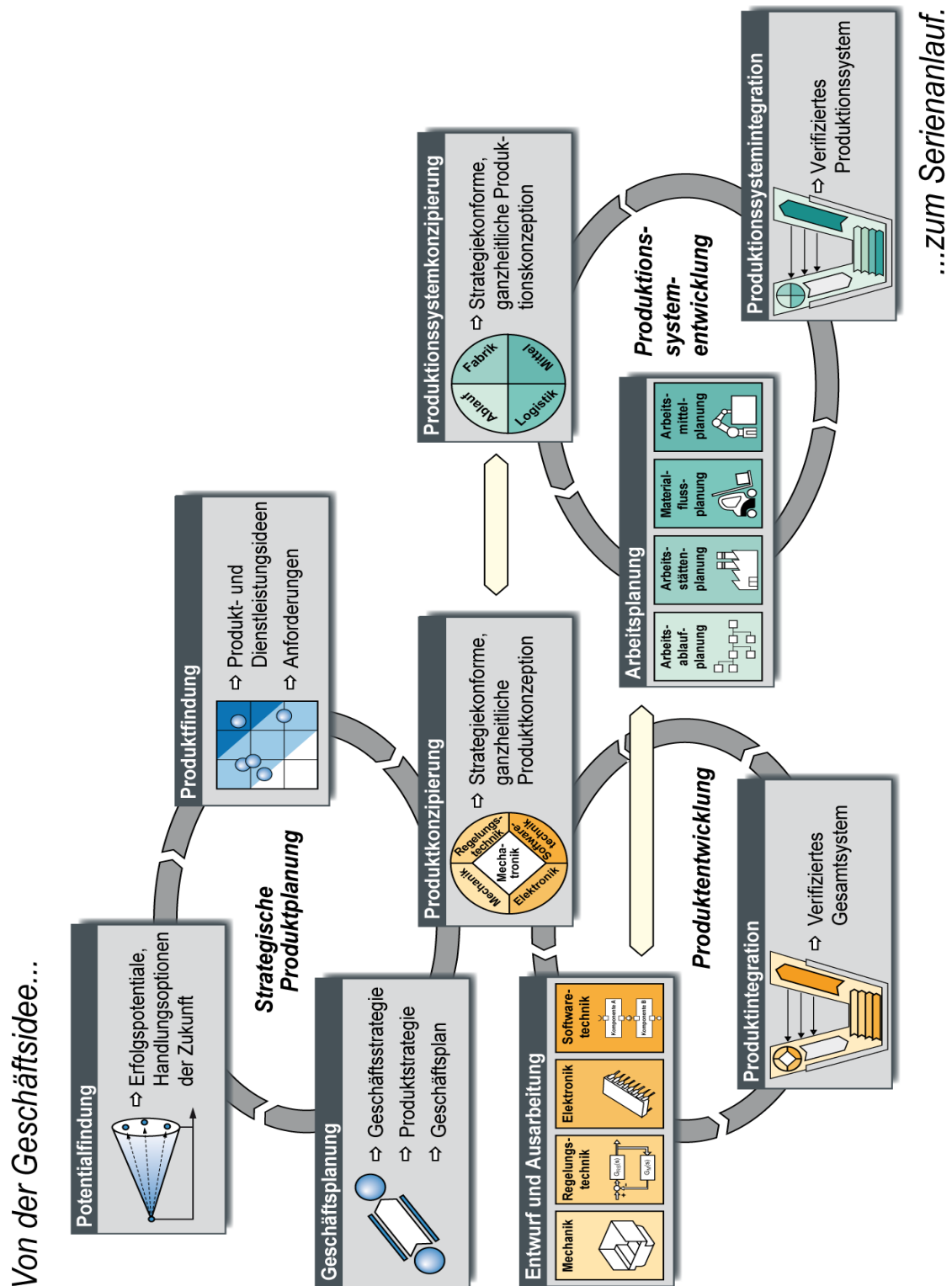


Bild 2-5: 3-Zyklus-Modell der Produktentstehung nach [GP14, S. 26], [Gau10, S. 23], [GLL12, S. 16]

Die Produktionssystementwicklung ist parallel zur Produktentwicklung angeordnet und nicht im Anschluss. Dabei sind die Produkt- und Produktionssystementwicklung parallel und in enger Abstimmung voranzutreiben. Dadurch soll sichergestellt werden, dass auch alle Möglichkeiten der Gestaltung eines leistungsfähigen und kostengünstigen Erzeugnisses ausgeschöpft werden. Das Produktkonzept wird z. B. durch die in Betracht gezogenen Fertigungstechnologien determiniert. Innovative Produktkonzepte erfordern in vielen Fällen die Entwicklung von neuen Fertigungsprozessketten und Produktionssystemen. Die beiden Pfeile in Bild 2-5 verdeutlichen den Abstimmungsbedarf zwischen Produktkonzipierung und Produktionssystemkonzipierung bzw. zwischen Entwurf/Ausarbeitung und Arbeitsplanung. [GP14, S. 25ff.], [Gau10, S. 22ff.], [GLL12, S. 14ff.]

Die Entwicklung mechatronischer Systeme und deren Produktionssysteme, die dem zweiten und dritten Zyklus zuzuordnen sind, werden in Kapitel 2.3 näher beschrieben.

Die **Arbeitsplanung**⁵ ist wesentliche Aufgabe bei der Entwicklung des Produktionssystems (vgl. Bild 2-5). AWF/REFA und DANGELMEIER verstehen unter der Arbeitsplanung:

„Die Arbeitsplanung umfasst alle einmalig auftretenden Planungsmaßnahmen, welche unter ständiger Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit die fertigungsgerechte Gestaltung eines Erzeugnisses sichern.“ [Dan03, S. 56], (vgl. auch [AR68, S. 6])

AWF/REFA verwendet exakt die gleiche Definition, wobei diese um den Passus *„oder die ablaufgerechte Gestaltung einer Dienstleistung“* ergänzt ist [AR68, S. 6].

Die Arbeitsplanung legt dabei fest *Was, Wie und Womit* gefertigt wird [Eve97, S. 3]. Die Arbeitsplanung ist dabei zusammen mit der Arbeitssteuerung Teil der Arbeitsvorbereitung⁶ [GP14, S. 16], [Eve97, S. 2]. Die Arbeitssteuerung gibt dabei vor *Wieviele, Wann, Wo* und durch *Wen* gefertigt wird. Die Arbeitsvorbereitung nimmt dabei die Brückenfunktion zwischen Konstruktion und Fertigung ein [Eve97, S. 3]. Dabei kommt der Arbeitsplanung eine Schlüsselrolle zu, da sie die Verbindung zwischen Konstruktion und Fertigung darstellt [VDI92].

Die Arbeitsplanung besteht dabei aus den vier Teilbereichen *Arbeitsablaufplanung, Arbeitsstättenplanung, Materialflussplanung* und *Arbeitsmittelplanung* [GP14, S. 26ff.]. Die vier Teilbereiche werden nachfolgend kurz erläutert.

⁵ Die Begriffe Fertigungsplanung und Arbeitsplanung werden in der Praxis häufig synonym verwendet. Da der Begriff Arbeitsplanung zutreffender ist, wird er im Rahmen dieser Arbeit verwendet. [Nor12, S. 36], [AR68, S. 6]

⁶ Der Begriff Arbeitsvorbereitung ist auch Synonym zu den Begriffen Fertigungsplanung, Fertigungssteuerung, Planung, Fertigungsplanvorbereitung, Fertigungsvorbereitung, technologische Fertigungsvorbereitung [Eve97, S. 2].

Arbeitsablaufplanung

Die Arbeitsablaufplanung definiert den zur Herstellung eines Produktes benötigten Fertigungsablauf und die Betriebsmittel. Die Aufgaben der Arbeitsablaufplanung sind dabei vielfältig und eng mit den anderen Aufgabenbereichen der Produktionssystementwicklung verknüpft. Wesentliche Ergebnisse der Arbeitsablaufplanung sind die Arbeitspläne⁷ und NC-Programme. [GP14, S. 31]

EVERSHEIM beschreibt den zeitlichen Ablauf der Tätigkeiten innerhalb der Arbeitsablaufplanung als vier parallele Stränge (vgl. Bild 2-6). Unterstützend zur Planung von Fertigung und Montage (Strang 1) werden die Kosten geplant (Strang 2). Parallel zu den Tätigkeiten Prozessplanung, Operationsplanung, Montageplanung und NC-/RC-Programmierung wird die Prüfplanung geplant (Strang 3). Ausgehend von der Planungsvorbereitung werden zusätzliche Sonderwerkzeuge und Vorrichtungen bei Bedarf geplant. [Eve97, S. 17ff.]

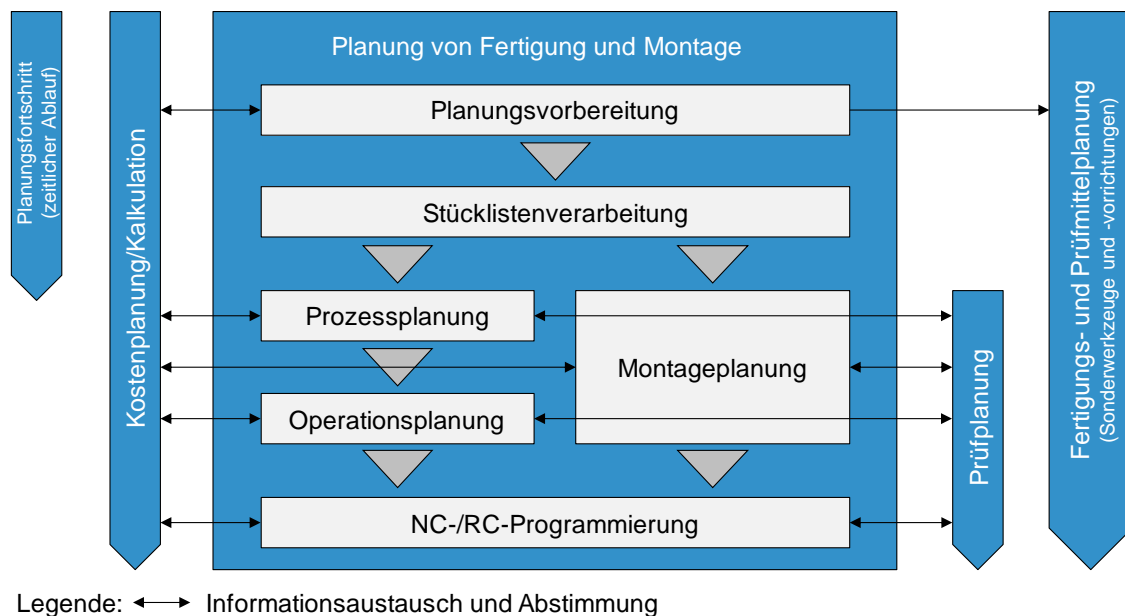


Bild 2-6: Zeitlicher Ablauf der Tätigkeiten innerhalb der Arbeitsablaufplanung nach Eversheim [Eve97, S. 18]

Die **Prüfplanung** bildet die Schnittstelle zwischen Arbeitsablaufplanung und dem unternehmensweiten Qualitätsmanagement. Im engeren Sinne wird die Prüfplanung als die „Planung der Qualitätsprüfung“ verstanden (vgl. auch Kapitel 2.1.3 und [DGQ93, S. 100]). Ebenso wie die Produkterstellung geplant und gesteuert werden muss, wird die Prüfung des Produktes planerisch unterstützt. In der Prüfplanung werden Entscheidungen über Notwendigkeit, den Ablauf und die Häufigkeit einer Prüfung getroffen. Wei-

⁷ Der Arbeitsplan ist der Datenträger der Fertigungsplanung bzw. Arbeitsplanung. In ihm sind die Vorgangsfolge zur Fertigung eines Teils, einer Gruppe oder eines Erzeugnisses beschrieben, wobei mindestens das verwendete Material sowie für jeden Arbeitsvorgang der Arbeitsplatz, die Betriebsmittel, die Vorgabezeiten und ggf. die Lohngruppe angegeben sind. [Ref93, S. 22]

terhin werden Prüfabläufe, Prüfmethoden, Hilfsmittel und die Unterstützung durch eine elektronische Datenverarbeitung festgelegt. [Eve97]

Die Prüfplanung wird in Kapitel 2.4 vertiefend erklärt.

Die **Fertigungs- und Prüfmittelplanung** ist Gegenstand der Betriebsmittelplanung im Rahmen der Arbeitsablaufplanung. Betriebsmittel sind „*Anlagen, Geräte und Einrichtungen, die zur betrieblichen Leistungserstellung dienen*“ (vgl. auch [VDI2815-5]). Die Prüfmittelplanung beinhaltet die Planung der Verwendung, der Eigenschaften, der Anforderungen, der Spezifikationen und des Einsatzfeldes von Prüfmitteln als Teil der Fertigungsplanung sowie deren Beschaffung bzw. Eigenfertigung (vgl. auch [SP15, S. 237]). Die Prüfmittelplanung umfasst mit der Prüfmittelauswahl auch Teilfunktionen der Prüfplanung. [Eve97, S. 17ff.]

Arbeitsmittelplanung

Die Arbeitsmittelplanung befasst sich mit der Planung der Fertigungsmittel (Maschinen, Vorrichtungen, Werkzeuge), die zur Durchführung der Arbeitsvorgänge in einem Fertigungsbetrieb erforderlich sind. [GP14, S. 31]

Arbeitsstättenplanung

Die Arbeitsstättenplanung stimmt die bauliche Struktur des Fertigungsbetriebes auf das Fertigungssystem und den damit verbundenen Materialfluss ab [WRN09] zitiert in [GP14, S. 33]. Dabei wird insbesondere den Fertigungsmitteln und den Komponenten des Materialflusssystems ein Standort in den Gebäuden zugeordnet [Dan99] zitiert in [GP14, S. 33]. Die Arbeitsstättenplanung besteht dabei aus den vier Hauptaufgaben: Bebauungsplanung (Gebäude), Anordnungsplanung, Planung der Produktionslinien, Gestaltung der Arbeitsplätze.

Materialflussplanung

Die Produktionslogistik umfasst die Planung des gesamten Materialflusses in einem Fertigungsbetrieb vom Wareneingang bis zum Versand. Sie umfasst ebenso die Planung der Ausrüstung – inklusive der Erstellung der Steuerungssoftware. Es wird dabei unterteilt in die vier Aufgaben: Erstellung der Logistikkonzeption, Projektierung des Materialflusssystems, Projektierung der Handhabungssysteme, Projektierung der Lagersysteme.

Fazit und Einordnung für die zu entwickelnde Systematik

Das 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung beschreibt die frühzeitige integrative Produkt- und Produktionssystementwicklung und bildet die Grundlage für einen erfolgversprechenden Produktentstehungsprozess – insbesondere für mechatronische Systeme. Bereits während der Konzipierungsphase werden Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung verzahnt.

Es zeigt sich die Notwendigkeit einer strukturierten Produktionssystementwicklung, um mechatronische Systeme wirtschaftlich herstellen zu können. Teil der Produktionssys-

mententwicklung sind die Aktivitäten zur Planung des Bedarfs, Verwendung, Auswahl und Entwicklung von Prüfmitteln. Klassischerweise erfolgt diese Planung dabei in der Arbeitsvorbereitung bzw. der Arbeitsplanung. Die Prüfplanung ist dabei das wesentliche Element.

Es bestehen insbesondere Wechselwirkungen zwischen Prüfmittel und Produkt, aber auch zwischen Prüfmittel, dem restlichen Produktionssystem und weiteren Bereichen (vgl. Bild 2-18, Kapitel 4.1.3 und Kapitel A1).

Die zu entwickelnde Systematik soll sich daher in das 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung einordnen. Sie soll dabei die Verzahnung zwischen der Produktentwicklung, der Produktionssystementwicklung und den darin enthaltenen planerischen Tätigkeiten für Prüfmittel unterstützen. Im Sinne der zu verwendenden bzw. zu entwickelnden Prüfmittel sind darunter Tätigkeiten wie Prüfplanung, Prüfmittelauswahl und insbesondere die Prüfmittelentwicklung zu verstehen. Dabei muss die Systematik zusätzlich die Möglichkeit bieten, Informationen aus dem Qualitätsmanagement des Unternehmens mit einzubeziehen.

2.3 Entwicklung mechatronischer Systeme und deren Produktionssysteme

Um die Prüfmittelentwicklung für mechatronische Systeme in einen Entwicklungsprozess frühzeitig zu integrieren, stellt die Produktentwicklung und Teile der Produktionssystementwicklung den Ausgangspunkt dar, wobei die Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung meist als Teil der Produktionssystementwicklung angesehen werden.

In Kapitel 2.3.1 wird eine allgemeine Struktur des Entwicklungsprozesses dargestellt. In Kapitel 2.3.2 wird auf die VDI-Richtlinie 2206 *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme* eingegangen. Darauf aufbauend wird in Kapitel 2.3.3 auf die modellbasierte Entwicklung mithilfe von (Model-Based) Systems Engineering und der Spezifikationstechnik CONSENS eingegangen.

2.3.1 Die Struktur des Entwicklungsprozesses

Für einen gesamten Produktentstehungsprozess, aber auch für die Produktentwicklung, gibt es kein stringentes Vorgehen zur Entwicklung. Der Entwurf⁸ eines mechatronischen Systems ist von einem Wechselspiel aus Synthese- und Analyseschritten geprägt. Dabei werden verschiedene Entwurfsaspekte (z. B. Struktur, Verhalten, Gestalt) betrachtet. Verursacht durch die Komplexität der Erzeugnisse entstehen somit immer wieder Iterationen bei der Entwicklung. Es ergibt sich so eine Folge von Entwurfsschritten im sogenannten Entwurfsraum (vgl. Bild 2-7). [GP14]

⁸ Der Begriff *Entwurf* wird an dieser Stelle als Synonym für den Begriff *Entwicklung* verwendet.

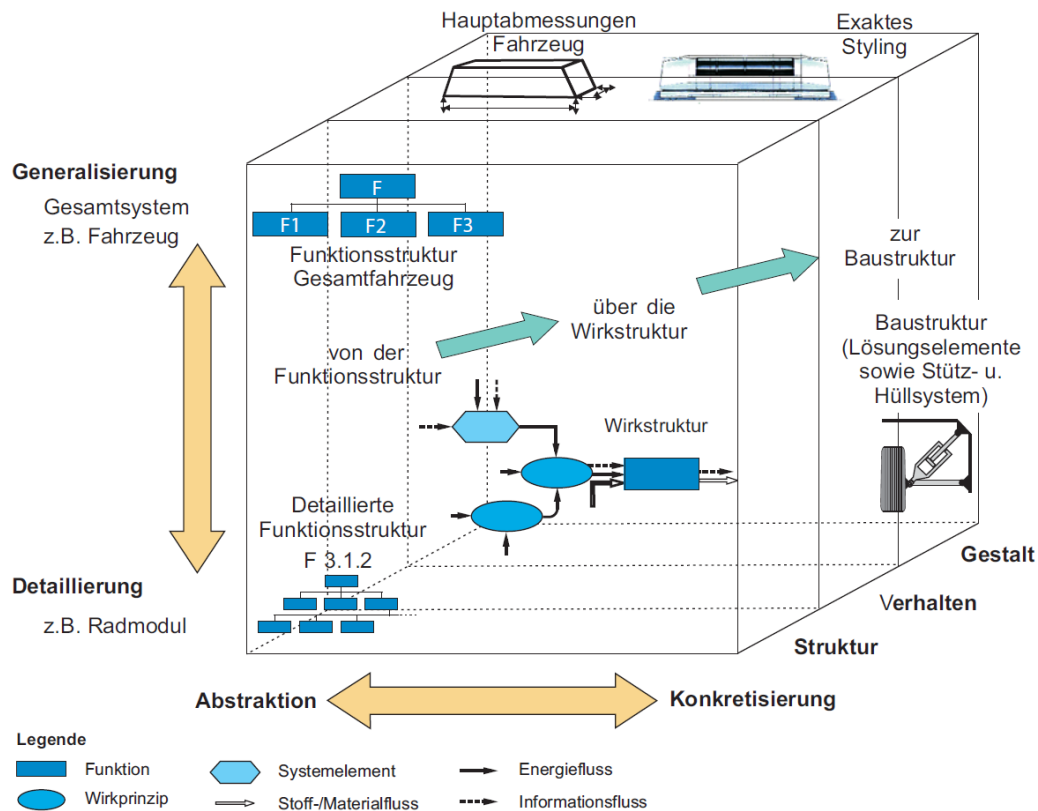


Bild 2-7: Der Entwurfsraum als Grundarchitektur des Entwicklungsgeschehens [GP14]

Der Entwurfsraum spannt sich dabei nach GAUSEMEIER ET AL. in drei Dimensionen auf. Beim Entwurf kann dabei ein Top-down-Vorgehen (eine Grobstruktur wird verfeinert) gewählt werden als auch ein Bottom-up-Vorgehen (getrennt entwickelte Baugruppen werden zu einem Gesamtsystem zusammengefügt). Für alle Arten von Entwicklungsaufgaben gilt dabei das prinzipielle Vorgehen: Es wird vom Abstrakten zum Konkreten, vom Generellen zum Detail und von der Funktions- zur Baustuktur entwickelt. Es werden dabei Sichten bzw. Aspekte – wie z. B. Struktur, Verhalten, Gestalt bzw. Geometrie nach dem Y-Modell der Mikroelektronik – gebildet ([BGH+96] zitiert in [GP14]). Abhängig von Entwicklungsaufgabe, Randbedingungen und Zielsystem ergeben sich im Entwurfsraum spezielle Verläufe von Entwurfsprozessen. Es existieren also keine universellen, sondern nur fallspezifische Entwurfsprozesse. [GP14]

2.3.2 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme – VDI-Richtlinie 2206

Der globale Wettbewerb ist durch hohe Innovationsgeschwindigkeit, verkürzte Entwicklungs- und Produktlebenszyklen sowie steigende Kundenerwartungen an Leistung, Qualität und Preis zukünftiger Innovationen gekennzeichnet. In entscheidender Weise tragen Produktinnovationen dazu bei, sich in dem globalen Umfeld zu behaupten. Mechatronische Produkte bieten dabei Erfolgspotentiale. Komplexe mechatronische Systeme bestehen dabei im Allgemeinen aus der synergetischen Integration verschiedener mechatronischer Module. Neben den Erfolgspotentialen stellen mechatronische Systeme aber zugleich besondere Anforderungen an den Entwicklungsprozess. Aufgrund des Zusammenspiels verschiedener Wissensdomänen und der im Vergleich zu mechanischen Systemen größeren Anzahl von verkoppelten Elementen, sind mechatronische Systeme durch eine hohe Komplexität geprägt. Die Problematik der Wechselwirkungen von mechanischen, elektrotechnischen und informationsverarbeitenden Komponenten, die das Verhalten und die Gestalt beeinflussen, sind daher bereits frühzeitig im Entwurf zu berücksichtigen. In der Vergangenheit erfolgte die Entwicklung meist getrennt in den involvierten Domänen. Diese sind dabei geprägt von eigenen Denkweisen, Begriffswelten und Erfahrungen. Die VDI-Richtlinie 2206 beschreibt das interdisziplinäre Zusammenwirken der einzelnen Domänen und bietet einen Leitfaden zur Entwicklung mechatronischer Systeme. [VDI2206, S. 2ff.]

Die VDI-Richtlinie 2206 stellt den heutigen Konsens zur systematischen Entwicklung von mechatronischen Systemen dar [Nor12]. Sie ist ein praxisorientierter Leitfaden für die systematische Entwicklung [VDI2206, S. 29]. Der Hauptbestandteil der Entwicklungsmethodik gliedert sich dabei in ein dreiteiliges Vorgehensmodell mit den folgenden Bestandteilen [VDI2206, S. 9 und S. 26ff.]:

- *Problemlösungszyklus als Mikrozyklus*
- *Das V-Modell als Makrozyklus*
- *Prozessbausteine für wiederkehrende Arbeitsschritte*

Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist der *Integrative Entwurf von Produkt und Produktionssystem*.

Der **Problemlösungszyklus als Mikrozyklus** strukturiert das Vorgehen im Entwicklungsprozess auf der Grundlage eines allgemeinen Problemlösungszyklus, wie er z. B. aus dem „Systems Engineering“ bekannt ist (vgl. [DH94]; auch zitiert in [VDI2206, S. 26]). Er umfasst dabei die fünf Schritte: Situationsanalyse bzw. Zielübernahme, Analyse und Synthese, Analyse und Bewertung, Entscheidung, Planen des weiteren Vorgehens bzw. Lernen. Der erste Schritt ist die Situationsanalyse bzw. Zielformulierung. Es wird entweder ein externes Ziel übernommen und dann anschließend eine Situationsanalyse durchgeführt oder eine Situationsanalyse durchgeführt, um ein Ziel zu formulieren. Als zweiter Schritt folgt die Analyse und Synthese. Es wird dabei nach Lösungen

für das gegebene Problem gesucht. Der Prozess der Lösungssuche stellt dabei in der Praxis ein permanentes Wechselspiel aus Synthese- und Analyseschritten dar. Die Erarbeitung von alternativen Lösungsvarianten ist dabei das Ziel. Es können dabei zusätzliche Aspekte des Problems erkannt werden, die einen Rücksprung zur Situationsanalyse und Zielformulierung notwendig machen oder als ergänzende Kriterien in den nachfolgenden Bewertungsschritt mit einfließen. Die im Verlauf der Lösungssuche konkretisierten Lösungsvarianten werden im nachfolgenden Schritt der Analyse und Bewertung einer detaillierten Evaluation unterzogen. Bewertet wird anhand der Bewertungskriterien, die bei der Zielformulierung und Lösungssuche definiert wurden. Auch in diesem Schritt ist ein Rückschritt möglich. Der vierte Schritt ist die Entscheidung. In diesem Schritt muss festgestellt werden, ob der bisherige Verlauf der Problemlösung zu einem befriedigenden Ergebnis geführt hat. Ist dies nicht der Fall kann zu den vorangegangenen Schritten zurückgesprungen werden. Eine oder mehrere Lösungsalternativen werden am Ende dieses Schrittes ausgewählt und bilden die Grundlage für die weiteren Planungen. Der letzte Schritt, die Planung des weiteren Vorgehens, wird in vielen Fällen in einen weiteren Problemlösungszyklus einmünden. Zusätzlich soll an dieser Stelle Wissen für kommende Entwicklungsaufgaben generiert werden.

Das V-Modell als Makrozyklus

Das V-Modell (Bild 2-8) beschreibt das generische Vorgehen beim Entwurf mechatronischer Systeme welches fallweise auszuprägen ist. [VDI2206, S. 29], [GLL12, S. 30]

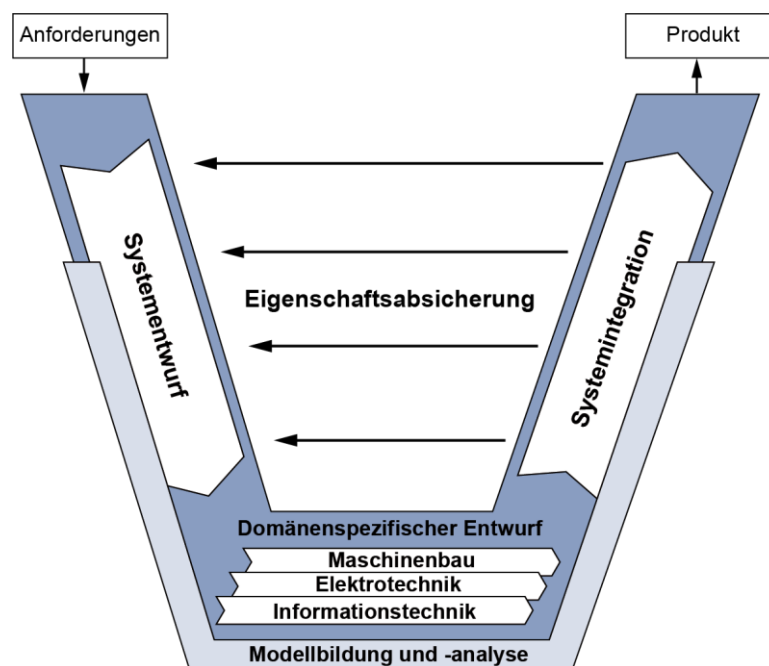


Bild 2-8: V-Modell als Makrozyklus nach [VDI2206, S. 29]

Begonnen wird mit den **Anforderungen**, die den Ausgangspunkt für den konkreten Entwicklungsauftrag bilden. Die Anforderungen bilden zugleich den Maßstab, an dem das spätere Produkt zu bewerten ist. [VDI2206, S. 29], [GLL12, S. 30]

Der **Systementwurf** verfolgt das Ziel ein domänenübergreifendes Lösungskonzept festzulegen, das die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen des zukünftigen Produktes beschreibt. Die Gesamtfunktion des zu entwickelnden Systems wird dazu in seine wesentlichen Teilfunktionen zerlegt. Zu diesen Teilfunktionen werden geeignete Wirkprinzipien⁹ bzw. Lösungselemente¹⁰ zugeordnet und die Funktionserfüllung im Systemzusammenhang geprüft. [VDI2206, S. 29f.], [GLL12, S. 30f.]

Im **Domänenspezifischen Entwurf** erfolgt auf Basis des gemeinsam entwickelten Lösungskonzepts die weitere Konkretisierung meist getrennt in den beteiligten Domänen. Um insbesondere bei kritischen Funktionen die Funktionserfüllung sicherzustellen, ist eine detailliertere Auslegung und Berechnung nötig. [VDI2206, S. 30], [GLL12, S. 31]

In der **Systemintegration** werden die Ergebnisse aus den einzelnen Domänen zu einem Gesamtsystem integriert. Das Zusammenwirken der Einzelergebnisse kann somit untersucht werden. [VDI2206, S. 30], [GLL12, S. 31]

Die **Eigenschaftsabsicherung** prüft fortlaufend den Entwurfsfortschritt anhand des spezifizierten Lösungskonzeptes und der Anforderungen. Es wird somit sichergestellt, dass die tatsächlichen mit den gewünschten Systemeigenschaften übereinstimmen. [VDI2206, S. 30], [GLL12, S. 31]

Die **Modellbildung und -analyse** flankiert die einzelnen Phasen im V-Modell durch Abbildung und Untersuchung der Systemeigenschaften mit Hilfe von Modellen und rechnergestützten Werkzeugen zur Simulation. [VDI2206, S. 30], [GLL12, S. 31]

Das **Produkt** ist das Ergebnis eines durchlaufenen Makrozyklus, also eines V-Modells. Unter Produkt ist dabei nicht ausschließlich das fertige real existierende Erzeugnis zu verstehen, sondern die zunehmende Konkretisierung des Produktes (Produktreife). [VDI2206, S. 30f.], [GLL12, S. 31f.]

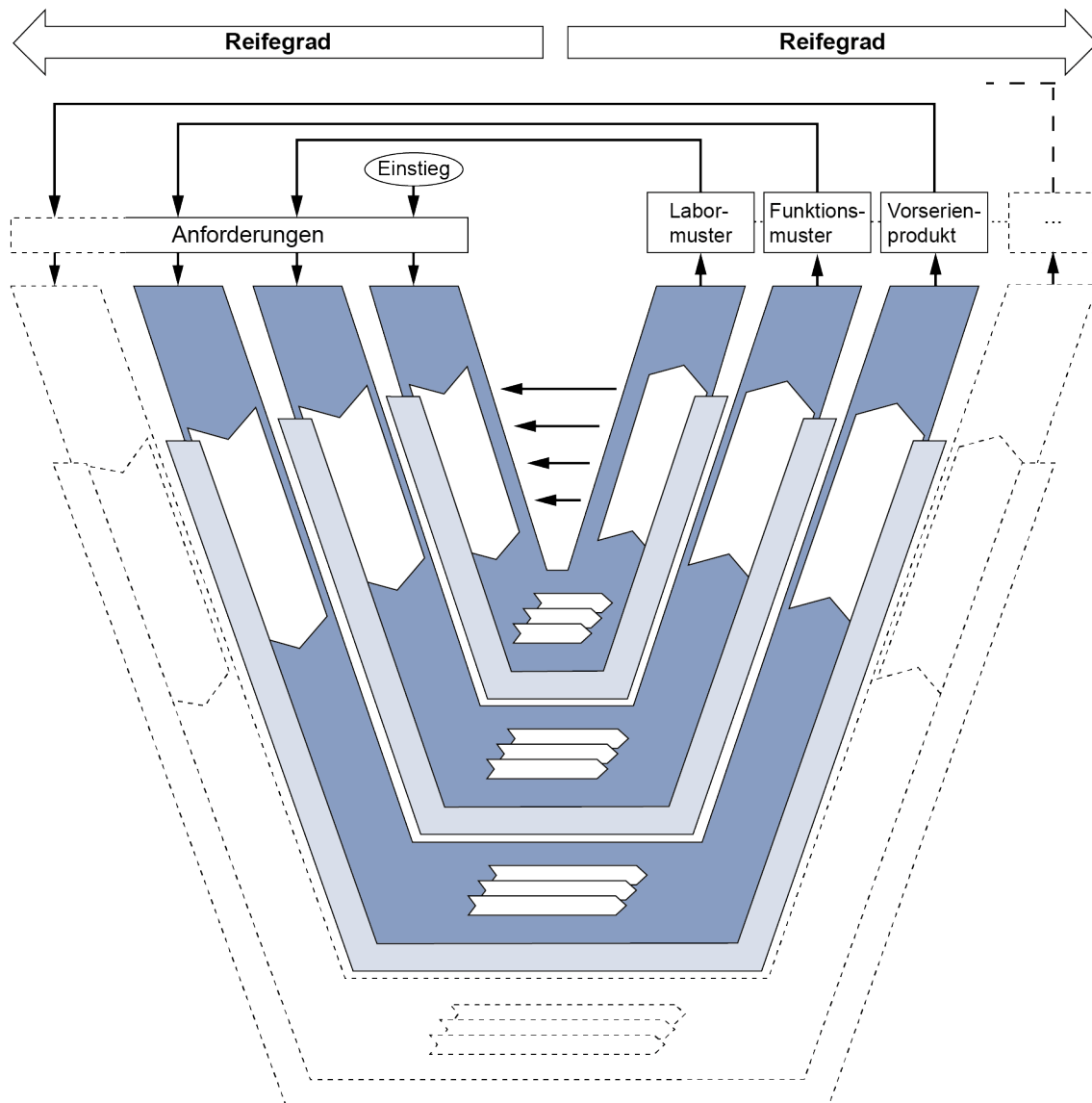
In der Regel entsteht ein komplexes mechatronisches Erzeugnis nicht innerhalb eines Makrozyklus. Dazu sind mehrere V-Modell-Durchläufe erforderlich (vgl. Bild 2-9). In einem ersten Zyklus wird beispielsweise das Produkt exemplarisch realisiert. Dazu wird das Produkt funktional spezifiziert, erste Wirkprinzipien und/oder Lösungselemente ausgewählt und grobdimensioniert und anschließend im Systemkontext auf Konsistenz geprüft. Das Ergebnis ist in der Regel ein Labormuster. In einem zweiten Zyklus wird das Produkt weiter konkretisiert (Feindimensionierung der Lösungselemente, Verhal-

⁹ „Das Wirkprinzip bezeichnet den Zusammenhang von physikalischem Effekt sowie geometrischen und stofflichen Merkmalen (Wirkgeometrie, Wirkbewegung und Werkstoff). Es lässt das Prinzip der Lösung zur Erfüllung einer Teilfunktion erkennen“. [PB97] zitiert in [VDI2206, S. 30]

¹⁰ „Ein Lösungselement ist eine realisierte und bewährte Lösung zur Erfüllung einer Funktion. Dabei handelt es sich im Allgemeinen um ein Modul/eine Baugruppe, das/die auf einem Wirkprinzip beruht. Die rechnerinterne Repräsentation eines Lösungselementes besteht aus unterschiedlichen Aspekten wie Verhalten und Gestalt. Jeder dieser Aspekte weist unterschiedliche Konkretisierungen auf, die den Phasen des Entwicklungsprozesses entsprechen. Der Aspekt Gestalt enthält grobe Festlegungen für die Bestimmung der prinzipiellen Lösung und weitergehende Festlegungen für die Bestimmung der Baustruktur. Der Aspekt Verhalten weist für den Fall von Software beispielsweise für die frühen Entwicklungsphasen abstrakte Datentypen und für die spätere Entwicklungsphase Code auf“. [GEK01] zitiert in [VDI2206, S. 30]

tens- und Gestaltsimulation). Ergebnis dieses zweiten Zyklus ist das Funktionsmuster. Um zum serienreifen Produkt zu gelangen, sind je nach Entwurfsfortschritt, Art und Komplexität der Entwicklungsaufgabe gegebenenfalls weitere Makrozyklen erforderlich. Die Anzahl der zu durchlaufenden Makrozyklen und die zu durchlaufenden Teilschritte hängen dabei von der spezifischen Entwicklungsaufgabe ab. [VDI2206, S. 30f.], [GLL12, S. 30f.]

Für den Einsatz in der Praxis muss das V-Modell an die spezifischen Rahmenbedingungen eines Unternehmens oder Projektes angepasst werden [Bau16, S. 429].



*Bild 2-9: Durchlaufen mehrerer Makrozyklen mit zunehmender Produktreife
[VDI2206, S. 31]*

Vor allem in der Automobiltechnik werden die einzelnen Durchläufe der V-Modelle oft als Musterphasen bezeichnet. Man spricht auch von Reifegradstufen. Ergebnis der einzelnen Musterphasen (also je eines V-Modell-Durchlaufs) sind das A-Muster, B-Muster und C-Muster. Der Serienstand wird der Bezeichnung folgend auch als D-Muster bezeichnet. [SZ10, S. 144f.], [PL14, S. 3f.], [MHD+07], [Bau16, S. 429]

Das Labormuster wird also als A-Muster bezeichnet, das Funktionsmuster als B-Muster usw. Eine Anzahl von vier V-Modell-Durchläufen ist dementsprechend eine gängige Anzahl von V-Modellen in der Produktentwicklung.

Gebräuchliche Bezeichnungen für die einzelnen Muster¹¹ sind im Allgemeinen auch (je nach Zweck): Entwicklungsmuster, Entwurfsmuster, Prototyp, Angebotsmuster, Versuchsmuster, Vormuster, Zwischenmuster, Spezialmuster, Erstmuster, Ausfallmuster, Baumuster, Fertigungsmuster, Typmuster, Wiederholmuster, Änderungsmuster, Einbaumuster, Belegmuster, Referenzmuster, Rückstellprobe, Sollmuster, Grenzmuster [DGQ93, S. 137ff.], (vgl. auch [DIN55350-15]).

Prozessbausteine für wiederkehrende Arbeitsschritte

Für Teilschritte, die beim Entwurf mechatronischer Systeme immer wieder auftreten, können Prozessbausteine beschrieben werden. Bild 2-10 zeigt den Prozessbaustein für den Systementwurf.

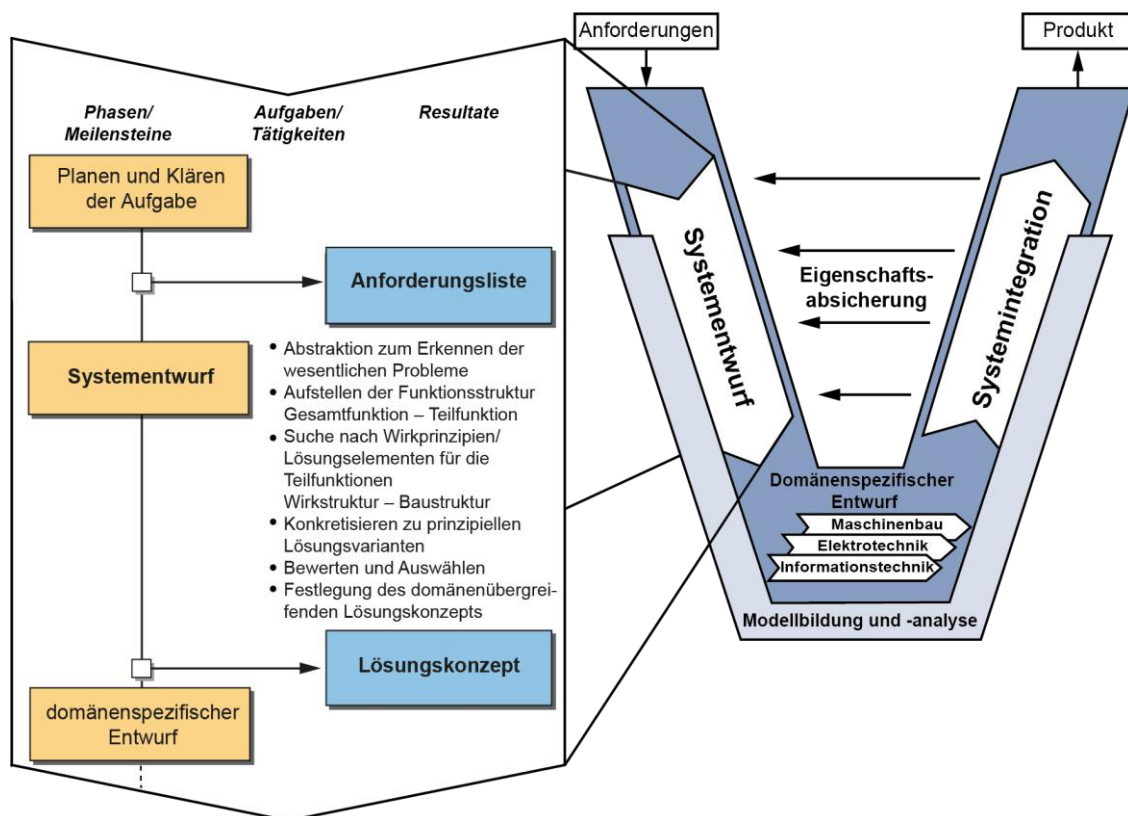


Bild 2-10: Tätigkeiten beim Systementwurf nach [VDI2206, S. 32]

¹¹ Die Erklärung und Ziele der einzelnen Muster sind in [DGQ93, S.137ff.] beschrieben (vgl. auch [DIN55350-15]).

Integrativer Entwurf von Produkt und Produktionssystem

Weiterhin wird in der VDI-Richtlinie 2206 beschrieben, dass die räumliche und funktionelle Integration von Komponenten in mechatronischen Produkten einen integrativen Entwurf von Produkt und Produktionssystem bereits in den frühen Entwurfsphasen erfordern. Die Notwendigkeit der engen Verzahnung von Produkt- und Produktionssystementwurf ist dabei in Wissenschaft und Praxis unumstritten. Hauptgrund dafür ist die hohe Beeinflussbarkeit des Produktes durch das Produktionssystem. Durch die integrative Entwicklung wird die Verkürzung der Entwicklungszeit und eine frühzeitige Abstimmung von Entscheidungen ermöglicht. Dadurch können maßgebliche Optimierungspotentiale erschlossen werden und aufwändige Änderungen vermieden werden. Ziel ist es dabei die Abläufe von Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung zeitlich zu parallelisieren. Die funktionale und räumliche Integration erfordert dabei auch integrierte Mechanik- und Elektronik-Prüfungen nach der Montage. Die Prüfungen müssen die mechanischen, elektrischen und elektronischen Eigenschaften des Produktes mit einbeziehen, um die einwandfreie Gesamtfunktion sicherzustellen. Diese Form der mechatronischen Qualitätssicherung hat dabei eine hohe Bedeutung hinsichtlich der wirtschaftlichen Potenziale mechatronischer Produkte. Die in der VDI-Richtlinie beschriebene iterative Vorgehensweise für den Entwurf von Produktionssystemen für mechatronische Erzeugnisse orientiert sich dabei an dem V-Modell zum Entwurf mechatronischer Systeme (vgl. Bild 2-8). Bild 2-11 zeigt diese iterative Vorgehensweise. [VDI2206, S. 41ff.], [GLL12, S. 31ff.]

Das Vorgehen gliedert sich in die Phasen: Vorbereitung, Produktionskonzipierung, Detail und Ausführungsplanung. Jede Phase entspricht dabei einem V-Zyklus. Die zu lösende Gesamtaufgabe wird dabei, analog zum Produkt, innerhalb eines V-Zyklus in Teilaufgaben unterteilt, konkretisiert und die Teilaufgaben im aufsteigenden Ast des „V“ wieder zur Lösung der Gesamtaufgabe zusammengeführt. Die Konkretisierung des Produktionssystementwurfs erfolgt sowohl innerhalb der einzelnen Phasen als auch über die Phasen hinweg. [VDI2206, S. 41ff.], [GLL12, S. 31ff.]

Die Anbindung des V-Modells des Produktionssystementwurfs an das des Produktentwurfs muss dabei jedes Unternehmen für sich situationsspezifisch festlegen, abhängig von der Ausgangssituation des Unternehmens. [VDI2206, S. 41ff.]

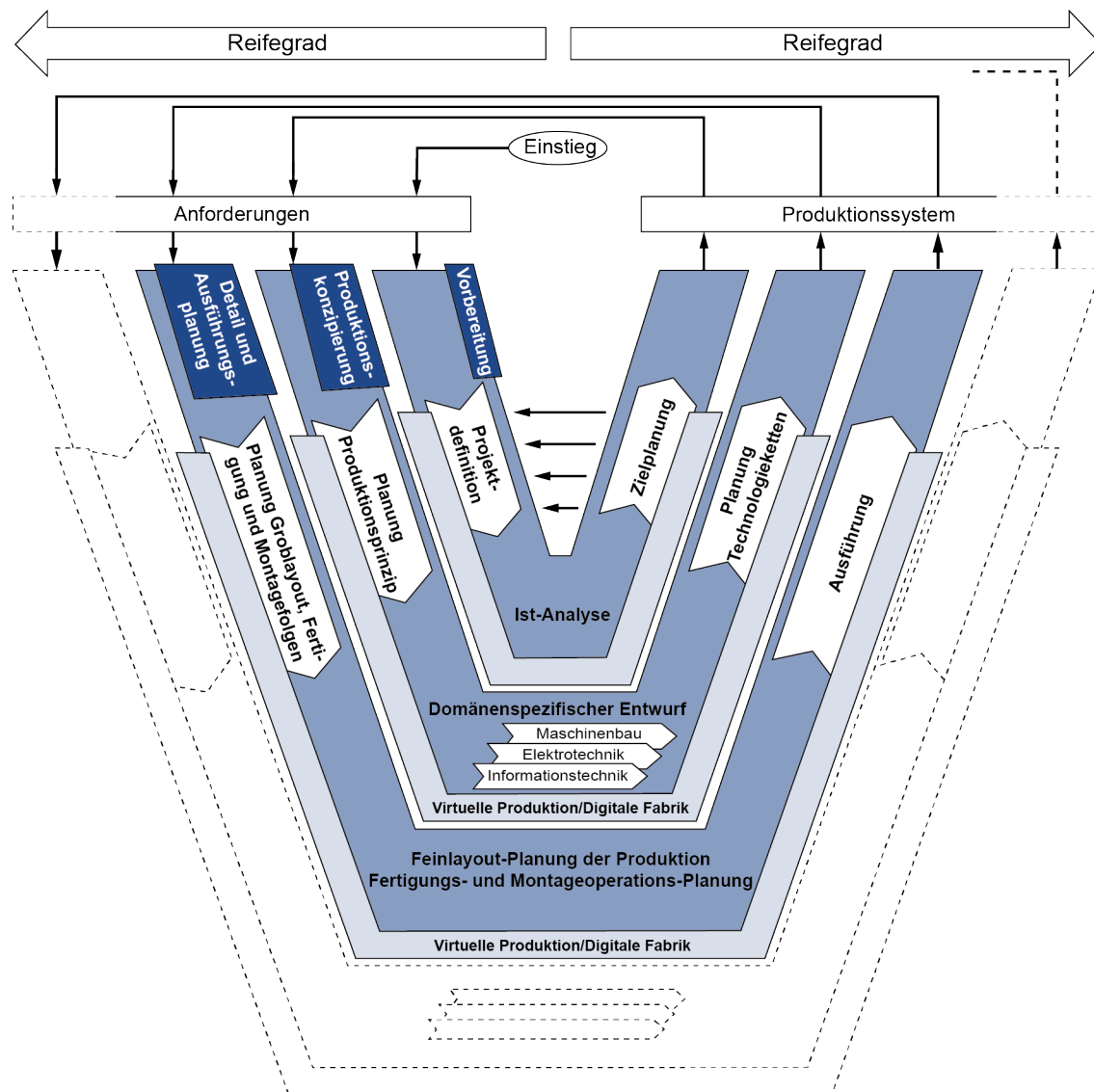


Bild 2-11: Iteratives Vorgehen beim Entwurf von Produktionssystemen für mechatronische Erzeugnisse nach [VDI2206, S. 44], [GLL12, S. 32]

2.3.3 Modellbasierte Entwicklung

Die hohe Komplexität bei der Entwicklung mechatronischer Systeme ist bereits in der frühen Phase des Entwurfs zu berücksichtigen. Die Integration heterogener Komponenten zu mechatronischen Systemen erfordert dabei eine domänenübergreifende Kommunikation und Kooperation zwischen den beteiligten Fachdisziplinen. Ziel dabei ist eine gemeinsame Vorstellung des zukünftigen Produktes zu gewinnen und eine gesamtoptimierte Lösung herbeizuführen. [VDI2206, S. 4]

Eine Möglichkeit den Herausforderungen und dabei insbesondere der Komplexität bei der Entwicklung mechatronischer Systeme zu begegnen, ist das Model-Based Systems Engineering (MBSE) [GDS+13]. Das Model-Based Systems Engineering ordnet sich dabei in das Systems Engineering ein [GDS+13], welches zunächst in Kapitel 2.3.3.1

beschrieben wird. Ausgehend davon wird das MBSE in Kapitel 2.3.3.2 erläutert, welches ein Systemmodell in den Vordergrund der Entwicklungsarbeit stellt [GDS+13]. In Kapitel 2.3.3.3 wird auf die Spezifikationstechnik CONSENS eingegangen, welche ein disziplinübergreifendes Systemmodell im Sinne des MBSE beschreibt [IKD+13, S. 337ff.].

2.3.3.1 Systems Engineering

Systems Engineering wird durch das INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING (INCOSE) als interdisziplinärer Ansatz und Mittel beschrieben, um komplexe Systeme erfolgreich zu realisieren. Die frühzeitige Definition und Dokumentation von Kundenanforderungen und Funktionen wird dabei fokussiert. Weiterhin wird dabei auf die Erstellung des Systementwurfs und die Validierung des Systems unter Berücksichtigung der gestellten Anforderungen und des Gesamtproblems eingegangen. Es werden dabei folgenden Aspekte mit betrachtet: Tätigkeiten, Kosten und Zeitplan, Leistung, Schulung und Support, Test, Herstellung und Entsorgung. Systems Engineering berücksichtigt dabei sowohl das „Business“ als auch die technischen Bedürfnisse aller Kunden, mit dem Ziel ein Qualitätsprodukt, welches die Bedürfnisse des Kunden trifft, bereitzustellen. [INC11, S.6], [NAS07, S. 3 f.], [Wei14, S.11 f.]

ALT beschreibt Systems Engineering als die Gesamtheit aller Entwicklungsaktivitäten, die notwendig sind, um ein System zu entwickeln [Alt12, S. 8].

HABERFELLNER ET AL. stellen dazu eine SE-Philosophie dar, die Systemdenken und ein Vorgehensmodell enthalten (vgl. Bild 2-12). [HWF+15, S. 31]

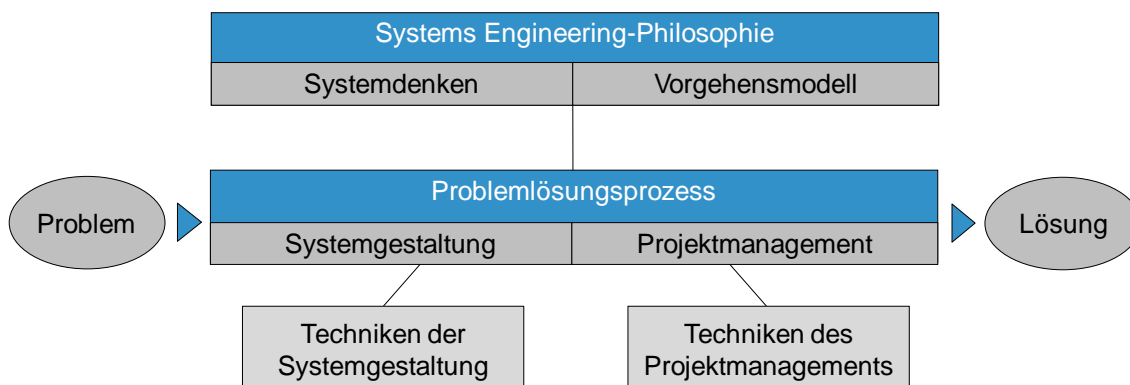


Bild 2-12: Das Systemdenken im Rahmen des SE-Konzeptes
nach [HWF+15, S. 31], [Dae78, S. 8]

Das *Systemdenken* beinhaltet Begriffe zur Beschreibung komplexer Gesamtheiten und Zusammenhänge. Weiterhin sind modellhafte Ansätze enthalten, um reale komplexe Erscheinungen zu veranschaulichen, ohne sie unzulässig vereinfachen zu müssen. Außerdem sind Ansätze enthalten, die das gesamtheitliche Denken unterstützen. Das *Vorgehensmodell* enthält eine Reihe von Vorgehensempfehlungen und -richtlinien, die sich in der Praxis bewährt haben und einen wesentlichen Bestandteil der SE-Methodik darstellen. Dem Vorgehensmodell liegen vier Grundgedanken zu Grunde. Es soll vom gro-

ben zum Detail vorgegangen werden. Es soll in Varianten gedacht werden und sich nicht mit einer (erstbesten) Lösung zufrieden geben. Der Prozess der Systementwicklung und -realisierung ist nach zeitlichen Gesichtspunkten zu realisieren. Bei der Lösung von Problemen soll eine Art Arbeitslogik als formaler Vorgehensleitfaden angewendet werden (Problemlösungszyklus), gleichgültig welcher Art sie sind und in welcher Phase sie auftreten. Das V-Modell der Produktentwicklung (vgl. Kapitel 2.3.2) gliedert sich in das Vorgehensmodell ein. [HWF+15]

Die Tätigkeit zur Lösungsfindung findet in der Systemgestaltung statt, wobei diese durch das Projektmanagement unterstützt wird. Das Projektmanagement organisiert und koordiniert dabei den Problemlösungsprozess. [HWF+15]

Die Produktentstehung soll dabei projekt- und situationsspezifisch gestaltet werden. Die Möglichkeit einen Entwicklungsprozess auf die Projektbedürfnisse zuzuschneiden wird dabei auch als *Tailoring* genannt. [GDS+13], [INC10] zitiert in [GDS+13]

2.3.3.2 Model-Based Systems Engineering (MBSE)

Model-Based Systems Engineering stellt ein Systemmodell in den Mittelpunkt des Entwicklungsgeschehens multidisziplinärer Systeme (vgl. Bild 2-13). Mechatronische Systeme sind dabei der Gruppe der multidisziplinären Systeme zuzuordnen. [IKD+13, S. 337ff.], [GDS+13]

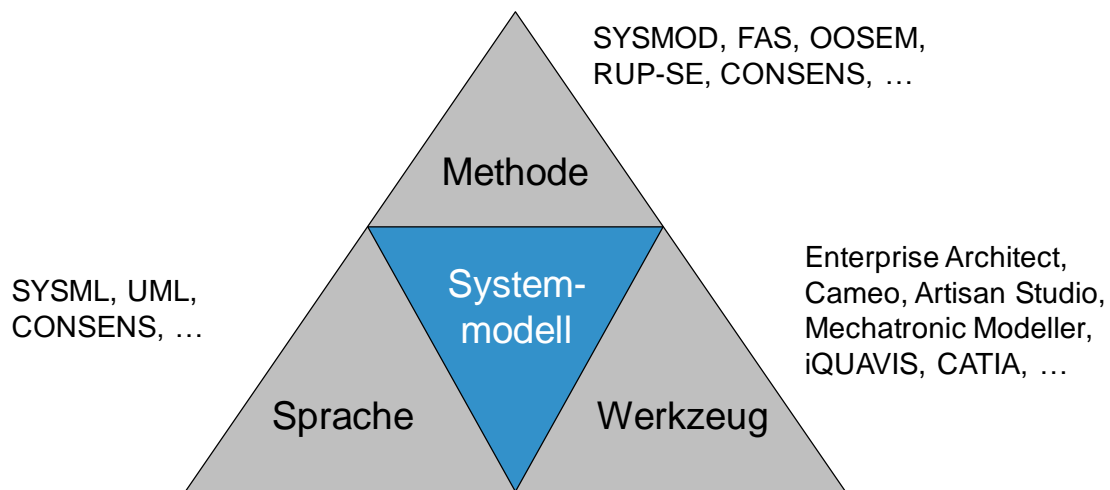


Bild 2-13: Bestandteile zum Erstellen eines Systemmodells im Sinne von MBSE nach [IKD+13, S. 339], [Kai14, S. 26]

Modellbasiertes Systems Engineering ist dabei als die formalisierte Anwendung der Modellierung, um die Aktivitäten zu Systemanforderungen, Architektur, Analyse, Verifikation und Validierung zu Beginn der konzeptionellen Architekturphase über die Entwicklung bis hin zu den späteren Phasen des Systemlebenszyklus zu verstehen. [INC09] zitiert in [Wei14, S. 21]

Im Kontext des MBSE ist dabei das Systemmodell als Abbild eines realen oder noch zu entwickelnden Systems zu verstehen, wobei mittels Abstraktion nur die für einen defi-

nierten Zweck relevanten Attribute berücksichtigt werden. [Wei14, S. 22]

Zur Beschreibung eines Systemmodells sind eine Modellierungssprache, eine Methode und ein Softwarewerkzeug notwendig (vgl. Bild 2-13). Bild 2-13 stellt exemplarisch Methoden, Sprachen und Werkzeuge dar. [IKD+13, S. 337ff.], [Kai14, S. 26], [GDS+13]

Das **Systemmodell** dient als Verständigungsmittel zwischen Entwicklern der verschiedenen Fachdisziplinen (z. B. Mechanik, Elektrik/Elektronik, Softwaretechnik). Es enthält alle wesentlichen fachdisziplinübergreifenden Informationen über das System und beschreibt es disziplinunabhängig. Es bildet den Ausgangspunkt für die fachdisziplinspezifische Ausarbeitung und dient dem Informationsaustausch sowie der Koordination der Entwicklungstätigkeiten. [GDS+13], [IKD+13, S. 337ff.]

Mit dem Systemmodell soll die horizontale und vertikale Konsistenz gesichert werden. Horizontal meint dabei eine Abstraktions- bzw. Konkretisierungsstufe fachdisziplinübergreifend; vertikal meint entlang der Achse Abstraktion bis zur Konkretisierung. Weiterhin werden mithilfe des Systemmodells frühzeitige Analysen möglich. [GDS+13]

Die Modellierung ist dabei eine Schlüsseltechnologie bei der Entwicklung komplexer Systeme. Grund ist die Komplexität mit all ihren interdisziplinären Abhängigkeiten, die von einer einzelnen Person nicht mehr bewältigt werden kann. [Wei14, S. 21]

Die **Methode** legt fest, welche Aspekte des Systems zu welchem Zeitpunkt und Zweck spezifiziert werden [IKD+13, S. 337ff.]. Im Kontext des MBSE besteht eine Methode aus Techniken zur Durchführung einer Aufgabe, d.h. sie definiert das „wie“ jeder Tätigkeit [Est08].

Die **Sprache** legt fest, welche Informationen in einem Systemmodell in welcher Form spezifiziert werden [IKD+13, S. 337ff.]. Die Modellierungssprache sollte dabei unabhängig von spezifischen Disziplinen wie z. B. Software oder Mechanik sein [Wei14, S. 309]. Dadurch soll erreicht werden, dass die Modelle von allen beteiligten Experten gelesen werden können.

Das **Werkzeug** sorgt für die erfolgreiche Umsetzung des MBSE-Ansatzes mit dem sich Systemmodelle auf Basis der gewählten Modellierungssprache und im Rahmen der gewählten Methode erstellen lassen [IKD+13, S. 337ff.].

2.3.3.3 Spezifikationstechnik CONSENS

Die Spezifikationstechnik CONSENS ist eine fachdisziplinübergreifende Spezifikationstechnik und verfolgt das Ziel der disziplinübergreifenden Beschreibung des Systemmodells im Sinne des MBSE. Sie besteht aus einer Modellierungssprache und einer zugehörigen Methode. Sprache und Methode sind dabei stark aufeinander abgestimmt. [IKD+13, S. 337ff.]

Die Spezifikationstechnik CONSENS (CONceptual design Specification technique for the Engineering of mechatronic Systems) wurde am Heinz-Nixdorf Institut im Rahmen

des Sonderforschungsbereiches 614 *Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus* zur Konzipierung von selbstoptimierenden Systemen erarbeitet [GRS09, S. 156]. Selbstoptimierende Systeme schließen dabei mechatronische Systeme mit ein [GRS09, S. 155]. CONSENS wird seitdem stetig weiterentwickelt und die Nutzbarkeit der Spezifikationstechnik für weitere Aufgaben erforscht. Insbesondere die frühzeitige Phase der Konzipierung mechatronischer Systeme wird mit CONSENS, sowohl für die *Produktkonzeption* als auch für die zugehörige *Produktionssystemkonzeption*, unterstützt. Diese frühzeitige Phase der Konzipierung entspricht dabei dem Systementwurf im V-Modell der Produktentwicklung (vgl. Kapitel 2.3.2). Die Stärke von CONSENS ist die zugrundeliegende ingenieurorientierte Methode, die sich in zahlreichen Industriekooperationen bewährt hat [IKD+13, S. 337ff.], [GLL12].

GAUSEMEIER ET AL. beschreiben die Spezifikationstechnik CONSENS zur frühzeitigen Konzipierung mechatronischer Systeme in zahlreichen Literaturstellen (z. B. [Fra06] [GFD+08a], [GFD+08b], [GRS09], [GFD+09], [Gau10], [GBR10], [Nor12], [GLL12], [GRS+14], [GRS14]). Sie wird nachfolgend zusammenfassend dargestellt:

Prinziplösung eines mechatronischen Systems – Produktkonzeption

Die Prinziplösung eines mechatronischen Systems unterteilt sich in mehrere Partialmodelle (Bild 2-14). Die Produktkonzeption besteht dabei aus sieben Partialmodellen: Umfeld, Anwendungsszenarien, Anforderungen, Funktionen, Wirkstruktur, Gestalt und Verhalten. Es handelt sich dabei um Auszüge einer Prinziplösung eines Pedelecs. Insbesondere für selbstoptimierende Systeme kann zusätzlich das Partialmodell Zielsystem existieren.

Das **Umfeldmodell** beschreibt wie das zu entwickelnde System in sein Umfeld eingebettet ist. Dazu wird das System zunächst als Black Box betrachtet. Es wird mit den Elementen seines Umfeldes, mit denen es interagiert bzw. von denen es beeinflusst wird, in Beziehung gesetzt. Benutzer und die Umwelt sind Beispiele für Elemente des Umfelds. Umgebungstemperaturen und Vibrationen sind Beispiele für Einflüsse.

Die **Anwendungsszenarien** stellen eine situationsspezifische Sicht auf das in der Prinziplösung beschriebene System dar. Die Umfeldelemente sowie deren Interaktion mit dem zu entwickelnden System bilden dabei den Ausgangspunkt. Die Anwendungsszenarien charakterisieren Betriebssituationen, für die das System auszulegen ist. Weiterhin spezifizieren sie in welcher Art und Weise sich das System in dieser Situation bzw. Zustand verhalten soll. Anwendungsszenarien charakterisieren somit das zu lösende Problem für einen bestimmten Fall und unterstützen dabei die Aufnahme der Anforderungen und Identifikation der Betriebsmodi.

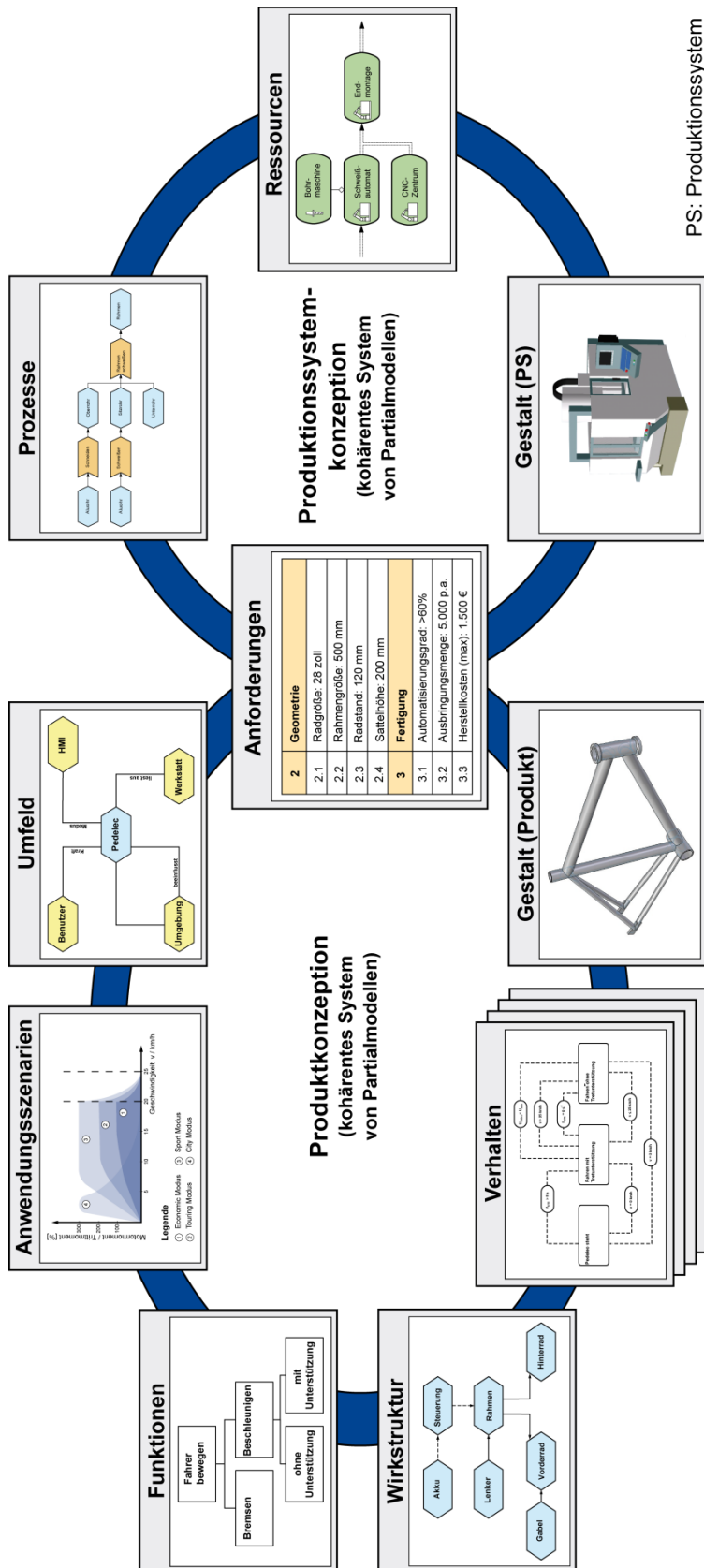


Bild 2-14: Partialmodelle zur domänenübergreifenden Beschreibung der Prinzipiölung mechatronischer Systeme und der Produktionssysteme nach [GLL12, S. 90], [GDK+11],[KNT09, S. 32] und [Nor12, S. 77]

Die **Anforderungen** ergeben sich aus der Aufgabenstellung und der Analyse der Partialmodelle Umfeld und Anwendungsszenarien. Die Anforderungen werden in einer Anforderungsliste strukturiert gesammelt. Die Anforderungen gelten während der Produktentwicklung als „Messlatte“ für das zu entwickelnde Produkt, der es genügen muss. Zusätzliche Hilfestellungen bei der Aufstellung von Anforderungslisten geben Checklisten wie z. B. nach [PBF+07], [Rot00] und [Ehr09] beschrieben.

Im Partialmodell **Funktionen** werden die Funktionen des zu entwickelnden Systems hierarchisch in der Funktionshierarchie aufgegliedert. Die Funktionen werden dazu aus den Anforderungen abgeleitet und beschreiben lösungsneutral allgemeine und gewollte Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen. Ziel ist dabei die Erfüllung einer Aufgabe. Die Funktionshierarchie untergliedert bzw. strukturiert die Gesamtfunktion des Systems in Teilfunktionen und wird dabei als Kreativitätstechnik eingesetzt. Eine Untergliederung in weitere Subfunktionen erfolgt dabei so lange, bis sinnvolle Lösungen gefunden werden. Die Erstellung der Funktionshierarchie kann dabei durch Funktionskataloge (z. B. in [Bir80] und [Lan00]) unterstützt werden.

Die **Wirkstruktur** bildet die grundsätzliche Struktur und die prinzipielle Wirkungsweise des Systems inklusive aller vorausgedachten Systemkonfigurationen ab. Die Modellierung der Wirkstruktur basiert auf der Funktionshierarchie. Dazu werden Lösungen für die beschriebenen Teilfunktionen gesucht, beispielsweise in Form von Wirkprinzipien oder Lösungselementen. Die Suche von Lösungen kann durch Methoden wie den Morphologischen Kasten unterstützt werden (vgl. z. B. [PBF+07]). Wirkprinzipien beschreiben den Zusammenhang zwischen physikalischem Effekt und den stofflichen sowie geometrischen Merkmalen (vgl. [PBF+07]). Lösungselemente können dabei realisierte und bewährte Lösungen darstellen, wie z. B. Module, Bauteile oder Softwarekomponenten. Die identifizierten Lösungen werden in der Wirkstruktur miteinander in Beziehung gesetzt. Systemelemente beschreiben die einzelnen Bestandteile des Systems (vgl. blaue Sechsecke in Bild 2-14). Abhängig vom Konkretisierungsgrad kann es sich bei den Systemelementen um abstrakte Wirkprinzipien, Muster der Softwaretechnik, Module, Bauteile oder Softwarekomponenten handeln. Die Wechselwirkungen zwischen den Systemelementen werden durch Stoff-, Energie-, Informationsflüsse und logische Beziehungen beschrieben. Das zuvor im Umfeldmodell als Black Box betrachtete System wird dabei in der Wirkstruktur detailliert. Die Einflüsse der Umfeldelemente werden bei der Modellierung der Wirkstruktur berücksichtigt. Die Systemelemente werden im Verlauf der Konzipierung weiter konkretisiert und detailliert. Dadurch ergibt sich eine Hierarchisierung des Systems. Weiterhin wird das System auf Basis der Wirkstruktur modularisiert. Die Modularisierung kann unter funktionalen, baulichen oder fertigungstechnischen Gesichtspunkten erfolgen.

Die **Gestalt** enthält Angaben über Anzahl, Form, Lage, Anordnung und Art der Wirkflächen und Wirkorte des Systems. Weiterhin können Hüllflächen und Stützstrukturen beschrieben sein. Die Gestalt wird aufbauend auf der Wirkstruktur spezifiziert. Die Gestalt bildet im klassischen Maschinenbau zusammen mit der Wirkstruktur den Kern der Prinziplösung.

Das Partialmodell **Verhalten** beschreibt das Verhalten des Gesamtsystems bzw. von Teilen des Systems. Es spielt bei der Modellierung von mechatronischen Systemen eine wesentliche Rolle. Die in diesem Partialmodell beschriebenen Informationen bilden den Ausgangspunkt für den Software- und Reglerentwurf. Es werden die Systemzustände mit den verbundenen Ablaufprozessen und den Zustandsübergängen modelliert (Zustandsdiagramm und Aktivitätsdiagramm). Abhängig von der Entwicklungsaufgabe sind darüber hinaus weitere Arten von Verhalten wie Kinematik, Dynamik oder die elektromagnetische Verträglichkeit der Systemkomponenten zu spezifizieren. In zahlreichen Anwendungen der Spezifikationstechnik CONSENS hat sich gezeigt, dass die Modellierung des Verhaltens bei der erstmaligen Konzipierung eines Systems nicht notwendig ist und auch erst zu einem späteren Zeitpunkt geschehen kann.

Vorgehensmodell für die Konzipierung des Produktes

Die Partialmodelle sind im Wechselspiel zu bearbeiten, wenngleich es eine gewisse Reihenfolge gibt. Das Vorgehensmodell für die Konzipierung stellt diese Reihenfolge dar. Anhand des generischen Prozesses für die Konzipierung werden die notwendigen Schritte zur Erstellung der Prinzipiellösung illustriert (vgl. Bild 2-15). Dabei wird dargestellt, welche Informationen die Entwickler aus einem Partialmodell extrahieren, in die weiteren Partialmodelle transferieren und welche Informationen sie dem jeweiligen Partialmodell hinzufügen. Das grundsätzliche Vorgehen der Phase Konzipieren gliedert sich in mehrere Unterphasen.

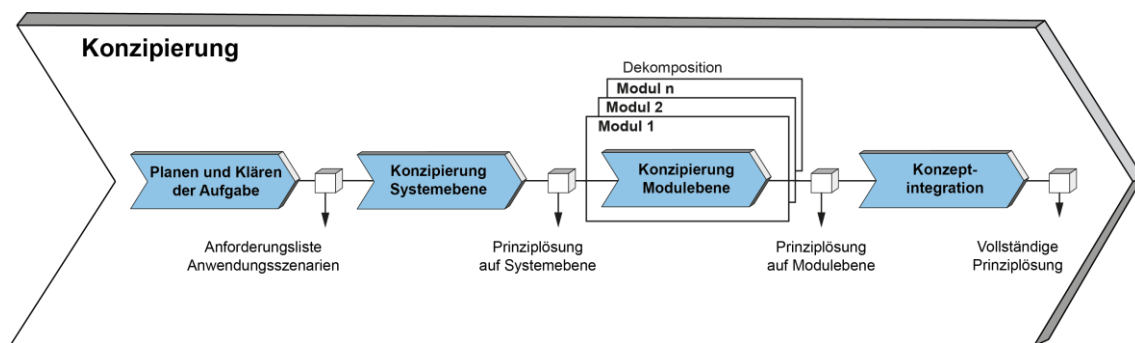


Bild 2-15: Vorgehen bei der Konzipierung mechatronischer Systeme [Gau10, S.61]

Im Prozessschritt **Planen und Klären der Aufgabe** wird die Aufgabenstellung identifiziert und die sich daraus ergebenden Anforderungen an das zu entwerfende System erarbeitet (vgl. Bild 2-16). In der Aufgabenanalyse wird zunächst die Aufgabe abstrahiert und der Kern der Entwicklungsaufgabe identifiziert. Davon ausgehend wird eine Umfeldanalyse durchgeführt. In ihr werden die wichtigsten Randbedingungen und Einflüsse auf das System ermittelt. Nachfolgend werden konsistente Kombinationen von Einflüssen gebildet, die als Situationen bezeichnet werden. Aus der Kombination von charakteristischen Situationen und Systemzuständen ergeben sich die Anwendungsszenarien. Sie beschreiben einen Ausschnitt der Gesamtfunktionalität des zu entwickelnden

Systems. Das Ergebnis dieser ersten Phase ist die Anforderungsliste, in der alle Forderungen und Wünsche dokumentiert sind.

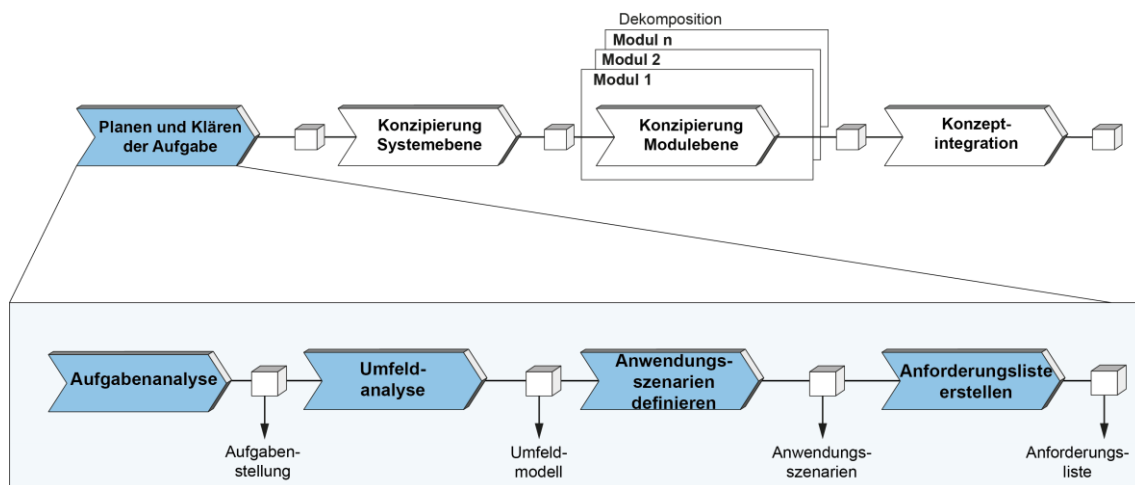


Bild 2-16: Konzipierungsphase „Planen und Klären der Aufgabe“ [Gau10, S. 63]

Im Prozessschritt **Konzipierung auf Systemebene** wird, ausgehend von den zuvor ermittelten Anforderungen an das System, eine Prinziplösung für das gesamte mechatronische System erarbeitet. Dazu werden in einem ersten Schritt die Hauptfunktionen aus den Anforderungen abgeleitet und in einer Funktionshierarchie dargestellt. Daraufhin wird für jedes Anwendungsszenario eine Lösung entwickelt. Dazu wird die Funktionshierarchie modifiziert, indem irrelevante Funktionen ausgeblendet werden und spezifische Teilfunktionen hinzugefügt werden. Zur Realisierung der in der Funktionshierarchie dokumentierten Funktionen werden Lösungsmuster gesucht, die in einen Morphologischen Kasten eingetragen werden. Die ausgewählten Lösungen können dabei bewährte und realisierte Lösungselemente sein oder abstrakte Lösungsmuster. Die Suche nach Lösungsmustern kann durch Lösungsmusterkataloge unterstützt werden (z. B. in [Sch06] oder [GZF+07]). Die Ermittlung sinnvoller Kombinationen von Lösungsmustern aus dem Morphologischen Kasten kann mittels Konsistenzanalysen durchgeführt werden (vgl. z. B. [Köc04]). Das sich daraus ergebende Bündel von Lösungsmustern bildet die Grundlage für die Entwicklung der Wirkstruktur, indem die Lösungsmuster zu Systemelementen konkretisiert werden. Die Systemelemente enthalten erste grobe Angaben über die Gestalt. So kann ausgehend von der Wirkstruktur eine initiale Baustruktur entwickelt werden. Weiterhin soll in dieser Phase das Systemverhalten grob modelliert werden. Im Wesentlichen werden hierbei die Aktivitäten, Zustände, Zustandsübergänge des Systems sowie die Kommunikation und Kooperation mit anderen Systemen bzw. Subsystemen modelliert. In zahlreichen Anwendungen der Spezifikationstechnik CONSENS hat sich gezeigt, dass die Modellierung des Verhaltens bei der erstmaligen, groben Konzipierung eines Systems nicht zwangsweise für jede Aufgabenstellung notwendig ist und auch erst zu einem späteren Zeitpunkt geschehen kann. Die für die Anwendungsszenarien erarbeiteten Lösungen werden abschließend zusammengeführt. Dabei ist darauf zu achten, dass funktionsfähige Konfigurationen entstehen. Die vollständig spezifizierte Prinziplösung des mechatronischen Systems auf Systemebene

ist das Ergebnis der Phase.

Der beschriebene Ablauf ist dabei nicht als stringente Folge von Prozessschritten zu sehen, sondern durch zahlreiche Iterationen gekennzeichnet, die im Bild nicht dargestellt sind. Die Sichtweisen der beteiligten Domänen werden durch die ganzheitliche Beschreibung der Prinzipiellösung zusammengeführt, wodurch ein einheitliches Systemverständnis entsteht.

Beim Übergang zwischen den Funktionen zu geeigneten Lösungen kann mithilfe von Lösungsmustern unterstützt werden (vgl. [GRS09, S. 172], [GTS14] und [Ana16]).

Im Prozessschritt **Konzipieren auf Modulebene** werden die einzelnen Module des Gesamtsystems detaillierter betrachtet. Für jedes Modul werden Prinzipiellösungen erarbeitet. Das Vorgehen entspricht dabei der Konzipierung auf Systemebene, angefangen mit dem Planen und Klären der Aufgabe. Diese detailliertere Betrachtung ist notwendig, um Aussagen über die technische und wirtschaftliche Realisierbarkeit der gefundenen Lösungen treffen zu können. Ergebnis der Phase ist die Prinzipiellösung auf Modulebene.

Im Prozessschritt **Konzeptintegration** werden die Prinzipiellösungen der Module zu einer detaillierteren Prinzipiellösung des Gesamtsystems integriert. Die Lösungen werden dazu auf Widersprüche analysiert. Es folgt eine technisch-wirtschaftliche Bewertung der gefundenen Lösung. Das Ergebnis der Phase ist die Prinzipiellösung des Gesamtsystems. Sie ist der Ausgangspunkt der anschließenden Konkretisierung in den einzelnen Domänen (Mechanik, Elektrotechnik/Elektronik, Regelungstechnik, Softwaretechnik). Die Ausarbeitung in den Domänen findet anschließend parallel statt.

Prinzipiellösung des mechatronischen Systems – Integrative Produktionssystemkonzeption

Eine frühzeitige integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystem kann mithilfe der Spezifikationstechnik CONSES durchgeführt werden (vgl. Bild 2-14). Sie ermöglicht die frühzeitige Einbindung der beteiligten Fachdisziplinen, zu denen neben der Mechanik, Elektrotechnik, Regelungstechnik und Softwaretechnik auch die Produktion zählt. Da die Fertigungstechnologien im hohen Maße das Produktkonzept beeinflussen, müssen diese Fachdisziplinen von Beginn an im Wechselspiel, d.h. integrativ, entwickeln. Der erste Ansatzpunkt dafür ist die Konzipierung, dessen Ergebnis die Prinzipiellösung des Produktes ist. Bei der integrativen Entwicklung beschreibt die Prinzipiellösung zusätzlich zum Produktkonzept den grundsätzlichen Aufbau und die Wirkungsweise des zugehörigen Produktionssystems und deren Wechselwirkungen (vgl. Bild 2-14). Die Prinzipiellösung von Produkt und Produktionssystem bilden dabei den Ausgangspunkt für die weitere Entwicklung und bieten die Grundlage der Kommunikation und Kooperation der Fachleute aus den einzelnen Domänen entlang des Entwicklungsprozesses. Auf Basis des Produkt- und Produktionssystemkonzeptes können dabei frühzeitige Analysen wie z. B. zu Kosten und Robustheit durchgeführt werden. Ziel der integrativen Konzipierung ist die Vermeidung von aufwändigen Iterationsschleifen im Entwicklungsprozess. [GBR10, S. 711ff.], [GLL12], [Nor12]

Im Partialmodell **Anforderungen** werden, zusätzlich zu den Anforderungen an das Produkt, auch Anforderungen an das Produktionssystem gesammelt. Diese ergeben sich aus Umfeld, Anwendungsszenarien und der Aufgabenstellung. Hilfestellung beim Aufstellen von Anforderungslisten können dabei Checklisten geben (vgl. [PBF+07], [Rot00], [Ehr09] zitiert in [GLL12]).

Den Ausgangspunkt bei der Konzipierung des Produktionssystems bilden die Partialmodelle Anforderungen, Wirkstruktur und Gestalt. Fertigungsanforderungen werden aus der Anforderungsliste gefiltert. Die Wirkstruktur und erste Gestaltinformationen werden dazu benutzt, das Produktkonzept in eine gestaltorientierte Struktur zu überführen (vgl. [Ste07], [GBK10] zitiert in [GLL12]). Dazu werden die zu fertigenden Bestandteile der Wirkstruktur identifiziert (Module, Bauteile, Baugruppen).

Im Partialmodell **Prozesse** wird eine erste Montage und Fertigungsreihenfolge ermittelt. Die Prozesse beschreiben den Produktionsablauf als Folge von Arbeitsvorgängen. Dies können Herstellungs-, Montage- und Transportvorgänge sein. Die Prozesse werden dabei durch die zu erfüllenden Funktionen sowie weitere Attribute (Prozessparameter) beschrieben. Im Laufe der Ausarbeitung des Produktentwurfs werden die Prozessschritte detailliert und konkretisiert.

Das Partialmodell Prozesse bildet den Kern der Produktionssystemkonzeption. Es ermöglicht die frühzeitige Identifikation von Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem. Fertigungsrestriktionen können so frühzeitig in die Produktentwicklung mit einfließen. Das Partialmodell Prozesse bildet weiterhin die Grundlage für die Arbeitsablaufplanung (vgl. Kapitel 2.2) im Zuge der Konkretisierung. Die enthaltenen Informationen können z. B. für die Erstellung von Arbeitsplänen oder Stücklisten verwendet werden.

Im Partialmodell **Ressourcen** werden den einzelnen Prozessen Ressourcen zugeordnet, wobei es möglich ist, dass eine Ressource mehrere Prozesse ausführt. Ressourcen können dabei z. B. Sachmittel und Personal sein [DIN69901-5, S. 17]. Im Ressourcendiagramm werden die Ressourcen dargestellt und durch Materialflüsse miteinander verbunden. Diese werden aus der Verkettung der Prozessschritte abgeleitet. Konkretisiert werden die Ressourcen durch Parameter und Gestaltinformationen. Die Informationen im Partialmodell Ressourcen bilden den Ausgangspunkt für die Konkretisierung im Rahmen der Arbeitsmittelplanung (vgl. Kapitel 2.2).

Zur **Gestalt des Produktionssystems** werden analog zur Produktentwicklung bereits während der Produktionssystemkonzipierung erste Festlegungen getroffen. Unter Gestalt werden dabei Arbeitsräume und Platzbedarf von Maschinen oder Wirkflächen von Handhabungseinrichtungen verstanden. Diese werden in Form von Flächenbedarfen, Skizzen oder 3D-CAD-Modellen gespeichert und den Ressourcen zugewiesen. Diese Gestaltinformationen sind für die Konkretisierung des Produktionssystemkonzeptes notwendig. Diese finden insbesondere im Rahmen der Arbeitsstättenplanung und der Arbeitsmittelplanung Verwendung (vgl. Kapitel 2.2).

Generelles Vorgehensmodell für die integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystem

Das generelle Vorgehen der integrativen Produkt- und Produktionssystemkonzipierung mithilfe der Spezifikationstechnik CONSENS ist in Bild 2-17 dargestellt. Das Vorgehen und die Phasen der Produktkonzipierung entsprechen dabei der bereits erläuterten Darstellung aus Bild 2-14. Ausgehend von der Prinziplösung des Produktes auf Systemebene erfolgt die auf das Produktkonzept abgestimmte Konzipierung des Produktionssystems mit den Hauptphasen *Planen und Klären der Aufgabe*, *Konzipierung auf Prozessebene* und *Konzipierung auf Ressourcenebene*.

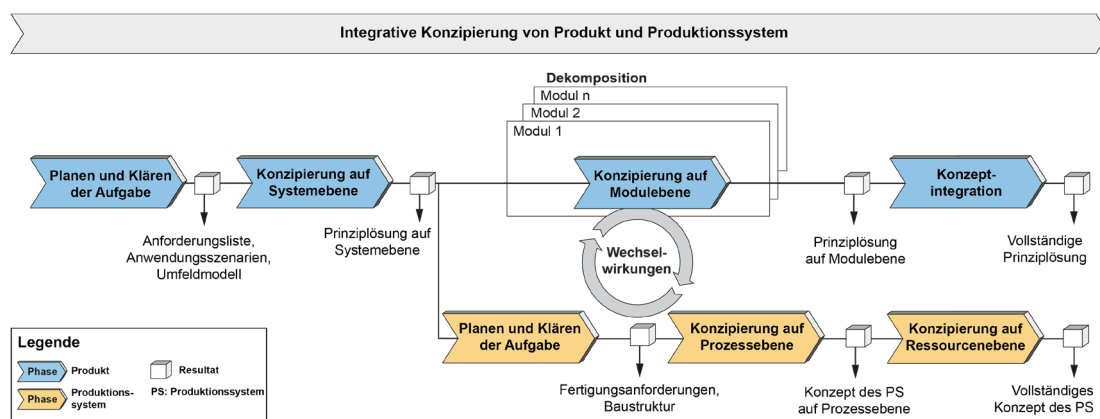


Bild 2-17: Generelles Vorgehensmodell für die integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystem [GDK+11], [Nor12, S. 99]

Im Prozessschritt **Planen und Klären der Aufgabe** wird die Entwicklungsaufgabe analysiert. Die Anforderungsliste wird dazu auf die fertigungsrelevanten Anforderungen reduziert (z. B. Stückzahlen, Anzahl Varianten, Gesamtgewicht, Maße). Danach wird mit Hilfe der Wirkstruktur und der Informationen aus dem Partialmodell Gestalt die Baustuktur des Produktes aufgestellt und analysiert. Das Ziel ist dabei, die gestaltbehafteten Systemelemente und ihre strukturelle Verbindung zu identifizieren. Als Resultate dieser Phase liegen eine Liste an Fertigungsanforderungen und die Baustuktur vor.

Im Prozessschritt **Konzipierung auf Prozessebene** wird das Partialmodell Prozesse erarbeitet. Die Wahl der Fertigungstechnologien erfolgt dabei parallel und in enger Abstimmung mit der Konzipierung des Produktes auf Modulebene, da die Fertigungstechnologien die Wahl der Werkstoffe und die Festlegung der Struktur und der Gestalt der Module beeinflussen. In der anderen Richtung werden durch die Detaillierung des Systems auf Modulebene neue Informationen für die Konzipierung des Produktionssystems erzeugt. Als Resultat dieser Phase liegt ein Konzept des Produktionssystems auf Prozessebene, d.h. im Wesentlichen die Arbeitsfolge, vor.

Im Prozessschritt **Konzipierung auf Ressourcenebene** wird das Partialmodell Ressourcen erstellt. Das Partialmodell Ressourcen ist dabei notwendig, um die Anord-

nungsstruktur des Produktionssystems zu ermitteln. Die Auswahl der Ressourcen hängt dabei von den Fertigungsanforderungen sowie der Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Konfiguration ab. Konfigurationen können dabei durch die Zuordnung der Ressourcen zu den einzelnen Prozessen entstehen.

Der Detaillierungsgrad des Konzeptes ist abhängig vom Zeitpunkt der Entwicklung. Das Vorgehen ist dabei keine stringente Folge der dargestellten Schritte. Es ist vielmehr geprägt von mehreren Iterationen. Das Konzept wird dabei stetig konkretisiert. Anzahl und Reihenfolge der Iterationen hängen von der Komplexität des Produktes, den organisatorischen Rahmenbedingungen und dem individuellen Verhalten des Entwicklers ab. Es ist dabei auch möglich, dass Teile des Produktionssystems bereits grob auf Ressourcenebene spezifiziert wurden, wobei andere Arbeitsabläufe lediglich durch die Fertigungstechnologie beschrieben werden.

Werkzeug

Um die Spezifikationstechnik im Sinne des MBSE nutzen zu können, steht als Softwarewerkzeug der *Mechatronic Modeller* und das *SysML4CONSENS-Profil* zur Verfügung [IKD+13, S. 337ff.]. Als Werkzeuge können auch einfache Standard-Softwarewerkzeuge wie Powerpoint oder Visio von Microsoft eingesetzt werden.

Nutzung und Erweiterung der Spezifikationstechnik CONSENS

Die Spezifikationstechnik CONSENS wurde im Laufe der Zeit für vielfältige Aufgaben genutzt und teilweise erweitert. Beispiele dafür sind die frühzeitige Absicherung der Sicherheit und Zuverlässigkeit fortschrittlicher mechatronischer Systeme [Gau10], [Dor15], die frühzeitige Bewertung von Kosten und Robustheit [GLL12], die Spezifikation von Produktschutzmaßnahmen [Kli17], die Nutzung zur Identifikation von Selbstoptimierungspotential [Iwa17], die Nutzung als Kooperationskern für die Release-Planung [Küh17].

Die Erweiterung der Spezifikationstechnik CONSENS fand hauptsächlich am HEINZ NIXDORF INSTITUT und dem FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ENTWURFSTECHNIK MECHATRONIK IEM in Paderborn statt. Die Spezifikationstechnik CONSENS wird in zahlreichen Forschungs- und Industrieprojekten des Fraunhofer IEM verwendet und ist dabei Mittelpunkt des Leistungsangebotes „Mechatronische Systembeschreibung“ [Fra-ol].

2.3.4 Fazit und Einordnung

Für die Entwicklung mechatronischer Systeme besteht eine etablierte Entwicklungsmethodik in Form der VDI-Richtlinie 2206, die aufgrund der Komplexität dieser Produkte notwendig ist. Sie bildet dabei einen Leitfaden für die systematische Entwicklung. Die mechatronischen Systeme bestehen dabei oftmals aus Modulen, die selbst wiederum mechatronische Systeme darstellen können. Dem frühzeitigen Entwurf kommt aufgrund der beteiligten Fachdisziplinen und der Komplexität mechatronischer Produkte eine besondere Bedeutung bei. Hier soll bereits in Varianten des mechatronischen Systems

gedacht werden. Zur Beherrschung der Komplexität, insbesondere in der frühen Phase der Entwicklung, ist ein modellbasierter Ansatz der Beschreibung mechatronischer Systeme vorteilhaft. Modellbasiertes Systems Engineering wird dabei als Schlüsseltechnologie bei der Entwicklung mechatronischer Systeme gesehen. Die Spezifikationstechnik CONSENS liefert dazu eine Modellierungssprache und Methode für die Anwendung von MBSE zur Erstellung eines Systemmodells. Die zur Verfügung stehende Zeit zur Entwicklung verkürzt sich zunehmend. Die Verbesserung des Ablaufs in der Entwicklung mechatronischer Systeme soll dabei mit MBSE und der Entwicklungssystematik VDI 2206 erreicht werden – mit dem Ziel der Verkürzung der Entwicklungszeit bzw. des Entwicklungsaufwandes. Komplexe mechatronische Systeme durchlaufen dabei in der Regel mehrere V-Modell Makrozyklen. Abhängig von den Randbedingungen ergeben sich spezielle Verläufe von Entwurfs- bzw. Entwicklungsprozessen – speziell angepasst an die Projektbedürfnisse. Dies gilt besonders für die Anpassung des V-Modells an spezifische Randbedingungen eines Unternehmens oder Projektes. Insbesondere die Anzahl der zu durchlaufenden V-Modell Makrozyklen hängen dabei von der spezifischen Entwicklungsaufgabe ab.

Weiterhin erfordern mechatronische Produkte eine integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem, insbesondere in den frühen Entwurfsphasen. Ein ebenfalls modellbasierter Ansatz, der die Produkt- und Produktionssystemkonzipierung berücksichtigt, ist dabei sinnvoll. Die dabei entstehende Prinzipiellösung bildet den Ausgangspunkt für die weitere Entwicklung und bietet die Grundlage zur Kommunikation und Kooperation der Fachleute aus den einzelnen Disziplinen entlang des Entwicklungsprozesses. Durch die integrative Entwicklung wird die Verkürzung der Entwicklungszeit und eine frühzeitige Abstimmung von Entscheidungen ermöglicht. Die funktionale und räumliche Integration erfordert integrierte Mechanik- und Elektronik-Prüfungen in der Montage, um die einwandfreie Gesamtfunktion sicherzustellen. Die mechatronische Qualitätssicherung hat dabei eine hohe Bedeutung hinsichtlich der wirtschaftlichen Potentiale mechatronischer Produkte. Die Anbindung der Produktionssystementwicklung an die Produktentwicklung muss dabei für jedes Unternehmen situationsspezifisch ausgeprägt werden, ebenfalls abhängig von der Ausgangssituation des Unternehmens. Der Detaillierungsgrad des Produktionssystemkonzeptes ist dabei zusätzlich abhängig vom Zeitpunkt der Entwicklung. Es wird in mehreren Iterationen erarbeitet. Anzahl und Reihenfolge der Iterationen hängen dabei von der Komplexität des Produktes und den organisatorischen Rahmenbedingungen ab.

Die zu entwickelnde Systematik soll die etablierten Methoden und Vorgehensweisen für die Entwicklung mechatronischer Systeme berücksichtigen. Dabei soll systematisch vorgegangen werden. Die mechatronischen Systeme können dabei modular aufgebaut sein, was durch die zu entwickelnden Prüfmittel zu berücksichtigen ist. Die Systematik soll dabei eine modellbasierte Vorgehensweise bei der frühzeitigen Konzipierung unterstützen. Durch die Forderung nach immer kürzeren Entwicklungszeiten ergibt sich für die Systematik die Anforderung nach einer effizienten Vorgehensweise. Dazu muss der Entwurfsprozess an die herrschenden Randbedingungen bei der Entwicklung angepasst

werden können.

Die zu entwickelnde Systematik soll die integrative Entwicklung von mechatronischem Produkt und zugehörigem Produktionssystem ermöglichen. Dabei soll insbesondere in den frühen Phasen modellbasiert konzipiert werden. Prüfungen sind dabei in den Planungsprozess zu integrieren. Es soll dabei die Möglichkeit bestehen das Vorgehen situationsspezifisch an die Ausgangssituation des Unternehmens bzw. des jeweiligen Entwicklungsprojektes anzupassen. Das Vorgehen muss Iterationen zulassen, die abhängig von der Komplexität des Produktes und den organisatorischen Rahmenbedingungen sind.

2.4 Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung

Im Fokus dieser Arbeit soll die Synchronisation der Prüfmittelentwicklung mit der Produktentwicklung, aber auch in die Produktionssystementwicklung stehen. Die Prüfplanung bzw. deren Tätigkeiten sind zur Vorbereitung einer Prüfmittelentwicklung unerlässlich. Daher sind die Prüfplanung bzw. die Planung der Prüfungen nachfolgend dargestellt. Zunächst wird in Kapitel 2.4.1 die Konventionelle Prüfplanung beschrieben. Diese soll grundsätzlich unabhängig vom Fertigungstyp, Betriebsgröße und gefertigtem Produkt sein. Es ist allerdings zu erkennen, dass die Prüfung (mechanischer) Komponenten bzw. (Einzel-)Teile fokussiert wird. Daher wird in Kapitel 2.4.2 die Planung der Prüfungen von elektronischen Baugruppen beschrieben, die teilweise auch auf mechatronische Produkte abzielt. In Kapitel 2.4.3 wird die Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung für mechatronische Produkte im Kontext integrativer Entwicklungen erläutert, in der auch auf die Eigenheiten der mechatronischen Produkte und deren Prüfmittelentwicklung eingegangen wird.

2.4.1 Konventionelle Prüfplanung

Die VDI/VDE/DGQ-Richtlinie 2619¹² *Prüfplanung*¹³ beschreibt die Aufgabe der Prüfplanung als die Planung der Qualitätsprüfung im gesamten Produktionsablauf vom Wareneingang bis zur Auslieferung. Die Richtlinie ist dabei weitgehend unabhängig vom Fertigungstyp (Einzel-, Kleinserien- und Großserienfertigung), von der Betriebsgröße und den gefertigten Produkten. Wesentliches Ergebnis der Prüfplanung ist der

¹² Die Richtlinie ist 1985 veröffentlicht worden und 2001 inhaltlich überprüft und unverändert für weiter gültig erklärt worden. Sie wird auch heute noch viel zitiert [BS12, S. 814]. Beispiele für Literaturstellen, die Bezug auf die VDI/VDE/DGQ-Richtlinie 2619 *Prüfplanung* nehmen bzw. die Prüfplanung mit nahezu den identischen Inhalten darstellen sind: [PS10], [SP15], [Lin14], [Lin11], [BG14], [HTB03], [SB94], [Zel90], [Ber05], [Kla97], [Kri89], [Dut75], [Dut96], [DK05]. Insbesondere die Ziele der Prüfplanung und deren Aufgaben sind nahezu gleich beschrieben.

¹³ Alle wesentlichen prüfbezogenen Begriffe sind in Kapitel 2.1.3 erläutert bzw. definiert.

Prüfplan¹⁴. Durch die Prüfplanung werden unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten die Prüftätigkeiten und Prüfvorgänge nach Ort, Häufigkeit, Zeitpunkt und Fertigungsablauf sowie Art und Ausmaß der Qualitätsprüfung festgelegt. Im Sinne einer umfassenden Qualitätssicherung sind hierzu alle Funktionen des Unternehmens in die Planung einzubeziehen. Dabei ist für das Durchführen der Prüfplanung die Kenntnis der Funktion und Verwendung des Bauteils/Aggregates, des Fertigungsablaufes, der Fertigungsunterlagen, der technischen Unterlagen und der Prüfmittel erforderlich. Kenntnisse von qualitätsbeschreibenden Unterlagen (Qualitätsberichte, Fehlerkarten, Maschinenfähigkeitsuntersuchungen, **Erfahrungen aus anderen oder ähnlichen Produkten**) erhöhen die Wirtschaftlichkeit der Prüfplanung. Zur Durchführung der Prüfplanung soll sich mit den beteiligten Funktionsbereichen abgestimmt werden (z. B. Fertigungsplanung, Fertigungsmittelplanung, Fertigung, Qualitätsprüfung, Konstruktion). Es empfiehlt sich bei der Prüfplanung methodisch und rechtzeitig vorzugehen, um eine gesicherte Durchführung zu erreichen. [VDI2619, S. 2]

DUTSCHKE/KEFERSTEIN weisen ausdrücklich darauf hin, dass die Prüfplanung fachlich anspruchsvoll ist und nur in einem interdisziplinären Team lösbar ist. Es soll dabei sowohl das Know-how der Entwicklung und Konstruktion (Überlegungen aus funktionaler Sicht), der Produktion (Überlegungen aus Sicht des Produktionsprozesses), der Messtechnik (Überlegungen zur Messbarkeit und Messunsicherheit) als auch der Kunden (Überlegungen zur Transparenz, Abnahme, usw.) mit eingehen. Bei den Bereichen bzw. Abteilungen kann es sich um interne und externe Ansprechpartner handeln. [DK05]

Im Prüfplan sind alle Aktivitäten der Qualitätsprüfung in Art und Umfang für ein Produkt oder ein Teil in Art und Umfang festgelegt. Die Prüfplanung soll dabei bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung erfolgen. Da die Aufgaben untereinander Abhängigkeiten aufweisen, sollten sie in einer sinnvollen Reihenfolge abgearbeitet werden. Es werden in der Prüfplanung die Fragen beantwortet *was, wann, wie, wie viel, wo, wer* und *womit* geprüft wird bzw. die Frage nach den *Prüfdaten* beantwortet. Die Aufgaben bzw. Punkte und der grobe Ablauf der Prüfplanung sind nachfolgend dargestellt [VDI2619], [PS10, S. 107ff.]:

- 1) Bestimmung der Prüfplankopfdaten

Der Prüfplankopf enthält die organisatorischen Daten des Prüfplans. Diese sind dabei firmen- und projektspezifisch. Beispiele sind: Identifikationsnummer, Werkstücknummer, Zeichnungsnummer, Bearbeiter und ähnliches.

- 2) Auswahl der Prüfmerkmale

Die Auswahl der Prüfmerkmale nimmt eine zentrale Rolle in der Prüfplaner-

¹⁴ Der Prüfplan ist definiert als die „Spezifikation für ein oder mehrere Prüfungen“, wobei Prüfpläne je nach Sprachgebrauch der betreffenden Organisation verschiedene Elemente enthalten oder darauf verweisen, wie z. B. Prüfspezifikation, Prüfanweisung, Prüfablaufplan. [DIN55350-11]

stellung ein, da alle nachfolgenden Schritte davon beeinflusst werden. Es muss an dieser Stelle die Frage beantwortet werden *Was* geprüft werden soll. Die Prüfmerkmale müssen erkannt und auf ihre Prüfnotwendigkeit hin bewertet werden. Zur Identifikation potenzieller Prüfmerkmale können Daten aus Konstruktionszeichnung, Prozess-FMEA, Maschinenwerte, Arbeitsplänen, Schadensberichten, Reklamationen und Kostendaten herangezogen werden. Zusätzliche Erkenntnisse können Gespräche mit Konstrukteuren, Herstellern und Anwendern des Bauteils liefern. Mit der Komplexität des Bauteils steigt dabei der Bedarf an Informationen über potentielle Prüfmerkmale. Sind diese erkannt erfolgt eine Beurteilung der Prüfnotwendigkeit mit dem Ziel, die Prüfkosten zu minimieren aber auch die Produktqualität sicherzustellen. Sicherheitsrelevante Merkmale sind hierbei von vornherein als notwendige Prüfmerkmale anzusehen. Entscheidungskriterien für die Prüfung eines Merkmals sind dabei: Funktion des Produktes, Kundenforderungen, Sicherheit des Fertigungsprozesses, Art der Weiterverarbeitung, Ort der Fertigung (Eigen- oder Fremdfertigung) und Kosten (z. B. Folgekosten/Prüfkosten). Prüfmerkmale können dabei physikalische, chemische, funktionelle oder auch optische Merkmale sein.

3) Festlegung der Prüfzeitpunkte

Der Prüfzeitpunkt legt fest *Wann* im Fertigungsprozess bzw. in welchem Prozessschritt eine Prüfung durchgeführt werden soll. Eine rechtzeitige Prüfung kann dazu beitragen, dass in den weiteren Fertigungsprozessen nicht „Schrott“ veredelt wird. Wird diese Zwischenprüfung übertrieben oder findet sie zu spät statt, so fallen unnötige Kosten an. Gründe dafür sind z. B. lange Lager- oder Pufferzeiten bis zur Prüfung, die die Lieferzeiten verlängern. Es muss dabei beachtet werden, dass einige Teile im eingebauten Zustand nicht mehr zugänglich sind und somit nicht mehr geprüft werden können. Zur Auswahl des Zeitpunktes kommen dabei die folgenden Kriterien zum Tragen: Prüfkosten, Schadensrisiko, Zugänglichkeit der Prüfstelle, Wertzuwachs des Produktes, Kostenstellenwechsel, Totzeit etc..

4) Festlegung der Prüfmethode

Die Prüfmethode legt fest *Wie* geprüft wird. Es wird grundsätzlich zwischen Attributiv- und Variablenprüfung unterschieden. Eine Attributivprüfung liefert lediglich das Ergebnis gut/schlecht (vgl. [DIN40080] zitiert in [PS10, S. 115]). Eine Attributivprüfung kann z. B. mit einer Lehre durchgeführt werden. Eine Variablenprüfung ermittelt quantitative Merkmale (vgl. [DIN3951] zitiert in [PS10, S. 115]). Beispiel für ein entsprechendes Prüfmittel ist ein Messschieber. Die Prüfmethode kann anhand der Kosten, der Einsetzbarkeit eines Prüfmittels und anhand des zu prüfenden Merkmals ausgewählt werden. Die Variablenprüfung ist dabei grundsätzlich der Attributivprüfung vorzuziehen, da mit ihr z. B. eine höhere statistische Aussagekraft erzielt werden kann.

5) Festlegung des Prüfumfangs

Der Prüfumfang legt fest *Wie viel* geprüft wird. Der Prüfumfang beeinflusst unmittelbar die Prüfkosten als auch die Fehlerkosten. Die Spannbreite des Prüfumfangs reicht dabei von keiner bzw. ausgesetzter (Skip-lot¹⁵) Prüfung bis zur 100 %-Prüfung¹⁶. Bei einer 100 %-Prüfung werden alle Teile geprüft. Insbesondere bei sicherheitsrelevanten Teilen ist dies wichtig. Stichprobenprüfungen werden nach genormten oder auch werksinternen Regeln durchgeführt (vgl. auch [DIN3951], [DIN2859-1] zitiert in [PS10, S. 116]). Der Prüfumfang kann dabei dynamisiert werden, abhängig von den jeweiligen Prüfungsergebnissen (vgl. [DIN2859-1] zitiert in [PS10, S. 116] und [PS10, S. 408ff.]). Die Bedeutung des zu prüfenden Merkmals für die Qualität des Produktes (kritisches Merkmal, Haupt- und Nebenmerkmal) und die Prozessfähigkeit ist bei der Festlegung des Prüfumfangs zu betrachten.

6) Festlegung von Prüfort

Der Prüfort legt fest *Wo* geprüft wird. Der Prüfort hängt dabei im Wesentlichen von den Prüfmerkmalen, den Prüfmitteln, dem Fertigungsfluss und auch den Teilgrößen ab. Der Fertigungsfluss sollte nach Möglichkeit durch die Prüfungen nicht unterbrochen werden. Dies kann z. B. durch abgestimmte Prüftakte oder Zwischenlager realisiert werden.

7) Festlegung von Prüfpersonal

Durch das Prüfpersonal wird festgelegt *Wer* prüft. Oftmals wird durch den Prüfort bereits das Prüfpersonal festgelegt. Aufwändige Messvorrichtungen können z. B. nur von Fachpersonal bedient werden. Allgemein sollte angestrebt werden die Prüfungen vom Fertigungspersonal selbst durchführen zu lassen (Werkerselbstprüfung). So können Fehler direkt durch den Werker behoben werden.

8) Auswahl der Prüfmittel

Durch die Auswahl des Prüfmittels wird bestimmt *Womit* geprüft wird. Dazu ist zunächst die Verfügbarkeit und Eignung von Prüfmitteln zu klären. Die wesentlichen Auswahlkriterien bilden dabei die Forderungen an die Prüfung, die Fähigkeit (Messunsicherheit) des Prüfmittels und die Toleranz des zu prüfen-

¹⁵ Bei einer Skip-lot-Stichprobenprüfung wird nach festgelegten Regeln (vgl. [DIN2859-3]) durch Verzicht auf die Prüfung eines Teils der Prüflose der Gesamtaufwand vermindert [DGQ93, S. 111].

¹⁶ Eine 100 %-Prüfung ist eine Qualitätsprüfung an allen Einheiten eines Prüfloses [DIN55350-17]. Eine 100 %-Prüfung wird verschiedentlich auch Stückprüfung genannt [DIN55350-17], [DGQ93, S. 108]. Werden bei einer 100 %-Prüfung sämtliche gefundenen fehlerhaften Einheiten aussortiert, so bezeichnet man dies als *Sortierprüfung*. Werden die Einheiten entsprechend den Ergebnissen zur weiteren Verwendung in Klassen eingeordnet, so wird dies auch Klassierprüfung (vgl. dazu auch [DIN55350-23], [VDA5, S.81f.]) genannt. [DIN55350-17]

den Merkmals. Weiterhin sind Anschaffungskosten, Kapazität (Zeitfaktor) oder ähnliches zu berücksichtigen.

9) Festlegung der Prüfanweisung

Die Prüfanweisung enthält z. B. in Form eines Prüftextes oder einer Prüfzeichnung ergänzende Informationen zu den auszuführenden Prüfaufgaben. Besonders bei komplexen und umfangreichen oder nicht andauernden Prüfaufgaben sind Prüfanweisungen erforderlich bzw. sinnvoll und erleichtern den reibungslosen Ablauf der Prüfung.

10) Festlegung der Prüfdokumentation/-datenverarbeitung

Die Prüfdokumentation legt fest welche Daten bei der Prüfung dokumentiert werden. Im Sinne einer wirtschaftlichen Verarbeitung von Prüfdaten sollen dabei nur die Daten gesammelt werden, aus denen auch Schlussfolgerungen gezogen werden können [VDI2619, S. 10]. PFEIFFER/SCHMITT schreiben dazu, dass eine Prüfung ohne Dokumentation und Auswertung wenig sinnvoll ist, da sonst die Daten ungenutzt verloren gehen und für spätere Anwendungen nicht mehr zur Verfügung stehen [PS10, S. 121]. Durch generelle Anweisungen wird festgelegt, ob und in welcher Form Prüfdaten gesammelt und weiterverarbeitet werden. Die Auswertung der Prüfdaten stellt dabei eine wesentliche Basis zur Rationalisierung interner Qualitätsregelkreise dar. Die Daten müssen dazu in geeigneter Form aufbereitet und zur Verhinderung von einem zu großen Datenaufkommen verdichtet werden, wobei eine Visualisierung die Handhabung der Daten erleichtert. Die Dokumentation der Prüfdaten kann dabei für interne und externe Zwecke genutzt werden. Externe Zwecke können dabei Vorschriften vom Gesetzgeber oder Vertragspartner sein. Besonders bei sicherheitsrelevanten Teilen z. B. in der Luftfahrt- oder Automobilindustrie herrschen strenge Auflagen die die Archivierung der Prüfergebnisse über mehrere Jahre fordern. Im Schadensfall ist so eine Rückverfolgbarkeit möglich. Interne Zwecke können die Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen, die Nutzung der Daten zur Prozessregelung bzw. zur Dynamisierung der Prüfungen sein. Zur Prüfdatenverarbeitung wird dabei oftmals eine EDV genutzt.

Die in Punkt zwei beschriebenen Prüfmerkmale können manchmal nicht aus den Unterlagen abgeleitet werden, die zum Produkt/Projekt zur Verfügung stehen. Beispielsweise stellt der Schiefzug beim Transportieren eines rechteckigen Blatt Papiers innerhalb einer Maschine ein wichtiges Merkmal zur Beurteilung der Qualität der Maschine dar (vgl. Bsp. in Kapitel 4.2.4.4). Am Anfang funktioniert die Maschine mit einem gewissen Schiefzug zunächst einwandfrei. Aus Erfahrungswerten ist bekannt, dass sich ein solcher Schiefzug über die Dauer der Nutzung verschlimmert und somit in der Zukunft zu Störungen führt. Daher ist der Schiefzug bei Auslieferung zu erfassen und sicherzustellen, dass dieser unterhalb einer gewissen Toleranzschwelle liegt. Die Erkennung des Schiefzuges ist keine Funktion der Maschine im eigentlichen Sinne. Somit kann das Prüfmerkmal *Schiefzug* nicht aus den Entwicklungsunterlagen etc. der Maschine abge-

leitet werden. Ein solches Prüfmerkmal kann also nur durch Erfahrungswissen der Mitarbeiter bzw. Stakeholder der Maschine erfragt werden, oder durch Analyse ähnlicher Produkte bzw. Vorgängerprodukte ermittelt werden. Eine gute Kooperation der Entwicklungsbeteiligten zur Auswahl der relevanten Prüfungen ist dabei von essentieller Bedeutung [For09].

In Bild 2-18 sind Informationsquellen zusammengetragen, die zur Prüfplanung und dabei insbesondere zur Prüfmerkmalsbestimmung genutzt werden können. Dabei werden auch Gespräche mit Konstrukteuren, Herstellern und Anwendern genannt. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine Reihe von Informationsquellen genutzt werden sollen. Diese Informationsquellen sind meist die vielfältigen Dokumentationen rund um den Prüfling aber auch Erfahrungswissen von Stakeholdern und Experten, die mit einbezogen werden sollen.

Informationsquellen zur Durchführung einer Prüfplanung		
Konstruktionszeichnungen bzw. -daten	Normen	Prüfdokumente
Kundenanforderungen bzw. Kundenwünsche	Richtlinien	Reklamationsdaten
Interne Anweisungen/ Betriebsvorschriften	Sicherheitsvorschriften	Schadensberichte
Stückliste	Verordnungen	Qualitätsdaten
Qualitätssicherungsvereinbarungen	System-FMEA Produkt bzw. Konstruktions-FMEA	Maschinen- und Prozess(fähigkeits)kennwerte
Produktmerkmale	Prozess-FMEA	Fertigungsunsicherheiten
Funktion(en) des Prüflings	Prüfberichte	Erfahrung des Prüfplaners
Verwendung des Prüflings	Lieferantenvereinbarungen und -bewertungen	Fertigungsplan, Fertigungsunterlagen
Technische Lieferbedingungen bzw. Bestellung	Vorhandene Prüfpläne	Wertschöpfungsstufen
Bestellunterlagen	Prüfmittel	Arbeitsplan
Auftragsdaten	Kostenstrukturen und -daten	Produktionsanforderungen
Technische Unterlagen	Gesetze/ Gesetzliche Vorschriften	Prozessinformationen
Gespräche mit Konstrukteuren, Herstellern, Anwendern

Bild 2-18: Informationsquellen, die zur Durchführung einer Prüfplanung und insbesondere der Prüfmerkmalsfindung genutzt werden können [VDI2619], [PS10], [Lin14], [Lin11], [Ber05]

Der Prüfplan kann ergänzend zum Arbeitsplan erstellt werden oder in den Arbeitsplan integriert werden [VDI2619]. EVERSHEIM stellt die Prüfplanung als Teil der Arbeitsablaufplanung dar, die Bestandteil der Arbeitsplanung ist (vgl. Bild 2-6). PFEIFFER/SCHMITT stellen die Prüfplanung parallel zur Arbeitsplanung dar (vgl. Bild 2-19) [PS10, S. 108].

Gemeinsam ist dabei den Quellen, dass die Prüfplanung klassischerweise mit der Arbeitsplanung einhergeht und nach der Entwicklung und Konstruktion stattfindet.

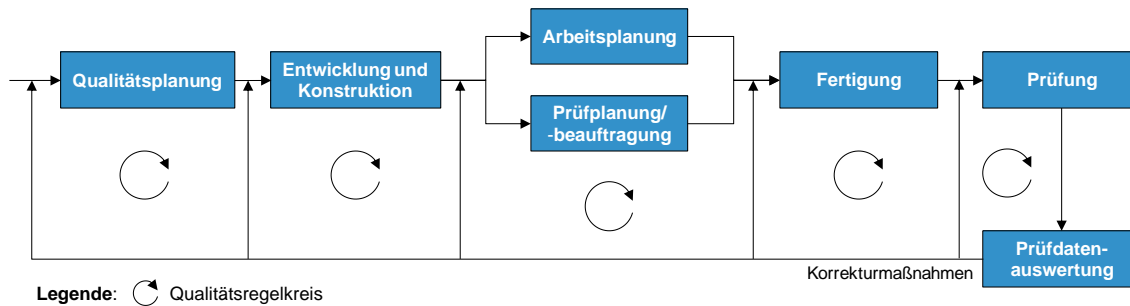


Bild 2-19: Innerbetriebliche Einordnung der Prüfplanung nach PFEIFFER/SCHMITT [PS10, S. 108]

SCHMITT/PFEIFFER ordnen die Prüfmittelplanung und -beschaffung sowie die Eignungsprüfung dem Prüfmittelmanagement zu. Die Prüfmittelplanung ist dabei verantwortlich für die anforderungsgerechte Auswahl und fristgerechte Beschaffung (Anschaffung bzw. Fertigung) der benötigten Prüfmittel. Die Prüfmittelplanung und -beschaffung beinhalten die Planung der Verwendung, Eigenschaften, Anforderungen, Spezifikationen und des Einsatzfeldes von Prüfmitteln als Teil der Fertigungsplanung und deren Beschaffung bzw. Eigenfertigung. Es sind dabei folgende Teilaufgaben zu lösen: Ermittlung des Prüfmittelbedarfs, Einsatzplanung, Beschaffung standardisierter Prüfmittel, Konstruktion und Fertigung nicht standardisierter Prüfmittel, Erstellen von Prüfanweisungen, Durchführung von Eignungsprüfungen, Verwendungsentscheide. Das Prüfmittel muss dabei dem Anwendungsfall entsprechend ausgewählt werden. [SP15, S. 236ff.]

DUTSCHKE beschreibt dazu die Notwendigkeit von Prüfmerkmalen Kriterien abzuleiten, die mit Kenngrößen des Prüfmittels verglichen werden sollen, um ein Prüfmittel auswählen zu können [Dut75].

LINß ordnet die Prüfmittelplanung der Prüfplanung zu, da alle Tätigkeiten, die im Zusammenhang mit der Vorbereitung von Prüfungen stehen, als Prüfplanung bezeichnet werden. In diesem Zusammenhang wird die Prüfmittelplanung auch als Planung der Prüfmittel für bestimmte festgelegte Prüfaufgaben bezeichnet. [Lin11, S. 298ff.]

Die Prüfmittelentwicklung ist in der Literatur nicht eindeutig einer Tätigkeit zuzuordnen. Meist wird sie den Aufgaben Prüfplanung, Prüfmittelplanung und -beschaffung bzw. Prüfmittelmanagement zugeordnet (vgl. z. B. [SP15, S. 236ff.], [Lin11, S. 298ff.]).

Unter der Prämisse, dass ein Prüfmittel neu bzw. für einen speziellen Zweck entwickelt werden muss, ist allerdings festzuhalten, dass eine Prüfplanung mit ihren Aufgaben unerlässlich ist, um eine Prüfmittelentwicklung zu ermöglichen. Nur so kann sichergestellt werden, dass das Prüfmittel dem Anwendungsfall entsprechend bzw. für die festgelegte Prüfaufgabe entwickelt wird und dabei die zu prüfenden Prüfmerkmale berücksichtigt werden.

Auch wenn die beschriebene Prüfplanung grundsätzlich unabhängig vom Fertigungstyp (Einzel-, Kleinserien- und Großserienfertigung), von der Betriebsgröße und den gefertigten Produkten sein soll, so lässt sich aus dem Kontext, den Anwendungsbeispielen und der Historie der Veröffentlichungen erkennen, dass die Prüfung (mechanischer) Komponenten bzw. Teile fokussiert wird.

WESTERMANN schreibt dazu, dass *„die herkömmliche Prüfplanung von der Teileprüfung und der dort gebräuchlichen Vorgehensweise geprägt“* ist [Wes91, S. 5]. Als Beispiele führt er die Fertigung von Zahnrädern und Thyristoren an. Nach seiner Ansicht weicht die Prüfaufgabe von mechatronischen Erzeugnissen aufgrund der Komplexität von der herkömmlichen Prüfplanung ab [Wes91, S. 6]. *„Auf komplexe mechatronische Geräte angewandt, versagt das Schema“* der konventionellen Prüfplanung [Wes91, S. 18]. Man muss sich daher bei der *„Prüfplanung für mechatronische Geräte vom herkömmlichen Denken lösen, dass bei einer Material- oder Teileprüfung angebracht ist“* [Wes91, S. 17]. Prüfverfahren, die für mechatronische Geräte angewandt werden, zielen meist nicht auf einzelne Prüfmerkmale oder bestimmte Einzelfehler, sondern sind globaler Natur [Wes91, S. 19]. Gemeint sind dabei z. B. Funktionsprüfungen, die gleich mehrere Merkmale beinhalten. Nur durch eine Kombination von Prüfverfahren kann die Qualität mechatronischer Produkte sichergestellt werden [Wes91, S. 17ff.].

REITER stellt dazu fest, dass die VDI 2619 auf die Fertigungstechnik ausgerichtet ist, in der die Auswahl von standardisierten Messmitteln wie z. B. Lehren im Vordergrund steht [Rei98, S. 37]. In der Montage elektromechanischer bzw. mechatronischer Produkte liegen die Schwerpunkte eher auf der Prüfung der Produktfunktionen [Rei98].

BALTERS stellt fest, dass die konventionelle Prüfplanung *„in erster Linie auf die mechanische Fertigung ausgerichtet ist und für die Elektronikproduktion ungeeignet“* ist. Er bemängelt dabei, dass die Prüfplanung erst viel zu spät, nach der Produktentwicklung beginnt. [Bal97, S. 49]

2.4.2 Planung der Prüfungen von elektronischen Baugruppen

Die Planung der Prüfungen hat auch für elektronische Baugruppen eine große Bedeutung. Die Qualität, die mit den Prüfungen sichergestellt wird, hat wesentlichen Einfluss auf den Gebrauchswert und prägt wesentlich die Wettbewerbsfähigkeit des Herstellers [VDI2428-5]. Wirtschaftliches Produzieren verlangt richtiges Prüfen während und nach

den einzelnen Fertigungsstufen, wobei die zunehmende Komplexität aufwändige Prüfeinrichtungen zur Folge hat, die fast immer mit erheblichen Investitionen einhergehen [VDI2428-5].

Die Planung der Prüfungen sind in der Regel wesentlicher Bestandteil bereits während der Entwicklung der Baugruppen (vgl. dazu [Ber12], [Sti10], [VDI90], [ABF10], [Bal97]). Damit unterscheidet sich diese Planung der Prüfungen deutlich von der konventionellen Prüfplanung (vgl. Kapitel 2.4.1), wo in der Regel die Prüfplanung erst nach der Entwicklung durchgeführt wird.

Um eine wirtschaftliche Produktionsprüfung von Leiterplattenbaugruppen sicherzustellen, muss die Prüfbarkeit jeder Leiterplattenbaugruppe von Beginn der Entwicklung an systematisch erzeugt werden [VDI2428-5].

Die Prüfplanung stimmt, in einem für heutige Produktentwicklungen üblichen Engineering-Prozess, mit der Produktentwicklung die zur Anwendung kommenden Prüfverfahren ab. Abhängig von den gewählten Prüfverfahren bzw. deren Kombination ergeben sich z. B. verschiedenste Anforderungen an die Schaltungs- und Layoutentwicklung. Die Effektivität der während des Produktionsprozesses eingesetzten Prüfverfahren wird so bereits im Stadium der Entwicklung des Produktlebenszyklus festgelegt. [ZVEI06]

Art und Umfang der Prüfungen werden dabei auch oftmals von der Entwicklung festgelegt. Dazu werden von der Entwicklung Fertigungsunterlagen und Prüfvorschriften erstellt. [Sti10]

Eine Optimierung der Prüfungen kann nur dann erfolgen, wenn entsprechende „Design for Testability“¹⁷-Maßnahmen (prüfgerechtes Design) berücksichtigt werden (vgl. auch [Sti10]). Zahlreiche Publikationen von Verbänden, Firmen, Buchautoren etc. geben Hinweise zum prüfgerechten Gestalten bzw. zum Design for Testability. Beispiele dafür sind: [VDI2428-5], [Rei13], [SPE1], [SPE2], [Ber12], [WWA06], [Bar13], [ABF10]. Aus den zahlreichen Publikationen zum prüfgerechten Gestalten lässt sich die Bedeutung der Integration der Planung der Prüfungen im Zuge der Entwicklung erkennen.

Für die Prüfung von bestückten Leiterplatten haben sich verschiedene Verfahren etabliert. Es können dabei zwei grundlegende Methoden unterschieden werden: optische und elektrische [Ber12].

Zu den **optischen Prüfverfahren** gehören z. B. MOI (Manuelle optische Inspektion), AOI (Automatische optische Inspektion), AXI (Automated X-Ray Inspection/Röntgeninspektion) in 2D, 2,5D und 3D [Ber12], [ZVEI06], [Sti10]. Vor allem die AOI lässt sich nach der Aufgabe der Prüfung weiter unterteilen. Es können dabei geprüft werden: der Aufdruck der Lötpaste (Scanner, Kamera 2D, Kamera 3D), Bauelementeplatzierung vor dem Löten (Scanner, Kamera 2D), Prüfung nach dem Löten (Scanner, Kamera 2D,

¹⁷ Im Bereich der Prüfungen von elektronischen Baugruppen wird oftmals der englische Begriff „Test“ anstatt das deutsche Wort „Prüfung“ verwendet.

Kamera 3D) [ZVEI06].

Oft werden bei der Leiterplattenbestückung mehrere optische Prüfverfahren kombiniert z. B. bei der SMD-Bestückung: Inspektion der aufgetragenen Lötpaste und danach die Inspektion der verlöteten Bauelemente auf der Leiterplatte.

Die Aussage eines optischen Prüfverfahrens ist, dass die Baugruppe funktionieren *müsste*. So kann beispielsweise nachgewiesen bzw. geprüft werden, ob es sich um das richtige Bauteil handelt, das an der richtigen Position bestückt wurde und korrekt verlötet wurde. Defekte in einem Bauteil oder Parameterabweichungen bleiben jedoch bei optischen Verfahren unentdeckt. [Ber12, S. 42]

Eine Zusammenstellung von Abnahmekriterien für die visuelle Inspektion für elektronische Baugruppen ist in der Richtlinie IPC-A-610F und den zugehörigen Richtlinien dargestellt, wobei die Richtlinie einen Standard zur Abnahme bei der Herstellung elektronischer Baugruppen bildet [IPC-A-610DE]. Diese Richtlinie ist der weltweit am meisten eingesetzte Standard, wenn es um die visuelle Beurteilung der Qualität elektronischer Baugruppen geht [Pos05]. Die IPC (Association Connecting Electronics Industries, früher Institute for Printed Circuits) ist eine weltweite Standardisierungsorganisation. Die Richtlinie wird im Auftrag des FED (Fachverband für Design, Leiterplatten- und Elektronikfertigung, Deutschland) übersetzt [IPC-A-610DE].

Zu den **elektrischen Prüfverfahren** zählen der Funktionstest, der In-Circuit-Test (ICT), Flying-Probe-Test und der Boundary-Scan-Test [Ber12], [ZVEI06], [Sti10].

Ein elektrisches Prüfverfahren führt immer zu der Aussage, dass die Baugruppe *zum Zeitpunkt der Prüfung* funktioniert. Die Qualität – z. B. einer Lötverbindung – kann damit nicht nachgewiesen werden. So kann z. B. nachgewiesen werden, dass zum Zeitpunkt der Prüfung der Widerstand einer Lötverbindung zwischen Leiterbahn und Bauteilanschluss praktisch 0 Ohm beträgt. Ob es sich dabei um eine Haarverbindung, eine kalte Lötstelle oder um einen dicken Lötklumpen handelt bleibt jedoch ungewiss. [Ber12, S. 117f.]

Aus den Aussagen – dass ein optisches Prüfverfahren nachweist, dass eine Baugruppe funktionieren müsste und der Aussage, dass ein elektrisches Prüfverfahren nur nachweist, dass die Baugruppe zum Zeitpunkt der Prüfung funktioniert – lässt sich direkt erkennen, dass eine gute Qualität nur durch eine Kombination von verschiedenen Verfahren sichergestellt werden kann. Neben diesen direkt erkennbaren Gründen existieren weitere Gründe mehrere Verfahren zu kombinieren. Grundsätzlich ist kein einziges Prüfverfahren in der Lage, sämtliche Fehler zu erkennen [Ber12, S. 221]. Daher besteht die Notwendigkeit mehrere Prüfverfahren zu kombinieren [Ber12, S. 221]. Die Kombination von mehreren Prüfverfahren wird dabei oft auch als Prüfstrategie¹⁸ (bzw. Teststrategie) bezeichnet [Ber12 S. 40]. Sollen dabei Mehrfachprüfungen vermieden werden, muss das jeweilige Prüfverfahren „wissen“, welche Prüfungen bereits die vorheri-

¹⁸ Die verschiedenen Definitionen zum Begriff Prüfstrategie sind in Kapitel 2.1.3 zu finden.

gen Prüfverfahren abgedeckt haben [Ber12, S. 222]. Es muss also bei der Planung der Prüfungen eine Übersicht geben, die die Verteilung der Prüfmerkmale auf die Prüfmittel darstellt. So können auch bewusst Mehrfachprüfungen zu bestimmten Prüfzeitpunkten herbeigeführt werden, falls z. B. die Gefahr einer Beschädigung in bestimmten Fertigungsschritten besteht.

Die Kombination von Prüfverfahren kann auch innerhalb eines Prüfsystems erfolgen. So können z. B. durch Verbindung eines elektrischen mit einem optischen Prüfverfahren aktive optische Ausgabeeinheiten wie z. B. LEDs oder LCD-Anzeigen vollautomatisiert geprüft und auch kalibriert werden. [Ber12, S. 221]

Elektrische Prüfverfahren werden oftmals am Ende der Fertigung genutzt, *nachdem* die Baugruppe in das Endprodukt verbaut wurde. Sie haben die Aufgabe sicherzustellen, dass keine fehlerhaften Produkte ausgeliefert werden. Diese Prüfungen am Fertigungsende sind daher einem separaten Prozessschritt in einem separaten Team zugeordnet – dem Prüffeld. [Ber12, S. 221]

Die Funktionalität einer elektronischen Baugruppe kann schlussendlich nur über eine Funktionsprüfung gesichert werden. In vielen Fällen werden zur Durchführung solcher funktionalen Prüfverfahren produktspezifisch zusammengestellte Prüfplätze verwendet. Diese setzen sich häufig aus marktüblichen Mess- und Stimuli-Geräten mit PC-Steuerung zusammen. Diese sollten dabei so in den Prüfablauf integriert sein, dass diese Zusammenstellung wie ein eigenes Prüfequipment behandelt wird. [ZVEI06]

Oftmals handelt es sich dabei nicht nur um eine reine Zusammenstellung, sondern bestimmte Teile müssen speziell entwickelt werden.

Insbesondere bei den Funktionsprüfungen ergeben sich viele Anforderungen an das Produkt bzw. die elektronische Baugruppe und das Prüfmittel, um überhaupt eine Funktionsprüfung durchführen zu können. So muss z. B. oftmals ein spezielles Prüfprogramm geschrieben werden, welches auf den Mikroprozessor zum Zweck der Prüfung gespielt wird. Dieses erzeugt dann ein Testmuster abhängig von den Eingangssignalen, die das Prüfmittel bereitstellen muss. Das Prüfmittel muss ggf. weiterhin Spannungsversorgung, Systemclock usw. zur Verfügung stellen. Oftmals müssen die Prüfmittel speziell für solche Prüfungen entwickelt und gefertigt werden. Diese speziell für diesen Zweck zu entwickelnden Prüfmittel müssen dabei unbedingt im Einklang mit der Entwicklung entwickelt werden. Die Prüfaufbauten entstehen damit parallel zur eigentlichen Entwicklung. Die Erstellung der durch das Prüfmittel durchzuführenden Prüfungen obliegt dabei einzig den Fähigkeiten und Fertigkeiten der Mitarbeiter, da eine automatische Erstellung der Prüfungen (gemeint ist die Identifikation der Prüfmerkmale) nicht möglich ist. Dazu muss die Funktion der zu prüfenden Baugruppe bekannt sein bzw. die inneren Zusammenhänge müssen verstanden werden. [Ber12, S. 119ff.]

Bei der Entwicklung eines Gerätes bzw. einer Baugruppe wird geprüft, ob alle Funktionen wie gewünscht funktionieren. Dazu wird die spätere Umgebung simuliert bzw. versucht den späteren Einsatzfall möglichst gut nachzubilden. Die Nachbildung der Umge-

bung kann dabei nicht nur elektrische Signale umfassen, sondern auch andere Umgebungsbedingungen, wie z. B. Umgebungstemperaturen. Bei den Prüfungen in der Fertigung fallen diese Nachbildungen der Umgebungsbedingungen meist rudimentärer aus. Dennoch werden je nach Produkt auch hier Umgebungstemperaturen oder „Rütteln“ nachgebildet. (vgl. dazu auch [Ber12 S. 119ff.])

Zusätzlich zu den Prüfungen, die durch ein Prüfmittel durchgeführt werden, existieren oftmals auch Selbstprüfungen von elektronischen Baugruppen, insbesondere wenn diese mit einem Mikroprozessor ausgestattet sind. In der Regel läuft diese Selbstprüfung beim Einschalten der Baugruppe ab. Teilweise wird diese im späteren Betrieb auch zyklisch wieder aufgerufen. Diese Selbstprüfungseigenschaften werden oftmals auch zur Prüfung in der Fertigung genutzt, z. B. bei der EoL-Prüfung (End of Line). Werden gezielt Schaltungsteile zur Prüfung in die Baugruppe hinein entwickelt wird auch von „Self-Checking Design“ gesprochen. [ZVEI06], [VDI2428-5], [Sti10, S. 134], [Ber12, S. 121], [ABF10]

Manchmal werden bei der Prüfung von elektronischen Baugruppen auch Teile der Schaltung, z. B. dort verbaute Sensoren, genutzt, um Prüfungen in der Fertigung durchzuführen. Nachteil der Nutzung von Selbstprüfungen bzw. von Teilen der Schaltung des Prüflings in der Fertigung kann sein, dass bei einer entwicklungsseitigen Änderung der elektronischen Baugruppe unbewusst manche Prüfschritte „ausgehebelt“ werden. In diesem Fall muss also unbedingt darauf geachtet werden, dass solche Änderungen auch hinsichtlich der Prüfungen durchdacht sind. Dies setzt voraus, dass dem Entwickler, der am Produkt bzw. Prüfling etwas ändert, eine Dokumentation zur Verfügung steht, aus der ersichtlich ist, dass bestimmte Schaltungsteile bzw. deren Funktionen auch für Prüfungen in der Fertigung genutzt werden.

2.4.3 Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung für mechatronische Produkte im Kontext integrativer Entwicklungen

Produkte unterliegen immer kürzeren Innovationszyklen, wodurch die zur Entwicklung zur Verfügung stehende Zeit ebenfalls verkürzt wird. Gleichzeitig werden die Produkte immer komplexer, was tendenziell zu einer Verlängerung der Entwicklungsdauer führt. Um trotzdem eine Produktentwicklung möglichst schnell ablaufen zu lassen, erscheint eine Fokussierung der Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen zu einem frühen Zeitpunkt erfolversprechend. Dazu wird eine frühzeitige integrierte Betrachtung von Produktentwicklungsprozessen und Produktionsprozessen angestrebt. Ein weiterer Grund dafür ist, dass die Beeinflussung der Herstellkosten insbesondere in den frühen Phasen der Produktentstehung hoch ist. Die Prüfplanung spielt bei der Wirtschaftlichkeit der Herstellung eine entscheidende Rolle. Im Sinne von Simultaneous Engineering (genauere Definition vgl. Kapitel 3.2.2) soll die Prüfplanung integriert und parallel zu den planenden Tätigkeiten geschehen. Durch die frühe Einbindung in die Produktentwicklung werden Abläufe optimiert und die Effizienz der Prüfplanung erhöht. Zu Be-

ginn der Entwicklung kann zwar noch kein vollständiger Prüfplan erstellt werden, z. B. können aber schon die wesentlichen Prüfmerkmale identifiziert werden. Grundsätzlich erlaubt die frühzeitige Planung der Fertigung, frühzeitig Anforderungen an die Produktentwicklung zu stellen. Die frühzeitige Planung der Fertigung beinhaltet dabei auch die Planung der Prüfungen. Nach EVERSHEIM/SCHUH liegt der Fokus bei der integrierten Prüfplanung auf der Produktgeometrie, den Konstruktionsdaten sowie Kundenforderungen und den daraus abgeleiteten Produktmerkmalen. [ES05]

In der traditionellen Rolle der Prüfplanung (vgl. auch Kapitel 2.4.1) ist diese nicht ausreichend in die unternehmensinternen Abläufe integriert [Ber05]. Dabei werden Informationen erst spät in die Prüfplanung eingebunden, was einer optimalen Arbeitsweise widerspricht [Tue96]. Insbesondere für komplexe Produkte muss daher die Prüfplanung stärker in die Entwicklungsprozesse integriert werden [Tue96]. Die Prüfplanung darf sich dabei nicht allein auf die Planung der Prüfungen einzelner Teile bzw. Komponenten beschränken wie bei der konventionellen Prüfplanung, sondern muss auch globalere Prüfungen berücksichtigen [Wes91].

Erst durch das parallele Arbeiten von Konstruktion, Arbeitsplanung und Prüfplanung können Potentiale erschlossen werden. Insbesondere können frühzeitig Überlegungen zur Prüfbarkeit angestellt werden. Dadurch kann eine nicht prüfgerechte Produktgestaltung verhindert werden und große Korrekturschleifen können vermieden werden. [Klo98]

Ein wesentlicher Schlüssel bei der integrierten Produktentwicklung und Prüfplanung ist dabei die Organisation der Entwicklerteams bzw. deren Kooperationsfähigkeit. Es müssen dabei neben den Disziplinen, die an der Entwicklung beteiligt sind, auch weitere Bereiche eines Unternehmens integriert werden. Es muss dabei möglichst funktionsübergreifend zusammengearbeitet werden. [ES05], [For09]

Das Qualitätsmanagement ist dabei im Sinne der Prüfplanung in der heutigen Zeit durch ein prozessuales Verständnis geprägt, wobei die abteilungsübergreifende Zusammenarbeit im Fokus steht und nicht das Abteilungsdenken [Ber05].

Auch wenn die integrierte Produkt- und Produktionsprozessgestaltung bei vielen Unternehmen grundsätzlich als implementiert gilt, so funktioniert diese in der Praxis selten. Es existieren noch erhebliche Potentiale in der effektiven und effizienten Produktentwicklung und den zugehörigen Produktionsprozessen. [ES05]

Nach Erfahrungen des Autors durch mehrere Industrieprojekte werden Prüfmittel in der industriellen Praxis oftmals speziell zur Prüfung eines komplexen mechatronischen Produktes bzw. einer Produktgruppe entwickelt. Dies ist insbesondere bei High-End-Produkten der Fall, da dort die Auslieferung eines einwandfreien Produktes besonders wichtig ist. Oftmals wird dabei eine 100 % Prüfung durchgeführt bzw. sogar gefordert. Die Produkte sind dabei oftmals von einer hohen Variantenvielfalt geprägt. In der Montage der Produkte liegt der Schwerpunkt der Prüfungen dabei auf den Prüfungen der Funktionen. REITER weist auf diese Sachverhalte bereits im Jahr 1998 hin [Rei98].

Dabei können dies Prüfmittel für die einzelnen Module bzw. Baugruppen eines Produktes sein oder ein Prüfmittel für Prüfungen des gesamten Produktes am Fertigungsende (auch End of Line-Prüfung genannt). Die verschiedenen Prüfungen müssen also auf die verschiedenen Prüfstufen verteilt werden (vgl. dazu auch [Bal97]). Die Prüfungen am Fertigungsende sind dabei oftmals besonders wichtig (vgl. auch [Sch07]). Hier werden meistens mindestens die wesentlichen Funktionen und der grundsätzlich ordnungsgemäße Zusammenbau abgeprüft, sowie die Einhaltung der wesentlichen Normen, Richtlinien, Forderungen usw. Oftmals werden auch weit umfangreichere Prüfungen am Fertigungsende durchgeführt. Die speziell zu entwickelnden Prüfmittel sind dabei oftmals selbst komplexe mechatronische Systeme (vgl. auch [Rei98]), die oftmals auch weitere Nebenfunktionen übernehmen. Diese Nebenfunktionen, die nicht direkt zur Prüfung des Produktes dienen, können z. B. Kalibrier¹⁹- und Justierfunktionen²⁰, die Speicherung von Messwerten, das Aufspielen von Software und die Erfassung und Zuordnung von Seriennummern sein. Die Integration dieser Nebenfunktionen macht oftmals Sinn. Zum Beispiel können in dem Prüfmittel die zur Kalibrierung und Justierung notwendigen Sensoren bzw. Messeinrichtungen bereits vorhanden sein. Diese müssen somit kein zweites Mal beschafft werden. Zusätzlich können so Prozessschritte gespart werden. Zur Prüfung werden manchmal auch Teile des Produktes mit genutzt, z. B. On Board Diagnose (OBD), Selbstprüfungsfunktionen, verbaute Sensoren und Aktoren (vgl. dazu auch [For09, S. 20 und S. 23f.], [BF05] und Kapitel 2.4.2).

Abhängig vom gewünschten Automatisierungsgrad sind diese Prüfmittel hoch automatisiert. Neben den Kostenersparnissen durch die Automatisierung steigt durch die Automatisierung in der Regel auch die Reproduzierbarkeit der Prüfungen im Vergleich zu durch Mitarbeiter durchgeführte Prüfungen. Weiterhin erlaubt eine Automatisierung eine gute Nachvollziehbarkeit der Prüfabläufe und ermöglicht eine automatische Dokumentation der Prüfergebnisse. Die zu entwickelnden Prüfmittel müssen dabei die Varianten des Produktes berücksichtigen. (vgl. auch [Rei98])

Da die zukünftigen Vertriebszahlen des zu prüfenden Produktes sowie auch die Verteilung auf die Varianten des Produktes nur schwer vorhersehbar sind und die Vertriebszahlen manchmal erst mit einem „Ramp-up“ steigen, kann der Wunsch bestehen ein erweiterbares Prüfmittel hinsichtlich des Durchsatzes zu entwickeln. Gelingt dies, so kann das Prüfmittel mit steigenden Vertriebs- bzw. daraus resultierenden Fertigungszahlen mitwachsen, ohne am Anfang eine unnötig große Investition tätigen zu müssen. Entwickeln sich die Vertriebszahlen nicht so gut wie prognostiziert, besteht ebenfalls der Vorteil keine unnötig große Investition getätigt zu haben. Die Notwendigkeit der

¹⁹ Kalibrierung beschreibt die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Messwert oder Erwartungswert der Ausgangsgröße und dem zugehörigen wahren oder richtigen Wert der als Eingangsgröße vorliegenden Messgröße. Bei der Kalibrierung erfolgt dabei kein Eingriff, der das Messgerät verändert. [DIN1319-1]

²⁰ Justierung beschreibt das Einstellen oder Abgleichen eines Messgerätes, um systematische Messabweichungen so weit wie möglich zu beseitigen, wie es für die vorgesehene Anwendung erforderlich ist. Die Justierung erfordert dabei einen Eingriff, der das Messgerät bleibend verändert. [DIN1319-1]

Erweiterbarkeit bzw. die grundsätzliche Reaktion auf allgemein schwankende Produktionszahlen wird auch schon bei REITER erkannt und dort als Stückzahlflexibilität bezeichnet [Rei98].

Oftmals bilden die Prüfmittel die Umfeldbedingungen im späteren Einsatz nach (ähnlich wie bei den Prüfungen von elektronischen Baugruppen, vgl. Kapitel 2.4.2). Dazu werden z. B. elektrische Ein- und Ausgänge, oder verschiedene Umgebungstemperaturen durch das Prüfmittel nachgebildet. Diese komplexen Prüfmittel durchlaufen dabei selbst einen Entwicklungsprozess mit entsprechend langen Entwicklungszeiten und -kosten (vgl. auch [Rei98]). Aufgrund der Komplexität solcher Prüfmittel stellt die Entwicklung solcher automatischen Prüfeinrichtungen vom Zeitbedarf her einen Schlüsselprozess bei einem Montagesystem dar [Rei98, S. 11]. Das Anwendungsbeispiel in Kapitel 5 verdeutlicht diese Erfahrungen (vgl. dazu auch [LHD+16a], [LHD+16b]).

Es bestehen dabei zwei wesentliche Herausforderungen. Zum einen muss das Prüfmittel mit einem möglichst guten Entwicklungsstand²¹ zum Ende des Entwicklungsprojektes bzw. zum Fertigungsanlauf bereitstehen. Zum anderen stellen die Prüfmittel oftmals selbst wieder Anforderungen an das Produkt, die in die laufende Produktentwicklung mit aufgenommen werden müssen. Oftmals muss, z. B. für Prüfzwecke am Produkt, eine spezielle Datenschnittstelle vorgesehen werden, um ein spezielles Prüfprogramm aufzuspielen, oder verschiedene Informationen vom Produkt an das Prüfmittel zu übertragen (vgl. dazu auch. Kapitel 2.4.2). Diese Schnittstelle am Produkt und das Prüfprogramm, das auf dem späteren Produkt installiert ist, muss dabei im Produktkonzept möglichst früh mit vorgesehen werden und auch mit entwickelt werden, um unnötige, kostenintensive und zeitaufwändige Entwicklungsschleifen zu verhindern. Die Prüfmittelentwicklung bzw. Prüfplanung muss also eine aktive, mitgestaltende Rolle bei der Produktentwicklung wahrnehmen (vgl. auch [Bal97, S. 53]). Die Produktion hat dabei ebenfalls einen Einfluss auf das Prüfmittel. Dies macht eine integrative Entwicklung von Produkt, Produktionssystem und Prüfmittel notwendig, wobei das Prüfmittel Teil des Produktionssystems ist. Um die Anforderungen vom Prüfmittel an das Produkt bzw. die Produktentwicklung möglichst frühzeitig ableiten zu können, ist dabei mit der Prüfplanung und der Prüfmittelentwicklung möglichst frühzeitig zu beginnen.

Der frühestmögliche Zeitpunkt ist dabei die Produkt- bzw. Produktionssystemkonzipierung, die den ersten Schritt bei der Entwicklung mechatronischer Produkte und deren Produktionssystemen darstellt (vgl. auch Kapitel 2.3.3).

Die Einbeziehung von Erfahrungswissen ist dabei besonders wichtig (vgl. auch Beispiel *Schiefzug beim Papiertransport* in Kapitel 2.4.1 und Kapitel 4.2.4.4).

²¹ Nach Erfahrungen des Autors kann zum Abschluss der Produktentwicklung bzw. zu Beginn der Fertigung oftmals der Reifegrad des Prüfmittels noch keine 100 % haben. Grund dafür ist, dass sich insbesondere bei neuen Produkten, neuen Produktfunktionen, neuen Produkteigenschaften, neuen Fertigungsverfahren usw. trotz intensiver Planungen erst eine Lernkurve bezüglich der zu prüfenden Merkmale ergibt. Es können sich somit z. B. durch die Nutzung im Feld und den daraus gewonnenen Erkenntnissen noch geringfügige Änderungen ergeben.

2.4.4 Rechnerunterstützte Planungstätigkeiten und wissensbasierte Werkzeuge

Es existieren verschiedene Möglichkeiten, die Prüfplanung bzw. die Prüfmittelplanung/Prüfmittelauswahl durch Rechnerunterstützung und weitere Hilfsmittel zu vereinfachen [Rel85], [Zel90], [Mey92] [Neu92], [Let92], [Vie94], [Kla97], [Klo98], [MHC+04]. Dabei wird sich im Wesentlichen an der konventionellen Prüfplanung orientiert (vgl. Kapitel 2.4.1).

Wesentlicher Ausgangspunkt sind meist die CAD-Zeichnungen des Produktes. Teilweise ist dabei eine Abstimmung zwischen Prüfplanung und Produktentwicklung vorgesehen. Dabei liegt der Fokus jeweils auf der Prüfplanung für (mechanische) Komponenten bzw. Teile.

WEISS stellt ein Expertensystem zur wissensbasierten Prüfplanung für elektronische Baugruppen im industriellen Einsatz vor. Das Wissen über die Planung von Verfahrensschritten, die Entwurf, Herstellung und Prüfung elektronischer Baugruppen betreffen wird dabei strukturiert und in Form gebracht, so dass eine Eignung für die Bearbeitung durch ein Computerprogramm besteht. Die formalisierte Aufnahme des Expertenwissens und Abbildung durch ein formales Regelwerk ist dabei ein wichtiger Bestandteil. Die Zeit für die optimierende Prüfplanung kann so drastisch reduziert werden, wobei alternative Strategien durchgespielt werden können. [Wei90]

2.4.5 Fazit und Einordnung

Die Prüfplanung umfasst die planerischen Tätigkeiten zur Planung der Qualitätsprüfungen im gesamten Produktionsablauf. Im Falle einer Prüfmittelentwicklung bildet sie die Grundlage der Entwicklungstätigkeiten des Prüfmittels. Bei der Prüfplanung werden dabei definierte Aufgaben in einer sinnvollen Reihenfolge bearbeitet. Zur Bearbeitung dieser Aufgaben sind alle Funktionen des Unternehmens in die Planung mit einzubeziehen. Die Kenntnis von Funktion und Verwendung des zu prüfenden Produktes ist zur Prüfplanung essentiell. Weiterhin ist die Einbeziehung von zahlreichen Unterlagen und die Erfahrung von Stakeholdern und Experten, z. B. aus ähnlichen Produkten, wichtig.

Die konventionelle Prüfplanung ist von der Teileprüfung bzw. der Prüfung von (mechanischen) Komponenten geprägt. Sie wird dabei zusammen mit der Arbeitsplanung nach der Entwicklung und Konstruktion durchgeführt. Für eine integrative Entwicklung von Produkt und Prüfmittel ist dies zu spät. Insbesondere Anforderungen vom Prüfmittel an das Produkt können so nur schwer aufgenommen werden. Die Prüfplanung bzw. die Prüfmittelplanung/Prüfmittelauswahl kann dabei Unterstützung durch rechnergestützte Planungstätigkeiten bekommen, wobei sich dabei im Wesentlichen an der konventionellen Prüfplanung für (mechanische) Komponenten orientiert wird und die CAD-Zeichnungen der wesentliche Ausgangspunkt sind.

Bei elektronischen Baugruppen ist die Planung der Prüfungen in der Regel wesentlicher Bestandteil bereits während der Entwicklung. Die Prüfbarkeit der Baugruppen wird

dabei in der Entwicklung in die Baugruppe hinein entwickelt. Dabei werden in der Regel mehrere Prüfverfahren kombiniert, um eine möglichst gute Qualität zu erzielen. Eine Übersicht, welches Merkmal durch welches Prüfmittel zu welchem Zeitpunkt geprüft wird, ist dazu erforderlich. Insbesondere für die Funktionsprüfungen werden oftmals spezielle Prüfmittel entwickelt, die auch Nebenfunktionen wie z. B. das Kalibrieren übernehmen. Funktionsprüfungen stellen dabei in der Regel eine Menge Anforderungen an das Produkt bzw. die elektronische Baugruppe und das Prüfmittel, was ein wesentlicher Grund der frühzeitigen Integration der Planung der Prüfungen in die Entwicklung ist. Diese Funktionsprüfungen werden dabei oft am Ende der Fertigung im eingebauten Zustand durchgeführt. Teilweise werden auch Teile der elektronischen Baugruppe selbst zu Prüfzwecken benutzt oder es können komplette Selbstprüfungen durch die Baugruppe durchgeführt werden. Auch bei der Prüfung von elektronischen Baugruppen ist Erfahrungswissen mit einzubeziehen. Ein Expertensystem zur wissensbasierten Prüfplanung kann bei den elektronischen Baugruppen bei Entwurf, Herstellung und Prüfung elektronischer Baugruppen unterstützen.

Die Prüfplanung im Kontext integrativer Entwicklungen strebt eine frühzeitige Integration der Prüfplanung in den Entwicklungsprozess an, insbesondere bei komplexen Produkten. So können insbesondere frühzeitig Anforderungen vom Prüfmittel an das Produkt gestellt werden und aufwändige Entwicklungsschleifen verhindert werden. Der abteilungsübergreifenden Zusammenarbeit kommt dabei eine große Bedeutung bei. Prüfmittel werden dabei oftmals speziell für ein Produkt oder eine Produktgruppe mit entsprechendem Aufwand entwickelt. Bei der Montage komplexer Produkte, wie einem mechatronischen System, liegt der Schwerpunkt der Prüfungen auf den Funktionsprüfungen.

Die zu entwickelnde Systematik soll die Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung für mechatronische Produkte bereits zu einem frühen Zeitpunkt in den Entwicklungsprozess mit einbeziehen. So können insbesondere Anforderungen vom Prüfmittel an das Produkt frühzeitig berücksichtigt werden. Das Prüfmittel kann dabei selbst ein mechatronisches System sein. Ein geeigneter Ansatzpunkt zur Integration kann die Produktkonzipierung sein. Die Varianten des Produktes müssen dabei mit berücksichtigt werden. Die Prüfmittel können dabei auch Nebenfunktionen übernehmen. Das bzw. die zu entwickelnden Prüfmittel müssen möglichst zum Ende der Produktentwicklung bzw. zum Start der Produktion bereitstehen. Es muss die Möglichkeit bestehen Erfahrungswissen, insbesondere bei der Identifikation von Prüfmerkmalen, mit einzubeziehen. Das Vorgehen muss sich dabei weitestgehend an die projekt- und unternehmensspezifischen Gegebenheiten anpassen.

2.5 Problemabgrenzung

Mechatronische Systeme beruhen auf dem engen Zusammenwirken der unterschiedlichen Fachdisziplinen Mechanik, Elektrik/Elektronik und Softwaretechnik. Die Entwicklung solcher mechatronischen Systeme ist dabei geprägt von kürzer werdenden Entwicklungszeiten, zunehmender Produktkomplexität sowie einem dynamischen Umfeld der Unternehmen. Die Entwicklung dieser Systeme bedarf daher der optimalen Zusammenarbeit unterschiedlicher Fachdisziplinen, um ein mechatronisches Produkt in der geforderten Zeit mit vertretbarem Aufwand entwickeln und produzieren zu können. Um dies zu ermöglichen ist ein Ansatz erforderlich, der alle Aktivitäten im Produktentstehungsprozess optimal verbindet und dabei insbesondere die Interdependenzen zwischen der Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung berücksichtigt.

Zur Produktionssystementwicklung zählt dabei auch die Prüfmittelentwicklung, falls eine solche notwendig ist. Eine Prüfmittelentwicklung ist insbesondere dann notwendig, wenn produktspezifische Prüfungen notwendig sind und kein zur Verfügung stehendes Prüfmittel die Anforderungen an das Prüfmittel erfüllt. Bei der Montage mechatronischer Produkte stehen dabei Funktionsprüfungen im Vordergrund. Solche Prüfmittel sind oftmals selbst wieder mechatronische Systeme. Die Prüfplanung ist dabei ein notwendiger Schritt zur Planung der Prüfmittelentwicklung. Es bestehen bei der Prüfmittelentwicklung zwei wesentliche Herausforderungen. Zum einen soll das Prüfmittel zum Produktionsstart möglichst bereitstehen. Zum anderen stellt das Prüfmittel selbst Anforderungen an das Produkt. Es besteht also die Notwendigkeit die Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung frühzeitig in das Entwicklungsgeschehen einzubinden, um den Herausforderungen zu begegnen.

Einen Lösungsansatz bildet die **integrative Entwicklung von Produkt- und Produktionssystem**, in den sich die Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung integriert. Hierbei werden die Tätigkeiten von Produkt- und Produktionssystementwicklung parallel durchgeführt und dabei intensiv abgestimmt. Das 3-Zyklen Modell der Produktentwicklung bildet einen Rahmen für eine solche integrative Entwicklung. In diesem werden die Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung parallel durchgeführt. Dabei stimmen sich Produkt- und Produktionssystementwicklung bereits zu einem frühen Zeitpunkt während der Konzipierung ab. Die integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem verspricht zwei wesentliche **Nutzenpotentiale**:

- **Frühzeitige Berücksichtigung von Wechselwirkungen:** Zwischen Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung bestehen eine Vielzahl von Wechselwirkungen. Dies gilt auch für die Wechselwirkungen zwischen Produkt und Prüfmittel. Ein prüfgerechtes Design des Produktes muss von der Produktentwicklung berücksichtigt werden. Dies ist in der Regel für eine kostenoptimale Produktion des Produktes notwendig. Die Anforderungen kommen dabei meist von der Prüfmittelentwicklung. Zum Beispiel kann am Produkt eine Datenschnittstelle zur Kommuni-

kation mit dem Prüfmittel erforderlich sein. Ein sinnvoller Schritt zur Planung der Prüfungen ist dabei die Prüfplanung.

- **Abstimmung und Parallelisierung der Tätigkeiten der Entwicklungsbereiche:** Eine frühzeitige Berücksichtigung und Parallelisierung der Tätigkeiten der Entwicklungsbereiche verhindert zeitintensive und aufwändige Entwicklungsschleifen im Entwicklungsprozess. Dadurch lassen sich Kosten einsparen und vor allem die Zeit bis zum Markteintritt verkürzen.

Aufgrund der starken Wechselwirkungen zwischen Produkt und Prüfmittel ist eine möglichst frühzeitige Integration der Planung der Prüfungen und der Prüfmittelentwicklung sinnvoll. Die frühzeitige Integration ist allerdings meist nicht gegeben. Der erste Schritt bei der Produktentwicklung ist der Systementwurf. Während der Produktkonzipierung bzw. der frühen Phase des Systementwurfs mechatronischer Systeme werden die wesentlichen Eigenschaften des Produktes in Form einer Prinziplösung festgelegt. Dabei sind die Funktionen und der Aufbau des Produktes wesentliche Aspekte. Zugehörig zur Produktkonzeption besteht die Möglichkeit integrativ das Produktionssystemkonzept mit zu gestalten, wobei dabei Prozesse, Ressourcen und Gestalt des Produktionssystems festgelegt werden. Der frühestmögliche und somit geeignete Ansatz zur Integration der Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung in das Entwicklungsgeschehen ist daher die integrative Produkt- und Produktionssystemkonzeption. Der Übergang von der Produktkonzeption in die Prüfmittelkonzeption und die Einordnung der Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung in die integrative Produkt- und Produktionssystementwicklung insgesamt ist bisher nicht hinreichend betrachtet worden. Um diesen Übergang zu ermöglichen bzw. diese Einordnung vorzunehmen, sind folgende **Herausforderungen** zu bewältigen:

- **Übergang von der Produktkonzeption in die Prüfmittelkonzeption:** Die Prinziplösung des Produktes beinhaltet bereits zahlreiche Informationen über das Produkt. Diese Informationen müssen insbesondere auf ihre Relevanz für die Prüfmittelentwicklung überprüft werden und für die Prüfmittelentwicklung nutzbar gemacht werden.
- **Frühzeitige Integration der Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung:** Für die frühzeitige integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem bestehen bereits etablierte Hilfsmittel. GAUSEMEIER ET AL. stellen dazu Vorgehensmodelle, Methoden und Werkzeuge zur Verfügung. Eine frühzeitige Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung wird dabei bisher nicht berücksichtigt. Die Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung soll sich hier einordnen und die etablierte Entwicklungsmethodik somit ergänzen.
- **Hilfsmittel zur Unterstützung der frühzeitigen, integrativen Entwicklung:** Zur Unterstützung einer frühzeitigen integrativen Entwicklung sind dedizierte Hilfsmittel vorteilhaft. Wichtige Hilfsmittel sollen identifiziert und für die Aufgabenstellung

nutzbar gemacht werden. Weiterhin sollen Möglichkeiten zur Integration der Hilfsmittel aufgezeigt werden.

- **Berücksichtigung der Eigenschaften mechatronischer Systeme:** Mechatronische Systeme sind oft modular aufgebaut. Je nach Prüfstrategie werden bestimmte Eigenschaften schon bei der Fertigstellung der einzelnen Module in der Produktion überprüft. Einzelne Module werden zu einem gesamten mechatronischen Produkt integriert. Je nach Konfiguration kann das mechatronische Produkt bei der Fertigungsendprüfung somit unterschiedliche Module enthalten. Zusätzlich sind die zu fertigenden Stückzahlen oftmals nicht oder nur ungenau bekannt und steigen erst mit bzw. nach einer „Ramp-up Phase“ an. Die planerischen Tätigkeiten bezüglich der Prüfungen in der Fertigung müssen daher den modularen Aufbau und die möglichen steigenden Stückzahlen mechatronischer Produkte berücksichtigen.
- **Projekt- und unternehmensspezifische Anpassung:** Jedes Entwicklungsvorhaben wird von unterschiedlichen Randbedingungen beeinflusst. Dies sind insbesondere projekt- und unternehmensspezifische Randbedingungen. Es muss also die Möglichkeit bestehen situationsspezifisch auf diese Randbedingungen zu reagieren. Eine Skalierbarkeit ist daher notwendig.

Es besteht somit der Bedarf einer *Systematik zur integrativen Entwicklung von mechatronischen Produkten und deren Prüfmittel*. Die Entwicklungssystematik soll Planer und Entwickler während des Entwicklungsgeschehens unterstützen, insbesondere in den frühen Phasen der Entwicklung. Die Entwicklungssystematik soll dabei folgende Bestandteile aufweisen:

- einen **integrativen Entwicklungsprozess**, welcher alle wesentlichen Schritte zur integrativen Entwicklung von Produkt, Produktionssystem und darin enthaltenem Prüfmittel und Prüfplanung beinhaltet
- eine **Möglichkeit zur Anpassung** des integrativen Entwicklungsprozess an projekt- und unternehmensspezifische Gegebenheiten
- **Hilfsmittel** zur Lösung von Teilaufgaben innerhalb des Entwicklungsprozesses und zusätzlich die Möglichkeit zur Integration von weiteren Methoden und Hilfsmitteln bei der späteren Anwendung der Systematik
- eine **einheitliche Beschreibungsform** von Produkt, Produktionssystem und insbesondere des Prüfmittels, die die Kommunikation und Kooperation zwischen den Entwicklungsbeteiligten vereinfacht.

2.6 Anforderungen

Aus der Problemanalyse ergeben sich folgende Anforderungen an eine *Systematik zur integrativen Entwicklung von mechatronischen Produkten und deren Prüfmittel*.

A1) Anwendbarkeit bei modularen mechatronischen Systemen: Moderne technische Produkte sind zunehmend mechatronische Systeme. Diese sind oftmals modular aufgebaut. Ebenso kann die Notwendigkeit bestehen ein Prüfmittel modular zu gestalten (um z. B. Varianten für andere Standorte generieren zu können oder um zu einem späteren Zeitpunkt den Durchsatz erhöhen zu können, aufgrund des „Ramp-up“ der Vertriebszahlen). Die Entwicklungssystematik soll daher für modular aufgebaute mechatronische Systeme anwendbar sein. Um dies zu erreichen, müssen das Vorgehen und die Hilfsmittel an den entsprechenden Stellen fachdisziplinübergreifend sein und dabei unabhängig von Branche oder Produkt sein. Andernfalls sind fachdisziplinspezifische Vorgehen und Hilfsmittel auszuprägen. Eine intensive und gut geplante Prüfung von Produkten wird besonders bei High-End-Produkten gefordert. Daher soll die Entwicklungssystematik insbesondere für High-End-Produkte geeignet sein.

A2) Abstimmung auf die etablierte Entwicklungsmethodik: Für die Entwicklung mechatronischer Systeme und deren Produktionssysteme existieren etablierte Methoden und Vorgehensweisen. Prüfmittel stellen dabei oftmals selbst ein mechatronisches System dar. Die Entwicklungssystematik soll diese Methoden und Vorgehensweisen integrieren bzw. entsprechend anpassen, wobei diese soweit wie möglich auch für das Prüfmittel selbst genutzt werden sollen. Ebenso existieren zur Prüfplanung etablierte Aufgaben und Vorgehensweisen. Diese sollen ebenfalls berücksichtigt werden.

A3) Systematische und effiziente Vorgehensweise: Das Vorgehen bei der Entwicklung mechatronischer Produkte, deren Produktionssystem und deren Prüfmittel ist ein komplexer Vorgang. Um sicherzustellen, dass alle wesentlichen Schritte in einer sinnvollen Reihenfolge durchlaufen werden, soll die Systematik das Vorgehen in Form eines Entwicklungsprozesses darstellen. Das so dargestellte Vorgehen dient somit als Leitfaden aller durchzuführenden Tätigkeiten, auch wenn weiterhin Iterationen innerhalb des Vorgehens auftreten können. Die gesamte Entwicklung soll dabei effizient ablaufen, wobei oftmals die Forderung besteht die Produktentwicklung nicht wesentlich aufzuhalten.

A4) Frühzeitige Integration: Aufgrund der zwischen Produktentwicklung, Produktionssystementwicklung und der dazugehörigen Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung bestehenden Wechselwirkungen ist eine integrative Entwicklung notwendig. So stellen z. B. die zu entwickelnden Prüfmittel Anforderungen an das Produkt, das weitere Produktionssystem und ggf. weitere an der Entwicklung beteiligte Systeme oder Organisationseinheiten. Außerdem sollen die zu entwickelnden Prüfmittel zum Fertigungsbeginn zur Verfügung stehen und die Auslieferung der zu prüfenden Produkte nicht verzögern. Somit muss das Prüfmittel möglichst zu Fertigungsbeginn zur Verfügung stehen. Um die Anforderungen frühzeitig ableiten zu können und das Prüfmittel möglichst zu Ferti-

gungsbeginn bereitstehen zu haben, ist mit der Prüfmittelentwicklung möglichst frühzeitig zu beginnen. Sie soll daher zu einem möglichst frühen Zeitpunkt in die Entwicklung integriert werden.

A5) Einheitliche und modellbasierte Beschreibung: Bei der Produktentwicklung, der Produktionssystementwicklung und der zugehörigen Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung werden als erster Schritt jeweils grobe Konzepte erarbeitet. Diese Konzepte sollen integrativ entwickelt werden, so dass ein gut abgestimmtes Gesamtkonzept entsteht. Um dieses Gesamtkonzept möglichst einfach erstellen zu können und die Analogien bei der Erstellung der Einzelkonzepte und deren Abhängigkeiten untereinander möglichst transparent darzustellen, soll die Notation möglichst einheitlich und wiedererkennbar sein. Daher soll die Notation modellbasiert erfolgen.

A6) Einbeziehung von Erfahrungswissen: Oftmals werden in Entwicklungsprojekten keine kompletten Neuentwicklungen durchgeführt. Teillösungen können dabei übernommen oder angepasst werden. Dies gilt für das Produkt ebenso wie für das Produktionssystem mit der dazugehörigen Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung. Insbesondere bei der Ermittlung von Prüfmerkmalen ist die Prüfplanung auf Erfahrungswissen angewiesen, da nicht alle Prüfmerkmale aus den Produktspezifikationen abgeleitet werden können. Bewährte Prüfmerkmale, die aus den Produktspezifikationen nicht hervorgehen, sind daher möglichst mit in Betracht zu ziehen. Die Entwicklungssystematik soll daher die Möglichkeit bieten Erfahrungswissen mit einzubeziehen.

A7) Projekt- und unternehmensspezifische Anpassung: Abhängig von den Randbedingungen des Projektes und des Unternehmens ergeben sich Einflüsse, die die Vorgehensweise bei der integrativen Entwicklung von Produkt, Produktionssystem und zugehöriger Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung beeinflussen können. Es soll daher die Möglichkeit bestehen das Vorgehen projekt- und unternehmensspezifisch anzupassen.

3 Stand der Technik

Die Problemanalyse hat gezeigt, dass eine frühzeitige Integration der Prüfmittelentwicklung in das gesamte Entwicklungsgeschehen mechatronischer Produkte notwendig ist. Wesentlicher Grund sind die zu berücksichtigenden Interdependenzen zwischen Produkt und Prüfmittel. Die Prüfmittel sind dabei oftmals speziell für ein Produkt bzw. für eine Produktgruppe zu entwickeln und müssen die modulare Bauweise des zu prüfenden Produktes (Prüfling) berücksichtigen. Es kann dabei die Forderung bestehen das Prüfmittel selbst modular aufzubauen. Mit der Prüfmittelentwicklung soll dabei frühestmöglich, schon während der Konzipierung, begonnen werden.

Nachfolgend wird der Stand der Technik zur gegebenen Problemstellung betrachtet. Kapitel 3.1 gibt einen Überblick über verschiedene Möglichkeiten zur Planung von Prüfungen und Prüfmitteln. In Kapitel 3.2 werden verschiedene Ansätze zur integrativen Entwicklung beschrieben, mit dem Fokus auf die Prüfmittelentwicklung. In Kapitel 3.3 wird der Stand der Technik anhand der in Kapitel 2.6 definierten Anforderungen bewertet und somit der Handlungsbedarf aufgezeigt.

3.1 Planungsansätze für Prüfungen und Prüfmittel

Zahlreiche Veröffentlichungen beschäftigen sich mit Planungstätigkeiten rund um die Prüfmittel, wie z. B. der Prüfplanung, der Prüfmittelauswahl, der Prüfmittelentwicklung, der Prüfzeitpunktauswahl usw. (vgl. dazu auch Kapitel 2.4). Nachfolgend wird auf diese Planungstätigkeiten eingegangen.

3.1.1 Modulare Prüfplanung nach BERNARDS

Das Ziel der modularen Prüfplanung nach BERNARDS ist die Integration der Prüfplanung in unternehmensinterne Abläufe. Sie sollen dabei mit eingesetzten Qualitätsmanagement-Methoden kombiniert werden. Jede Phase der Wertschöpfungskette bzw. der Produktentstehung wird dabei einem Modul der Prüfplanung zugeordnet (vgl. Bild 3-1). [Ber05]

Durch die Module werden die Informationen direkt am Entstehungsort gesammelt und verwendet. Mehrere Qualitätsmanagement-Methoden (QM-Methoden) wie QFD (Quality Function Deployment), System-FMEA (Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse), SVM (Statistische Versuchsmethodik) und SPC (Statistical Process Control) werden in den Modulen genutzt. Durch die Bewertung der Zielerreichung der einzelnen Module kann die Prüfplanungsreife bewertet werden. Es können so frühzeitig Maßnahmen eingeleitet werden, um Korrekturen des Prüfplanungsprozesses anzustoßen. [Ber05]

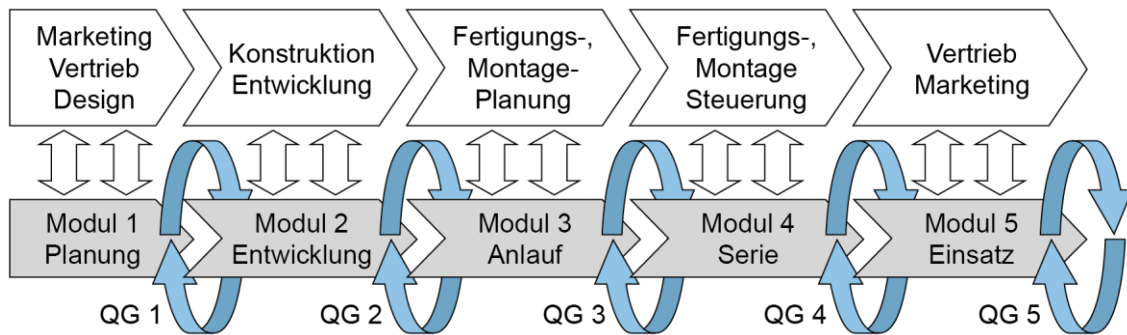


Bild 3-1: Zuordnung der Module des Prüfplanungskonzeptes zu den Phasen entlang der Wertschöpfungskette [Ber05, S. 85]

BERNARDS berücksichtigt drei Einflussgrößen auf die Prüfplanung, die in einem Würfel dargestellt werden (vgl. Bild 3-2).

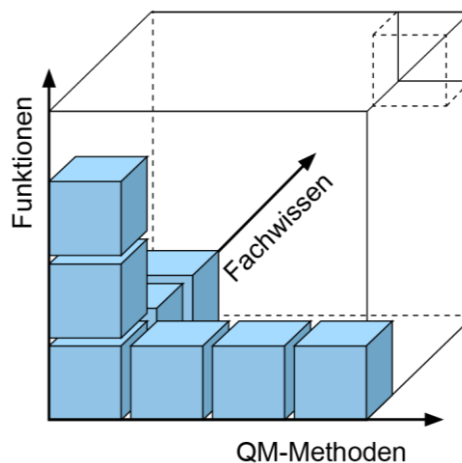


Bild 3-2: Gestaltungsdimensionen der modularen Prüfplanung [Ber05, S. 79]

Die erste Dimension wird als *Funktionen* bezeichnet. Hierbei handelt es sich um die Aufgaben der konventionellen Prüfplanung, die in Kapitel 2.4.1 beschrieben sind (10 Aufgaben der Prüfplanung). Die zweite Dimension bilden die beteiligten Unternehmensabteilungen, in denen die unterschiedlichen prüfplanungsrelevanten Informationen generiert werden. Diese Dimension wird *Fachwissen* genannt. Die dritte Dimension stellen die QM-Methoden dar. Jedes Modul umfasst eine oder mehrere Funktionen der Prüfplanung. Dieses greift auf eine oder mehrere Informationen zurück, die in einem oder mehreren Unternehmensbereichen generiert werden. Dabei werden Methoden des Qualitätsmanagement zur Hilfe genommen. Die drei Dimensionen werden als gestalterischer Rahmen aufgefasst, in dem die modulare Prüfplanung durchgeführt wird. Die Funktionen und die Informationen aus den beteiligten Abteilungen flankieren den Prüfplanungsprozess, wogegen die QM-Methoden als wesentlicher additiver Einfluss gesehen wird. [Ber05]

Die **Funktionen** der konventionellen bzw. klassischen Prüfplanung sind Modulen zugeordnet und zusätzlich in Clustern gebündelt (vgl. Bild 3-3), so dass zusammengehörige

ge Funktionen als Ganzes betrachtet werden. Sobald eine Funktion einen neuen Input generiert sind alle im Cluster erstellten Ergebnisse zu überdenken.

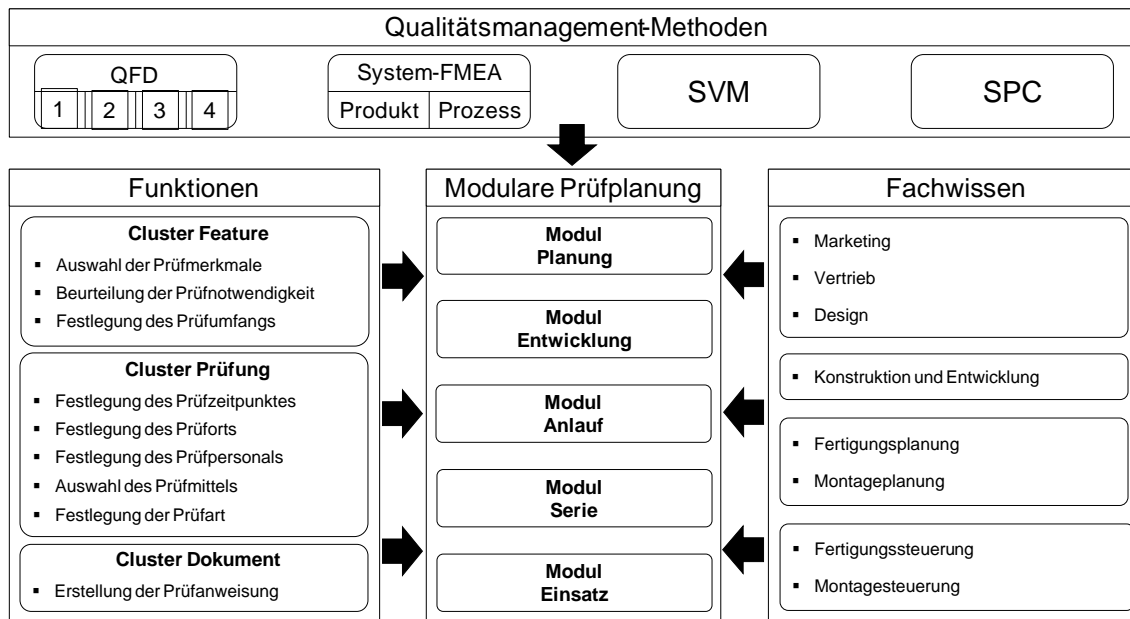


Bild 3-3: Gestaltungsrahmen der modularen Prüfplanung nach [Ber05, S. 80]

Das **Fachwissen** für die modulare Prüfplanung setzt sich aus den beteiligten Unternehmensbereichen zusammen, wobei diese ebenfalls in Clustern gebündelt werden, um thematisch zusammengehörige Bereiche zu kennzeichnen (vgl. Bild 3-3). Diese Bereiche können ebenfalls einzelnen Modulen zugeordnet werden.

Neben den vorgesehenen **QM-Methoden** (vgl. Bild 3-3) kann auf weitere Methoden zurückgegriffen werden, wie z. B. Kreativitätstechniken und Methoden zur Problemstrukturierung, die in den Modulen genutzt werden.

Bewertung: Die modulare Prüfplanung nach BERNARDS ermöglicht grundsätzlich die frühzeitige Prüfplanung. Eine Prüfmittelentwicklung integriert sie jedoch nicht. Anforderung seitens des Prüfmittels werden nicht in die Produktentwicklung zurückgespielt. Die Planung erfolgt parallel zur Produktentstehung, wobei die Reife des Prüfplans mit fortschreitender Produktreife zunimmt.

3.1.2 Prüfplanung – Ein Prozessmanagement für Fahrzeugprüfungen nach FORCHERT

FORCHERT stellt ein neues Prozessmanagement für Fahrzeugprüfungen dar. Das methodische Prozessmanagement für die Prüfplanung im Montagebereich des Herstellers stützt sich dabei auf eine IT-Lösung und bettet sich in die Entwicklungs-, Produktionsplanungs- und Produktionsprozesse ein. Es wird dabei das Ziel verfolgt alle Einflussfaktoren auf die Prüfplanung systematisch zu berücksichtigen und den Aufwand zur Planung zu reduzieren. Die Prüfplanung wird dabei nicht isoliert, sondern eingebettet.

tet in das Verständnis der sozialen, gesellschaftlichen sowie geschäftsprozessbezogenen Zusammenhänge gesehen. Insbesondere die Kooperation der verschiedenen Entwicklungsingenieure in den verschiedenen Organisationseinheiten wird berücksichtigt. Der entwickelte neue Prüfplanungsprozess umfasst vier Hauptphasen, die iterativ durchlaufen werden (vgl. Bild 3-4). Die Anwendung ist für Personenkraftwagen beschrieben, grundsätzlich ist das beschriebene Prozessmanagement jedoch generisch formuliert. [For09]

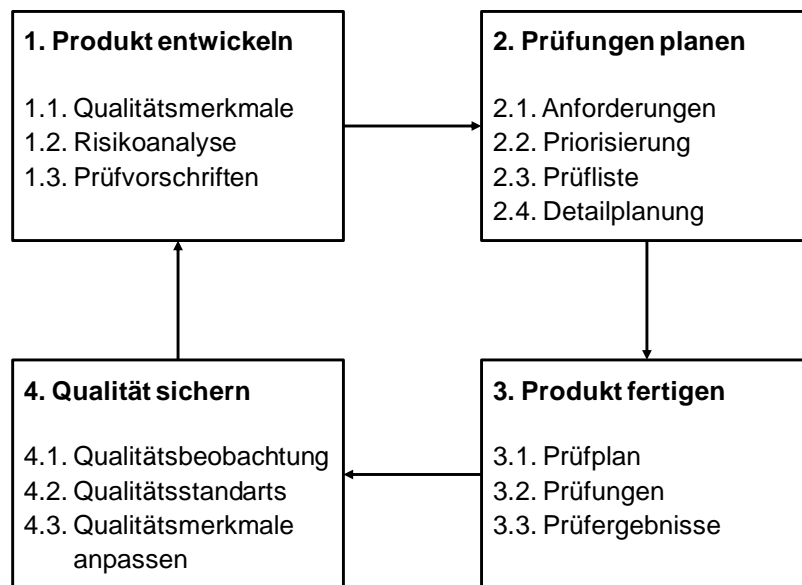


Bild 3-4: Zyklischer Ablauf der vier Hauptphasen des neuen Prüfplanungsprozesses [For09, S. 91]

Der Prozess zur Auswahl und Gestaltung von Prüfungen verfolgt das Ziel durch die systematische Prüfung ausgewählter Komponenten, Systeme, Wirkketten und Funktionen die Sicherheit und die Qualität der Fahrzeuge zu gewährleisten. Die Prozesse sind auf die verantwortlichen Organisationseinheiten (Entwicklung, Produktionsplanung, Produktion, Qualitätssicherung) in der industriellen Praxis zugeschnitten. Für jede dieser Organisationseinheiten ist ein eigener Prozess mit definierten Verantwortungen, Schnittstellen und Lieferumfängen definiert. [For09]

Die vier Hauptphasen werden im Folgenden beschrieben [For09]:

In der Phase **Produkt entwickeln** werden die produktbestimmenden Qualitätsmerkmale, die Sicherheitsklassen, die Risikofaktoren aus der Risikoanalyse und die Prüfvorschriften definiert und formuliert.

In der Phase **Prüfungen planen** wird eine Prüfbedarfsliste erstellt. Sie beinhaltet je Prüfbedarfsposition Informationen über Prüfaufwand (Kosten, Zeit) und Risikofaktoren. Jede Prüfbedarfsposition ist dabei einem Fertigungs-Gewerk zugeordnet (Presswerk, Rohbau, Lackierung, Montage). Für jedes Fertigungs-Gewerk ist dabei ein Prüfplanungsprozess vorzusehen. Die Prüfbedarfspositionen werden einem Priorisierungsverfahren unterzogen. Berücksichtigt werden dabei Risikofaktoren und

Vorgaben über Gesamt-Prüfaufwand (Kosten, Zeit). Aus der Prüfbedarfsliste wird durch einen Priorisierungsalgorithmus nach objektiven Kriterien die Prüfliste erzeugt. Diese Prüfbedarfsliste wird einer Freigabe unterzogen und archiviert. Der numerische Priorisierungsalgorithmus stellt die wichtigste Kernfunktion des Prozesses Prüfungen planen dar.

In der Phase **Produkt fertigen** wird aus der bis dahin baureihenspezifischen Prüfliste ein ausstattungs- und fahrzeugspezifischer Prüfauftrag durch das Produktionssteuersystem generiert, dokumentiert und archiviert. Auf der Basis dieses Prüfauftrages werden die Prüfung durchgeführt, Einzelergebnisse erfasst und archiviert.

Die Phase **Qualität sichern** verfolgt das Ziel auf der Basis der Feldbeobachtung die Qualitätsstandards und die zugehörigen Qualitäts-Merkmale zu definieren.

Mit dem mehrfachen Durchlauf (Iteration) des Zyklus werden die Annahmen der Risikoanalyse über die Betriebsdaten aus dem Feld (Qualitätsbeobachtung) bestätigt bzw. stoßen Anpassungen an. [For09]

Bewertung: Es wird ein neuer Prüfplanungsprozess vorgestellt, der alle Einflussfaktoren auf die Prüfplanung systematisch berücksichtigt. Die Kooperation unter den Entwicklungsbeteiligten wird dabei besonders gefördert. Es kann daher von einer guten Einbeziehung von Erfahrungswissen ausgegangen werden. Eine IT-Unterstützung ist dabei vorgesehen. Die Nutzung von On Bord Diagnosen zur Prüfung in der Fertigung werden beschrieben. Es ist grundsätzlich ein Vorgehen beschrieben. Wie sich dieses an der Produktentwicklung orientieren soll ist dabei allerdings nur ansatzweise zu erkennen. Die beschriebenen Fahrzeuge stellen variantenreiche mechatronische Systeme dar. Eine Prüfmittelentwicklung ist jedoch nicht vorgesehen. Eine modellbasierte Beschreibung von Produkt und Prüfmittel ist nicht vorgesehen.

3.1.3 Prüfplattform für mechatronisch ausgestattete Fahrzeuge in Entwicklung und Produktion nach SCHENK

SCHENK beschreibt eine durchgängige Prüfplattform für Fahrzeuge mit vollständigem Drive-by-Wire Antrieb. Die Prüfplattform ist dabei durchgängig nutzbar, von der frühen Fahrzeugentwicklung bis hin zu den Prüfungen in der Fertigungsline der Fahrzeugproduktion. Eine frühzeitige Entwicklung der Prüfplattform bzw. die frühzeitige Systemspezifikation über die Testabläufe wird dazu angestrebt. Damit soll das Bewusstsein geschaffen werden, welche Tests bzw. Prüfungen im späteren Verlauf der Wertschöpfungskette (Prototyp und Produktion) wie durchgeführt werden müssen. Durch die frühzeitige Planung der Tests bzw. Prüfungen soll die später benötigte Prüfbarkeit des Fahrzeugs sichergestellt werden. Ebenso sollen dadurch frühzeitige Tests im Entwicklungsprozess ermöglicht werden, um frühzeitig Fehler zu erkennen. Der theoretische Prozess einer frühen Integration von fehlererkennenden Tools in den (Software-)Entwicklungsprozess entlang des V-Prozesses (VDI2206) wird beschrieben. Für das Bandende wird ein vollautomatisierbares Prüf-, Einstell- und Kalibrierkonzept

vorgestellt. Schwerpunkt der Arbeit ist der Aufbau eines neuartigen Prüfstandes (ViL – Vehicle in the Loop) für den Entwicklungsprozess. Aus diesem Prüfstand ist ein vollautomatisiertes InLine Prüf- und Einstellkonzept für die Fahrzeugserienproduktion und die dort durchgeführte Bandendekontrolle entwickelt worden. Abgesehen von der Testtiefe bzw. Prüftiefe bestehen zwischen ViL und Bandendekontrolle keine großen Unterschiede. Die Gemeinsamkeiten zwischen Entwicklungstests wie HiL (Hardware in the Loop), SiL (Software in the Loop), MiL (Model in the Loop), ViL (Vehicle in the Loop) und den Prüfungen am Bandende werden dazu beschrieben. Diese verschiedenen Arten von Entwicklungstests werden in die Prüfplattform mit eingebunden. Mit der Prüfplattform können Prüfungen an real existierenden Komponenten und Schnittstellen durchgeführt werden, sobald diese existieren (z. B. ABS, ESP, Fensterheber, Spiegel, Automatiklicht, usw.). Im Ausblick führt SCHENK an, dass ein für alle Beteiligten durchgängig verständlicher und sinngemäß dokumentierter Prüf- und Entwicklungsprozess erarbeitet werden soll. Es sollen so erhebliche Kosten vermieden werden, aber auch die Qualität und Zuverlässigkeit der Fahrzeuge nachhaltig und effizient gesteigert werden. [Sch07]

Bewertung: Eine durchgängig nutzbare Prüfplattform für Entwicklung und Produktion wird beschrieben. Eine Prüfmittelentwicklung für das Fahrzeug wird dabei frühzeitig in die Entwicklung mit eingebunden. Dadurch wird die Prüfbarkeit des Fahrzeugs frühzeitig sichergestellt. Die Orientierung an der VDI-Richtlinie 2206 bzw. an dem darin enthaltenen V-Modell wird erwähnt. Wie sich die Entwicklung der Prüfplattform bzw. des Prüfmittels daran orientieren soll und wie sich dieses in einen Entwicklungsprozess einordnen kann ist kaum zu erkennen. Ein ausgearbeitetes Vorgehen fehlt. Der Fokus der Arbeit liegt eher auf den Entwicklungstests als bei den Prüfungen in der Produktion. Eine einheitliche und modellbasierte Beschreibung von Produkt und Prüfmittel ist nicht vorhanden.

3.1.4 Offenes, integratives Rahmenwerk für die Qualitätsprüfung variantenreicher Serienprodukte nach SCHMITZ

SCHMITZ beschreibt ein offenes, integratives Rahmenwerk für die Qualitätsprüfung variantenreicher Serienprodukte am Beispiel der Automobilmontage. Ein komponentenbasiertes Framework (Software) als Qualitätsprüfungssystem wurde dazu entwickelt. [Sch05]

Bezüglich der Prüfungen für komplexe bzw. variantenreiche Serienprodukte beschreibt SCHMITZ folgende Herausforderungen: Zur Gewährleistung der Qualität eines Produktes müssen die einzelnen Baugruppen nach der Montage oder nach einzelnen Prozessschritten geprüft und im Falle eines Fehlers repariert oder ausgetauscht werden. Die Prüfmethoden müssen dabei unter Berücksichtigung komplexer Baugruppen bzw. Abhängigkeiten von Baugruppen ausgewählt und in den Montageprozess eingebunden werden. Dabei müssen Kosten-Nutzen Gesichtspunkte berücksichtigt werden. In den Prüfprozessen ist dabei eine frühzeitige Fehlererkennung anzustreben, um geringe Folgekosten

zu gewährleisten. Die Art der Prüfungen und deren Kombination hängt vom herzustellenden Produkt und der Fertigungstechnik ab. Dabei sind für verschiedenartige Produktprüfungen (z. B. mechanische, hydraulische, elektrische, elektronische) unterschiedliche Abteilungen zuständig, welche auf die spezifischen Prüftypen spezialisiert sind. Durch die unterschiedlichen Prüfarten ergibt sich für die unterschiedlichen Organisationseinheiten ein heterogenes Umfeld von Prüferstellern und Prüftypen, die sich in einer Vielzahl von unterschiedlichen Prüfsystemen widerspiegeln. Durch neue Zusammenschlüsse von bisher getrennten Arbeitsbereichen ist der Bedarf einer Integration bzw. ganzheitlichen Betrachtung des Prüffeldes gegeben. Beispiel ist hierfür die Mechatronik. Die verschiedenen Organisationsbereiche stehen vor der Aufgabe prüfrelevante bzw. qualitätsrelevante Informationen auszutauschen und zu verknüpfen. Durch die vielfältigen Informationen entsteht dabei ein hoher Komplexitätsgrad. Dabei müssen oftmals auch Zulieferer mit eingebunden werden. Es werden also optimal anpassbare Prüf- und Messmittel und deren Verwaltung in der Qualitätsprüfung benötigt, um schnell und effizient auf die Vorstellungen und Anforderungen eines sich ändernden Marktes und damit ändernden Produkten zu reagieren. [Sch05, S. 21ff.]

SCHMITZ entwickelt daher ein informationstechnisches Konzept für ein Applikationsframework zur Unterstützung der Qualitätsprüfung. Kernelement ist dabei das Prüfdatenmanagement. Dabei werden vorhandene Softwarelösungen integriert. Die Prüfplanung für variantenreiche Produkte wird damit unterstützt und eine Gesamtbetrachtung des Prüffeldes ermöglicht. Das entwickelte Qualitätsprüfungssystem verschafft die organisatorische, prozessorientierte Sicht auf alle Daten und Informationen, die im Zusammenhang mit der Qualitätsprüfung benötigt werden. Es gestattet zudem einen einheitlichen Zugriff auf alle qualitätsrelevanten Informationen und bietet die Möglichkeit zur Personalisierung der Benutzeroberfläche über Rollen, sowie die Anpassung an den jeweiligen Handlungskontext. Das entwickelte Klassensystem befähigt einen Anwendungsentwickler ein komfortables und sicheres Qualitätsprüfungssystem umzusetzen. Das Klassensystem ermöglicht zusätzlich zur Produktion grundsätzlich die Einbeziehung von Entwicklung und Vertrieb, so dass ein unternehmensweites Qualitätsverständnis und direkte Rückkoppelmechanismen etabliert werden können. Ein inhärenter Qualitätsverbesserungsprozess wird durch das System zur Verfügung gestellt. Das Produkt wird über die Prüfungen ganzheitlich betrachtet. So ist es möglich eine Bewertung der Produktqualität für jedes einzelne produzierte Produkt vorzunehmen. Die dem Produkt zugeordneten Fehler bilden dazu die Grundlage. Trends können dabei aufgezeigt werden. Die bereichsübergreifende Informationsbereitstellung kann genutzt werden, um ein unternehmensweites Qualitätsinformationssystem aufzubauen, welches zu einem zentralen, zielorientierten Instrument für Qualitätsziele und -philosophien im Unternehmen werden kann. [Sch05]

Bewertung: SCHMITZ stellt ein Konzept für ein Softwarewerkzeug vor, welches alle relevanten Informationen rund um die Qualitätsprüfungen zugänglich macht und die Möglichkeit bietet diese Informationen miteinander zu vernetzen. Mechatronische Pro-

dukte in verschiedenen Varianten, also auch Module, werden dabei mit adressiert. Eine ganzheitliche Betrachtung der einzelnen Prüfungen wird dabei vorgenommen. Eine Abstimmung auf die Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme ist nicht beschrieben, aber ggf. denkbar. Eine Vorgehensweise ist nicht beschrieben. Eine Prüfmittelentwicklung ist nicht vorgesehen. Eine einheitliche und modellbasierte Beschreibung von Produkt und Prüfmittel ist somit auch nicht vorgesehen.

3.1.5 Prüfsystementwicklung mittels Fahrzeugreferenzmodell nach GROHMANN

GROHMANN beschreibt ein hybrides Fahrzeugreferenzmodell für die Prüfsystementwicklung. Ziel ist es dabei die Fehlerfreiheit eines gefertigten Fahrzeugs schnellstmöglich bzw. mit möglichst geringer Produktionszeit sicherzustellen. GROHMANN stellt fest, dass mit der Prüfsystementwicklung möglichst früh begonnen werden muss, um den Produktionsstart des Fahrzeugs durch ein nicht verfügbares Prüfsystem nicht zu verzögern. Die Entwicklung eines solchen Prüfsystems ist selbst wieder ein schwieriges und zeitaufwändiges Entwicklungsprojekt. Eine wesentliche Herausforderung wird dabei darin gesehen, dass zur Entwicklung des Prüfsystems idealerweise ein Serienfahrzeug zur Verfügung steht. Zur Entwicklungszeit des Prüfsystems stehen allerdings nur sehr kurze Zeit Prototypen zur Verfügung. Dies führt oftmals zur Verzögerung des Fertigungsanlaufs, da ohne Prüfsystem nicht produziert werden kann.

Es wird daher eine Vorgehensweise dargestellt, mit dem Prüfsysteme für elektronische Fahrzeugsysteme bereits zu einem frühen Zeitpunkt entwickelt werden können, auch wenn noch kein Prototyp des Fahrzeugs vorhanden ist. Dazu wird mit Hilfe von Simulationstechnik ein Ersatzsystem des noch nicht verfügbaren Fahrzeugs geschaffen, mit dem die komplette Prüfsystementwicklung durchgeführt werden kann. Durch die Integration von realen Steuergeräten (z. B. Entwicklungsmuster) in die Simulationsumgebung entsteht das hybride Fahrzeugmodell, welches das Referenzmodell bildet. [Gro96]

Bewertung: GROHMANN erkennt, dass es für die Fahrzeugproduktion unerlässlich ist, das Prüfsystem zum Produktionsstart bereitstehen zu haben. Dies betrifft grundsätzlich nicht nur die Fahrzeugindustrie, sondern viele weitere Firmen und Bereiche. Er reagiert darauf, indem er ein Ersatzsystem des noch nicht vorhandenen Fahrzeugs schafft und dieses nutzt, um das Prüfsystem zu entwickeln. Eine Anwendbarkeit für modulare mechatronische Systeme ist denkbar, wobei das Vorgehen nicht auf die bestehende Entwicklungssystematik abgestimmt ist und auch kein integrativer Entwicklungsprozess vorliegt. Eine frühzeitige und einheitliche modellbasierte Beschreibung von Produkt und Produktionssystem ist nicht vorgesehen.

3.1.6 Leitfaden zur Gestaltung einer ganzheitlichen Prüfplanung

Im Forschungsprojekt *P² – Nutzung reaktiver Prozessdaten für eine ganzheitliche Prüfplanung* der Forschungsgemeinschaft Qualität e.V. (FOS) – wurde ein Leitfaden zur

Gestaltung einer ganzheitlichen Prüfplanung erarbeitet. Als Ergebnis entstand ein Rahmenwerk für die Planung und Anpassung von Qualitätsprüfungen entlang des Produktlebenszyklus. In der Herstellungsphase lassen sich damit durch geeignete Methoden und Hilfsmittel Qualitätsprüfungen systematisch anpassen. Auch eine Nutzung der Erkenntnisse für spätere Entwicklungen, z. B. Nachfolgeprodukte, ist vorgesehen. Durch die Aktualisierung der Prüfsituation in der Produktion lassen sich Kosten sparen. Die klassische Prüfplanung wird dazu um eine herstellungsbegleitende Prüfplanung erweitert. [SK16], [KS15]



Bild 3-5: Aufbau des Leitfadens entlang der ganzheitlichen Prüfplanung [KS15, S. 27], [SK16, S. 3]

Die ganzheitliche Prüfplanung beschreibt die Aufgaben der Prüfplanung in unterschiedlichen Produktlebenszyklen. Sie besteht aus vier Prozessbereichen, die nachfolgend beschrieben werden [SK16], [KS15]:

Entwicklungsbegleitende Prüfplanung: Sie stellt die Aufgaben der Prüfplanung während der Produkt- und Prozessentwicklung dar. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um die etablierten Vorgehensweisen und Werkzeuge (vgl. dazu auch Kapitel 2.4.1). Ergänzend wird ein Prozess- und Datenkatalog vorgestellt, der ein Werkzeug zur Informationsbeschaffung für die Prüfplanung darstellt und diese so vereinfachen soll.

Herstellungsbegleitende Prüfplanung: Damit wird der Anwendungsbereich der Prüfplanung auf die Phase der Produktherstellung erweitert. Gegenstand der Prüfplanung ist somit nicht mehr nur die initiale Planung der Prüfungen im Rahmen des Produktentstehungsprozesses, sondern auch die Anpassung der Qualitätsprüfungen bei Änderungsbedarf in der Produktion. Ein Referenzprozess zur Planung, Bewertung und Umsetzung der Anpassung von Qualitätsprüfungen in der Herstellung wird dazu beschrieben.

Vernetzung der Prüfplanungsprozesse: Darunter werden Methoden und Werkzeuge des Wissensmanagements gefasst. Das bei der Anpassung von Qualitätsprüfungen in der Herstellungsphase erzeugte prüfplanungsrelevante Wissen kann damit erfasst werden. Es kann so für ähnliche Produkte oder zukünftige Entwicklungsprojekte genutzt werden. Die Prozesse der Prüfplanung in der Herstellungsphase und dem Produktent-

stehungsprozess werden dabei so verknüpft, dass generiertes Wissen gespeichert, verteilt und angewendet werden kann.

Verbesserungsmanagement: Durch das Verbesserungsmanagement sollen Schwachstellen bei der Umsetzung oder im Betrieb der Prüfplanungsprozesse identifiziert und abgestellt werden, was zu einer kontinuierlichen Optimierung der Prüfplanungsprozesse in der Entwicklung und Herstellung führt. Es wird dazu ein PDCA-Zyklus (Plan, Do, Check, Act) genutzt.

Bewertung: Das Konzept der ganzheitlichen Prüfplanung erweitert die Prüfplanung um eine herstellungsbegleitende Prüfplanung. Die Prüfung von aktuell produzierten Produkten kann so verbessert werden, wobei Kosten optimiert werden sollen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden in zukünftigen Entwicklungsprozessen mit berücksichtigt und führen so zu Verbesserungen auch in den nachfolgenden Entwicklungsprojekten. Die Einbeziehung und Nutzung von Erfahrungswissen ist bei diesem Konzept sehr gut ausgeprägt. Die entwicklungsbegleitende Prüfplanung orientiert sich an der konventionellen Prüfplanung (vgl. auch Kapitel 2.4.1). Daher wird die Prüfplanung auch nicht schon zu Beginn der Konzipierung integrativ mit einbezogen (vgl. auch Bild 2-19). Fokussiert werden daher auch Prüfungen von (mechanischen) Komponenten bzw. Teilen. Eine Prüfmittelentwicklung ist ebenfalls nicht vorgesehen.

3.1.7 Kontinuierliche Prüfplanung

Es wird ein Vorgehen beschrieben, welches Unternehmen bei der Anpassung von bestehenden Qualitätsprüfungen in der Produktion unterstützt. Prüf- und Fehlerkosten sollen so langfristig gesenkt werden. Die oftmals fehlende Aktualisierung der Prüfsituation in der Produktion soll durch das Vorgehen geschehen. Prüfkosten für unkritische Prüfprozesse können so verringert werden. Prüfprozesse für fehlerhafte Produkte aus dem Feld können ergänzt werden. Dazu wurde eine herstellungsbegleitende Prüfplanung entwickelt und ausgearbeitet, die in einem Referenzprozess abgebildet ist (vgl. Bild 3-6). Der Anwendungsbereich der Prüfplanung wird so auf die Phase der Produktherstellung erweitert. [KS16]

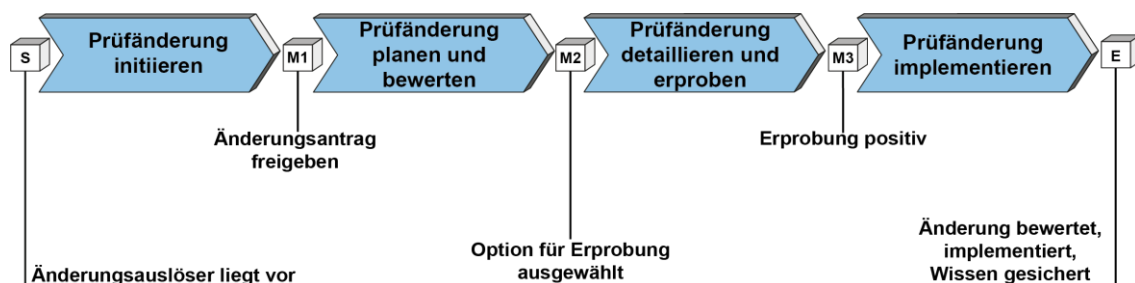


Bild 3-6: Referenzprozess für die herstellungsbegleitende Prüfplanung nach [KS16, S. 51]

Initiiert wird die herstellungsbegleitende Prüfplanung durch prüfplanungsbezogene Änderungsauslöser. Verschiedene Änderungsauslöser werden dazu aufgelistet. In der zweiten Phase werden verschiedene Änderungsoptionen für die Qualitätsprüfungen ermittelt, wobei die Analyse der Ursachen und Ziele für die Änderung mit eingehen. Verschiedene Methoden zur Ursachenanalyse können mit einbezogen werden (z. B. 5W-Methode, Ishikawa-Diagramm, Ursache-Wirkungs-Matrix). Grundsätzlich verschiedene Änderungsoptionen werden zur Auswahl vorgeschlagen. Die Auswahl erfolgt anhand prüfplanungsspezifischer Bewertungskriterien, die sich an den vier Perspektiven einer Balanced Scorecard orientieren (Finanzen, Kunden, interne Prozesse, organisationsbezogenes Lernen). Fällt die Entscheidung für eine Umsetzung, so kann diese im Nachgang detailliert, erprobt, dokumentiert und implementiert werden. Ob die Anpassung der Qualitätsprüfung gemäß der Zielstellung erfolgreich war, lässt sich im Anschluss durch einen Wirksamkeitsnachweis validieren. Die Vorgehensweise wurde bei mehreren Unternehmen erprobt. [KS16]

Bewertung: Die beschriebene Prüfplanung zielt auf die Optimierung während der Produktion ab. Eine Prüfmittelentwicklung ist dabei nicht vorgesehen. Eine Anwendung bei modularen mechatronischen Produkten ist nicht beschrieben, aber denkbar. Eine Abstimmung auf die Entwicklungssystematik mechatronischer Systeme ist nicht beschrieben. Eine modellbasierte Beschreibung von Produkt und Prüfmittel ist nicht vorgesehen.

3.1.8 Modulares Konzept zur produktübergreifenden Prüfplanung

Es wird ein modulares Konzept zur Prüfplanerstellung für die Produktgruppen mechanische Bauteile, elektronische Baugruppen und Software vorgestellt. Die generelle Gültigkeit der Prüfplanung nach der VDI2619 (vgl. Kapitel 2.4.1) für verschiedene Produktgruppen wird in Frage gestellt. Es wird daher ein produktübergreifendes und unabhängiges Vorgehen zur Prüfplanerstellung angestrebt. Dies baut auf einer kurzen produktgruppenspezifischen Analyse auf, welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede der produktgruppenspezifischen Prüfplanungsaufgaben verdeutlicht. Beispielhaft wird hierfür der Prüfplanungsschritt „Auswahl der Prüfmerkmale“ herangezogen. Es wird die Schlussfolgerung gezogen, dass die Unterschiede kein gänzlich von Produktgruppen unabhängiges Vorgehen zu Prüfplanung ermöglicht, jedoch auch Unterschiede bestehen. Das Vorgehen der Prüfplanerstellung wird in mehrere Prüfplanungsmodule untergliedert. Die Module sollen ein Prüfplanungsvorgehen ermöglichen, das von der äußeren Struktur für alle definierten Produktgruppen einheitlich ist. Die Module sollen dabei die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Prüfplanungsteilaufgaben zwischen den verschiedenen Produktgruppen berücksichtigen. In einer Matrix werden den drei Produktgruppen (mechanische Bauteile, elektronische Baugruppen, Software) die Prüfplanungsschritte zugewiesen. Die gemeinsamen Prüfplanungsschritte werden durch einen Rahmen in der Matrix gekennzeichnet. Zusätzlich wird gekennzeichnet, welche Informationen für die einzelnen Teilaufgaben der Prüfplanungsschritte benötigt werden.

Durch die herausgearbeiteten Gemeinsamkeiten und Unterschiede bei den verschiedenen Produktgruppen bezüglich der Prüfplanungsschritte motiviert, wird ein Denkanstoß zur Überarbeitung der VDI/VDE/DGQ-Richtlinie 2619 gegeben. [BS12]

Bewertung: Durch ein modulares Konzept wird der Versuch unternommen, die Planungsschritte zur Prüfplanerstellung für die Produktgruppen mechanische Bauteile, elektronische Baugruppen und Software so zusammenzufassen, dass das Prüfplanungsvorgehen von der äußeren Struktur her für alle definierten Produktgruppen einheitlich ist. Die Einbeziehung einer Prüfplanung für Software erscheint wenig sinnvoll, da der Test der Software der Entwicklung zugeordnet ist (bei der Reproduktion der Software muss daher lediglich geprüft werden, ob die Software richtig installiert ist – oftmals durch eine Checksumme; vgl. auch Kapitel 4.1.1, Fußnote 22). Eine Abstimmung auf die Entwicklungssystematik mechatronischer Systeme wird nicht beschrieben. Eine Prüfmittelentwicklung ist nicht vorgesehen. Eine einheitliche und modellbasierte Beschreibung von Produkt und Produktionssystem ist ebenfalls nicht vorgesehen.

3.1.9 Prüfplanung mittels Entscheidungstheorie

In dem Artikel wird eine Prüfplanung mittels Entscheidungstheorie propagiert. Es wird festgestellt, dass sich durch ständig erhöhende Produkt- und Prozesskomplexität die Anforderungen an die Prüfplanung ständig erhöhen. Die wesentlichen Gründe dafür sind: Simultaneous Engineering ist notwendig, um die „time to market“ zu verkürzen – jedoch müssen so Entscheidungen mit unsicheren Eingangsinformationen durchgeführt werden; Produktvarianten führen zu differenzierten Prüfplänen; zu geringe Vernetzung der Prüfplanung mit anderen planerischen Tätigkeiten führen zu Redundanzen und Mehraufwänden. Die Notwendigkeit einer ganzheitlichen Betrachtung der Prüfplanung innerhalb des Produktentstehungsprozesses sowie nachgelagerter Bereiche wird beschrieben. Es sollen so Zusammenhänge und Auswirkungen dargestellt werden und Entscheidungen in der Prüfplanung vereinfacht werden. Es wird die Entwicklung einer entscheidungstheoretisch gestützten Prüfplanung mit drei Kernelementen vorgestellt: Schnittstellenanalyse, Implementierung eines Entscheidungsmodells und Umsetzung in einem Softwaretool. In der Schnittstellenanalyse werden zugrunde liegende Informationsschnittstellen und -flüsse sowie Wechselwirkungen der Prüfplanung im Rahmen der sie umgebenden Unternehmensprozesse und weiterer Planungsdisziplinen analysiert. Darauf aufbauend können Entscheidungssituationen für die Prüfplanung definiert werden. In dem Entscheidungsmodell wird eine Methode entwickelt, die eine wirtschaftlich optimale Entscheidung in unterschiedlichen Situationen ermöglicht. Handlungsalternativen können damit unter Berücksichtigung von Umweltzuständen mit bekannten und unbekannten Eintrittswahrscheinlichkeiten (Sicherheit, Risiko, Unsicherheit) berücksichtigt werden. Für eine anwendergerechte Nutzung der entwickelten Methode ist ein Softwaretool hilfreich. Bild 3-7 stellt die Parallelisierung der Prüfplanung dar. [SB11]

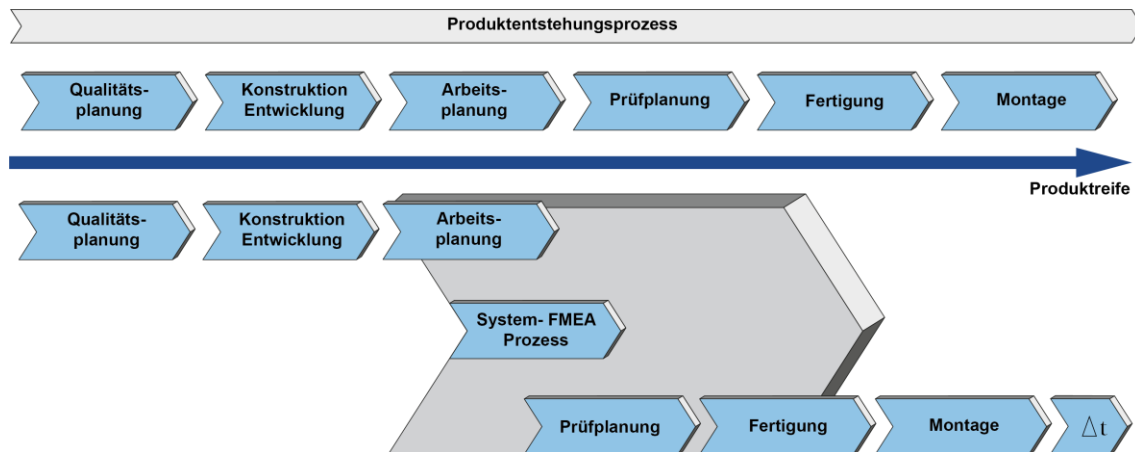


Bild 3-7: Ansätze zur Parallelisierung der Prüfplanung [SB11]

Bewertung: Eine Prüfplanung mittels Entscheidungstheorie wird vorgeschlagen. Eine bezüglich der Prüfplanung proaktiv arbeitende Entwicklung wird zwar erwähnt, eine frühzeitige Einbindung in die Prüfplanung in die Entwicklungstätigkeiten ist allerdings nicht zu erkennen (vgl. auch Bild 3-7). Über die Nutzbarkeit für mechatronische Systeme wird keine Aussage getroffen, jedoch kann angenommen werden, dass die Nutzung dafür gelingt bzw. dafür adaptiert werden kann. Die Einbeziehung einer Prüfmittelentwicklung ist nicht erkennbar. Eine modellbasierte Beschreibung von Produkt und Prüfmittel ist nicht vorgesehen.

3.1.10 Qualitätsmanagement in der Elektroindustrie – Konzept für die integrierte Prüfplanung in der modernen Elektronikproduktion nach BALTERS

BALTERS beschreibt ein Konzept für die integrierte Prüfplanung in der modernen Elektronikproduktion. Das Konzept besteht aus mehreren Bausteinen. Diese beschreiben Aufbau, Einbettung, Inhalte und Ablauf der Prüfplanung.

In dem ersten Baustein wird zwischen einer strategischen, produktübergeordneten Prüfplanung und einer taktischen Prüfplanung unterschieden. Die taktische Prüfplanung beschreibt die für ein spezielles elektronisches System anzuwendenden Prüfmethoden. Das Ergebnis der strategischen Prüfplanung ist eine Prüfstrategie, die wesentlich weiter gefasst wird als üblich. Sie wird als funktionale Strategie in das Gefüge der Unternehmensstrategien eingebettet und legt Strukturen, Methoden, Mittel und Fähigkeiten fest, welche für die Prüfung der elektronischen Systeme von Bedeutung sind. [Bal97]

Der zweite Baustein betrachtet wesentliche Inhalte der Prüfplanung als funktionsübergreifende Aufgaben. Eine bessere Abstimmung der qualitätsbestimmenden Faktoren soll dadurch erreicht werden. [Bal97]

In zwei weiteren Bausteinen wird auf den Ablauf der Prüfplanung in einer strategischen und taktischen Dimension eingegangen. Die strategische Prüfplanung beinhaltet einen Entscheidungsprozess, durch den die Prüfstrategie des Unternehmens derart gestaltet werden soll, dass sowohl die Wettbewerbsstrategie des Unternehmens wirksam unter-

stützt wird, als auch die erforderlichen operativen Fähigkeiten für die Zukunft sichergestellt werden. [Bal97]

Der neue Ansatz zur Entwicklung einer Prüfstrategie baut auf der Technologie-Portfolioanalyse und dem Technologie-Kalender auf. Die Wettbewerbsstrategie des Unternehmens aus Sicht der Prüfplanung wird dazu systematisch untersucht. Qualitätsbestimmende Faktoren der elektronischen Systeme werden dabei mit einbezogen. In einer ersten Stufe werden Prüfstrategien anhand ihrer Leistungsgrößen und der für die Anwendung der Prüfstrategien ausschlaggebenden Erfolgsfaktoren strategisch bewertet. In einer zweiten Stufe erfolgt eine operative und finanzielle Bewertung konkreter Lösungen zur Realisierung der alternativen Prüfstrategien. [Bal97]

In der taktischen Prüfplanung ist ein Entscheidungs- und Entwicklungsprozess enthalten, durch den die Prüftaktik für ein spezifisches elektronisches System festgelegt wird. In der Prüftaktik sind dabei die während der gesamten Produktentstehungs- und -nutzungsphasen anzuwendenden Prüfmethoden enthalten. Die zentralen Entwicklungsentscheidungen, auf die die Prüfplanung bei der Gestaltung eines elektronischen Systems stärker Einfluss nehmen muss, werden dargestellt. Die strategischen Zielgrößen Qualität, Kosten und Zeit sollen so optimiert werden. Es wird erläutert, wie ein neu entwickeltes integriertes Instrument zur Unterstützung der Produktgestaltung und Technologieauswahl genutzt werden kann, so dass aus Sicht der Prüfplanung aktiv Einfluss auf die zentralen Entwicklungsentscheidungen genommen werden kann, um so eine geeignete Prüftaktik zu finden. [Bal97]

Ein Ziel des Konzepts ist die Produktentstehungszeit durch eine optimale Prüfstrategie zu optimieren. Die Prüfstrategie bezieht sich dabei nicht nur auf ein einzelnes Produkt. Produktübergeordnete Langfristplanungen und Lebenszyklus-Kostenrechnung sollen zu Kostenersparnissen beitragen. Prüfmethoden bzw. prüfgerechtes Design für Elektronik werden von Beginn der Produktentwicklung mit berücksichtigt. [Bal97]

BALTERS orientiert sich bei seinem Konzept an der Planung der Prüfungen von elektronischen Baugruppen bzw. sein Konzept ähnelt in Teilen diesen Planungen (vgl. Kapitel 2.4.2).

Bewertung: BALTERS beschreibt ein Konzept für die integrierte Prüfplanung in der modernen Elektronikproduktion. Die Prüfplanung für die Elektronik soll im Entwicklungsprozess der Elektronik frühzeitig mit eingebunden werden. Ein Entwicklungsprozess ist nicht dargestellt. Das prüfgerechte Gestalten des Produktes wird frühzeitig in der Elektronikentwicklung vorgesehen. Eine Prüfplanung für ein gesamtes mechatronisches System ist nicht vorgesehen. Eine Prüfmittelentwicklung ist ebenfalls nicht vorgesehen. Eine einheitliche und modellbasierte Beschreibung von Produkt und Prüfmittel erfolgt nicht. Viele in der Problemanalyse von BALTERS dargestellten Herausforderungen und Lösungsansätze lassen sich auf mechatronische Systeme übertragen.

3.1.11 Prüfverfahren für die Serienfertigung feldbusfähiger Automatisierungskomponenten nach HERTWECK

HERTWECK beschreibt ein Prüfverfahren für die Serienfertigung feldbusfähiger Automatisierungskomponenten. Er kommt zu dem Schluss, dass für die Systemprüfung (Fertigungsendprüfung) moderner feldbusfähiger Automatisierungskomponenten wie Sensoren und Aktoren keine geeigneten Prüfverfahren vorhanden sind. Wesentlicher Grund dafür ist die eingeschränkte Zugänglichkeit, die im Wesentlichen durch die Miniaturisierung bzw. erhöhte Integrationsdichte verursacht wird. Die sonst zu Prüfzwecken genutzte Adaption von Bauelementepins oder internen Schaltungsknoten wird aufgrund der hohen Integrationsdichte erschwert. Die bis dahin eingesetzten In-Circuit- und Funktionsprüfungen verlieren daher an Effizienz. Die fertigungsbegleitenden Prüfungen reduzieren sich. Die Systemprüfung, die die Fertigung abschließt, gewinnt somit an Bedeutung, da die Defizite vorangegangener Prüfungen ausgeglichen werden sollen. Für die Zugänglichkeit zum Prüfling bei der Systemprüfung wird die natürliche Feldbusschnittstelle genutzt, da das zu prüfende Gerät im Auslieferungszustand bereits mit einem Gehäuse versehen oder vergossen ist. Dazu wird eine Systemarchitektur für ein Prüfmittel konzipiert. Diese ermöglicht die Stimulation und Datenerfassung über die Feldbusschnittstelle. Zusätzlich wird für die Prüfung von Feldbusfunktionen die Nachbildung besonderer Eigenschaften des Feldbussystemverhaltens auf logischer Ebene sowie auf physikalischer Ebene gewährleistet. Die Systemarchitektur unterstützt dabei die Integration des Prüfmittels in bestehende Prüfsysteme der Serienfertigung. [Her97]

Um eine wirtschaftliche Systemprüfung bei Serienprodukten durchführen zu können, wird eine neue, zweistufige Prüfstrategie vorgeschlagen, die systematisch die Auswahl der Prüfmerkmale unterstützt. Zunächst wird durch eine funktionale Prüfung die Fehlerfreiheit von Feldbus- und Gerätefunktionen sichergestellt. Danach wird das Verhalten der externen Schnittstellen auf Einhaltung der Spezifikation überprüft. Die elektrischen Eigenschaften der Feldbusschnittstelle stehen dabei im Vordergrund. [Her97]

Die Systemprüfung setzt eine reale Betriebsumgebung voraus, die das Prüfsystem in geeigneter Art und Weise nachbildet. Wesentliches Ergebnis ist die spezifizierte und prototypisch realisierte Nachbildung bzw. Emulation der Feldbussystemumgebung. Es können dabei Normal- und Fehlverhalten emuliert werden. Dem Feldbusprüfgerät liegt dabei eine modulare Systemarchitektur zugrunde, um eine flexible Erweiterbarkeit zu gewährleisten. Durch die Verwendung von standardisierten Schnittstellen wird eine Einbindung in vorhandene Prüfsysteme der Serienfertigung sichergestellt. [Her97]

Bewertung: HERTWECK beschreibt ein Prüfverfahren für die Serienfertigung feldbusfähiger Automatisierungskomponenten. Die Feldbusschnittstelle steht dabei im Mittelpunkt der Arbeit. Bei der Prüfung der externen Schnittstellen beschränkt sich die Arbeit auf die Feldbusschnittstelle. Die elektrischen Prüfungen stehen insgesamt im Vordergrund. HERTWECK entwickelt zwar selbst ein Prüfmittel, eine Anleitung zur Prüfmittelentwicklung ist jedoch nicht enthalten. Eine einheitliche und modellbasierte Beschreibung von Produkt und Prüfmittel ist nicht vorgesehen.

3.1.12 Methodik zur Integration der Prüfplanung in die Qualitätsplanung nach TUETE KWAM

TUETE KWAM stellt eine Methodik zur Integration der Prüfplanung in die Qualitätsplanung vor. Traditionell wird am Anfang des Produktentstehungsprozesses eine Qualitätsplanung vorgenommen. Darin werden die Tätigkeiten durchgeführt, welche die Zielsetzungen und die Qualitätsforderungen festlegen. Dies umfasst eine Strategieplanung, eine Planung der Produkteigenschaften und die Planung der Fertigungseigenschaften. Nach der Qualitätsplanung wird während der Arbeitsvorbereitung und Fertigung/Montage die Qualitätsprüfung durchgeführt. Diese dient der Feststellung, inwieweit eine Einheit die in der Qualitätsplanung festgelegten Qualitätsforderungen erfüllt. Zur Qualitätsprüfung zählen dabei die Prüfplanung, die Prüfausführung und die Prüfdatenauswertung. Die Prüfplanung ist dabei strikt von der Qualitätsplanung getrennt und erfolgt später im Produktentstehungsprozess. Informationen werden spät in die Prüfplanung eingebunden, was einer optimalen Arbeitsweise widerspricht. Die traditionelle Prüfplanung beschäftigt sich dabei meist mit der Prüfung von einzelnen Komponenten und nicht mit komplexen Gesamtsystemen. [Tue96]

TUETE KWAM verzahnt die Prüfplanung und Qualitätsplanung, da die Qualitätsplanung wesentliche Eingangsinformationen für die Prüfplanung beinhaltet. Doppelte Arbeitsschritte werden so verhindert. Die Prüfplanung beginnt so schon während der Entwicklungsphase. Fehler können so vermehrt dort beseitigt werden, wo sie auftreten und am wenigsten kosten. Durch die frühzeitige Einbindung der Prüfplanung während der Entwicklung können dabei nicht nur die Prüfung einzelner Komponenten betrachtet werden, sondern auch Baugruppen oder komplexe Gesamtsysteme (Anwendungsbeispiel ist ein gesamtes Getriebe, das aus mehreren Zahnrädern besteht). Es werden dazu die Produktmerkmale ermittelt. Jedes Produktmerkmal bildet dabei ein potentiell Prüfmerkmal, wobei aus den potentiellen Prüfmerkmalen die zu prüfenden Merkmale auszuwählen sind. In einen Produktplan werden die Prüfmerkmale integriert. [Tue96]

Bewertung: TUETE KWAM integriert die Prüfplanung in die Qualitätsplanung, die bereits während der Produktentwicklung aktiv ist. Er betrachtet grundsätzlich komplexe Produkte und leitet auf Basis von Produktmerkmalen bereits frühzeitig Prüfmerkmale ab. Aus dem Anwendungsbeispiel und der Betrachtung, dass jedes Produktmerkmal ein potentiell Prüfmerkmal ist, ist zu erkennen, dass mechanische oder ggf. auch elektromechanische Produkte im Vordergrund stehen (Produktmerkmale, die ausschließlich durch Software realisiert werden, brauchen nicht in der Fertigung geprüft werden). Eine Prüfmittelentwicklung ist nicht vorgesehen. Eine einheitliche und modellbasierte Beschreibung von Produkt und Prüfmittel existiert nicht.

3.1.13 Modell für ein integriertes Qualitäts- und Prüfplanungssystem in der Montage nach KRING

KRING beschreibt ein integriertes Qualitäts- und Prüfplanungssystem für die Montage. Er erkennt, dass die Montage gewisse Besonderheiten im Vergleich zur Teilefertigung beinhaltet. Durch die Montage einzelner Teile entstehen vor allem neue Prüfmerkmale, die meist durch Funktionsprüfungen geprüft werden. Er geht dabei davon aus, dass die Automatisierung von Zwischenprüfungen recht gering ist, wohingegen der Automatisierungsgrad der Endprüfungen und Funktionsprüfungen relativ hoch ist. [Kri89]

KRING stellt Methoden zur Systematisierung der Qualitätssicherung zur Verfügung. Die Auswahl der Prüfmerkmale steht dabei im Vordergrund (vgl. auch Rei98, S. 37). Die Auswahl der Qualitätsmerkmale und die Festlegung der Prüfhäufigkeit sollen dabei optimal bezüglich der Entdeckung von Fehlern hinsichtlich der Kosten sein. Das Erkennen von Fehlerursachen und das Zuordnen zu Verursachern soll dabei die Qualitätslenkung erleichtern, wobei ursachenbezogene Qualitätsinformationen zur Reduzierung von Montagefehlern beitragen sollen. Über die Ursache-Wirkungsbeziehungen kann bei der Auswahl der Prüfmerkmale und der Prüfnotwendigkeit sowie der Bestimmung der Prüfhäufigkeit die Korrelation der Merkmale zugrunde gelegt werden. Doppelprüfungen können so unterbunden werden und Merkmale, die Indikatoren für die Prozessregelung sind, können so zur Prozessregelung benutzt werden. Die Ursache-Wirkungsbeziehungen können weiterhin für die bedarfsgerechte Informationsbeschaffung genutzt werden. [Kri89]

Das entstandene Modell ist dabei so geartet, dass es für eine rechnergestützte Lösung geeignet ist. Das Modell unterteilt sich dabei in die Funktionsblöcke Qualitätsplanung, Prüfplanung, Prüfdurchführung und Qualitätsdatenverarbeitung, zwischen denen Schnittstellen definiert sind. Mittels der Schnittstellen können während des gesamten Planungsverlaufes erforderliche Informationen ausgetauscht werden. Es existieren dabei Schnittstellen zu weiteren betrieblichen Systemen. [Kri89]

Bewertung: Kring beschreibt ein integriertes Qualitäts- und Prüfplanungssystem für die Montage. Eine Prüfmittelentwicklung ist dabei nicht vorgesehen. Eine einheitliche und modellbasierte Beschreibung von Produkt und Prüfmittel kann daher nicht existieren. Die Verbindung zur Entwicklung wird nur am Rande betrachtet.

3.2 Integrative Entwicklung

In diesem Kapitel werden Ansätze beschrieben, die ein abgestimmtes Vorgehen der Produkt- und Produktionssystementwicklung ermöglichen, wobei dabei die Prüfmittelentwicklung im Fokus steht.

3.2.1 Integrierte Gestaltung automatisierter Prüfmittel nach REITER

REITER kommt zu dem Schluss, dass insbesondere bekannte Methoden aus der Montageplanung, aufgrund des deutlich höheren Anteils an Messtechnik sowie Steuerungs- und Auswertesoftware, nicht direkt übernommen werden können. REITER beschreibt daher einen Lösungsansatz zur integrierten Gestaltung automatischer Prüfmittel für die flexible Montage. Die Prüfmittelentwicklung betrachtet er dabei explizit als eigene Entwicklung, die in enger Abstimmung mit der Produktentwicklung geschehen muss. Er zeigt damit einen Weg auf, wie die Qualitätsprüfung unter Verwendung von Baukastenstrukturen flexibilisiert und in Produktionsumgebungen integriert werden kann. Es soll dabei eine Stückzahl-, Produkt- und Variantenflexibilität erreicht werden. Fokussiert wird die Prüfung in der Montage elektromechanischer Erzeugnisse. [Rei98]

In Bild 3-8 ist das Vorgehen bei der Prüfmittelentwicklung nach REITER dargestellt. Dies orientiert sich dabei an gängiger Entwicklungsmethodik zur Zeit der Erstellung des Vorgehens. Bei der Prüfmittelentwicklung wird die Entwicklungsaufgabe gegliedert in Messtechnik, Softwareentwicklung und mechanische Konstruktion. [Rei98]

Das Gesamtverfahren ähnelt dabei dem Vorgehen bei der Entwicklung mechatronischer Systeme.

Das Vorgehen besteht aus fünf Phasen wobei Iterationsschleifen und Rücksprünge zwischen den Phasen zulässig sind (vgl. Pfeile zwischen den Phasen in Bild 3-8) [Rei98]:

Phase 1 – Aufgabenklärung: Zu Beginn der ersten Phase müssen die Anforderungsliste sowie Unterlagen über Vorläuferprodukte vorhanden sein. Falls es sich bei dem Produkt um eine Neuentwicklung handelt, so sind weitere Informationen z. B. über die angewandten physikalischen Effekte erforderlich. Es wird zunächst die Aufgabenstellung definiert. Es erfolgt die Festlegung der Prüfkriterien und die Festlegung der Abfolge der Prüfungen. Weiterhin sind die Projekttrandbedingungen wie Kosten, Zeitplan etc. abzuklären. Der frühzeitigen und genauen Festlegung der gewünschten Flexibilität (z. B. Variantenflexibilität oder gewünschte Stückzahlbereiche) kommt dabei bereits in der Aufgabenstellung eine hohe Bedeutung bei, da damit in den folgenden Phasen entscheidende Weichenstellungen verbunden sind. Aussagen über den Prüfbedarf und Funktionalität der Prüfeinrichtung ergeben sich aus der Aufgabenklärung.

Phase 2 – Konzeption: Zu Beginn der zweiten Phase müssen die Informationen über die Produktstruktur, die Montagereihenfolge und das grobe Anlagenkonzept vorhanden sein. Es werden dann die Systemgrenzen zum Materialfluss und zur Montageanlagen-

steuerung festgelegt sowie Definitionen der Schnittstellen vorgenommen. Die Schnittstellen betreffen dabei hauptsächlich die Bereiche Konstruktion und Softwareentwicklung. In enger Abstimmung aller Bereiche ist die interne Struktur der Prüfeinrichtung abzuleiten. Dies reicht von der Festlegung der Messverfahren über die Auswahl der Steuerungstechnik bis hin zum mechanischen Aufbau. Ergebnisse dieser Phase sind das Prüfverfahren sowie Aussagen über Taktzeiten und Investitionskosten der Qualitätsprüfung.

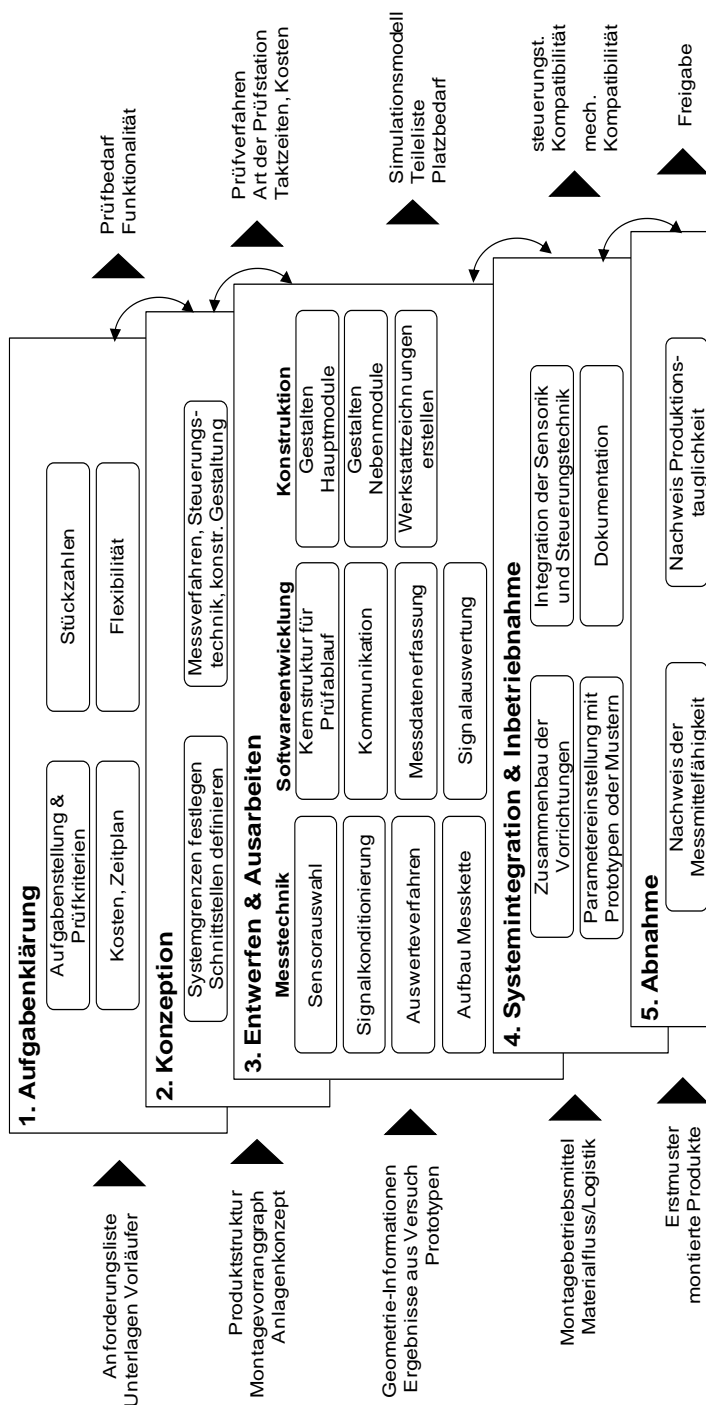


Bild 3-8: Vorgehen bei der Prüfmittelentwicklung nach [Rei98, S. 75 und S. 78]

Phase 3 – Entwerfen und Ausarbeiten: Zu Beginn der dritten Phase müssen die Produktgeometrie sowie Ergebnisse aus dem Versuch zur Eigenschaftsfrüherkennung und eventuell Prototypen vorliegen. In der Phase Entwerfen und Ausarbeiten werden die Aufgaben in die Bereiche Messtechnik, Softwareentwicklung und Konstruktion aufgeteilt. Im Bereich der Messtechnik wird zunächst die Sensorauswahl durchgeführt und die Messkette bis zur digitalen Messwertverarbeitung entworfen. Anhand von Messungen an Prototypen oder Vorläuferprodukten werden geeignete Auswerteverfahren ausgewählt und Parameter für die Auswerteverfahren festgelegt. Im Bereich der Softwareentwicklung wird zunächst vom allgemeinen Prüfablauf ausgegangen. Dann werden die Kommunikationsfunktionen für die Anbindung der Montageanlage und des Materialflusses sowie die Visualisierung entworfen. Im Bereich der Konstruktion wird, ausgehend von einer Grobgestaltung der Module zur Feingestaltung hin, detailliert. Als Ergebnis dieser Phase können der Montageplanung ein CAD-Geometriemodell und Aussagen über Prüfablauf innerhalb der Prüfstation sowie Platzbedarf zur Verfügung gestellt werden.

Phase 4 – Systemintegration und Inbetriebnahme: Zu Beginn der Phase müssen die Betriebsmittel und die Transportsysteme mit ihren informationstechnischen Schnittstellen bekannt sein. Es werden die Vorrichtungen zusammengebaut. Die Integration der Sensorik und der Steuerungstechnik sowie die Anpassung der Prüfparameter nach Messungen an Prototypen und Erstmustern werden vorgenommen. Als Ergebnis kann die steuerungstechnische und mechanische Kompatibilität der Prüfeinrichtung abgesichert werden.

Phase 5 – Abnahme: Zur Durchführung der Abnahme ist in der Regel der Nachweis der Messmittelfähigkeit zu führen, wozu Erstmuster oder bereits montierte Produkte aus der Nullserie benötigt werden. In der Phase Abnahme werden Untersuchungen zur Bestimmung der Messmittelfähigkeit durchgeführt. Gegebenenfalls werden Nachweise für die Produktionstauglichkeit durchgeführt. Dies kann z. B. die ordnungsgemäße Prüfung einer bestimmten Stückzahl sein. Als Ergebnis liegt die Freigabe vor.

Bewertung: REITER beschreibt ein in den Produktentstehungsprozess integriertes Vorgehen. Die Prüfmittelentwicklung wird in die Montageplanung eingebettet. Erforderliche Ein- und Ausgangsinformationen der einzelnen Phasen werden aufgezeigt. Einzusetzende Methoden und Werkzeuge werden beschrieben.

REITER kommt der zu entwickelnden Entwicklungssystematik in Teilen nahe. Eine Abstimmung auf die Entwicklungssystematik mechatronischer Systeme liegt nicht vor, auch wenn Ähnlichkeiten bestehen (die VDI2206 – Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme – kam z. B. erst nach Erstellung der Arbeit von REITER auf). Eine modellbasierte Beschreibung von Produkt und Prüfmittel erfolgt nicht. REITER fokussiert die Gestaltung von Prüfmittel in automatisierten Montageumgebungen, z. B. eingebettet in einer Montagelinie.

3.2.2 Simultaneous Engineering

Unter Simultaneous Engineering wird die zielgerichtete, interdisziplinäre bzw. abteilungsübergreifende Zusammen- und Parallelarbeit in der gesamten Produkt-, Produktions- und Vertriebsentwicklung für den gesamten Produktlebenslauf mit einem straffen Projektmanagement verstanden [PBF+07, S. 205], [EM13, S. 227f.]. Simultaneous Engineering wird oft auch als Concurrent Engineering bezeichnet [PBF+07, S. 205], [KP13, S. 69]. Der Unterschied wird darin gesehen, dass Simultaneous Engineering bewusst auf die Parallelisierung von Produkt- und Produktionssystementwicklung abzielt, während durch Concurrent Engineering im Schwerpunkt eine optimale Produkterstellung durch interdisziplinäre Zusammenarbeit im Team angestrebt wird [EM13, S. 228].

Grundidee des Simultaneous Engineering ist die Parallelisierung verschiedener Tätigkeiten im Vergleich zum sequenziellen Ablauf [EBL95, S. 2]. In Bild 3-9 ist schematisch der traditionelle, sequenzielle Projektablauf mit dem parallel ablaufenden Simultaneous Engineering gegenübergestellt.

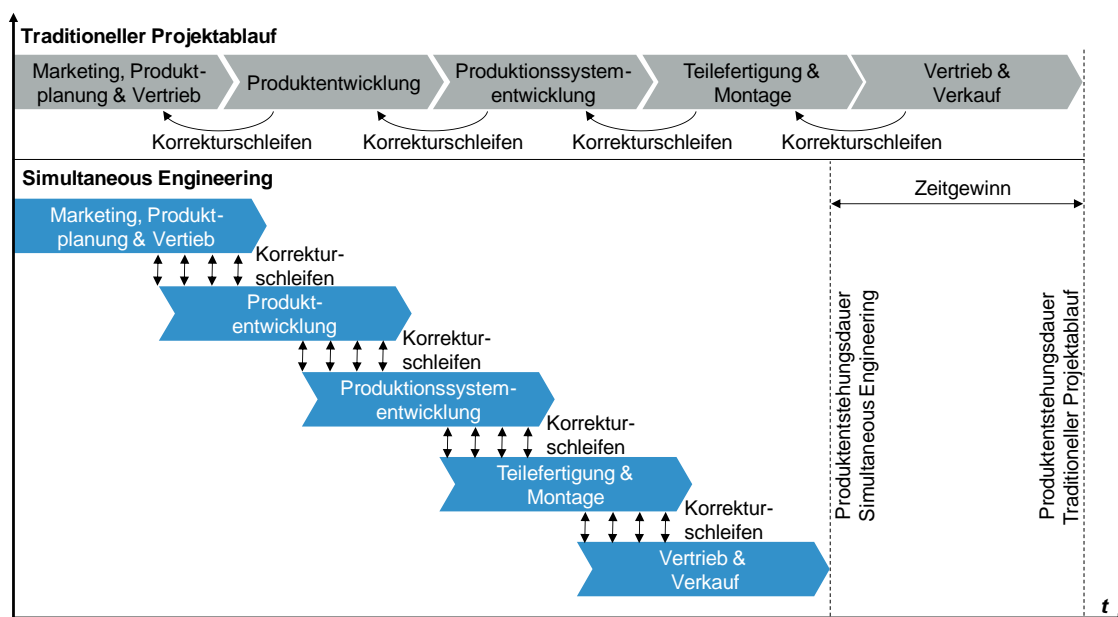


Bild 3-9: Simultaneous Engineering in Anlehnung an [KP13, S. 69], [PBF+07, S. 206], [EBL95, S. 2]

Zur Produktentwicklung wird ein Entwicklungsteam zeitlich befristet gebildet. Dabei werden alle an der Produktentstehung beteiligten Bereiche im Team berücksichtigt. Abteilungsgrenzen sollen so überwunden werden. Die Ziele sind dabei: kürzere Entwicklungszeiten, schnellere Produkterstellung, Kostenreduktion am Produkt und in der Produktentwicklung sowie Qualitätsverbesserung. [PBF+07, S. 206], [EM13, S. 228]

Grundsätzlich sollen durch den frühen Start mit dem nächsten Arbeitsablauf schnell Fehler erkannt werden. Diese können dann rechtzeitig beseitigt werden, bevor diese erhebliche Kosten in einer späteren Phase verursachen. Teilweise ist jedoch mit Mehr-

aufwand zu rechnen, da nicht mit dem endgültigen Informationsstand gearbeitet werden kann. [KP13, S. 69]

Verschiedene Einzelmethoden können bzw. sollen im Rahmen des Simultaneous Engineering eingesetzt werden: Teamarbeit, Projektmanagement, Parallelisierung von Arbeitsabläufen, Einbezug der Kunden, Kooperation mit Systemlieferanten, Schwerpunktbildung mit ABC-Analyse, FMEA, DFA, DFM, Target Costing, zielkostengesteuertes Konstruieren, Simulation und Rapid Prototyping. Wichtig ist dabei eine Betonung und Visualisierung von Zielen und Ergebnissen. [EM13, S. 228]

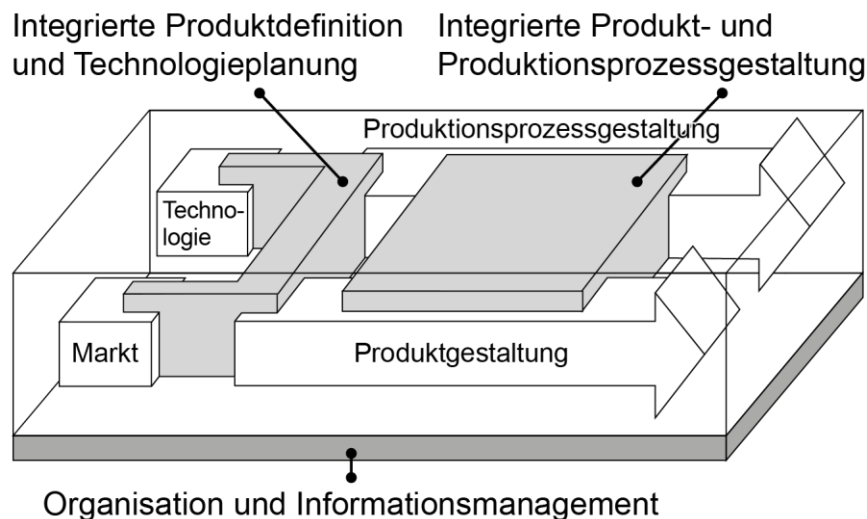
Kernelement des Simultaneous Engineering sind abgestimmte Entscheidungen in frühen Phasen der Entwicklung. Spätere Änderungen sollen so reduziert und der weitere Entwicklungsprozess parallelisiert werden. Voraussetzung dafür ist eine eindeutige Definition des Entwicklungsziels in einem abgestimmten Lasten-/Pflichtenheft. [EBL95, S. 19ff.]

Bewertung: Im Fokus des Simultaneous Engineering steht die frühzeitige, zielgerichtete interdisziplinäre Zusammen- und Parallelarbeit im Produktentstehungsprozess. Dabei kommen eine Vielzahl von Methoden, Werkzeugen und Verfahren zum Einsatz. Ein konkretes Vorgehen zur Einbeziehung der Prüfmittelentwicklung existiert nicht. Eine modellbasierte Beschreibung von Produkt und Prüfmittel ist zwar im Rahmen des Simultaneous Engineering denkbar, aber nicht explizit vorgesehen.

3.2.3 Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung nach EVERSHEIM/SCHUH

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 316 „Modelle und Methoden zur integrierten Produkt- und Prozessgestaltung“ wurde ein Konzept zur Integration von Produkt- und Prozessgestaltung erarbeitet, mit dem Ziel einen Modell- und Methodenbaukasten für die integrierte Produkt- und Prozessgestaltung zu entwickeln. [ES05, S. 3]

Das Rahmenkonzept besteht aus drei Hauptbereichen (vgl. Bild 3-10): Organisation und Informationsmanagement, integrierte Produktdefinition und Technologieplanung sowie integrierte Produkt- und Produktionsprozessgestaltung. Die integrierte Produkt- und Produktionsprozessgestaltung fokussiert dabei die frühen Phasen der Produktentstehung. Es wird mit dem Sammeln von Frühinformationen aus dem Unternehmensumfeld begonnen und mit der Fertigungsplanung der Produkte geendet. [ES05, S. 11]



*Bild 3-10: Rahmenkonzept der integrierten Produkt- und Prozessgestaltung
[ES05, S. 11]*

Die drei Hauptbereiche werden nachfolgend beschrieben [ES05, S. 11ff. und S. 191ff.]:

Organisation und Informationsmanagement: Dieser Bereich stellt die Grundlage der integrierten Produkt- und Prozessgestaltung dar und umfasst die Abläufe der integrierten Produkt- und Prozessgestaltung sowie ein ganzheitliches Informationsmanagement im Sinne eines Product Lifecycle Managements. Abläufe werden dabei unternehmensintern und -übergreifend in Projekten zusammengefasst. Zur langfristigen Sicherstellung des Unternehmenserfolgs müssen die richtigen Projektideen identifiziert, bewertet und ausgewählt werden, wobei diese mit dem gesamten Projektportfolio sowie dem Produktprogramm abzustimmen sind. Auf eine enge Verknüpfung zwischen Projekt- und Variantenmanagement ist dabei zu achten. Eine der zentralen Aufgaben des Projektmanagements während der Projektlaufzeit ist dabei das Risikomanagement, das aufgrund des dynamischen und komplexen Unternehmensumfeldes notwendig ist. Projektsituationen können so frühzeitig risikobezogen beurteilt und Steuerungsmaßnahmen eingeleitet werden. Ein weiterer wichtiger Bestandteil in diesem Bereich ist die Organisation der Entwicklungsteams, da dadurch die Effizienz eines Entwicklungsprojekts maßgeblich beeinflusst werden kann. Methoden zur Gestaltung von Teams sollen dabei angewendet werden. Das Projektmanagement soll dabei funktionsübergreifend sein, um auch externe Partner mit einbinden zu können. Während des Kooperationsaufbaus wird die Eignung potentieller Kooperationspartner bewertet und das Entwicklungsnetzwerk konfiguriert. Diesem Schritt kommt insbesondere bei mechatronischen Systemen aufgrund der hohen Komplexität eine hohe Bedeutung bei. Bei Kooperationen ist dabei ein unternehmensübergreifendes Qualitätssystem vorgesehen und ein Controlling-System zu implementieren. Zur Unterstützung des Projektmanagements und anderer Kernbereiche dient ein Informationsmanagement im Sinne des Product-Lifecycle-Managements, welches auf dem integrierten Produkt- und Prozessmodell basiert sowie dem Kommunikationssystem basiert.

Integrierte Produktdefinition und Technologieplanung: Dieser Bereich dient der Zusammenführung von Markt-/Kundenbedürfnissen und technologischen Innovationen, wobei die Kunden- und Umweltanforderungen frühzeitig und systematisch zu erfassen sind. Eine unternehmensübergreifende Produktdefinition ist dabei notwendig, da heutzutage überwiegend in Unternehmenskooperationen entwickelt wird. Technologische Innovationen müssen frühzeitig erkannt und bei der Produktentwicklung berücksichtigt werden. Mit geeigneten Methoden werden dazu Anforderungen erhoben und Produktkonzepte gefunden. Es wird eine Produktstruktur erarbeitet, wobei mögliche Herstellungstechnologien zugewiesen werden. Die Produktstruktur bildet Abhängigkeiten zwischen einzelnen Elementen ab, so dass Anforderungen an Module und Baugruppen zugewiesen werden können. Durch die frühzeitige Einbeziehung der Fertigung können Restriktionen aus der Fertigung frühzeitig mit in die Produktstruktur einfließen.

Integrierte Produkt- und Produktionsprozessgestaltung: Dieser Bereich dient der frühzeitigen Abstimmung von Produkten und Produktionsprozessen, so dass Abhängigkeiten zwischen Produkt- und Produktionsmerkmalen berücksichtigt werden können. Insbesondere die Herstellkosten sollen so frühzeitig positiv beeinflusst werden. Auswirkungen von neuartigen Produkt- und Fertigungstechnologien auf die Ablauf- und Aufbauorganisation sollen frühestmöglich berücksichtigt werden. Die Fertigungsleittechnik wird auf die Produktionsprozesse ausgelegt.

Die Prüfplanung wird in diesem Bereich berücksichtigt, da sie eine entscheidende Rolle bei der Wirtschaftlichkeit des Herstellungsprozesses spielt. Die Prüfnötwendigkeit eines Qualitäts- oder Funktionsmerkmals muss definiert und eine optimale Prüfstrategie entwickelt werden. Eine Methode zur optimierten Prüfablauf- und Prüfmittleinsatzplanung wird dazu vorgestellt. Relevante Unternehmensbereiche mit ihren Eingangsinformationen werden dabei mit einbezogen. Der Fokus liegt dabei auf Produktgeometrie, Konstruktionsdaten und Kundenanforderungen, aus denen Produktmerkmale abgeleitet werden. Informationen über Technologieketten, alternative Prozessketten, Kostenstrukturen des Unternehmens und Informationen über die Verfügbarkeit von Prüfmitteln werden mit einbezogen. In den frühen Phasen der Produktentwicklung wird dabei im Sinne des Simultaneous Engineering eine integrierte Prüfplanung konstruktionsbegleitend und parallel zu den planenden Tätigkeiten durchgeführt. Durch die frühe Einbindung in die Produktentwicklung, sowohl während der Prototypen- auch während der Vorserienfertigung, soll die Effizienz der Prüfplanung erhöht werden. Es kann während der frühen Phasen der Entwicklung zwar noch kein vollständiger Prüfplan erstellt werden, jedoch können wesentliche Prüfmerkmale in frühen Stadien identifiziert werden. Oftmals wird dabei eine Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse zur Hilfe genommen.

Bewertung: Die integrierte Produkt- und Prozessgestaltung umfasst Methoden zur Steigerung von Effektivität und Effizienz in der Produkt- und Produktionssystementwicklung, wobei die frühen Phasen der Produktentstehung fokussiert werden. Die Prüfplanung wird grundsätzlich thematisiert und frühzeitig in das Entwicklungsgeschehen eingebunden. Der Fokus liegt dabei allerdings auf der Prüfung der Geometrie, Konstrukti-

onsdaten und Kundenanforderungen. Prüfungen von mechatronischen Systemen, z. B. mittels Funktionsprüfungen werden nicht beschrieben. Grundsätzlich erfolgt die frühzeitige Einbindung der Prüfplanung. Eine Prüfmittelentwicklung wird dabei nicht systematisch eingebunden. Eine frühzeitige Einbindung aufgrund einer einheitlichen und modellbasierten Beschreibung ist nicht vorgesehen.

3.2.4 IPE-Methodik

Unter der IPE-Methodik (Integrierte Produkterstellungsmethodik) wird eine Methodik bzw. ein ganzheitliches Methodensystem zur Produkterstellung unter besonderer Berücksichtigung der Zielorientierung und Zusammenarbeit der beteiligten Menschen verstanden. Entstanden ist die Methodik aus den Erfahrungen aus der Konstruktionsmethodik zusammen mit systematischen Denkansätzen. Die zunehmende Komplexität bei der Erstellung von Produkten soll damit angegangen werden, um dabei insbesondere kürzere Entwicklungszyklen und steigende Qualitätsansprüche zu berücksichtigen. Die IPE-Methodik ist dabei nicht nur für die Entwicklung und Konstruktion, sondern als Ansatz für die gesamte Produkterstellung gedacht. Der Ansatz umfasst z. B. auch Produktion, Vertrieb und Materialwirtschaft. Die gegenseitige Abstimmung der Verantwortlichen in den verschiedenen Bereichen und Abteilungen wird dabei als zentrale Aufgabe angesehen. Die Inhalte der IPE-Methodik müssen sich dabei aus den Problemen und den Problemlösungsmöglichkeiten aller an der Produkterstellung beteiligten Teilsysteme ergeben. Diese Teilsysteme sind in Bild 3-11 als abgerundete Balken dargestellt. [EM13, S. 207ff. und S. 325ff.]

Die Teilsysteme werden nachfolgend genauer beschrieben [EM13, S. 327f.]:

- **Sachsystem Produkt:** Darunter werden alle physikalisch-technischen Eigenschaften und Lösungsmöglichkeiten gefasst (physikalische, gestalterische, stoffliche Merkmale).
- **Sachsystem Produktion:** Darunter werden die Eigenschaften und Lösungsmöglichkeiten der Produktionstechnik verstanden, die das Produkt herstellen muss.
- **Ziel- und Handlungssystem Mensch:** Darunter wird zunächst das Individuum verstanden, das im Zielsystem seine Motivation und Wünsche für die Arbeit im Unternehmen einbringt. Das Handlungssystem des Individuums enthält Fähigkeiten, Kenntnisse und Kompetenz, welche zum Problemlösen erforderlich sind.
- **Ziel- und Handlungssystem Entwicklung und Konstruktion:** Darunter werden Inhalte, die Organisation und organisatorische Methoden der Entwicklung bzw. Konstruktion verstanden, sowie sachgebundene Methoden.
- **Ziel- und Handlungssystem der Bereiche X:** Darunter werden die weiteren an der Produkterstellung beteiligten Bereiche verstanden, wie Produktion, Vertrieb, Materialwirtschaft, Controlling, Lieferanten usw.

- **Ziel- und Handlungssystem Kunde:** Darunter wird der Kunde verstanden, der direkt oder indirekt an der Produkterstellung beteiligt ist.

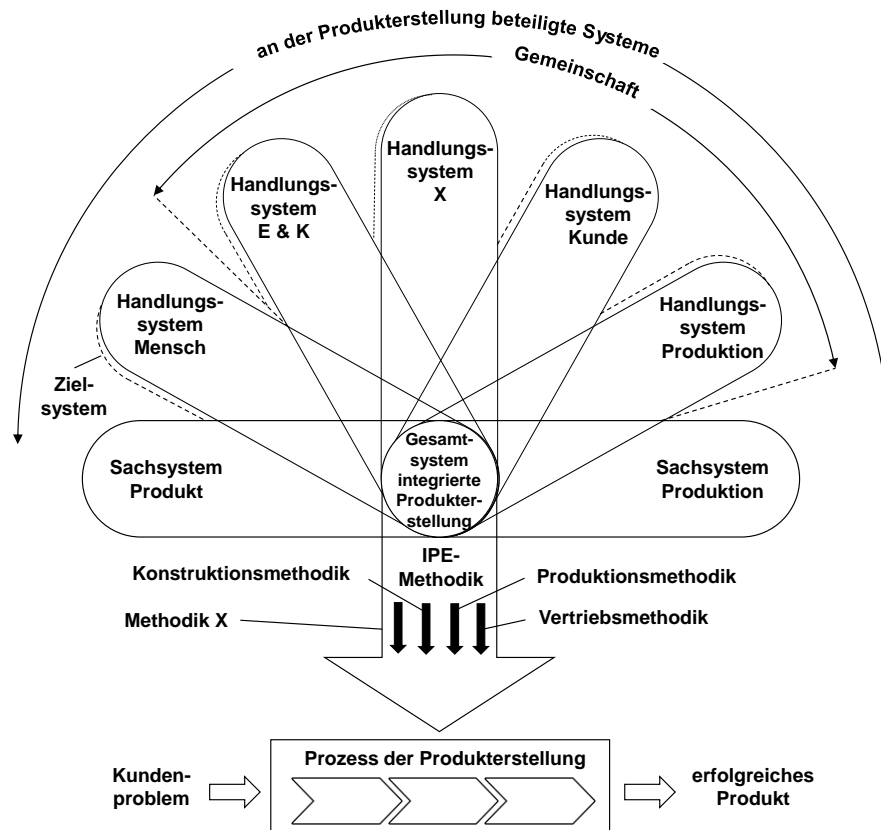


Bild 3-11: IPE-Methodik als Zusammenwirken verschiedener Sach-, Handlungs- und Zielsysteme [EM13, S. 358]

Der Schwerpunkt der IPE-Methodik liegt auf der besonderen Berücksichtigung der Zielorientierung und dem Zusammenarbeiten der beteiligten Menschen. Es werden dabei folgende Vorteile erwartet [EM13, S. 325ff.]:

- Gemeinsame Begriffe, Denkweisen und Methoden sollen ein integriertes, abgestimmtes, **ganzheitlich optimales Handeln** erleichtern.
- Die ganzheitliche Betrachtung soll zu **besseren Produkten** führen (Qualität, Zeit, Kosten).

Bewertung: Die IPE-Methodik ist ein ganzheitlicher Ansatz zur Entwicklung komplexer Systeme. Sie beinhaltet je nach Vorhaben ausprägende Pläne und Methoden und legt dabei den Schwerpunkt auf die Berücksichtigung der Zielorientierung und dem Zusammenarbeiten der Menschen. Grundsätzlich ist eine Abstimmung der verschiedenen Bereiche wie Entwicklung und Produktion vorgesehen. Wie die Prüfmittelentwicklung in das gesamte Entwicklungsgeschehen für modulare mechatronische Systeme einzubinden ist, wird nicht beschrieben. Eine einheitliche und modellbasierte Beschreibung von Produkt und Prüfmittel ist nicht vorgesehen.

3.3 Bewertung und Handlungsbedarf

Der Großteil der in der Problemanalyse herausgearbeiteten Herausforderungen lässt sich in dem Stand der Technik wiederfinden und bestätigt somit die herausgearbeiteten Herausforderungen. Der Stand der Technik wird nachfolgend mit den Anforderungen verglichen:

A1) Anwendbarkeit bei modularen mechatronischen Systemen: Die grundsätzliche Berücksichtigung mechatronischer Produkte ist oftmals gegeben. Die Berücksichtigung der Modularität sowohl vom Produkt als auch vom mechatronischen Prüfmittel ist oft nicht gegeben. Die Planungstätigkeiten für Prüfmittel sind oftmals von der Denk- und Vorgehensweise der konventionellen Prüfplanung geprägt, die grundsätzlich für alle Produkte gedacht ist, jedoch die Prüfung (mechanischer) Komponenten bzw. Teile fokussieren (vgl. Kapitel 2.4.1). Lediglich die *Integrierte Gestaltung automatisierter Prüfmittel* nach REITER berücksichtigt diese Forderung umfassend.

A2) Abstimmung auf die etablierte Entwicklungsmethodik: Keiner der untersuchten Ansätze erfüllt diese Anforderung ganz. Entweder sind diese nicht auf die Entwicklungsmethodik mechatronischer Systeme abgestimmt oder sie berücksichtigen die gängigen Aufgaben und Vorgehensweisen der Prüfplanung nicht.

A3) Systematische und effiziente Vorgehensweise: Die Forderung nach einem Vorgehen, das die Entwicklung mechatronischer Produkte, deren Produktionssysteme und deren Prüfmittel umfasst und dabei insgesamt ein effizientes Vorgehen fokussiert, wird lediglich von der *Integrierten Gestaltung automatisierter Prüfmittel* nach REITER umfassend erfüllt.

A4) Frühzeitige Integration: Die frühzeitige Einbindung der Prüfplanung bzw. Prüfmittelentwicklung wird grundsätzlich von vielen Planungstätigkeiten für Prüfmittel als Notwendigkeit angesehen. Meist wird darunter allerdings die Einbindung im Rahmen der Arbeitsvorbereitung verstanden, die nach der Entwicklung stattfindet. Eine frühzeitige Einbindung bereits während der Entwicklung wird lediglich von SCHENK und TUETE KWAM beschrieben. Bei TUETE KWAM stehen allerdings keine mechatronischen Produkte als Prüflinge im Vordergrund. Wie die Prüfmittelentwicklung frühzeitig zu integrieren ist, ist auch bei SCHENK kaum zu erkennen.

A5) Einheitliche und modellbasierte Beschreibung: Die Forderung nach einer möglichst einheitlichen und modellbasierten Notation von Produkt, Produktionssystem, Prüfmittel und Prüfplanung während der frühen Entwicklungsphasen wird von keiner der beschriebenen Ansätze erfüllt. Es existieren Ansätze, die das Produkt und Produktionssystem einheitlich und modellbasiert modellieren. Auch Ansätze zur einheitlichen Modellierung der Prüfmittelentwicklung und der zugehörigen Prüfplanung sind erkennbar. Eine insgesamt einheitliche Notation, die somit die Übergänge zwischen Produktentwicklung, Produktionssystementwicklung und zugehöriger Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung erleichtert, ist in den untersuchten Ansätzen nicht beschrieben.

A6) Einbeziehung von Erfahrungswissen: Der überwiegende Anteil der untersuchten Ansätze ermöglicht bzw. sieht eine Einbeziehung von Erfahrungswissen vor. Insbesondere bei der vorgesehenen Intensität der Ermittlung der Erfahrungswerte – bezogen auf die Prüfmerkmale – ergeben sich deutliche Unterschiede, so dass die Anforderung bei den unterschiedlichen Ansätzen als mehr oder weniger erfüllt angesehen werden kann.

A7) Projekt- und unternehmensspezifische Anpassung: Der überwiegende Anteil der untersuchten Ansätze ermöglicht bzw. sieht eine Anpassung der Vorgehensweise vor.

Die Bewertung des Stands der Technik anhand der gestellten Anforderungen ist in Bild 3-12 dargestellt. Keiner der untersuchten Ansätze erfüllt dabei alle Anforderungen vollständig. Die Planungstätigkeiten für Prüfmittel sind insgesamt oftmals von der Denk- und Vorgehensweise der konventionellen Prüfplanung geprägt, die grundsätzlich für alle Produkte gedacht ist, jedoch die Prüfung von (mechanischen) Komponenten bzw. Teilen fokussieren (vgl. Kapitel 2.4.1). Am ehesten erfüllt REITER die gestellten Anforderungen, jedoch geht er nicht explizit auf die Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme ein. Die Forderung nach einer einheitlichen und modellbasierten Beschreibung erfüllt keiner der untersuchten Ansätze. Es besteht also **Handlungsbedarf** zur Entwicklung einer *Systematik zur integrativen Entwicklung von mechatronischen Produkten und deren Prüfmittel*.

Obwohl bei der Spezifikationstechnik CONSENS und der VDI-Richtlinie 2206 eine Vorgehensweise zur Berücksichtigung der Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung fehlt sind hier aus Sicht der integrativen Entwicklung am ehesten die Anforderungen erfüllt. Daher dienen die Spezifikationstechnik CONSENS und die VDI-Richtlinie 2206 zusammen mit den etablierten Herangehensweisen zur Prüfplanung als Ausgangsbasis zur Systematik in Kapitel 4.

Bewertung: Das Verfahren hat die Anforderungen...	Anforderungen						
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
<input checked="" type="radio"/> weitestgehend erfüllt <input type="radio"/> teilweise erfüllt <input type="radio"/> kaum erfüllt							
Planungsansätze für Prüfmittel							
Modulare Prüfplanung nach BERNARDS	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Prüfplanung – Prozessmanagement für Fahrzeugprüfungen nach FORCHERT	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Prüfplattform für mechatronisch ausgestattete Fahrzeuge nach SCHENK	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Rahmenwerk für die Qualitätsprüfung variantenreicher Serienprodukte nach SCHMITZ	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Prüfsystementwicklung mittels Fahrzeugreferenzmodell nach GROHMANN	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Leitfaden zur Gestaltung einer ganzheitlichen Prüfplanung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kontinuierliche Prüfplanung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Modulares Konzept zur produktübergreifenden Prüfplanung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Prüfplanung mittels Entscheidungstheorie	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Konzept für die integrierte Prüfplanung in der Elektronikproduktion nach BALTERS	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Prüfverfahren für feldbusfähige Automatisierungskomponenten nach HERTWECK	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Methodik zur Integration der Prüfplanung in die Qualitätsplanung nach TUETE KWAM	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Modell für ein integriertes Qualitäts- und Prüfplanungssystem nach KRING	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Integrative Entwicklung							
Integrierte Gestaltung automatisierter Prüfmittel nach REITER	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Simultaneous Engineering	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung nach EVERSHEIM / SCHUH	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
IPE-Methodik	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

Bild 3-12: Bewertung des untersuchten Stands der Technik anhand der Anforderungen

4 Entwicklungssystematik

Im Rahmen dieser Arbeit soll die Lücke zwischen der frühzeitigen Produkt- und Produktionssystemtkonzipierung für mechatronische Systeme und der zugehörigen Prüfmittelentwicklung geschlossen werden. Eine frühzeitige Prüfplanung wird dazu beschrieben.

In diesem Kapitel wird anhand eines generischen Referenzprozesses die Entwicklungssystematik allgemein erläutert. Die Modularisierung des Prüfmittels anhand der Produktstruktur wird anhand eines Anwendungsbeispiels in Kapitel 5 erläutert. Ebenso wird die Anpassung des generischen Referenzprozesses aus Kapitel 4 an eine konkrete Entwicklungsaufgabe sowie der Einsatz dedizierter Hilfsmittel anhand des Anwendungsbeispiels in Kapitel 5 verdeutlicht.

In Kapitel 4.1 wird zunächst eine Einführung in die Entwicklungssystematik gegeben. Hier wird insbesondere ein Überblick über den generischen Referenzprozess gegeben, der in Kapitel 4.2 unter Zuhilfenahme eines Systemmodells und dedizierter Hilfsmittel detailliert beschrieben wird. In Kapitel 4.3 wird beschrieben wie der generische Entwicklungsprozesses als Prozessbausteinkasten interpretiert werden kann und somit eine projekt- und unternehmensspezifische Anpassung des Entwicklungsprozesses erfolgen kann.

4.1 Einführung in die Entwicklungssystematik

In Kapitel 4.1.1 werden zunächst die Bestandteile der Entwicklungssystematik beschrieben. In Kapitel 4.1.2 wird aufgezeigt wie eine gemeinsame Spezifikation von Produkt, Produktionssystem und Prüfmittel mithilfe der Spezifikationstechnik CONSENS erfolgen kann. Kapitel 4.1.3 beschreibt die Beziehungen im Referenzprozess bezogen auf die im späteren Referenzprozess auszutauschenden Informationen. In Kapitel 4.1.4 wird ein Überblick über den Referenzprozess gegeben, der in Kapitel 4.2 detailliert dargestellt wird.

4.1.1 Bestandteile der Systematik

Das 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung nach GAUSEMEIER (Bild 2-5) bildet das Rahmenwerk für die vorliegende *Entwicklungssystematik*. Dabei wird dem zweiten Zyklus die Produktentwicklung zugeordnet. Dem dritten Zyklus werden die Produktionssystementwicklung mit der zugehörigen Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung zugeordnet. Die im 3-Zyklen-Modell beschriebene integrative Entwicklung des zweiten und dritten Zyklus wird hier weiter vertieft, insbesondere im Hinblick auf die Integration der Entwicklung des Prüfmittels und der zugehörigen Prüfplanung. Es wird davon ausgegangen, dass ein oder mehrere Prüfmittel zu entwickeln sind.

Die Bestandteile der Entwicklungssystematik sind in Bild 4-1 dargestellt. Nachfolgend wird ein kurzer Überblick über die Bestandteile der Entwicklungssystematik gegeben.

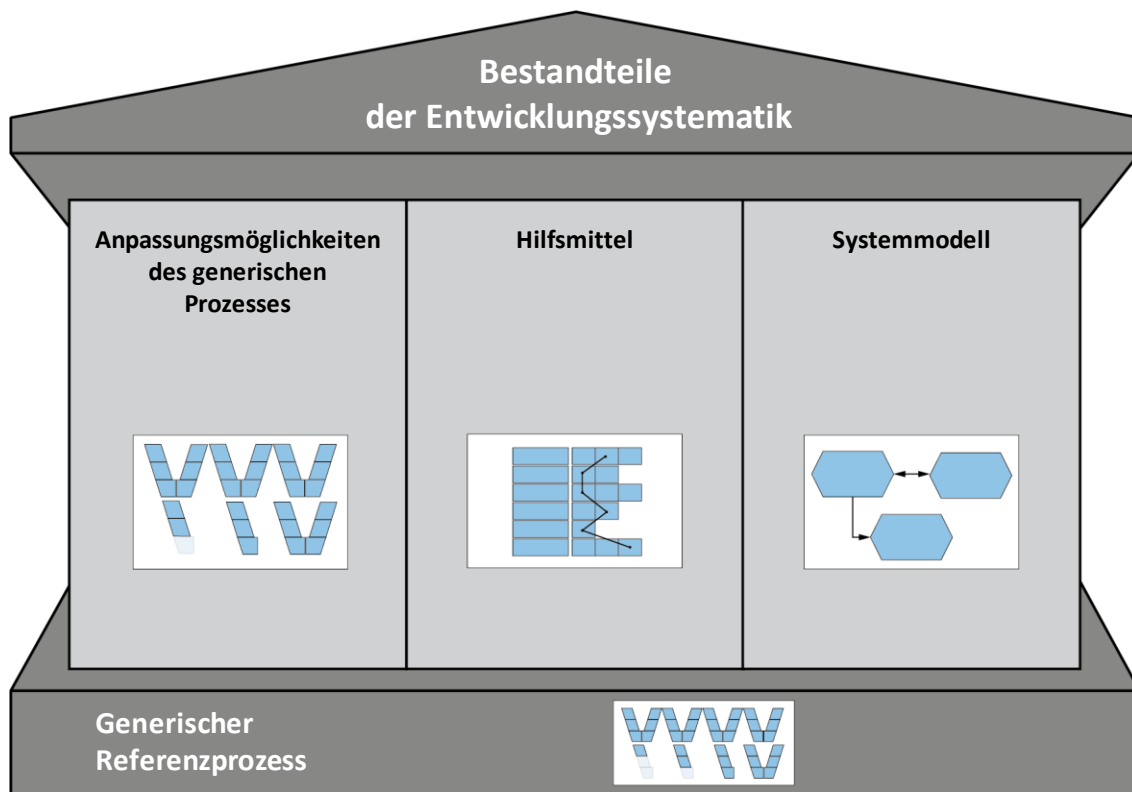


Bild 4-1: Wesentliche Bestandteile der Entwicklungssystematik

Generischer integrativer Referenzprozess

Der generische integrative Referenzprozess ist ein Vorgehensmodell und stellt den Hauptbestandteil der Entwicklungssystematik dar. Er liefert eine Gesamtübersicht, welche Schritte im Zuge der Produkt- und Produktionssystementwicklung sowie der Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung zu durchlaufen sind. Der Referenzprozess zeigt weiterhin in welcher Reihenfolge optimaler Weise vorgegangen werden soll und welche Zwischenergebnisse vorliegen (die ggf. außerhalb dieser Arbeit für andere Zwecke genutzt werden können).

Es handelt es sich um ein zyklisches Vorgehen, welches sich an den Zyklen des V-Modells der Produktentwicklung aus der VDI 2206 (vgl. Bild 2-9) und dem Vorgehen der Spezifikationstechnik CONSENS orientiert. Es wird dabei davon ausgegangen, dass in der Produktentwicklung das komplette V-Modell mehrfach nacheinander durchlaufen wird (vgl. Bild 2-9). In der Produktionssystementwicklung wird das Prüfmittel ebenfalls nach dem gleichen V-Modell entwickelt, wobei dieses mehrfach teilweise und einmal komplett durchlaufen wird. Die Verzahnung der V-Modelle zwischen Produktentwicklung und Prüfmittelentwicklung bildet dabei einen wesentlichen Bestandteil der Systematik und ist in Bild 4-1 im Bereich des generischen Referenzprozesses stilisiert

angedeutet. Der integrative Prozess orientiert sich dabei an den Grundideen des Simultaneous Engineering (vgl. Kapitel 3.2.2).

Der generische Referenzprozess ist in Kapitel 4.1.4 (Bild 4-4) als Übersicht dargestellt und erläutert. In Kapitel 4.2 werden die vier Durchläufe des Referenzprozesses in den Bildern Bild 4-5, Bild 4-14, Bild 4-15 und Bild 4-16 detailliert dargestellt und anhand dieser erläutert, wobei das Vorgehen der Prüfplanung in Bild 4-9 weiter detailliert ist. In Anhang A5 wird auf einer höheren Abstraktionsebene das Grundprinzip des Gesamt-vorgehens komprimiert beschrieben.

Anpassungsmöglichkeiten des generischen Prozesses

Das Vorgehensmodell, in Form des Referenzprozesses, ist dabei nicht als starrer nur in der Form zu durchlaufender Entwicklungsprozess zu verstehen. Er ist viel mehr als ein Prozessbausteinkasten zu verstehen, mit dessen Hilfe – der Situation angepasst – ein projekt- und unternehmensspezifischer Entwicklungsprozess ausgeprägt werden kann. In Kapitel 4.3 ist dazu beschrieben wie diese Anpassung vorgenommen werden kann. Anhand eines Industriebeispiels ist eine solche Anpassung in Kapitel 5.2 verdeutlicht.

Hilfsmittel

Innerhalb des generischen integrativen Entwicklungsprozesses sind in Bezug auf das Ziel, ein möglichst gut auf die anderen Funktionsbereiche abgestimmtes Prüfmittel zu entwickeln, verschiedene Teilaufgaben zu lösen. Die Lösung dieser Teilaufgaben erfolgt anhand von dedizierten Hilfsmitteln. Diese bieten Hilfestellungen und geben Handlungsanweisungen bzw. -empfehlungen zur strukturierten Lösung der Teilaufgaben. Teilweise sind dies Methoden, die in der Literatur beschrieben sind. Um diese für die bestehende Aufgabe bzw. für die hier beschriebene Vorgehensweise nutzbar zu machen, sind diese teilweise angepasst. Wo nicht anders möglich sind eigene Hilfsmittel entwickelt worden. Dabei wurde darauf geachtet möglichst konsistent zu bestehenden Ansätzen zu bleiben und alle bisher beschriebenen Aufgaben – insbesondere im Bereich der Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung – zu lösen.

Ein wesentliches Augenmerk liegt dabei auf der Anforderungsanalyse für Prüfmittel und deren Dokumentation. Prüfmerkmale können dabei im Rahmen dieser Arbeit als Anforderungen an das oder die Prüfmittel betrachtet werden. Alle prüfbaren Eigenschaften des Produktes (Prüfling), die nicht ausschließlich durch Software realisiert sind, sind zunächst potentielle Prüfmerkmale²². Da eine gleiche Anforderung an das

²² Software (SW) wird in der Produktentwicklung ausgiebig getestet (Qualifizierung/Eigenschaftsabsicherung). SW ist keinen Fertigungsunsicherheiten ausgesetzt, wie z. B. einer mechanischen Verarbeitung. Durch seinen immateriellen Charakter treten keine Fertigungsprobleme/Abnutzungserscheinungen auf. Da ein SW-Fehler im Sinne der Produktion ein systematischer Fehler wäre, braucht die SW in der Produktion nicht geprüft werden. (vgl. dazu auch [FLS07, S. 15] und [Her97, S. 2])

In der Produktion muss hinsichtlich SW lediglich geprüft werden, ob die richtige SW-Version/SW-Konfiguration auf der richtigen Version/Konfiguration der Hardware aufgespielt ist usw. Diese Prüfung ist bei mechatronischen High-End-Produkten Standard.

Prüfmittel sowohl vom Produkt als auch vom sonstigen Produktionssystem ausgehen kann, werden diese beiden gleichen Anforderungen in der Systematik miteinander abgeglichen. So ist diese Anforderung an das Prüfmittel nur einmal vorhanden, allerdings mit der Zuweisung von den beiden Quellen. Dies geschieht mithilfe der beschriebenen Prüfplanung (Kapitel 4.2.4.4, 4.2.4.5, 4.2.4.6) und insbesondere unter Zuhilfenahme der darin enthaltenen Prüfpläne (Bild 4-10, Bild 4-11, Bild 4-12, Bild 4-13), wodurch diese Synchronisation geschehen kann.

Die Hilfsmittel sind immer an der Stelle des Referenzprozesses beschrieben an der diese verwendet werden. Nachfolgend sind die bedeutendsten Hilfsmittel aufgelistet:

- CONSENS als Methode in erweiterter Form, wobei diese um die Erstellung und Verwendung der Partialmodelle des Prüfmittels erweitert ist (im gesamten Kapitel 4.2 übergeordnete Verwendung, Verdeutlichung in Kapitel 5.3)
- Kategorisierung von Produktschnittstellen mit dem wesentlichen Ziel der Identifikation des frühestmöglichen Prüfzeitpunktes (Kapitel 4.2.2.2)
- Beschreibung einer frühzeitigen Prüfplanung, angepasst für mechatronische Systeme unter Zuhilfenahme der Spezifikationstechnik CONSENS (Kapitel 4.2.4)
- Beschreibung einer Anforderungsanalyse für Prüfmittel (in Kapitel 4.2.5.2)
- Morphologischer Kasten angepasst an die Prüfplanung, der als „Lösungselemente“ Mitarbeiterrollen beinhaltet und die Prüfarm enthält, welche klassischerweise in der Prüfplanung beinhaltet ist (Kapitel 4.2.5.2, verdeutlicht in 5.3.4.5)
- Nutzwertanalyse anhand von nicht funktionalen Anforderungen zur Ermittlung der optimalen Lösungskombination aus dem Morphologischen Kasten (Kapitel 4.2.5.2 Abschnitt *Erstellung des Morphologischen Kastens*, verdeutlicht in Kapitel 5.3.4.5)
- Abschätzungen beim Prüfmittel hinsichtlich Gesamtkosten, Taktzeit/Durchlaufzeit (in Kapitel 4.2.5.2)
- Ableiten von Anforderungen an andere Unternehmens-/Funktionsbereiche (in Kapitel 4.2.5.2, verdeutlicht in Kapitel 5.3.4.9)
- Aufbau einer Funktionshierarchie und Wirkstruktur für modulare mechatronische Systeme, in der die verschiedenen Funktionsarten, wie z. B. Pflicht- und mehrfache Funktionen, beschrieben sind (Kapitel 5.3.1.2)
- Modulare Funktionsstrukturierung für Prüfmittel und Bezug der Prüfmittelfunktionen zu den Produktfunktionen (Kapitel 5.3.4.4)

Zusätzlich durch das Kapitel 4.2 gibt es zahlreiche Anmerkungen und To-dos, die als Hilfsmittel für eine gute Produktentstehung angesehen werden können.

Systemmodell

Zur Konzipierung des Produktes und des Prüfmittels (ggf. auch mehrere Prüfmittel), die hier im Fokus stehen sowie des Hauptprozesses der Produktionssystementwicklung wird ein Systemmodell aus Partialmodellen verwendet. Es werden dazu grundsätzlich die Partialmodelle der Spezifikationstechnik CONSENS benutzt, wobei diese leicht abgewandelt sein können. Zum Beispiel werden im Umfeldmodell des Prüfmittels die Mitarbeiterrollen, die Funktionen im Sinne des Prüfmittels übernehmen, in grün dargestellt (vgl. Bild 5-24). Diese Partialmodelle unterstützen insbesondere in den frühen Phasen der Entwicklungsdurchläufe die disziplinübergreifende Konzipierung von Produkt, Prüfmittel und dem Hauptprozess der Produktionssystementwicklung. Verschiedene Informationen, die in der klassischen Literatur der Prüfplanung in einzelnen Dokumenten abgelegt sind, werden hier in den Partialmodellen abgelegt. Damit wird der modellbasierte Ansatz im Produktentstehungsprozess konsequent weiterverfolgt.

Das gesamte Systemmodell ist in Kapitel 4.1.2 (Bild 4-2) dargestellt und erläutert. An den Stellen des generischen Prozesses in Kapitel 4.2, an denen das Systemmodell Stück für Stück genutzt wird, ist dieses weiter erläutert. Anhand eines Industriebeispiels wird das Systemmodell in Kapitel 5.3 verdeutlicht.

4.1.2 Gemeinsame Spezifikation von Produkt, Produktionssystem und Prüfmittel

GAUSEMEIER ET AL. zeigen einen Ansatz zur integrativen Konzipierung von Produkt und Produktionssystem (vgl. Bild 2-14) mithilfe der Spezifikationstechnik CONSENS. Dieser fügt sich in das 3-Zyklen-Modell (Bild 2-5) der Produktentstehung ein. Dieser Ansatz ist hier aufgegriffen und um den Aspekt der Prüfmittelentwicklung weiterentwickelt worden. Bild 4-2 zeigt diesen erweiterten Ansatz. Das Produkt wird als kohärentes System von Partialmodellen beschrieben (Bild 4-2 links). Das Produktionssystem wird ebenfalls mit einem kohärenten System von Partialmodellen (Anforderungen, Prozesse, Ressourcen, Gestalt) beschrieben (Bild 4-2 Mitte). Ressourcen im Produktionssystem werden dabei allgemein alle benötigten Sachmittel sowie Personal bezeichnet [DIN69901-5], [GLL12]. Die zur Prüfung des Produktes genutzten Prüfmittel zählen ebenfalls dazu. Prüfmittel für mechatronische Systeme sind dabei oftmals selbst mechatronische Systeme, die für den geplanten Einsatz entwickelt werden müssen. Die Ressource Prüfmittel wird konsistent zum Produkt ebenfalls mit einem kohärenten System aus Partialmodellen beschrieben (Bild 4-2 unten rechts). Die Entstehung des gesamten Systemmodells wird in Kapitel 4.2 erläutert und in Kapitel 5.3 anhand eines Praxisbeispiels verdeutlicht.

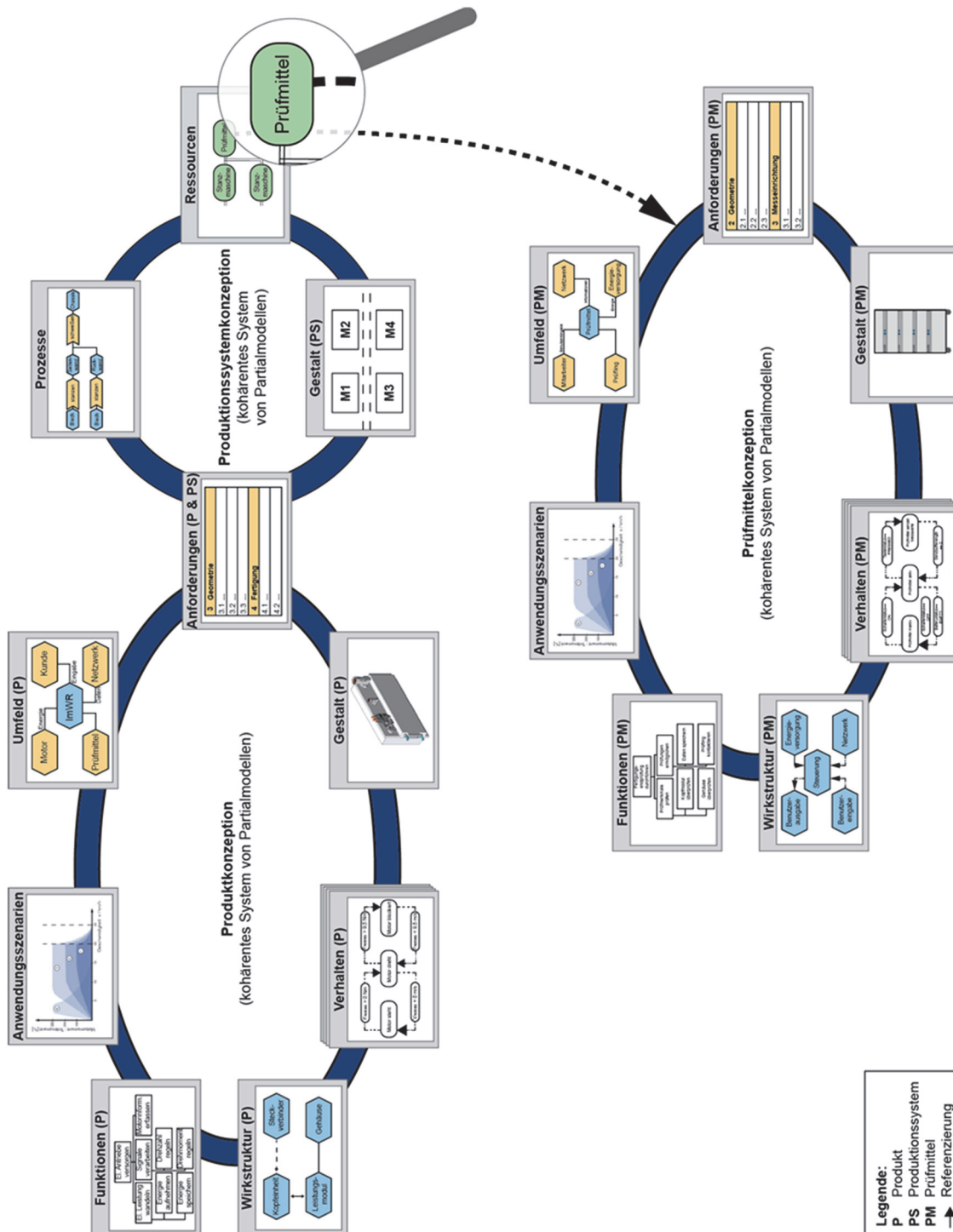


Bild 4-2: Partialmodelle zur domänenübergreifenden Beschreibung der Prinzipiellösung mechatronischer Produkte, deren Produktionssystem und deren Prüfmittel

4.1.3 Beziehungen im Referenzprozess

Zum Zweck der integrativen Prüfmittelentwicklung und der dazugehörigen Prüfplanung müssen idealerweise zwischen den beteiligten Funktionsbereichen und Stakehol-

den/Experten Informationen ausgetauscht werden (vgl. auch Bild 2-18). Dies kann in Form von Dokumenten aber auch in Form von unterstützender Mitarbeit bestimmter Funktionsbereiche bzw. Stakeholdern/Experten bei bestimmten Aufgaben sein. Um ein Gesamtverfahren zu erstellen, welches die verschiedenen Funktionsbereiche und deren Aufgaben sinnvoll in einem Vorgehensmodell miteinander verknüpft, ist untersucht worden, welche Informationsquellen zur Verfügung stehen. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist hier zusammenfassend dargestellt (Bild 4-3). Detailliertere Ergebnisse der Untersuchung sind in Anhang A1 dargestellt.

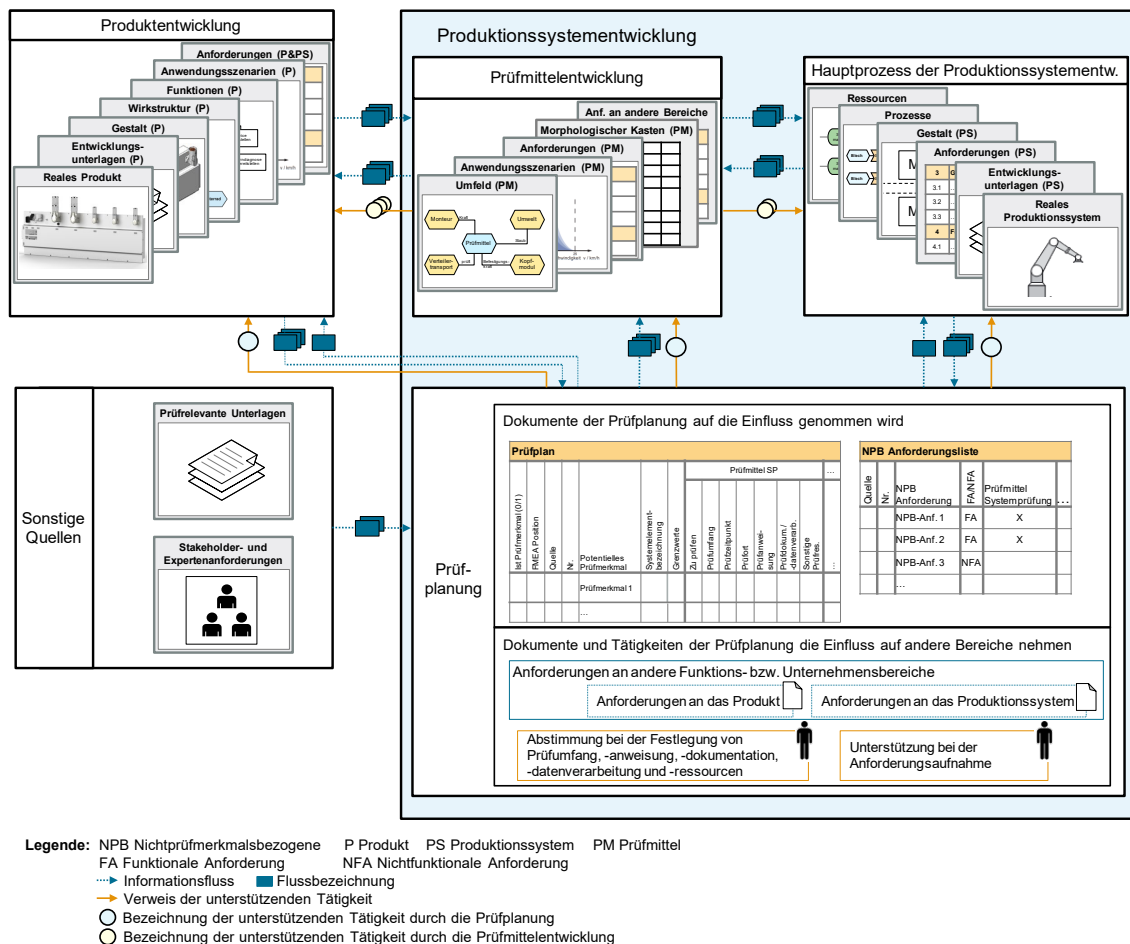


Bild 4-3: Informationsquellen und Beziehungen im Entwicklungsprozess bezogen auf den Informationsaustausch zur Prüfmittelentwicklung

Die verschiedenen Informationsquellen für die Prüfmittelentwicklung relevanten Informationen sind dazu zunächst identifiziert worden. In Bild 4-3 sind die identifizierten Funktionsbereiche und sonstige Quellen mit ihren für diese Arbeit wesentlichen Informationen und deren Beziehungen als Übersicht abgebildet. Die Informationen bestehen im Wesentlichen aus den Spezifikationen, wobei die Partialmodelle dazu zählen (vgl. auch Bild 4-2). Die Abbildung ist unabhängig von der Reihenfolge der Entstehung der Informationen. Die für die Prüfmittelentwicklung wesentlichen Funktionsbereiche sind dabei: die *Produktentwicklung* und die *Produktionssystementwicklung*, welche in den

Hauptprozess der Produktionssystementwicklung, die Prüfplanung und die Prüfmittelentwicklung unterteilt werden. Darüber hinaus existieren noch weitere für die Prüfmittelentwicklung wichtige Informationsquellen, die in dieser Arbeit als *Sonstige Quellen* zusammengefasst werden.

Der Fokus dieser Entwicklungssystematik liegt auf den frühen Phasen der Entwicklung und orientiert sich an der Spezifikationstechnik CONSENS. Es wird daher an dieser Stelle vorausgesetzt, dass das Produkt und der Hauptprozess der Produktionssystementwicklung in den frühen Phasen mit den Modellen der Spezifikationstechnik CONSENS spezifiziert wird (vgl. Kapitel 2.3.3.3). Ebenso wird vorausgesetzt, dass die Beschreibung des Prüfmittelkonzeptes selbst unter Zuhilfenahme der Partialmodelle der Spezifikationstechnik CONSENS geschieht. Die Beschreibung der Informationsquellen für die Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung in den späteren Phasen werden hier zusammenfassend betrachtet (z. B. Entwicklungsunterlagen(P), Entwicklungsunterlagen(PS), Reales Produkt, usw.).

Im Rahmen des integrativen Entwicklungsprozesses unterteilt sich die **Prüfplanung** in zwei Bereiche.

Zum einen existieren *Dokumente der Prüfplanung auf die Einfluss genommen wird*. Dies sind der Prüfplan und die NPB Anforderungsliste. Im Prüfplan werden alle (potentiellen) Prüfmerkmale und dazugehörigen Informationen gesammelt (vgl. auch 10 Aufgaben der Prüfplanung in Kapitel 2.4.1). Die Prüfmerkmale können dabei als Anforderungen an das bzw. die Prüfmittel aufgefasst werden (Prüfmerkmale müssen durch das oder die Prüfmittel geprüft werden). In der NPB-Anforderungsliste werden Anforderungen an das oder die Prüfmittel gesammelt, die keine Prüfmerkmale darstellen.

Zum anderen existieren *Dokumente und Tätigkeiten der Prüfplanung, die Einfluss auf andere Bereiche nehmen*. Die Dokumente sind Anforderungen an andere Funktionsbereiche/Unternehmensbereiche, insbesondere an das Produkt aber auch z. B. an das Produktionssystem, die sich aus der Prüfplanung ergeben (später auch aus der nachgelagerten Prüfmittelkonzipierung und -entwicklung). Zudem unterstützt die Prüfplanung bei Tätigkeiten anderer Bereiche. Die Prüfplanung stellt das wesentliche Bindeglied zwischen Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung auf der einen Seite und Prüfmittelentwicklung auf der anderen Seite dar.

In der **Produktentwicklung** entsteht zunächst ein frühzeitiger Gesamtsystementwurf des Produktes, der hier mit den Partialmodellen der Spezifikationstechnik CONSENS abgebildet ist. Dabei können *Anforderungen, Anwendungsszenarien, Funktionen, Wirkstruktur* und *Grobgestalt* Informationen enthalten, die zur Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung genutzt werden können bzw. auf die andere Funktionsbereiche/Unternehmensbereiche Einfluss im Sinne der Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung haben. Im weiteren Entwicklungsverlauf entstehen weitere Entwicklungsunterlagen, wie z. B. Zeichnungen und Schaltpläne sowie reale Produkte – z. B. in Form von Prototypen – die zur Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung genutzt werden können.

Im **Hauptprozess der Produktionssystementwicklung** beinhalten die Partialmodelle *Ressourcen, Prozesse, Gestalt* und *Anforderungen* der Spezifikationstechnik CONSENS zur Produktionssystembeschreibung Informationen. Diese Informationen können zur Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung genutzt werden bzw. auf diese haben andere Unternehmensbereiche/Funktionsbereiche Einfluss im Sinne der Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung. Weiterhin beinhalten detailliertere Entwicklungsunterlagen wie z. B. Detailzeichnungen oder Datenblätter über Maschinenfähigkeitskennwerte Informationen, die zur Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung genutzt werden können sowie das reale Produktionssystem selbst.

Im Bereich **Sonstige Quellen** sind alle weiteren Informationsquellen, die zur Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung genutzt werden können, zusammenfassend dargestellt. Dies können weitere prüfrelevante Unterlagen sein oder auch Anforderungen an das Prüfmittel von diversen Stakeholdern und Experten, die über prüfrelevantes Wissen verfügen.

In der **Prüfmittelentwicklung** entsteht ein Prüfmittelkonzept, welches ebenfalls unter Zuhilfenahme der Partialmodelle der Spezifikationstechnik CONSENS beschrieben wird.

Die **Abhängigkeiten unter den Entwicklungsbereichen** werden mit *Informationsflüssen* (blau) und *Verweisen auf unterstützende Tätigkeiten* (orange) beschrieben. Dabei sind die Informationsflüsse mit Flussbezeichnungen versehen. Ein Flussbezeichner weist in Bild 4-3 auf einen Einfluss hin, sind zwei Flussbezeichner angedeutet steht dies für zwei Einflüsse. Sind drei Flussbezeichnungen angedeutet, sind drei oder mehr Einflüsse vorhanden. Im Folgenden besteht ein Flussbezeichner immer aus zwei Buchstaben. Der erste Buchstabe steht für die Informationsquelle (kann Prozessschritt oder Dokument sein), der zweite für das Ziel der Information (kann Prozessschritt oder Dokument sein). Am Beispiel des Bezeichners *AP*, welcher einen Informationsfluss zwischen *Produktentwicklung* und *Prüfmittelentwicklung* bezeichnet, wird das System der Beschriftung der Flussbezeichner an dieser verdeutlicht. *A* steht dabei für die Prinzipiellösung des Produktes mit den Partialmodellen *Umfeld* und *Wirkstruktur* (vgl. auch Bild A-3). *P* steht dabei für das Prüfmittel für Systemprüfungen auf das Einfluss genommen wird. Aus dem Umfeldmodell des Produktes können z. B. Schnittstellen zum Prüfmittel oder Störflüsse übernommen werden (Hinweis: Ein Prüfmittel stellt oftmals das Umfeld des Prüflings nach, um diesen zu prüfen, vgl. dazu auch Kapitel 2.4 und [Her97, S. 14ff.]). Die Bezeichner für Informationsflüsse werden im später beschriebenen integrativen Entwicklungsprozess weiter genutzt. Dazu wird an den Bezeichner noch eine Zahl angefügt. *API* würde dann den beschriebenen Informationsfluss im ersten Durchlauf beschreiben (vgl. Bild 4-5). Bei den *Verweisen auf unterstützende Tätigkeiten* gibt es zwei Arten: *Unterstützende Tätigkeiten durch die Prüfplanung*, welche mit einem blauen Kreis gekennzeichnet sind und *unterstützende Tätigkeiten durch die Prüfmittelentwicklung*, welche mit einem gelben Kreis gekennzeichnet sind. Analog zu den Informationsflüssen deuten mehrere Bezeichner

mehrere unterstützende Tätigkeiten an. Der Bezeichner ist dabei immer mit einem Buchstaben versehen und steht für die durchzuführende unterstützende Tätigkeit. So steht z. B. der gelbe Bezeichner *B* für die unterstützende Tätigkeit durch die Prüfmittelentwicklung bei der Produktentwicklung, um die Zugänglichkeit der Prüfmerkmale bzw. der dazu notwendigen Schnittstellen beim Produkt sicherzustellen. Auch die Bezeichner werden im später beschriebenen integrativen Entwicklungsprozess weiter genutzt und geben bei bestimmten Prozessen die unterstützenden Tätigkeiten der Prüfmittelentwicklung bzw. der Prüfplanung an. Alle Bezeichner unterstützender Tätigkeiten und alle Flussbezeichnungen sind im Anhang A1 detailliert aufgelistet und beschrieben. Ebenso sind diese im integrativen Entwicklungsprozess an entsprechender Stelle beschrieben.

Wie in Bild 4-3 zu sehen, existieren zahlreiche Informationsquellen, die für die Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung genutzt werden können. Ebenso ist erkennbar, dass zahlreiche Wechselwirkungen unter den Entwicklungsbereichen mit ihren jeweiligen Informationen bestehen. Aus den identifizierten Wechselwirkungen ist unter zeitlicher Berücksichtigung ihres Auftretens der integrative generische Entwicklungsprozess abgeleitet worden. Dieser ist in den Kapiteln 4.1.4 und 4.2 dargestellt und beschrieben.

4.1.4 Überblick über den generischen Referenzprozess

Nachfolgend wird der generische Referenzprozess zunächst im Überblick beschrieben, vgl. Bild 4-4. Dieser besteht aus vier Durchläufen. Die einzelnen Durchläufe werden jeweils detailliert in Kapitel 4.2 beschrieben (vgl. Bild 4-5, Bild 4-14, Bild 4-15, Bild 4-16). Bei den Durchläufen zwei bis vier wird aufgrund der Ähnlichkeit zu Durchlauf eins nur auf die Unterschiede eingegangen. Die Nutzung des Systemmodells, die einzusetzenden Hilfsmittel und spezifischen Vorgehensweisen innerhalb des Referenzprozesses werden dabei an entsprechender Stelle beschrieben. Die Beschreibung der Anpassung des Referenzprozesses an projekt- und unternehmensspezifische Randbedingungen erfolgt in Kapitel 4.3. Eine weitere Möglichkeit einen solchen integrativen Prozess auszugestalten ist in Anhang A-3 dargestellt.

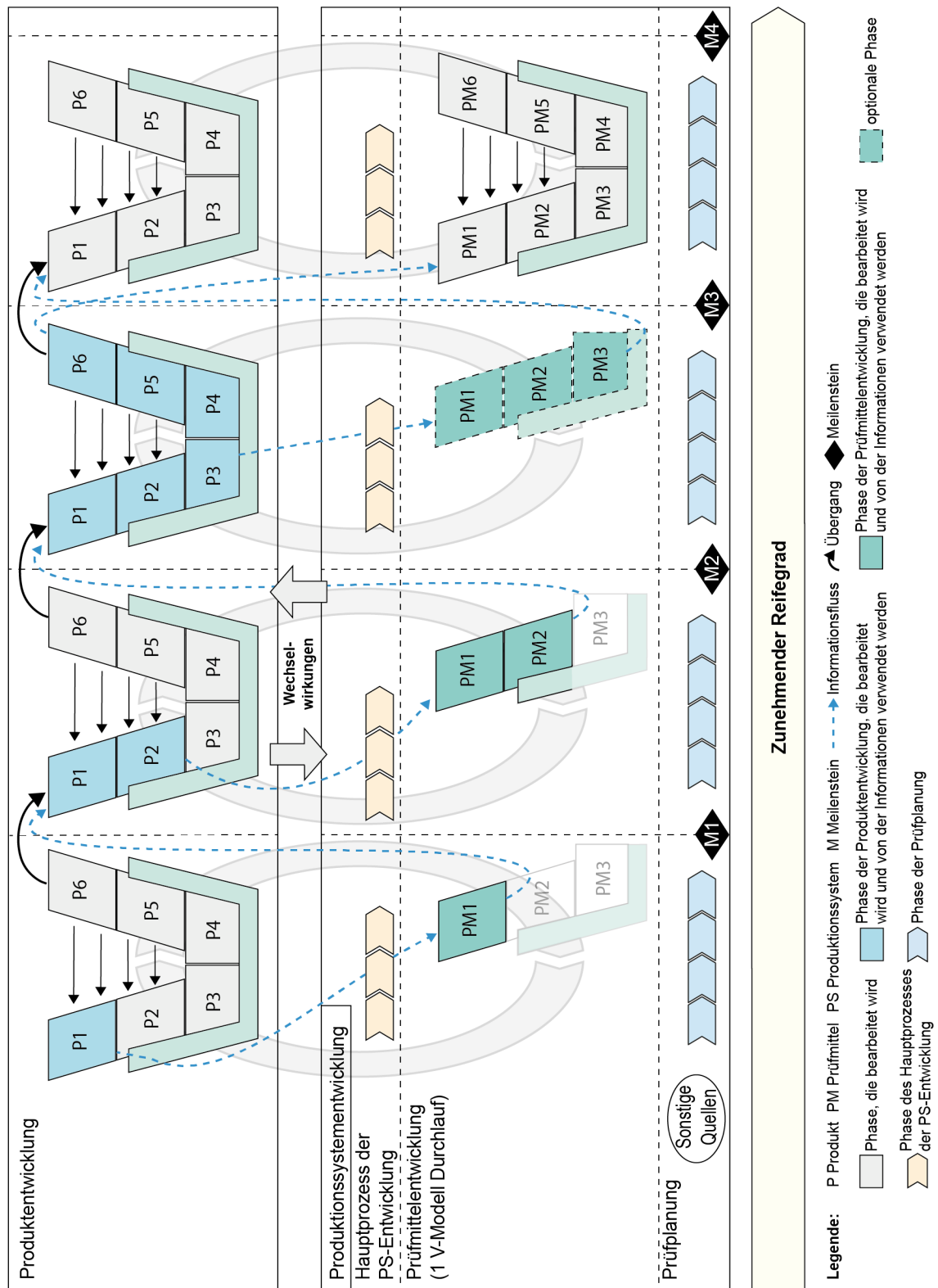


Bild 4-4: Genereller Ablauf des generischen integrativen Referenzprozesses für ein zu entwickelndes Prüfmittel

Ein Prüfmittel für mechatronische Produkte ist oftmals selbst ein mechatronisches System und kann aus Sicht der Entwicklung selbst als ein mechatronisches Produkt angesehen werden. Daher orientiert sich die Entwicklung des Prüfmittels und insbesondere deren Konzeption ebenfalls an dem V-Modell der Produktentwicklung und dem Vorgehen der Spezifikationstechnik CONSENS. Der Unterschied zwischen dem Produkt (Prüfling) und dem dazu zu entwickelnden Prüfmittel besteht dabei insbesondere in der Stückzahl. Während das Produkt in der Regel in großen Stückzahlen hergestellt wird, wird das zugehörige Prüfmittel einmal oder ggf. wenige Male (z. B. ein Prüfmittel für jeden Produktionsstandort) hergestellt. Das V-Modell wird daher für die Prüfmittelentwicklung nur einmal durchlaufen. Das Prüfmittel ist dabei oftmals in den Bereich des Sondermaschinenbaus einzuordnen. Auch hier wird oftmals nur ein V-Modell durchlaufen, da nur eine Anlage aufgebaut wird.

In dem Vorgehensmodell wird das V-Modell des Prüfmittels Stück für Stück durchlaufen und somit mit steigendem Reifegrad des Produktes die Planungstiefe bzw. der Reifegrad des Prüfmittels erhöht.

Es werden im generischen integrativen Referenzprozess in Bild 4-4 zwei Hauptbereiche unterschieden: die *Produktentwicklung* und die *Produktionssystementwicklung*. Zwischen ihnen bestehen zahlreiche Wechselwirkungen. Die vier dargestellten Swimlanes mit der *Produktentwicklung*, dem *Hauptprozess der Produktionssystementwicklung*, der *Prüfmittelentwicklung* und der *Prüfplanung* entsprechen dabei den Funktionsbereichen aus Bild 4-3, wobei die *Sonstigen Quellen* als Oval in der Swimlane Prüfplanung dargestellt sind. Die Informationen aus den sonstigen Quellen gehen im Rahmen dieser Systematik nur in die Prüfplanung ein.

Der zeitliche Verlauf des generischen integrativen Referenzprozesses wird dabei von der **Produktentwicklung** vorgegeben und gliedert sich in vier V-Modell Zyklen²³. Bei jedem V-Modell Zyklus erhöht sich dabei der Reifegrad des Produktes, wobei nach jedem Zyklus ein Prototyp entsteht, der durch die Meilensteine M1 bis M4 dargestellt ist. M1 bezeichnet dabei in Anlehnung an [VDI2206] das Labormuster, M2 das Funktionsmuster, M3 das Vorserienprodukt und M4 das Serienprodukt (vgl. auch Kapitel 2.3.2). Es wird dabei vorausgesetzt, dass die Produktkonzipierung mit der Spezifikationstechnik CONSENS durchgeführt wird. Ein gesamter Produkt-V-Modell Zyklus mit den dazugehörigen Prozessen der Produktionssystementwicklung, mit seinen drei Swimlanes, wird im Folgenden als *ein Durchlauf* bezeichnet. Ein Durchlauf bezeichnet also immer alle Prozesse zwischen zwei Meilensteinen bzw. die Prozesse aus Bild 4-4 vor dem ersten Meilenstein. An der Abfolge der Produktentwicklung durch die V-Modelle orientieren sich alle anderen Prozesse in der Produktionssystementwicklung.

²³ Es werden für den Referenzprozess vier V-Modell Durchläufe gewählt, da dies eine gängige Anzahl ist (vgl. Kapitel 2.3.2).

In Bild 4-4 sind die im Rahmen der Entwicklungssystematik wesentlichen Hauptphasen der Produktentwicklung nach dem V-Modell dargestellt:

- **Phase P1:** Anforderungsanalyse und Konzipierung auf Systemebene
- **Phase P2:** Konzipierung auf Modulebene und Konzeptintegration
- **Phase P3:** Domänenspezifische Planung des Systems. Dies bezeichnet den ersten Teil des domänenspezifischen Entwurfs, in dem lediglich geplant wird. Es entstehen Entwicklungsdokumente. Real wird aber noch nichts realisiert.
- **Phase P4:** Domänenspezifischer Aufbau des Systems. Dies bezeichnet den zweiten Teil des domänenspezifischen Entwurfs, in dem Teile des Produktes realisiert werden.
- **Phase P5:** Systemintegration auf Modulebene
- **Phase P6:** Systemintegration auf Systemebene

Die im Rahmen der Prüfmittelentwicklung zu durchlaufenden Hauptphasen sind:

- **Phase PM1:** Anforderungsanalyse und Konzipierung auf Systemebene bzw. Anforderungs- und Konzeptaktualisierung auf Systemebene
- **Phase PM2:** Konzipierung auf Modulebene und Konzeptintegration bzw. Konzeptaktualisierung auf Modulebene und Konzeptintegration
- **Phase PM3:** Domänenspezifische Planung des Systems bzw. domänenspezifische Planung des Systems aktualisieren
- **Phase PM4:** Domänenspezifischer Aufbau des Systems
- **Phase PM5:** Systemintegration auf Modulebene
- **Phase PM6:** Systemintegration auf Systemebene

Bild 4-4 stellt lediglich eine Prüfmittelentwicklung (z. B. ein Prüfmittel zur Prüfung des Produktes als Gesamtsystem) dar, die integrativ zur Produktentwicklung durchgeführt wird. Möglich sind auch mehrere Prüfmittelentwicklungen, z. B. für verschiedene Module des Produktes. Diese werden aufgrund der besseren Übersicht in Bild 4-4 nicht dargestellt. Bei der detaillierten Darstellung der einzelnen Durchläufe in Bild 4-5, Bild 4-14, Bild 4-15 und Bild 4-16 sind diese dargestellt.

Der in Bild 4-4 dargestellte integrative Referenzprozess soll mit der integrierten Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung nur gestartet werden, wenn sicher ist, dass ein marktreifes Serienprodukt entwickelt werden soll. Wird z. B. zunächst ein Prototyp entwickelt, mit dem Ziel die Machbarkeit zu überprüfen oder eine bestimmte Technologie innerhalb des Produktes zu entwickeln, ist lediglich zu bedenken, dass das Produkt in der industriellen Fertigung überhaupt geprüft werden kann. Die Erstellung eines sol-

chen ersten Prototyps soll als Vorentwicklungsprojekt (VEP) vor dem in Bild 4-4 dargestellten integrativen Entwicklungsprozess geschehen.

Innerhalb der **Produktionssystementwicklung** bildet die erste Swimlane den *Hauptprozess der Produktionssystementwicklung* und umfasst im Wesentlichen die Konzipierung des Produktionssystems auf Prozess- und Ressourcenebene mit der dazugehörigen Anforderungsanalyse. Diese Swimlane orientiert sich dabei an der Produktionssystemkonzipierung mithilfe der Spezifikationstechnik CONSENS, die in Kapitel 2.3.3.3 beschrieben ist. Die in der Literatur nicht immer ganz trennscharf zu unterscheidende *Prüfplanung* und *Prüfmittelentwicklung* sind hier jeweils einer Swimlane zugeordnet. In der *Prüfmittelentwicklung* wird in allen Durchläufen zusammen genau ein V-Modell-Zyklus zur Entwicklung des Prüfmittels durchlaufen. Zur Konzipierung des Prüfmittels selbst werden dabei ebenfalls die Partialmodelle der Spezifikationstechnik CONSENS genutzt (Partialmodelle der Produktkonzeption). Die dritte Swimlane in der Produktionssystementwicklung bildet die *Prüfplanung*. Sie ist als wesentliches Bindeglied zwischen Produktentwicklung und dem Hauptprozess der Produktionssystementwicklung auf der einen Seite und der Prüfmittelentwicklung auf der anderen Seite zu verstehen. Teile der Informationen, die klassischerweise in der Prüfplanung dokumentiert werden, werden in dieser Systematik in den Modellen der Prüfmittelentwicklung dokumentiert, wobei in der Prüfplanung hierauf verwiesen wird.

Die nach dem V-Modell ablaufende Produktentwicklung ist mit der Prüfmittelentwicklung verzahnt, d.h. es werden zu bestimmten Zeitpunkten in der Produktentwicklung bzw. nach der Erstellung bestimmter Entwicklungsdokumente Informationen von dort abgeleitet und in die Prüfmittelentwicklung übergeben. Dies geschieht teilweise auf direktem Wege, teilweise werden diese Informationen aus der Produktentwicklung zunächst genutzt, um eine Prüfplanung oder eine Produktionssystemkonzipierung durchzuführen. Von dort werden dann weitere Informationen an die Prüfmittelentwicklung übergeben. Aus der Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung werden ebenso Informationen an die Produktentwicklung, aber auch an den Hauptprozess der Produktionssystementwicklung, übergeben. Somit entsteht eine Verzahnung der Produkt- und Produktionssystementwicklung, wobei der Fokus hier auf der Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung liegt. Die vier Funktionsbereiche arbeiten also im Wechselspiel. Aus Gründen der besseren Übersicht sind in Bild 4-4 nur die Informationsflüsse zwischen Produktentwicklung und Prüfmittelentwicklung dargestellt.

Die beschriebenen Informationsflüsse sind in Bild 4-4 vereinfacht dargestellt. Allgemein wird davon ausgegangen, dass das Produkt modular aufgebaut ist. Die Idee dabei ist, das Produkt möglichst so aufzubauen, dass jedes Modul für sich prüfbar ist. Das heißt z. B. das gesamte Produkt wird von einem Systemprüfmittel (PM-SP) geprüft. Das gesamte Produkt besteht aus z. B. vier Modulen. Die vier Module werden z. B. je von einem Modulprüfmittel (PM-MP) geprüft. Besitzt ein Modul Sub-Module, so wird wieder jedes Sub-Modul geprüft usw. Analoges gilt für die Prüfung von Komponenten. Dabei müssen nicht zwangsweise für alle Module, Sub-Module usw. neue Prüfmittel

entwickelt werden. Es ist in dieser Entwicklungssystematik lediglich aufgezeigt wie dies systematisch geschehen kann, falls dies notwendig ist. Falls vorhanden kann z. B. auf vorhandene Prüfmittel zurückgegriffen werden. Ebenso ist es möglich, dass z. B. ein Sub-Modul nicht einzeln geprüft wird, sondern nur im Verbund mit dem Modul, in dem es sich selbst befindet oder auf Systemebene. Ist das Produkt nicht modular aufgebaut, kann die Systematik zur Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung für Fertigungsendprüfungen dennoch benutzt werden. Damit das beschriebene Konzept – die Prüfmittel orientieren sich an den Modulen des Produktes – funktionieren kann, müssen die Schnittstellen bestimmte Eigenschaften erfüllen (aus Sicht der Prüfmittel eindeutig bestimmt sein). Diese Eigenschaften sind in Kapitel 4.2.2.2 näher beschrieben.

Im **ersten Durchlauf** wird zunächst eine Prinzipiellösung des Produktes auf Systemebene mit der Spezifikationstechnik CONSENS erstellt (vgl. Bild 4-4 *P1* und Bild 4-5). Dabei kann die Prüfmittelentwicklung auf eine prüfgerechte Gestaltung des Produktes achten (Konzipierung eines prüfgerechten Verhaltens, Modularisierung des Produktes hinsichtlich der Prüfbarkeit, Sicherstellung der Zugänglichkeit der Prüfmerkmale, usw.). Dies setzt voraus, dass bestimmte Prüfmerkmale zu diesem Zeitpunkt schon antizipiert werden können.

Während die Produktentwicklung mit den Schritten Konzipierung auf Modulebene (*P2*), domänenspezifischer Entwurf (*P3*, *P4*) und Konzeptintegration (*P5*, *P6*) fortfährt, um den ersten Meilenstein zu erreichen, kann die erste Prinzipiellösung des Produktes auf Systemebene (*P1*) genutzt werden, um ein Produktionssystem zu konzipieren (Konzipierung auf Prozess- und Ressourcenebene mit zugehöriger Anforderungsanalyse). Die Konzipierung auf Prozessebene wird dabei durch die Prüfmittelentwicklung unterstützt und stellt dabei die Zugänglichkeit zu den Prüfmerkmalen sicher. Gegebenenfalls ergibt sich dadurch eine alternative Montagereihenfolge. Die Produktentwicklung wird somit nicht angehalten oder wesentlich verzögert. Bei der Konzipierung des Produktes auf Modulebene und dem domänenspezifischen Entwurf kann dabei ebenfalls durch die Prüfmittelentwicklung unterstützt werden.

Aus der Prinzipiellösung des Produktes auf Systemebene und dem entstandenen Produktionssystemkonzept werden nun Informationen abgeleitet, um eine Prüfplanung und Prüfmittelkonzipierung (*PM1*) auf Systemebene durchzuführen. Es entsteht dabei ein erstes Konzept eines Prüfmittels für Systemprüfungen des Produktes, also die Prüfung des gesamten Produktes am Fertigungsende. Ebenso kann ein erstes Konzept für ein oder mehrere Prüfmittel für Modulprüfungen entstehen. Dabei können an dieser Stelle nur Prüfmittel für Module konzipiert werden, die in der vorherigen Prinzipiellösung des Produktes auf Systemebene schon auftauchen. Prüfmittel für Sub-Module, die sich in einem Modul befinden und an dieser Stelle in dem Produktkonzept noch nicht sichtbar sind, können also hier noch nicht berücksichtigt werden.

Bei der Prüfmittelkonzipierung und deren Anforderungsanalyse unterstützt die Prüfplanung. Während der Prüfplanung und Prüfmittelkonzipierung werden ggf. auftretende Anforderungen an andere Unternehmensbereiche/Funktionsbereiche, z. B. die Produktentwicklung, gesammelt. Ziel der Prüfmittelkonzipierung ist es ein Prüfmittelkonzept zu

erstellen, welches möglichst wenig Anforderungen an andere Unternehmensbereiche/Funktionsbereiche stellt. Auch ist darauf zu achten, dass Anforderungen möglichst vermieden werden, die beim entsprechenden Funktionsbereich große Auswirkungen haben bzw. großen Aufwand erzeugen. Dies gilt besonders für die Produktentwicklung, da zum einen eine Anforderung dort bei jedem produzierten Stück berücksichtigt werden muss und zum anderen Änderungen beim Produktkonzept oftmals nur mit viel Aufwand und Zeitverlust realisiert werden können. Ein gutes Verständnis seitens der Prüfmittelentwicklung für das Produkt ist dazu förderlich. Daher ist es sinnvoll die Prüfmittelentwicklung frühzeitig gut in die Produktentwicklung einzubinden. Das entstandene Prüfmittelkonzept wird am Ende der Prüfmittelkonzipierung hinsichtlich Anforderungen an andere Funktionsbereiche/Unternehmensbereiche analysiert. Abgeleitete Anforderungen an das Produkt fließen zusammen mit den während der Prüfplanung und Prüfmittelkonzipierung aufgenommenen Anforderungen zu Beginn des nächsten Durchlaufs in die Produktanforderungen mit ein. Gegebenenfalls können auch Anforderungen unterstützend in Form von Modellen in die Produktentwicklung übernommen werden. Die Anforderungen der Prüfmittelentwicklung an das Produkt können somit frühzeitig in der Produktentwicklung berücksichtigt werden. Gleiches gilt für den Hauptprozess der Produktionssystementwicklung. Aus dem Prüfmittelkonzept entstandene Anforderungen werden zu Beginn des nächsten Durchlaufs in den Hauptprozess der Produktionssystementwicklung übergeben. Werden bei der Analyse des Prüfmittelkonzeptes Anforderungen an weitere Funktionsbereiche identifiziert, werden diese dem entsprechenden Bereich ebenso zugespielt.

Im **zweiten Durchlauf** wird grundsätzlich analog zum ersten Durchlauf vorgegangen (vgl. Bild 4-4 zweiter Durchlauf und Bild 4-14). Dabei wird in der Produktentwicklung das nächste V-Modell durchlaufen, mit dem Ziel ein Funktionsmuster mit einem höheren Produktreifegrad zu erzeugen. Die Prüfmittelentwicklung wird dabei mit einbezogen, um eine prüfgerechte Produktgestaltung sicherzustellen. Neue Anforderungen an das Produkt aus der Produktentwicklung werden dazu berücksichtigt. Bei der Anforderungsanalyse für das Produkt unterstützen dabei die Prüfmittelentwicklung und die Prüfplanung. Die im ersten Zyklus ermittelten Anforderungen aus der Prüfmittelentwicklung und der Prüfplanung fließen dabei mit ein. Ebenso fließen die ermittelten Anforderungen aus der Prüfplanung und der Prüfmittelentwicklung in den Hauptprozess der Produktionssystemplanung und, falls vorhanden, in andere Funktionsbereiche mit ein. Die Anforderungsanalyse im Hauptprozess der Produktionssystementwicklung wird dabei ebenfalls von der Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung unterstützt.

Wesentlicher Unterschied im weiteren Verlauf des zweiten Durchlaufs ist der „Absprungpunkt/Absprunghöhe“ von der Produktentwicklung in die Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung. Es wird dabei abgewartet bis die Produktentwicklung die Konzipierung auf Modulebene durchgeführt hat (*P1* und *P2* im zweiten Durchlauf sind durchlaufen, vgl. Bild 4-4). Diese ist dann Grundlage für die Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung. Während bei der Produktentwicklung ein neues V-Modell durchlaufen wird, werden in der Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung zunächst die bestehenden Model-

le und Dokumente lediglich überarbeitet, z. B. aufgrund geänderter Spezifikation des Produktes. Die Prüfmittelentwicklung detailliert den vorhandenen Entwurf des bestehenden Prüfmittels, so dass ein Prüfmittelkonzept auf Modulebene vorliegt (*PM2* im zweiten Durchlauf in Bild 4-4). In der Prüfmittelentwicklung können nun zusätzlich Prüfmittel für (Sub-)Module konzipiert werden, die im letzten Durchlauf für die Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung aufgrund der geringeren Modellierungstiefe/Abstraktionsebene des Produktes noch nicht sichtbar waren.

Im **dritten Durchlauf** durchläuft die Produktentwicklung das nächste V-Modell mit dem Ziel das Vorserienprodukt (*M3*) zu erstellen. Für die Produktionssystementwicklung gibt es mehrere Optionen des Durchlaufs (vgl. Bild 4-4 dritter Durchlauf und Bild 4-15).

Option 1 orientiert sich dabei im Wesentlichen wieder am Vorgehen aus dem 1. Durchlauf und 2. Durchlauf. Alle als optional angedeuteten Prozesse werden dabei durchlaufen. Wesentlicher Unterschied im weiteren Verlauf des dritten Zyklus mit der ersten Option ist der „Absprungpunkt/Absprunghöhe“ von der Produktentwicklung in die Prüfmittelentwicklung bzw. Prüfplanung. Es wird dabei abgewartet, bis die Produktentwicklung die domänenspezifische Planung (*P3* in Bild 4-4) durchgeführt hat. Diese ist zusammen mit der vollständigen Prinzipiellösung Grundlage für die Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung. Die schon bestehenden Modelle und Dokumente der Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung werden zunächst überarbeitet. Dazu werden die Phasen *PM1* und *PM2* erneut durchlaufen. Diejenigen für Prüfungen für Komponenten werden neu erstellt. Falls notwendig, können in der Prüfmittelentwicklung nun auf Basis der Produktentwicklungsunterlagen aus der domänenspezifischen Planung, Prüfmittel für die Prüfung von Komponenten entwickelt werden. Mit dem domänenspezifischen Entwurf der Prüfmittel kann begonnen werden (*PM3* im dritten Durchlauf).

Option 2 blendet die als optional gekennzeichneten Prozesse teilweise oder komplett aus (vgl. auch Bild 4-15). Der Vorteil ist gesparter Aufwand. Insbesondere wenn zu erwarten ist, dass sich aus diesen Prozessschritten keine neuen Anforderungen an die Produktentwicklung ergeben, kann diese Option Sinn machen. Die Prüfmittelentwicklung für Prüfung von Komponenten tritt hier erstmals auf. Oftmals werden hierzu Standardprüfmittel herangezogen. Diese sind oftmals vorhanden oder müssen lediglich beschafft und nicht entwickelt werden. In diesem Fall entfallen insbesondere diese Prozessschritte. Diese liefern dann demzufolge auch keine Anforderungen an das Produkt, Produktionssystem und weitere Funktionsbereiche/Unternehmensbereiche.

Im **vierten Durchlauf** ist das Vorgehen grundsätzlich ähnlich wie in den Durchläufen davor. Ziel dieses Durchlaufs ist die Erstellung des Serienproduktes in der Produktentwicklung und die Erstellung des kompletten Produktionssystems inklusive aller zu entwickelnden Prüfmittel. In die Produktentwicklung werden dazu wieder Anforderungen, insbesondere aus der Prüfmittelentwicklung aufgenommen. Der Unterschied zu den vorherigen Durchläufen ist, dass nicht mehr nach Teilen der Produktentwicklung in die Produktionssystementwicklung übergegangen wird. Als Ausgangsbasis für die Produk-

tionssystementwicklung inklusive Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung wird hier das komplette Produkt zu Meilenstein *M3* herangezogen. Dazu gehören sämtliche Spezifikationen sowie das Produkt selbst.

Innerhalb des generischen integrativen Entwicklungsprozesses können Iterationen und Rückschritte auftreten, die hier nicht dargestellt sind. Das Vorgehensmodell gibt dabei nur den generellen Ablauf an.

4.2 Beschreibung des generischen Referenzprozesses unter Zuhilfenahme des Systemmodells und dedizierter Hilfsmittel

In diesem Kapitel wird der komplette generische integrative Entwicklungsprozess, bestehend aus vier Durchläufen, beschrieben. Der erste Durchlauf wird dabei im Detail erläutert. Bei den Durchläufen zwei bis vier wird aufgrund der Ähnlichkeit der Durchläufe nur auf die Unterschiede des jeweiligen Durchlaufs eingegangen.

In Kapitel 4.2.1 wird ein Gesamtüberblick über den ersten Durchlauf gegeben. In Kapitel 4.2.2 werden die Prozessschritte der Produktentwicklung beschrieben. In Kapitel 4.2.3 wird der Hauptprozess der Produktionssystemplanung, die integrativ zur Produktentwicklung stattfindet, erläutert. In Kapitel 4.2.4 wird das Vorgehen der Prüfplanung und die dort entstehenden Entwicklungsdokumente beschrieben, wobei als Grundlage die erstellten Entwicklungsartefakte der Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung dienen. In Kapitel 4.2.4 wird beschrieben welche Informationen in die dort entstandenen Entwicklungsdokumente in den nächsten Durchläufen einzutragen sind. Die Prüfplanung ist dabei das wesentliche Bindeglied zwischen Produktentwicklung und dem Hauptprozess der Produktionssystementwicklung auf der einen Seite und der Prüfmittelentwicklung, die in Kapitel 4.2.5 beschrieben wird, auf der anderen Seite.

In Kapitel 4.2.6 wird der zweite Durchlauf beschrieben. In Kapitel 4.2.7 wird der dritte Durchlauf beschrieben. Abschließend wird in Kapitel 4.2.8 der vierte Durchlauf beschrieben.

4.2.1 Überblick über den ersten Durchlauf des Referenzprozesses

Die Gesamtübersicht über den ersten Durchlauf des integrativen generischen Entwicklungsprozesses ist in Bild 4-5 dargestellt. Es detailliert dabei den in Bild 4-4 dargestellten Gesamtprozess bis zum ersten Meilenstein *M1*. Ziel des ersten Durchlaufs ist die Erreichung des Meilensteins *M1*, wobei zu diesem Zeitpunkt verschiedene Ergebnisse der vier Funktionsbereiche (vier Swimlanes) vorliegen sollen.

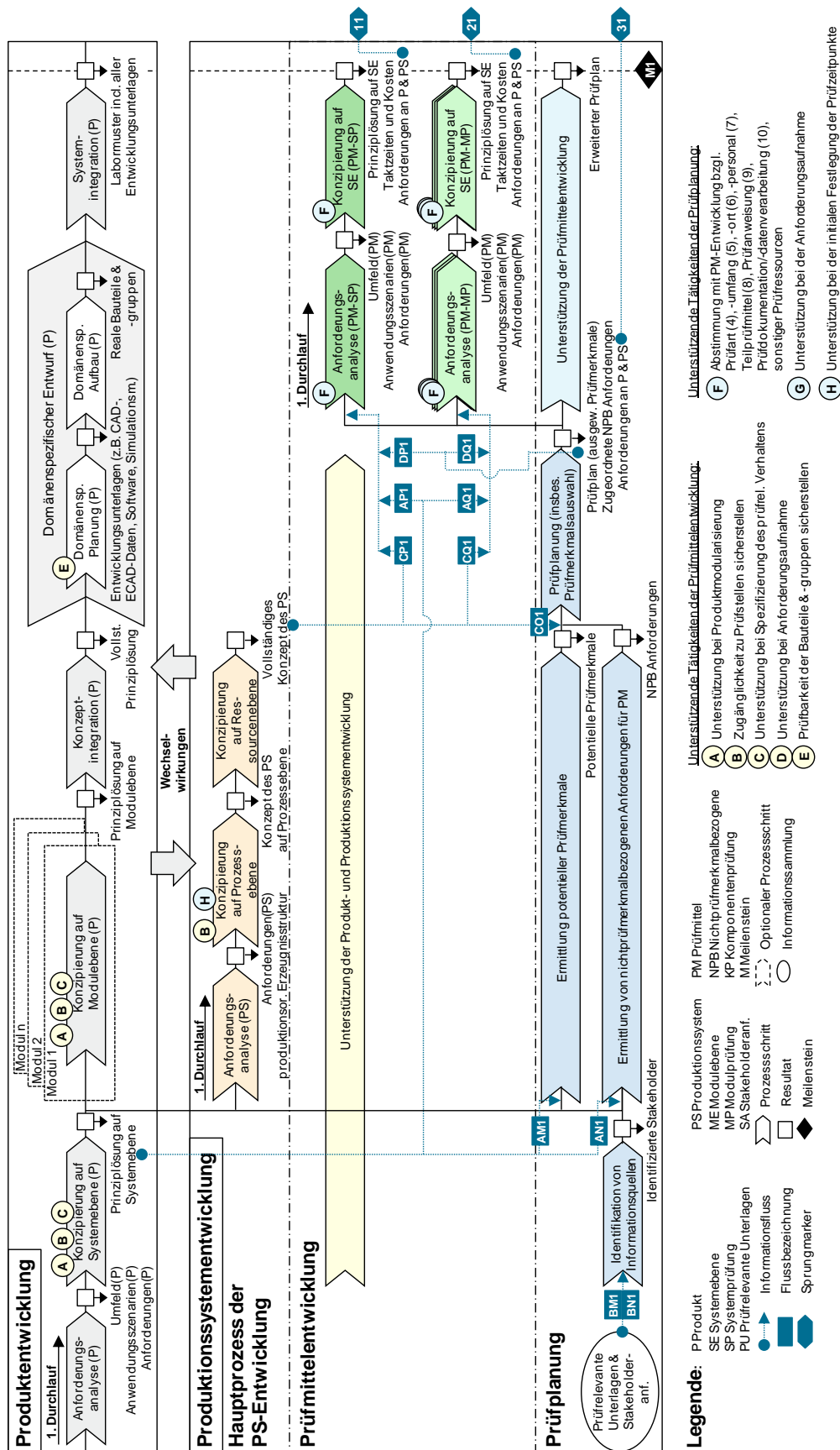


Bild 4-5: Integrativer Produkt- und Prüfmittelentwicklungsprozess – 1. Durchlauf

Zu *M1* soll das Produkt als erster Prototyp in Form des Labormusters vorliegen. Eine erste Beschreibung des Produktionssystems, die integrativ zum Produkt erstellt wird, soll mit einer dokumentierten Prozessfolge und den zugehörigen Ressourcen vorliegen. Konsistent zum Produktkonzept auf Systemebene und der ersten Beschreibung des Produktionssystems sollen Ergebnisse einer ersten Prüfplanung vorliegen. Die Prüfplanung bildet dabei das wesentliche Bindeglied zwischen Produktentwicklung und dem Hauptprozess der Produktionssystementwicklung auf der einen Seite und der Prüfmittelentwicklung auf der anderen Seite. Auf Basis der Prüfplanung soll ein erstes Prüfmittel des Gesamtsystems (PM-SP) und Prüfmittel für einzelne Module (PM-MP) konzipiert sein. Anforderungen an die Produktentwicklung, den Hauptprozess der Produktionssystementwicklung und ggf. weitere Funktionsbereiche/Unternehmensbereiche liegen zum Meilenstein *M1* ebenfalls vor und können von dort in den nächsten Durchlauf eingespeist werden (vgl. sechseckige Sprungmarken *11*, *21*, *31* rechts in Bild 4-5 und links in Bild 4-14).

4.2.2 Produktentwicklung – erster Durchlauf

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie das mechatronische Produkt selbst entwickelt werden soll (erste Swimlane in Bild 4-5). In Kapitel 4.2.2.1 wird dazu das grobe Vorgehen beschrieben. Es orientiert sich dabei an dem Vorgehen der Spezifikationstechnik CONSENS und dem V-Modell der Produktentstehung (vgl. Kapitel 2.3.3.3, Kapitel 2.3.2 und [Gau10], [GFD+09], [VDI2206]). Dem Thema Schnittstellen kommt an dieser Stelle, insbesondere denen zwischen Produkt und Prüfmittel, eine besondere Bedeutung bei. Auf das Thema Schnittstellen geht das Kapitel 4.2.2.2 daher gesondert ein.

4.2.2.1 Beschreibung des groben Vorgehens

In der Produktentwicklung werden folgende Prozessschritte durchlaufen:

- **Anforderungsanalyse (P):** Sie stellt den Beginn des integrativen Produkt- und Prüfmittelentwicklungsprozesses dar. Die Entwicklungsaufgabe wird zunächst analysiert. Die Modelle *Umfeld (P)* und *Anwendungsszenarien (P)* des zu entwickelnden mechatronischen Systems werden erstellt. Auf dieser Basis erfolgt die Festlegung der Produktanforderungen. (vgl. Kapitel 2.3.3.3 und [Gau10, S. 62f.], [GFD+09, S. 217f.])
- **Konzipierung auf Systemebene (P):** Anhand der Anforderungsliste des Produktes werden Hauptfunktionen abgeleitet. Diese sind in eine Funktionshierarchie zu bringen. Diese ist unter Einbezug der *Anwendungsszenarien (P)* zu erweitern und anzupassen. Danach wird ein Morphologischer Kasten mit den bereits definierten Funktionen erstellt. Zur Realisierung der Funktionen werden Lösungselemente ermittelt, in den Morphologischen Kasten eingetragen und zu sinnvollen Kombinationen zusammengestellt. Damit werden die *Wirkstruktur*

(*P*) und die Module des mechatronischen Systems gebildet. Danach werden *Gestalt (P)* und *Verhalten (P)* des Produktes spezifiziert. Am Ende dieser Phase liegt die Prinziplösung auf Systemebene vor. (vgl. Kapitel 2.3.3.3 und [Gau10, S. 63f.], [GFD+09, S. 218])

Der Prozessschritt kann von der Prüfmittelentwicklung unterstützt werden, um eine möglichst prüfgerechte Gestaltung zu erreichen (vgl. runde Marker *A*, *B* und *C* in Bild 4-5). Voraussetzung ist dabei, dass zu diesem Zeitpunkt schon Prüfmerkmale bzw. Anforderungen seitens des Prüfmittels an das Produkt antizipiert werden können. Aufgrund von Erfahrungswissen ist dies oftmals der Fall. So kann z. B. bei der Produktmodularisierung unterstützt werden, auf die Zugänglichkeit der Prüfmerkmale geachtet werden und ein prüfrelevantes Verhalten konzipiert werden.

Beim Entwurf des Produktes ist es vorteilhaft die Module so zu gestalten, dass die Möglichkeit besteht jedes einzelne Modul für sich zu prüfen.

Vorausgesetzt jedes Modul des Produktes ist so gestaltet, dass es später in der Produktion einzeln geprüft werden kann und der Voraussetzung, dass durch eine Prüfung jeden Moduls dessen komplette Funktionsfähigkeit sichergestellt wird und der Voraussetzung, dass nach der Prüfung der einzelnen Module nichts beschädigt wird, kann davon ausgegangen werden, dass nach dem Zusammenbau der Module das Gesamtprodukt funktioniert.

Wesentliche Voraussetzung dafür, dass einzelne Module komplett geprüft werden können und nach dem Zusammenbau auch funktionieren, sind eindeutig prüfbare Schnittstellen. Hierauf wird in Kapitel 4.2.2.2 eingegangen.

- **Konzipierung auf Modulebene (P):** Während dieser Phase erfolgt die Dekomposition des mechatronischen Systems in Submodule und Komponenten. Das Vorgehen zur Erstellung der Prinziplösung auf Modulebene entspricht dabei dem Vorgehen der beiden vorigen Phasen. (vgl. Kapitel 2.3.3.3 und [Gau10, S. 62], [GFD+09, S. 216])
- **Konzeptintegration (P):** In dieser Phase werden die erarbeiteten Modelle aus den vorangegangenen Prozessschritten zu einer Gesamtlösung integriert. Diese wird auf Widersprüche untersucht und eine technisch-wirtschaftliche Bewertung wird durchgeführt. Ergebnis ist die vollständige Prinziplösung des Gesamtsystems. (vgl. Kapitel 2.3.3.3 und [Gau10, S. 62], [GFD+09, S. 216f.])
- **Domänenspezifischer Entwurf (P):** In dieser Phase erfolgt auf Basis der Prinziplösung des Gesamtsystems die weitere Konkretisierung in den beteiligten Entwicklungsdomänen (vgl. auch [VDI2206, S. 30]). Der Prozessschritt *Domänenspezifischer Entwurf (P)* unterteilt sich dabei in zwei Teilprozessschritte *Domänenspezifische Planung (P)* und *Domänenspezifischer Aufbau (P)*. Während des ersten Teilprozessschrittes werden die Systemelemente im Detail kon-

ketisiert bzw. ausgelegt und Entwicklungsunterlagen erstellt (z. B. mechanische CAD-Daten, elektrische CAD-Daten, Software und Simulationsmodelle). Hierbei ist die Prüfmittelentwicklung mit einzubeziehen, um die Prüfbarkeit der Bauteile und -gruppen sicherzustellen. Gekennzeichnet ist diese unterstützende Tätigkeit im Prozessmodell mit dem runden Marker *E*. Der reale Aufbau der Bauteile und -gruppen wird im zweiten Teilprozessschritt „Domänenspezifischer Aufbau (P)“ durchgeführt.

- **Systemintegration (P):** Die Systemintegration ist die letzte Phase des ersten V-Modell Durchlaufs in der Produktentwicklung. Die Ergebnisse aus den einzelnen Domänen werden zu einem Gesamtsystem integriert. Deren Zusammenwirken kann so untersucht werden (vgl. auch [VDI2206, S. 30]). Das Resultat ist mit Meilenstein *M1* das Labormuster des Produktes.

4.2.2.2 Produktschnittstellen

Die Schnittstellen des Produktes lassen sich aus Sicht des Prüfmittels grob in zwei Kategorien einteilen:

Zur **ersten Kategorie** gehören die Schnittstellen eines Moduls, die nach Fertigstellung des kompletten Moduls von außen noch zugänglich sind. Das sind typischerweise die Schnittstellen, die im Betrieb des Moduls verwendet werden, z. B. um das Modul mit einem anderen Modul zu verbinden.

Aus Sicht der Prüfmittels werden diese Schnittstellen oftmals benutzt, um Prüfungen an dem jeweiligen Modul durchzuführen. Ein Prüfmittel simuliert dabei oftmals das Umfeld des Moduls genau an diesen Schnittstellen (vgl. dazu Kapitel 2.4.2 und Kapitel 2.4.3).

Zur **zweiten Kategorie** gehören die Schnittstellen eines Moduls, die nach Fertigstellung des kompletten Moduls von außen nicht mehr zugänglich sind. Diese Schnittstellen werden meist lediglich für die Produktion des Moduls benutzt, z. B. zur Kalibrierung und Justierung des Moduls (vgl. Fußnote 19 und 20). Solche Schnittstellen können auch zur Prüfung bestimmter Eigenschaften verwendet werden. Zudem kann es auch vorkommen, dass das Prüfmittel auch andere Fertigungsschritte selbst übernimmt, z. B. das Kalibrieren von Sensoren und deren Messverstärkern bzw. Messeinrichtungen.

Insbesondere bei Schnittstellen der zweiten Kategorie ist bei der Entwicklung des Produktes sowie beim Hauptprozess der Produktionssystementwicklung (vgl. Marker *B* im Hauptprozess der Produktionssystementwicklung, Bild 4-5) auf die Zugänglichkeit dieser Schnittstellen durch das Prüfmittel zu achten, falls diese Schnittstellen vom Prüfmittel benutzt werden sollen. Manche Prüfungen finden daher nicht nach dem letzten Fertigungsschritt des Moduls statt, sondern kurz vorher, wenn z. B. das Gehäuse noch nicht montiert ist.

Die Schnittstellen der ersten Kategorie lassen sich aus Sicht der Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung weiter in drei Typen von Schnittstellen unterteilen.

1) Eindeutig definierte Produktschnittstelle

Eine *eindeutig definierte Produktschnittstelle* ist eine Schnittstelle, die eindeutig definiert ist. Zustände von Schnittstellen bzw. zwischen den Schnittstellen sind dabei jederzeit und ohne Zusatzinformationen eines Einzelteils eindeutig interpretierbar. Dies kann z. B. ein Informationsfluss sein. Dadurch ist eine solche Schnittstelle **eindeutig prüfbar**. Die meisten modernen elektrisch-digitalen Schnittstellen fallen darunter. Die mechanische Schnittstelle ist z. B. in Form von Stecker und Buchse standardisiert, ebenso wie die elektrischen Signale und deren Interpretation (Softwareprotokoll).

Dies ermöglicht z. B. im PC-Bereich eine Modularisierung mit all ihren Vorteilen. Ein normaler Home-PC kann so im Normalfall problemlos aus Modulen verschiedener Hersteller zusammengesetzt werden, die diese unabhängig voneinander entwickelt und gefertigt haben. Oftmals sind diese Schnittstellen Teil von (sichtbaren) Konstruktionsvorgaben auf Systemebene. (vgl. [BC98])

Schnittstellen dieser Art sind, insbesondere auf Systemebene des Produktes, zwischen den einzelnen Modulen zu bevorzugen.

2) Nicht eindeutig definierte Produktschnittstelle

Eine *nicht eindeutig definierte Produktschnittstelle* ist eine Schnittstelle, die nicht vollständig eindeutig definiert ist. Das heißt, es kann Zustände geben, die nicht eindeutig interpretiert werden können. Folge ist eine **nicht eindeutig prüfbare Schnittstelle**, da das Ergebnis der Prüfung nicht eindeutig sein kann (Eine Prüfung soll immer gut/schlecht Ergebnis liefern, vgl. Kapitel 2.1.3). Um dies zu verdeutlichen ist ein leicht verfremdetes und vereinfachtes Beispiel aus der Industrie nachfolgend angegeben.

Schnittstellen dieser Art sind, wenn möglich, zwischen Modulen zu vermeiden. Idealerweise treten diese Art von Schnittstellen, falls nicht vermeidbar, nur innerhalb der Module auf. Existiert eine solche Schnittstelle zwischen zwei oder mehr Modulen, können die Schnittstellen der Module erst im Verbund nach dem Zusammenbringen der Module (Montage) in der Produktion geprüft werden. Die Module, die über eine solche Schnittstelle verbunden sind, sind somit nicht vollständig einzeln prüfbar. Daraus ergibt sich automatisch der frühestmögliche Zeitpunkt zur Prüfung dieses Merkmals nach dem Zusammenbringen (Montage) dieser Module.

Beispiel für eine nicht eindeutig definierte und prüfbare Schnittstelle

Das Beispiel ist eine optische Schnittstelle in Form einer Lichtschranke, die in Bild 4-6 dargestellt ist.

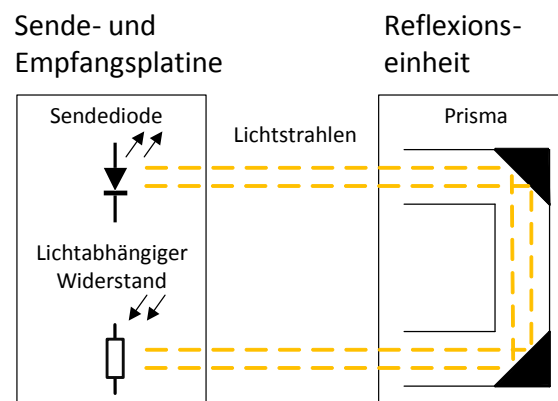


Bild 4-6: Lichtschranke – Beispiel einer nicht eindeutig definierten und prüfbaren optischen Schnittstelle

Die Schnittstelle befindet sich zwischen den zwei Modulen A und B. Teil von Modul A ist dabei die Sende- und Empfangsplatine (vgl. auch Bild 4-7, links). Teil von Modul B ist die Reflexionseinheit. Eine Sendediode ist auf einer Sende- und Empfangsplatine befestigt und strahlt in Richtung Prisma (idealisiert nur in Richtung Prisma). Dieses Prisma ist Teil der Reflexionseinheit und damit Teil von Modul B. Es hat die Aufgabe die Richtung des Lichts zu ändern und parallel zum gesendeten Licht wieder zurück zur Sende- und Empfangsplatine zu leiten. Auf der Sende- und Empfangsplatine wird das Lichtsignal von einem lichtabhängigen Widerstand empfangen. Wird das empfangene Lichtsignal unterbrochen bzw. geschwächt, kann Papier detektiert werden, welches die Lichtschranke passiert (Zählfunktion). Es kann dabei detektiert werden wie viele Papierstücke die Lichtschranke passieren. Bei bekannter Geschwindigkeit des Papiers kann dessen Länge errechnet werden. Auch kann eine Aussage über die Art des Papiers getroffen werden. Sehr dünnes Papier lässt den Empfänger noch ein wenig Licht detektieren, während dickeres Papier den Empfänger kein oder sehr wenig Licht detektieren lässt.

Idealerweise wäre die optische Schnittstelle zwischen den beiden Modulen so definiert, dass sich Modul A und Modul B so justieren lassen, dass es auf jeden Fall möglich ist, dass für gut befundene Module A und B miteinander die gewünschte Detektion ausführen können. Die Schnittstelle wird dabei z. B. durch Lichtintensität, Lichtverteilung, usw. an den beiden Modulgrenzen unter definierten Bedingungen beschrieben. Zahlreiche Parameter, die sich negativ überlagern können, sorgen dafür, dass dies kaum möglich ist. Beispielfhaft sind hier einige störende Parameter aufgeführt:

- Die Einbaulage der Sendediode auf der Platine in Modul A unterliegt einer Streuung.
- Die Abstrahlcharakteristik der Sendediode ist nicht symmetrisch und unterliegt einer Streuung.

- Die Einbaulage des Empfängers auf der Platine unterliegt einer Streuung.
- Die Einbaulage des Prismas im Verhältnis zur Sende- und Empfangsplatine und damit zum Sender und Empfänger streut.
- Eigenschaften des Prismas (Kunststoffglas) unterliegen einer Streuung durch z. B. Schlieren, kleine Kratzer oder Trübung.

Aus den obigen Streuungen und deren zum Teil vorkommenden sich negativ auswirkenden Überlagerungen ergibt sich, dass es vorkommt, dass ein bestimmtes Modul A nicht mit einem bestimmten Modul B kompatibel ist. Würde die Schnittstelle zwischen den Modulen so eindeutig definiert sein, dass jedes beliebige Modul A mit jedem beliebigen Modul B kompatibel ist, wäre der Ausschuss extrem hoch. Daher wird in der Fertigung wie folgt verfahren: Bei den meisten erstmalig zusammengefügte Modulen A und B ist die Funktion auf Anhieb gegeben. Dies wird durch eine gut/schlecht Vorsortierung erreicht, in der die auf jeden Fall zu schlechten Prismen und Sende- und Empfangseinheiten aussortiert werden. Funktioniert ein Modul B in Kombination mit einem bestimmten Modul A nicht, so wird Modul B getauscht. Das getauschte Modul B funktioniert dann in aller Regel in Kombination mit dem nächsten Modul A.

Idealerweise wären aus Sicht der Prüfbarkeit in der Fertigung Sender (Sendediode), Empfänger (lichtabhängiger Widerstand) und Prisma in einem Modul verbaut (vgl. Bild 4-7, Gutbeispiel). In diesem Modul kann dann die Abstimmung der verschiedenen Komponenten untereinander geschehen. Das entstandene Modul kann dann einzeln geprüft werden bevor es in die weitere Fertigung übergeben wird. Bei der Integration in den Produktionsprozess würden dann aufgrund der Abstimmung der Lichtschranken keine unnötigen Demontagen und erneuten Montagen entstehen.

Grundsätzlich gilt: Je später im Fertigungsprozess integriert wird, bzw. je weiter aus Produktsicht aus Richtung Komponentenebene in Richtung Gesamtsystem geschaut wird, desto mehr sollten solche Schnittstellen vermieden werden. Die optische Schnittstelle ist lediglich ein Beispiel. Es existieren weitere Schnittstellen dieser Art, die nicht eindeutig definiert sind (z. B. mechanische Schnittstellen, bei der sich Toleranzen überlagern).

Erkennung von nicht eindeutigen Schnittstellen

Grundsätzlich können zur Erkennung solcher Schnittstellen alle auftretenden Schnittstellen (z. B. nach dem ersten Systementwurf) untersucht werden, um diese zu erkennen. Um diese von vorn herein möglichst zu vermeiden, und so unnötige Iterationen zu vermeiden, können folgende Überlegungen beim Systementwurf zur Hilfe genommen werden.

Während des Systementwurfs wird nach Kapitel 4.2.2.1 eine Funktionshierarchie erstellt. Eine Funktion wird dabei von einem oder mehreren Systemelementen realisiert. Wird eine Funktion durch mehrere Systemelemente realisiert, ergibt sich dabei

automatisch eine Schnittstelle zwischen diesen Systemelementen. Wird dabei eine Schnittstelle des 2. Typs identifiziert, soll dabei möglichst darauf geachtet werden, dass diese innerhalb eines Moduls liegt. Bild 4-7 zeigt diesen Zusammenhang anhand der Lichtschranke einmal anhand des beschriebenen Beispiels (Schlechtbeispiel) und anhand eines verbesserten Beispiels (Gutbeispiel).

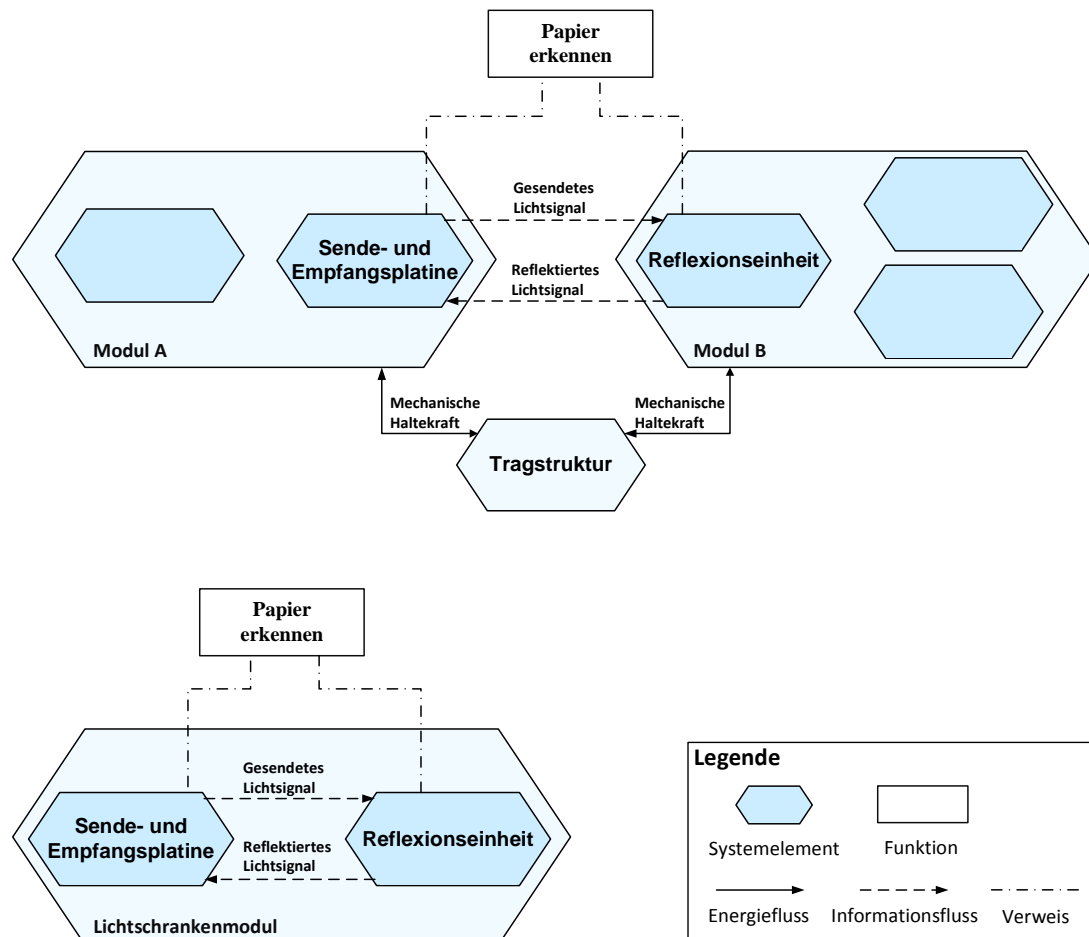


Bild 4-7: Erkennung von nicht eindeutigen Schnittstellen
oben Schlechtbeispiel, unten Gutbeispiel

3) Eindeutig interpretierbare Produktschnittstelle (mit Zusatzinformationen)

Eine *eindeutig interpretierbare Produktschnittstelle* ist eine Schnittstelle, die zunächst nicht eindeutig definiert ist und deren Zustand bzw. Zustände nur mit Hilfe einer oder mehrerer Zusatzinformationen eindeutig interpretierbar ist. Eine solche Schnittstelle ist **eindeutig prüfbar** unter Zuhilfenahme von diesen Zusatzinformationen (oftmals als Korrekturfaktoren bezeichnet). Zur Verdeutlichung ist ein leicht verfremdetes, einfaches Beispiel aus der Industrie nachfolgend angegeben. Die Zusatzinformationen beziehen sich meist jeweils auf ein individuelles Teil einer Menge von Bauteilen.

Beispiel für eine eindeutig interpretierbare Schnittstelle

Das Beispiel ist eine Schnittstelle zwischen einem Sensor und einer Auswerteelektronik. Der Sensor liefert idealerweise eine Sensorspannung, die proportional zur Messgröße ist (vgl. Bild 4-8). Durch Toleranzen in der Herstellung kann die Steigung der idealen Sensorkennlinie größer oder kleiner als die einer idealen Sensorkennlinie sein.

Mit einem Korrekturfaktor, der z. B. auf den Sensor aufgedruckt ist, lässt sich diese Abweichung korrigieren. Die Sensorspannung des Sensors stellt somit zusammen mit dem Korrekturfaktor den richtigen Messwert dar. Der Korrekturfaktor ist in diesem Fall die Zusatzinformation. Ähnlich wie im Beispiel kann es zahlreiche Zusatzinformationen geben, die nur zu einem einzelnen Element gehören und die zur Interpretation einer Schnittstelle notwendig sind. Beispielsweise könnte es für das angegebene Beispiel einen weiteren Korrekturfaktor zur Korrektur eines Offsets geben.

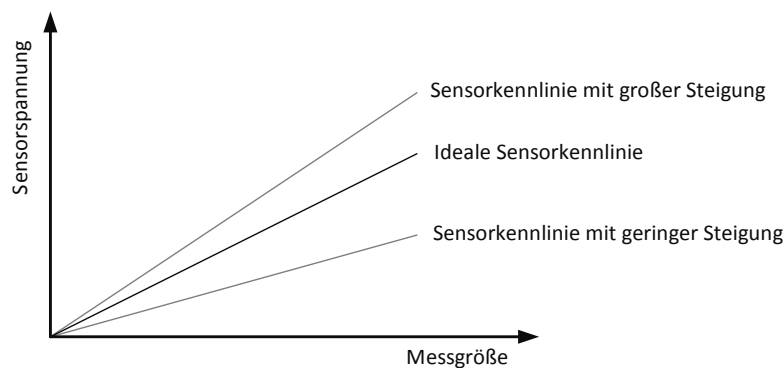


Bild 4-8: Sensorkennlinien mit verschiedenen Steigungen

Die drei Typen von Schnittstellen können später in der Produktionssystementwicklung zur Ermittlung des frühestmöglichen Prüfzeitpunkts für die Module benutzt werden, die anhand der Schnittstelle verbunden sind (vgl. Kapitel 4.2.3 und Kapitel 4.2.4).

Handelt es sich um Schnittstellen vom Typ eins, können die durch die Schnittstelle verbundenen Module einzeln geprüft werden. Handelt es sich um Schnittstellen vom Typ zwei, können die durch diese Schnittstelle verbundenen Module nur im Verbund, also nach deren Montage, geprüft werden. Handelt es sich um Schnittstellen vom Typ drei, können die dadurch verbundenen Module einzeln geprüft werden. Dafür muss dem Prüfmittel die Zusatzinformation(en) bekannt sein.

4.2.3 Hauptprozess der Produktionssystementwicklung – erster Durchlauf

Im ersten Durchlauf des Entwicklungsprozesses wird im Rahmen des Hauptprozesses der Produktionssystementwicklung (siehe Bild 4-5, zweite Swimlane) die Prinzipiellösung des Produktionssystems mithilfe der Spezifikationstechnik CONSENS spezifiziert (vgl.

Kapitel 2.3.3.3). Bei dem Vorgehen ist lediglich auf bestimmte Aspekte im Sinne der Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung zu achten.

Es werden dabei die folgenden Phasen bearbeitet:

- **Anforderungsanalyse (PS):** Den Ausgangspunkt der Anforderungsanalyse bildet die Prinzipiellösung des Produktes auf Systemebene. Die Entwicklungsaufgabe wird zunächst analysiert. Anschließend werden die fertigungsrelevanten Anforderungen der Anforderungsliste gefiltert und eine produktionsorientierte Erzeugnisstruktur des Produktes mithilfe der Partialmodelle *Wirkstruktur (P)* und *Gestalt (P)* aufgestellt. Das Resultat dieser Phase ist eine Liste der Fertigungsanforderungen und die Baustruktur. (vgl. Kapitel 2.3.3.3 und [GLL12, S. 100], [Nor12, S. 100])
- **Konzipierung auf Prozessebene:** In dieser Phase wird ein vorläufiger Produktionsprozess aus der produktionsorientierten Erzeugnisstruktur abgeleitet. Der Produktionsprozess wird dabei durch die Auswahl von Fertigungstechnologien und Angaben zu den damit verbundenen Zwischenzuständen detailliert. Die Wahl der Fertigungstechnologien erfolgt simultan und in enger Abstimmung mit der Konzipierung des Produktes auf Modulebene. (vgl. Kapitel 2.3.3.3 und [GLL12, S. 100ff.], [Nor12, S. 100])

In dieser Phase unterstützen die Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung. Mit ihrer Hilfe können ggf. schon im ersten Durchlauf erste mögliche Prüfzeitpunkte identifiziert werden. Voraussetzung ist dazu ein gewisses Erfahrungswissen der Mitarbeiter. Auch sind bestimmte Prüfzeitpunkte (und auch zugehörige Prüforte und Prüfmittel) durch eine ggf. schon bestehende Fertigung für bestimmte Baugruppen vorgegeben. Soll z. B. eine SMD bestückte Leiterplatte optisch geprüft werden, ist die Prüfung oftmals direkt in der Bestückungslinie der Leiterplatte integriert und wird für alle zu fertigenden SMD-Leiterplatten genutzt. Die Prüfzeitpunkte sollen sich dabei möglichst an der Fertigstellung der einzelnen Module des Produktes orientieren. Ziel ist es, jedes fertiggestellte Modul einzeln prüfen zu können. Dazu muss hier erstmalig der frühestmögliche Prüfzeitpunkt bestimmter Modulfunktionen beachtet werden (vgl. Kapitel 4.2.2.2). Die genaue Festlegung der Prüfzeitpunkte geschieht in der *Prüfplanung* (Bild 4-5, vierte Swimlane) im Teilprozess *Prüfplan erweitern* (vgl. Bild 4-9).

Die Prüfmittelentwicklung unterstützt – wie auch bei der Konzipierung des Produktes – dabei die Zugänglichkeit zur Prüfstelle/zum Prüfmerkmal bzw. die Schnittstelle, die zur Prüfung des Prüfmerkmals benutzt wird, sicherzustellen. Auch dies setzt ein gewisses Erfahrungswissen der Mitarbeiter und eine gewisse Antizipierung bestimmter Prüfmerkmale in diesem ersten Durchlauf voraus. Insbesondere bei Produkten oder Teilen von Produkten, die eine gewisse Ähnlichkeit zu bestehenden Produkten aufweisen ist dies möglich. Es können sich daraus alternative Prozessfolgen ergeben. Die Montage eines Gehäuseteils kann

z. B. auf einen späteren Zeitpunkt verschoben werden, um die Zugänglichkeit zu einer internen Schnittstelle (vgl. Kapitel 4.2.2.2, Schnittstellen der Kategorie zwei) zum Prüfzeitpunkt zu gewährleisten.

Als Ergebnis dieser Phase liegt das initiale Partialmodell *Prozesse* vor.

- **Konzipierung auf Ressourcenebene:** In diesem Prozessschritt werden den einzelnen Produktionsprozessen Ressourcen zugeordnet. Auf Basis der fertigungsrelevanten Anforderungen und der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Konfiguration erfolgt die Auswahl zwischen alternativ möglichen Ressourcen in Abstimmung mit der Produktentwicklung. Die ausgewählten Ressourcen werden im Partialmodell *Ressourcen* modelliert. Sie dienen als Grundlage zur Definition des Layoutplans der Produktion im Partialmodell *Gestalt (PS)*. (vgl. Kapitel 2.3.3.3 und [GLL12, S. 102f.], [Nor12, S. 100f., S. 136ff.])

Durch bestehende Prüfmittel, die ggf. wiederverwendet werden sollen, stehen auch hier ggf. Ressourcen in Form von den wieder zu verwendenden Prüfmitteln fest. Im Modell *Gestalt (PS)* können hier schon Prüfmittel vorgesehen werden (Festlegung Prüfart, vgl. Prüfplanungsaufgabe 6 in Kapitel 4.2.4.1), falls diese zu diesem Zeitpunkt schon antizipiert werden können. Andernfalls werden diese später während der Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung ergänzt.

Der *Domänenspezifische Entwurf (PS)* des Produktionssystems wird frühestens im dritten Durchlauf des Referenzprozesses (Bild 4-15) durchgeführt. Die *Systemintegration (PS)* des Produktionssystems wird im vierten Durchlauf (Bild 4-16) durchgeführt. Der Reifegrad und die Planungstiefe nehmen somit mit den zu durchlaufenden Durchläufen zu. Die Planung und der Aufbau des Produktionssystems werden im ersten Durchlauf des Entwicklungsprozesses nicht komplett bis zur Fertigstellung durchlaufen. Es soll lediglich dafür gesorgt werden, dass das Produktkonzept mit dem Hauptprozess der Produktionssystementwicklung abgestimmt ist. Weiterhin soll das Produktionssystem nur einmal aufgebaut werden, im Vergleich zum Produkt, welches in Serie gebaut werden soll (Ausnahme wenn z. B. für mehrere Standorte geplant wird).

4.2.4 Vorgehen der Prüfplanung – erster Durchlauf

In diesem Kapitel wird das Vorgehen der Prüfplanung beschrieben. Die Prüfplanung kann dabei im Rahmen dieser Arbeit im Wesentlichen als eine Art Sammlung von Anforderungen an das oder die Prüfmittel verstanden werden. Diese Anforderungen werden dann später der Prüfmittelentwicklung übergeben. Alle in der konventionellen Prüfplanung durchzuführenden Tätigkeiten (vgl. Kapitel 2.4.1) werden dabei mit berücksichtigt. Kapitel 4.2.4.1 gibt einen Gesamtüberblick über die zu durchlaufenden Prozessschritte. In Kapitel 4.2.4.2 bis Kapitel 4.2.4.7 werden die einzelnen Prozessschritte der Prüfplanung im Detail beschrieben, inklusive der Tätigkeiten, bei denen durch die Prüfplanung andere Tätigkeiten außerhalb der Prüfplanung unterstützt werden sollen.

4.2.4.1 Gesamtüberblick über die Prüfplanung

Die Prüfplanung besteht aus den in Bild 4-5 in der vierten Swimlane dargestellten Prozessen. Diese sind in Bild 4-9 detailliert dargestellt. Begonnen wird mit der *Identifikation von Informationsquellen*. Im weiteren Verlauf der Prüfplanung muss allerdings abgewartet werden, bis die erste Prinziplösung des Produktes auf Systemebene vorhanden ist (Informationsflüsse *AMI* und *ANI*), um die *Ermittlung potentieller Prüfmerkmale* und *Ermittlung von NPB Anforderungen* durchzuführen. Um den Prozessschritt *Prüfplanung (insbesondere Prüfmerkmalauswahl)* durchführen zu können, soll auf das erste Konzept des Produktionssystems gewartet werden (*COI*). Ist der Prozessschritt *Prüfplanung (insbesondere Prüfmerkmalauswahl)* abgeschlossen, kann die Prüfmittelentwicklung beginnen (vgl. Bild 4-5). Die Prüfplanung, mit den dort entstandenen Informationen, bildet dabei die wesentliche Ausgangsbasis für die Prüfmittelentwicklung.

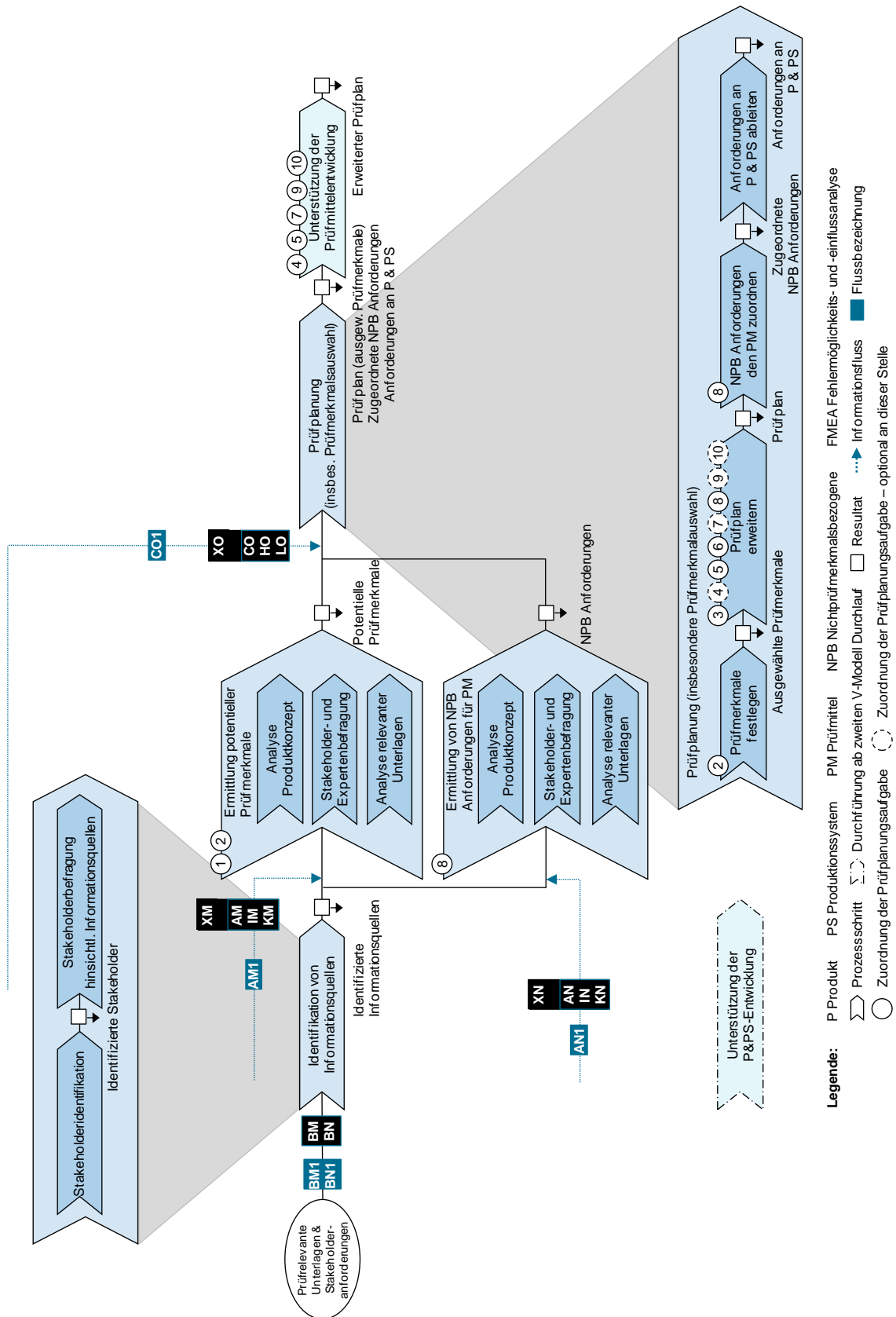


Bild 4-9: Vorgehen der Prüfplanung

Zusätzlich zu den genannten Tätigkeiten der Prüfmittelentwicklung werden *Unterstützende Tätigkeiten* übernommen. Hierbei werden die Produktentwicklung, der Hauptprozess der Produktionssystementwicklung und die Prüfmittelentwicklung durch die Prüfplanung unterstützt.

Während aller Teilprozessschritte der Prüfplanung können Anforderungen, die an das Produkt oder Produktionssystem aus Sicht der Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung gestellt werden, auftauchen. Tauchen solche Anforderungen in den Teilprozessschritten auf sind diese zu dokumentieren. Im Teilprozessschritt *Anforderungen an Produkt und Produktionssystem ableiten* (vgl. Bild 4-9) werden diese dann gesammelt dokumentiert und der Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung übergeben.

In Bild 4-9 sind die für den ersten Durchlauf des Entwicklungsprozesses geltenden Flussbezeichner der Informationsflüsse blau dargestellt (*BMI*, *BNI*, *AMI*, *ANI*, *COI*). Die „1“ am Ende des Bezeichners gibt dabei an, dass es sich um den ersten Durchlauf handelt. Die Flussbezeichner entsprechen dabei den Bezeichnern aus Bild 4-5. Zusätzlich sind in Bild 4-9 schwarze Flussbezeichner eingefügt. Sie kennzeichnen allgemein die Flüsse, die im gesamten Entwicklungsprozess an der Stelle auftreten können. Das Bild und das zugehörige Vorgehen gilt also grundsätzlich für jeden einzelnen Durchlauf.

Der Flussbezeichner *XM* fasst dabei die Flussbezeichner *AM*, *IM*, *KM* zusammen. Der Flussbezeichner *XN* fasst dabei die Flussbezeichner *AN*, *IN*, *KN* zusammen. Der Flussbezeichner *XO* fasst dabei die Flussbezeichner *CO*, *HO*, *LO* zusammen.

Zuordnung der Aufgaben der Prüfplanung zu den Prozessschritten

In der Literatur wird zwischen Prüfplanung, Prüfmittelbeschaffung und Prüfmittelentwicklung nicht immer trennscharf unterschieden. Prüfmittelbeschaffung und -entwicklung werden dabei oftmals als Teilbereich der Prüfplanung angesehen. Es sollen die nachfolgend aufgeführten Aufgaben bearbeitet werden, die in der konventionellen Prüfplanung beschrieben sind (vgl. Kapitel 2.4.1). Die Aufgaben sind in dieser Arbeit aufgeteilt worden. Ein Teil erfolgt dabei direkt in der Prüfplanung selbst. Ein anderer Teil wird im Rahmen dieser Arbeit der Prüfmittelentwicklung zugeordnet. Die nachfolgende Nummerierung der Prüfplanungsaufgaben ordnet diese den in Bild 4-9 dargestellten Prozessen zu:

1) Bestimmung der Prüfplankopfdaten

Der Prüfplankopf enthält die organisatorischen Daten des Prüfplans. Dieser ist dabei unternehmens- und projektspezifisch. Der Prüfplankopf wird erstmalig in dem Prozessschritt *Ermittlung potentieller Prüfmerkmale* angelegt. Falls notwendig kann er im weiteren Verlauf ergänzt werden.

2) Auswahl der Prüfmerkmale

Im Prozessschritt *Ermittlung potentieller Prüfmerkmale* werden zunächst alle in Frage kommenden Prüfmerkmale gesammelt. Im Prozessschritt *Prüfmerkmale fest-*

legen werden die potentiellen Prüfmerkmale auf die später tatsächlich zu prüfenden Merkmale reduziert.

3) Festlegung der Prüfzeitpunkte

Erste mögliche Prüfzeitpunkte können schon im Hauptprozess der Produktionssystementwicklung identifiziert worden sein (vgl. Kapitel 4.2.3). Im Prozessschritt *Prüfplan erweitern* werden den Prüfmerkmalen die Prüfzeitpunkte zugeordnet. Die Prüfzeitpunkte gliedern sich dabei in die *Prozessschritte der Fertigung* ein, die in der Produktionssystementwicklung bei der Konzipierung auf Prozessebene erstellt wurden. Zu beachten ist dabei der frühestmögliche Zeitpunkt der Prüfungen aufgrund der Schnittstellen (vgl. Kapitel 4.2.2.2). Erst nach dem Zusammenfügen der Module, die über *nicht eindeutig definierte Produktschnittstellen* verbunden sind, können diese in der Produktion geprüft werden. Bei der Festlegung der Prüfzeitpunkte muss dabei darauf geachtet werden, dass die nicht eindeutig definierten Produktschnittstellen bereits verbunden sind (vgl. Kapitel 4.2.2.2).

4) Festlegung der Prüffart

Die Prüffart kann im Rahmen dieser Arbeit sowohl im Prozessschritt *Prüfplan erweitern* von der Prüfplanung direkt festgelegt werden. Die Folge ist, dass die vorgegebene Prüffart als Anforderung an die Prüfmittelentwicklung direkt vorgegeben ist. Alternativ kann die Prüffart auch später in der *Prüfmittelentwicklung* festgelegt werden, wobei die Prüfplanung an dieser Stelle unterstützend mitwirkt. Der Vorteil ist dabei, dass zunächst lösungsneutral nach der besten Lösung gesucht werden kann und die beste Gesamtlösung des zu entwickelnden Prüfmittels mit in die Entscheidungsfindung mit einfließen kann. Diese Alternative ist daher grundsätzlich zu bevorzugen. Die Zuordnung der Prüffart zu den Prüfmerkmalen erfolgt in diesem Fall im Morphologischen Kasten des Prüfmittels.

5) Festlegung des Prüfumfangs

Der Prüfumfang wird im Prozessschritt *Prüfplan erweitern* initial festgelegt und wird bei Bedarf später geändert.

6) Festlegung von Prüfort

Im Prozessschritt *Prüfplan erweitern* wird im Prüfplan ein Feld zum Eintrag der Zuordnung des Prüfmerkmals zum Prüfort angelegt. Es kann dabei in diesem Prozessschritt ein (zunächst grober) Prüfort eingetragen werden oder auch erst später bei der Konzipierung des jeweiligen Prüfmittels. Der Prüfort gliedert sich dabei in das Modell *Gestalt* (Produktionssystem) ein, das in dem Hauptprozess der Produktionssystementwicklung (vgl. Kapitel 4.2.3) entstanden ist. Dort können auch schon initial Prüforte vorgesehen worden sein.

7) Festlegung von Prüfpersonal

Im Prozessschritt *Prüfplan erweitern* kann ein Feld zum Eintrag der Zuordnung des Prüfmerkmals zum Prüfpersonals angelegt werden. Dies macht Sinn, falls kein Prüfmittel für dieses Prüfmerkmal neu entwickelt werden muss, also auf ein vor-

handenes Prüfmittel, wie z. B. einen Messschieber zurückgegriffen wird. Bei der Serienfertigung von mechatronischen High-End-Produkten wird oft, insbesondere bei späteren Modul- und Gesamtprüfungen, händisches Prüfen weitestgehend vermieden und automatisiert geprüft. Falls das Prüfmittel für dieses Prüfmerkmal neu entwickelt und für das jeweilige Prüfmerkmal Prüfpersonal zur Prüfung benötigt wird, wird das Prüfpersonal später in der Prüfmittelentwicklung im *Morphologischen Kasten* dokumentiert.

8) Auswahl der Prüfmittel

Im Prozessschritt *Prüfplan erweitern* wird eine Spalte zum Eintrag der Zuordnung des Prüfmerkmals zum Prüfmittel im Prüfplan angelegt.

Prüft das Prüfmittel mehrere Prüfmerkmale, wird später in der *Prüfmittelentwicklung* das einzelne Prüfmerkmal dem Teil/Komponente des gesamten Prüfmittels im *Morphologischen Kasten* zugeordnet (z. B. ein Sensor), der das einzelne Prüfmerkmal überprüft.

9) Festlegung der Prüfanweisung

Im Prozessschritt *Prüfplan erweitern* kann ein Feld im Prüfplan zum Eintrag der Zuordnung der Prüfanweisung zum Prüfmittel angelegt werden. Dies macht Sinn, falls kein Prüfmittel neu entwickelt werden muss, also auf ein vorhandenes Prüfmittel, wie z. B. einen Messschieber zurückgegriffen wird. Wird ein Prüfmittel neu entwickelt, werden später in der Prüfmittelentwicklung Prüfanweisungen in Form von *Anwendungsszenarien* beschrieben.

10) Festlegung der Prüfdokumentation/-datenverarbeitung

Im Prozessschritt *Prüfplan erweitern* kann ein Feld zum Eintrag der Zuordnung der Prüfdokumentation/-datenverarbeitung zum Prüfmittel angelegt werden. Dies macht Sinn, falls kein Prüfmittel für dieses Prüfmerkmal neu entwickelt werden muss, also auf ein vorhandenes Prüfmittel, wie z. B. einen Messschieber zurückgegriffen wird. Wird ein Prüfmittel neu entwickelt, wird die Prüfdokumentation/-datenverarbeitung über den *Morphologischen Kasten* und/oder die *Anwendungsszenarien* in der *Prüfmittelentwicklung* im ersten Schritt spezifiziert. Im Detail werden diese in der weiteren Spezifikation des Prüfmittels in der Prüfmittelentwicklung dokumentiert.

Die Nummern der aufgeführten Aufgaben sind in Bild 4-9 den Prozessschritten zugeordnet, in denen die Aufgaben bearbeitet werden. Beispielsweise erfolgt in der Phase *Ermittlung potentieller Prüfmerkmale* die Bestimmung der Prüfplankopfdaten (1).

4.2.4.2 Unterstützung der Produkt- und Produktionssystementwicklung

Im Prozessschritt *Unterstützung der Produkt- und Produktionssystementwicklung* (Bild 4-9) sind die Tätigkeiten der Prüfplanung dargestellt, bei der die Prüfplanung (deren Mitarbeiter) bei der Produkt- und Produktionssystementwicklung unterstützt (vgl. Mar-

ker *G* in Bild 4-14, Bild 4-15 und Bild 4-16). Dieser Prozessschritt ist an dieser Stelle gestrichelt dargestellt, da er erst im zweiten Durchlauf an dieser Stelle durchgeführt wird. Ab dem zweiten Durchlauf unterstützt die Prüfplanung mit diesem Prozessschritt die Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung bei der Anforderungsaufnahme der Anforderungen aus dem vorangegangenen Durchlauf.

4.2.4.3 Identifikation von Informationsquellen

Ziel dieses Prozessschrittes ist insbesondere Erfahrungswissen in die Prüfplanung mit einfließen zu lassen. Der Prozessschritt *Identifikation von Informationsquellen* (Bild 4-9) unterteilt sich in zwei Prozessschritte.

Im ersten Prozessschritt wird eine **Stakeholderidentifikation** durchgeführt. Stakeholder sind dabei Gruppen oder Individuen (in Anlehnung an [GP14, S. 150]), die Einfluss auf die Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung haben bzw. dazu wichtige Informationen liefern können. Dabei werden alle Stakeholder des Prüfmittels ermittelt. Diese Stakeholder können z. B. unternehmensinterne Abteilungen (bzw. deren Mitarbeiter) wie der Vertrieb sein oder auch unternehmensexterne Parteien wie z. B. ein wichtiger Kunde.

Im zweiten Prozessschritt wird eine **Stakeholderbefragung hinsichtlich Informationsquellen**, die zur Ermittlung von Prüfmerkmalen, NPB Anforderungen an das Prüfmittel und zur Ermittlung der Prüfnotwendigkeit (vgl. Prozessschritt *Prüfmerkmale festlegen*) dienen kann, durchgeführt. Dazu werden die im Prozessschritt *Stakeholderidentifikation* identifizierten Stakeholder befragt. Identifizierte Informationsquellen können dabei sein:

- *Prüfrelevante Unterlagen*: Beispiel dafür wäre z. B. ein Dokument, in dem der Kunde – an den das Produkt später geliefert wird – beschreibt, welche Prüfungen vom Lieferant zwingend durchzuführen sind. Weitere Beispiele wären Normen, in denen bestimmte Prüfungen vorgeschrieben werden oder Unterlagen von Prüfungen von ähnlichen Produkten, an denen eine Orientierung erfolgen kann.
- *Experten*: Ein Experte kann zum einen selbst (potentielle) Prüfmerkmale oder NPB Anforderungen nennen oder zum anderen auf weitere prüfrelevante Dokumente/Unterlagen verweisen.
- *Stakeholder*: Die Stakeholder können selbst Quelle zur Nennung von (potentiellen) Prüfmerkmalen oder NPB-Anforderungen sein.

Die hier durchgeführte *Stakeholderbefragung hinsichtlich Informationsquellen* kann in der Praxis zusammen mit der *Stakeholder- und Expertenbefragung* in den folgenden Prozessschritten *Ermittlung potentieller Prüfmerkmale* und *Ermittlung von NPB Anfor-*

derungen für PM durchgeführt werden (vgl. Bild 4-9). Dadurch kann der Aufwand bei den Stakeholdern und Experten verringert werden.

Am Ende dieses Prozessschrittes liegen die *Identifizierten Informationsquellen* vor.

4.2.4.4 Ermittlung potentieller Prüfmerkmale

Ziel dieses Prozessschrittes ist die Ermittlung aller *Potentiellen Prüfmerkmale*. Potentielle Prüfmerkmale sind alle Merkmale eines Produktes, die prinzipiell zur Qualitätskontrolle in der Fertigung des Produktes herangezogen werden können. Im Normalfall eignen sich nur solche Prüfmerkmale, die keinen systematischen Fehler des Prüflings (Produktes) finden. Das Finden der systematischen Fehler ist grundsätzlich Aufgabe der Entwicklung (Eigenschaftsabsicherung/Qualifizierung/Entwicklungstests).

Die potentiellen Prüfmerkmale können zum einen in der weiteren Prüfplanung selbst genutzt werden. Zum anderen können diese ggf. außerhalb der Prüfplanung genutzt werden, um z. B. bei der Erstellung erster Prototypen (für Pilotkunden) Hinweise auf die zu prüfenden Eigenschaften zu liefern. Diese können ggf. von den Prüfmerkmalen abweichen, die bei einer Prüfung des in Serie gefertigten Produktes geprüft werden müssen.

In der Produktion mechatronischer Produkte haben sich neben den „normalen“ Prüfmerkmalen, wie z. B. die Prüfung einer geometrischen Abmessung, *Key Performance Indicators* (KPIs) etabliert. Die Beurteilung eines Produktmerkmals anhand eines KPIs kann als Prüfmerkmal aufgefasst werden.

Beispiel für ein KPI: Es handelt sich um ein leicht verfremdetes und vereinfachtes Beispiel aus der Industrie. Ein Produkt hat die Aufgabe rechteckige Papierstücke unterschiedlicher Größe aus dafür vorgesehenen Papierspeichern zu entnehmen und dem nächsten Prozessschritt möglichst schnell zuzuführen. Zur Zählung und Bestimmung von Eigenschaften des Papiers werden mehrere Lichtschranken verwendet (vgl. Bild 4-6). Zum Transport des Papiers innerhalb des Produktes werden Rollen verwendet, die elektrisch angetrieben werden. Durch minimale Streuungen bei den Parametern der Rollen kann es zu einem „Schiefzug“ des Papiers im Produkt kommen. Die Kanten des zu transportierenden Papiers befinden sich durch diesen Schiefzug nicht mehr parallel bzw. rechtwinklig zum Transportweg. Grund kann z. B. unterschiedlicher Anpressdruck auf die Enden der Rollen oder verschiedene Materialeigenschaften der Rollen selbst sein. Durch Alterung der Rollen nimmt dieser Effekt tendenziell zu. Ist der Schiefzug irgendwann zu groß, fällt das Produkt aus (z. B. durch Papierstau). Dieser Schiefzug kann bei der Fertigung des Produktes gemessen werden und stellt den KPI dar. Ist der Schiefzug im Auslieferungszustand zu hoch, kann davon ausgegangen werden, dass das Produkt frühzeitig ausfällt (z. B. Papierstau).

Manche Prüfmerkmale, zu denen insbesondere solche KPIs zählen, lassen sich durch die Analyse des Produktkonzeptes durch die Prüfplanung schwer finden, da diese oft-

mals keine Produktfunktionen sind. Bei der Identifikation solcher Prüfmerkmale/KPIs ist es daher nahezu unerlässlich auf die Hilfe von Experten und deren **Erfahrungswissen** zurückzugreifen. Durch die Analyse von prüfrelevanten Unterlagen, z. B. Prüfpläne von Vorgängerprodukten, ähnlichen Produkten oder Produkten mit auch nur teilweise gleichen Eigenschaften können solche Prüfmerkmale/KPIs ebenfalls identifiziert werden.

Analyse Produktkonzept

Bei der Analyse des Produktkonzeptes werden die Entwicklungsartefakte des Produktes auf mögliche Prüfmerkmale hin untersucht. Im ersten Durchlauf steht dazu die Prinziplösung des Produktes auf Systemebene zur Verfügung. Aus der Prinziplösung des Produktes werden nun potentielle Prüfmerkmale abgeleitet und in den vorläufigen Prüfplan (Bild 4-10) eingetragen. Dieser Informationsfluss ist mit dem Marker *AMI* gekennzeichnet. In Bild 4-10 sind dabei wieder die im ersten Durchlauf bestehenden Informationsbeziehungen in blau dargestellt. Die Informationsbeziehungen allgemein, die auch die späteren Durchläufe umfassen, werden wieder in schwarz dargestellt.

Zur Ermittlung potentieller Prüfmerkmale können von der Prinziplösung des Produktes die Anforderungsliste, die Grobgestalt, die Funktionshierarchie und die Wirkstruktur herangezogen werden. Es soll dabei wie folgt vorgegangen werden:

- Aus der *Funktionshierarchie* werden alle Funktionen identifiziert, die nicht ausschließlich durch Software realisiert werden. Diese Funktionen sind potentielle Prüfmerkmale und werden in den vorläufigen Prüfplan mit ihren funktionserfüllenden Systemelementen eingetragen (Bild 4-10).

Anmerkungen:

Funktionen, die ausschließlich durch Software realisiert sind, brauchen nicht geprüft werden (vgl. dazu auch Fußnote 22 und [FLS07, S. 15], [Her97, S. 2]). Fehler in der Software sind systematische Fehler und würden somit bei jedem Produkt mit dieser Software auftreten. Generell lässt sich sagen, dass die einzige Anforderung, die bezüglich Software bestehen kann, folgende ist: Es muss geprüft werden, ob die richtige Software, abhängig von Konfiguration/Version des Produktes installiert wurde. Zur Konfiguration zählt dabei die Software selbst, die kundenspezifisch sein kann.

Funktionen werden durch die Verhaltensmodellierung (Zustände, Aktivitäten) im Systementwurf konkretisiert. Daher kann es im weiteren Verlauf vorkommen, dass bei der Konkretisierung der Prüfmerkmale auf das Verhalten zurückgegriffen wird.

- Alle nicht funktionalen Anforderungen aus der *Anforderungsliste* werden auf potentielle Prüfmerkmale hin untersucht und in den vorläufigen Prüfplan eingetragen. Dabei ist darauf zu achten nur die Anforderungen zu berücksichtigen, die für eine Prüfung in der Fertigung sinnvoll sein können. Die Überprüfung der Anforderung hinsichtlich einer bestimmten Maximallänge des Gehäuses des

Produktes macht z. B. in aller Regel keinen Sinn. Die Länge des Gehäuses wird in aller Regel bei jedem einzelnen Stück (nahezu) gleich groß sein. Ist die Länge bei jedem einzelnen Produkt zu groß, ist dies ein systematischer Fehler und muss in der Produktentwicklung (Qualifizierung/Eigenschaftsabsicherung/Entwicklungstests) entdeckt worden sein. *Anmerkung:* Die funktionalen Anforderungen brauchen nicht untersucht werden, da aus diesen in der Konzipierung des Produktes die schon vorher untersuchten Funktionen abgeleitet wurden.

- Die *Grobgestalt* wird auf potentielle Prüfmerkmale hin untersucht. Beispiel hier könnte der einwandfreie Zustand einer Klappe oder der richtige relative Abstand zwischen zwei Bohrungen sein.

Zu den potentiellen Prüfmerkmalen werden die betreffenden Systemelemente der Wirkstruktur zugeordnet. So kann eine Verbindung zwischen den Prüfmerkmalen aus der Analyse des Produktkonzeptes und der Fertigungsabfolge hergestellt werden. Die Systemelemente tauchen in der Fertigungsprozessbeschreibung wieder auf.

Stakeholder- und Expertenbefragung

Die im Prozessschritt *Identifikation von Informationsquellen* identifizierten Stakeholder und Experten werden nach potentiellen Prüfmerkmalen befragt. Die potentiellen Prüfmerkmale werden in den vorläufigen Prüfplan (Bild 4-10) eingetragen.

Analyse relevanter Unterlagen

Die im Prozessschritt *Identifikation von Informationsquellen* identifizierten prüfrelevanten Unterlagen werden hier hinsichtlich potentieller Prüfmerkmale analysiert. Beispielsweise können Prüfdokumentationen, in denen geprüfte Merkmale aufgelistet sind, von Vorgängerprodukten oder (in Teilen) ähnlichen Produkten wichtige Hinweise liefern.

Der **vorläufige Prüfplan** ist nachfolgend in Bild 4-10 dargestellt. Dem Prüfmerkmal selbst sind dabei die Quelle des Prüfmerkmals und das betreffende Systemelement zugeordnet. Es kann dabei vorkommen, dass ein Prüfmerkmal mehrere Quellen hat. Weiterhin ist eine Spalte vorgesehen, in der später markiert werden kann, ob das Prüfmerkmal geprüft werden soll oder nicht (0/1).

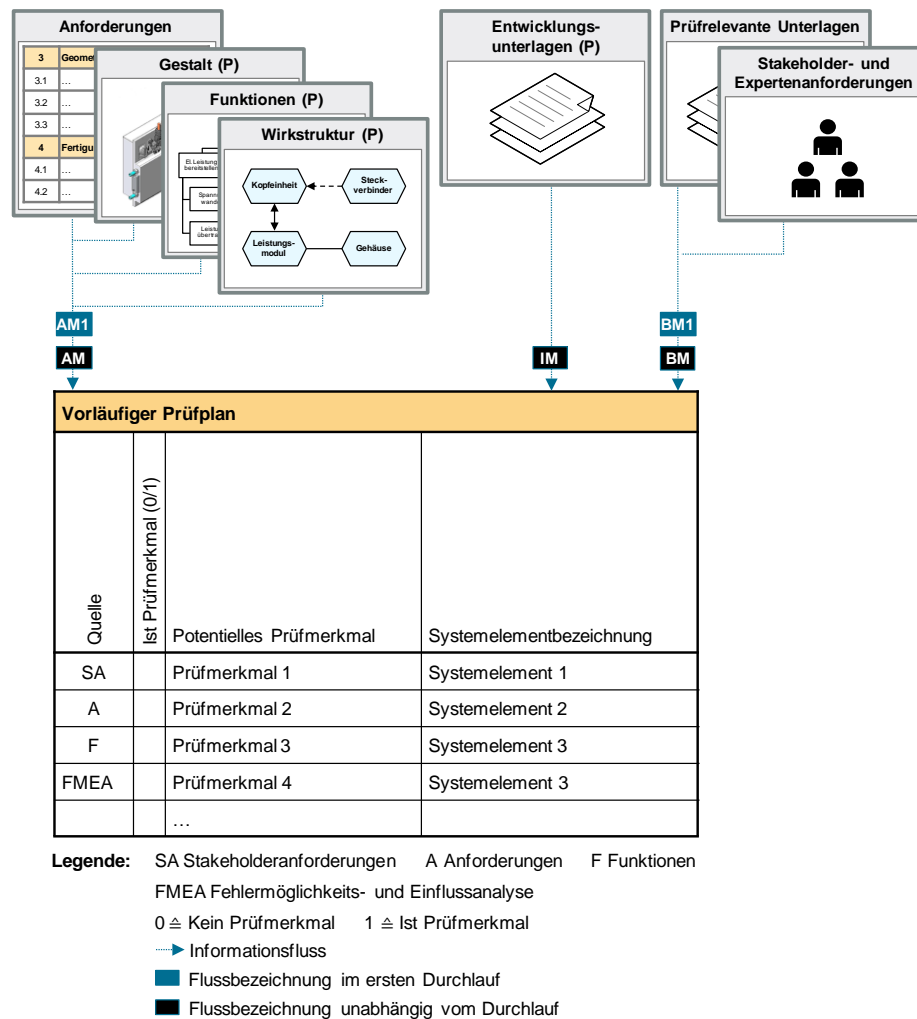


Bild 4-10: Vorläufiger Prüfplan

4.2.4.5 Ermittlung von NPB Anforderungen für Prüfmittel

In diesem Kapitel wird der Prozessschritt *Ermittlung von NPB Anforderungen für Prüfmittel* beschrieben, der parallel zu dem zuvor beschriebenen Prozessschritt *Ermittlung potentieller Prüfmerkmale* ausgeführt wird. Nichtprüfmerkmalbezogene Anforderungen sind Anforderungen, die keine Prüfmerkmale darstellen. Es wird dabei in funktionale Anforderungen (FA) und in nicht funktionale Anforderungen (NFA) unterschieden. Beispiel für nicht funktionale Anforderungen wären z. B. die zu prüfende Stückzahl der Prüflinge oder die Anforderung, dass das produzierende Unternehmen Generalunternehmer bei der Entwicklung des Prüfmittels zu sein hat und somit in der Lage ist insbesondere die Software des Prüfmittels jederzeit selbst anzupassen. Beispiel für eine funktionale Anforderung wäre z. B., dass bestimmte Prüfergebnisse in einem elektronischen Logfile abzuspeichern sind. Aus den funktionalen Anforderungen werden später in der Prüfmittelentwicklung Funktionen gebildet.

Die NPB Anforderungen werden in einer Anforderungsliste gesammelt (Bild 4-11). Die Quellen der Anforderungen sind dabei mit abgebildet und mit Informationsflüssen ver-

bunden. Die Flussbezeichner der Informationsflüsse, die im ersten Zyklus bestehen, sind blau. Die Flussbezeichner der Informationsflüsse, die in den weiteren Durchläufen insgesamt auftreten können sind wieder schwarz gekennzeichnet.

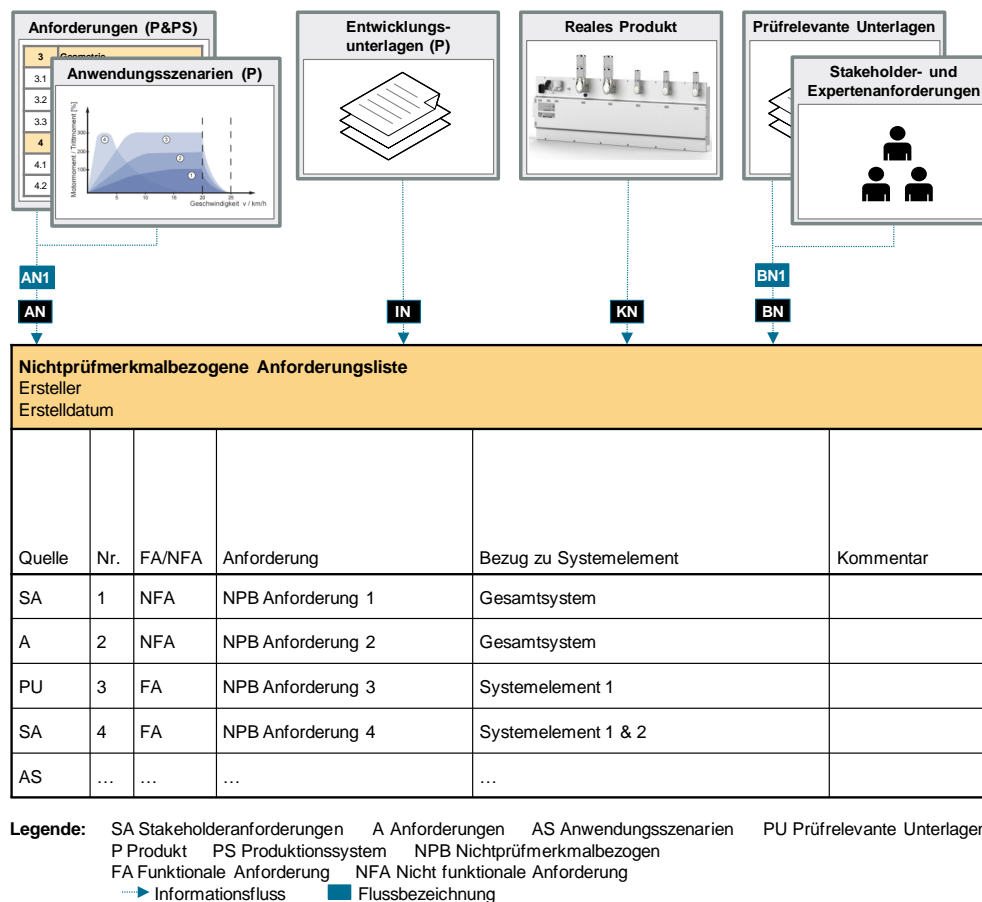


Bild 4-11: NPB Anforderungsliste

Analyse Produktkonzept

Bei der Analyse des Produktkonzeptes werden die Entwicklungsartefakte des Produktes hinsichtlich möglicher NPB Anforderungen untersucht. Im ersten Durchlauf steht dazu die Prinzipiellösung des Produktes mit den Partialmodellen *Anwendungsszenarien (P)* und *Anforderungen (P)* zur Verfügung. Dies ist mit dem Fluss **AN1** angedeutet. In den weiteren Durchläufen stehen an dieser Stelle auch die weiteren Entwicklungsunterlagen aus dem disziplinspezifischen Entwurf und das reale Produkt selbst in Form eines Prototypen zur Verfügung. Die ermittelten Anforderungen werden in die Anforderungsliste eingetragen. Die Quelle der Anforderung, ob es sich um eine funktionale oder nicht funktionale Anforderung handelt und der Bezug zu einem oder mehreren Systemelementen, wird zu jeder Anforderung dokumentiert.

Stakeholder- und Expertenbefragung

Die im Prozessschritt *Identifikation von Informationsquellen* identifizierten Stakeholder und Experten werden hinsichtlich NPB Anforderungen befragt. Die dabei ermittelten

NPB Anforderungen werden in die Anforderungsliste eingetragen. Die Quelle der Anforderung, ob es sich um eine funktionale oder nicht funktionale Anforderung handelt und der Bezug zu einem oder mehreren Systemelementen, wird zu jeder Anforderung dokumentiert.

Analyse relevanter Unterlagen

Die im Prozessschritt *Identifikation von Informationsquellen* identifizierten prüfrelevanten Unterlagen werden hier hinsichtlich NPB Anforderungen analysiert. Die dabei ermittelten NPB Anforderungen werden in die Anforderungsliste eingetragen. Die Quelle der Anforderung, ob es sich um eine funktionale oder nicht funktionale Anforderung handelt und der Bezug zu einem oder mehreren Systemelementen, wird zu jeder Anforderung dokumentiert.

4.2.4.6 Prüfplanung (insbesondere Prüfmerkmalsauswahl)

Dieser Prozessschritt besteht aus mehreren Teilprozessen. Hauptziel dieses Prozessschrittes ist das *Festlegen der Prüfmerkmale*, also die Reduzierung der potentiellen Prüfmerkmale auf die durch das Prüfmittel zu prüfenden Prüfmerkmale und die *Zuordnung der NPB Anforderungen zu den Prüfmitteln*. Darüber hinaus wird der *Prüfplan erweitert*, wobei in diesem Prozessschritt festgelegt wird, welches Prüfmerkmal an welcher Stelle im Produktionsprozess zu prüfen ist. Eingangsinformationen sind die erarbeiteten Informationen aus den vorangegangenen Prozessschritten. Zusätzlich werden Informationen aus dem *Hauptprozess der Produktionssystementwicklung* benutzt. Im ersten Durchlauf sind das die Partialmodelle der Prinzipiellösung des Produktionssystems *Prozesse, Ressourcen* und *Gestalt (PS)*, die mit der blauen Flussbezeichnung *COI* des Informationsflusses in Bild 4-9 dargestellt sind. In den weiteren Durchläufen werden an dieser Stelle weitere Informationen berücksichtigt. Diese sind mit den schwarzen Flussbezeichnern *CO*, *HO* und *LO* allgemein dargestellt. *CO* stellt dabei allgemein die Partialmodelle der Prinzipiellösung des Produktionssystems in den einzelnen Durchläufen dar. *HO* stellt weitere Entwicklungsunterlagen des Produktionssystems dar. *LO* stellt das real aufgebaute Produktionssystem dar (Die Flüsse *CO*, *HO*, *LO* werden zusammenfassend mit *XO* bezeichnet).

Teile der Informationen, die klassischerweise in einem Prüfplan enthalten sind, sind in Modellen, die insbesondere in der Prüfmittelentwicklung entstehen, enthalten. Es bestehen aber Verweise vom Prüfplan auf diese. Weiterhin werden die *Anforderungen an das Produkt und Produktionssystem abgeleitet*.

Prüfmerkmale festlegen

In diesem Prozessschritt werden aus den potentiellen Prüfmerkmalen die Prüfmerkmale ausgewählt, die tatsächlich geprüft werden sollen. Im Prüfplan in Bild 4-10 wird dazu in der Spalte *Ist Prüfmerkmal (0/1)* eine Eins eingetragen, wenn das Merkmal geprüft werden soll und eine Null eingetragen, wenn das Prüfmerkmal nicht geprüft werden soll. In

diesem Zusammenhang wird auch vom Festlegen der Prüfnotwendigkeit gesprochen (vgl. z. B. [SP15, S. 202]).

Der Hauptgrund, warum überhaupt Prüfungen in der Fertigung durchgeführt werden, sind unsichere Prozesse. Darüber hinaus kann es auch Forderungen von Kunden, gesetzliche Regelungen, Richtlinien usw. geben, die eine Prüfung verlangen, wobei diese letztlich auch auf mögliche Unsicherheiten in Fertigungsprozessen zurückgehen. Darum soll die Betrachtung der Fertigungsprozesse, wenn möglich, die Grundlage zur Festlegung der Prüfnotwendigkeit sein.

Zur Festlegung der Prüfnotwendigkeit sind dazu verschiedene Einflussgrößen zu berücksichtigen, wie z. B. Qualitätsziele, Prozess-FMEA, Produkt-FMEA, Maschinen- und Prozessfähigkeitskennwerte, Schadensberichte, Reklamationen, Kostendaten, Erfahrungswissen von den Experten, Kundenanforderungen, Richtlinien usw. Diese Einflussgrößen können dabei im Prozessschritt *Identifikation von Informationsquellen* ermittelt worden sein. Als Hilfsmittel zum Festlegen der Prüfmerkmale, die nicht fest durch Richtlinien/Kunden usw. gefordert sind, kann eine Prozess-FMEA hilfreich sein (vgl. [SP15, S. 559ff.]). Eine für die Prüfplanung an dieser Stelle angepasste Prozess-FMEA ist im Anhang A-2 beschrieben.

Schwachpunkt bei einer herkömmlichen Prozess-FMEA ist, dass manche Fehler und deren Auswirkungen nicht antizipiert werden können. Die Ursache kann mangelnde Erfahrung und nicht ausreichende Kreativität zur Antizipierung sein. Insgesamt ist festzustellen, dass bei neuen Produktionsprozessen die Abschätzung – ob ein Prüfmerkmal geprüft werden soll oder nicht – schwierig ist. Die Neuheit der Produktionsprozesse kann dabei durch ein neues Produkt hervorgerufen sein.

Sind die Fähigkeiten der Fertigungsprozesse nicht hinreichend bekannt, kommt den untersuchten Produkteigenschaften, aus denen potentielle Prüfmerkmale abgeleitet wurden, eine besondere Bedeutung bei. Insbesondere bei neuen Produkten können zunächst (bei Produktionsanlauf) mehr Prüfmerkmale aus den potentiellen Prüfmerkmalen geprüft werden, abhängig von den Qualitätszielen.

Prüfmerkmale können grundsätzlich aus Produktsicht identifiziert werden (vgl. *Analyse Produktkonzept* in Kapitel 4.2.4.4) und aus Produktionssicht (unsichere Produktionsprozesse). Durch den Eintrag der Systemelementbezeichnungen in den (vorläufigen) Prüfplan ist eine Verknüpfung bzw. Synchronisation zwischen diesen beiden Quellen (Produktsicht, Produktionssicht) für Prüfmerkmale möglich. Über eine Prozess-FMEA kann dabei die Fehlerkette noch besser dargestellt werden. Ein in der Produktion auftretender Fehler kann dabei z. B. eine bestimmte Produktfunktion stören. Idealerweise gelingt es bei einer Prozess-FMEA jedes Prüfmerkmal einer oder mehreren Fehlerursachen zuzuordnen.

Allgemein kann angenommen werden, dass bei hohen Qualitätszielen für High-End-Produkte tendenziell mehr Prüfmerkmale überprüft werden. Bei automatisierten Prüfungen, wie es bei mechatronischen High-End-Produkten oft der Fall ist, stellt dies oftmals durch die Automatisierung der Prüfungen keinen sehr großen Kostenaspekt wie händische Prüfungen durch einen Mitarbeiter dar. Dabei kann selbstverständlich keine

Qualität in das Produkt hinein geprüft werden, sondern Ziel muss grundsätzlich die Erstellung einer guten Qualität sein, z. B. durch sichere Fertigungsprozesse und konstruktive Maßnahmen (vgl. [Dem00, S. 29], [SP15, S. 195], [Ber05, S. 2], [Stu96, S. 152], [Wes06]).

Prüfplan erweitern

Der Prüfplan stellt das zentrale Dokument in der Prüfplanung dar. Er sammelt die wichtigsten Informationen der Prüfplanung bzw. verweist auf weitere Informationen. In diesem Prozessschritt wird dieser erweitert (Bild 4-12). Insbesondere wird in dem Prüfplan eine Übersicht über die Prüfmerkmale geschaffen. Den Prüfmerkmalen werden dabei die verschiedenen Prüfmittel zugeordnet.

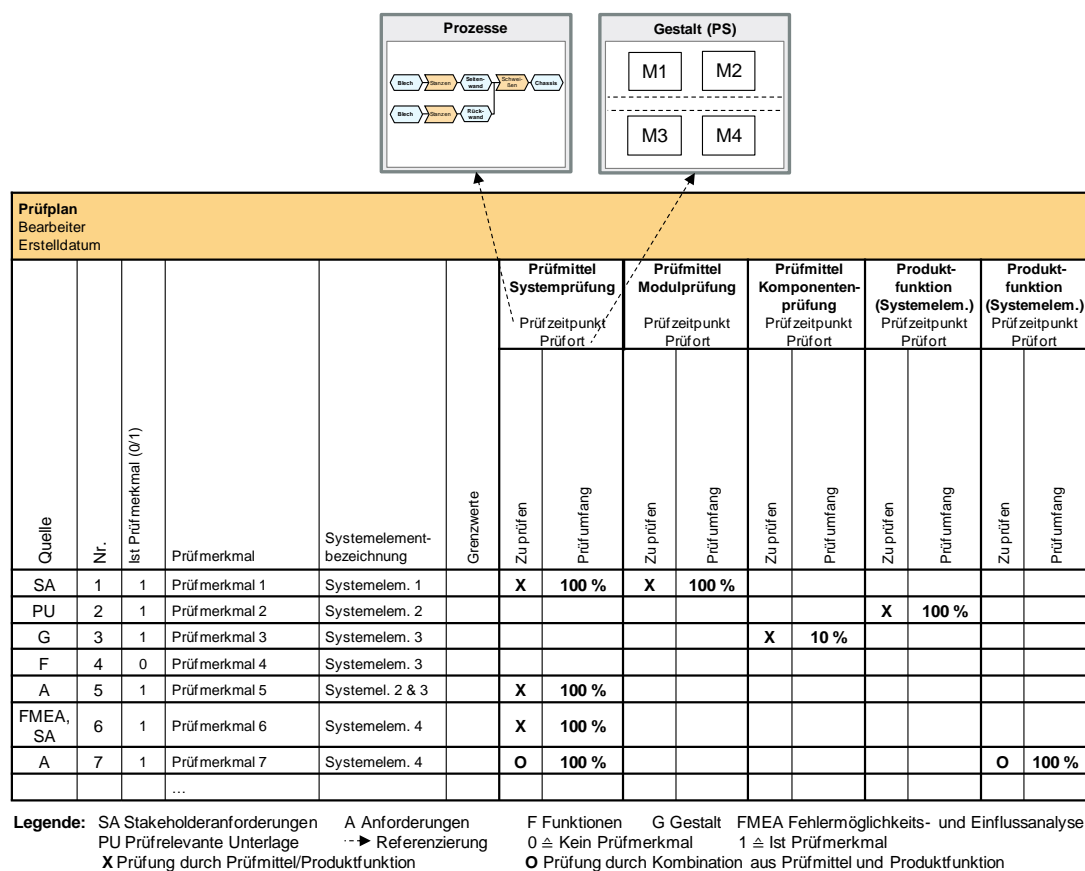


Bild 4-12: Prüfplan

Prüfmittel können dabei wie folgt kategorisiert werden:

- Prüfmittel für Systemprüfungen

Ein Prüfmittel für Systemprüfungen befindet sich, sofern es dieses geben soll, am Ende der Produktion des gesamten Produktes und prüft das Produkt auf Systemebene. In der Regel existiert dieses Prüfmittel maximal einmal pro Fertigungsstandort bzw. Fertigungslinie des zu prüfenden Produktes.

- Prüfmittel für Modulprüfungen
Es können Prüfmittel für die Prüfung von Modulen des Produktes existieren. Dies können ggf. auch Sub-Module usw. sein. Im ersten Durchlauf sind dabei nur die Prüfmittel für Module zu berücksichtigen, die auf Systemebene beim Systementwurf des Produktes (Systementwurf des Produktes ist Ausgangsbasis im ersten Durchlauf) sichtbar sind. In der Regel existiert dabei maximal ein Prüfmittel pro Modul und Fertigungsstandort bzw. Fertigungslinie.
- Prüfmittel für Komponentenprüfungen
Es können Prüfmittel für die Prüfung von einzelnen Komponenten existieren. Im ersten Durchlauf sind diese dabei nur zu berücksichtigen, wenn sie auf Systemebene sichtbar sind. Dies ist meist nicht der Fall, so dass diese Prüfmittel erst in den späteren Durchläufen zu berücksichtigen sind. In der Regel existiert dabei maximal ein Prüfmittel pro Komponente und Fertigungsstandort bzw. Fertigungslinie.

Jedem Prüfmittel werden Prüfzeitpunkt und Prüfort zugewiesen. In der Regel existieren für komplexe Prüfmittel, die selbst eine Anlage darstellen, pro Prüfmittel ein Prüfort und ein Prüfzeitpunkt, da diese ortsunveränderlich installiert sind und lediglich in einem Prozessschritt prüfen. Werden nicht direkt aufeinanderfolgende Prüfungen mit einem Prüfmittel vorgesehen bzw. ist dies ortsveränderlich (z. B. auf einem Wagen) sind auch mehrere Prüfzeitpunkte und Prüforte pro Prüfmittel denkbar.

Zur Ermittlung, welche Prüfmittel es geben soll, sind die Prüfzeitpunkte von zentraler Bedeutung. Ein Prüfmerkmal kann prinzipiell nach dessen Entstehen mehrfach im Produktionsprozess geprüft werden, solange dies zugänglich ist bzw. die dafür zu nutzende Schnittstelle zugänglich ist. Es wird zunächst bestimmt, zu welchen Prüfzeitpunkten welche Prüfmerkmale geprüft werden. Im Rahmen dieser Arbeit soll sich, dem modularen Gedanken folgend, bevorzugt an der Fertigstellung der Module bzw. des gesamten Produktes orientiert werden. Der frühestmögliche Prüfzeitpunkt ist dabei direkt nach dem Entstehen des Merkmals bzw. durch die Art der Schnittstelle und dem Zeitpunkt der Zusammenführung dieser Schnittstelle (vgl. *Nicht eindeutig definierte Produktschnittstelle* Kapitel 4.2.2.2 und *Konzipierung auf Prozessebene* Kapitel 4.2.3) gegeben. Die Prüfmerkmale sollen dabei vorzugsweise in einem Prozessschritt zur Prüfung gebündelt werden, um ein (teil-)automatisiertes Prüfen durch ein Prüfmittel in einem Prozessschritt zu ermöglichen. Dazu dient das Prozessmodell, welches im Hauptprozess der Produktionssystemplanung entstanden ist, als Grundlage. In diese Prozessfolge wird dazu ein Prozessschritt eingefügt. Falls im Prozessmodell schon Prüfzeitpunkte, z. B. durch bestehende Produktionsanlagen und zugehörige Prüfmittel eingetragen sind, sind diese entsprechend zu berücksichtigen. Es kann dabei auch ein Prüfzeitpunkt kurz vor Fertigstellung ausgewählt werden, z. B. vor Montage eines Gehäuses (oder Deckel), um die Zugänglichkeit zu den Prüfmerkmalen sicherzustellen. Zur Bestimmung der Prüfzeitpunkte sind dabei wirtschaftliche, organisatorische, strategische und technische Überlegungen mit einzubeziehen.

Die Entscheidung über eine Endprüfung oder eine oder mehrere Zwischenprüfungen sollte vor dem Hintergrund der Prüf- und Ausschusskosten gefällt werden. Eine höhere Anzahl an Zwischenprüfungen verhindert, dass fehlerhafte Elemente fälschlicherweise zum nächsten Arbeitsgang gelangen und damit zusätzliche Produktionskosten verursachen. Dies erhöht allerdings die Prüfkosten. Folgende Kriterien sollten dabei berücksichtigt werden: Kosten der Prüfung, Wertzuwachs des Produktes, Schadensrisiko, Prozessfähigkeit, Kostenstellenwechsel, Arbeitsgänge bei denen mit Produktveränderungen zu rechnen ist, Zugänglichkeit der Prüfstelle am Teil, Totzeit zwischen Merkmalerzeugung und Merkmalsprüfung. [SP15, S. 203]

Sind die (gebündelten) Prüfmerkmale den Prüfzeitpunkten zugeordnet, ergeben sich daraus schon grob die benötigten Prüfmittel. Es kann ein Bündel von Prüfmerkmalen in einem Prozessschritt nun grundsätzlich einem Prüfmittel zugeordnet werden. Dazu ist dem Prüfplan für jedes Prüfmittel eine Spalte hinzuzufügen und in der Spalte *Zu Prüfen* ein X dort einzutragen, wo ein Prüfmerkmal dem jeweiligen Prüfmittel zuzuordnen ist (Bild 4-12). In der Spalte *Prüfumfang* wird dabei der Prüfumfang des Prüfmerkmals durch das jeweilige Prüfmittel eingetragen. Es kann dabei vorkommen, dass das Produkt selbst die Prüfung eines Merkmals übernimmt (z. B. mittels einer Selbstdiagnosefunktion/Selbstprüfungsfunktion/On Board Diagnose usw., vgl. Kapitel 2.4.2 und 2.4.3). In diesem Fall kann eine Spalte für die prüfende Produktfunktion bzw. das entsprechende Systemelement eingefügt werden. Wird eine solche Selbstdiagnosefunktion für Prüfzwecke benutzt, muss dieses unmittelbar an die Produktentwicklung gemeldet werden und ein Verweis zum Prüfplan hergestellt werden. Das Systemmodell bietet sich hierfür an. Im Falle einer Änderung der Selbstdiagnosefunktion am Produkt kann somit die Auswirkung auf die Prüfungen in der Fertigung erkannt werden. Ebenfalls besteht die Möglichkeit, dass die Prüfung eines Merkmals durch ein Prüfmittel in Kombination mit einer Produktfunktion bzw. eines Produktelements (z. B. Aktoren oder Sensoren des Produktes) durchgeführt wird. In diesem Fall werden in die Spalten *Zu Prüfen* des Prüfmittels und der zugehörigen Produktfunktion bzw. des Systemelements des Produktes ein O eingetragen.

Bei High-End-Produkten ist eine Prüfung des Gesamtsystems am Fertigungsende üblich, welche in diesem ersten Durchlauf nun aufgrund der vorliegenden Prüfmerkmale schon konzipiert werden kann. Die Prüfmerkmale können dabei als Anforderungen an das Prüfmittel in dem prüfenden Prozessschritt angesehen werden. Es kann dabei vorkommen, dass ein Prüfmittel zur Prüfung in mehreren Prozessschritten genutzt werden kann. Bei der Darstellung des Prüfplans in Bild 4-12 wird davon ausgegangen, dass die dortigen Prüfmittel entwickelt werden müssen. Außerdem wird davon ausgegangen, dass diese je zu einem Prüfzeitpunkt und nur an einem Prüfort verwendet werden und die Prüfarm erst später in der Prüfmittelentwicklung festgelegt wird. Die Entwicklung eines Prüfmittels ist immer dann zu veranlassen, wenn ein geeignetes Prüfmittel nicht im Unternehmen vorhanden ist und auch nicht über einen Hersteller erworben werden kann bzw. eine Eigenentwicklung von Vorteil ist.

In den Prüfplan können auch vorhandene Prüfmittel eingetragen werden. In diesem Fall sind die Informationen zu den zehn Punkten aus Kapitel 4.2.4.1 einzutragen bzw. Verweise zu diesen. Der Prüfplan ist dementsprechend um diese Spalten zu erweitern.

Der Prüfplan in Bild 4-12 wächst tendenziell mit jedem Durchlauf und ändert sich auch nach Produktionsstart mit der Zeit. Es können z. B. Prüfmerkmale hinzukommen, die sich im Laufe der Zeit, z. B. durch Servicefälle, als sinnvoll zu prüfen herausstellen. Es kann ebenfalls vorkommen, dass Prüfmerkmale – die zu Anfang noch zu 100 % geprüft wurden – später nur noch stichprobenhaft oder gar nicht geprüft werden. Ursache kann z. B. die Erkenntnis sein, dass das entsprechende Prüfmerkmal immer für gut befunden worden ist.

NPB Anforderungen den Prüfmitteln zuordnen

Den NPB Anforderungen werden in diesem Prozessschritt die Prüfmittel, die im vorherigen Prozessschritt *Prüfplan erweitern* festgelegt wurden, zugewiesen. Die NPB Anforderungsliste wird dazu um eine Spalte je Prüfmittel erweitert (Bild 4-13). In die entsprechende Zelle ist für eine Zuordnung ein Kreuz einzutragen.

Nichtprüfmerkmalbezogene Anforderungsliste									
Ersteller Erstelldatum									
Quelle	Nr.	FA/NFA	Anforderung	Bezug zu Systemelement	Kommentar	Prüfmittel Systemprüfung	Prüfmittel Modulprüfung	Prüfmittel Komponentenprüfung	...
SA	1	NFA	NPB Anforderung 1	Gesamtsystem		X			
A	2	NFA	NPB Anforderung 2	Gesamtsystem		X			
PU	3	FA	NPB Anforderung 3	Systemelement 1			X		
SA	4	FA	NPB Anforderung 4	Systemelement 1 & 2			X	X	
			...						

Legende: SA Stakeholderanforderungen A Anforderungen PU Prüfrelevante Unterlage
 FA Funktionale Anforderung NFA Nicht funktionale Anforderung NPB Nichtprüfmerkmalsbezogene

Bild 4-13: Nichtprüfmerkmalsbezogene Anforderungsliste

Anforderungen an Produkt und Produktionssystem ableiten

Auf Basis des erarbeiteten Prüfplans und der NPB Anforderungsliste werden, sofern zu diesem Zeitpunkt schon möglich, Anforderungen an das Produkt oder Produktionssystem abgeleitet und in einer Anforderungsliste festgehalten. Anforderungen sind immer dann abzuleiten, wenn eine Prüfung mit dem aktuellen Entwicklungsstand des Produktes oder Produktionssystems nicht möglich oder zu aufwändig ist. Aus praktischer Sicht kann auch beim Eintrag jedes Prüfmerkmals/jeder Anforderung überlegt werden, ob sich dadurch offensichtlich schon Anforderungen ergeben. Falls in den vorherigen Schritten der Prüfplanung schon Anforderungen an das Produkt oder Produktionssystem offensichtlich wurden, werden diese ebenfalls hier in einer Anforderungsliste gesammelt. Die ermittelten Anforderungen werden in den nächsten Durchlauf eingespeist. Die

Einspeisung ist in Bild 4-5 rechts und Bild 4-14 links mit der sechseckigen *Sprungmarke 31* gekennzeichnet. Die zweite Ziffer gibt die Quelle der Sprungmarke an, in diesem Fall der erste Durchlauf. Die erste Ziffer gibt dabei an, dass es sich um die dritte Sprungmarke handelt. In Bild 4-14 beschreibt dabei die Flussbezeichnung *ES2* die Anforderungen, die an die Produktentwicklung übergeben werden. *ET2* beschreibt die Anforderungen, die an den Hauptprozess der Produktionssystementwicklung übergeben werden.

4.2.4.7 Unterstützung der Prüfmittelentwicklung

In diesem Prozessschritt unterstützt die Prüfplanung (deren Mitarbeiter) die Prüfmittelentwicklung bei der Entwicklung des Prüfmittels (vgl. auch Marker *F* in der Swimlane *Prüfmittelentwicklung* in Bild 4-5). Grundsätzlich sind bei einer Prüfplanung bestimmte Aufgaben durchzuführen (vgl. Kapitel 4.2.4.1). Im Rahmen dieser Arbeit sind diese Aufgaben dabei teilweise der Prüfmittelentwicklung zugeordnet worden. Insbesondere unterstützt die Prüfplanung daher diese Tätigkeiten in der Prüfmittelentwicklung. Dazu zählen:

- Die Festlegung der Prüfanweisung in den *Anwendungsszenarien (PM)* des Prüfmittels
- Die Erstellung des *Morphologischen Kastens (PM)* des Prüfmittels, in dem durch Festlegung der Lösungsalternativen (Teil-)Prüfmittel und Prüfpersonal festgelegt werden, sowie Prüfdatenverarbeitung und Prüfdokumentation
- Die Festlegung von Prüfumfang, Prüfmittel, Prüfort und ggf. weitere Prüfressourcen

4.2.5 Prüfmittelentwicklung – erster Durchlauf

In diesem Kapitel werden die Tätigkeiten der Prüfmittelentwicklung im ersten Durchlauf beschrieben (vgl. dritte Swimlane *Prüfmittelentwicklung* in Bild 4-5). In Kapitel 4.2.5.1 wird zunächst kurz auf die Unterstützung der Produkt- und Produktionssystementwicklung durch die Prüfmittelentwicklung eingegangen. In Kapitel 4.2.5.2 wird die Anforderungsanalyse und die Konzipierung der Prüfmittel auf Systemebene beschrieben.

4.2.5.1 Unterstützung der Produkt- und Produktionssystementwicklung

Die Prüfmittelentwicklung unterstützt die Produkt- und Produktionssystementwicklung, da das Prüfmittel Einfluss auf das Produkt und Produktionssystem haben kann (genauso selbstverständlich andersherum). Die unterstützenden Tätigkeiten sind in Bild 4-5 mit runden, gelben Markierungen dargestellt. Beschrieben werden die unterstützenden Tätigkeiten in den jeweiligen Prozessschritten.

4.2.5.2 Anforderungsanalyse und Konzipierung der Prüfmittel

Auf Basis der in der Prüfplanung ermittelten Prüfmerkmale, der NPB Anforderungen und der identifizierten Prüfmittel kann im ersten Durchlauf mit der Anforderungsanalyse und Konzipierung des oder der identifizierten Prüfmittel auf Systemebene begonnen werden. Die Entwicklung der Prüfmittel selbst folgt dabei wieder dem Vorgehen nach dem V-Modell (vgl. Kapitel 2.3.2 und Bild 2-8). Die Konzipierung wird dabei, wie bei dem Produkt selbst, mit der Spezifikationstechnik CONSENS durchgeführt, wobei das Vorgehen und die benutzten Partialmodelle in weiten Teilen identisch sind (vgl. Kapitel 2.3.3.3). Mit der Konzipierung der Prüfmittel auf Systemebene und der zugehörigen Anforderungsanalyse wird in diesem ersten Durchlauf begonnen. Dies ist in Bild 4-5 dargestellt. Die Konzipierung des Prüfmittels für die Systemprüfung (PM-SP) des Gesamtsystems wird dabei durch einen Prozesspfeil für die Anforderungsanalyse und einen nachfolgenden Prozesspfeil für die Konzipierung selbst dargestellt. Bei den Prüfmitteln für Modulprüfungen kann es mehrere zu konzipierende Prüfmittel geben, z. B. ein Prüfmittel pro Modul. Dies ist durch die drei hintereinander liegenden Prozesspfeile jeweils für die Anforderungsanalyse und die Konzipierung der Prüfmittel für Modulprüfungen (PM-MP) angedeutet. Das Vorgehen bei der Prüfmittelentwicklung unterscheidet sich dabei grundsätzlich nicht. Daher sind die Prozesse Anforderungsanalyse und Konzipierung nachfolgend nur einmal beschrieben.

Die *Anforderungsanalyse* unterteilt sich in die *Umfeldanalyse*, *Beschreibung der Anwendungsszenarien* und *Anforderungsliste erstellen*. Zur Konzipierung zählen das *Aufstellen der Funktionshierarchie*, die *Erstellung des Morphologischen Kastens*, die *Erstellung der Wirkstruktur*, die *Erstellung der Gestalt* und die *Verhaltensbeschreibung*.

Die Eingangsinformationen für die Anforderungsanalyse und Konzipierung des Prüfmittels auf Systemebene (PM-SP) zur Prüfung des gesamten (fertiggestellten) Produktes (auf Systemebene) bilden die Informationsflüsse *CPI*, *API* und *DPI*.

Die Eingangsinformationen für die Anforderungsanalyse und Konzipierung des Prüfmittels auf Modulebene (PM-MP) zur Prüfung der Module des Produktes bilden die Informationsflüsse *CQI*, *AQI*, und *DQI*.

CPI bzw. *CQI* stellt dabei die Prinziplösung des Produktionssystem mit den Partialmodellen *Ressourcen* und *Gestalt* (PS) dar. Diese können herangezogen werden, um das *Umfeldmodell* (PM) und die *Anwendungsszenarien* (PM) des Prüfmittels zu erstellen. *API* bzw. *AQI* stellt die Prinziplösung des Produktes auf Systemebene mit den Modellen *Umfeld* (P) und *Wirkstruktur* (P) dar. Diese können zur Erstellung des Umfeldmodells des jeweiligen Prüfmittels genutzt werden. *DPI* bzw. *DQI* stellt den in der Prüfmittelentwicklung erarbeiteten *Prüfplan* und die *NPB Anforderungsliste* dar.

Die Phasen Anforderungsanalyse und Konzipierung des Prüfmittels innerhalb dieses ersten Durchlaufs stellen mit ihren Zwischenschritten keine stringente Abfolge dar, sondern können auch Iterationen beinhalten. Insbesondere aufgrund der Anwendungsszenarien, die beim Prüfmittel auch die Prüfanweisungen beinhaltet, wird empfohlen bei

der Anforderungsanalyse und Konzipierung des Prüfmittels die Phasen mindestens zweimal zu durchlaufen. Die Prüfplanung unterstützt bei den Prozessschritten Anforderungsanalyse und Konzipierung (vgl. Kapitel 4.2.4.7 und Marker *F* in der Swimlane *Prüfmittelentwicklung* in Bild 4-5).

Während der Prüfmittelentwicklung können ggf. schon Wechselwirkungen zu anderen Unternehmensbereichen bzw. Funktionsbereichen identifiziert werden. Insbesondere Wechselwirkungen zum Produkt aber auch zum Produktionssystem sind im Rahmen dieser Arbeit von Bedeutung. Diese Wechselwirkungen werden kontinuierlich dokumentiert. Aus diesen dokumentierten Wechselwirkungen werden am Ende jeden Durchlaufes Anforderungen an die Produktentwicklung (an das Produkt), die Produktionssystementwicklung (das Produktionssystem) und weitere Funktionsbereiche abgeleitet. Sind während der Konzipierung/Entwicklung des Prüfmittels schon Anforderungen an die Produktentwicklung, die Produktionssystementwicklung oder andere Funktionsbereiche direkt erkennbar, so sollen diese direkt dokumentiert werden.

Umfeldanalyse

Ein Prüfmittel simuliert oftmals in weiten Teilen das Umfeld des Prüflings während der späteren Nutzung (vgl. Kapitel 2.4.2 und Kapitel 2.4.3). Daher ist zur Modellierung des *Umfelds (PM)* des *Prüfmittels (PM-SP)* für das Gesamtsystem, das *Umfeldmodell (P)* des Produktes heranzuziehen. Die Flüsse des Produktumfeldes sind zu analysieren und die Flüsse zum Prüfmittel zu modellieren, die für sinnvoll erachtet werden. Bei den gewollten Flüssen des Produktes können z. B. Kommunikationsschnittstellen, Energieversorgung und Sensoren durch das Prüfmittel simuliert werden. Störflüsse des *Umfeldmodells (P)* des Produktes werden dabei oftmals zu gewollten Flüssen im *Umfeldmodell (PM)* des Prüfmittels. Ist z. B. im *Umfeldmodell (P)* des Produktes eine Temperatureinwirkung störend auf das Produkt modelliert, kann diese Temperatureinwirkung durch das Prüfmittel gewollt nachgebildet werden, um diese Temperatureinwirkung während einer Prüfung gezielt zu simulieren. Zur besseren Beschreibung der Schnittstellen zwischen Prüfmittel und Produkt kann ggf. auf die *Grobgestalt (P)* des Produktes zurückgegriffen werden.

Bei der Erstellung des *Umfeldmodells (PM)* des *Prüfmittels für Modulprüfungen (PM-MP)* ist genauso vorzugehen. Dabei ist zusätzlich die Wirkstruktur hinzuzuziehen. Aus Sicht des einzelnen Moduls des Produktes stellt die Wirkstruktur das Umfeld des Moduls dar.

Aus den Partialmodellen *Ressourcen* und *Gestalt (PS)* des Produktionssystems können Informationen zur Erstellung des *Umfeldes (PM)* des Prüfmittels übernommen werden, insbesondere wenn zu diesem Zeitpunkt schon geklärt ist, wo das Prüfmittel aufgestellt wird und welche Ressourcen sich in unmittelbarer Nähe befinden. Es können daraus relevante Material-, Energie-, Informations-, und Störflüsse abgeleitet werden. Grundsätzlich gliedert sich das Prüfmittel in die Gestalt des Produktionssystems mit ein. Der Prüfzeitpunkt und auch der Prüfort können sich generell in der Prüfmittelentwicklung

noch (geringfügig) ändern. An der Stelle der Umfeldmodellierung kann dies dabei insbesondere durch das betrachtete Umfeld des Prüflings der Fall sein.

Beschreibung der Anwendungsszenarien

Grundsätzlich spezifizieren Anwendungsszenarien in welcher Art und Weise sich ein System (in diesem Fall ein Prüfmittel) in einem Zustand und einer bestimmten Situation verhalten soll und in welcher Art und Weise aufgrund welcher Ereignisse Zustandsübergänge stattfinden sollen. Dabei beschreiben die Anwendungsszenarien auch die Interaktion mit dem Benutzer. Der Hauptnutzer ist in diesem Fall das Prüfpersonal. In den Anwendungsszenarien der Prüfmittel wird dabei die Interaktion des Prüfpersonals mit dem Prüfmittel und dem Prüfling (Produkt) spezifiziert. Interaktion kann in diesem Fall zum einen bedeuten, dass das Prüfmittel bedient wird (z. B. Einschalten) oder dass einzelne Prüfmerkmale durch das Prüfpersonal händisch geprüft werden. Insbesondere in dem Fall, in dem Prüfungen durch das Prüfpersonal durchgeführt werden, wird das Prüfpersonal aus Sicht der Konzipierung als Teil des Prüfmittels angesehen. Es besteht also aus Sicht der Konzipierung die Möglichkeit, dass einzelne Funktionen (Prüfen von Prüfmerkmalen) entweder durch Prüfpersonal oder einen Anlagenteil des Prüfmittels erfüllt werden. Diese beiden Möglichkeiten stellen Lösungsalternativen dar, die später im Morphologischen Kasten zunächst gegeneinander abgewogen werden sollen.

Um den Lösungsraum der weiteren Konzipierung an dieser Stelle nicht einzuschränken, sollen beim erstmaligen Definieren der Anwendungsszenarien daher nur die Szenarien mit Interaktion eines Nutzers (i.d.R. Prüfpersonal) definiert werden, von denen klar ist, dass sie auf jeden Fall vom Nutzer ausgeführt werden sollen. Ein Beispiel wäre, wenn explizit die händische Prüfung eines Merkmals vorgesehen werden soll. Ist die Konzipierung innerhalb des ersten Durchlaufs einmal durchlaufen, sollen – durch diesen Umstand hervorgerufen – alle Schritte der Anforderungsanalyse und Konzipierung des Prüfmittels mindestens noch einmal durchlaufen werden, um zum einen die Konsistenz aller Partialmodelle sicherzustellen, und um zum anderen die Anwendungsszenarien konsistent zur ausgewählten Lösung zu komplettieren. Die Anwendungsszenarien, die eine Interaktion des Prüfmittels und des Prüflings im Sinne der auszuführenden Prüfungen beschreiben, sind dabei die Prüfanweisungen (vgl. Kapitel 4.2.4.1 – Zuordnung der Aufgaben der Prüfplanung zu den Prozessschritten – 9. Prüfanweisung).

Erstellung der Anforderungsliste

Aus dem Umfeldmodell und den Anwendungsszenarien werden nun Anforderungen abgeleitet und in einer Anforderungsliste dokumentiert. Es wird dabei wieder in funktionale und nicht funktionale Anforderungen unterschieden. In diese Anforderungsliste werden die NPB Anforderungen (vgl. Bild 4-13) und die Prüfmerkmale (vgl. Bild 4-12) in Form von Anforderungen integriert, so dass eine Anforderungsliste für ein Prüfmittel vorliegt. In der Anforderungsliste sind den Anforderungen verschiedene Eigenschaften zugeordnet. Dazu zählen: Quelle der Anforderung, funktionale/nicht funktionale Anforderung, Prüfmerkmal/kein Prüfmerkmal, Bezug zu den Modulen des Produktes (Prüf-

lings). Es können darüber hinaus unternehmens- und projektspezifisch weitere Eigenschaften zugeordnet werden. Es liegen somit nun alle zu diesem Zeitpunkt bekannten Anforderungen mit relevanten Zusatzinformationen an das jeweils zu entwickelnde Prüfmittel in einem Dokument vor. Die Anforderungsliste an das jeweilige Prüfmittel stellt dabei den wesentlichen Ausgangspunkt zur Konzipierung und Entwicklung des Prüfmittels dar. Alternativ zur Sammlung aller Anforderungen an ein Prüfmittel in einem Dokument kann auch in den vorhandenen Listen (NPB Anforderungen, Prüfmerkmale, Anforderungen) definiert werden, welche NPB Anforderungen, welche Prüfmerkmale und welche Anforderungen, die aus Umfeldmodell und Anwendungsszenarien abgeleitet wurden, für das jeweilige Prüfmittel gelten sollen. Damit ist der Prozessschritt *Anforderungsanalyse PM* in Bild 4-5 abgeschlossen.

Aufstellen der Funktionshierarchie

Mit dem Aufstellen der Funktionshierarchie beginnt die Konzipierung des Prüfmittels. Dazu werden aus allen funktionalen Anforderungen der Anforderungsliste Funktionen gebildet. Die Funktionen sind danach hierarchisch zu gliedern. Gegebenfalls werden weitere Funktionen ergänzt, um eine hierarchische Struktur zu erhalten. Vorteilhaft bei der Strukturierung einer Funktionshierarchie eines Prüfmittels ist dabei die Unterteilung in Funktionen, die sich auf Prüfungen beziehen und Funktionen, die sich nicht auf eine Prüfung beziehen, also unterstützend wirken (z. B. Sensoren justieren oder Prüfdaten abspeichern). Soll das Prüfmittel selbst modular aufgebaut werden, um z. B. eine Erweiterung für einen steigenden Durchsatz zu ermöglichen, so ist die Art der Strukturierung der Funktionshierarchie von besonderer Bedeutung. Die Funktionshierarchie soll in diesem Fall die modulare Struktur des Produktes und ebenfalls die modulare Struktur des Prüfmittels berücksichtigen. Es ergibt sich in dem Fall eine Art *3-dimensionale Funktionshierarchie*. Die genaue Vorgehensweise dabei wird im Anwendungsbeispiel beschrieben (vgl. Kapitel 5.3.4.4).

Erstellung des Morphologischen Kastens

Im Morphologischen Kasten²⁴ werden alle Funktionen in der Struktur eingetragen, wie sie in der Funktionshierarchie strukturiert wurden. Daraus kann sich der Funktionshierarchie folgend eine Art 3-dimensionaler Morphologischer Kasten ergeben (vgl. Anwendungsbeispiel, Kapitel 5.3.4.5). Den Funktionen werden nun Lösungsalternativen zugeordnet. Lösungsalternativen zur Erfüllung einer Funktion können dabei Lösungsmuster²⁵, Wirkprinzipien bzw. Muster der Informationsverarbei-

²⁴ Ein Morphologischer Kasten wird zum Erarbeiten von Gesamtlösungen aus mehreren Teillösungen genutzt. Er wird dazu als Kombinationshilfe zur Kombination von Teillösungen herangezogen. (vgl. dazu [PBF+07, S. 145ff., S. 159ff., S. 256f.] und [Zwi71])

²⁵ Ein (Lösungs-)Muster beschreibt ein wiederkehrendes Problem und den Kern der Lösung für dieses Problem. Gemeint sind z. B. Struktur und Verhalten der charakteristischen Elemente möglicher Lösungen in verallgemeinerter Form. [AIS+77], [GFD+08a], [GAC+13], [FGK+04]

tung²⁶, Lösungselemente²⁷ aber auch Mitarbeiterrollen in Form von (unterschiedlich qualifiziertem) Prüfpersonal sein. Prüfpersonal kann somit Funktionen des Prüfmittels mit übernehmen. Es wird dadurch möglich gezielt zwischen händischer und automatisierter Lösung abzuwägen. Lösungsalternativen können dabei im Morphologischen Kasten eine Gestalt besitzen. Die eingetragenen Funktionen im Morphologischen Kasten beinhalten auch die Prüfmerkmale. Dadurch wird im Morphologischen Kasten die Prüffart zugeordnet (vgl. Prüfplanungsaufgabe 4 in Kapitel 4.2.4.1). Es werden nun Kombinationen aus den im Morphologischen Kasten enthaltenen Lösungsalternativen gebildet, auch Pfade genannt. Es stehen nun unterschiedliche Kombinationsmöglichkeiten (Pfade) zur Verfügung (vgl. [PBF+07, S. 159ff.]). Anhand der nicht funktionalen Anforderungen wird die bestmögliche Kombination ausgewählt. Dazu kann eine Nutzwertanalyse (vgl. z. B. [PBF+07, S. 166ff.]) herangezogen werden. Die nicht funktionalen Anforderungen stellen dabei die Bewertungskriterien dar.

Hinweis: Erste Abschätzungen über Eigenschaften der Gesamtlösung des zu entwickelnden Prüfmittels können anhand des Morphologischen Kastens durchgeführt werden. Zur Abschätzung von z. B. Taktzeiten/Durchlaufzeiten und Kosten des Prüfmittels kann den einzelnen Lösungsalternativen zur Erfüllung einer Funktion jeweils Zeit und Kosten zugeordnet werden. Durch die Summe der einzelnen Kosten und der einzelnen Zeiten anhand des ausgewählten Pfades ergeben sich die abgeschätzten Gesamtkosten und die Taktzeit/Durchlaufzeit.

Erstellung der Wirkstruktur

Die ausgewählten Lösungsalternativen, die den am besten bewerteten Pfad durch den Morphologischen Kasten darstellen, werden nun zu einer Wirkstruktur weiterentwickelt, die konsistent zum Umfeldmodell des Prüfmittels ist. Dazu werden aus den Lösungsalternativen Systemelemente gebildet und mithilfe von Flussbeziehungen miteinander und den Umfeldelementen des Umfeldmodells verbunden. Die Wirkstruktur ist somit in das Umfeldmodell integriert.

²⁶ Wirkprinzipien und Muster der Informationsverarbeitung sind als Klassen von Lösungsmustern zu verstehen. Wirkprinzipien basieren auf physikalischen Effekten und sind im Maschinenbau und der Elektrotechnik bekannt (vgl. z. B. [PBF+07]). Funktionen werden durch ein Wirkprinzip erfüllt. Ein Beispiel aus dem Maschinenbau ist die Vergrößerung der Kraft durch einen Hebel. Muster der Informationsverarbeitung werden in der Regel durch Softwarekomponenten erfüllt (Ausnahme bilden dabei Muster der Regelungstechnik. Diese können auch mechanisch realisiert werden). [GFD+08a], [GAC+13], [FGK+04], [PBF+07]

²⁷ Als Lösungselement ist eine realisierte und bewährte Lösung wie z. B. eine Baugruppe, Module, Bauteil, Softwarekomponente/ Softwarebibliotheken zu verstehen, die zur Erfüllung einer oder mehrerer Funktionen des Gesamtsystems genutzt werden können. Lösungselemente beruhen dabei auf einem oder mehreren Lösungsmustern. [GAC+13], [FGK+04]

Erstellen der Grobgestalt

Aus den im Morphologischen Kasten ausgewählten Lösungsalternativen werden die (wesentlichen) gestaltbehafteten Elemente ausgewählt und zu einer groben Gestalt unter Beachtung der Anforderungen zusammengefügt. Beim Prüfmittel bietet es sich dabei an in der Gestalt den oder die Prüflinge mit einzuzeichnen. Das Ergebnis ist die Grobgestalt des Prüfmittels.

Verhaltensbeschreibung

Das Verhalten des Prüfmittels kann mit Zustands- und Ablaufdiagrammen beschrieben werden. Dabei ist das Verhalten konsistent zu den vorher erstellten Modellen zu modellieren. Anwendungsszenarien und Funktionen bilden dabei die wesentliche Ausgangsbasis der Verhaltensmodellierung.

Insbesondere wird an dieser Stelle die Prüfreihefolge bestimmt, also die Reihenfolge in der die ermittelten Prüfmerkmale geprüft werden. In diesem Zusammenhang wird auch von Prüfschritten gesprochen. Es ist dabei vorteilhaft die Reihenfolge der Prüfschritte so festzulegen, dass möglichst wenig Schaden im Falle eines oder mehrerer Fehler (oftmals Fehlfunktion/-en) des Prüflings am Prüfling selbst und besonders am Prüfmittel selbst entsteht. Weiterhin kann es vorteilhaft sein die Reihenfolge so festzulegen, dass die Prüfschritte – bei denen am ehesten ein Fehler zu erwarten ist – zuerst geprüft werden (vgl. sinngemäß auch [Wes91]). In dem Fall kann die weitere Prüfung abgebrochen werden und so unnötige Prüfzeit eingespart werden. Der Abbruch ist dabei an Kriterien gebunden.

Die Verhaltensbeschreibung muss nicht zwangsweise schon im ersten Durchlauf durchgeführt werden. Zur groben ersten Konzipierung und zum Ableiten der ersten groben Anforderungen an das Produkt können die anderen entstandenen Partialmodelle ausreichen. Aufwand kann dadurch vermieden werden. Ist zu erkennen, dass sich durch die Verhaltensbeschreibung wesentliche Wechselwirkungen zum Produkt ergeben, die durch die Produktentwicklung frühzeitig berücksichtigt werden müssen, können auch nur Teile des Verhaltens modelliert werden. Mit der Beschreibung des Verhaltens ist die eigentliche Konzipierung des Prüfmittels beendet.

Ableiten von Anforderungen an andere Unternehmens-/Funktionsbereiche

Am Ende der Prüfmittelentwicklung jeden Durchlaufs werden aus den dort entstandenen Entwicklungsartefakten Anforderungen an andere Unternehmensbereiche/Funktionsbereiche abgeleitet, dabei insbesondere an die Produktentwicklung (an das Produkt) aber auch an andere Funktionsbereiche wie z. B. (den Hauptprozess der) Produktionssystementwicklung (an das Produktionssystem). Zudem werden Anforderungen aus den während der Prüfmittelentwicklung dokumentierten Wechselwirkungen abgeleitet. Diese Anforderungen sind im nächsten Durchlauf in die entsprechenden Funktionsbereiche einzuspeisen. Sie sind in Bild 4-5 mit den sechseckigen Sprungmarkern 11 und 21 gekennzeichnet. Diese Sprungmarker befinden sich am Ende jeden Durchlaufs. Die erste Ziffer nummeriert fortlaufend die Sprungmarker am Ende des

jeweiligen Durchlaufs. Die zweite Ziffer gibt dabei jeweils den Durchlauf an, von dem die Sprungmarke ausgeht – in diesem Fall dem ersten Durchlauf. Die Sprungmarke ist im jeweils nächsten Durchlauf, in diesem Fall dem zweiten, als Eingangsinformation dargestellt (vgl. Bild 4-14).

Die Anforderungen sind je Prüfmittel zu ermitteln. Dabei sind diese zu unterteilen in Anforderungen an die Produktentwicklung, an die Produktionssystementwicklung und ggf. weitere Unternehmens- bzw. Funktionsbereiche. Die Anforderungen sind im nächsten Durchlauf, in diesem Fall dem zweiten, wieder mit Flussbezeichnungen gekennzeichnet, vgl. Bild 4-14. Die Anforderungen vom Prüfmittel zur Systemprüfung (PM-SP) an das Produkt sind mit *FS2* gekennzeichnet. Die Anforderungen vom Prüfmittel zur Modulprüfung (PM-MP) an das Produkt sind mit *GS2* gekennzeichnet. Die Anforderungen vom Prüfmittel zur Systemprüfung (PM-SP) an das Produktionssystem sind mit *FT2* gekennzeichnet. Die Anforderungen vom Prüfmittel zur Modulprüfung (PM-MP) an das Produktionssystem sind mit *GT2* gekennzeichnet.

Das Ableiten der Anforderungen aus dem erstellten Gesamtkonzept des Prüfmittels erfolgt dabei wie folgt in zwei Schritten:

- Das Produktkonzept des Prüfmittels wird analysiert. Dazu werden zunächst alle Funktionen des Prüfmittels mit ihren ausgewählten funktionserfüllenden Lösungselementen analysiert. Es wird dabei analysiert ob die jeweilige Funktion eine Wechselwirkung zum Produkt, zum Produktionssystem oder ggf. einem anderen Unternehmensbereich/Funktionsbereich hat. Weiterhin wird das Umfeldmodell des Prüfmittels hinsichtlich Wechselwirkungen analysiert.
- Aus den identifizierten Wechselwirkungen werden nun Anforderungen abgeleitet. Diese werden in einer oder mehreren Anforderungslisten, sortiert nach Ziel der Anforderung, zusammengetragen. Die Anforderungen können dann den jeweiligen Funktionsbereichen, z. B. Produktentwicklung oder Produktionssystementwicklung, übergeben werden.

Die ggf. schon während der Konzipierung/Entwicklung des Prüfmittels erkannten Anforderungen an die Produktentwicklung, die Produktionssystementwicklung oder andere Funktionsbereiche sind in an dieser Stelle zu ergänzen.

Am Ende des ersten Durchlaufs ist Meilenstein *M1* erreicht (vgl. Bild 4-5). Das Produkt liegt als erster Prototyp in Form des Labormusters vor. Eine erste Beschreibung des Produktionssystems, die integrativ zum Produkt erstellt wurde, liegt mit einer dokumentierten Prozessfolge, den zugehörigen Ressourcen und der Gestalt (Layoutplan) vor. In die drei Modelle des Produktionssystems ordnen sich auch das bzw. die Prüfmittel ein. Konsistent zum Produktkonzept auf Systemebene und der ersten Beschreibung des Produktionssystems ist eine Prüfplanung durchgeführt worden. Auf Basis der Prüfplanung wurde ein erstes Prüfmittel für Prüfungen des Gesamtsystems (PM-SP) und Prüfmittel für einzelne Module (PM-MP) konzipiert. Diese zum Produkt und Produktionssystem konsistenten Konzepte

liegen zum Meilenstein *M1* ebenfalls vor. Anforderungen an die Produktentwicklung, den Hauptprozess der Produktionssystementwicklung und ggf. weitere Funktionsbereiche/Unternehmensbereiche sind abgeleitet worden. Diese liegen ebenfalls zum Meilenstein *M1* vor und werden in den nächsten Zyklus (Bild 4-14) übergeben.

4.2.6 Zweiter Durchlauf des Referenzprozesses

In diesem Kapitel wird der zweite Durchlauf des integrativen Entwicklungsprozesses beschrieben. Da das Vorgehen weitestgehend gleich dem des ersten Durchlaufs ist, werden nur die Abweichungen zu dem ersten Durchlauf beschrieben.

Überblick über den zweiten Durchlauf des Referenzprozesses

Die Gesamtübersicht über den zweiten Durchlauf des integrativen generischen Entwicklungsprozesses ist in Bild 4-14 dargestellt. Er detailliert dabei den in Bild 4-4 dargestellten Gesamtprozess zwischen den Meilensteinen *M1* und *M2*. Ziel des zweiten Durchlaufs ist die Erreichung des Meilensteins *M2*, wobei zu diesem Zeitpunkt verschiedene Ergebnisse der vier Funktionsbereiche (vier Swimlanes) vorliegen sollen. Das Produkt soll als zweiter Prototyp in Form des Funktionsmusters vorliegen. Die Beschreibung des Produktionssystems wird integrativ zur Produktentwicklung aktualisiert. Konsistent zum Produktkonzept auf Modulebene und der Beschreibung des Produktionssystems sollen die weiter detaillierteren Ergebnisse der Prüfplanung vorliegen. Die Detaillierung ist dabei durch das Produktkonzept möglich, welches nun auf Modulebene die Ausgangsbasis für die Prüfplanung bildet (anstatt auf Systemebene im ersten Durchlauf). Die Prüfplanung bildet dabei wieder das wesentliche Bindeglied zwischen der Produktentwicklung und dem Hauptprozess der Produktionssystementwicklung auf der einen Seite und der Prüfmittelentwicklung auf der anderen Seite. Auf Basis der detaillierteren Prüfplanung soll das Prüfmittel des Gesamtsystems (PM-SP) weiter detailliert werden. Die bereits aus dem ersten Durchlauf bekannten Prüfmittel für einzelne Module (PM-MP) werden weiter detailliert. Durch die Analyse des Produktes auf Modulebene ist der Beginn der Entwicklung mancher Prüfmittel zur Prüfung von (Sub)Modulen in diesem Durchlauf möglich, die im Durchlauf zuvor auf Systemebene des Produktes noch nicht sichtbar waren. Anforderungen an die Produktentwicklung, den Hauptprozess der Produktionssystementwicklung und ggf. weitere Funktionsbereiche liegen zum Meilenstein *M2* ebenfalls wieder vor (wie beim ersten Durchlauf) und können von dort in den nächsten Durchlauf eingespeist werden (vgl. Sprungmarken 12, 22, 32 rechts in Bild 4-14, links in Bild 4-15).

Zu Beginn des zweiten Durchlaufs werden die Anforderungen aus dem ersten Durchlauf mit in die entsprechenden Funktionsbereiche mit aufgenommen (vgl. Bild 4-14 Flussbezeichner *FS2*, *FT2*, *GS2*, *GT2*, *ES2* und *ET2*).

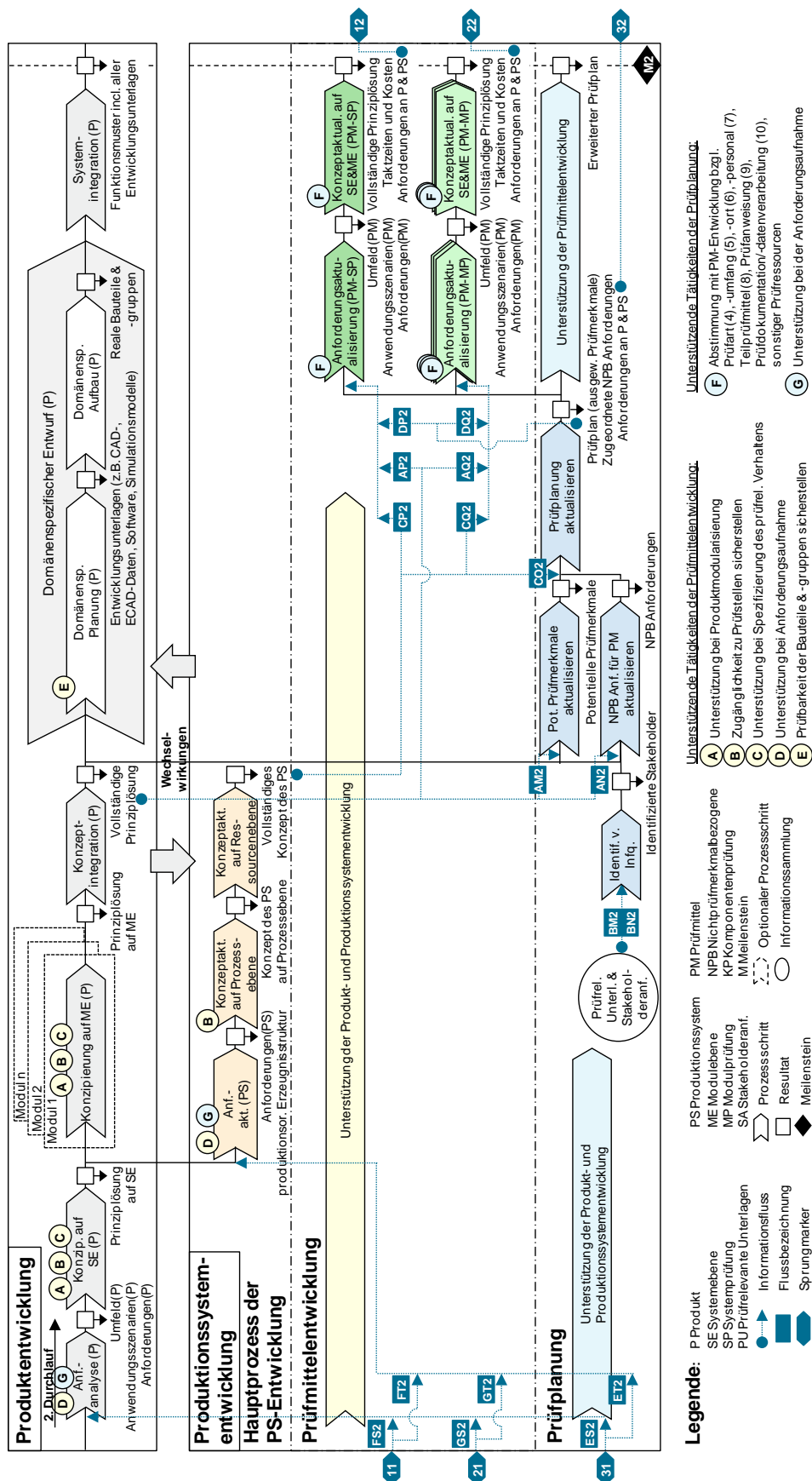


Bild 4-14: Integrativer Produkt- und Prüfmittelentwicklungsprozess – 2. Durchlauf

Produktentwicklung – zweiter Durchlauf

Die Produktentwicklung geht wie im ersten Durchlauf vor (vgl. Kapitel 4.2.2). Sie orientiert sich dabei wieder an dem Vorgehen der Spezifikationstechnik CONSENS und dem V-Modell der Produktentstehung (vgl. Kapitel 2.3.3.3, Kapitel 2.3.2 und [Gau10], [GFD+09], [VDI2206]). Die Spezifikation wird wieder mit Hilfe der Spezifikationstechnik CONSENS durchgeführt bzw. überarbeitet. Es werden dabei die Anforderungen aus dem ersten Durchlauf mit aufgenommen. Diese Anforderungen sind anhand der Flussbezeichner *FS2*, *GS2* und *ES2* in Bild 4-14 auf der linken Seite dargestellt. Der Flussbezeichner *FS2* stellt dabei die Anforderungen an das Produkt dar, die aus der Konzipierung des Prüfmittels für Prüfungen des Gesamtsystems (PM-SP) resultieren. Der Flussbezeichner *GS2* stellt die Anforderungen an das Produkt dar, die aus der Konzipierung des Prüfmittels für Prüfungen der Module (PM-MP) resultieren. Der Flussbezeichner *ES2* stellt die Anforderungen an das Produkt dar, die aus der Prüfplanung resultieren. Die Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung unterstützt bei der prüfmittelgerechten Anforderungsaufnahme, insbesondere bei der Integration der genannten Anforderungen (vgl. Marker *D* und *G* bei der Anforderungsanalyse (P) in Bild 4-14). Zu Beginn der Produktentwicklung können auch weitere bzw. geänderte Anforderungen gegenüber dem ersten Durchlauf an das Produkt aus anderen Bereichen mit einfließen (Typisch sind z. B. Anforderungen aus den Bereichen Vertrieb, Produktmanagement, praxisnahe Erprobung des Produktes).

Hauptprozess der Produktionssystementwicklung – zweiter Durchlauf

Der Hauptprozess der Produktionssystementwicklung entspricht grundsätzlich dem Vorgehen des ersten Durchlaufs (vgl. Kapitel 4.2.3). Bei den durchzuführenden Prozessschritten handelt es sich dabei um eine Aktualisierung. Es werden die Anforderungen aus dem ersten Durchlauf mit aufgenommen. Diese Anforderungen sind anhand der Flussbezeichner *FT2*, *GT2* und *ET2* in Bild 4-14 auf der linken Seite dargestellt. Der Flussbezeichner *FT2* stellt dabei die Anforderungen an das Produktionssystem dar, die aus der Konzipierung des Prüfmittels für Prüfungen des Gesamtsystems (PM-SP) resultieren. Der Flussbezeichner *GT2* stellt die Anforderungen an das Produktionssystem dar, die aus der Konzipierung des Prüfmittels für Prüfungen der Module (PM-MP) resultieren. Der Flussbezeichner *ET2* stellt die Anforderungen ans Produktionssystem dar, die aus der Prüfplanung resultieren. Die Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung unterstützt bei der prüfmittelgerechten Anforderungsaufnahme, insbesondere bei der Integration der genannten Anforderungen (vgl. Marker *D* und *G* bei der Anforderungsaktualisierung (PS) in Bild 4-14).

Vorgehen der Prüfplanung – zweiter Durchlauf

Das Vorgehen bei der Prüfplanung im zweiten Durchlauf entspricht grundsätzlich dem Vorgehen aus dem ersten Durchlauf (vgl. Kapitel 4.2.4). Dabei werden alle bisher erarbeiteten Dokumente erweitert. Ausgangsbasis für die Prüfplanung im zweiten Durchlauf ist dabei das Produktkonzept auf Modulebene (und nicht wie im ersten Durchlauf auf

Systemebene). Dies ist durch die beiden Informationsflüsse mit den Bezeichnern *AM2* und *AN2* in Bild 4-14 dargestellt (entsprechend den Bezeichnern *AM1* und *AN1* im ersten Durchlauf). Durch die Prüfplanung auf Basis der Spezifikation des Produktes auf Modulebene werden nun Produktinformationen von (Sub-)Modulen zusätzlich sichtbar, die im ersten Durchlauf nicht sichtbar waren. Diese Informationen der nun zusätzlich sichtbaren (Sub-)Module tragen wesentlich zur Erweiterung des Prüfplans und der NPB Anforderungsliste bei.

Die Flussbezeichner *BM2* und *BN2* entsprechen den Flussbezeichnern *BM1* und *BN1* des ersten Durchlaufs. Dabei werden, falls vorhanden, neu dazugekommene Informationsquellen berücksichtigt.

Prüfmittelentwicklung – zweiter Durchlauf

Das Vorgehen bei der Prüfmittelentwicklung im zweiten Durchlauf entspricht grundsätzlich dem Vorgehen des ersten Durchlaufs (vgl. Kapitel 4.2.5). Dabei werden alle bisher erarbeiteten Dokumente aktualisiert. Die Konzipierung von Prüfmitteln für (Sub-)Module (PM-MP), die nun auf Modulebene der Produktspezifikation sichtbar sind, wird an dieser Stelle begonnen. Analog zu den Informationsflüssen des ersten Durchlaufs gehen in die Prüfmittelentwicklung die Flüsse für den zweiten Durchlauf ein. Geringfügiger Unterschied besteht bei den Flüssen mit der Bezeichnung *AP2* und *AQ2*. Sie gehen vom Produktkonzept auf Modulebene aus, anstatt von der Produktkonzeption auf Systemebene.

Am Ende des zweiten Durchlaufs ist Meilenstein *M2* erreicht (vgl. Bild 4-14). Das Produkt liegt als zweiter Prototyp in Form des Funktionsmusters vor. Die bearbeitete bzw. aktualisierte Beschreibung des Produktionssystems, die integrativ zum Produkt erstellt wurde, liegt mit einer dokumentierten Prozessfolge, den zugehörigen Ressourcen und der Gestalt (Layout) vor. Konsistent zum Produktkonzept auf Modulebene und der Beschreibung des Produktionssystems ist eine Prüfplanung durchgeführt worden. Auf Basis der Prüfplanung liegen Spezifikationen der Prüfmittel für Prüfungen des Gesamtsystems (PM-SP) und Prüfmittel für alle zu prüfenden einzelnen Module (PM-MP) vor. Die Spezifikation der Prüfmittel ist dabei je eine vollständige Prinzipiellösung auf Modulebene. Anforderungen an die Produktentwicklung, den Hauptprozess der Produktionssystementwicklung und ggf. weitere Funktionsbereiche sind abgeleitet worden. Diese liegen ebenfalls zum Meilenstein *M2* vor und werden dem nächsten Durchlauf (Bild 4-15) übergeben.

4.2.7 Dritter Teilprozess des Referenzprozesses

In diesem Kapitel wird der dritte Durchlauf des integrativen Entwicklungsprozesses beschrieben. Es gibt in diesem Durchlauf des Referenzprozesses optional zu durchlaufende Prozessschritte. Das Vorgehen entspricht dennoch weitestgehend dem des ersten und zweiten Durchlaufs. Daher werden wieder nur die wesentlichen Abweichungen zu diesen Durchläufen beschrieben.

Überblick über den dritten Durchlauf des Referenzprozesses

Die Gesamtübersicht über den dritten Durchlauf des integrativen generischen Entwicklungsprozesses ist in Bild 4-15 dargestellt. Es detailliert dabei den in Bild 4-4 dargestellten Gesamtprozess zwischen den Meilensteinen *M2* und *M3*. Zu Beginn des dritten Durchlaufs sind die Entwicklungen der Prüfmittel für Prüfungen des Gesamtsystems (PM-SP) und der Module (PM-MP) bereits fortgeschritten. Die Entwicklung von Prüfmitteln zur Prüfung von Komponenten ist in der Regel noch nicht begonnen. Zu Beginn des dritten Durchlaufs werden die Anforderungen aus dem zweiten Durchlauf mit in die entsprechenden Funktionsbereiche mit aufgenommen (vgl. Bild 4-15 Flussbezeichner *FS3*, *FT3*, *GS3*, *GT3*, *ES3* und *ET3*). Es gibt mehrere Optionen den dritten Durchlauf zu durchlaufen. Die optionalen Prozessschritte sind dabei in Bild 4-15 gestrichelt gekennzeichnet.

Bei der **ersten Möglichkeit** handelt es sich um die Minimalversion dieses Durchlaufs. Es werden dabei keine Prozessschritte der Prüfplanung und der Prüfmittelentwicklung durchlaufen (mit Ausnahme unterstützender Tätigkeiten). Im Hauptprozess der Produktionssystemplanung wird eine Konzeptaktualisierung durchgeführt, der domänenspezifische Entwurf wird jedoch nicht begonnen. In diesem Fall liegt zum Meilenstein *M3* ein Produktprototyp in Form des Vorserienproduktes vor und ein überarbeitetes Produktionssystemkonzept.

Es gibt Gründe dafür diese Möglichkeit zu wählen. Diese können sein: Die verfügbaren Daten aus der Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung sind denen, die im nächsten Durchlauf als Grundlage für die Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung als Grundlage dienen, sehr ähnlich. Es steht im nächsten Durchlauf das Vorserienprodukt selbst zur Verfügung und der Reifegrad der Entwicklungsdokumente ist ggf. durch interne Entwicklungsschleifen innerhalb des dritten Durchlaufs etwas höher. Um Aufwand zu vermeiden, kann daher ggf. auf die optionalen Prozessschritte in diesem Durchlauf verzichtet werden, aufgrund der ähnlichen Entwicklungsunterlagen. Dies setzt voraus, dass die Prüfmittel trotzdem noch termingerecht fertig gestellt werden können. Des Weiteren werden in den optionalen Prozessen der Prüfmittelentwicklung die Prüfmittelentwicklung für Prüfmittel zur Prüfung von Komponenten (PM-KP) begonnen. Prüfmittel für Komponenten sind oftmals Standardprüfmittel bzw. bestehende Prüfmittel, die adaptiert werden können. Zudem sind Prüfmittel für Komponenten u.a. aus diesen Gründen oftmals tendenziell mit weniger Aufwand zu entwickeln wie z. B. Prüfmittel für ein Gesamtsystem. Daher wird es in vielen Fällen ausreichen mit der

Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung für Komponenten erst in dem vierten Durchlauf zu beginnen. Ein Beispiel für ein Standardprüfmittel für eine Komponente könnte z. B. ein Messschieber sein.

Die **zweite Möglichkeit** kann unterschiedlich ausgeprägt werden. Es wird dabei eine Prüfplanung durchgeführt. Basis dafür ist die vollständige Prinziplösung des Produktes auf Modulebene und zusätzlich die Entwicklungsunterlagen des Produktes aus dem domänenspezifischen Entwurf. Der domänenspezifische Entwurf der Produktionssystementwicklung kann ebenfalls als Grundlage der Prüfplanung dienen. Aufbauend auf die Prüfplanung kann entweder mit der Entwicklung bzw. deren Aktualisierung aller Prüfmittel fortgefahren werden oder auch nur mit einzelnen Prüfmitteln. Beispielsweise könnte in der Prüfmittelentwicklung nur mit den Prüfmitteln für Komponenten (PM-KP) begonnen werden. Die Entwicklung dieser ist an dieser Stelle möglich, da die Entwicklungsunterlagen des domänenspezifischen Entwurfs des Produktes mit in die Prüfplanung eingegangen sind. Aus dem gleichen Grund kann es sinnvoll sein mit dem disziplinspezifischen Entwurf der Prüfmittel zur Prüfung des Gesamtsystems (PM-SP) und der Module (PM-MP) zu beginnen.

Wird diese Möglichkeit gewählt, liegt zum Meilenstein *M3* auch wieder ein Produktprototyp in Form des Vorserienproduktes vor (wie bei der ersten Möglichkeit). Der domänenspezifische Entwurf und Aufbau des Produktionssystems kann begonnen haben. Die Prüfmittel zur Prüfung von Komponenten (PM-KP) können begonnen worden sein. Die Prüfmittel für die Prüfung des Gesamtsystems (PM-SP) und der Module (PM-MP) können weiter entwickelt worden sein. Die verschiedenen Prüfmittel können dabei soweit entwickelt worden sein, dass der domänenspezifische Entwurf begonnen wurde. Es sollen dabei lediglich die Entwicklungsunterlagen des domänenspezifischen Entwurfs erstellt werden (Zeichnung, Schaltplan, usw.). Mit dem realen Aufbau soll noch nicht begonnen werden, damit kleine Änderungen, die sich noch ergeben können, keinen unnötigen Aufwand verursachen.

Zum Meilenstein *M3* liegen wieder Anforderungen an die Produktentwicklung, den Hauptprozess der Produktionssystementwicklung und ggf. weitere Funktionsbereiche vor. Diese können von dort in den nächsten Durchlauf eingespeist werden (vgl. sechseckige Sprungmarken rechts in Bild 4-15 und links in Bild 4-16).

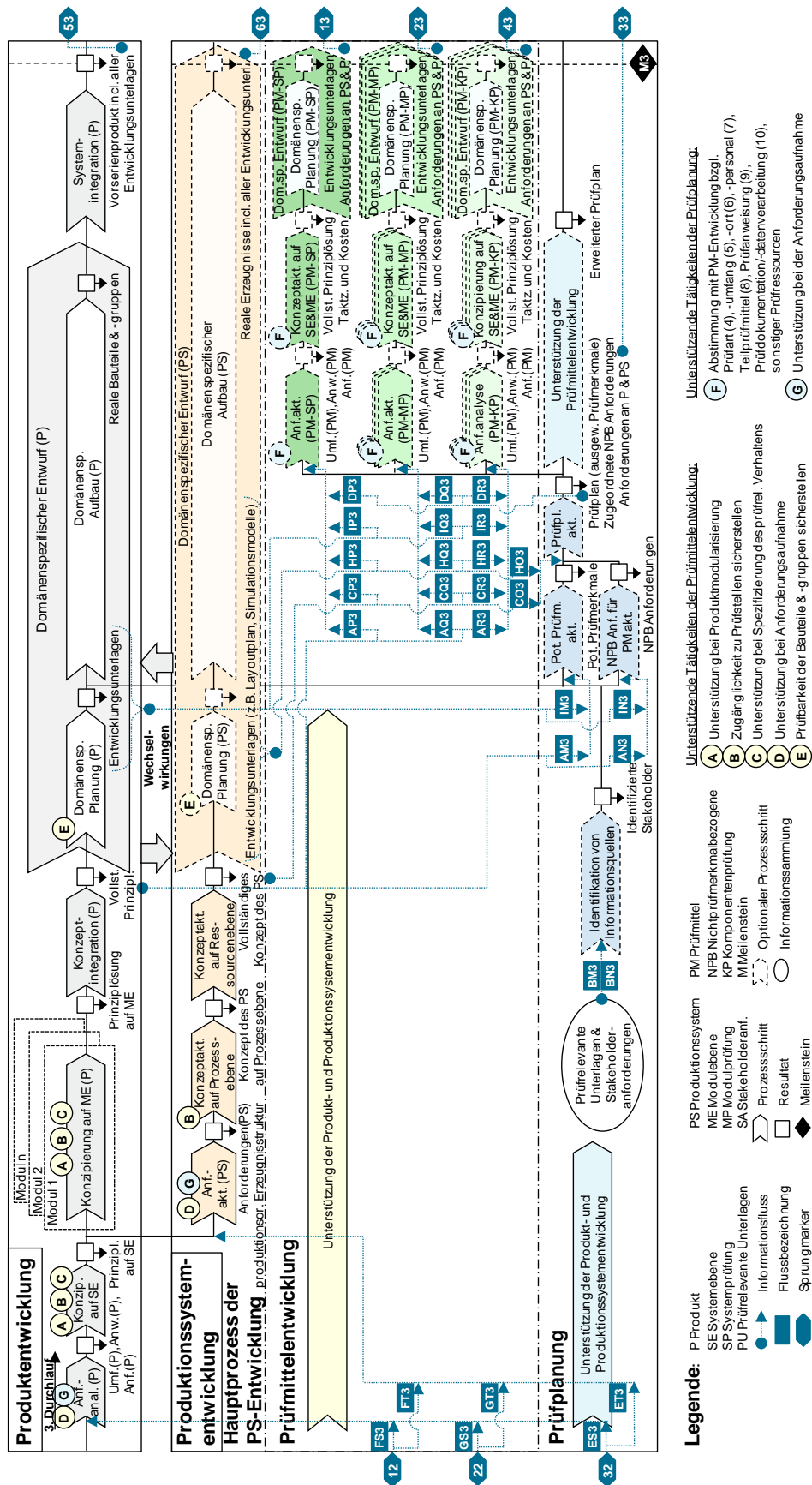


Bild 4-15: Integrativer Produkt- und Prüfmittelentwicklungsprozess – 3. Durchlauf

Produktentwicklung – dritter Durchlauf

Der Reifegrad des Produktes ist zu Beginn des dritten Durchlaufs bereits fortgeschritten. Die Produktentwicklung geht wie im ersten und zweiten Durchlauf vor (vgl. Kapitel 4.2.2). Sie orientiert sich dabei wieder an dem Vorgehen der Spezifikationstechnik CONSENS und dem V-Modell der Produktentstehung (vgl. Kapitel 2.3.3.3, Kapitel 2.3.2 und [Gau10], [GFD+09], [VDI2206]). Die Spezifikation wird wieder mit Hilfe der Spezifikationstechnik CONSENS durchgeführt bzw. überarbeitet. Es werden dabei die Anforderungen aus dem zweiten Durchlauf mit aufgenommen. Diese Anforderungen sind anhand der Flussbezeichner *FS3*, *GS3* und *ES3* in Bild 4-15 auf der linken Seite dargestellt. Der Flussbezeichner *FS3* stellt dabei die Anforderungen an das Produkt dar, die aus der Konzipierung des Prüfmittels für Prüfungen des Gesamtsystems (PM-SP) resultieren. Der Flussbezeichner *GS3* stellt die Anforderungen an das Produkt dar, die aus der Konzipierung des Prüfmittels für Prüfungen der Module (PM-MP) resultieren. Der Flussbezeichner *ES3* stellt die Anforderungen an das Produkt dar, die aus der Prüfplanung resultieren. Die Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung unterstützt bei der prüfmittelgerechten Anforderungsaufnahme, insbesondere bei der Integration der genannten Anforderungen (vgl. Marker *D* und *G* bei der Anforderungsanalyse (P) in Bild 4-15). Zu Beginn der Produktentwicklung können auch weitere bzw. geänderte Anforderungen gegenüber dem ersten Durchlauf an das Produkt aus anderen Bereichen mit einfließen.

Hauptprozess der Produktionssystementwicklung – dritter Durchlauf

Der Hauptprozess der Produktionssystementwicklung entspricht grundsätzlich dem Vorgehen des ersten und zweiten Durchlaufs (vgl. Kapitel 4.2.3). Bei den durchzuführenden Prozessschritten handelt es sich dabei um eine Aktualisierung. Es werden die Anforderungen aus dem zweiten Durchlauf mit aufgenommen. Diese Anforderungen sind anhand der Flussbezeichner *FT3*, *GT3* und *ET3* in Bild 4-15 auf der linken Seite dargestellt. Der Flussbezeichner *FT3* stellt dabei die Anforderungen an das Produktionssystem dar, die aus der Konzipierung des Prüfmittels für Prüfungen des Gesamtsystems (PM-SP) resultieren. Der Flussbezeichner *GT3* stellt die Anforderungen an das Produktionssystem dar, die aus der Konzipierung des Prüfmittels für Prüfungen der Module (PM-MP) resultieren. Der Flussbezeichner *ET3* stellt die Anforderungen an das Produktionssystem dar, die aus der Prüfplanung resultieren. Die Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung unterstützen bei der prüfmittelgerechten Anforderungsaufnahme, insbesondere bei der Integration der genannten Anforderungen (vgl. Marker *D* und *G* bei der Anforderungsaktualisierung (PS) in Bild 4-15).

Abweichend zu den ersten beiden Durchläufen kann in diesem Durchlauf mit dem domänenspezifischen Entwurf begonnen werden. Hierbei unterstützt die Prüfplanung (vgl. Marker *E*). Soll die Prüfmittelentwicklung in diesem Durchlauf weitergeführt werden, ist es hilfreich zumindest die domänenspezifische Planung des Produktionssystems zu beginnen. Die dort erstellten Entwicklungsunterlagen können dabei als Eingangsinformationen für die spätere Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung verwendet werden.

Vorgehen der Prüfplanung – dritter Durchlauf

Das Vorgehen bei der Prüfplanung im dritten Durchlauf entspricht grundsätzlich dem Vorgehen aus dem ersten und zweiten Durchlauf (vgl. Kapitel 4.2.4). Die Durchführung der Prüfplanung ist dabei optional. Wird diese durchgeführt, werden alle bisher erarbeiteten Dokumente erweitert. Ausgangsbasis für die Prüfplanung im dritten Durchlauf ist das Produktkonzept auf Modulebene (Informationsflüsse mit den Bezeichnern *AM3* und *AN3*) und die Entwicklungsunterlagen aus dem domänenspezifischen Entwurf (Informationsflüsse mit den Bezeichnern *IM3* und *IN3*). Die Produktinformationen sind also detaillierter als in den vorangegangenen beiden Durchläufen. Durch die Prüfplanung auf Basis der Produktentwicklungsunterlagen des domänenspezifischen Entwurfs werden nun Produktinformationen sichtbar, die in den vorherigen beiden Durchläufen für die Prüfplanung (und auch später Prüfmittelentwicklung) nicht sichtbar waren. Diese Informationen tragen wesentlich zur Erweiterung des (vorläufigen) Prüfplans und der NPB Anforderungsliste bei. Insbesondere werden hier Komponenten des Produktes sichtbar und deren (potentielle) Prüfmerkmale. Zusätzlich zu der in den ersten beiden Zyklen ebenfalls berücksichtigten vollständigen Prinzipiellösung des Produktes (Flussbezeichner *CO3*), wird bei der Aktualisierung der Prüfplanung der domänenspezifische Entwurf des Produktionssystems berücksichtigt (Flussbezeichner *HO3*).

Die Flussbezeichner *BM3* und *BN3* entsprechen den Flussbezeichnern *BM1* und *BN1* des ersten Durchlaufs.

Prüfmittelentwicklung – dritter Durchlauf

Das Vorgehen bei der Prüfmittelentwicklung im dritten Durchlauf entspricht grundsätzlich dem Vorgehen aus dem ersten Durchlauf (vgl. Kapitel 4.2.5) und zweiten Durchlauf (für den Fall, dass eine Prüfmittelentwicklung in diesem Durchlauf durchgeführt wird). Dabei werden alle bisher erarbeiteten Dokumente aktualisiert. Die bereits in den beiden vorherigen beiden Durchläufen begonnene Entwicklung der Prüfmittel für das Gesamtsystem (PM-SP) und Module (PM-MP) kann in diesem Durchlauf weiter konkretisiert werden – mit der domänenspezifischen Planung dieser Prüfmittel.

Die Konzipierung von Prüfmitteln für Komponenten (PM-KP), die nun durch die domänenspezifischen Entwicklungsunterlagen des Produktes (*IR3*) sichtbar sind, wird an dieser Stelle begonnen. Analog zu den Informationsflüssen des ersten und zweiten Durchlaufs gehen in die verschiedenen parallelen Prüfmittelentwicklungsprozesse die Informationsflüsse für den dritten Durchlauf ein (*AP3*, *AQ3*; *CP3*, *CQ3*; *DP3*, *DQ3*). Zusätzlich gehen die domänenspezifischen Entwicklungsunterlagen des Produktes (*IP3*, *IQ3*) mit ein. Die Informationsflüsse *AR3*, *CR3*, *DR3* beschreiben die Informationsflüsse, die in die hier begonnene Entwicklung von Prüfmitteln für Komponenten (PM-KP) mit einfließt. Zusätzlich zum vollständigen Konzept des Produktionssystems (*CP3*, *CQ3*, *CR3*) können in die Prüfmittelentwicklung in diesem Durchlauf die Entwicklungsunterlagen des domänenspezifischen Entwurfs des Produktionssystems mit eingehen (*HP3*, *HQ3*, *HR3*).

Zuletzt werden wieder analog zu den beiden vorherigen Durchläufen Anforderungen an

die verschiedenen Funktionsbereiche abgeleitet, die zu Beginn des nächsten Durchlaufs berücksichtigt werden sollen. Dazu ist nun nicht nur die Prinziplösung der Prüfmittel zur Identifikation von Wechselwirkungen und zum Ableiten von Anforderungen heranzuziehen, sondern auch die domänenspezifischen Entwicklungsdokumente der Prüfmittel. Die sich aus den verschiedenen Prüfmittelentwicklungen ergebenden Anforderungen werden mit den Sprungmarkern 13, 23 und 43 in den nächsten Durchlauf übertragen.

Am Ende des dritten Durchlaufs ist Meilenstein M3 erreicht (vgl. Bild 4-15). Das Produkt liegt als dritter Prototyp in Form des Vorserienproduktes vor. Die Beschreibung des Produktionssystems, die integrativ zum Produkt erstellt wurde, liegt vor und ist ggf. schon im domänenspezifischen Entwurf detailliert worden.

Je nach gewählter Option wurde auch konsistent zum Produktkonzept mit den Entwicklungsunterlagen aus der domänenspezifischen Planung des Produktes eine Prüfplanung durchgeführt. Auf Basis dieser Prüfplanung liegen Prüfmittelspezifikationen für Prüfungen des Gesamtsystems (PM-SP), Prüfmittel für alle zu prüfenden einzelnen Module (PM-MP) und Prüfmittel für Komponenten (PM-KP) vor. Die Spezifikationen können dabei bis zum domänenspezifischen Entwurf ausgearbeitet sein. Anforderungen an die Produktentwicklung, den Hauptprozess der Produktionssystementwicklung und ggf. weitere Funktionsbereiche sind abgeleitet worden. Diese liegen ebenfalls zum Meilenstein M3 vor und werden dem nächsten Durchlauf (Bild 4-16) übergeben.

4.2.8 Vierter Teilprozess des Referenzprozesses

In diesem Kapitel wird der vierte und damit letzte Durchlauf des integrativen Entwicklungsprozesses beschrieben. Das Vorgehen ähnelt dem Vorgehen aus den vorangegangenen drei Durchläufen. Daher werden wieder nur die wesentlichen Abweichungen zu diesen Durchläufen beschrieben.

Überblick über den vierten Durchlauf des Referenzprozesses

Die Gesamtübersicht über den vierten Durchlauf des integrativen generischen Entwicklungsprozesses ist in Bild 4-16 dargestellt. Es detailliert dabei den in Bild 4-4 dargestellten Gesamtprozess zwischen den Meilensteinen M3 und M4. Ziel des vierten Durchlaufs ist die Erreichung des Meilensteins M4, wobei zu diesem Zeitpunkt verschiedene Ergebnisse der vier Funktionsbereiche (vier Swimlanes) vorliegen sollen. Das Produkt soll in Form des Serienproduktes vorliegen. Dazu soll das passende Produktionssystem zur Produktion des Produktes bereitstehen, welches die benötigten Prüfmittel beinhaltet. Die entsprechende Prüfplanung muss dazu für alle Prüfmittel durchgeführt worden sein. Basis der Prüfplanung und der Prüfmittelentwicklung ist die vollständige Produktbeschreibung und das Vorserienprodukt aus dem letzten (dritten) Durchlauf

(Meilenstein *M3*). Die Prüfplanung bildet dabei wieder das wesentliche Bindeglied zwischen Produktentwicklung und den Hauptprozess der Produktionssystementwicklung auf der einen Seite und der Prüfmittelentwicklung auf der anderen Seite. Zu Beginn des vierten Durchlaufs werden Anforderungen, aber auch Informationen, aus der Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung aus dem dritten Durchlauf mit in die entsprechenden Funktionsbereiche aufgenommen (vgl. Bild 4-16 Flussbezeichner *FS4*, *FT4*, *GS4*, *GT4*, *JS4*, *JT4*, *ES4*, *ET4*, *XM4*, *XN4*, *XP4*, *XQ4*, *XR4*, *YP4*, *YQ4*, *YR4*, *DP4*, *DQ4*, *DR4*).

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden in Bild 4-16 Flüsse zusammenfassend dargestellt. So werden z. B. mit *XN* die Flüsse *AN*, *IN* und *KN* zusammengefasst. Diese Zusammenfassung ist an den entsprechenden Stellen gekennzeichnet.

Produktentwicklung – vierter Durchlauf

Der Reifegrad des Produktes ist mit dem Vorserienprodukt zu Beginn des vierten Durchlaufs bereits weit fortgeschritten. Es sollten sich somit keine wesentlichen Änderungen des Produktes im vierten Durchlauf ergeben. Die Produktentwicklung geht wie in den ersten drei Durchläufen vor (vgl. Kapitel 4.2.2). Sie orientiert sich dabei wieder an dem Vorgehen der Spezifikationstechnik CONSENS und dem V-Modell der Produktentstehung (vgl. Kapitel 2.3.3.3, Kapitel 2.3.2 und [Gau10], [GFD+09], [VDI2206]). Die Spezifikation wird wieder mit Hilfe der Spezifikationstechnik CONSENS durchgeführt bzw. überarbeitet. Es werden dabei die Anforderungen aus dem dritten Durchlauf mit aufgenommen. Diese Anforderungen sind anhand der Flussbezeichner *FS4*, *GS4*, *JS4* und *ES4* in Bild 4-16 auf der linken Seite dargestellt. Der Flussbezeichner *FS4* stellt dabei die Anforderungen an das Produkt dar, die aus der Entwicklung des Prüfmittels für Prüfungen des Gesamtsystems (PM-SP) resultieren. Der Flussbezeichner *GS4* stellt die Anforderungen an das Produkt dar, die aus der Entwicklung des Prüfmittels für Prüfungen der Module (PM-MP) resultieren. Der Flussbezeichner *JS4* stellt die Anforderungen an das Produkt dar, die aus der Entwicklung des Prüfmittels für Prüfungen von Komponenten (PM-KP) resultieren. Der Flussbezeichner *ES4* stellt die Anforderungen an das Produkt dar, die aus der Prüfplanung des vorangegangenen Durchlaufs resultieren.

Die Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung unterstützen bei der prüfmittelgerechten Anforderungsaufnahme, insbesondere bei der Integration der genannten Anforderungen (vgl. Marker *D* und *G* bei der Anforderungsanalyse (P) in Bild 4-16). Zu Beginn der Produktentwicklung können auch weitere bzw. geänderte Anforderungen gegenüber dem dritten Durchlauf an das Produkt aus anderen Bereichen mit einfließen. Diese sollten allerdings aufgrund des Reifegrades des Produktes sehr gering ausfallen. Ergeben sich größere Änderungen am Produkt, z. B. verursacht durch diese neuen Anforderungen, ist es insbesondere für die Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung aufwändig dies zu berücksichtigen, da grundsätzlich von dem Stand des Vorserienproduktes ausgegangen werden muss.

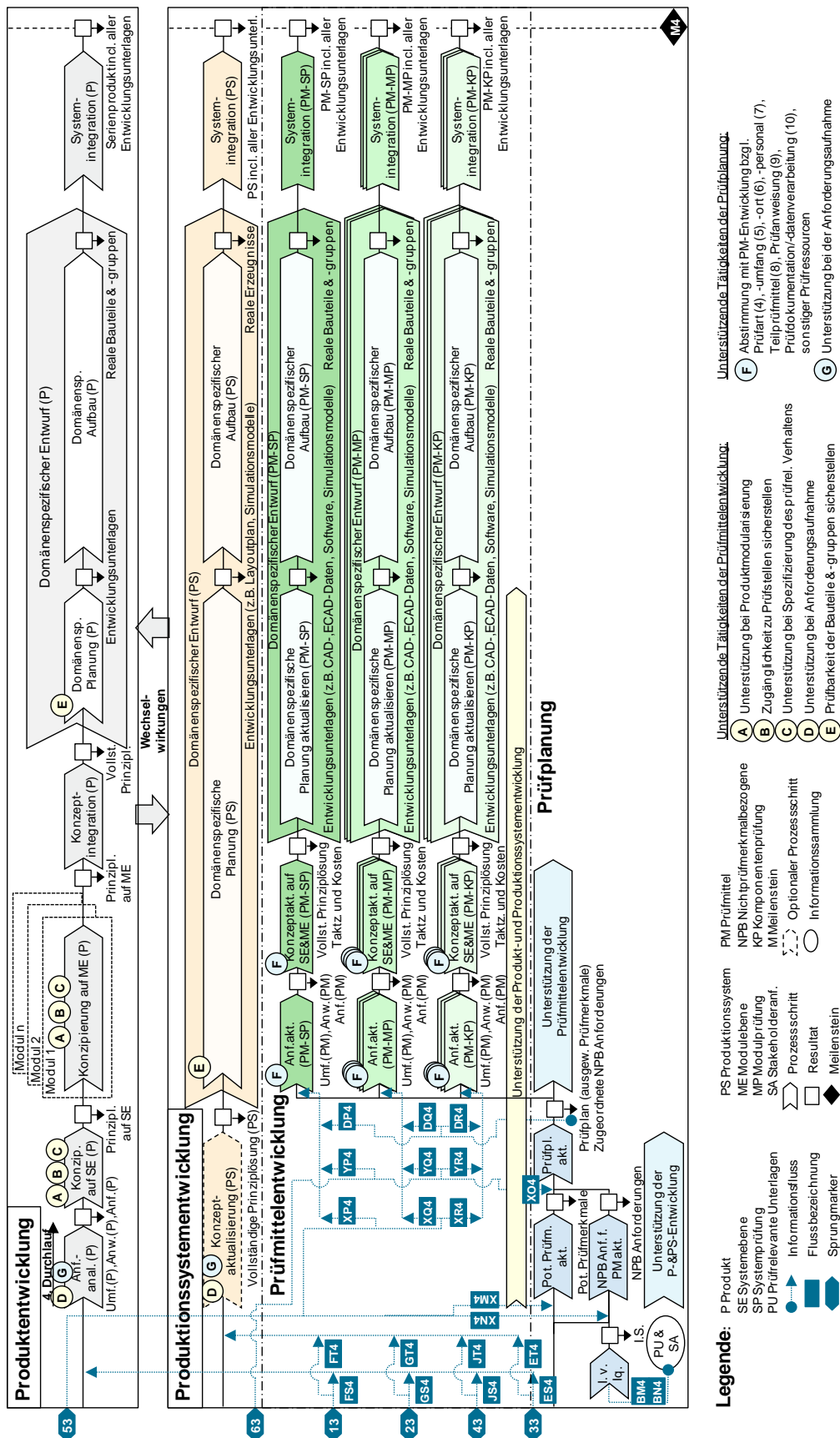


Bild 4-16: Integrativer Produkt- und Prüfmittelentwicklungsprozess – 4. Durchlauf

Hauptprozess der Produktionssystementwicklung – vierter Durchlauf

Der Hauptprozess der Produktionssystementwicklung ähnelt grundsätzlich dem Vorgehen im dritten Durchlauf (vgl. Kapitel 4.2.7, Abschnitt „Hauptprozess der Produktionssystementwicklung – dritter Durchlauf“).

Es werden dabei die Anforderungen aus dem dritten Durchlauf mit aufgenommen. Diese Anforderungen sind anhand der Flussbezeichner *FT4*, *GT4*, *JT4* und *ET4* in Bild 4-16 auf der linken Seite dargestellt. Der Flussbezeichner *FT4* stellt dabei die Anforderungen an das Produktionssystem dar, die aus der Entwicklung des Prüfmittels für Prüfungen des Gesamtsystems (PM-SP) resultieren. Der Flussbezeichner *GT4* stellt die Anforderungen an das Produktionssystem dar, die aus der Entwicklung des Prüfmittels für Prüfungen der Module (PM-MP) resultieren. Der Flussbezeichner *JT4* stellt die Anforderungen an das Produktionssystem dar, die aus der Entwicklung des Prüfmittels für Prüfungen der Komponenten (PM-KP) resultieren. Der Flussbezeichner *ET4* stellt die Anforderungen an das Produktionssystem dar, die aus der Prüfplanung des vorangegangenen Durchlaufs resultieren.

Abhängig von diesen Anforderungen kann das Konzept aktualisiert werden. Wird das Konzept aktualisiert, unterstützt die Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung bei der prüfmittelgerechten Anforderungsaufnahme, insbesondere bei der Integration der genannten Anforderungen (vgl. Marker *D* und *G* bei der Anforderungsaktualisierung (PS) in Bild 4-16). Dieser optionale Prozessschritt ist durch den gestrichelten Prozesspfeil angedeutet.

Es folgt der domänenspezifische Entwurf des Produktionssystems bzw. die Überarbeitung des domänenspezifischen Entwurfs und des domänenspezifischen Aufbaus, falls dieser im letzten Durchlauf schon begonnen wurde. Abschließend wird die Systemintegration des Produktionssystems durchgeführt.

Vorgehen der Prüfplanung– vierter Durchlauf

Das Vorgehen der Prüfplanung im vierten Durchlauf entspricht grundsätzlich dem Vorgehen aus den ersten drei Durchläufen (vgl. Kapitel 4.2.4).

Wesentliche Grundlage der Prüfplanung ist in diesem Durchlauf nicht die Produktspezifikation aus dem gleichen Durchlauf, sondern alle Entwicklungsartefakte (Produktspezifikation und real aufgebautes Vorserienprodukt) des Produktes des letzten Durchlaufs (*XM4*, *XN4*). Die Flussbezeichner *XM4* und *XN4* in Bild 4-16 fassen diese Entwicklungsartefakte zusammen. *XM4* beinhaltet dabei die Informationsflüsse *AM3* und *IM3* aus dem dritten Zyklus mit dem real aufgebauten Vorserienprodukt *KM3*. Analog dazu besteht *XN4* aus *AN3*, *IN3* und *KN3*. Dabei handelt es sich ggf. im vierten Durchlauf um einen aktualisierten Stand dieser Informationsflüsse. Wurde z. B. gegen Ende des dritten Durchlaufs die Produktspezifikation *AM3* geändert/angepasst, so ist selbstverständlich die aktuelle Version im Durchlauf 4 heranzuziehen.

Wenn die komplette Spezifikation des Produktes aus dem gleichen (vierten) Durchlauf herangezogen werden würde, wäre es besonders bei der Entwicklung aufwändiger Prüfmittel nahezu unmöglich diese mit dem Serienprodukt zeitgleich fertigzustellen. Es

wird an dieser Stelle davon ausgegangen, dass sich das Produkt aufgrund des hohen Reifegrades nur noch unwesentlich ändert (aus Sicht des Prüfmittels). Sollte es zu Produktänderungen kommen, die zu Änderungen der Prüfplanung für neu zu entwickelnde Prüfmittel führen, so ist dies durch Abstimmungen innerhalb des letzten (vierten) Durchlaufs zu berücksichtigen. Die Wechselwirkungspfeile zwischen Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung stellen dies in Bild 4-16 dar.

In der Prüfplanung werden alle bisher erarbeiteten Dokumente, wie in den vorangegangenen Durchläufen, überarbeitet bzw. erweitert. Ist im vorherigen (dritten) Durchlauf eine Prüfplanung durchgeführt worden, werden sich nur geringfügige Änderungen und Ergänzungen ergeben. Dafür steht als zusätzliche Informationsquelle in diesem Durchlauf das real aufgebaute Vorserienprodukt selbst zur Verfügung (*KM3* und *KN3*, Teilmenge von *XM4* und *XN4*). Es werden dadurch ggf. prüfrelevante Produktinformationen sichtbar, die vorher nicht sichtbar waren. Diese Zusatzinformationen tragen dann wieder zur Überarbeitung und Erweiterung des (vorläufigen) Prüfplans und der NPB Anforderungsliste bei.

Insbesondere wenn in dem vorangegangenen (dritten) Durchlauf keine Prüfplanung durchgeführt worden ist (optionaler Schritt), ist die komplette Spezifikation des Produktes (*AM3*, *IM3*, *AN3*, *IN3*; diese sind Teilmenge von *XM4* und *XN4*) mit heranzuziehen, da diese im vorangegangenen Durchlauf nicht berücksichtigt wurde (*AM3*, *AN3*, *IM3*, *IN3* wurden im dritten Durchlauf, Bild 4-15, nicht berücksichtigt). Für den Fall, dass im dritten Durchlauf eine Prüfplanung durchgeführt wurde und sich danach Produktspezifikationen geändert haben, können diese hier auch mit aufgenommen werden.

Zusätzlich werden die kompletten Entwicklungsartefakte des Produktionssystems (Spezifikationen, reales Produktionssystem, usw.) mit aufgenommen (*XO4*). Dazu zählen der aktuelle Stand der Produktionssystemspezifikation (*CO3*, *HO3*) und ggf. real aufgebaute Produktionssystemteile (*LO3* bezeichnet dazu real aufgebaute Produktionssystemteile zum Meilenstein *M3*). Auch hier brauchen diese Spezifikationen nur dann mit berücksichtigt werden, wenn sie im vorangegangenen Durchlauf nicht mit berücksichtigt wurden oder sie seitdem geändert wurden.

Die Flussbezeichner *BM4* und *BN4* entsprechen den Flussbezeichnern *BM* und *BN* der vorangegangenen Zyklen, wobei auch hier ggf. neue Informationen mit aufgenommen werden können.

Prüfmittelentwicklung– vierter Durchlauf

Das Vorgehen bei der Prüfmittelentwicklung im vierten Durchlauf entspricht grundsätzlich dem Vorgehen in den ersten drei Durchläufen (vgl. Kapitel 4.2.5). Wesentlicher Unterschied ist hierbei, dass die Prüfmittel real aufgebaut und fertiggestellt werden. Der komplette Prozess von der Anforderungsaktualisierung über die Konzeptaktualisierung, den domänenspezifischen Entwurf und die Systemintegration wird dazu für die einzelnen zu entwickelnden Prüfmittel durchlaufen. Die bereits vorhandenen Entwicklungsunterlagen werden dazu zunächst aktualisiert bzw. erweitert. Basis dafür sind wieder die

Informationen aus der Prüfplanung mit dem Prüfplan und den NPB Anforderungen (vgl. Bild 4-16 Informationsflüsse *DP4*, *DQ4* und *DR4*).

Zusätzlich gehen in die Prüfmittelentwicklung wieder Informationsflüsse aus den anderen Funktionsbereichen mit ein. Abweichend zu den vorherigen Durchläufen werden Informationen aus dem vorherigen Durchlauf drei zum Meilenstein *M3* dazu herangezogen. Falls wieder auf die Informationen aus dem gleichen Durchlauf gewartet würde, wäre eine rechtzeitige Fertigstellung der einzelnen zu entwickelnden Prüfmittel kaum möglich. Es wird an dieser Stelle davon ausgegangen, dass sich das Produkt aufgrund des hohen Reifegrades nur noch unwesentlich ändert. Sollte es zu Produktänderungen kommen, die zu Änderungen der Prüfmittelentwicklung für neu zu entwickelnde Prüfmittel führen, so ist dies durch Abstimmungen innerhalb des letzten (vierten) Durchlaufs zu berücksichtigen. Die Wechselwirkungspfeile zwischen Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung stellen dies in Bild 4-16 dar.

XP4, *XQ4* und *XR4* bezeichnen jeweils die kompletten nutzbaren Entwicklungsartefakte (Informationsflüsse) zum Meilenstein *M3* der Produktentwicklung, die in die jeweiligen Prüfmittelentwicklungsprozesse eingehen. Verläuft im dritten Durchlauf die Produktentwicklung planmäßig und wird dort zum Ende die Spezifikation des Produktes nicht erneut angepasst, bestehen die genannten Informationsflüsse jeweils aus dem Produktkonzept (*AP3*, *AQ3*, *AR3*), den domänenspezifischen Entwicklungsunterlagen (*IP3*, *IQ3*, *IR3*) und dem real aufgebauten Vorserienprodukt (*KP3*, *KQ3*, *KR3*). Gegebenfalls sind diese Informationsflüsse zu aktualisieren.

YP4, *YQ4* und *YR4* bezeichnen die Informationsflüsse, die aus dem Hauptprozess der Produktionssystementwicklung in die einzelnen Prüfmittelentwicklungsprozesse für die verschiedenen Prüfmittel (PM-SP / PM-MP / PM-KP) eingehen. Diese bezeichnen analog zu den vorangegangenen Bezeichnungen die kompletten nutzbaren Entwicklungsartefakte des Produktionssystems zum Meilenstein *M3*. Dazu zählen jeweils die vollständige Prinziplösung des Produktionssystems (*CP3*, *CQ3*, *CR3*), die Entwicklungsunterlagen (*HP3*, *HQ3*, *HR3*) und die ggf. real aufgebauten Produktionssystemteile (*LP3*, *LQ3*, *LR3*) zum Meilenstein *M3*.

Zum Schluss folgt in den einzelnen Prozessschritten der Systemintegration der einzelnen Prozesse der Prüfmittel, der Fähigkeitsnachweis dieser Prüfmittel. Allgemein wird bei einem Prüfmittelfähigkeitsnachweis versucht, anhand einer eindeutig und leicht durchführbaren Vorgehensweise, die Eignung eines Messverfahrens nachzuweisen [DS14, S. 10]. Da in dieser Arbeit Prüfmittel betrachtet werden, die komplexe mechatronische Produkte prüfen sollen, können diese Prüfmittel mehrere Messverfahren einsetzen. Analog zu der allgemeinen Definition ist also die Fähigkeit des gesamten Prüfmittels mit ggf. mehreren Messverfahren an dieser Stelle zu verstehen. Eine Übersicht über verschiedene Verfahren zum Nachweis der Prüfmittelfähigkeit bzw. Normen und Richtlinien im Zusammenhang mit der Prüfprozesseignung sind in [DS14] und [SP15, S. 244ff.] zusammengetragen. Der Prüfmittelfähigkeitsnachweis entspricht dabei in etwa der Eigenschaftsabsicherung eines mechatronischen Systems. Da das Prüfmittel

selbst ein mechatronisches System ist, werden alle Schritte der Eigenschaftsabsicherung eines mechatronischen Systems an dieser Stelle ebenfalls durchlaufen.

Am Ende des vierten Durchlaufs ist Meilenstein *M4* erreicht (vgl. Bild 4-16 und Bild 4-4). Das Produkt liegt in Form des fertigen Serienproduktes vor. Das komplette Produktionssystem, inklusive der zu entwickelnden Prüfmittel, liegt betriebsbereit vor. Für jedes zu entwickelnde Prüfmittel wurde dazu mindestens einmal das V-Modell komplett durchlaufen.

Mit der Serienfertigung des Produktes kann nun gestartet werden. Damit endet der integrative Entwicklungsprozess.

4.3 Projekt- und unternehmensspezifische Anpassungsmöglichkeiten des integrativen Entwicklungsprozesses

In Kapitel 4.1 und Kapitel 4.2 ist der generische Entwicklungsprozess für die integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem mit dem Fokus auf die in der Produktionssystementwicklung enthaltene, frühzeitige Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung beschrieben worden. Der generische Entwicklungsprozess zeigt dabei auf wie eine solche integrative Entwicklung grundsätzlich ablaufen kann. Dabei wird insbesondere aufgezeigt, welche Informationen und Modelle für das parallele Wechselspiel aus Produktentwicklung, Hauptprozess der Produktionssystementwicklung, Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung genutzt werden können. Dabei wird in jedem der vier Durchläufe eine leicht unterschiedliche Möglichkeit aufgezeigt – von der Produktentwicklung ausgehend die Produktionssystementwicklung mit der integrierten Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung zu durchlaufen (verschiedene „Absprungpunkte/Absprunghöhen“ bzw. Modellierungstiefen/Abstraktionsebenen der Produktentwicklung als Ausgangspunkt für die Prüfplanung; verschiedene Modellierungstiefen/Abstraktionsebenen bei der Prüfmittelentwicklung, usw.).

Abhängig von projekt- und unternehmensspezifischen Randbedingungen kann aus dem generischen Referenzprozess ein projekt- bzw. unternehmensspezifischer Prozess abgeleitet werden. Dies wird in diesem Kapitel gezeigt. Der in Kapitel 4.1 und Kapitel 4.2 beschriebene generische Entwicklungsprozess ist dazu als Prozessbausteinkasten zu interpretieren, aus dem der projekt- bzw. unternehmensspezifische Prozess abgeleitet werden kann. Dazu können die verschiedenen Möglichkeiten, die in den einzelnen vier Durchläufen des Referenzprozesses aufgezeigt wurden, genutzt werden. Erfahrungswissen von ähnlichen bzw. vorangegangenen Projekten kann bei der Erstellung des projekt- und unternehmensspezifischen Entwicklungsprozesses hilfreich sein und genutzt werden. In Kapitel 5.2 wird anhand eines Anwendungsbeispiels gezeigt, wie ein projekt- und unternehmensspezifischer Prozess abgeleitet werden kann.

Zunächst werden Randbedingungen aufgelistet, die Einfluss auf die Erstellung des projekt- bzw. unternehmensspezifischen Prozesses haben. Mögliche daraus folgende Handlungsoptionen werden hierbei den Randbedingungen zugeordnet. Die Auflistung erhebt dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die verschiedenen Entwicklungsprojekte mit ihren Randbedingungen sind dafür zu unterschiedlich. Die aufgezählten Randbedingungen mit ihren möglichen Handlungsoptionen sollen zusammen mit den später aufgezeigten Stellschrauben am Entwicklungsprozess vielmehr auch Denkanstöße liefern, welche zusätzlichen Randbedingungen noch mit zu berücksichtigen sind.

Randbedingungen und mögliche Handlungsoptionen

- **Anzahl der V-Modell Zyklen der Produktentwicklung**

Die Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung soll in vielen Fällen die Produktentwicklung nicht oder nur unwesentlich aufhalten, da „time to market“ oftmals ein wesentlicher Wettbewerbsfaktor ist. Die Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung soll sich daher grundsätzlich an den geplanten V-Modell Zyklen der Produktentwicklung orientieren. Sind für die Produktentwicklung z. B. nur drei zu durchlaufende V-Modell Zyklen geplant, wie im Anwendungsbeispiel (Kapitel 5), gibt es auch nur drei Durchläufe des integrativen Entwicklungsprozesses. Es sind grundsätzlich auch Fälle denkbar, in denen die Prüfmittelentwicklung auch die Anzahl der V-Modell Durchläufe der Produktentwicklung beeinflussen.

- **Neuheit des Produktes bezüglich der Technologie im Produkt**

Stellt das Produkt oder Teile des Produktes lediglich eine Weiterentwicklung eines bestehenden Produktes mit einer dafür bisher eingesetzten Technologie dar, so sind ggf. keine wesentlichen Neuerungen am Prüfmittel zu erwarten. In diesem Fall kann ggf. die Prüfmittelentwicklung, insbesondere für gut bekannte Module des Produktes, später begonnen werden bzw. erst später detailliert ausgearbeitet werden (die Prüfmittelentwicklung würde dann z. B. erst im zweiten Durchlauf beginnen).

Stellt das Produkt oder Teile des Produktes eine wesentliche Neuheit dar und ist dieses Produkt zusätzlich mit für das Unternehmen neuen Technologien realisiert, ist zu überlegen, mit der Prüfmittelentwicklung – insbesondere der Prüfmittel für die neuartigen Module – zu einem frühen Zeitpunkt einen hohen Reifegrad zu erlangen (Die Prüfmittelentwicklung würde dann z. B. im ersten Durchlauf begonnen und anstatt auf Systemebene, bis auf Modulebene spezifiziert). So können frühzeitig kritische Stellen bei der Entwicklung des Prüfmittels ermittelt werden und es bleibt genügend Zeit Lösungen für diese kritischen Stellen auszuarbeiten. Weiterhin können so bisher noch nicht bekannte Wechselwirkungen, z. B. zum Produkt, erkannt werden. Auch kann sichergestellt werden, dass es überhaupt gelingt ein Prüfmittel für das neuartige (Teil-)Produkt zu entwickeln, welches die Prüfkosten im möglichen Rahmen hält.

Ist zu erkennen, dass kein Prüfmittel für das Produkt oder einen bestimmten Teil des Produktes mit vertretbarem Aufwand entwickelt werden kann, so kann die Folge ein

echtes Wechselspiel zwischen Produktentwicklung und Prüfmittelentwicklung sein, bis ein Produktkonzept mit einem entsprechenden Prüfmittel gefunden ist. Ein solches Wechselspiel könnte z. B. wie in Kapitel A3 dargestellt aussehen.

- **Neuheit des Produktes bezüglich des bedienten Marktes bzw. der Anwendung**

Wird das zu entwickelnde Produkt in einer bekannten Anwendung, in einem bekannten Markt eingesetzt, sind von dort wenig neue Anforderungen zu erwarten, die sich auf das Prüfmittel auswirken können.

Wird das zu entwickelnde Produkt in einer bisher nicht bekannten Anwendung in einem für das Unternehmen neuen Markt eingesetzt, kann es Anforderungen aus diesem Markt bzw. der Anwendung geben, die sich gravierend auf das Prüfmittel auswirken. Dies war z. B. im Anwendungsbeispiel der Fall. Es kann daher ebenfalls sinnvoll sein zu einem frühen Zeitpunkt das Prüfmittel zu einem hohen Detailgrad zu planen, z. B. anstatt im ersten Durchlauf auf Systemebene wird hier schon bis auf Modulebene spezifiziert.

- **Neuheit der Produktionstechnologie**

Ist die Produktionstechnologie bekannt, sind aus dieser Richtung keine wesentlichen (störenden) Einflüsse bzw. Anforderungen für die Prüfmittelentwicklung zu erwarten.

Wird dagegen eine für das Unternehmen neuartige Fertigungstechnologie verwendet bzw. eine neue Fertigung aufgebaut, liegen noch keine bzw. tendenziell wenig Erfahrungswerte bezüglich der Prozesssicherheit der einzelnen Fertigungsprozesse vor. Da die Prozessunsicherheiten in der Produktion der wesentliche Grund für die Prüfungen darstellt, wirkt sich dies unmittelbar auf die Prüfmittelentwicklung aus. Die Prozessunsicherheiten und deren Auswirkungen sind möglichst gut und frühzeitig zu ermitteln. Dies fließt in die Prüfmittelentwicklung mit ein. Da zu erwarten ist, dass diese Ermittlung insbesondere bei den neuen Fertigungstechnologien bzw. einer neuen Fertigung aufgrund der geringen Erfahrung unvollständig ist, kann die Untersuchung des Produktkonzeptes selbst wichtige Hinweise auf Prüfmerkmale liefern. Es sind, insbesondere in diesem Fall, möglichst alle potentiellen Prüfmerkmale frühzeitig zu ermitteln. Tendenziell kann in diesem Fall eine größere Anzahl von potentiellen Prüfmerkmalen zur Prüfung herangezogen werden als bei bekannten Fertigungsprozessen. Diese Vorgehenseise bezieht sich wieder insbesondere auf die Module des Produktes, die mit der neuartigen Produktionstechnologie hergestellt werden.

- **Komplexität des Produktes**

Die Komplexität des Produktes kann grundsätzlich Einfluss auf die Prüfungen haben. Übersteigt z. B. die Komplexität des neu zu entwickelnden Produktes die Komplexität bisheriger Produkte in Bezug auf die Anzahl verbauter Module und Komponenten, kann überlegt werden frühzeitig, z. B. direkt im ersten Durchlauf, die komplette Produktspezifikation als Basis der Prüfplanung heranzuziehen. In der Prüfplanung sind dann direkt das Gesamtsystem und alle Module und Komponenten

sichtbar. Es wird dadurch möglich, frühzeitig zu überlegen, welche Prüfmittel es überhaupt geben soll (für die verschiedenen Module und Komponenten).

- **Zur Verfügung stehende Zeit bis zur Fertigstellung des Prüfmittels**

Bei der Beschreibung des Referenzprozesses ist davon ausgegangen worden, dass die Produktion direkt zur Fertigstellung des Produktes beginnen soll und zu diesem Zeitpunkt möglichst das zu entwickelnde Prüfmittel schon betriebsbereit sein soll. Ist zwischen Fertigstellung des Produktes und Produktionsstart (SOP) noch genügend Zeit vorgesehen, so kann insbesondere mit dem Aufbau des Prüfmittels nach Fertigstellung des Produktes begonnen werden. Dabei sollten während der Durchläufe trotzdem planerische Tätigkeiten der Prüfmittelentwicklung ausgeführt werden, um Anforderungen vom Prüfmittel an das Produkt zu stellen. Nach Fertigstellung des Produktes kann dann das komplette V-Modell für das Prüfmittel durchlaufen werden. So ist sichergestellt, dass die Prüfmittelentwicklung den letzten Entwicklungsstand des Produktes vollständig berücksichtigt.

Stellschrauben am Entwicklungsprozess

In Kapitel 4.1 und Kapitel 4.2 ist ein generischer integrativer Entwicklungsprozess beschrieben worden. Die verschiedenen Möglichkeiten diesen anzupassen sind nachfolgend beschrieben:

- **Anzahl der Durchläufe**

Die Anzahl der Durchläufe des gesamten integrativen Entwicklungsprozesses soll sich grundsätzlich an den geplanten V-Modell Zyklen der Produktentwicklung orientieren. Es gibt also so viele Durchläufe wie V-Modell Zyklen des Produktes. Dabei kann es vorkommen, dass die Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung Einfluss auf die Anzahl der V-Modell Zyklen des Produktes haben.

- **Absprungpunkt von der Produktentwicklung in die Prüfplanung**

Das Produktkonzept ist jeweils der Ausgangspunkt für den Beginn der Prüfplanung. Dies ist sichtbar an den Flussbezeichnern *AM1* und *AN1* in Bild 4-5, *AM2* und *AN2* in Bild 4-14, *AM3*, *AN3*, *IM3* und *IN3* in Bild 4-15, *KM4* und *KN4* (Teilmenge von *XM4* und *XN4*) in Bild 4-16. Die möglichen „Absprungpunkte/Absprunghöhen“ von der Produktentwicklung in die Prüfplanung unterscheiden sich dabei. Diese können sein: das Produktkonzept auf Systemebene, das Produktkonzept auf Modulebene, die kompletten Entwicklungsunterlagen der domänenspezifischen Planung und letztlich das gesamte reale Produkt.

Die beschriebenen Absprungpunkte/Absprunghöhen sind im Referenzprozess den einzelnen Durchläufen zugeordnet. Bei der projekt- und unternehmensspezifischen Ausprägung des Prozesses können die Absprungpunkte/Absprunghöhen auch anderen Durchläufen zugeordnet werden. So wäre es z. B. möglich im ersten Durchlauf von dem Produktkonzept auf Modulebene abzuspringen (vgl. *AM2* und *AN2* in Bild 4-14) anstatt von dem Produktkonzept auf Systemebene. Die nachfolgenden Absprungpunkte/Absprunghöhen sollen dabei immer mindestens an der gleichen Stelle

stattfinden oder „tiefer“ als bei dem Durchlauf davor. Es hätte z. B. keinen Sinn im zweiten Durchlauf vom Produktkonzept auf Systemebene abzuspringen. Sinnvoll wäre ein Absprung entweder wieder beim Produktkonzept auf Modulebene oder von den Entwicklungsunterlagen der domänenspezifischen Planung.

Eine bisher nicht betrachtete Besonderheit stellt hierbei das Produktkonzept auf Modulebene dar. In Bild 4-5, Bild 4-14, Bild 4-15 und Bild 4-16 wird in der Prozessfolge der Produktentwicklung die Konzipierung auf Modulebene mit mehreren parallelen Prozessen dargestellt. Es kann vorkommen, dass ein Modul selbst aus mehreren Modulen (Sub-Modulen) besteht. Ein solches Sub-Modul kann wieder aus mehreren Modulen bestehen usw. Dadurch ergeben sich noch weitere potentielle Absprungpunkte/Absprunghöhen im Produktentwicklungsprozess.

- **Verschiedene Entwicklungsstartpunkte für System-, Modul- und Komponentenprüfmittel**

Die Entwicklungen der einzelnen Prüfmittel können erst dann gestartet werden, wenn die (Sub-)Module/Komponenten, die diese prüfen sollen, für die Prüfplanung sichtbar sind. Im ersten Durchlauf des Referenzprozesses (Bild 4-5) sind z. B. keine Sub-Module und Komponenten des Produktes für die Prüfplanung sichtbar, da diese im Produktkonzept auf Systemebene nicht sichtbar sind. Daher sind im Prüfplan (Bild 4-12) die Prüfmittel für diese Sub-Module und Komponenten nicht enthalten. Folglich kann eine Entwicklung für diese Prüfmittel nicht gestartet werden. Die Absprungpunkte/Absprunghöhen aus der Produktentwicklung haben somit unmittelbar Auswirkung auf die Möglichkeit die Entwicklung für bestimmte Prüfmittel zu starten. Dies ist grundsätzlich im Referenzprozess gewollt so angelegt, da davon ausgegangen wird, dass Prüfmittel für Komponenten weniger Entwicklungszeit und Durchläufe benötigen als z. B. Prüfmittel für das Gesamtsystem. Es wird ferner davon ausgegangen, dass die Auswirkungen von Prüfmitteln für Komponenten nicht so große Einflüsse auf das Produktkonzept haben wie Prüfmittel für Gesamtsystemprüfungen.

Auch wenn die verschiedenen Prüfmittel für die Prüfplanung sichtbar sind, heißt dies nicht, dass mit der Entwicklung der Prüfmittel begonnen werden muss. Der Beginn der Entwicklung der verschiedenen Prüfmittel kann also unterschiedlich sein. Zum Beispiel kann die Entwicklung für das Prüfmittel für das Gesamtsystem direkt im ersten Durchlauf gestartet werden und die Prüfmittelentwicklung für Module und Komponenten erst in den späteren Durchläufen (wie im Anwendungsbeispiel).

- **Modellierungstiefe/Abstraktionsebene der Prüfmittel in den einzelnen Durchläufen**

Im Referenzprozess vergrößert sich die Modellierungstiefe/Abstraktionsebene der Prüfmittel von Durchlauf zu Durchlauf. Zum Beispiel wird für das Prüfmittel des Gesamtsystems (PM-SP) im ersten Durchlauf lediglich auf Systemebene konzipiert. Im zweiten Durchlauf wird dieses auf Modulebene konzipiert. Im dritten Durchlauf kann mit dem domänenspezifischen Entwurf angefangen werden. Im

vierten Durchlauf wird das Prüfmittel für die Gesamtsystemprüfung des Produktes fertiggestellt.

Es ist möglich auch zu jeweils früheren Zeitpunkten tiefer bzw. mit einer detailreicheren Abstraktion zu modellieren. So wäre es denkbar das Prüfmittel für Gesamtsystemprüfungen (PM-SP) im ersten Durchlauf schon auf Modulebene zu konzipieren (wie im Anwendungsbeispiel). In den weiteren Durchläufen soll dann immer mindestens so tief modelliert werden wie im Durchlauf davor. Zusätzlich soll die Modellierungstiefe/Abstraktionsebene des Prüfmittels nicht die Modellierungstiefe/Abstraktionsebene der Produktbeschreibung übersteigen. Zum Beispiel wäre es nicht sinnvoll das Produktkonzept auf Systemebene als Grundlage der Prüfplanung zu benutzen und daraufhin das Prüfmittel auf Modulebene zu konzipieren.

- **Parallele oder abwechselnde Durchführung von Produktentwicklung und Prüfplanung/Prüfmittelentwicklung**

Im beschriebenen Referenzprozess und auch an den meisten Stellen dieses Kapitels wird davon ausgegangen, dass die Produktentwicklung kontinuierlich abläuft und nicht angehalten wird. Parallel dazu findet dabei im Wechselspiel die Produktionssystementwicklung mit der darin enthaltenen Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung statt. Immer zu Beginn eines neuen V-Modell Zyklus des Produktes werden dann der Produktentwicklung Informationen bzw. Anforderungen übergeben.

Grundsätzlich ist auch denkbar abwechselnd die Produktentwicklung und die Prüfplanung/Prüfmittelentwicklung zu betreiben. Die Produktentwicklung würde dann z. B. zunächst auf Systemebene konzipieren. Diese würde dann gestoppt. Die Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung startet. Das Prüfmittel auf Systemebene wird konzipiert. Die Prüfmittelentwicklung wird daraufhin gestoppt. Die Informationen/Anforderungen aus der Prüfmittelentwicklung werden in die Produktentwicklung übergeben. Daraufhin startet die Prüfmittelentwicklung erneut, usw. Dieses Vorgehen ist in Kapitel A3 dargestellt.

- **Unterstützende Tätigkeiten in den einzelnen Prozessschritten**

Im generischen Referenzprozess werden bei verschiedenen Prozessschritten die jeweiligen Funktionsbereiche von Experten aus anderen Funktionsbereichen unterstützt. Es wurde dabei versucht die wesentlichen unterstützenden Tätigkeiten abzubilden. Beispielsweise unterstützt die Prüfplanung bei der Anforderungsaufnahme und Konzipierung des Prüfmittels für Gesamtsystemprüfungen (vgl. Bild 4-5, Marker F).

Darüber hinaus kann es sinnvoll sein weitere Experten zur Unterstützung aus den abgebildeten Funktionsbereichen zur Bearbeitung verschiedener Prozessschritte heranzuziehen. Auch können weitere, bisher nicht abgebildete, Funktionsbereiche bzw. Experten zur Unterstützung der Bearbeitung verschiedener Prozessschritte herangezogen werden. Im Referenzprozess wird auf Funktionsbereiche bzw. auf deren Experten außerhalb des generischen Entwicklungsprozesses nur bei der Identifikation

von Informationsquellen und der daraus folgenden Identifikation von Prüfmerkmalen und Anforderungen explizit zugegriffen.

- **Gewünschter Zeitpunkt der Fertigstellung des Prüfmittels**

In der Beschreibung des generischen Referenzprozesses (Kapitel 4.1 und Kapitel 4.2) wird davon ausgegangen, dass das Prüfmittel zum Produktionsstart (SOP) bzw. gleichzeitig mit dem Produkt fertig gestellt werden soll (*M4*). Es ist auch denkbar, dass das Prüfmittel schon zu einem früheren Zeitpunkt fertig gestellt werden soll, z. B. zu Meilenstein *M3*. Zum Beispiel könnten so Vorserienprodukte schon mit dem zu entwickelnden Prüfmittel geprüft werden. Insbesondere bei vielen geplanten und zu prüfenden Vorserienprodukten ist dies denkbar. Ein weiterer Grund könnte der Wunsch nach einer intensiven Erprobung/Eigenschaftsabsicherung/Validierung/Verifizierung/Prüfmittelfähigkeitsuntersuchung des Prüfmittels sein.

5 Anwendung der Entwicklungssystematik

In Kapitel 5 wird die Anwendung der Systematik anhand eines Anwendungsbeispiels beschrieben. Dazu wird in Kapitel 5.1 zunächst die Ausgangssituation des Unternehmens dargestellt und in das Anwendungsbeispiel eingeführt. Davon ausgehend wird in Kapitel 5.2 ein projekt- und unternehmensspezifischer Entwicklungsprozess abgeleitet. Der erste Durchlauf des abgeleiteten Entwicklungsprozesses wird in Kapitel 5.3 anhand des Anwendungsbeispiels beschrieben. Die Anwendung der Systematik erfolgte parallel zur konkreten Entwicklungsarbeit und unter Einbeziehung der Entwicklungsbeteiligten. In Kapitel 5.4 wird die Entwicklungssystematik mit den Anforderungen abgeglichen.

5.1 Ausgangssituation des Unternehmens und Einführung in das Anwendungsbeispiel

In Kapitel 5.1.1 wird zunächst die Ausgangssituation des Unternehmens dargestellt, welches das Anwendungsbeispiel zur Verfügung stellt. Das Anwendungsbeispiel wird in Kapitel 5.1.2 beschrieben.

5.1.1 Ausgangssituation des Unternehmens

Die Firma KEB Automation KG (Kurzform KEB) entwickelt, produziert und vertreibt innovative Produkte im Bereich der Antriebs- und Automatisierungstechnik, Erneuerbaren Energien und Automotive. Eine Kernkompetenz ist die Entwicklung von elektrischen Frequenzumrichtern und Wechselrichtern, also Leistungselektroniken, die die Leistungsabgabe an elektrische Drehstrommotoren stellen und zum Teil auch selbst regeln. Durch diese Leistungselektroniken wird eine effiziente Drehzahlregelung von Industriemotoren gewährleistet. Die beschriebenen Leistungselektroniken werden im Moment hauptsächlich für die Anwendung im Industriebereich entwickelt.

Im Zuge der Elektrifizierung von Fahrzeugen kommen Wechselrichtern einen hohen Stellenwert zu. Die im Elektrofahrzeug vorhandene Hochvolt-Gleichspannung (HV-DC – High Voltage Direct Current) kann mithilfe von Wechselrichtern in die von den Elektromotoren im Fahrzeug benötigten Drehstromspannungen (AC – Alternating Current) gewandelt werden.

Das betrachtete Unternehmen hat sich intensiv mit dem neu entstehenden Markt der Elektromobilität beschäftigt. Das Unternehmen sieht dabei für sich große Erfolgchancen im Bereich der Nutzfahrzeuge. Insbesondere die Versorgung des Antriebs der Nebenaggregate mit eklektischer Leistung mittels Wechselrichtern scheint erfolgversprechend. Diese Nutzfahrzeuge können z. B. Busse, LKWs, Kommunalfahrzeuge sowie Landmaschinen und Baumaschinen aller Art sein. Zu den Landmaschinen zählen z. B. Traktoren, Mähdrescher, Erntemaschinen und Anbaugeräte. Beispiele für Baumaschinen sind z. B. Bagger, Raupen und Walzen.

Unter einem Antrieb eines Nebenaggregats sind Antriebssysteme zu verstehen, die für unterschiedliche Hilfsanwendungen im Nutzfahrzeug zum Einsatz kommen. Beispiele hierfür sind (vgl. auch [ALO03]): Klimakompressoren, Lüfter, Hydraulikpumpen, Kühlmittelpumpen, Druckluftkompressoren, Anbaugeräte (z. B. von Landmaschinen). In konventionellen Fahrzeugkonzepten werden Nebenaggregate klassischerweise direkt mit dem Verbrennungsmotor, z. B. über einen Riementrieb, gekoppelt. Die Leistungsaufnahme der Nebenaggregate hängt damit also unmittelbar von der Drehzahl des Hauptantriebs (in der Regel ein Verbrennungsmotor) ab. Die Leistungsaufnahme der Nebenaggregate kann somit nur sehr eingeschränkt an den aktuellen Leistungsbedarf der Nebenaggregate angepasst werden.

Eine Elektrifizierung der Nebenantriebe ermöglicht dagegen eine bedarfsgerechte Versorgung. Weitere Vorteile der Elektrifizierung der Nebenaggregate können dabei sein: Ortsunabhängigkeit von Hauptantrieb und Nebenantrieb, Reduzierung von mechanischen Komponenten wie z. B. Keilriemen, Umlenkrollen etc. und somit Reduzierung von Wartungs- und Reparaturaufwand.

Für die verschiedenen Einsatzzwecke von Antriebswechselrichtersystemen für Nebenantriebe werden innerhalb eines Fahrzeugs mehrere Wechselrichter benötigt (z. B. Klimakompressor, Luftdruckkompressor, Ölpumpe, usw.). Zudem werden abhängig von der Leistungsaufnahme der einzelnen Nebenaggregate in einem Fahrzeug unterschiedliche Wechselrichter (bezüglich der Leistung) benötigt.

Das betrachtete Unternehmen hat daher die strategische Entscheidung getroffen für den sich ergebenden Markt von Wechselrichtern zur Versorgung von Nebenantrieben tätig zu werden und solche Wechselrichter zu entwickeln, zu fertigen und zu vertreiben.

Die Kompetenz zur Entwicklung und Produktion von Wechselrichtern ist beim Unternehmen vorhanden. Die zu erwartenden Anforderungen an die eigentliche Leistungselektronik sind vergleichbar mit denen aus dem Industriebereich. Die grundsätzliche schaltungstechnische Topologie der Leistungselektronik aus dem Industriebereich und der Fahrzeugtechnik sind daher sehr ähnlich. Aus den Anwendungen in den Nutzfahrzeugen sind jedoch neue Anforderungen z. B. hinsichtlich Rüttelfestigkeit, IP-Schutzart, Kommunikationsschnittstellen zum Fahrzeug usw. zu erwarten. Aus dem modularen Wechselrichtersystem (wird in Kapitel 5.1.2 erläutert) sind ggf. ebenfalls neue Anforderungen zu erwarten, z. B. an die interne Kommunikation im zu entwickelnden Wechselrichtersystem. Diese folgen letztlich auch aus den Erfordernissen und somit Anforderungen seitens des Marktes. Dieser Markt der Elektromobilität stellt für das Unternehmen jedoch Neuland dar. Diese Marktneuheit in Relation zur Technologieneuheit ist in Bild 5-1 dargestellt.

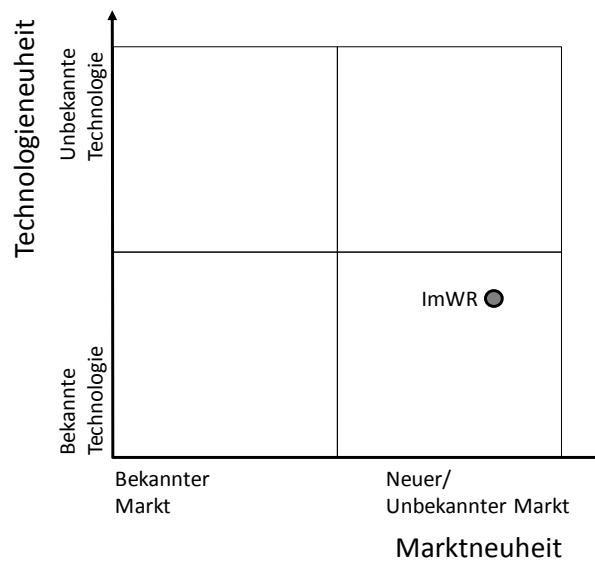


Bild 5-1: Technologie-Markt-Matrix in Anlehnung an [Ans65] und [Kno16]

5.1.2 Einführung in das Anwendungsbeispiel

Das geplante Produkt zur Bedienung des sich ergebenden Marktes soll modular aufgebaut werden. Je nach Anwendungsfall soll sich der Kunde aus verschiedenen Modulen ein Gesamtsystem konfigurieren können. Wesentlicher Grund für diese Kundenkonfiguration sind die je nach Anwendung unterschiedliche Anzahl zu versorgender Nebenantriebe und deren jeweilige Leistung. Es soll daher ein innovatives modulares Wechselrichtersystem (im weiteren Verlauf ImWR genannt) entwickelt werden.

Die grundsätzliche Entwicklung des ImWR erfolgte dabei im Rahmen des Spitzenclusters *Intelligente Technische Systeme OstWestfalenLippe* (it's owl) im Innovationsprojekt *Innovatives modulares Antriebswechselrichtersystem für die Elektrifizierung von Nebenaggregaten in Fahrzeuganwendungen* (itsOWL-ImWR) [SDS+17], [ITS17], [ITS]. Ein Arbeitspaket war dabei die integrative Erarbeitung des zugehörigen End of Line Prüfmittels.

Bild 5-2 zeigt einen Anwendungsfall im Bereich der Landmaschinentechnik. Verschiedene Nebenantriebe wie die dargestellte Hydraulikpumpe, der Luftkompressor, der Klimakompressor und der Antrieb des Anbaugerätes sind durch das ImWR mit elektrischer Energie zu versorgen.

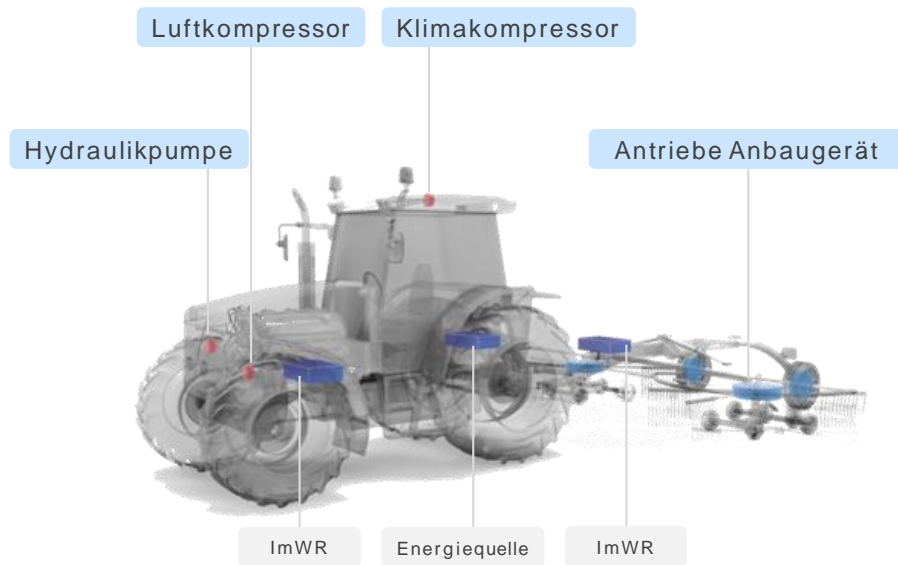


Bild 5-2: Anwendungsbeispiel eines innovativen modularen Wechselrichters [KEB Automation KG]

Das ImWR soll einen Gleichspannungseingang fahrzeugseitig besitzen, welches mit der Energiequelle des Fahrzeugs verbunden ist und mehrere Drehstromausgänge aufweist, die die Nebenantriebe mit elektrischer Energie versorgen. Typischerweise besitzen bisherige Systeme, von KEB oder anderen Herstellern, nur einen Drehstromausgang. Vereinfacht vorgestellt, besteht das geplante Wechselrichtersystem aus mehreren internen Wechselrichtern, wobei ein interner Wechselrichter pro Drehstromausgang verwendet wird. Ein „interner Wechselrichter“ stellt also in erster Näherung ein Modul dar. Zusätzlich müssen diese „internen Wechselrichter“ von einer zentralen Stelle gesteuert bzw. geregelt werden. Weiterhin sind zusätzliche Nebenfunktionen aus dem sich ergebenden Markt gefordert, wie z. B. Temperatursensoreingänge, um einzelne Motortemperaturen zu überwachen.

Die Prinzipskizze in Bild 5-3 stellt einen ersten, groben Entwurf des ImWR dar. Es sind verschiedene Module zur Versorgung der Nebenantriebe mit den Buchstaben A, B, C angedeutet, die für die unterschiedlichen Leistungen stehen (A entspricht kleine Ausgangsleistung; B entspricht mittlere Ausgangsleistung; C entspricht hohe Ausgangsleistung). Das erste Modul (links), später Kopfmodul genannt, soll die verschiedenen Schnittstellen zum Fahrzeug, wie Kühlmediumanschluss, Kommunikationsschnittstelle, Energieversorgungsschnittstelle usw. beinhalten.

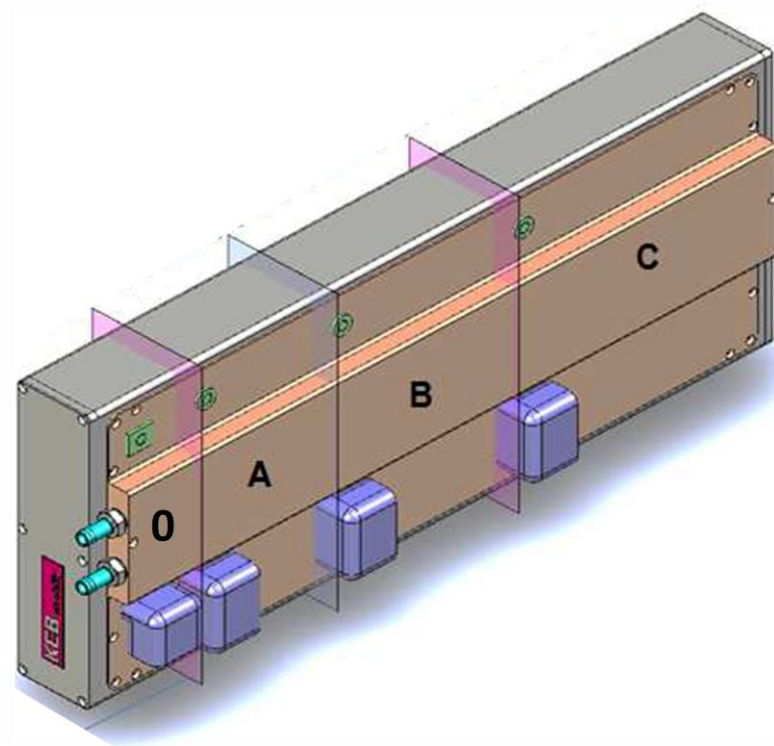


Bild 5-3: Erste, grobe Prinzipskizze des ImWR (Konfiguration A, B, C und Kopfmodul 0) [KEB Automation KG]

5.2 Ableitung des projekt- und unternehmensspezifischen Entwicklungsprozesses

Zur Ableitung des projekt- und unternehmensspezifischen integrativen Entwicklungsprozesses werden zunächst die wesentlichen Randbedingungen zusammengefasst.

Randbedingungen

Durch den zu erwartenden ähnlichen topologischen Aufbau des Leistungsteils und teilweise der Steuerung des ImWR zu den bisher entwickelten Industrieumrichtern sind grundsätzlich keine wesentlich neuen Anforderungen an das Prüfmittel zu erwarten. Jedoch sind durch den neuartigen modularen Aufbau, der durch den Kunden konfiguriert werden kann, Auswirkungen auf das Produkt, das zugehörige Produktionssystem und das zugehörige Prüfmittel zu erwarten. Die Produktion muss den modularen Aufbau und die Konfigurationen des Kunden berücksichtigen (unterschiedliche Kombinationen der Module 0, A, B, C möglich). Das Prüfmittel muss am Ende der Fertigung ebenfalls den modularen Aufbau und die kundenspezifische Konfiguration berücksichtigen. Dies stellt eine wesentliche Neuerung gegenüber den bisher eingesetzten – und oftmals durch das zu betrachtende Unternehmen selbst entwickelten Prüfmitteln – dar. Durch die zusätzlichen Nebenfunktionen des Produktes verursacht, sind Auswirkungen zu erwarten, die sich auf die Produktion und die Prüfmittel auswirken. Es wird weiter-

hin erwartet, dass sich Anforderungen aus dem sich neu bildenden Markt und den sich dort ergebenden neuen Anwendungen in Fahrzeugen ergeben, die sich auf das Prüfmittel auswirken. In der Prüfmittelentwicklung liegen keine Erfahrungswerte für Prüfungen von Produkten in diesem neuen Markt vor. In der Produktentwicklung sind zur Entwicklung des ImWR drei V-Modell Zyklen vorgesehen.

Es lässt sich folgendes aus den Randbedingungen folgern:

- Für die Produktentwicklung des ImWR sind drei V-Modell Zyklen vorgesehen. Daraus ergibt sich, dass der integrative Prozess drei Durchläufe besitzen soll.
- Bei dem geplanten Entwicklungsvorhaben stellt die Zeit bis zum Produktionsstart (time to market) eine wesentliche Erfolgsgröße dar. Es wird daher, wie im Referenzprozess, die Prüfplanung und dazugehörige Prüfmittelentwicklung parallel zur Produktentwicklung betrieben. Die Produktentwicklung wird dabei nicht unterbrochen. Die Produktentwicklung und die Prüfplanung mit zugehöriger Prüfmittelentwicklung werden wieder im Wechselspiel betrieben.
- Grundsätzlich sind Erfahrungswerte für die Entwicklung und Produktion von Wechselrichtern vorhanden. Ebenso sind Erfahrungswerte für die Prüfung bzw. die Prüfmittelentwicklung für Wechselrichter vorhanden. Dieses Erfahrungswissen ist bei der Entwicklung mit einzubeziehen. Ein zukünftiges Modul des ImWR entspricht vereinfacht einem bisherigen Wechselrichter.

Es ist zu erwarten, dass die Prüfung der einzelnen Module daher keine großen Schwierigkeiten bereiten dürfte, da hier genügend Erfahrungswissen vorhanden ist. Es kann bei der Prüfung dieser Module auf bestehende Prüfmittel bzw. auf bestehendes Erfahrungswissen zur Entwicklung entsprechender Prüfmittel zurückgegriffen werden. Die Informationen im Prüfplan, der im ersten Durchlauf entsteht, können diese Einschätzung untermauern. Auch sind keine wesentlichen neuartigen Anforderungen vom Prüfmittel für die Module an die Produktentwicklung oder andere Funktionsbereiche/Unternehmensbereiche zu erwarten. Daraus ergibt sich, dass mit der Prüfmittelentwicklung für die einzelnen Module nicht im ersten Durchlauf begonnen werden muss.

Die Prüfung eines gesamten modularen Aufbaus, wie beim ImWR, und den daraus folgenden Konfigurationen ist für das Unternehmen neu. Ein Prüfmittel, das solche in großer Stückzahl gefertigte modulare Wechselrichtersysteme zu tolerierbaren Kosten prüfen kann, ist nicht vorhanden. Erfahrungswerte zur Entwicklung eines Prüfmittels, welches einen solchen modularen Aufbau des Produktes berücksichtigt, sind kaum vorhanden. Es wird vermutet, dass ein Prüfmittel für ein solches Wechselrichtersystem Anforderungen an das Produkt haben kann, die für das Unternehmen neu sind. Daraus ergibt sich, dass mit der Prüfmittelentwicklung für das Gesamtsystem ImWR frühestmöglich, schon im ersten Durchlauf begonnen werden soll. Es soll dabei das Prüfmittel selbst auf Modulebene konzipiert werden, um die Wechselwirkungen zwischen den Modulen des Produktes und denen des Prüfmittels

abzubilden. Dazu muss der „Absprungpunkt/Absprunghöhe“ in der Produktentwicklung ebenfalls frühestens auf Modulebene sein. Da erwartet wird, dass das Prüfmittel für das Gesamtsystem nicht nur Integrationsprüfungen durchführen soll, sondern sich ergeben kann, dass auch tiefergehende Prüfungen durch das Prüfmittel für das Gesamtsystem erforderlich sind, sollen ggf. bestimmte Dokumente aus dem domänenspezifischen Entwurf mit berücksichtigt werden. Es sollen im ersten Durchlauf die Entwicklungsdokumente des domänenspezifischen Entwurfs des ImWR berücksichtigt werden, die ohne großen Zusatzaufwand analysiert werden können.

- Es sind neuartige, für das Unternehmen bisher unbekannte Anforderungen insbesondere aus dem Markt zu erwarten. Es ist zu erwarten, dass sich diese auf die Prüfmittelentwicklung auswirken. Es liegen dabei keine Erfahrungswerte zur Entwicklung eines Prüfmittels zur Prüfung von Produkten in diesem Markt vor. Es kann z. B. sein, dass Kunden/Kundengruppen unmittelbar Anforderungen an die Prüfung in der Produktion stellen (gewünschte/vorgeschriebene Prüfmerkmale) und somit auch direkt Anforderungen an das Prüfmittel vorhanden sind. Es soll daher frühzeitig mit der Prüfmittelentwicklung begonnen werden, um die Auswirkungen solcher Anforderungen sichtbar zu machen und die Möglichkeit zu schaffen darauf frühzeitig reagieren zu können. Dies ist ein wesentlicher Grund für den Beginn der Prüfmittelentwicklung im ersten Durchlauf.

Aus den Randbedingungen und den daraus abgeleiteten Folgerungen ergibt sich der erste Durchlauf des integrativen Entwicklungsprozesses für das ImWR (Bild 5-4).

Der zweite und dritte Durchlauf soll auf Basis der Erkenntnisse aus dem ersten Durchlauf detailliert geplant werden.

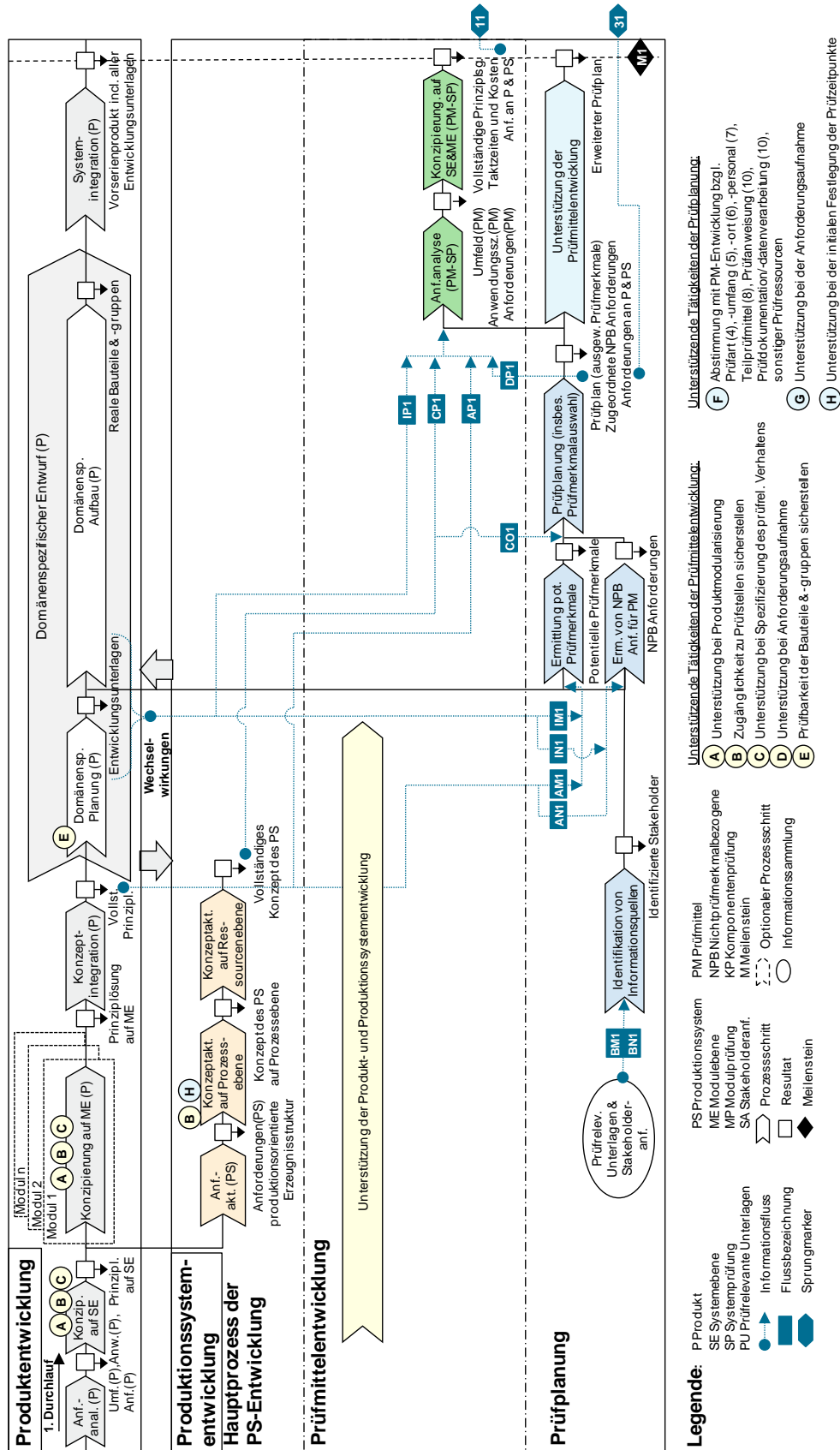


Bild 5-4: Projekt- und unternehmensspezifischer integrativer Produkt- und Prüfmittelentwicklungsprozess

5.3 Anwendung des projekt- und unternehmensspezifischen integrativen Entwicklungsprozesses

In diesem Kapitel wird der entstandene projekt- und unternehmensspezifische integrative Entwicklungsprozess angewendet. Es wird dabei exemplarisch für alle Durchläufe der erste Durchlauf beschrieben, wobei der Fokus auf der Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung liegt. Da das Prüfmittel für Systemprüfungen des Produktes tendenziell am ehesten für ein spezielles Produkt entwickelt wird, wird in diesem Kapitel die Entwicklung des Prüfmittels für das Fertigungsende betrachtet (End of Line Prüfung). Das Anwendungsbeispiel mit seinen Informationen ist an manchen Stellen leicht verfremdet und vereinfacht. Es werden so keine sensiblen Informationen des Unternehmens dargestellt, was zum Verständnis der Systematik jedoch unerheblich ist. Zudem ist durch die Vereinfachung ein schnelleres Verständnis für den Leser möglich.

In Kapitel 5.3.1 wird zunächst die Produktentwicklung beschrieben. In Kapitel 5.3.2 wird der Hauptprozess der Produktionssystementwicklung erläutert. In Kapitel 5.3.3 wird die Prüfplanung beschrieben, die viele wesentliche Informationen aus der beschriebenen Produktentwicklung und dem Hauptprozess der Produktionssystementwicklung ableitet. Ausgehend von dem in der Prüfplanung erarbeiteten Prüfplan wird in Kapitel 5.3.4 die Prüfmittelentwicklung beschrieben.

5.3.1 Produktentwicklung

In diesem Kapitel werden die Modelle und Informationen auszugsweise dargestellt, die für die Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung im weiteren Verlauf wesentlich sind.

5.3.1.1 Anforderungsanalyse

Das Ergebnis der Anforderungsanalyse ist an dieser Stelle das Umfeldmodell, die Anwendungsszenarien und die Anforderungsliste.

Umfeldmodell

Das leicht vereinfachte Umfeldmodell²⁸ des ImWR ist in Bild 5-5 dargestellt.

²⁸ Abweichend von der Darstellung der Partialmodelle CONSENS in der Literatur (z. B. [Gau10]) wird hier und bei den folgenden Partialmodellen eine Schriftart mit Serifen verwendet. Es besteht ansonsten die Gefahr Ziffern nicht eindeutig identifizieren zu können. Der Kleinbuchstabe l (l) und der Großbuchstabe I (I) können z. B. sonst nicht auseinander gehalten werden [DIN1338, S. 21]. Insbesondere in dem Anwendungsbeispiel ist diese Unterscheidung wichtig, da in der Antriebstechnik beide Ziffern oftmals Verwendung finden. Die serifenlose Schrift ist daher für den anspruchsvollen Formelsatz nicht geeignet [DIN1338, S. 21], [PTB98].

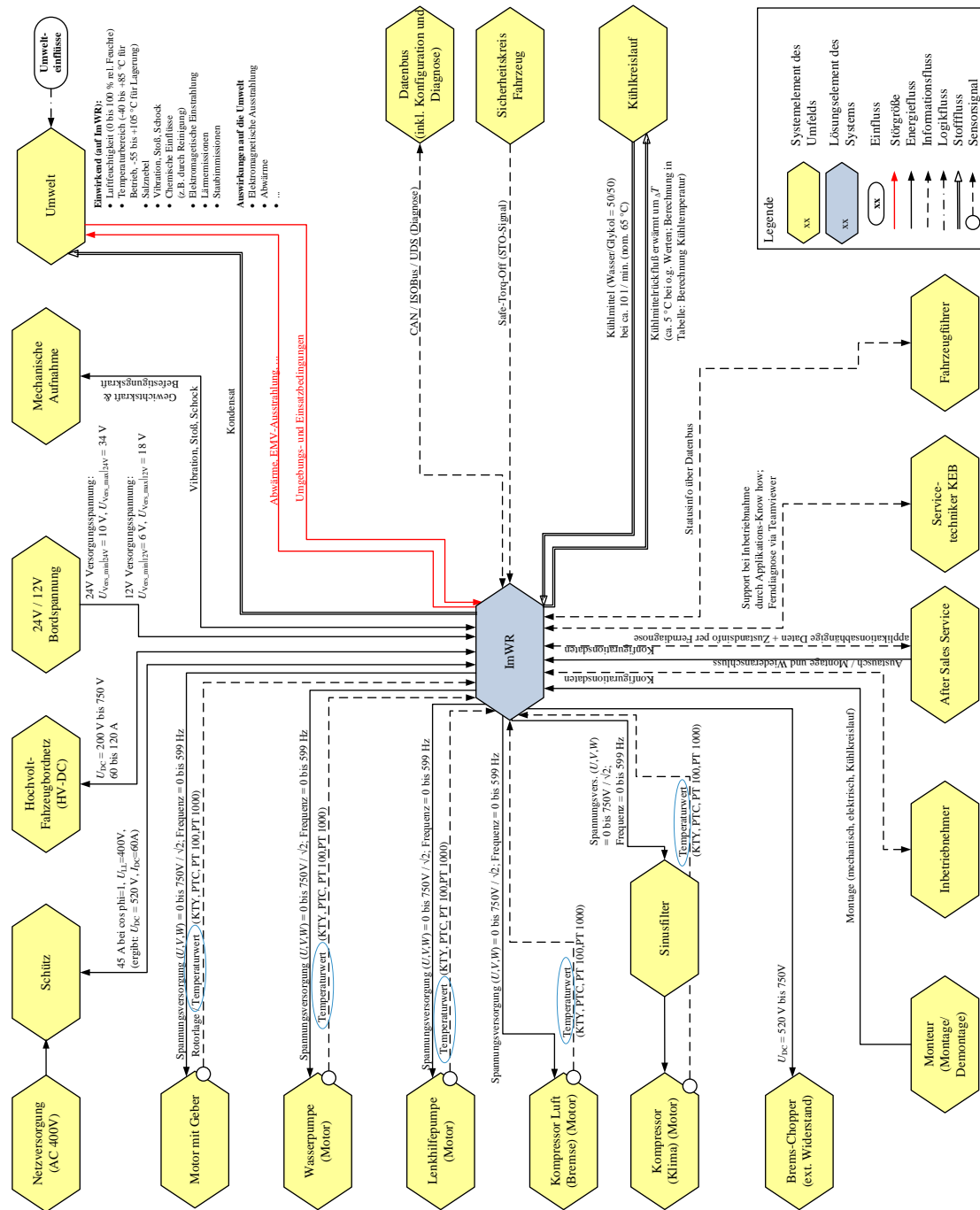


Bild 5-5: Umfeldmodell des ImWR

In der Mitte befindet sich das zu entwickelnde innovative modulare Wechselrichtersystem (ImWR). Über Flussbeziehungen ist dabei das ImWR mit seinen Umfeldelementen verbunden. Oben befinden sich die verschiedenen Energienetze, zu denen das ImWR verbunden sein kann (Netzversorgung, Hochvolt-Fahrzeuginstrument, 12 V / 24 V Bordspannung). Auf der linken Seite sind mögliche verschiedene Motore zu sehen. Sie stellen die Nebenantriebe dar, die durch das ImWR mit elektrischer Leistung (Spannungsversorgung) versorgt werden sollen. Die Versorgung dieser Nebenantriebe mit elektrischer

scher Leistung stellt das Hauptziel der Entwicklungsaufgabe dar. Die Motore (bzw. die darin verbauten Sensoren) können dabei einen Temperaturwert zurück an das ImWR liefern. Der Fluss *Temperaturwert* ist im Umfeldmodell des ImWR (Bild 5-5) mit einem blauen Oval gekennzeichnet (anhand der Motortemperaturerfassung wird in diesem Kapitel durchgängig der Pfad der Informationen durch den gesamten Entwicklungsprozess dieses Durchlaufs bzw. durch die verwendeten Modelle beschrieben, vgl. auch Bild 5-32). Unten befinden sich die verschiedenen Benutzerrollen, die in Wechselwirkung mit dem ImWR stehen. Auf der rechten Seite ist die Verbindung zum Kühlkreislauf (im Normalfall des Fahrzeugs) mit Vorlauf und Rücklauf dargestellt. Weiterhin sind rechts die Kommunikationsverbindungen mit dem Fahrzeug dargestellt und die Wechselwirkung mit der Umwelt. Die Verbindung zwischen dem ImWR und dem Umfeldelement *Datenbus* stellt die wesentliche Kommunikationsverbindung zwischen dem ImWR und dem Fahrzeug dar.

Anmerkung: Im Umfeldmodell hätte, falls zu diesem Zeitpunkt schon antizipierbar, das Prüfmittel in das Umfeldmodell eingefügt werden können. Das Prüfmittel für das Gesamtsystem simuliert oftmals das Umfeld des Produktes, also in diesem Fall des ImWR. Dies lässt sich später im Umfeldmodell des Prüfmittels des ImWR erkennen (vgl. Bild 5-16).

Anwendungsszenarien

Nachfolgend wird eine kurze Übersicht über die Anwendungsszenarien aufgelistet:

1. Applikations- und kundenspezifische Konfiguration
2. Kundenspezifisches Angebot
3. Fertigungs- und Prozessunterlagen für kundenspezifische Konfiguration erstellen
4. Montage und Prüfung des ImWR bei KEB
5. Verpackung und Versand
6. Montage und Installation im Fahrzeug
7. Inbetriebnahme im Fahrzeug
8. Start, Betrieb und Abschaltung
9. After Sales Service (Ferndiagnose, Service, Austausch und Schulung)
10. Schadendiagnose (Rückläufer)
11. Demontage und Recycling

Die Anwendungsszenarien orientieren sich dabei am Produktlebenszyklus. Unter Punkt vier ist mit dem Anwendungsszenario *Montage und Prüfung des ImWR bei KEB* die Prüfung des Gesamtsystems bereits berücksichtigt. Es ist festgelegt, dass eine Prüfung des Gesamtsystems erfolgen soll. Weiterhin entsteht hier die Forderung, dass das Prüfmittel zur Prüfung des Gesamtsystems ImWR alle möglichen Varianten des ImWR be-

rücksichtigen soll, das heißt in der Lage sein soll diese zu prüfen. Unter Punkt 10 ist das Anwendungsszenario *Schadensdiagnose (Rückläufer)* beschrieben. Es beschreibt das Vorgehen in dem Fall, dass ein defekter ImWR aus dem Feld zurück zu KEB zur Reparatur kommt. Hier wird ebenfalls das Prüfmittel erwähnt. Falls das Prüfmittel für die Rückläufer das gleiche ist, wie das der Produktion (steht an dieser Stelle noch nicht fest), muss dabei der Durchsatz berücksichtigt werden.

Anforderungsliste

In Bild 5-6 ist auszugsweise eine Anforderungsliste dargestellt. Dabei liegt der Fokus auf Anforderungen, die im Sinne der Prüfmittelentwicklung im weiteren Verlauf von Bedeutung sind. Anforderung Nummer 12.2 wird im Folgenden immer wieder als durchgängiges Beispiel herangezogen.

Anforderungsliste für das ImWR				
Verweis auf Quelle	Nr.	FA/NFA	Beschreibung der Anforderung	Nr. der abgeleiteten Funktion
1 Hauptanforderungen				
U_Motore, U_Netz(nachbildung)	1.1	FA	Das ImWR muss Leistung an seine Verbraucher (Motore, Netz) abgeben können.	1.2.1.2
8 Herstellung				
AWSZ4	8.3	NFA	Es muss ein Prüfmittel für das modulare Wechselrichtersystem bereitgestellt werden, welches geeignet ist die Konfigurationen des ImWR zu prüfen (Stückzahl x / Jahr).	
12 Sensorik				
U_Motore	12.2	FA	Das ImWR muss den Temperaturwert der Motore (Nebenantrieb) verarbeiten können.	1.2.2.4.2.d

Bild 5-6: Anforderungsliste für das ImWR

In der linken Spalte sind Verweise auf die Quelle der jeweiligen Anforderung eingetragen. Eine Quellenangabe, die mit *U_* beginnt, steht dabei für eine Anforderung, die aus dem Umfeldmodell abgeleitet ist. Eine Quellenangabe, die mit *AWSZ* beginnt, steht dabei für eine Anforderung, die aus einem Anwendungsszenario abgeleitet ist. Die nachfolgende Zahl steht dabei für die Nummer des Anwendungsszenarios. *AWSZ4* beschreibt also das vierte Anwendungsszenario als Quelle der Anforderung. Die Anforderungen sind nummeriert. Es wird zwischen funktionalen Anforderungen (FA) und nicht funktionalen Anforderungen (NFA) unterschieden. Aus den funktionalen Anforderungen werden im nächsten Schritt (vgl. Kapitel 5.3.1.2) Funktionen abgeleitet. Die nicht funktionalen Anforderungen können als Bewertungskriterien herangezogen werden. Die Nummer der abgeleiteten Funktion ist in der letzten Spalte bereits eingetragen.

5.3.1.2 Konzipierung auf System- und Modulebene

Funktionshierarchie

Aus den Anforderungen ist unter Einbezug der Anwendungsszenarien die Funktionshierarchie entstanden. Bild 5-7 zeigt einen Ausschnitt der Funktionshierarchie des ImWR. Die Funktion 1.2.2.4.2.d folgt dabei aus der Anforderung 12.2 (vgl. Bild 5-6).

Das ImWR soll modular aufgebaut und vom Kunden konfiguriert werden können. Diese Modularität ist in der Funktionshierarchie berücksichtigt worden. Es existieren dazu *Pflichtfunktionen*, *Alternative Funktionen*, *Mehrfach vorhandene Funktionen* und *Optionale Funktionen*.

Die verschiedenen Funktionsarten sind dabei an die verschiedenen Arten von Features angelehnt, die ein Produkt besitzen kann (vgl. [KCH+90]). Eine ähnliche Art der Strukturierung wird in [FMS12] beschrieben. Wesentlicher Unterschied zwischen den Features und den hier dargestellten Funktionen ist, dass die Funktionen lösungsneutral sind und zum Systementwurf genutzt werden, während Features eher zur Konfiguration eines Gesamtsystems aus bestehenden Einheiten genutzt werden.

Pflichtfunktionen sind bei jeder Konfiguration des ImWR vorhanden.

Von den *Alternativen Funktionen* kann nur eine der Funktionen aktiv sein. So kann im Anwendungsbeispiel entweder auf die Drehzahl geregelt (Funktion 1.2.2.3.a) werden oder auf das Drehmoment (Funktion 1.2.2.3.b).

Weiterhin kann es *Mehrfach vorhandene Funktionen* geben. Im Anwendungsbeispiel kann es die Funktion *Drehzahl regeln* (Funktion 1.2.2.3.a) mehrfach geben. Diese Funktion gibt es dabei einmal pro „Leistungsmodul“ A, B und C. Wie in Bild 5-3 gezeigt soll das ImWR aus mehreren Modulen bestehen. Dabei sind die wesentlichen Module die „Leistungsmodule“. Pro „Leistungsmodul“ kann dabei ein Motor (Nebenantrieb) angeschlossen werden. Die Funktionalitäten der verschiedenen Module A, B und C sollen sich dabei nicht unterscheiden. Der Unterschied besteht lediglich in den Maximalleistungen, die die Module zur Verfügung stellen können. Daher existieren die Funktionen grundsätzlich mehrfach. In Bild 5-3 ist die Konfiguration A-B-C dargestellt. In dieser Konfiguration würde es die Funktion 1.2.2.3 also drei Mal geben. Bei einer Konfiguration B-A-A-A würde es diese Funktion vier Mal geben usw.

Darüber hinaus kann es *Optionale Funktionen* geben. *Optionale Funktionen* sind Funktionen, die je nach (Kunden-)Konfiguration vorhanden sein können oder auch nicht. Beispiel für eine solche Funktion ist die Funktion *Überschüssige Energie an Bremschopper leiten* (Funktion 1.2.1.4). Der Kunde kann also entscheiden, ob er eine Möglichkeit bestellen möchte mit der er überschüssige elektrische Energie an einem externen Widerstand (Bremschopper) „verbrennen“ möchte.

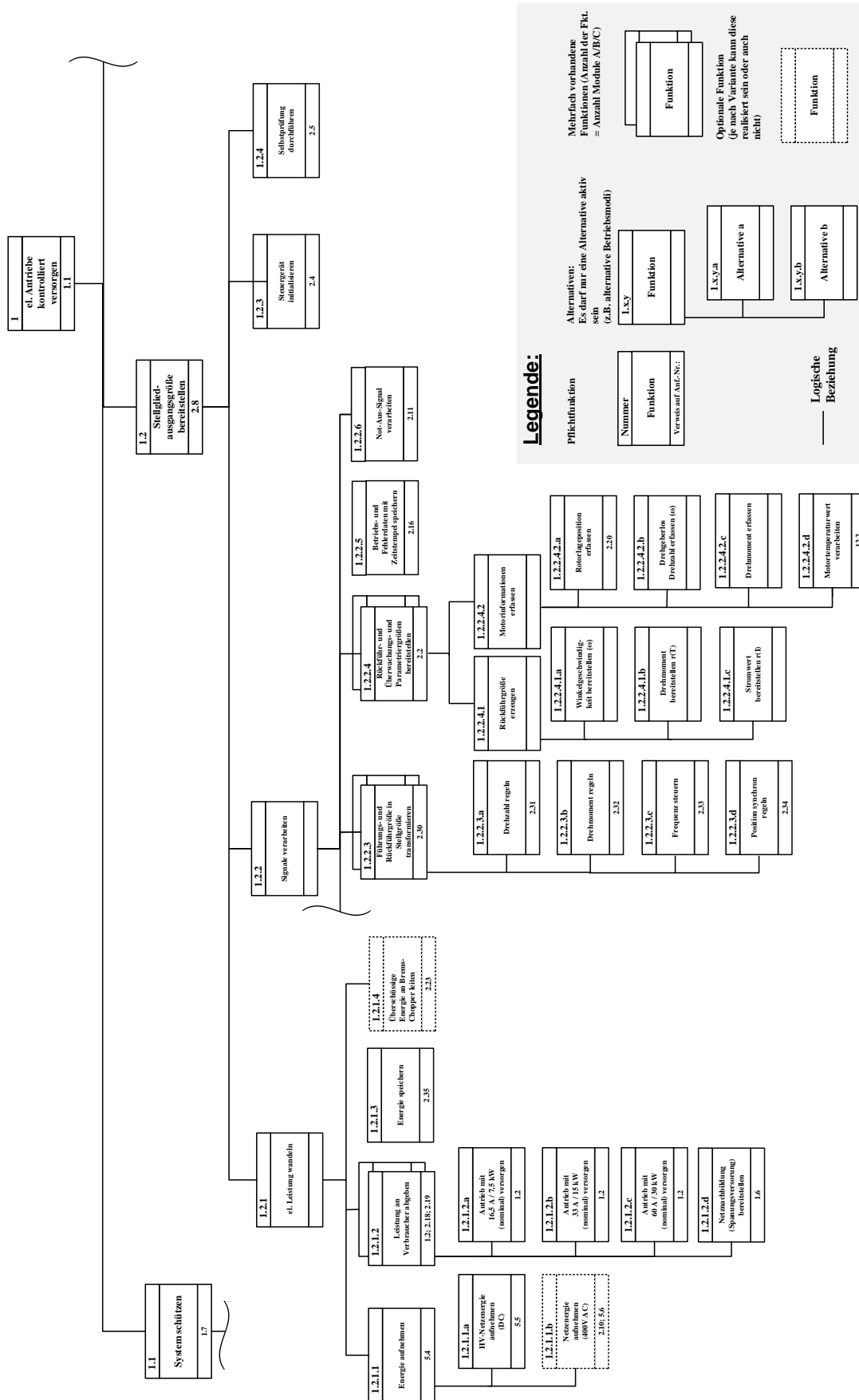


Bild 5-7: Ausschnitt der Funktionshierarchie des ImWR

Wirkstruktur

Eine vereinfachte Wirkstruktur auf Systemebene, in der alle wesentlichen Module abgebildet sind, ist in Bild 5-8 dargestellt. Die dunkelblauen Systemelemente entsprechen dabei einzelnen Modulen, deren Wirkstruktur jeweils noch detailliert ist (Konzipierung auf Modulebene).

Es ist in der Wirkstruktur zu erkennen, dass das ImWR aus folgenden wesentlichen Modulen bestehen soll:

Das **Kopfmodul 0** ist bei jedem ImWR genau einmal vorhanden. Es beinhaltet das Schaltnetzteil (SNT), welches die weiteren Module mittels der internen DC-Spannungsversorgung mit Energie versorgt. Weiterhin beinhaltet es die Informationsverarbeitung, die zum einen die Kommunikation zum Fahrzeug herstellt (über den integrierten Steckverbinder) und zum anderen die Kommunikation zu den weiteren Modulen A, B, C herstellt.

Die **Leistungsmodule A, B, C** stellen die wesentlichen Module des Entwicklungsvorhabens dar. Jedes der drei Modultypen kann mehrfach vorhanden sein. Die hintereinander dargestellten Leistungsmodule sollen dies andeuten. Jedes Leistungsmodul versorgt einen Motor (Nebenantrieb) mit elektrischer Leistung (vgl. Bild 5-7, Funktionshierarchie, Funktion 1.2.1.2, *Leistung an Verbraucher abgeben*). Zusätzlich besitzt jedes dieser Leistungsmodule einen Temperatursensoreingang, mit der die Motortemperatur erfasst werden kann. Die Leistungsmodule unterscheiden sich in ihrer Funktionalität grundsätzlich nicht. Der Unterschied zwischen den Modulen besteht lediglich aus den maximalen Strömen bzw. Leistungen die sie abgeben können. *Modul A* soll ca. 16 A bzw. 7,5 kW²⁹ abgeben können. *Modul B* soll ca. 33 A bzw. 15 kW abgeben können. *Modul C* soll 60 A bzw. 30 kW abgeben können. Die Anzahl der einzelnen Leistungsmodultypen pro ImWR stellt die wesentliche Konfigurationsmöglichkeit des Kunden dar. Je nach Anzahl und benötigter Leistung der an das ImWR anzuschließenden Nebenantriebe kann der Kunde die Anzahl und die Art der Leistungsmodule wählen. Eine Konfiguration A-B-C ist in Bild 5-3 dargestellt. Es kann auch Konfigurationen mit nur einem Leistungsmodul (für einen Nebenantrieb) geben, z. B. nur Modul C. Weiterhin kann ein Leistungsmodultyp mehrfach in einer Konfiguration vorhanden sein, z. B. B-A-A-A.

²⁹ In der Regel wird die Abgabeleistung von Wechselrichtern bzw. Frequenzumrichtern an einen Drehstrommotor in kVA (Scheinleistung) angegeben für einen standardisierten Elektromotor (Wirkungsgrad, Leistungsfaktor). In kW wird meist die mechanische Abgabeleistung des Elektromotors an der Antriebswelle angegeben. Zur Erklärung der Systematik wird hier vereinfachend angenommen, dass die mechanische Abgabeleistung der elektrischen Abgabeleistung entspricht.

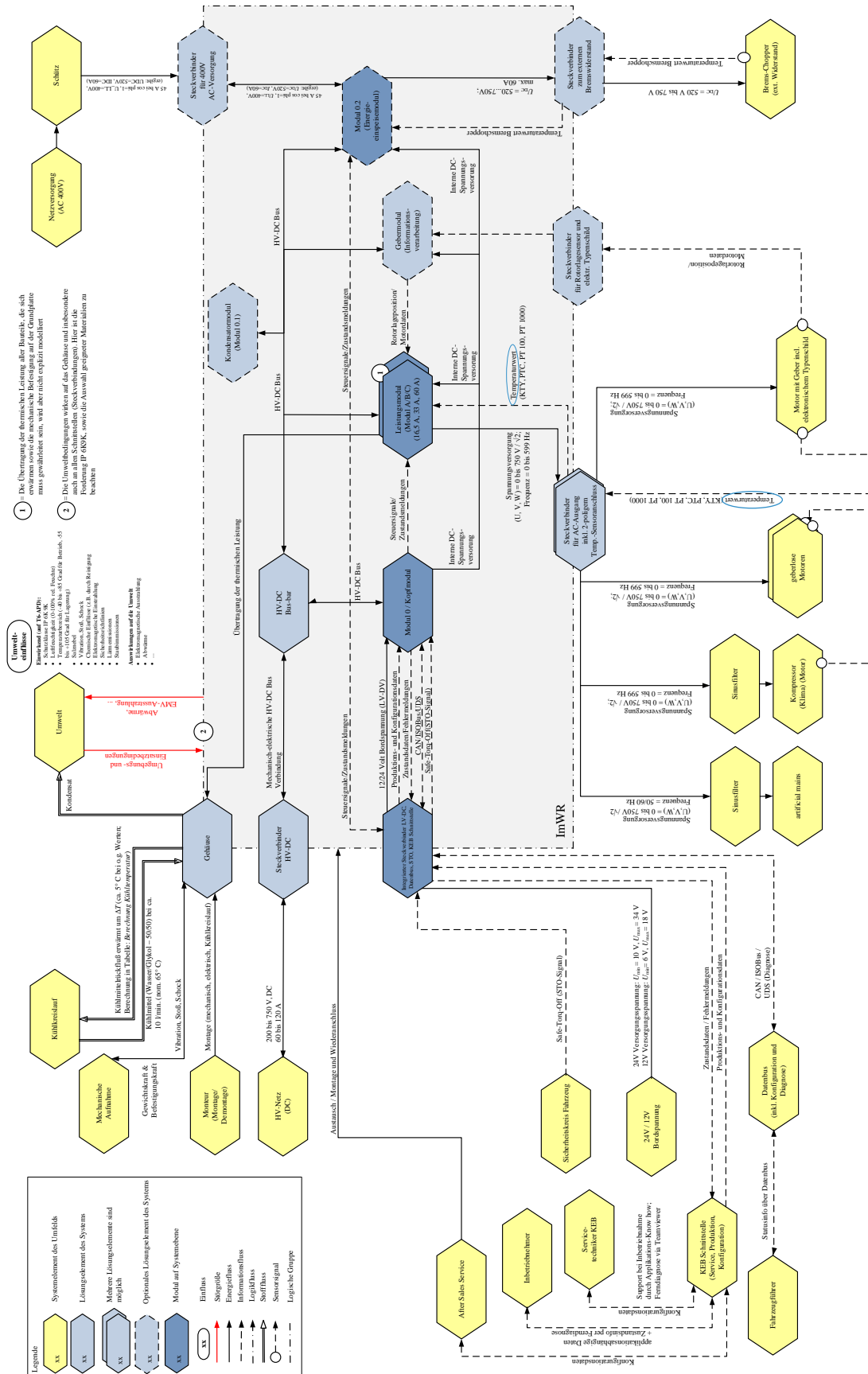


Bild 5-8: Vereinfachte Wirkstruktur des ImWR auf Systemebene

Das **Energieeinspeisemodul 0.2** ist ein optionales Modul. Das heißt dieses Modul kann in einem ImWR vorhanden sein. Es muss aber nicht vorhanden sein. Das Energieeinspeisemodul kann zum einen die Versorgung des Fahrzeugs aus dem Energieversorgungsnetz bei einem stehenden Fahrzeug übernehmen (z. B. Parken in der Nacht), zum anderen kann an dieses Modul ein externer Bremschopper angeschlossen werden, um überschüssige Energie zu „verbrennen“ (vgl. Bild 5-7, Funktionshierarchie, Funktion 1.2.1.4, Überschüssige Energie an Bremschopper leiten).

Das **Gehäusemodul** ist auf der Systemgrenze angedeutet. Das Gehäuse umschließt (geometrisch gesehen) alle anderen Module und schützt das System vor Umwelteinflüssen (vgl. Bild 5-7, Funktionshierarchie, Funktion 1.1, System schützen).

Grobgestalt

Eine erste grobe Gestalt des ImWR ist in Bild 5-9 dargestellt. Es ist dabei die Konfiguration A-C dargestellt. Es ist zu erkennen, dass es ein durchgängiges Gehäuse geben soll, das alle weiteren Module enthalten soll. Es muss also verschiedene Gehäuselängen geben.

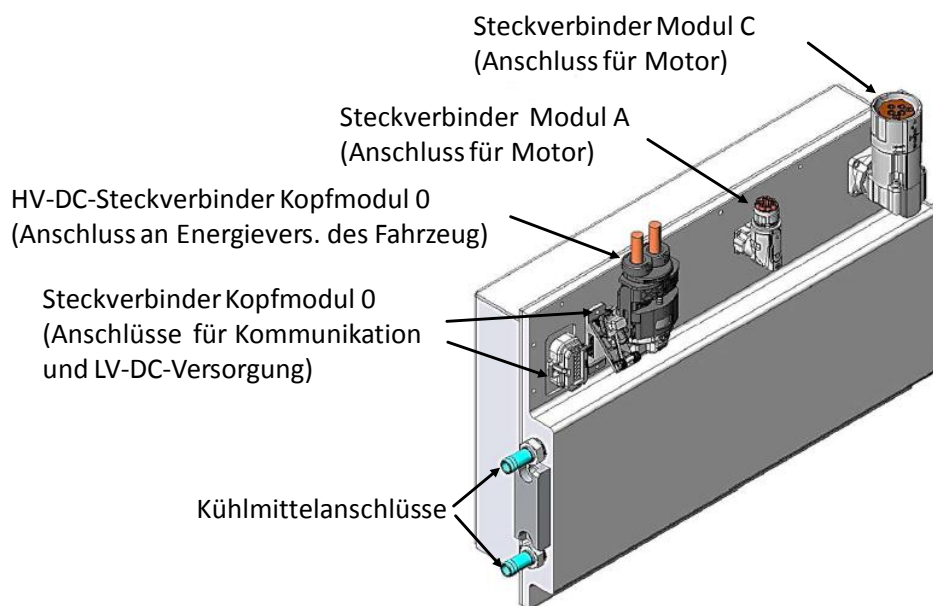


Bild 5-9: Grobgestalt des ImWR (Konfiguration A-C und Kopfmodul 0)

5.3.1.3 Domänenspezifische Planung

Die domänenspezifische Planung beschreibt die Erstellung aller Unterlagen, die zum domänenspezifischen Aufbau nötig sind. Darunter fallen z. B. Zeichnungen, Schaltpläne und Ablaufdiagramme der Software. Diese Entwicklungsunterlagen sind in diesem Prozessschritt entstanden.

Auf Basis dieser Entwicklungsunterlagen ist eine Produkt-FMEA durchgeführt worden. In dieser ist von der Entwicklung direkt eingetragen worden, welche Merkmale in der Fertigung geprüft werden sollen.

5.3.2 Hauptprozess der Produktionssystementwicklung

Im Hauptprozess der Produktionssystementwicklung ist eine erste grobe Prozessfolge entstanden. Erste Ressourcen sind festgelegt worden. Aufgrund der Neuartigkeit des modularen Aufbaus des ImWR liegt zu Beginn des ersten Durchlaufs lediglich eine grobe Produktionssystembeschreibung vor. Die End-of-Line Prüfung, die durch das zu entwickelnde Prüfmittel durchgeführt werden soll, befindet sich am Fertigungsende als letzter Prozessschritt vor der Verpackung (vgl. Bild 5-15).

5.3.3 Prüfplanung

In diesem Kapitel wird die Prüfplanung des ersten Durchlaufs beschrieben. Es wird dabei vorgegangen wie in Kapitel 4.2.4 beschrieben und in Bild 4-9 dargestellt.

5.3.3.1 Identifikation von Informationsquellen

Stakeholderidentifikation

Das Ergebnis eines Workshops zur Stakeholderidentifikation ist in Bild 5-10 dargestellt.

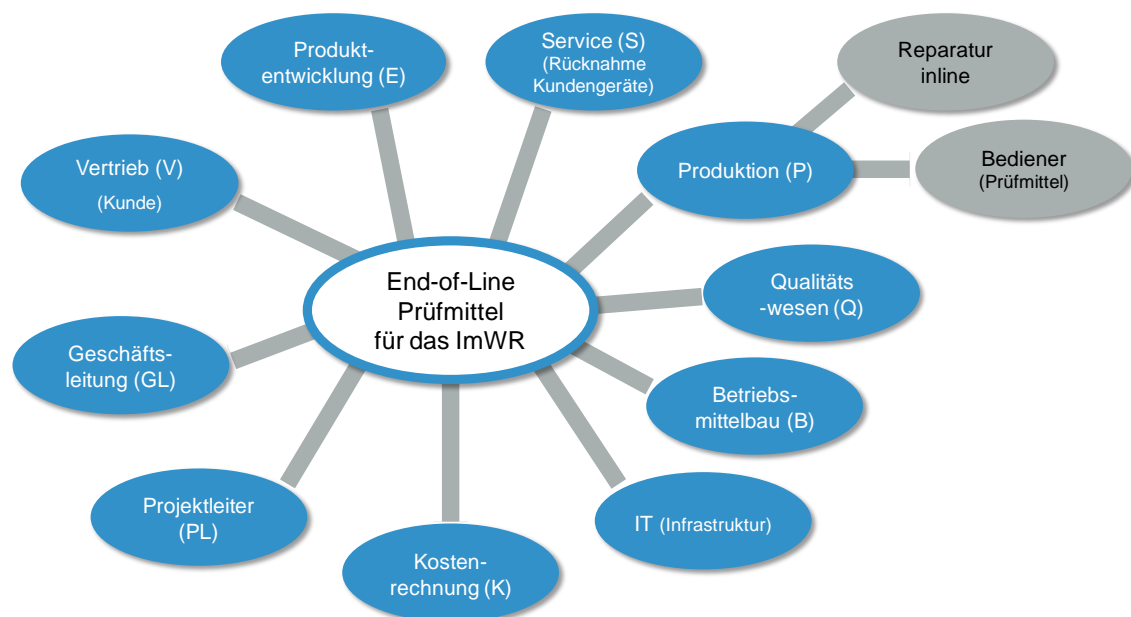


Bild 5-10: Stakeholderdiagramm des End-of-Line Prüfmittels für das ImWR

In der Mitte ist das zu entwickelnde Prüfmittel dargestellt. Außen sind die identifizierten Stakeholder dargestellt, die Einfluss auf das Prüfmittel haben können. Dem Stakeholder *Produktion* sind zusätzlich die Stakeholder *Reparatur inline* und *Bediener (Prüfmittel)* zugeordnet worden, da diesen nach Meinung der Workshopteilnehmer innerhalb der Produktion – in Bezug auf die Prüfmittelentwicklung – besondere Bedeutung zukommt. Der *Bediener* bedient das zu entwickelnde Prüfmittel später in der Pro-

duktion. Die *Reparatur inline* repariert ImWR, bei denen während der Fertigung Defekte auftreten können. Diese kann das Prüfmittel zur Überprüfung ihrer Reparatur nutzen.

Hinweis 1: Der *Bediener* und die *Reparatur inline* können auch später bei der Beschreibung der Anwendungsszenarien mit aufgenommen werden.

Hinweis 2: Die in Bild 5-10 dargestellten Stakeholder sind typisch für ein Prüfmittel. Unternehmens- und projektabhängig können die Stakeholder variieren.

Die Stakeholder sind im Anschluss bezüglich Informationsquellen befragt worden. Das Ergebnis ist auszugsweise aufgelistet, so dass die Bandbreite der Informationsquellen deutlich wird.

Identifizierte Informationsquellen

- Produkt-FMEA (vgl. Kapitel 5.3.1.3)
- Dokument, in dem Prüfschritte für ein Produkt beschrieben werden, das dem ImWR am meisten ähnlich ist (aus dem Produktportfolio des Unternehmens)
- Fertigungsprozessbeschreibung für ein Produkt, das dem ImWR am meisten ähnlich ist (aus dem Produktportfolio des Unternehmens)
- Dokument, in dem beschrieben ist, welche Prüfungen (in der Fertigung) notwendig sind, um eine CE-Kennzeichnung eines Wechselrichters (in diesem Fall ImWR) vornehmen zu können
- Mengenplanung des ImWR aus dem Vertrieb
- Prüfanforderungen eines Pilotkunden (Anforderungen eines anspruchsvollen Pilotkunden, der explizit bestimmte Stückprüfungen fordert)
- Alle Stakeholder selbst
- Diverse Experten

Hinweis: Um unnötigen Aufwand zu vermeiden bzw. um die Stakeholder möglichst nur einmal befragen zu müssen, ist die Befragung hinsichtlich Informationsquellen und die im nächsten Schritt vorgesehene Befragung hinsichtlich potentieller Prüfmerkmale und NPB Anforderungen in der gleichen Befragung durchgeführt worden.

5.3.3.2 Ermittlung potentieller Prüfmerkmale

Die Ermittlung der potentiellen Prüfmerkmale wird nachfolgend beispielhaft gezeigt. Die ermittelten potentiellen Prüfmerkmale sind in Bild 5-12 auszugsweise dargestellt.

Analyse Produktkonzept

Zunächst sind die **Funktionen** (vgl. Bild 5-7) auf potentielle Prüfmerkmale hin untersucht worden. Die Funktionen, die nicht ausschließlich durch Software realisiert sind, sind dann in den vorläufigen Prüfplan eingetragen worden (vgl. Bild 5-12). In der Spalte

Quelle beginnen die Prüfmerkmale, die aus den Funktionen abgeleitet worden sind mit *F*, die nachfolgenden Ziffern geben die Nummer der Funktion an. So ist z. B. die Funktion *F 1.2.1.2 Leistung an Verbraucher abgeben* ein potentiellcs Prüfmerkmal. Beispiel für eine rein durch Software realisierte Funktion ist die Funktion *F 1.2.2.3 Führungs- und Rückführgröße in Stellgröße transformieren*. Daher taucht diese Funktion auch nicht in dem vorläufigen Prüfplan auf.

Die **nicht funktionalen Anforderungen** sind auf potentielle Prüfmerkmale hin untersucht worden. Es wurden keine potentiellen Prüfmerkmale aus den Produktanforderungen identifiziert. Grund ist die zu diesem Zeitpunkt noch sehr grobe Beschreibung der Produktanforderungen. Wäre in den Produktanforderungen z. B. ein bestimmter Wirkungsgrad gefordert worden, wäre dieser ein potentiellcs Prüfmerkmal.

Aus der Analyse der groben **Gestalt** des ImWR ergeben sich potentielle Prüfmerkmale. Exemplarisch sind zwei potentielle Prüfmerkmale, *M_5* und *M_8*, in Bild 5-11 dargestellt. Das *M* steht dabei für das zu prüfende Merkmal und ist im vorläufigen Prüfplan wiederzufinden (vgl. Bild 5-12).

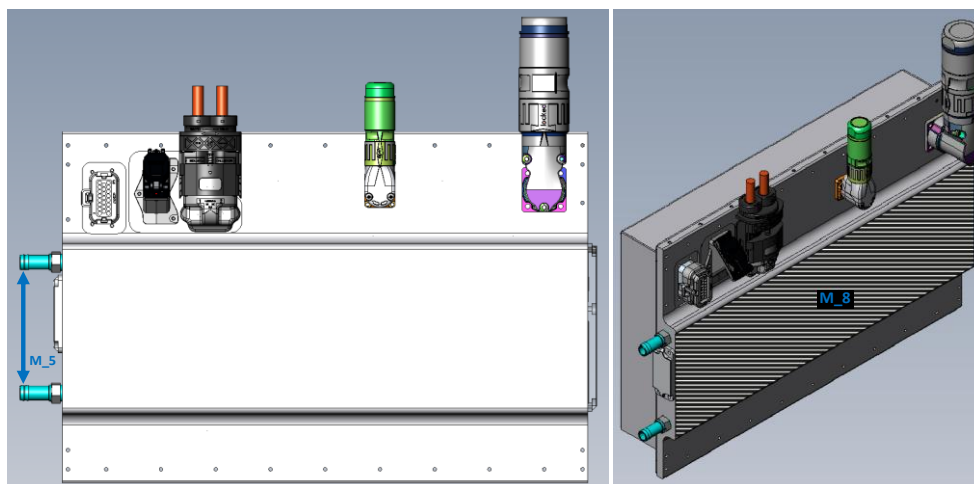


Bild 5-11: Potentielle Prüfmerkmale aus der Gestalt des ImWR

Stakeholder- und Expertenbefragung

Die im vorherigen Prozessschritt befragten Stakeholder und Experten sind hinsichtlich potentieller Prüfmerkmale befragt worden. Einige genannte potentielle Prüfmerkmale sind in Bild 5-12 exemplarisch dargestellt. In der Spalte *Quelle* beginnen die Prüfmerkmale, die aus der Stakeholder- und Expertenbefragung resultieren, mit *S*; die nachfolgende Ziffer gibt einen Hinweis auf den Stakeholder. Die weiteren Ziffern nummerieren dann die Merkmale fortlaufend. So gibt die Bezeichnung *S_V_2* an, dass es sich um die zweite Nennung des Stakeholders *Vertrieb* handelt (vgl. Stakeholderdiagramm, Bild 5-10). Eine Anforderung des Vertriebs ist beispielsweise zu prüfen, ob die richtige Kundensoftware auf dem ImWR installiert ist. Hintergrund der Forderung ist, dass es Software geben kann, die individuell nur für einen Kunden bestimmt ist. Durch die Prüfung wird sichergestellt, dass der Kunde die richtige Software erhält.

Analyse relevanter Unterlagen

Bei der Analyse relevanter Informationsquellen sind mehrere Dokumente identifiziert worden, aus denen potentielle Prüfmerkmale abgeleitet werden können (vgl. Kapitel 5.3.3.1). Exemplarisch sind einige, aus diesen Unterlagen identifizierte, potentielle Prüfmerkmale in dem vorläufigen Prüfplan dargestellt (Bild 5-12). In der Spalte *Quelle* beginnen dabei die aus dem jeweiligen Dokument abgeleiteten Prüfmerkmale wieder mit einer Abkürzung für das Dokument. Die weiteren Ziffern nummerieren dann die Merkmale wieder fortlaufend, die aus diesem Dokument stammen. So gibt die Bezeichnung CE_1 an, dass es sich um die erste Nennung aus dem Dokument *CE-Anforderungen* handelt.

Auszug aus dem vorläufigen Prüfplan			
Quelle	Ist PMM (0/1)	Potentiell. Prüfmerkmal	Systemelementbezeichnung
F 1.2.1.2		Leistung an Verbraucher abgeben	Modul A, B, C
F 1.2.2.4.2.d, S_S_4		Das Verarbeiten des Temperaturwertes muss überprüft werden für alle Temperatursensortypen (KTY, PTC, PT 100, PT 1000)	Modul A, B, C
M_5		Position der Kühlkörperanschlüsse relativ zueinander	Gehäuse
FMEA_MA1.1.1		Korrekte Funktion der internen HV-DC Spannungsmessung	Modul A, B, C, 0,2
PS_3024		Stromsymmetrie zwischen den Phasen	Modul A, B, C, 0,2
CE_1		Aufkleber/Typenschild/Warnhinweise müssen bei Auslieferung vorhanden sein	Gehäuse
CE_5		Kühlflüssigkeit mit zweifachem Betriebsdruck auf Dichtigkeit prüfen	Gehäuse
PK_2.7		Richtiger Verbau und Toleranzen der Y-Kondensatoren im eingebauten Zustand	Modul A, B, C, 0, 0,2
S_V_2		Richtige Kundensoftware auf dem ImWR installiert	Modul 0

Bild 5-12: Auszug aus dem vorläufigen Prüfplan

5.3.3.3 Ermittlung von NPB Anforderungen

Analyse Produktkonzept

Die Anwendungsszenarien und auch die Anforderungen an das ImWR sind hinsichtlich NPB Anforderungen analysiert worden. Es sind exemplarisch NPB Anforderungen in Bild 5-13 dargestellt. In der Spalte *Quelle* sind die NPB Anforderungen, die sich aus der *Anforderungsliste* des ImWR ergeben, mit A gekennzeichnet. Beispiel für eine Anforderung, die sich aus der Anforderungsliste des Produktes ergibt, ist die zu prüfende Stückzahl pro Jahr. Aus der zu produzierenden Stückzahl ergibt sich in erster Näherung die zu prüfende Stückzahl neuer ImWR.

Hinweis: Zu dieser Stückzahl kommen aus anderen Informationsquellen noch zu prüfende ImWR pro Jahr hinzu – aus Service und Reparatur (Inline).

Stakeholder und Expertenbefragung

Die im vorherigen Prozessschritt befragten Stakeholder und Experten sind hinsichtlich NPB Anforderungen befragt worden. Einige genannte NPB Anforderungen sind in Bild

5-13 exemplarisch dargestellt. In der Spalte *Quelle* beginnen die NPB Anforderungen, die aus der Stakeholder- und Expertenbefragung resultieren, mit *S*. Die nachfolgende Ziffer gibt einen Hinweis auf den Stakeholder. Die weiteren Ziffern nummerieren dann die Merkmale wieder fortlaufend.

Analyse relevanter Unterlagen

Bei der Analyse relevanter Informationsquellen sind mehrere Dokumente identifiziert worden, aus denen NPB Anforderungen abgeleitet werden können (vgl. Kapitel 5.3.3.1). Exemplarisch sind einige, aus diesen Unterlagen identifizierte, NPB Anforderungen in der NPB Anforderungsliste dargestellt (Bild 5-13). In der Spalte *Quelle* beginnen dabei die aus dem jeweiligen Dokument abgeleiteten NPB Anforderungen wieder mit einer Abkürzung für das Dokument. Die weiteren Ziffern nummerieren dann die Merkmale wieder fortlaufend, die aus diesem Dokument stammen.

NPB Anforderungsliste			
Quelle	FA/NFA	Anforderung	Systemelementbezeichnung
A 8.3	NFA	Das Prüfmittel muss eine Stückzahl von x neu produzierten ImWR/Jahr überprüfen können (Durchsatz).	Gesamtsystem
S_B	NFA	Es soll ein zusätzlicher Durchsatz von 5 % für Wechselrichter aus der Reparatur vorgesehen werden.	Gesamtsystem
S_GL_2	NFA	Das Prüfmittel soll so (modular) beschaffen sein, dass der Durchsatz des Prüfmittels mit steigenden Vertriebszahlen mitwachsen kann.	Gesamtsystem
S_P_2	FA	Zu dem EoL-Prüfmittel soll ein manueller Reparatur- und Prüfplatzplatz bereitgestellt werden.	Gesamtsystem
S_Q_4	FA	Das Prüfmittel muss in der Lage sein die Seriennummer der Netzwerkkarte des Kopfmoduls (Modul 0) mit der Seriennummer des ImWR zu verknüpfen.	Gesamtsystem
PS_2002	FA	Das Prüfmittel muss das Prüfbyte auslesen können, welches auf dem ImWR gespeichert ist. (Das Prüfbyte gibt u.a. an, ob das Gerät bereits geprüft wurde und von welchen Prüfmitteln)	Gesamtsystem
PS_2002	FA	Das Prüfmittel muss das Prüfbyte überschreiben können, welches auf dem ImWR gespeichert ist.	Gesamtsystem
S_P_4	FA	Das Prüfmittel muss in der Lage sein die in der Prüfung auftretenden Fehler an das SAP-System zu senden (und somit zu dokumentieren).	Gesamtsystem
PS_A	NFA	Es soll geprüft werden, ob eine Vorinbetriebnahme vorgesehen werden soll.	Gesamtsystem
FMEA_MA1.2.1	FA	Das Prüfmittel muss in der Lage sein die interne HV-DC-Spannungsmessung des ImWR nachjustieren, falls diese nicht innerhalb der Toleranz angezeigt wird.	Modul A, B, C, 0.2

Bild 5-13: NPB Anforderungsliste

An dieser Stelle ist die Forderung aufgekommen zu prüfen, ob eine Vorinbetriebnahme durchgeführt werden soll (PS_A). Das Konzept einer Vorinbetriebnahme hat sich in der Vergangenheit bei der Prüfung von Wechselrichtern bereits bewährt. Die Vorinbetriebnahme findet dabei kurz vor der Gesamtsystemprüfung statt. Oftmals können dabei defekte Systeme (in diesem Fall das ImWR) mit einer solchen Vorinbetriebnahme mit wenig Aufwand erkannt werden. Dazu ist kein aufwändiges Prüfmittel zu entwickeln. Es wird lediglich eine Kommunikationsverbindung zum System hergestellt und überprüft, ob das System „lebt“ (arbeitet grundsätzlich der Microcontroller usw.). Grenzwerte werden dabei nicht überprüft. Durch eine solche Vorsortierung der Prüflinge kann grundsätzlich Prüfzeit bei einem aufwändigen Prüfmittel gespart werden. Zudem kann

ggf. das aufwändige, nachfolgende Prüfmittel geschützt werden – im Fall einer drastischen Fehlfunktion.

Hinweis: Aus der Anforderung, dass das *Prüfmittel in der Lage sein muss die interne HV-DC-Spannungsmessung des ImWR nachzujustieren, falls diese nicht innerhalb der Toleranz angezeigt wird* (FMEA_MA1.2.1) ergibt sich, dass das Prüfmittel Aufgaben übernehmen soll, die streng genommen keine Prüfung darstellen. Justierungen wie diese sind bei Prüfmitteln üblich, da die Prüfmittel oftmals die notwendige Messtechnik bereits besitzen und diese somit nicht ein zweites Mal beschafft und betrieben werden müssen.

Aus dieser Anforderung ergibt sich automatisch wieder eine Anforderung an das Produkt (das ImWR) selbst: *Das ImWR muss die Möglichkeit bieten die internen HV-DC-Spannungsmessungen durch das Prüfmittel justieren zu lassen.* Diese Anforderung wird im letzten Prozessschritt in Kapitel 5.3.4.9 *Ableiten von Anforderungen an andere Funktionsbereiche* mit den weiteren sich ergebenden Anforderungen an andere Funktionsbereiche zusammengetragen.

5.3.3.4 Prüfplanung (insbesondere Prüfmerkmalauswahl)

Die **Prüfmerkmale** sind im Prüfplan **ausgewählt** (vgl. Bild 5-14, Spalte *Ist Prüfmerkmal*). Da aus dem Hauptprozess der Produktionssystemplanung noch keine aussagekräftigen bzw. nur grobe Aussagen über Prozessfähigkeitskennwerte vorhanden sind, und es sich um ein neuartiges Produktkonzept handelt (modularer Aufbau, neuer Markt, usw.), werden im Anwendungsbeispiel nahezu alle potentiellen Prüfmerkmale zu Prüfmerkmalen übernommen. Aus den gleichen Gründen wird zunächst der Prüfumfang bei jedem zu prüfenden Merkmal auf 100 % gesetzt. Im weiteren Verlauf der Entwicklung oder nach Serienanlauf können die Prüfmerkmale bzw. der Prüfumfang weiter reduziert werden, wenn aussagekräftigere Informationen bzw. Erfahrungswerte vorliegen.

Der **Prüfplan** ist dabei **erweitert** worden. Genaue Grenzwerte können zu diesem Erstellungszeitpunkt meistens noch nicht fest definiert werden. Für die Konzipierung des Prüfmittels im ersten Durchlauf ist dies jedoch unerheblich.

An dieser Stelle wurde zusätzlich zu dem eigentlichen *Systemprüfmittel* aus den zu prüfenden Prüfmerkmalen ein *Dichtigkeitsprüfmittel* identifiziert, welches die Dichtigkeit des Kühlsystems des ImWR sicherstellt (das ImWR ist flüssigkeitsgekühlt). Diese Prüfung soll vor der EoL-Prüfung geschehen und nicht mit dem gleichen Prüfmittel, um im Fall einer Undichtigkeit das Systemprüfmittel zu schützen (Kurzschluss etc.). Das Dichtigkeitsprüfmittel steht dabei in der Montage, um unnötige Wege im Falle einer Undichtigkeit zu vermeiden.

Zusätzlich ist eine Spalte für ein Vorinbetriebnahmeprüfmittel vorgesehen worden. Eine Überprüfung von Grenzwerten ist dabei nicht vorgesehen.

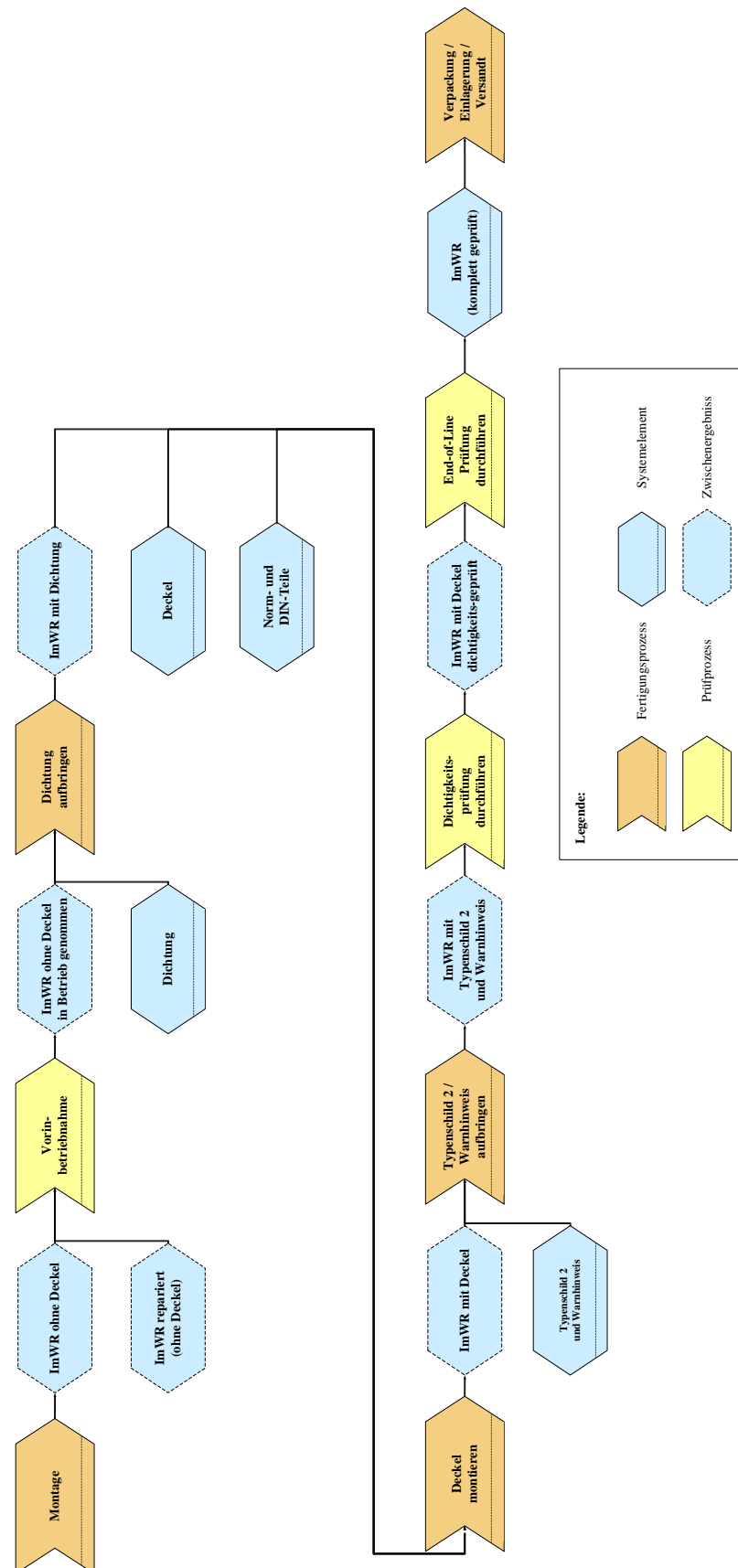


Bild 5-15: Ausschnitt des Produktionsprozesses des ImWR mit integrierten Prüfungen

Ist die Fertigung komplett abgeschlossen, inklusive der Montage des Deckels und dem Aufbringen von Typenschild und Warnhinweis, wird die *Dichtigkeitsprüfung* durchgeführt. Die Dichtigkeitsprüfung ist dabei nicht Bestandteil des zu entwickelnden Prüfmittels (wäre auch denkbar gewesen). Damit wird verhindert, dass im Falle einer Undichtigkeit eines ImWR das Prüfmittel durch Kühlflüssigkeit beschädigt wird.

Im ersten Durchlauf soll nur das Prüfmittel für das Gesamtsystem konzipiert werden. Daher sind alle **NPB Anforderungen** (Bild 5-13) **dem Gesamtsystemprüfmittel zugeordnet**. Das Gesamtsystemprüfmittel unterteilt sich dabei in das Teilprüfmittel *Dichtigkeitsprüfmittel*, welches ausschließlich das Prüfmerkmal der *Dichtigkeit* überprüft, und das *EoL-Prüfmittel*. Die Entwicklung des *EoL-Prüfmittels* wird im ersten Durchlauf begonnen (vgl. Kapitel 5.3.4). Die Entwicklung des Dichtigkeitsprüfmittels wird im ersten Durchlauf nicht begonnen, da von diesem Prüfmittel keine Anforderungen an das Produkt zu erwarten sind und die Entwicklungsdauer gering eingeschätzt wird. Gleiches gilt für das Vorinbetriebnahmeprüfmittel.

Anforderungen an das Produkt und Produktionssystem ableiten

Die Anforderung PS_2002 (Bild 5-13) legt fest, dass das Prüfmittel ein Prüfbyte des ImWR auslesen soll. Diese Anforderung wird in der Prüfmittelentwicklung berücksichtigt. Daraus lassen sich an dieser Stelle direkt zwei Anforderungen an das ImWR ableiten:

- „Das ImWR muss ein Prüfbyte besitzen, welches über eine Datenschnittstelle durch KEB-Prüfmittel auslesbar ist.“
- „Das Prüfbyte muss durch KEB-Prüfmittel über eine Datenschnittstelle verändert werden können.“

Hinweis: Diese Anforderung könnte auch in der Prüfmittelentwicklung entstehen, bzw. dort zusätzlich entstehen.

5.3.4 Prüfmittelentwicklung

Die Konzipierung des Prüfmittels für die EoL-Prüfung auf Systemebene und Modulebene wird in diesem Kapitel beschrieben.

5.3.4.1 Umfeldanalyse

Das initiale Umfeldmodell des Prüfmittels für die EoL-Prüfung ist in Bild 5-16 dargestellt.

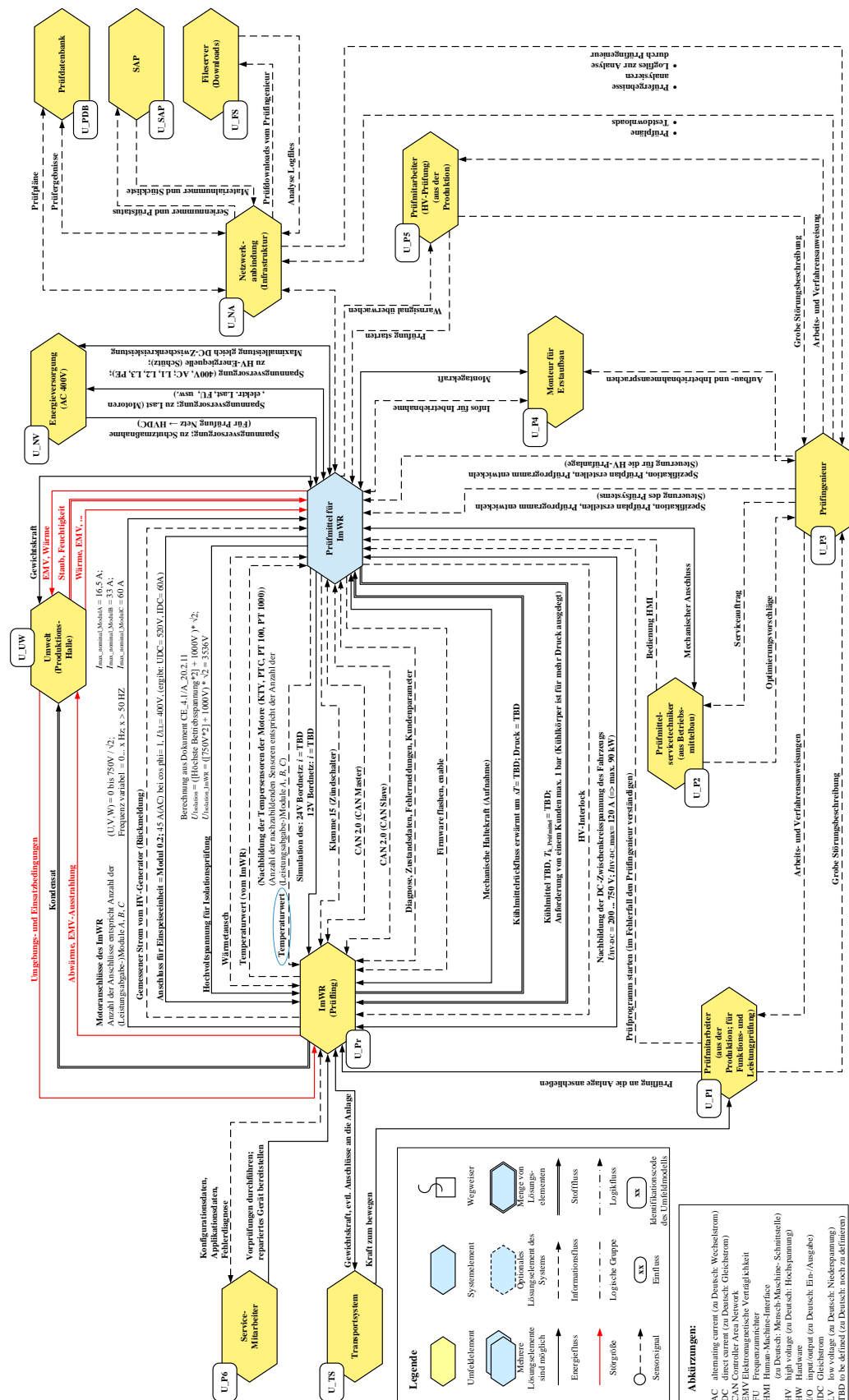


Bild 5-16: Umfeldmodell des Prüfmittels

In der Mitte ist das Prüfmittel dargestellt, links daneben das ImWR (Prüfling). Dabei sind zwischen dem Prüfmittel und dem ImWR die meisten Wechselwirkungen zu erkennen. Das Prüfmittel bildet dabei die meisten Flüsse bzw. Beziehungen aus dem Umfeld des ImWR (Prüfling) nach (vgl. Bild 5-5). Die Nachbildung des Umfeldes des Prüflings durch ein Prüfmittel ist dabei typisch für ein Prüfmittel (vgl. Kapitel 2.4.2 und Kapitel 2.4.3). Zum Beispiel bildet das Prüfmittel die Motoranschlüsse bzw. die Motore (Nebenantriebe) selbst nach, die von dem ImWR mit Leistung versorgt werden sollen sowie die zugehörigen Temperatursensoren, die die Motortemperatur messen. Weitere Beispiele sind der HV-DC Zwischenkreis des Fahrzeugs und der Kühlkreislauf, die durch das Prüfmittel nachgebildet werden.

Auf der linken Seite ist ein Transportsystem vorgesehen.

Auf der linken Seite, unten und auf der rechten Seite sind die verschiedenen Mitarbeiterrollen als Umfeldelemente dargestellt. Die normale Bedienung des Prüfmittels zur Prüfung von neuen Wechselrichtern, die aus der Fertigung kommen, werden dabei durch die Prüfmitarbeiter durchgeführt.

Im Umfeldmodell ist auf der rechten Seite oben die Verbindung zum Netzwerk dargestellt über das das Prüfmittel zur Prüfdatenbank, dem SAP³⁰-System und dem Fileserver verbunden ist.

Oben sind die Umfeldelemente Energieversorgung und Umwelt dargestellt. Die Energieversorgung stellt die zum Betrieb des Prüfmittels benötigte Energie bereit bzw. nimmt überschüssige Energie wieder auf. Die Umwelt des Prüfmittels stellt die Produktionshalle dar, in dem das Prüfmittel aufgestellt ist. Es wirken seitens der Umwelt störende Flüsse auf das Prüfmittel und den Prüfling. Andersherum beeinflussen auch Störflüsse die Umwelt selbst.

5.3.4.2 Anwendungsszenarien

Es werden an dieser Stelle bewusst nur wenige Anwendungsszenarien beschrieben. Es soll so verhindert werden, dass der Lösungsraum zu sehr eingeschränkt wird. Weiterhin werden in diesem Durchlauf nur die Anwendungsszenarien beschrieben, die zum späteren Betrieb notwendig sind. Anwendungsszenarien zum Aufbau/Inbetriebnahme usw. sind für den nächsten Durchlauf vorgesehen. Es sind also lediglich Anwendungsszenarien für den späteren Betrieb definiert, bei denen auf jeden Fall Mitarbeiter beteiligt sein sollen. Beispielhaft wird an dieser Stelle das Anwendungsszenario „Transport des Prüflings (ImWR) nach der EoL-Prüfung“ dargestellt, vgl. Bild 5-17. Im oberen Teil befindet sich die Beschreibung des Anwendungsszenarios, im unteren Teil sind die daraus abgeleiteten Anforderungen dargestellt.

³⁰ SAP bezeichnet die verwendete ERP-Software des Unternehmens (ERP steht dabei für Enterprise-Resource-Planning).

Anwendungsszenario 7: Transport des Prüflings (ImWR) nach der EoL-Prüfung			
Beschreibung: • Mehrere ImWR haben die EoL-Prüfung absolviert und sind für gut befunden worden. • Nach der Prüfung der ImWR durch das EoL-Prüfmittel werden zunächst die geprüften ImWR zwischengelagert (neben dem Prüfmittel). • Das Zwischenlager für geprüfte ImWR ist eindeutig gekennzeichnet und räumlich von der Lagerung ungeprüfter ImWR getrennt, um Verwechslungen mit ungeprüften ImWR zu vermeiden. • Nach erfolgreicher Prüfung einer produzierten Charge (z.B. eines Auftrags) werden die geprüften ImWR durch einen Mitarbeiter zur Verpackung der ImWR transportiert. Es erfolgt kein automatischer Abtransport durch ein Transportsystem/Förderband oder ähnliches.			
Verweise			
	Quelle der Anf.	Id. der Anf.	Abgeleitete Anforderung
	AWSZ_7	1	Eine Stellfläche der für geprüfte ImWR muss zur Verfügung gestellt werden.
	AWSZ_7	2	Die Stellfläche für geprüfte ImWR muss eindeutig als „Stellfläche für geprüfte ImWR“ gekennzeichnet sein.
	AWSZ_7	3	Die Stellfläche für geprüfte ImWR muss räumlich von anderen ImWR-Stellflächen getrennt sein.

Bild 5-17: Beispielhaftes Anwendungsszenario des Prüfmittels

5.3.4.3 Anforderungsliste erstellen

In der Anforderungsliste sind die sich aus dem Umfeldmodell und den Anwendungsszenarien ergebenden Anforderungen eingetragen (Bild 5-18). Die Anforderungen, die aus dem Umfeldmodell resultieren, beginnen dabei in der Spalte *Quelle* mit *U*. Die Anforderungen, die aus den Anwendungsszenarien resultieren, beginnen dabei mit *AWSZ*. Zudem sind die Anforderungen aus den NPB Anforderungen (Bild 5-13) und die ermittelten Prüfmerkmale (vgl. Bild 5-14) in dieser Anforderungsliste zusammengetragen. Es liegt damit eine Anforderungsliste vor, die alle Anforderungen an das eine Prüfmittel zusammenfasst. In Bild 5-18 ist ein Ausschnitt aus der Anforderungsliste dargestellt (insgesamt ergeben sich ca. 250 Anforderungen). Im ersten Abschnitt sind die Anforderungen aus dem Prüfplan dargestellt. Im zweiten Abschnitt sind die Anforderungen aus der NPB Anforderungsliste dargestellt. Im dritten Abschnitt sind die Anforderungen aus dem Umfeldmodell und den Anwendungsszenarien dargestellt.

In Bild 5-18 sind die Anforderungen zur besseren Erklärung des Vorgehens nach den Quellen sortiert (Anforderungen aus Prüfplan, Anforderungen aus NPB Anforderungsliste, Anforderungen aus Umfeldmodell und Anwendungsszenarien des Prüfmittels). Je nach Bedarf bzw. Vorliebe kann diese Anforderungsliste auch nach anderen Gesichtspunkten strukturiert werden, vgl. [EM13, S. 563ff], [FGN+13, S. 325], [FG13, S. 488], [Bau16, S. 434].

Anforderungsliste: EoL-Prüfmittel ImWR							
Quelle	Id.	FA/ NFA	PM/ KPM	Anforderung	Bezug zu Modul	Grenzwerte	Prüf- umfang
Anforderungen aus dem Prüfplan							
F 1.2.1.2	P1	FA	PMM	Das Prüfmittel muss in der Lage sein, die Abgabe der Leistung an Verbraucher zu überprüfen.	Modul A, B, C	Ca. 7,5 kW; 15 kW; 30 kW	100 %
F 1.2.2.4.2.d, S_S_4	P2	FA	PMM	Das Verarbeiten des Motortemperaturwertes muss überprüft werden (für alle Temperatursensortypen KTY, PTC, PT 100, PT 1000).	Modul A, B, C		100 %
M_5	P3	FA	PMM	Das Prüfmittel muss in der Lage sein die Position der Kühlkörperanschlüsse relativ zueinander zu überprüfen.	Gehäuse	Abw. Max 0,5 mm	100 %
FMEA_ MA1.1.1	P4	FA	PMM	Das Prüfmittel muss in der Lage sein die korrekte Funktion der internen HV-DC Spannungsmessung zu überprüfen.	Modul A, B, C, 0,2	Abw. <0,5 V	100 %
PS_3024	P5	FA	PMM	Das Prüfmittel muss in der Lage sein die Stromsymmetrie zwischen den Phasen zu überprüfen.	Modul A, B, C, 0,2		100 %
CE_1	P6	FA	PMM	Das Prüfmittel muss in der Lage sein zu überprüfen, ob die Aufkleber/Typenschild/Warnhinweise bei Auslieferung vorhanden sind.	Gehäuse		100 %
PK_2.7	P7	FA	PMM	Das Prüfmittel muss in der Lage sein den richtigen Verbau und Toleranzen der Y-Kondensatoren im eingebauten Zustand zu überprüfen.	Modul 0, A, B, C, 0,2		100 %
S_V_2	P8	FA	PMM	Das Prüfmittel muss in der Lage sein zu überprüfen, ob die richtige Kundensoftware auf dem ImWR installiert ist.	Modul 0		100 %
Anforderungen aus der NPB Anforderungsliste							
A 8.3	N1	NFA	KPMM	Das Prüfmittel muss eine Stückzahl von x neu produzierten ImWR/Jahr überprüfen können (Durchsatz).	-		
S_B	N2	NFA	KPMM	Es soll ein zusätzlicher Durchsatz von 5 % für Wechselrichter aus der Reparatur vorgesehen werden.	-		
S_GL_2	N3	NFA	KPMM	Das Prüfmittel soll so (modular) beschaffen sein, dass der Durchsatz des Prüfmittels mit steigenden Vertriebszahlen mitwachsen kann.	-		
S_P_2	N4	FA	KPMM	Zu dem EoL-Prüfmittel soll ein manueller Reparatur- und Prüfplatz bereitgestellt werden.	-		
S_Q_4	N5	FA	KPMM	Das Prüfmittel muss in der Lage sein die Seriennummer der Netzwerkkarte des Kopfmoduls (Modul 0) mit der Seriennummer des ImWR zu verknüpfen.	Gesamtsystem		
PS_2002	N6	FA	KPMM	Das Prüfmittel muss das Prüfbyte auslesen können, welches auf dem ImWR gespeichert ist (Das Prüfbyte gibt u.a. an, ob das Gerät bereits geprüft wurde und von welchen Prüfmitteln).	Gesamtsystem		
PS_2002	N7	FA	KPMM	Das Prüfmittel muss das Prüfbyte überschreiben können, welches auf dem ImWR gespeichert ist.	Gesamtsystem		
S_P_4	N8	FA	KPMM	Das Prüfmittel muss in der Lage sein die in der Prüfung auftretenden Fehler an das SAP-System zu senden (und somit zu dokumentieren).	Gesamtsystem		
FMEA_ MA1.2.1	N9	FA	KPMM	Das Prüfmittel muss in der Lage sein die interne HV-DC-Spannungsmessung des ImWR nachjustieren, falls diese nicht innerhalb der Toleranz angezeigt wird.	Modul A, B, C, 0,2		
Anforderungen aus dem Umfeldmodell und den Anwendungsszenarien des Prüfmittels							
AWSZ_7	1	FA	KPMM	Das Prüfmittel muss eine Stellfläche für geprüfte ImWR zur Verfügung stellen.	-		
AWSZ_7	2	FA	KPMM	Die Stellfläche für geprüfte ImWR muss eindeutig als "Stellfläche für geprüfte ImWR" gekennzeichnet sein.	-		
AWSZ_7	3	NFA	KPMM	Die Stellfläche für geprüfte ImWR muss räumlich von anderen ImWR-Stellflächen getrennt sein.	-		
U_NV	4	NFA	KPMM	Das Prüfmittel muss in der Lage sein mit einer Netzspannung von 400 V Drehstrom (L1, L2, L3) betrieben zu werden.	-		

Bild 5-18: Ausschnitt der Anforderungsliste EoL-Prüfmittel für ImWR

5.3.4.4 Aufstellen der Funktionshierarchie

Funktionen aus funktionalen Anforderungen ableiten

Aus allen funktionalen Anforderungen (FA) der Anforderungsliste (Bild 5-18) werden Funktionen erstellt. Es existieren dabei grundsätzlich zwei verschiedene Arten von Funktionen des Prüfmittels: Funktionen, die *(Modul-)Prüfmerkmale prüfen* und Funktionen, die *Prüfungen ermöglichen* (vgl. auch Bild 5-19, Funktionen 1.1 und 1.2).

Funktionen, die Prüfungen ermöglichen, prüfen kein Prüfmerkmal. Diese Funktionen sind notwendig, um das Prüfmittel effizient und anforderungsgerecht zu betreiben. Ein Beispiel für eine solche unterstützende Funktion resultiert aus der Anforderung *Das Prüfmittel muss in der Lage sein die in der Prüfung auftretenden Fehler an das SAP-System zu senden (und somit zu dokumentieren)*. Die daraus abgeleitete Funktion *Fehler (an SAP-System) senden* ist somit eine unterstützende Funktion, die das Prüfen ermöglicht.

Ein Beispiel für Funktionen, die (Modul-)Prüfmerkmale prüfen, resultiert aus der Anforderung *Das Verarbeiten des Motortemperaturwertes muss überprüft werden*. Daraus resultiert die Funktion *Motortemperaturwertverarbeitung überprüfen*. Da ein Motortemperatursensoranschluss an jedem Modul A, B, C existiert, ist an dieser Stelle schon zu erkennen, dass es diese prüfende Funktion auch mehrfach geben kann.

Funktionen strukturieren

Nachdem aus allen funktionalen Anforderungen Funktionen abgeleitet sind, werden die Funktionen strukturiert. Dazu wird zunächst ein Überbau für die abgeleiteten Funktionen erzeugt (Bild 5-19).

In der Funktionshierarchie ist oben in der ersten Hierarchieebene die Hauptfunktion *Fertigungsendprüfung durchführen* (Funktion 1) dargestellt. Darunter untergliedert sich in der zweiten Hierarchieebene die Funktionshierarchie in die beiden beschriebenen Funktionsarten *(Modul-)Prüfmerkmale prüfen* (Funktion 1.1) und *Prüfungen ermöglichen* (Funktion 1.2).

Unter der Funktion *Prüfungen ermöglichen* werden alle Funktionen dieser Art strukturiert. Die drei angedeuteten logischen Beziehungslinien unterhalb der Funktion *Prüfungen ermöglichen* deuten dies an. Die Strukturierung dieser Funktionen ist nachfolgend nicht detailliert, da dies im Sinne der Modularisierung und Erweiterbarkeit des Prüfmittels unerheblich ist.

Die Funktion *(Modul-)Prüfmerkmale prüfen* wird zunächst weiter untergliedert, bevor die aus den funktionalen Anforderungen abgeleiteten Funktionen darunter gegliedert werden. Die Gliederung orientiert sich dabei an den Modulen bzw. an dem Gesamtsystem, welches die Funktionen zu prüfen haben.

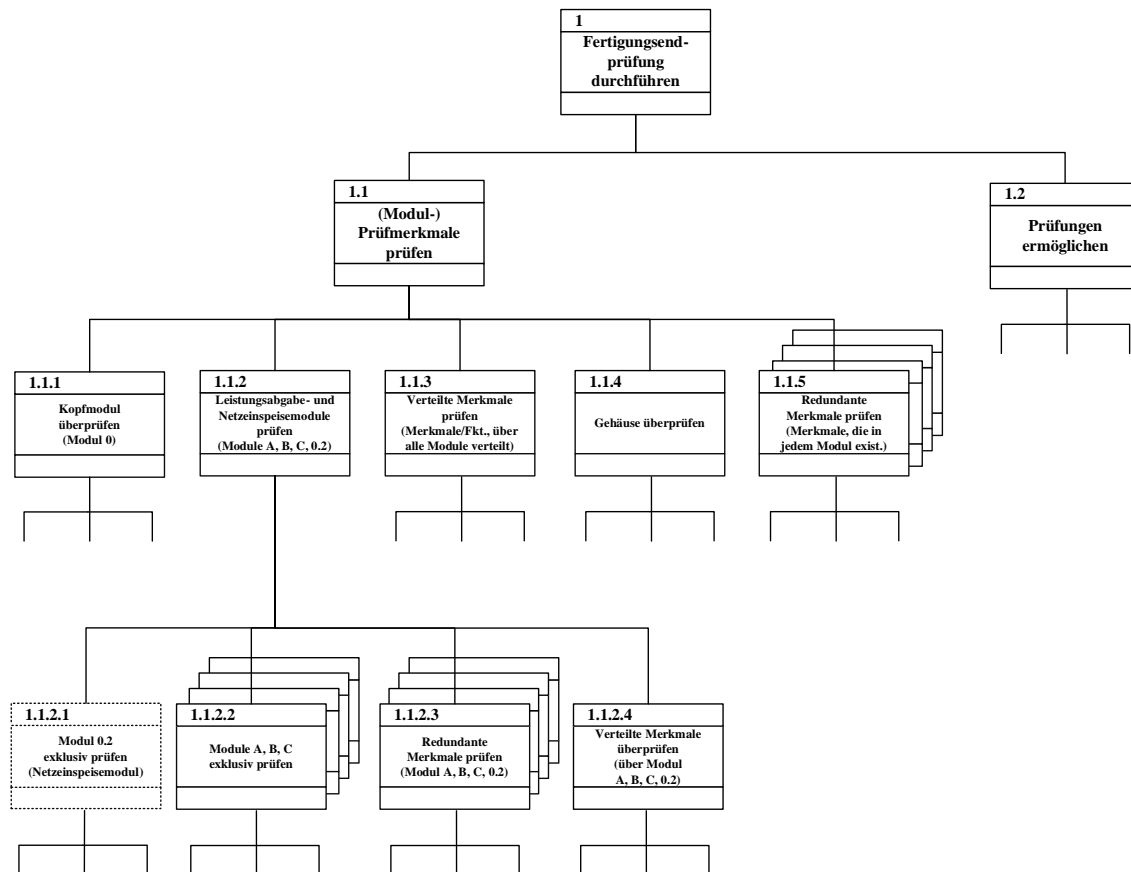


Bild 5-19: Überbau der Funktionshierarchie für das End of Line Prüfmittel des ImWR

Bezug der prüfenden Funktion zum Prüfling ImWR

Eine Unterfunktion von Funktion 1.1.2. in Bild 5-19 ist dabei die Funktion 1.1.2.2, die durchgängig durch das Kapitel 5 genutzt wird. Dies wird später in diesem Kapitel (Kapitel 5.3.4.4) noch genauer erläutert.

Unterfunktionen der Funktion 1.1.1 prüfen dabei Prüfmerkmale, die sich ausschließlich auf das *Kopfmodul*, auch *Modul 0* genannt, beziehen. Beispiel für eine solche Unterfunktion ist die Funktion *Kundensoftware auf Richtigkeit überprüfen*. Diese geht aus der Anforderung *Das Prüfmittel muss in der Lage sein zu überprüfen, ob die richtige Kundensoftware auf dem ImWR installiert ist* hervor (vgl. Bild 5-18). Die Kundensoftware ist dabei in dem *Kopfmodul/Modul 0* (vgl. Bild 5-9 und Bild 5-3) installiert und hat daher auch nur den Bezug zu diesem Modul.

Unterfunktionen der Funktion 1.1.3 prüfen dabei Prüfmerkmale, die über alle Module verteilt sind. Beispiel für eine solche Unterfunktion ist die Funktion *Wärmeübergang überprüfen* des Prüfmittels. Das Kühlmedium fließt durch jedes einzelne Modul – unabhängig von der Anzahl und der Konfiguration der Module. Das Kühlmedium transportiert dabei die Wärme jedes einzelnen Moduls ab. Daher bezieht sich diese Funktion auf jedes Modul.

Unterfunktionen der Funktion 1.1.4 prüfen dabei Prüfmerkmale, die sich auf das Gehäuse beziehen. Beispiel für eine solche Unterfunktion ist die Funktion *Aufkleber, Ty-*

penschilder, Warnhinweise überprüfen. Diese geht aus der Anforderung *Das Prüfmittel muss in der Lage sein zu überprüfen, ob die Aufkleber/Typenschild/Warnhinweise bei Auslieferung vorhanden sind* (vgl. Bild 5-18) hervor. Die Aufkleber werden auf dem Gehäuse angebracht. Daher bezieht sich diese Funktion auf das Gehäuse. Gleiches würde sich z. B. für die Oberflächenbeschaffenheit des Gehäuses ergeben (vgl. M_8 in Bild 5-11).

Unterfunktionen der Funktion 1.1.5 prüfen dabei redundante Prüfmerkmale, also Merkmale, die in jedem Modul einmal vorhanden sind. Beispiel für eine solche Unterfunktion ist die Funktion *Y-Kondensatoren überprüfen*. Diese geht auf die Anforderung *Das Prüfmittel muss in der Lage sein den richtigen Verbau und Toleranzen der Y-Kondensatoren im eingebauten Zustand zu überprüfen* zurück (vgl. Bild 5-18). Ein solcher Y-Kondensator ist in jedem Modul in gleicher Weise verbaut. Daher bezieht sich diese Funktion auf jedes Modul.

Die Funktion 1.1.2 *Leistungsabgabe- und Netzeinspeisemodule überprüfen (Module A, B, C, 0.2)* ist in gleicher Weise nochmals unterteilt wie die Funktionen in der beschriebenen dritten Hierarchieebene. Unterschied ist dabei, dass das Kopfmodul/Modul 0 bei allen Unterfunktionen ausgeschlossen ist.

Unterfunktionen der Funktion 1.1.2.4 prüfen dabei – wie Funktion 1.1.3 – Prüfmerkmale, die über mehrere Module verteilt sind. In diesem Fall sind die Prüfmerkmale nicht über alle sondern nur über die *Module A, B, C, und 0.2* verteilt (ohne *Modul 0*). Beispiel für eine solche Funktion ist *HV-DC-Entladung prüfen*. Die Hochvolt-Gleichstrom-Verteilung (Stromschienen) ist intern an den *Modulen A, B, C und 0.2* angeschlossen und versorgt diese mit elektrischer Energie. Daher bezieht sich diese Funktion auf diese Module.

Unterfunktionen der Funktion 1.1.2.3 prüfen wieder, wie Funktion 1.1.5, redundante Merkmale, also Merkmale, die in mehreren Modulen vorkommen. In diesem Fall sind die Merkmale nicht in allen Modulen, sondern nur in den *Modulen A, B, C und 0.2* enthalten. Beispiel für eine solche Funktion ist die Funktion *Stromsymmetrie überprüfen*. Diese Funktion folgt aus der Anforderung *Das Prüfmittel muss in der Lage sein die Stromsymmetrie zwischen den Phasen zu überprüfen* (vgl. Bild 5-18). Nur diese Module besitzen drei Phasen zum Anschluss an einen Motor oder das Energieversorgungsnetz.

Unterfunktionen der Funktion 1.1.2.2 prüfen die *Module A, B und C* exklusiv. Dies bedeutet, dass nur Merkmale dieser Module von den Unterfunktionen der Funktion 1.1.2.2. geprüft werden. Die Module A, B und C besitzen exakt die gleichen Funktionen, daher unterscheiden sich diese aus Sicht der grundsätzlichen Funktionen des Prüfmittels nicht. Ein Beispiel für eine Unterfunktion an dieser Stelle ist die Funktion *Motortemperaturwertverarbeitung überprüfen* (vgl. Beispiel im Abschnitt *Funktionen aus Funktionalen Anforderungen ableiten*). Diese Funktion folgte aus der Anforderung *Das Verarbeiten des Motortemperaturwertes muss überprüft werden* (Bild 5-18).

Unterfunktionen der Funktion 1.1.2.1 prüfen Merkmale des *Modul 0.2* (Netzeinspeisemodul) exklusiv. Dies bedeutet, dass nur Merkmale dieses Moduls von

den Unterfunktionen der Funktion 1.1.2.1 geprüft werden. Ein Beispiel für eine solche Unterfunktion ist die Funktion *Netznachbildung (des ImWR) überprüfen*. Das Modul 0.2 kann eine Netznachbildung durchführen. Die Funktion des Prüfmittels überprüft diese Netznachbildung.

Funktionsarten in der Funktionshierarchie des Prüfmittels

In der Funktionshierarchie des Prüfmittels (vgl. auch Bild 5-19) existieren, wie bei der Funktionshierarchie des Produktes (Bild 5-7), wieder *Pflichtfunktionen*, *Optionale Funktionen* und *Mehrfach vorhandene Funktionen*.

Alternative Funktionen existieren im Anwendungsbeispiel ImWR nicht. Theoretisch könnten diese alternativen Funktionen bei einem Prüfmittel vorhanden sein, wenn das Prüfmittel selbst wieder in verschiedenen Varianten gebaut werden soll.

Existiert ein Prüfmerkmal genau ein Mal resultiert daraus genau eine *Pflichtfunktion*, die dieses Prüfmerkmal überprüft. Zum Beispiel existieren die zu prüfenden Aufkleber am Gehäuse des ImWR pro ImWR genau ein Mal. Soll durch das Prüfmittel ein ImWR geprüft werden, existiert daher die prüfende Funktion auch genau ein Mal.

Es existieren im Anwendungsbeispiel *Optionale Funktionen* des Prüfmittels (vgl. Funktion 1.1.2.1 in Bild 5-19). Alle Unterfunktionen der Funktion *Modul 0.2 exklusiv prüfen* stellen solche optionalen Funktionen dar. Diese Funktionen prüfen das Netzeinspeisemodul. Dieses ist selbst ein optionales Modul, d.h. es kann in einem ImWR verbaut sein, muss aber nicht verbaut sein. Es wird z. B. die Produktfunktion *Überschüssige Energie an Bremschopper leiten* (vgl. Bild 5-7, Funktion 1.2.1.4) des ImWR durch eine Unterfunktion der Funktion *Modul 0.2 exklusiv prüfen* überprüft. Das die Funktionen, die das Netzeinspeisemodul prüfen, optional sind hat dabei zwei Gründe: Erstens wird bei der Entwicklung des ImWR das Netzeinspeisemodul zwar mit konzipiert, jedoch nicht komplett entwickelt. Je nach Kundennachfrage wird dieses Modul noch zu einem späteren Zeitpunkt nachentwickelt. Somit sind die Funktionen des Prüfmittels und deren spätere Lösungselemente, die dieses Modul prüfen, zwar vorzusehen, aber zunächst nicht vollständig zu entwickeln. Zweitens kann es eine Variante des Prüfmittels geben (z. B. für eine Fertigung im Ausland), die dieses Modul nicht prüfen muss (eine Konfiguration des ImWR mit der Funktion wird in dem Fall in dem Land nicht benötigt und produziert). Grundsätzlich würde aus einer optionalen Produktfunktion eine Pflichtfunktion folgen, wenn das Prüfmittel in der Lage sein soll das Produkt mit dieser optionalen Produktfunktion zu überprüfen.

Es existieren im Anwendungsbeispiel *Mehrfach vorhandene Funktionen*. Diese Funktionen prüfen Prüfmerkmale, die mehrfach vorhanden sein können. Bestehen Prüfmerkmale mehrfach, bestehen prinzipiell mehrere Möglichkeiten diese mehrfachen Merkmale zu überprüfen. Entweder kann durch einen Teil (Lösungselement(e)) des Prüfmittels ein gleiches Merkmal nach dem anderen geprüft werden. Oder der Teil (Lösungselement(e)) zur Prüfung existiert mehrfach und es werden alle gleichen Merkmale gleichzeitig überprüft. Möglich ist zusätzlich eine gleichzeitige Prüfung mehrerer Prüflinge

mit diesen Merkmalen. Durch diese Möglichkeiten kann eine hohe Varianz bei der Prüfmittelkonzipierung erzeugt werden.

Beispiel der Varianzerzeugung des Prüfmittels aufgrund mehrfach vorhandener Funktionen

Am Beispiel der Funktion *Motortemperaturwertverarbeitung überprüfen* werden die *Mehrfach vorhandenen Funktionen* und die daraus folgenden möglichen Varianten erläutert. Die Funktion *Motortemperaturwertverarbeitung überprüfen* ist eine Unterfunktion der Funktion *Modul A, B, C exklusiv prüfen* (Funktion 1.1.2.2 in Bild 5-19). Die Funktion *Modul A, B, C exklusiv prüfen* ist dabei so oft (mehrfach) vorhanden, wie die zu prüfende Funktion auftreten kann. Existiert die zu prüfende Funktion (*Motortemperaturwert verarbeiten*) am Prüfling m -fach, existiert die zugehörige prüfende Funktion (*Motortemperaturwertverarbeitung überprüfen*) ebenfalls m -fach.

In Bild 5-20 ist die Funktionshierarchie aus Bild 5-19 weiter untergliedert. Die in Bild 5-20 nebeneinander dargestellte mehrfach vorhandene Funktion *Modul A, B, C exklusiv prüfen* entspricht dabei der in Bild 5-19 hintereinander dargestellten Funktion. Die Module A, B, C des ImWR kann es in Summe maximal $m = 7$ mal geben, daher existiert die Funktion *Modul A, B, C exklusiv prüfen* ebenfalls $m = 7$ mal, ebenso wie alle deren Unterfunktionen, wie die Funktion *Motortemperaturwertverarbeitung überprüfen*. Jede dieser Funktionen überprüft eine Verarbeitung eines Sensorsignals, wobei der Sensor je an einem Modul angeschlossen ist (im normalen Betriebsfall, während der Prüfungen kann der Sensor simuliert bzw. nachgebildet werden). Dies ist mit den gestrichelten Linien zu den vier Steckverbindungen dieser Konfiguration des ImWR in Bild 5-20 dargestellt. In Bild 5-20 ist eine Konfiguration des ImWR mit vier Motortemperatursensorschanschlüssen dargestellt (maximal wären $m = 7$ möglich).

Jede dieser prüfenden Funktionen kann durch ein oder mehrere Lösungselemente des Prüfmittels erfüllt werden. Ein Lösungselement zur Prüfung der *Motortemperaturwertverarbeitung* wäre z. B. die Simulation/Nachbildung des Temperatursensors durch verschiedene umschaltbare Widerstände. Diese sind unterhalb der Funktionshierarchie in Bild 5-20 abgebildet. Möglich wäre nun die Umsetzung der sieben Funktionen durch ein Lösungselement (Temperatursensorsimulation durch Widerstände). In diesem Fall würde zunächst *ein* Lösungselement an den ersten Temperatursensoreingang des ersten Moduls angeschlossen und damit geprüft, danach der zweite usw. Die Prüfungen werden somit sequenziell, also nacheinander, durchgeführt. Eine weitere Möglichkeit wäre die Umsetzung der sieben Funktionen durch sieben Lösungselemente (Temperatursensorsimulation durch Widerstände). In diesem Fall können alle sieben Prüfungen gleichzeitig durchgeführt werden.

Die Lösungselemente sind Bestandteil des Morphologischen Kastens, der im nächsten Schritt beschrieben wird (Kapitel 5.3.4.5). Um die Beschreibung zu vereinfachen, wird jedoch an dieser Stelle vorgegriffen. Durch die beschriebenen mehrfach vorhandenen Funktionen spannt sich eine 3-dimensionale Funktionshierarchie auf. Daraus folgt ein 3-dimensionaler Morphologischer Kasten. Aufgrund der besseren Darstellbarkeit wird

der später gezeigte Morphologische Kasten (Bild 5-23) in 2 Dimensionen dargestellt und dabei angegeben, wie groß die Dimension m des Lösungselementes ist. Theoretisch wären auch andere Anzahlen an Lösungselementen denkbar, die zwischen 1 und m liegen. Voraussetzung dafür, dass die zu prüfenden Funktionen nacheinander geprüft werden können, ist, dass diese Funktionen voneinander unabhängig sind. Bestünde z. B. die Gefahr, dass sich die verschiedenen Temperaturmessungen gegenseitig beeinflussen, müssten diese auf jeden Fall immer gleichzeitig geprüft werden.

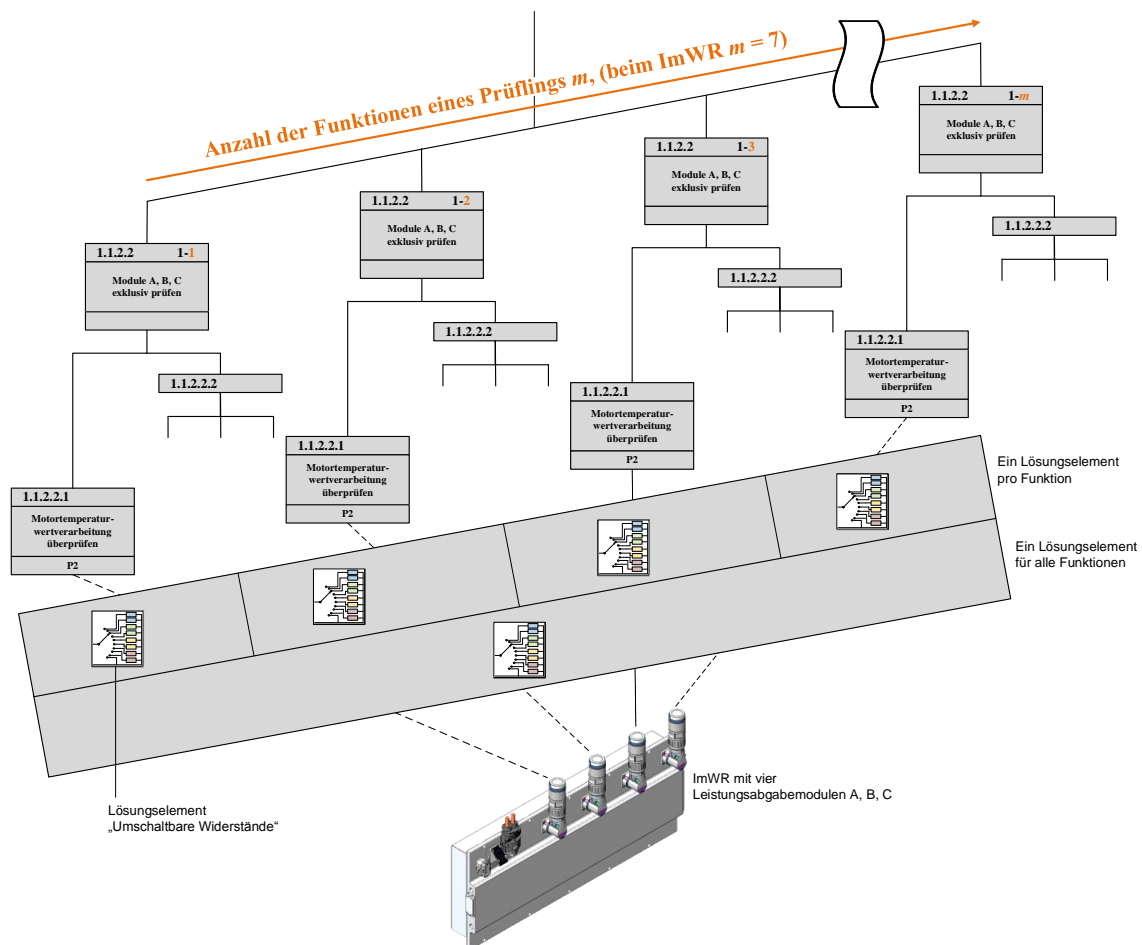


Bild 5-20: Beispiel einer mehrfach vorhandenen Funktion mit Bezug zum Lösungselement und Produkt

Insbesondere durch die Entscheidung, ob *Mehrfach vorhandene Funktionen* durch ein oder mehrere Lösungselemente realisiert werden, können die durchschnittliche Prüfzeit pro Prüfling (ImWR) und damit der Durchsatz des Prüfmittels beeinflusst werden. Werden *alle* mehrfach vorhandenen Funktionen gleichzeitig durch je ein Lösungselement geprüft, wird die durchschnittliche Prüfzeit pro Prüfling wesentlich geringer sein als wenn immer sequenziell nacheinander geprüft wird (je ein Lösungselement pro mehrfacher Funktion).

Weiterhin kann – durch die Möglichkeit *Mehrfach vorhandene Funktionen* entweder

durch ein oder mehrere Lösungselemente zu realisieren – die Möglichkeit vorgesehen werden, den Durchsatz des Prüfmittels nach der Fertigstellung des Prüfmittels im Nachhinein zu erhöhen. *Mehrfach vorhandene Funktionen* werden dazu zunächst durch ein Lösungselement realisiert. Die Realisierung durch mehrere Lösungselemente wird aber schon im Konzept und bei der Entwicklung des Prüfmittels berücksichtigt. So kann zu einem späteren Zeitpunkt der Durchsatz des Prüfmittels erhöht werden. Der Vorteil bei dieser Vorgehensweise ist, dass zunächst nur die Investition für ein Lösungselement des Prüfmittels getätigt werden muss. Im Fall des bewusst einfach gehaltenen Beispiels anhand der Überprüfung der Motortemperaturwertverarbeitung werden die Kosten für die zusätzlichen Lösungselemente bei Parallelprüfung nicht wesentlich ins Gewicht fallen. Bei den z. B. ebenfalls zu prüfenden Motorausgängen der Module A, B, C müssen Motore (Nebenantriebe) nachgebildet werden. Jede Nachbildung eines Motors (Nebenantrieb) ist dabei mit erheblichen Kosten verbunden. Dabei macht es einen großen Unterschied bei der initialen Investition, ob ein oder sieben Motornachbildungen im Prüfmittel verbaut werden. Abhängig von den zu prüfenden Stückzahlen (stark abhängig von den schlecht vorhersehbaren Vertriebszahlen – Markt zur Versorgung von Nebenantrieben von Nutzfahrzeugen entsteht gerade erst und ist dabei von vielen, zum Teil politischen, Randbedingungen abhängig) kann der Durchsatz des Prüfmittels erhöht werden. Da die Prüfung durch einen simulierten Motor mehrere Minuten dauert, kann durch die parallele Prüfung durch mehrere Motore der Durchsatz deutlich erhöht werden. Die Forderung der Anpassung an steigende Vertriebszahlen ist auch im Anwendungsbeispiel gegeben (vgl. Bild 5-18, S_GL_2).

Zusätzliche Varianzerzeugung durch Anschluss mehrerer Prüflinge an ein Prüfmittel

Es besteht die Möglichkeit ein Prüfmittel so zu entwerfen, dass mehrere Prüflinge (ImWR) an ein Prüfmittel angeschlossen werden können. Es wird zur Erläuterung zunächst von $n = 4$ Prüflingen ausgegangen, die an ein Prüfmittel angeschlossen werden. n bezeichnet dabei die Anzahl der an ein Prüfmittel angeschlossenen Prüflinge bzw. in diesem Fall ImWR (wie später noch gezeigt wird, werden für die favorisierte Gesamtlösung, für das Anwendungsbeispiel der Firma KEB, vier gleichzeitig angeschlossene Prüflinge (ImWR) favorisiert). Als Beispiel dient wieder die Funktion *Motortemperaturwertverarbeitung überprüfen*, die die korrekte Funktion des ImWR *Motortemperaturwert verarbeiten* überprüfen soll. Es sind also vier ImWR an das Prüfmittel angeschlossen. Es bestehen hinsichtlich der Prüfungen durch das Prüfmittel grundsätzlich **zwei unterschiedliche Möglichkeiten**.

Möglichkeit eins: Die Prüfmerkmale der angeschlossenen Prüflinge werden seriell (nacheinander) geprüft. Das heißt, dass zunächst die sieben Funktionen des ersten ImWR nacheinander überprüft werden, dann die nächsten sieben Funktionen des zweiten ImWR, usw. Kann diese aufeinanderfolgende Prüfung der 28 Merkmale ($m \cdot n = 7 \cdot 4$) durch das Prüfmittel automatisiert geschehen, ergibt sich dadurch nicht unmittelbar eine wesentliche Verringerung der Durchlaufzeit (gegenüber dem Anschluss und

Prüfung eines ImWR und dem darauffolgenden Anschluss eines zweiten ImWR und dessen Prüfung, usw.). Wohl kann durch den Anschluss und die automatisierte serielle Prüfung der vier ImWR nacheinander aber die Werkerbindung verringert werden. Der Werker (Bediener/Bestücker/Prüfpersonal) des Prüfmittels muss also nicht so oft in zeitlichen Abständen neue Prüflinge (ImWR) anschließen, sondern schließt vier Prüflinge zeitgleich an. Der Werker kann so einfacher einer weiteren Aufgabe nachgehen und so auch besser ausgelastet werden. Zusätzlich kann durch den Anschluss mehrerer Prüflinge und die verringerte Werkerbindung erreicht werden, dass z. B. das Prüfmittel nachts ohne Prüfpersonal weiter prüft und so das Prüfmittel optimal ausgenutzt wird. Im Zweischichtbetrieb kann z. B. abends das Prüfmittel beschickt werden, nachts wird automatisiert ein Prüfling nach dem nächsten geprüft, morgens wird wieder neu beschickt.

Möglichkeit zwei: Die Prüfmerkmale der angeschlossenen Prüflinge werden parallel geprüft. Das heißt, dass alle 28 Funktionen ($m \cdot n = 7 \cdot 4$) der beiden ImWR gleichzeitig geprüft werden können. Kann diese gleichzeitige Prüfung der 28 Funktionen automatisiert geschehen, so kann die Durchlaufzeit deutlich verringert bzw. der Durchsatz deutlich erhöht werden.

Aus den zu prüfenden Funktionen des Produktes (ImWR) ergeben sich die Anzahl der Funktionen des Prüfmittels. 28 mal soll die Produktfunktion *Motortemperaturwert verarbeiten* geprüft werden. Daraus ergibt sich 28 mal die Funktion des Prüfmittels *Motortemperaturwertverarbeitung überprüfen*. Zu der in Bild 5-20 dargestellten Dimension ergibt sich durch die $n = 4$ angeschlossenen Prüflinge (ImWR) eine weitere Dimension, die in Bild 5-21 dargestellt ist.

In Bild 5-21 werden der besseren Übersicht halber nur Funktionen für zwei angeschlossene Prüflinge grafisch dargestellt, die weiteren zwei liegen, wie die zweite „Lage“ an Funktionen dahinter. Als Lösungselement für die Prüfmittelfunktion *Motortemperaturwertverarbeitung überprüfen* wird wieder von der Nachbildung der Temperatursensoren durch Widerstände ausgegangen.

Die maximale (sinnvolle) Anzahl der Lösungselemente (umschaltbare Widerstände) beträgt also 28, um die Prüfungen der Motortemperaturwertverarbeitung so weit wie möglich zu beschleunigen.

Die minimale Anzahl der Lösungselemente entspricht dabei weiterhin *einem* Lösungselement (umschaltbare Widerstände). Dabei wird die Prüfung der Motortemperaturwertverarbeitung aller Module, die eine Motortemperaturwertverarbeitung beinhalten, nacheinander durch ein Lösungselement durchgeführt.

Durch den zusätzlichen Anschluss von mehreren Prüflingen pro Prüfmittel spannt sich in der Funktionshierarchie des Prüfmittels eine weitere Dimension auf. Diese vierte Dimension ist (wie die dritte Dimension) ebenfalls im Morphologischen Kasten schwer darstellbar. Aufgrund der besseren Darstellbarkeit wird der später gezeigte Morphologische Kasten (Kapitel 5.3.4.5, Bild 5-23) in zwei Dimensionen dargestellt und dabei angegeben, wie groß die Dimensionen m und n des Lösungselementes sind.

Möglich ist auch in diesem Fall wieder eine Anzahl von Lösungselementen zwischen 1 und m multipliziert mit n .

Auch hier kann wieder die Möglichkeit geschaffen werden den Durchsatz des Prüfmittels im Nachhinein (abhängig von Fertigungszahlen/Vertriebszahlen) zu erhöhen. Es kann zu Anfang minimal ein Lösungselement vorgesehen werden und in der Zukunft auf bis zu 28 Elementen aufgerüstet werden.

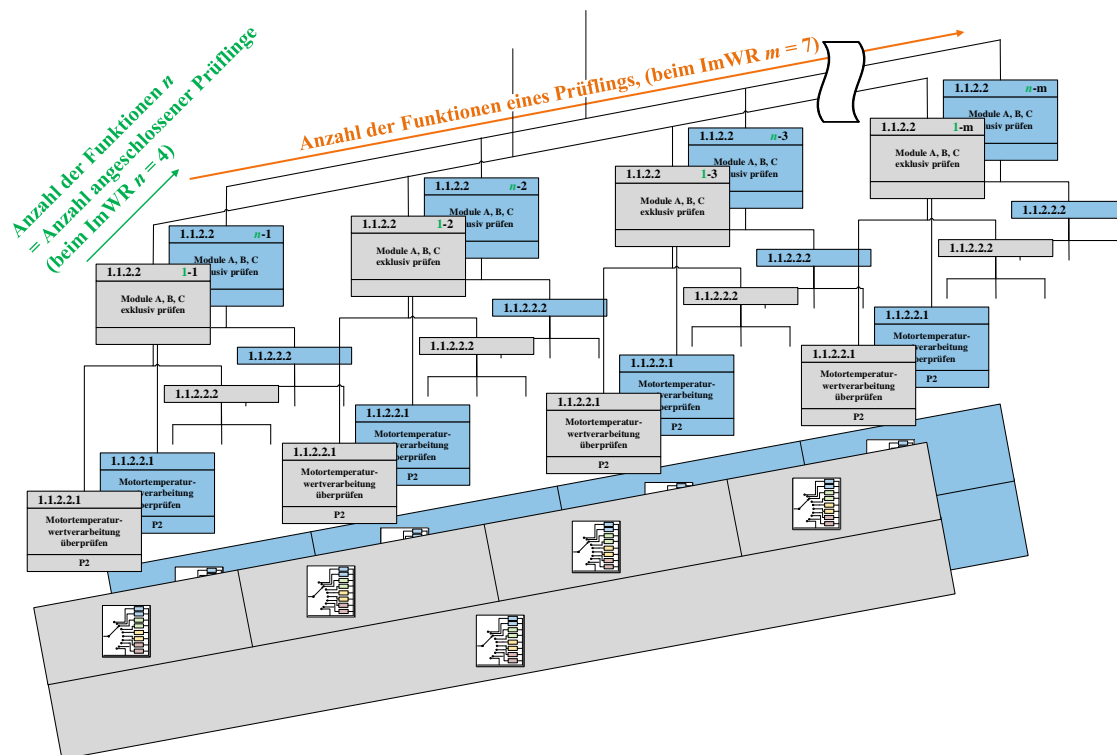


Bild 5-21: Beispiel einer mehrfach vorhandenen Funktion mit mehreren Prüflingen

Beziehungen zwischen Produktfunktionen/Prüfmerkmalen und Prüfmittelfunktionen

Nachfolgend wird beschrieben, welche mengenmäßige Beziehung zwischen den zu prüfenden Produktfunktionen und den sie prüfenden Prüfmittelfunktionen bestehen.

Wie am Beispiel der Motortemperaturwertverarbeitung zu erkennen ist, kann eine Prüfmittelfunktion eine Produktfunktion überprüfen. Dadurch, dass eine Produktfunktion mehrfach vorliegen kann und auch mehrere Prüflinge mit einem Prüfmittel verbunden und geprüft werden können, gibt es eine minimale und eine maximale sinnvolle Anzahl an Lösungselementen, die diese Funktionen realisieren.

In Bild 5-22 ist in der ersten Spalte der Funktionstyp des Produktes angegeben (vgl. Bild 5-7).

In der zweiten Spalte ist die sich daraus ergebende Anzahl der Prüfmittelfunktionen angegeben, für den Fall, dass lediglich ein Prüfling mit dem Prüfmittel verbunden ist. In der dritten Spalte ist die minimale und maximale Anzahl der sich daraus ergebenden Lösungselemente des Prüfmittels angegeben.

In der vierten Spalte ist die Anzahl der Prüfmittelfunktionen angegeben, für den Fall, dass n Prüflinge mit dem Prüfmittel verbunden sind. In der fünften Spalte sind die minimale und maximale Anzahl der sich daraus ergebenden Lösungselemente des Prüfmittels angegeben.

Funktionstyp des Produktes	Ein angeschlossener Prüfling pro Prüfmittel		n angeschlossene Prüflinge pro Prüfmittel	
	Anzahl der Prüfmittelfunktionen	Anzahl der Lösungselemente des Prüfmittels	Anzahl der Prüfmittelfunktionen	Anzahl der Lösungselemente des Prüfmittels
Pflichtfunktionen	1	1	n	1 bis n
Optionale Funktionen *	1	1	n	1 bis n
Alternative Funktionen ** (Anzahl der Alternativen = a)	a	a	$a \cdot n$	a bis $a \cdot n$
Mehrfache Funktionen (maximale Anzahl = m)	m	1 bis m	$m \cdot n$	1 bis $m \cdot n$

* Es wird davon ausgegangen, dass die optionale Funktion von dem Prüfmittel geprüft werden soll.

** Es wird davon ausgegangen, dass die a -fach unterschiedlichen Produktfunktionen nicht durch ein gleiches Lösungselement des Prüfmittels überprüft werden können. Können diese durch ein Lösungselement überprüft werden, ist die minimale Anzahl nicht a sondern eins.

Bild 5-22: Mengenbeziehungen zwischen Produktfunktionen und Prüfmittelfunktionen und Lösungselementen des Prüfmittels

Eine zu überprüfende *Pflichtfunktion* des Produktes benötigt genau eine Prüfmittelfunktion und ein zugehöriges Lösungselement für den Fall, dass ein Prüfling durch das Prüfmittel überprüft werden soll. Sollen n Prüflinge gleichzeitig an das Prüfmittel angeschlossen werden, resultieren daraus n Prüfmittelfunktionen. Werden die Produktfunktionen der n Produkte nacheinander überprüft, ergibt sich daraus ein Lösungselement des Prüfmittels. Sollen die n Produktfunktionen gleichzeitig überprüft werden, ergeben sich daraus n Lösungselemente des Prüfmittels.

Eine durch das Prüfmittel zu überprüfende *Optionale Funktion* benötigt ebenfalls genau eine Prüfmittelfunktion und ein zugehöriges Lösungselement für den Fall, dass ein Prüfling durch das Prüfmittel überprüft werden soll. Da bei jedem zu prüfenden Prüfling die optionale Funktion vorhanden sein kann, entspricht die Anzahl der Prüfmittelfunktionen im Fall, dass n Prüflinge an das Prüfmittel angeschlossen werden können ebenfalls n . Werden die optionalen Produktfunktionen der n Produkte nacheinander überprüft ergibt sich daraus ein Lösungselement des Prüfmittels. Sollen die n optionalen Produktfunktionen gleichzeitig überprüft werden, ergeben sich daraus n Lösungselemente des Prüfmittels.

Alternative Funktionen sind im Prinzip wie *Pflichtfunktionen* zu verstehen. Alle Alternativen sind im Produkt vorhanden. Der Unterschied ist lediglich, dass sie nicht gleichzeitig aktiv sind. Existieren also a Alternativen müssen bei einem angeschlossenen Prüfmittel auch a prüfende Funktionen existieren, die je mit einem Lösungselement realisiert werden. a entspricht dabei der Anzahl der alternativen Funktionen. Es wird dabei davon ausgegangen, dass ein Lösungselement nur in der Lage ist eine der a Funk-

tionen zu überprüfen. Ist ein Lösungselement in der Lage alle Alternativen zu prüfen, ist die minimale Anzahl gleich eins. Werden mehrere Prüflinge an ein Prüfmittel angeschlossen, wird daher die Anzahl mit n multipliziert.

Der Fall der *Mehrfach vorhandenen Funktionen* entspricht dem vorher beschriebenen Beispiel der Überprüfung der Motortemperaturwertverarbeitung. Existiert die Funktion beim Prüfling m -fach, so existiert die prüfende Funktion des Prüfmittels ebenfalls m -fach. Wird die Funktion nacheinander überprüft, wird ein Lösungselement benötigt. Sollen alle Funktionen gleichzeitig überprüft werden, werden m Lösungselemente benötigt. Sollen n Prüflinge gleichzeitig an das Prüfmittel angeschlossen werden, so wird die maximale Anzahl mit n multipliziert.

In Bild 5-22 ist dargestellt, wie viele Prüfmittelfunktionen und Lösungselemente aus einer zu prüfenden Produktfunktion entstehen können. Prüfmerkmale können Produktfunktionen sein. Sie müssen allerdings keine Produktfunktionen sein. Analog zu den zu prüfenden Funktionen in Bild 5-22 verhalten sich auch die Prüfmerkmale, die keine Produktfunktionen sind. Aus einem einfach vorhandenen Prüfmerkmal (Analogie zur Pflichtfunktion) resultiert z. B. bei einfach angeschlossenem Prüfling eine prüfende Funktion und ein zugehöriges Lösungselement des Prüfmittels. Sind n Prüflinge an einem Prüfmittel angeschlossen, ergeben sich dadurch wieder n Prüfmittelfunktionen und 1 bis n zugehörige Lösungselemente des Prüfmittels.

5.3.4.5 Erstellung des Morphologischen Kastens

Der Morphologische Kasten beinhaltet auf der linken Seite die Funktionen, die in der Funktionshierarchie strukturiert worden sind. Für jede Funktion werden nun ein oder mehrere Lösungsalternativen auf der rechten Seite eingetragen. Der Morphologische Kasten des Prüfmittels für das ImWR ist in Bild 5-23 auszugsweise dargestellt. Der Überbau der Funktionen entspricht dabei den Funktionen aus Bild 5-19. Die Funktionen im Morphologischen Kasten sind ebenfalls konsistent zu Bild 5-20 und Bild 5-21.

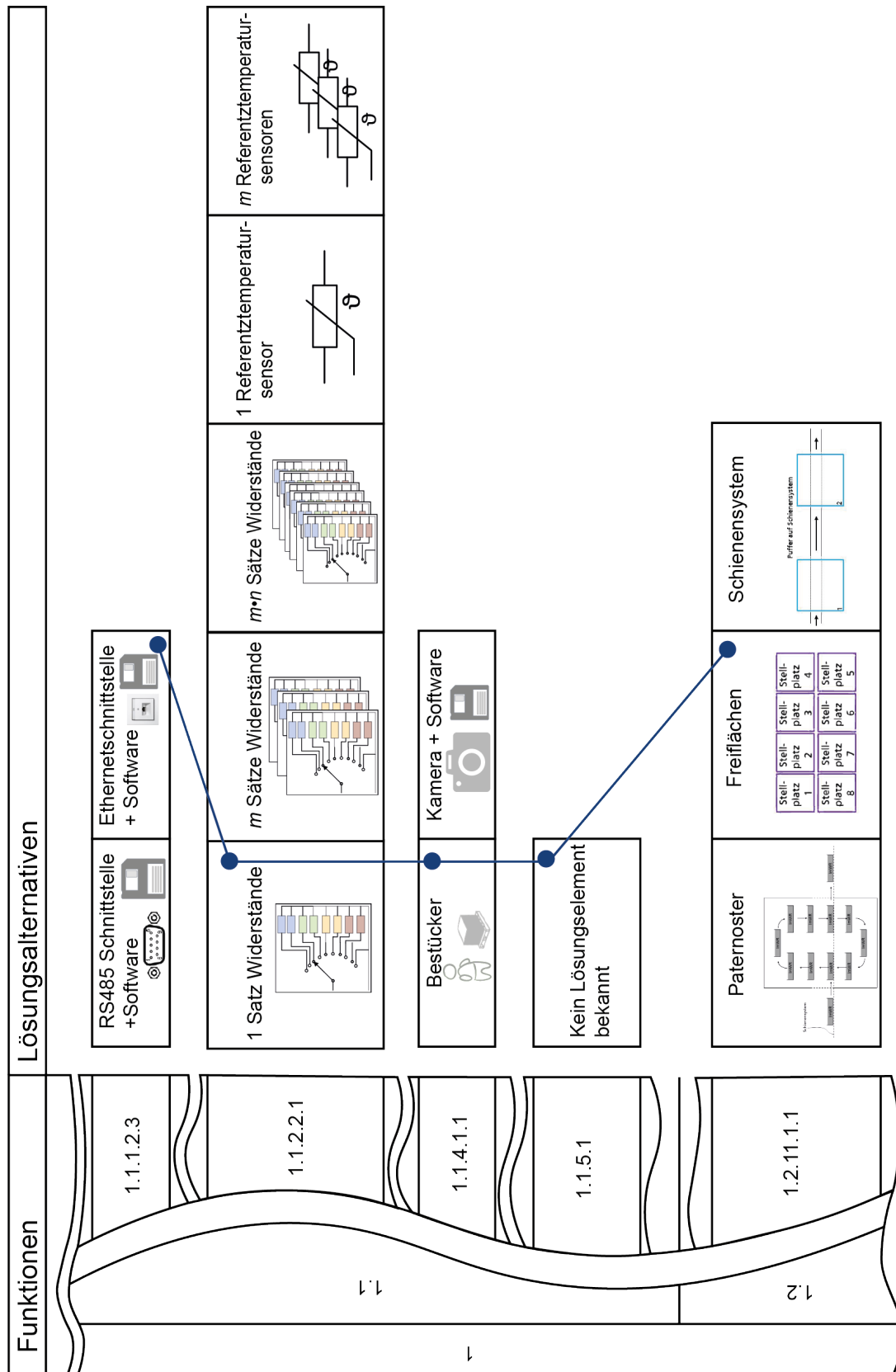


Bild 5-23: Ausschnitt des Morphologischen Kastens des Prüfmittels für ImWR

Aus Platzgründen sind in Bild 5-23 lediglich die Nummern der Funktionen aus der Funktionshierarchie eingetragen. Die Zuordnung der Nummern der Funktionen zu deren Namen und der funktionalen Anforderung aus der die Funktionen folgen ist (vgl. auch Bild 5-19, Bild 5-20 und Bild 5-21):

- Funktion 1.1.1.2.3: *Kundensoftware auf Richtigkeit überprüfen*
Folgt aus Anforderung P8: *Das Prüfmittel muss in der Lage sein zu überprüfen, ob die richtige Kundensoftware auf dem ImWR installiert ist* (vgl. Bild 5-18).
- Funktion 1.1.2.2.1: *Motortemperaturwertverarbeitung überprüfen*
Folgt aus Anforderung P2: *Das Verarbeiten des Motortemperaturwertes muss überprüft werden* (vgl. Bild 5-18).
- Funktion 1.1.4.1.1: *Aufkleber/Typenschilder/Warnhinweise überprüfen*
Folgt aus Anforderung P6: *Das Prüfmittel muss in der Lage sein zu überprüfen, ob die Aufkleber/Typenschild/Warnhinweise bei Auslieferung vorhanden sind* (vgl. Bild 5-18).
- Funktion 1.1.5.1: *Y-Kondensatoren überprüfen*
Folgt aus Anforderung P7: *Das Prüfmittel muss in der Lage sein den richtigen Verbau und Toleranzen der Y-Kondensatoren im eingebauten Zustand zu überprüfen* (vgl. Bild 5-18).
- Funktion 1.2.11.1.1: *Pufferstellfläche (für geprüfte ImWR) zur Verfügung stellen*
Folgt aus Anforderung 1: *Das Prüfmittel muss eine Stellfläche für geprüfte ImWR zur Verfügung stellen* (vgl. Bild 5-18).

Der Funktion 1.1.2.2.1 *Motortemperaturwertverarbeitung überprüfen* sind die möglichen mehrfachen Lösungselemente zugeordnet. Es handelt sich dabei um die Funktion, anhand derer in den vorangegangenen Unterkapiteln die mehrfach vorhandenen Funktionen erläutert wurden. Da ein Morphologischer Kasten in mehr als zwei Dimensionen kaum darstellbar ist und in erster Linie die Anzahl der Lösungsalternativen für die Gesamtlösung von Bedeutung ist, sind die Dimensionen innerhalb der Lösungselemente angegeben ($1, m, m \cdot n$).

Eine Besonderheit ist bei den Lösungsalternativen von Funktion 1.1.4.1.1 zu erkennen. Als eine Lösungsalternative für die Funktion *Aufkleber/Typenschilder/Warnhinweise überprüfen* ist ein technisches System (z. B. Software + Kamera) eingetragen. Alternativ kann diese Funktion auch durch eine Mitarbeiterrolle erfüllt werden. Der Mitarbeiter, der diese Rolle erfüllt, stellt also im Sinne dieser Funktion einen Teil des Prüfmittels dar. In der späteren Wirkstruktur des Prüfmittels (Bild 5-24) ist diese Mitarbeiterrolle als grünes Systemelement dargestellt (normal gelb als Umfeldelement).

Eine weitere Besonderheit stellt die Funktion *Y-Kondensatoren überprüfen* dar. Es kann zunächst kein Lösungselement/Wirkprinzip ermittelt werden, welches diese Funktion erfüllt. Es muss nun die weitere Verfahrensweise ermittelt werden. Dies könnte z. B. eine Absprache mit dem Kunden sein, von dem die Anforderung stammt, mit dem Ziel

die Anforderung anzupassen. Denkbar wäre auch ein Projekt, in dem ermittelt wird, wie im eingebauten Zustand die Y-Kondensatoren überprüft werden können. Diese zunächst nicht zu erfüllende Anforderung bzw. Funktion macht zusätzlich deutlich, dass eine Notwendigkeit der frühzeitigen Prüfplanung und Prüfmittelkonzipierung besteht. Zu diesem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess besteht noch genügend Zeit die weitere Vorgehensweise zu klären.

Im Morphologischen Kasten (Bild 5-23) ist exemplarisch ein sinnvoller Lösungspfad durch den Morphologischen Kasten dargestellt. Die verschiedenen Pfade sind anhand einer Nutzwertanalyse bewertet worden. Die Bewertungskriterien der Nutzwertanalyse entsprechen ausgewählten nicht funktionalen Anforderungen (NFA) aus der Anforderungsliste (Bild 5-18). Aus den so ausgewählten Lösungsalternativen kann die Wirkstruktur gebildet werden.

Grundidee der Gesamtlösung

Aus dem Morphologischen Kasten ergibt sich eine favorisierte Gesamtlösung. Je vier ImWR werden in einem Wagen übereinander angeordnet (vgl. Gestalt, Bild 5-26). Der Wagen entspricht dabei einem (gesamten) Prüfadapter. Die vier ImWR werden über die ImWR-Schnittstellen mit dem Wagen verbunden. Ein Wagen mit vier ImWR wird zunächst in eine HV-Prüfkabine geschoben (vgl. Bild 5-27). Dort wird der Wagen mit der HV-Prüfkabine (Hochvolt-Prüfkabine) verbunden. In der HV-Prüfkabine werden alle Prüfmerkmale aller vier ImWR des Wagens geprüft, bei denen Hochspannung benutzt werden soll. Nach den HV-Prüfungen wird der Wagen durch einen Mitarbeiter in eine weitere Prüfkabine (FLP – Funktions- und Leistungsprüfung) geschoben, in der alle weiteren Prüfmerkmale abgeprüft werden. Gleichzeitig können in der HV-Prüfkabine die nächsten vier ImWR eines Wagens geprüft werden. Für den initialen Bau des Prüfmittels wird zur Prüfung der mehrfach vorhandenen Funktionen zunächst nur eine Lösungsalternative pro mehrfacher Funktion realisiert. Das Konzept des Prüfmittels wird jedoch so erstellt, dass eine spätere Erweiterung mit mehr Lösungsalternativen möglich ist, um insbesondere den Durchsatz zu erhöhen. Beispielsweise wird zunächst ein Satz an Widerständen als Lösungsalternative zur Überprüfung der Funktion *Motortemperaturwertverarbeitung überprüfen* vorgesehen (Funktion 1.1.2.2.1 in Bild 5-23). Soll der Durchsatz später erhöht werden, kann z. B. auf m Sätze an Widerständen (7) oder $m \cdot n$ Sätze an Widerständen (28) erweitert werden. Gleiches gilt insbesondere für die Abgabe der Leistung der einzelnen Leistungsmodule A, B, C. Die Abgabe der Leistung wird zunächst durch einen (nachgebildeten) Motor überprüft. Später können, wie bei der Überprüfung der Motortemperaturwertverarbeitung, mehrere (nachgebildete) Motore nachgerüstet werden (Adaption für steigenden Durchsatz). Da diese Prüfung jeweils viel Zeit beansprucht, liegt bei der Parallelisierung dieser ein großes Potential zur Verringerung der Durchlaufzeit bzw. der Steigerung des Durchsatzes.

5.3.4.6 Wirkstruktur

Zur Erstellung der Wirkstruktur werden die aus dem Morphologischen Kasten ausgewählten Lösungsalternativen durch Beziehungen miteinander und mit den Umfeldelementen verbunden. Das Umfeldmodell wird im Sinne der Konzipierung überarbeitet und erweitert.

Im Anwendungsbeispiel des Prüfmittels sind zum Beispiel die verschiedenen Mitarbeiterrollen, die im Sinne der Funktion des Prüfmittels handeln, als grüne Systemelemente gekennzeichnet bzw. eingefügt.

In Bild 5-24 ist die Wirkstruktur des Prüfmittels auf Systemebene vereinfacht dargestellt. Die Mitarbeiterrollen, die Funktionen des Prüfmittels übernehmen sind dabei grün markiert (vgl. z. B. Mitarbeiterrolle *Bestücker* im morphologischen Kasten, Funktion 1.1.4.1.1). Der Mitarbeiter, der die Rolle *Bestücker* erfüllt, erkennt mit seinen Augen, ob die Aufkleber/Typenschilder/Warnhinweise auf dem ImWR ordnungsgemäß angebracht/vorhanden sind (vgl. Fluss *Optische Wahrnehmung: Aufkleber/Typenschilder/Warnhinweise* in der Wirkstruktur des Prüfmittels – mit einem blauen Oval markiert). Aus den Funktionen, die den Mitarbeiterrollen zugewiesen sind und den Beziehungen in der Wirkstruktur können erste Kompetenzprofile/notwendige Qualifikationen der Mitarbeiter abgeleitet werden.

In Bild 5-24 ist ebenfalls das Systemelement *Freifläche/Abstellplatz für geprüfte ImWR* zu sehen, welches die *Funktion 1.2.11.1.1* aus dem Morphologischen Kasten (Bild 5-23) erfüllt.

Die beiden Ausgewählten Lösungselemente *Ethernetschnittstelle* und *Software* zur Erfüllung der Funktion 1.1.1.2.3 des Morphologischen Kastens sind im Anhang in Bild A-9 zu sehen und dort blau mittels eines Ovals gekennzeichnet.

Der Informationsfluss *Temperaturwert*, der von den nachgebildeten Temperatursensoren ausgeht (im Modul FT- und Leistungsprüfung – Schaltschrank), ist in der Wirkstruktur des Prüfmittels gekennzeichnet (blaues Oval). Über den Prüfadapter (Tablettwagen) ist er mit dem Prüfling (ImWR) verbunden. Das Prüfmittel bildet also an dieser Stelle das Umfeld des Prüflings nach.

Die einzelnen Module der Wirkstruktur (Funktions- und Leistungsprüfung – Schaltschrank; HV-Prüfung; Steuerungsrechner) sind im Anhang A-4 einzeln dargestellt. In dem Modul *Funktions- und Leistungsprüfung – Schaltschrank* sind dabei die Widerstände zur Nachbildung der Temperatursensoren in den Nebenantrieben/Motore enthalten (vgl. Morphologischer Kasten, Funktion 1.1.2.2.1).

Zur besseren/intuitiven Lesbarkeit sind im Anwendungsbeispiel die einzelnen Systemelemente mit je einem Piktogramm versehen worden. Exemplarisch ist dies ebenfalls im Modul *Funktions- und Leistungstest – Schaltschrank* anhand der Widerstände zu sehen (Bild A-7).



5.3.4.7 Erstellen der Grobgestalt

In Bild 5-25 ist das grobe Layout der Prüffläche dargestellt, die zur Prüfung des Gesamtsystems ImWR benötigt wird. Auf der linken Seite sind zwei Bereiche für die Dichtigkeitsprüfung und die Vorinbetriebnahme bei geöffnetem Deckel dargestellt (vgl. Bild 5-15). Auf der rechten Seite ist das grobe Layout des EoL-Prüfmittels dargestellt. Unten sind ein manueller Prüfplatz und ein Reparaturplatz dargestellt. Diese können zur Fehlerbehebung von Prüflingen (ImWR) genutzt werden, falls Prüflinge die Prüfungen nicht bestehen. Der manuelle Prüfplatz und der Reparaturplatz werden in diesem Durchlauf nicht weiter detailliert, da dadurch keine wesentlichen Anforderungen an andere Funktionsbereiche zu erwarten sind.

Der Fokus der Konzipierung liegt daher auf den restlichen vier Bereichen. Es ist ein Abstellplatz/Freifläche für nicht geprüfte ImWR vorgesehen sowie ein Abstellplatz/Freifläche für geprüfte ImWR. Der Abstellplatz für geprüfte ImWR ist im Morphologischen Kasten – Bild 5-23, Funktion 1.2.11.1.1 – zu sehen. Die ImWR befinden sich dabei in den Wagen (vgl. Bild 5-26). Jeder Wagen kann vier ImWR aufnehmen. Es sind weiterhin Flächen für die HV-Prüfung und die Funktions- und Leistungsprüfung vorgesehen (detailliertes Layout in Bild 5-27).

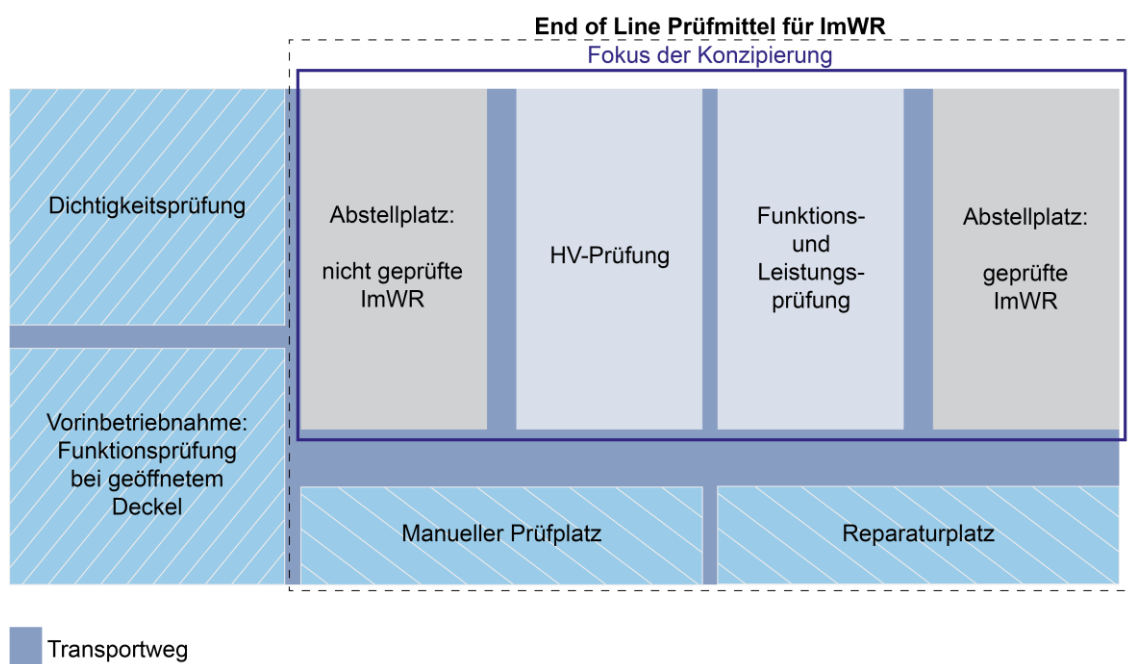


Bild 5-25: Grobes Layout der Prüffläche

In Bild 5-26 ist ein Wagen zur Aufnahme von vier ImWR dargestellt. Die ImWR werden übereinander in dem Wagen angeordnet, um Fläche zu sparen. Von diesen Wagen sollen mehrere existieren – am Anfang zunächst ein Wagen und mit steigender Stückzahl mehrere Wagen. Diese können ebenfalls für den innerbetrieblichen Transport benutzt werden. Unterhalb des Wagens existieren Führungsschienen, um die Positionierung der Wagen in den Prüfkabinen zu vereinfachen (vgl. Bild 5-27). Der Wagen funktioniert dabei wie ein großer Prüfadapter, mit dem die Prüflinge mit dem Prüfmittel

verbunden werden. Zwischen dem Wagen und den Prüfkabinen besteht eine Schnittstelle, die bei jedem Wagen gleich ausgeführt ist. Die Verbindung des Wagens mit der Kabine ist somit ohne großen Zeitaufwand möglich. Die Verbindung der vier Prüflinge mit dem Wagen geschieht durch einen Teil-Prüfadapter und geschieht vor der Verbindung des Wagens mit den Prüfkabinen. Die Verbindung eines Wagens mit einer Prüfkabine kann so mit wenig Zeitaufwand erfolgen, um die Prüfkabinen möglichst gut auszulasten.

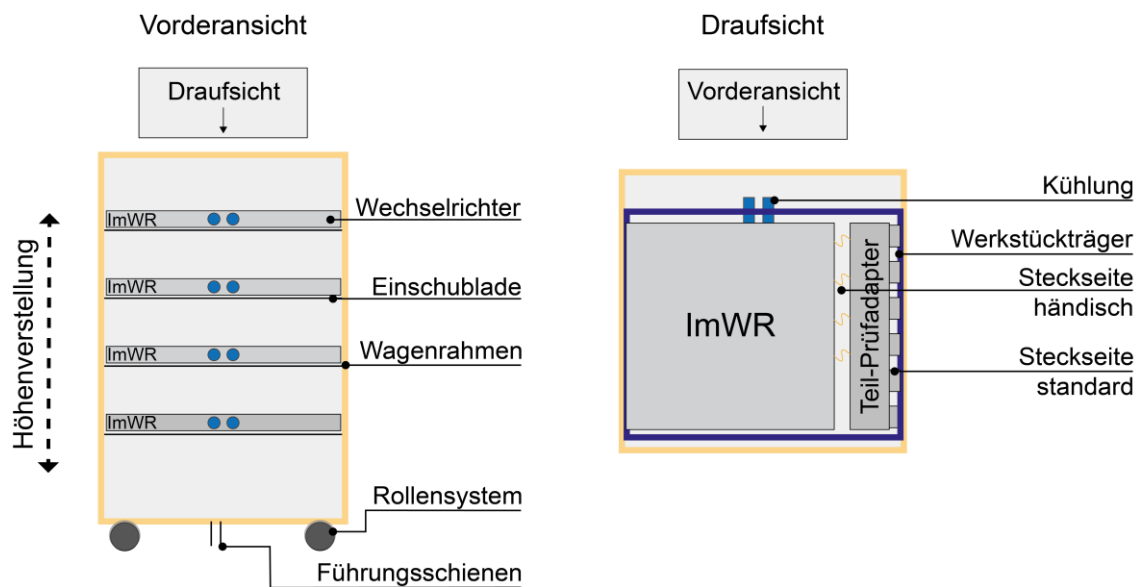
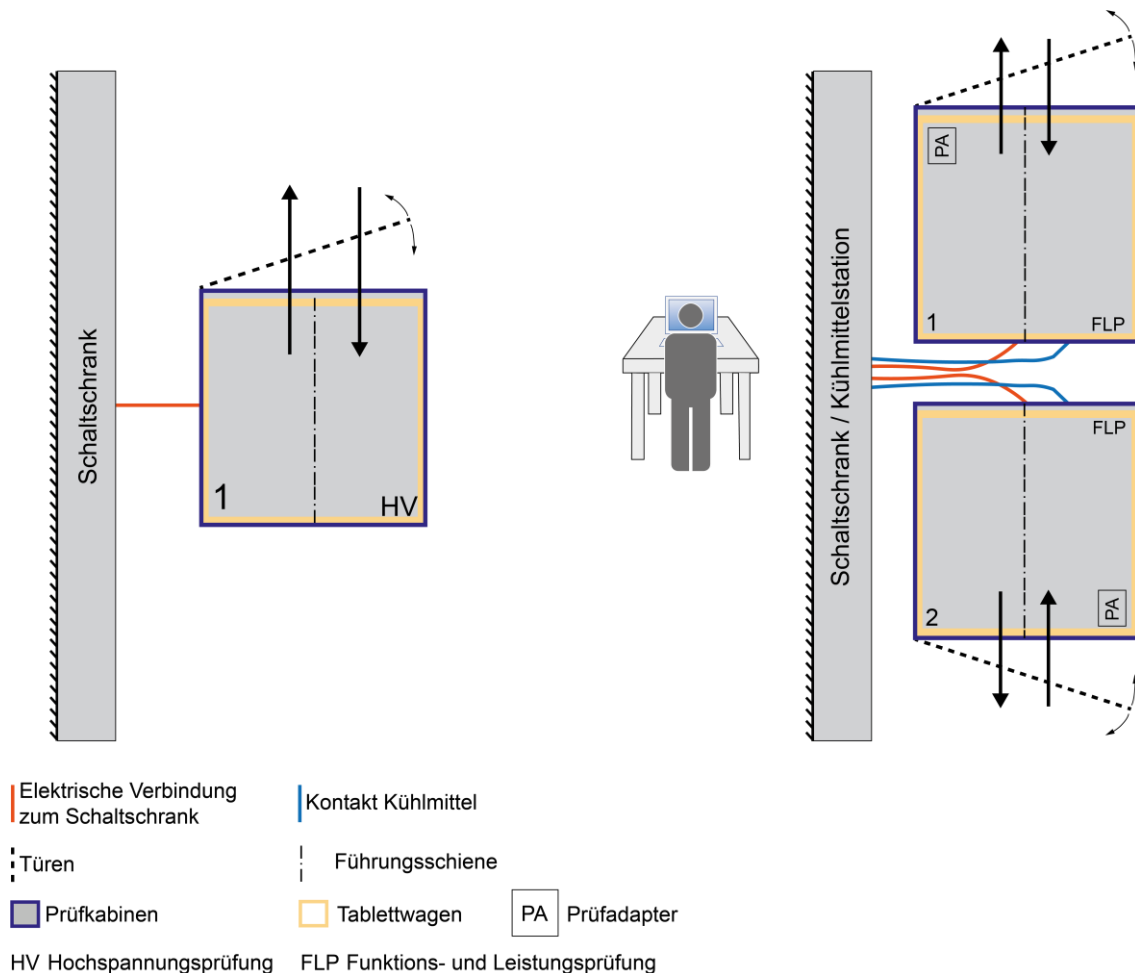


Bild 5-26: Wagen zur Aufnahme von vier ImWR

In Bild 5-27 sind die Prüfkabinen dargestellt, in die die Wagen zur Prüfung von jeweils vier ImWR eingeschoben werden bzw. mit denen die Wagen verbunden werden. Beim Einschieben der Wagen in die Kabine wird durch eine Führung unter dem Wagen und in der Kabine die richtige Positionierung unterstützt. Auf der linken Seite ist eine HV-Prüfkabine dargestellt. Diese ist mit einem Schaltschrank verbunden, der im Wesentlichen die Elektrik/Elektronik zur HV-Prüfung beinhaltet. In dieser Prüfkabine erfolgen zunächst die HV-Prüfungen der vier Prüflinge des Wagens. Sind diese Prüfungen erfolgreich bestanden, wird der Wagen in eine FLP-Kabine (Funktions- und Leistungsprüfungskabine) eingeschoben und damit verbunden. Der Großteil der Prüfmerkmale wird hier geprüft. In dem Schaltschrank/Kühlmittelstation befindet sich z. B. der Satz Widerstände zur Prüfung der Funktion *Motortemperaturwertverarbeitung überprüfen* sowie die Nachbildung der Motore (Nebenantriebe). Im ersten Entwicklungsschritt bzw. in der ersten Ausbaustufe ist zunächst eine FLP-Kabine geplant. Eine zweite bzw. mehrere zusätzliche FLP-Kabinen sind vorgesehen. Während der Überprüfung der Prüflinge aus der zweiten Kabine kann dann der Wagen in der ersten Kabine gewechselt werden, wodurch der Durchsatz ein wenig erhöht werden kann. Der Durchsatz kann zusätzlich dadurch erhöht werden, dass die Prüfung der dann acht gleichzeitig anschließbaren Prüflinge abends begonnen werden kann und während der Abwesenheit des Prüfpersonals über Nacht durchgeführt wird. Zudem wird durch die zweite FLP-Kabine die

Werkerbindung verringert, da die Prüfungen längere Zeit autonom ablaufen können. Der Werker hat ein größeres Zeitfenster zum Wechseln eines Wagens und kann somit einen Wagen wechseln, wenn es sich für ihn gut in den Arbeitsablauf integrieren lässt. Eine zweite HV-Kabine ist nicht vorgesehen, da die Prüfungen in der HV-Kabine im Verhältnis zu den Prüfungen in der FLP-Kabine nur sehr wenig Zeit in Anspruch genommen werden.



*Bild 5-27: Prüfkabinen zur Aufnahme der Wagen als Draufsicht
links: Hochvoltkabine;
rechts: Spätere Ausbaustufe mit zwei FLP-Kabinen*

5.3.4.8 Verhaltensbeschreibung

Eine detaillierte Beschreibung des Verhaltens erfolgt in diesem ersten Durchlauf des Anwendungsbeispiels nicht, da dadurch keine nennenswerten Anforderungen an andere Funktionsbereiche zu erwarten sind. Grundsätzlich ist an dieser Stelle im nächsten Durchlauf auch die Reihenfolge der Prüfungen festzulegen. Bei der Inbetriebnahme/Prüfung der Prüfmerkmale wird dabei zunächst in der Reihenfolge vorgegangen, die das geringste Risiko für die Zerstörung des Prüflings und des Prüfmittels birgt. Weiterhin wird die Reihenfolge der Prüfungen eines Prüflings so festgelegt, dass die Prüf-

merkmale, bei denen die höchste Fehlerhäufigkeit zu erwarten ist, zuerst geprüft werden.

5.3.4.9 Ableiten von Anforderungen an andere Funktionsbereiche

Zur Ermittlung von Anforderungen, die sich aus dem Prüfmittelkonzept ergeben, wird das Konzept des Prüfmittels auf Wechselwirkungen hin untersucht (Umfeldmodell und Funktionen bzw. deren ausgewählte Lösungsalternativen).

Die Beziehungen zu den **Umfeldelementen des Prüfmittels** (Bild 5-24) werden analysiert, die das Prüfmittel mit seinen Umfeldelementen verbindet. Ist zu erkennen, dass sich aus einer Beziehung eine Anforderung ergibt, die an einen weiteren Funktionsbereich übergeben werden muss, so wird dies in der entsprechenden Anforderungsliste dokumentiert.

Beispielsweise ergibt sich aus der Verbindung *Mechanische Verbindung* (mittels der Montagevorrichtung im Umfeld) zwischen dem Prüfmittel und dem Prüfling (ImWR), dass das ImWR so gestaltet sein muss, dass es durch das Prüfmittel mit wenig Aufwand verbunden werden kann (Anforderung Nr. 2 in Bild 5-28).

Weiterhin ergibt sich aus der Verbindung des Prüfmittels mit der Netzversorgung im Umfeld, dass ein Netzanschluss (an das elektrische Energieversorgungsnetz) bereitzustellen ist (drei Phasen mit 400 V Wechselspannung). Die maximale Anschlussleistung kann näherungsweise durch den Leistungsfluss zwischen Prüfmittel und Prüfling (Nachbildung der DC-Zwischenkreisspannung) abgeschätzt werden ($120 \text{ A} \cdot 750 \text{ V} = 90 \text{ kW}$). Es muss dem Prüfmittel also eine dreiphasige 400 V Anschlussleistung von 90 kW (kurzzeitig) zur Verfügung gestellt werden (Anforderung 1 in Bild 5-29).

Die **Funktionen des Prüfmittels** und die sie erfüllenden Lösungsalternativen werden ebenfalls hinsichtlich Wechselwirkungen untersucht. Dazu werden alle Funktionen mit den ausgewählten Lösungsalternativen des Morphologischen Kastens (Bild 5-23) analysiert. Ist zu erkennen, dass sich aus einer Funktion des Prüfmittels eine Anforderung an einen weiteren Funktionsbereich ergibt, so wird dies in der entsprechenden Anforderungsliste dokumentiert.

Beispielsweise ergibt sich aus der Funktion 1.1.1.2.3 *Kundensoftware auf Richtigkeit überprüfen* die Anforderung, dass das ImWR in der Lage sein muss die Versionsnummer der Kundensoftware an das Prüfmittel auszugeben (Anforderung 1.2 in Bild 5-28).

Die Anforderung *Das ImWR muss ein Prüfbyte mit mindestens 32 Bit pro Modul zur Verfügung stellen, welches durch das Prüfmittel geändert werden kann* (Anforderung 6 in Bild 5-28), folgt aus einer Funktion des Prüfmittels (diese Funktion geht dabei auf die Anforderungsliste des Prüfmittels zurück (Bild 5-18) bzw. die NPB Anforderungsliste (Bild 5-13) – vgl. jeweils Quelle PS_2002).

Die während der Prüfplanung und Prüfmittelenwicklung **identifizierten Anforderungen** sind in die entsprechende Anforderungsliste **integriert**.

So ergab sich während der *Ermittlung von NPB Anforderungen* (vgl. letzten Abschnitt in Kapitel 5.3.3.3) die Anforderung, dass *Das ImWR die Möglichkeit bieten soll die interne HV-DC-Spannungsmessungen durch das Prüfmittel justieren zu lassen*. Dies stellt eine Anforderung an das ImWR dar. Die Anforderung ist in die Anforderungsliste, die an die Produktentwicklung übergeben wird, integriert (vgl. Anforderung 4 in Bild 5-28).

Weiterhin ist während der Konzipierung des Prüfmittels die Anforderung identifiziert worden, dass beim Abspeichern der Prüfergebnisse die Struktur der Datenablage jede in der Zukunft mögliche Konfiguration des ImWR berücksichtigen muss (vgl. Anforderung 3 in Bild 5-30). Diese Anforderung stellt eine Anforderung dar, die an die Unternehmens-IT gerichtet ist.

Eine weitere Anforderung, die während der Prüfmittelkonzipierung identifiziert wurde, ist die Anforderung, dass eine Möglichkeit zur Reinigung der aus dem Feld (meist vom Kunden) zurückkommenden ImWR bereitgestellt werden muss. Dies stellt eine Anforderung an den Service dar (Anforderung 2 in Bild 5-31). Damit soll eine Verschmutzung des Prüfmittels verhindert werden (insbesondere auch des Kühlmediums). Eine übermäßige Verschmutzung des Prüfmittels kann zu ungewollten Störungen führen und soll somit vermieden werden.

Ausschnitte der verschiedenen Anforderungslisten, in denen die Anforderungen sortiert nach Ziel der Anforderungen gesammelt werden, sind in Bild 5-28, Bild 5-29, Bild 5-30 und Bild 5-31 dargestellt. In Bild 5-28 sind die Anforderungen zusammengefasst, die an die Produktentwicklung übergeben werden. In Bild 5-29 sind die Anforderungen zusammengefasst, die an die Produktionssystementwicklung übergeben werden. In Bild 5-30 sind die Anforderungen zusammengefasst, die an die Unternehmens-IT übergeben werden. In Bild 5-31 sind die Anforderungen zusammengefasst, die an den Service des Unternehmens übergeben werden sollen. In den einzelnen Anforderungslisten ist die Quelle der Anforderung dokumentiert und eine Rückverfolgbarkeit somit sichergestellt. Eine Anforderung kann dabei aus mehreren Quellen resultieren. Beispielsweise wurde die Anforderung *Die IT muss in der Lage sein Eigenschaften der geprüften ImWR (Konfiguration, Seriennummern des Gesamtsystems und der Module, Softwarestände usw.) abzuspeichern und den Prüfergebnissen zuzuordnen* (vgl. Anforderung 1 in Bild 5-30) durch eine Beziehung/Fluss zu einem Umfeldelement identifiziert und zusätzlich bei der Stakeholderbefragung identifiziert.

Anforderungen an die Produktentwicklung		
Quelle	Nr.	Anforderung
Prüfmittelfunktion 1.1.1.2.3	1.2	Das ImWR muss in der Lage sein die Versionsnummer der Kundensoftware an das Prüfmittel auszugeben.
Prüfmittelfunktion 1.1.2.3.6	1.6	Das ImWR muss in der Lage sein die durch den ImWR selbst gemessene HV-DC-Spannung des Zwischenkreises an das Prüfmittel auszugeben.
Umfeldmodell (Beziehung Mechanische Verbindung)	2	Das ImWR muss mechanisch so gestaltet sein, dass es durch das Prüfmittel mit wenig Aufwand verbunden werden kann (mithilfe der Montagevorrichtung).
NPB Anforderungsliste (FMEA_MA1.2.1); Prüfmittelfunktion 1.2.6.1.2	4	Das ImWR muss die Möglichkeit bieten die internen HV-DC-Spannungsmessungen durch das Prüfmittel justieren zu lassen. (Kommentar: Anforderung wurde während der Prüfplanung schon entdeckt)
Prüfmittelfunktion 1.2.6.3	6	Das ImWR muss ein Prüfbyte mit mindestens 32 Bit pro Modul zur Verfügung stellen, welches durch das Prüfmittel geändert werden kann.

Bild 5-28: Anforderungen zur Übergabe an die Produktentwicklung

Anforderungen an die Produktionssystementwicklung		
Quelle	Nr.	Anforderung
Umfeldmodell des Prüfmittels (Netzversorgung)	1	Dem Prüfmittel muss eine dreiphasige 400 V Anschlussleistung von 90 kW (kurzzeitig) zur Verfügung gestellt werden.
Umfeldmodell des Prüfmittels (Umwelt)	2	Der Hallenboden muss so beschaffen sein, dass die Wagen des Prüfmittels gut rollen können und somit nicht "wackeln".

Bild 5-29: Anforderungsliste zur Übergabe an die Produktionssystementwicklung

Anforderungen an die Unternehmens-IT		
Quelle	Nr.	Anforderung
Umfeldmodell des Prüfmittels (Netzwerkanbindung), Stakeholder Qualitätswesen	1	Die IT muss in der Lage sein Eigenschaften der geprüften ImWR (Konfiguration, Seriennummern des Gesamtsystems und der Module, Softwarestände usw.) abzuspeichern und den Prüfergebnissen zuzuordnen.
Umfeldmodell des Prüfmittels (Netzwerkanbindung)	2	Es muss ein Konzept erarbeitet werden, wie die Daten vom Prüfmittel an die IT übertragen werden und wie diese abgelegt werden sollen.
Prüfmittelentwicklung	3	Die Struktur der Datenablage muss jede in Zukunft mögliche Konfiguration des ImWR berücksichtigen.

Bild 5-30: Anforderungen zur Übergabe an die Unternehmens-IT

Anforderungen an den Service		
Quelle	Nr.	Anforderung
Prüfmittelentwicklung	1	Sollen ImWR, die gebraucht aus dem Feld zurückkommen, von dem EoL-Prüfmittel überprüft werden, so müssen diese vorab gesäubert werden (Verschmutzung des Prüfmittels verhindern).
Prüfmittelentwicklung	2	Eine Möglichkeit zur Reinigung der aus dem Feld zurückkommenden ImWR muss bereitgestellt werden.
Prüfmittelentwicklung	3	Sollen ImWR, die gebraucht aus dem Feld zurückkommen, von dem EoL-Prüfmittel überprüft werden, so müssen die Kühlkanäle vorab durch Spülung gesäubert werden (Verunreinigung des Kühlsystems des Prüfmittels verhindern).

Bild 5-31: Anforderungen zur Übergabe an den Service

Die ermittelten Anforderungen werden zu Beginn des nächsten Durchlaufs in die jeweiligen Funktionsbereiche übergeben (vgl. Bild 5-4 Sprungmarker 11 und 31). Beispielsweise kann die Produktentwicklung die aus der Prüfmittelkonzipierung kommenden Anforderungen somit frühzeitig berücksichtigen.

An dieser Stelle stechen die Anforderungen an die Unternehmens-IT hervor. Dass bestimmte Daten des Prüflings in einer digitalen Datenablage archiviert werden sollen, ist grundsätzlich nicht neu. Durch die modulare Struktur und die verschiedenen möglichen Konfigurationen des ImWR wird die bisher verwendete Datenablage nicht ohne Änderungen genutzt werden können. Durch die frühzeitige Identifikation dieses Sachverhaltes bleibt nun genügend Zeit ein auf das ImWR angepasstes Konzept zur Datenablage zu erarbeiten.

Durch den Eintrag der Quellen in die Anforderungslisten (Bild 5-28, Bild 5-29, Bild 5-30 und Bild 5-31) und die auch im gesamten vorangegangenen Entwicklungsprozess immer dokumentierten Quellen jedes Schrittes sind alle Anforderungen bis hin zur ursprünglichen Quelle rückverfolgbar. Sollten Rückfragen zu den Anforderungen bestehen, ist dies somit auch einfach möglich.

Zum Beispiel folgt die Anforderung *Das ImWR muss in der Lage sein die Versionsnummer der Kundensoftware an das Prüfmittel auszugeben* (vgl. Anforderung 1.2 in Bild 5-28) aus der Prüfmittelfunktion 1.1.1.2.3 des Prüfmittels (vgl. Bild 5-23). Die Prüfmittelfunktion, die auch in der Funktionshierarchie des Prüfmittels auftaucht, geht zurück auf die Anforderung an das Prüfmittel *Das Prüfmittel muss in der Lage sein zu überprüfen, ob die richtige Kundensoftware auf dem ImWR installiert ist* (Bild 5-18). Diese Anforderung resultiert aus dem Prüfplan (Bild 5-14), der aus dem vorläufigen Prüfplan (Bild 5-12) entstanden ist. Aus dem vorläufigen Prüfplan kann entnommen werden, dass die Anforderung auf den Stakeholder *Vertrieb* zurückgeht, der im Prozessschritt *Stakeholder- und Expertenbefragung* befragt wurde.

Insgesamt ergeben sich einige wenige Anforderungen vom Prüfmittel an das Produkt, das Produktionssystem und weitere Funktionsbereiche. Dass es nur wenige Anforderungen sind, ist dabei positiv zu sehen. Dies zeigt, dass sinnvoll bei der Prüfmittelentwicklung konzipiert wurde. Ziel der Konzipierung darf ja nicht ein Konzept sein, welches möglichst viele Anforderungen an das Produkt oder weitere Funktionsbereiche

stellt. Ziel ist es möglichst wenig Anforderungen zu stellen bzw. Anforderungen, die wenig Aufwand generieren. Beim Produkt müsste eine solche Anforderung bei jedem einzelnen produzierten Produkt berücksichtigt werden und nicht nur bei einem Stück oder wenigen Stücken wie beim Prüfmittel.

5.3.4.10 Zusammenfassung des Prüfmittelkonzeptes

Unter Berücksichtigung der ermittelten Prüfmerkmale bzw. der ermittelten Anforderungen ist ein Prüfmittelkonzept erarbeitet worden. Eine wesentliche Forderung war, dass das Prüfmittel jede Konfiguration des modularen Aufbaus des ImWR prüfen kann. Eine weitere Forderung war, dass der Durchsatz des Prüfmittels durch Erweiterung des Prüfmittels in der Zukunft gesteigert werden kann. Das erarbeitete Prüfmittelkonzept erfüllt beide Anforderungen. Die Strukturierung des Prüfmittels anhand der Struktur des Produktes und die modulare Struktur des Prüfmittels selbst machen dies möglich. Erfahrungswissen ist, insbesondere bei der Ermittlung der Anforderungen an das Prüfmittel, mit einbezogen worden. Weiterhin sind viele Schritte der Konzipierung in Workshopform durchgeführt worden, wodurch weiteres Erfahrungswissen direkt mit einfließen konnte. Aus dem erarbeiteten Prüfmittelkonzept sind Anforderungen an andere Funktionsbereiche – insbesondere die Entwicklung – abgeleitet worden, die in der weiteren Entwicklung mit berücksichtigt werden und zu Beginn des nächsten Durchlaufs mit einfließen.

Das entstandene Prüfmittelkonzept bzw. dessen Partialmodelle und Anforderungen sind dabei rückverfolgbar durch den gesamten Entwicklungsprozess.

Beispielhaft wird dies an dem Systemelement *Satz Widerstände* gezeigt. Schematisch ist diese Rückverfolgbarkeit in Bild 5-32 dargestellt.

Der *Satz Widerstände* befindet sich als Systemelement in der Wirkstruktur (enthalten im Modul *Funktions- und Leistungsprüfung*, vgl. Bild 5-24 und Bild A-7). Das Systemelement wurde im Morphologischen Kasten (Bild 5-23) anhand der Bewertungskriterien/nicht funktionalen Anforderungen aus mehreren Lösungsalternativen ausgewählt. Die Lösungsalternativen gehen auf die Funktion *Motortemperaturwertverarbeitung überprüfen* (Funktion 1.1.2.2.1) in der Funktionshierarchie des Prüfmittels zurück (Bild 5-19, Bild 5-20, Bild 5-21). Die Funktion ergibt sich aus der Anforderungsliste des Prüfmittels (Bild 5-18). Die Anforderung wurde dabei aus dem Prüfplan (Bild 5-14) übernommen, der aus dem vorläufigen Prüfplan (Bild 5-12) abgeleitet wurde. Das Prüfmerkmal im Prüfplan wurde dabei aus der Funktionshierarchie des Produktes abgeleitet (Bild 5-7, Funktion 1.2.2.4.2.d). Die Funktion selbst wurde aus einer Anforderung (Bild 5-6) an das Produkt (ImWR) abgeleitet. Die Anforderung stammt dabei aus dem Umfeldmodell des Produktes (Bild 5-5), in dem zu erkennen ist, dass das ImWR Werte von Motortemperatursensoren verarbeiten soll.

Das Umfeldmodell (P) des Produktes (vgl. Bild 5-5) hängt dabei unmittelbar mit dem Umfeldmodell (PM) des Prüfmittels (vgl. Bild 5-16) zusammen, da dieses weitestge-

hend das Umfeld des Produktes nachbildet. Der durch das ImWR zu erfassende Temperaturwert im Umfeld (P) des Produktes wird im Umfeld (PM) des Prüfmittels durch das Prüfmittel nachgebildet. Daher kann das Umfeld (PM) des Prüfmittels vereinfacht mit der Unterstützung des Umfelds (P) des Produktes erstellt werden. Der nachgebildete Temperaturwert ist auch in der Wirkstruktur (vgl. Bild 5-24) zu sehen, bis in das Modul hinein, das die Nachbildung durch das Systemelement *Satz Widerstände* vornimmt (vgl. Bild A-7).

Ebenso hängen die Funktionshierarchie (P) des Produktes und Funktionshierarchie (PM) des Prüfmittels direkt zusammen. Aus der zu prüfenden Funktion des Produktes *Motortemperaturwert verarbeiten* (vgl. Funktion 1.2.2.4.2.d in Bild 5-7) ergibt sich automatisch die Funktion des Prüfmittels *Motortemperaturwertverarbeitung überprüfen* (vgl. Funktion 1.1.2.2.1 in Bild 5-20 und Bild 5-21), die diese Produktfunktion überprüfen soll.

So besteht zwischen Umfeld (P)/Funktionshierarchie (P) des Produktes und Umfeld (PM)/Funktionshierarchie (PM) des Prüfmittels direkt ein Zusammenhang. Diese Modelle können teils direkt voneinander abgeleitet werden.

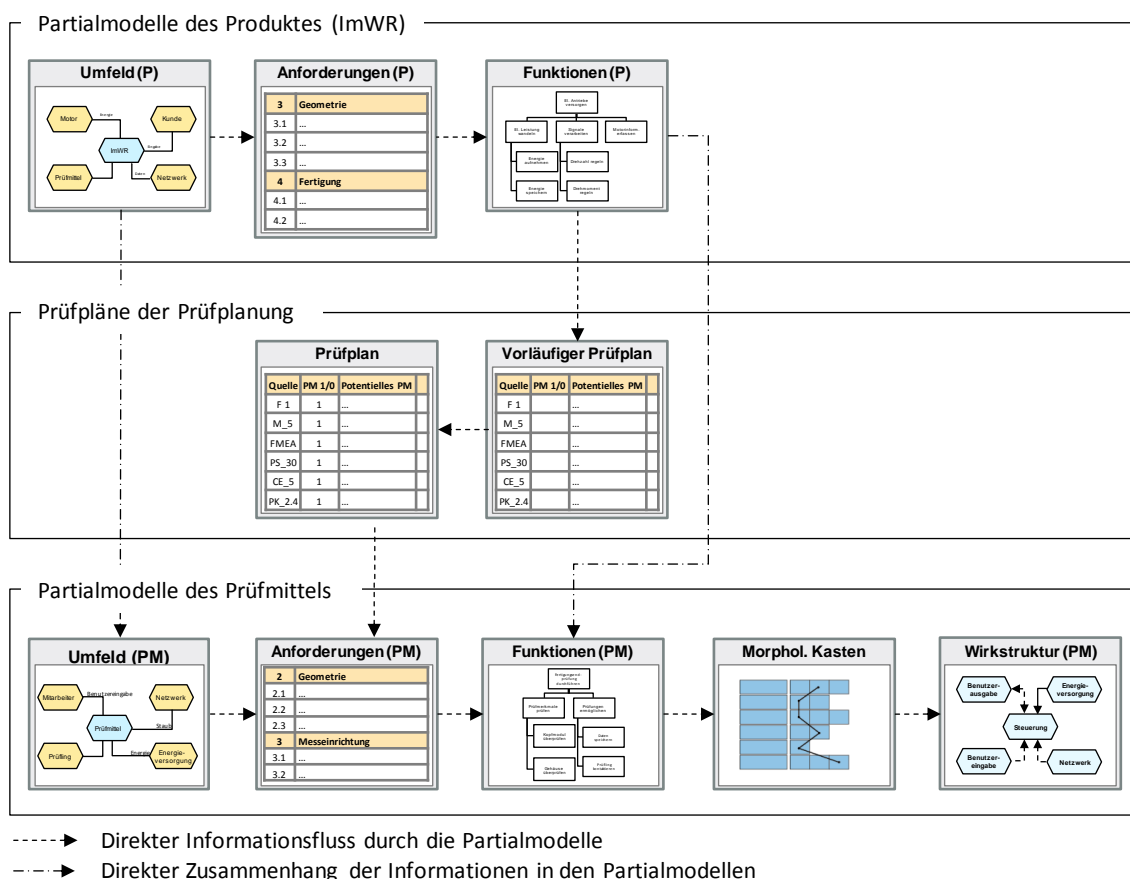


Bild 5-32: Beispiel des Informationsflusses durch den ersten Durchlauf des Entwicklungsprozesses und der Zusammenhänge bzw. die entstandenen Modelle anhand der zu überprüfenden Motortemperaturwertverarbeitung

Der dargestellte Informationsfluss ist nur ein Beispiel für einen Pfad, den die Informationen nehmen können. Zum Beispiel könnte die Quelle eines potentiellen Prüfmerkmals, welches im vorläufigen Prüfplan eingefügt wird, ein Stakeholder des Prüfmittels sein.

5.4 Abgleich der Entwicklungssystematik mit den Anforderungen

In dem vorliegenden Abschnitt wird die Bewertung der erarbeiteten Entwicklungssystematik anhand der Anforderungen aus Kapitel 2.6 durchgeführt. Je Anforderung wird erläutert, wie diese durch die Bestandteile der Entwicklungssystematik erfüllt werden. Durch welche Bestandteile die Anforderungen erfüllt werden ist in Bild 5-33 zusätzlich grafisch dargestellt.

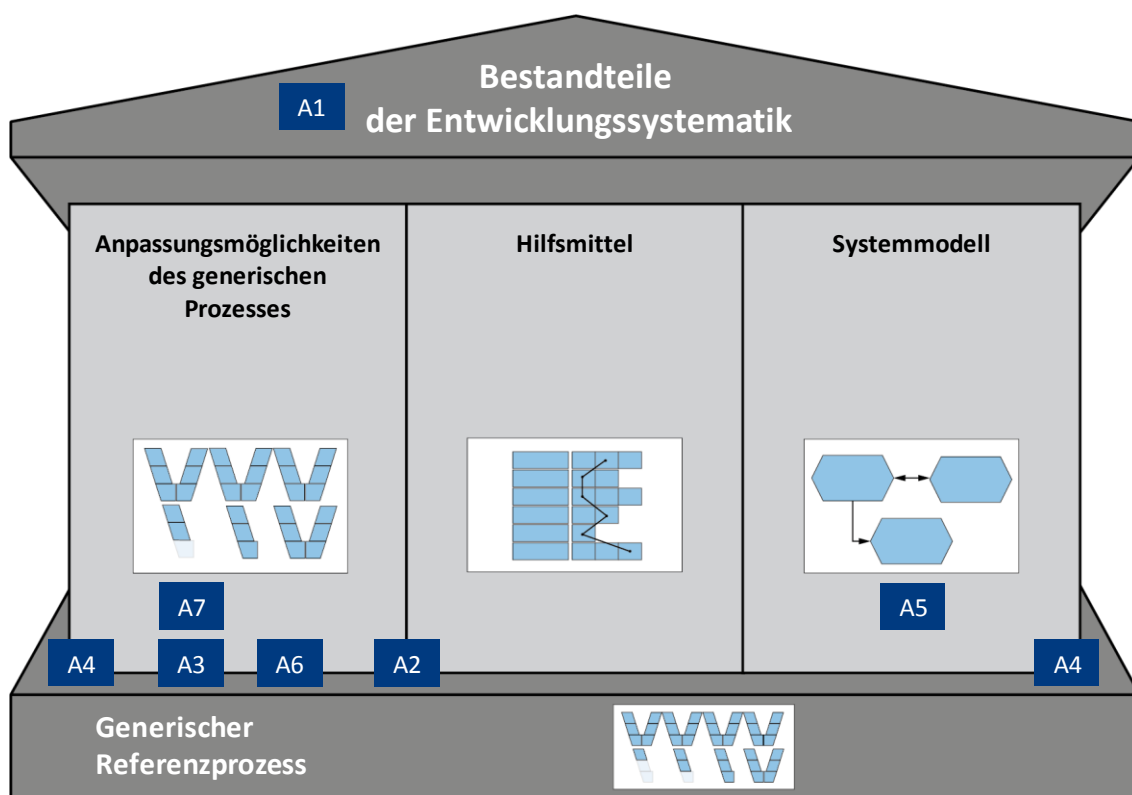


Bild 5-33: Erfüllung der Anforderungen durch die Systematik

A1) Anwendbarkeit bei modularen mechatronischen Systemen: Die Entwicklungssystematik berücksichtigt mit all ihren Bestandteilen die integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem und dabei insbesondere dem Prüfmittel sowie der dazugehörigen Prüfplanung. Mechatronisches Produkt und auch mechatronische Prüfmittel, die beide mechatronische Systeme sind, sind dabei explizit berücksichtigt. Der Modularität sowohl von Produkt als auch von Prüfmittel wird durch die Entwicklungssystematik Rechnung getragen.

A2) Abstimmung auf die etablierte Entwicklungsmethodik: Durch den generischen Referenzprozess ist eine gut abgestimmte und parallele Entwicklung, insbesondere von Produkt und Prüfmittel, möglich. In den generischen Referenzprozess integrieren sich

dabei etablierte Hilfsmittel. Durch die Möglichkeit der situationsspezifischen Anpassung auf projekt- und unternehmensspezifische Randbedingungen ist es weiterhin möglich den generischen Entwicklungsprozess auf weitere Hilfsmittel abzustimmen bzw. diese zu integrieren. Die Ausgangsbasis der Entwicklungssystematik bildet dabei die VDI-Richtlinie 2206 und die Spezifikationstechnik CONSENS. Die wesentlichen in der Literatur beschriebenen Aufgaben zur Prüfplanung wurden dabei integriert. Die Entwicklungssystematik selbst ordnet sich dabei in das 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung ein. Die Entwicklungssystematik fügt sich so in die Entwicklungsmethodik zur Entwicklung mechatronischer Systeme ein.

A3) Systematische und effiziente Vorgehensweise: Die entstandene Entwicklungssystematik beinhaltet ein detailliertes Vorgehensmodell in Form des generischen Referenzprozesses, der für eine systematische Vorgehensweise sorgt. Der Referenzprozess besteht aus den Hauptbestandteilen der Produktentwicklung, Produktionssystementwicklung, Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung und gibt an, wie diese zusammenspielen sollen. Die Möglichkeit zur Anpassung des generischen Entwicklungsprozesses stellt ein effizientes Vorgehen sicher. Die Hinweise zur Anpassung stellen weiterhin sicher, dass der Entwicklungsprozess angepasst werden kann, ohne dabei unsystematisch bei der Entwicklung vorzugehen.

A4) Frühzeitige Integration: Der generische Entwicklungsprozess und die Möglichkeit der projekt- und unternehmensspezifischen Anpassung ermöglichen, mit der Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung sehr frühzeitig zu starten. Dazu wird die Prinziplösung genutzt, mithilfe der Spezifikationstechnik CONSENS, welche frühzeitig erstellt wird. Ausgangspunkt ist dabei die Prinziplösung des Produktes. Eine frühzeitige Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung auf Basis der Prinziplösung des mechatronischen Systems war bisher nicht möglich. Oftmals wurde mit der Prüfplanung gewartet, bis die Produktentwicklung abgeschlossen war. Durch die Möglichkeit der Anpassung des generischen Referenzprozesses an die jeweilige Situation ist es möglich zu entscheiden, welche Prüfmittelentwicklung – im Falle mehrerer zu entwickelnden Prüfmittel – zu welchem Zeitpunkt gestartet werden soll und wie detailliert diese zu Beginn schon spezifiziert werden sollen bzw. welche Modellierungstiefe diese zu diesem Zeitpunkt aufweisen sollen.

A5) Einheitliche und modellbasierte Beschreibung: Die vorliegende Entwicklungssystematik nutzt die Spezifikationstechnik CONSENS zur einheitlichen und modellbasierten Notation der Produktkonzipierung, der Produktionssystemkonzipierung und der Prüfmittelentwicklung. Viele Informationen der Prüfplanung werden, dem modellbasierten Gedanken folgend, auch in diese Modelle integriert.

A6) Einbeziehung von Erfahrungswissen: Die Einbeziehung von Erfahrungswissen wird durch den generischen Referenzprozess ermöglicht. Das Vorgehen zur Einbeziehung von Erfahrungswissen von Stakeholdern und Experten sowie weiteren prüfrelevanten Unterlagen wie z. B. Unterlagen von Prüfungen ähnlicher Produkte, Normen

usw. von ähnlichen bzw. Vorgängerprodukten ist direkt beschrieben. Zu definierten Zeitpunkten kann Erfahrungswissen immer wieder im Laufe der Entwicklung eingebracht werden. Durch die Möglichkeit der Anpassung des generischen Referenzprozesses können gezielt die Zeitpunkte und die Anzahl der Zeitpunkte geplant werden, zu denen dieses Erfahrungswissen mit einfließen kann. Auch zur Anpassung des generischen Prozesses an die projekt- und unternehmensspezifischen Gegebenheiten kann Erfahrungswissen, insbesondere aus vorangegangenen Projekten, genutzt werden.

A7) Projekt- und unternehmensspezifische Anpassung: Die Entwicklungssystematik bietet die Möglichkeit den generischen Referenzprozess an projekt- und unternehmensspezifische Gegebenheiten anzupassen. Zum Beispiel können Anzahl der Durchläufe und die Absprungpunkte/Absprunghöhen von der Produktentwicklung in die Prüfmittelentwicklung variiert werden oder die Entwicklungstiefe der Prüfmittel kann zu verschiedenen Zeitpunkten variiert werden. Es werden weiterhin erste Hinweise gegeben, anhand welcher Randbedingungen überlegt werden kann, wie der projekt- und unternehmensspezifische Entwicklungsprozess ausgeprägt werden soll. Dies kann z. B. die geplante Anzahl an Durchläufen des V-Modells in der Produktentwicklung sein oder die Neuheit des zu entwickelnden Produktes und des damit zu bedienenden Marktes oder die Neuheit der Produktionstechnologie.

Die entstandene *Systematik zur integrativen Entwicklung von mechatronischen Produkten und deren Prüfmittel* erfüllt alle an sie gestellten Anforderungen. Die Anwendbarkeit wurde am Beispiel des modularen Wechselrichtersystems gezeigt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Mechatronische Systeme beruhen auf dem engen Zusammenwirken von Mechanik, Elektronik, Softwaretechnik und Regelungstechnik. Die Komplexität der mechatronischen Produkte steigt dabei stetig. Die Folge ist eine erhöhte Komplexität der zugehörigen Produktionssysteme und deren Entwicklung. Durch die Modularisierung der Produkte wird versucht dieser Komplexität entgegenzuwirken. Die Auswirkung auf die Prüfmittel und deren Entwicklung ist dabei besonders groß, da ein Prüfmittel für mechatronische Systeme oftmals zahlreiche Eigenschaften eines Systems überprüft und somit zahlreiche Wechselwirkungen zwischen Produkt und Prüfmittel bestehen. Ein aufwändiges Prüfmittel für mechatronische Systeme, welches selbst wieder ein mechatronisches System darstellt, stellt Anforderungen insbesondere an das Produkt bzw. das Produktionssystem und die zugehörige Produktentwicklung bzw. Produktionssystementwicklung. Anforderungen ergeben sich zusätzlich auch an weitere Funktionsbereiche des Unternehmens. Die an der Entwicklung beteiligten Fachdomänen bzw. die betroffenen Funktionsbereiche des Unternehmens müssen daher frühzeitig zusammenarbeiten. Die **integrative Produktentstehung**, in der strategische Produktplanung, Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung fachdomänenübergreifend im Wechselspiel zusammenarbeiten, bietet hierzu einen Lösungsansatz. Die integrative, zeitlich parallele Entwicklung von Produkt, Produktionssystem und darin integrierter Prüfmittelentwicklung mit zugehöriger Prüfplanung versprechen dabei große **Nutzenpotentiale**. Es kann mit der Prüfmittelkonzipierung frühzeitig begonnen werden. Durch die dadurch möglich werdende frühzeitige Abstimmung und Verzahnung der Entwicklungsbereiche können zeit- und kostenintensive Iterationsschleifen zu späteren Zeitpunkten vermieden werden. Insbesondere die frühzeitige Ableitung von Anforderungen seitens des Prüfmittels an weitere Funktionsbereiche und deren frühzeitige Berücksichtigung tragen dazu bei. Weiterhin steht das Prüfmittel durch die frühzeitig begonnene Konzipierung möglichst zeitgleich mit der Fertigstellung des Produktes zum Produktionsstart bereit.

Der frühestmögliche Ausgangspunkt für die Prüfmittelentwicklung und zugehörige Prüfplanung ist die Prinzipiellösung des mechatronischen Produktes und das zugehörige allgemeine Produktionssystemkonzept. Die frühzeitige Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung auf Basis der Informationen aus der Prinzipiellösung des Produktes und dem zugehörigen Produktionssystem sind bisher noch nicht konkret ausgeführt worden. Eine frühzeitige Ableitung von Anforderungen seitens des Prüfmittelkonzeptes, insbesondere an die Produktentwicklung und weitere Funktionsbereiche, ist dementsprechend ebenfalls nicht bekannt. Die wesentliche zu bewältigen **Herausforderung** ist die systematische, effiziente Integration der Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung in den Produktentstehungsprozess.

Bestehende Ansätze wurden hinsichtlich einer integrativen Entwicklung, in der die Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung frühzeitig integriert sind, untersucht. Die klassische, in der Literatur beschriebene, Prüfplanung startet nach der Produktentwicklung. Zudem wird dabei meist von der Prüfung von (mechanischen) Komponenten und nicht von mechatronischen Systemen ausgegangen. Diese klassischen Ansätze sind somit nicht geeignet. Es existieren zwar wenige neuere Quellen, die darauf hinweisen mit der Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung frühzeitig zu starten. Wie dies geschehen soll und wie sich dies in einen Entwicklungsprozess integrieren soll wird jedoch nicht beschrieben. Es besteht daher **Handlungsbedarf** zur Erarbeitung einer *Systematik zur integrativen Entwicklung von mechatronischen Produkten und deren Prüfmittel*.

Ein generischer integrativer Entwicklungsprozess, der die integrative und zeitlich parallele Entwicklung von Produkt und Produktionssystem und dabei insbesondere das Prüfmittel berücksichtigt, ist im Rahmen dieser Arbeit erstellt worden. Dieser Entwicklungsprozess kann projekt- und unternehmensspezifisch angepasst werden. Dazu ist beschrieben, wie der Referenzprozess als Prozessbaustenkasten interpretiert werden kann. Durch die dadurch geschaffene Modularität ist die Entwicklungssystematik skalierbar. Die Systematik berücksichtigt dabei die Modularität moderner mechatronischer Produkte.

Dazu wurden zunächst die Interdependenzen zwischen den verschiedenen Funktionsbereichen – Produktentwicklung, Hauptprozess der Produktionssystementwicklung, Prüfplanung, Prüfmittelentwicklung und weiteren Quellen – des Unternehmens herausgearbeitet. Der entstandene Entwicklungsprozess bietet dabei die Möglichkeit Erfahrungswissen mit einfließen zu lassen. Der Fokus liegt bei dem Entwicklungsprozess auf der frühzeitigen Konzipierung. Diese frühzeitige Konzipierung von Produkt, Produktionssystem und dazugehörigen Prüfmitteln sowie der Prüfplanung wird durch ein Systemmodell und verschiedene Hilfsmittel unterstützt. Es wird dabei auf verschiedene bestehende Ansätze zurückgegriffen, die teilweise angepasst wurden. Die Entwicklungssystematik integriert sich dabei in das 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung nach GAUSEMEIER in den zweiten Zyklus *Produktentwicklung* und den dritten Zyklus *Produktionssystementwicklung*. Das Vorgehen nach dem V-Modell, wie in der VDI-Richtlinie 2206 beschrieben, stellt dabei die Ausgangsbasis zusammen mit der Methodik zur integrativen Produkt- und Produktionssystemkonzipierung nach NORDSIEK dar.

In dieser Arbeit wurden die Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung getrennt und definiert, welche Informationen von der Prüfplanung zur Prüfmittelentwicklung zu übergeben sind. In der Literatur wird zwischen Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung nicht immer einheitlich und trennscharf unterschieden. Die wechselseitigen Informationsflüsse innerhalb des gesamten integrativen Entwicklungsprozesses sind dargestellt.

Durch die frühzeitige Konzipierung der Prüfmittel werden frühzeitig Anforderungen vom Prüfmittel an die Produktentwicklung und weitere Funktionsbereiche übergeben. Diese können so frühzeitig mit einfließen. Dadurch werden zeit- und kostenintensive Iterationen vermieden. Durch den frühzeitigen Beginn der Konzipierung der Prüfmittel können Herausforderungen bei der Prüfmittelentwicklung selbst frühzeitig identifiziert

werden und somit frühzeitig angegangen werden. Ziel des frühzeitigen Beginns der Prüfmittelentwicklung ist dabei die Fertigstellung des Prüfmittels zum Ende der Produktentwicklung bzw. zum Produktionsstart.

Falls das Produkt modular aufgebaut ist, wird das Prüfmittel so konzipiert und entwickelt, dass es alle Konfigurationen des modularen Produktes überprüfen kann. Durch eine aufgezeigte Möglichkeit der modularen Strukturierung des Prüfmittels selbst kann insbesondere auf zu erwartenden steigenden Durchsatz des Prüfmittels reagiert werden, ohne initial eine sehr große Investition in das Prüfmittel zu tätigen. Auch können durch diese modulare Strukturierung des Prüfmittels Varianten des Prüfmittels erzeugt werden, z. B. für andere Fertigungsstandorte im Ausland, die ggf. nur bestimmte Konfigurationen des mechatronischen Produktes prüfen sollen.

Die Systematik wurde exemplarisch in einem Entwicklungsprojekt zur Entwicklung eines innovativen modularen Wechselrichtersystems (ImWR) angewendet, in dem ein passendes Prüfmittel integrativ zum ImWR konzipiert wurde. Dazu wurde zunächst aus dem generischen Entwicklungsprozess anhand der Randbedingungen abgeleitet, dass es einen integrativen Entwicklungsprozess mit drei Durchläufen geben soll. Der erste Durchlauf dieses projekt- und unternehmensspezifischen Entwicklungsprozess wurde dabei detailliert hergeleitet. Dieser erste Durchlauf ist vollständig durchlaufen worden und in dieser Arbeit auszugsweise dargestellt. In dieser frühen Phase der Entwicklung wurden, ausgehend vom Produktkonzept des ImWR, bereits ca. 250 Anforderungen an das Prüfmittel ermittelt. Bei der davon ausgehenden Konzipierung des Prüfmittels wurden, je nach Zählweise der mehrfach vorhandenen Funktionen usw., wenige hundert bis viele hundert Funktionen ermittelt und diesen entsprechende Lösungen zugeordnet. Ausgehend von dem entstandenen Prüfmittelkonzept wurden dabei wieder ca. 20 Anforderungen zurück an das Produkt und weitere Funktionsbereiche wie die Fertigung, die IT und den Service ermittelt, so dass diese Anforderungen frühzeitig berücksichtigt werden können, insbesondere bei der weiteren Entwicklung des ImWR. Alle im Anwendungsbeispiel ermittelten Anforderungen sind dabei rückverfolgbar.

Damit konnte gezeigt werden, dass die Systematik alle an sie gestellten Anforderungen erfüllt.

Weiterer Forschungsbedarf besteht bei der Verteilung der Prüfmerkmale auf die einzelnen Prüfmittel zur Prüfung eines Produktes bzw. der zugehörigen Prüfzeitpunkte. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass sich die Prüfungen an den Modulen des Produktes orientieren. Es ist also theoretisch ein Prüfmittel pro Modul möglich. Auf diese Prüfmittel sollen die zu prüfenden Prüfmerkmale unter Berücksichtigung verschiedener Gesichtspunkte verteilt werden. Zur besseren Abschätzung der (optimalen) Prüfkosten, die einen wesentlichen Gesichtspunkt darstellen, wäre ein Kostenrechnungsmodell vorteilhaft, welches die Kosten der einzelnen Möglichkeiten der Verteilung der Prüfmerkmale auf die möglichen Prüfmittel vergleichbar macht. Die vorliegende Arbeit unterstützt dabei explizit schon die Möglichkeit der übersichtlichen Zuordnung der Prüfmerkmale zu den unterschiedlichen Prüfmitteln und Prüfzeitpunkten

mittels des gezeigten Prüfplans. Im Stand der Technik werden zwar Ansätze eines Kostenrechnungsmodells diskutiert, wobei dabei meist die Prüfung von (mechanischen) Einzelteilen bzw. Komponenten im Vordergrund steht, nicht aber die Prüfung von komplexen mechatronischen Systemen.

Eng damit verbunden ist die Fragestellung, wie eine übergeordnete Prüfstrategie erstellt werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Prüfmittelentwicklung für ein Produkt bzw. für ein Produkt mit mehreren Varianten betrachtet. Sinnvoll erscheint eine übergeordnete Prüfstrategie über alle Produkte bzw. für die jeweils verschiedenen Produktgruppen eines Unternehmens oder eines Wertschöpfungsnetzwerkes. Insbesondere wenn manche Module in mehreren Produkten eingesetzt werden, erscheint dies sinnvoll. Diese übergeordnete Prüfstrategie könnte z. B. festlegen, welche Prüfmittel insgesamt existieren sollen, wer diese betreibt (z. B. OEM oder Zulieferer), wer diese entwickelt und die Anpassungen über den Lebenszyklus vornimmt (z. B. Prüfmittelentwicklung/Prüfmittelbau des OEM oder externe Prüfmittelentwicklung/Prüfmittelbau), welche Merkmale von welchem Prüfmittel zu welchem Zeitpunkt geprüft werden und wie die Prüfdaten einheitlich und rückverfolgbar abgelegt werden können. Diese übergeordnete Prüfstrategie könnte auch festlegen welche Module bzw. Baugruppen in Form von Prototypen bereits auf bestehenden Prüfmitteln geprüft werden sollen, um eine Prüfbarkeit durch diese frühzeitig sicherzustellen.

In der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt wie ein projekt- und unternehmensspezifischer Entwicklungsprozess erstellt werden kann und somit an die jeweilige Situation angepasst werden kann. Es ist zu erkennen, welche Möglichkeiten zur Anpassung bestehen. Es wurde dabei aufgezeigt, welche Stellschrauben am integrativen Entwicklungsprozess dazu genutzt werden können bzw. welche Handlungsoptionen dazu zur Verfügung stehen. Es wurde weiterhin gezeigt, welche grundsätzlichen Randbedingungen bei den Überlegungen der Anpassung des Entwicklungsprozesses grundsätzlich mit einbezogen werden können. An dieser Stelle können die Kriterien, anhand derer entschieden wird, wie der projekt- und unternehmensspezifische Entwicklungsprozess genau ausgestaltet wird, noch weiter konkretisiert werden.

Weiterer Forschungsbedarf scheint bei einem Regelwerk für die prüfgerechte Gestaltung für komplexe mechatronische Systeme zu bestehen, ähnlich wie dies z. B. schon für elektronische Baugruppen existiert. Sinnvoll erscheint hier die Untersuchung von zahlreichen Fallbeispielen von Produktentwicklungen komplexer mechatronischer Systeme. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf Hinweisen zur prüfgerechten Gestaltung lediglich bei der Gestaltung der Schnittstellen, die zur Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung notwendig sein können.

Die informationstechnische Unterstützung dieser Entwicklungssystematik über alle Durchläufe verspricht weitere Nutzenpotentiale. Alle entstehenden Informationen/Modelle, die im Laufe der Entwicklung entstehen (Produktentwicklung, Hauptprozess der Produktionssystementwicklung, Prüfplanung, Prüfmittelentwicklung), könnten hierin abgebildet und miteinander verknüpft werden. Die Informationsflüsse und manche Modelle könnten teilautomatisiert erstellt werden. Änderungen in den einzelnen

Modellen und deren Auswirkungen könnten einfacher sichtbar gemacht werden, da die Informationsketten automatisiert miteinander verknüpft wären (vgl. z. B. Motortemperaturwertverarbeitung im Anwendungsbeispiel dieser Arbeit). Die Beibehaltung der Konsistenz der Informationen/Modelle würde dadurch vereinfacht.

Oftmals werden auch Produktionsmaschinen speziell für die Herstellung von einem Produkt entwickelt und gebaut. Dabei ergeben sich ähnliche Abhängigkeiten wie bei dem speziell für ein Produkt entwickelten Prüfmittel. Auch diese Produktionsmaschinen müssen also integrativ entwickelt werden. Grundsätzlich ist eine Übertragbarkeit der hier dargestellten Systematik zur integrativen Konzipierung bzw. Entwicklung denkbar. Eine detaillierte Untersuchung wie diese bestehende Systematik angepasst und erweitert werden muss, stellt ebenfalls weiteren Forschungsbedarf dar.

Übergeordnetes Ziel weiterführender Forschungsarbeiten ist eine neue Schule des Entwurfs neuartiger technischer Systeme. Dabei sollen die Interdependenzen zwischen den beteiligten Fachdomänen bzw. Funktionsbereichen frühzeitig berücksichtigt werden.

7 Abkürzungsverzeichnis

<i>a</i>	Anzahl der alternativen Funktionen
A	Ampere
AC	Alternating Current (Wechselstrom/Drehstrom)
Abw.	Abweichung
Anf.	Anforderung
AOI	automatische optische Inspektion
AWSZ	Anwendungsszenario
AXI	Automated X-Ray Inspection (Röntgeninspektion)
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design
CONSENS	CONceptual design Specification technique for the ENgineering of mechatronic Systems
EDV	elektronische Datenverarbeitung
EMV	elektromagnetische Verträglichkeit
EoL	End of Line (Fertigungsende)
ERP	Enterprise-Resource-Planning
F	Funktion
FA	funktionale Anforderung
FLP	Funktions- und Leistungsprüfung
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
ggf.	gegebenenfalls
HNI	Heinz Nixdorf Institut
HV	Hochvolt
HV-DC	High Voltage Direct Current (Hochvolt Gleichspannung)
ImWR	Innovatives modulares Wechselrichtersystem
ICT	In-Circuit-Test

IEM	Institut für Entwurfstechnik Mechatronik (Fraunhofer)
IT	Informationstechnik
kW	Kilowatt
kVA	Kilovoltampere
KEB	KEB Automation KG
KP	Komponentenprüfung
KPI	Key Performance Indicator
KPMM	Kein Prüfmerkmal
m	Anzahl der mehrfach vorhandenen Funktionen eines Prüflings; entspricht der Anzahl der prüfenden Funktionen des Prüfmittels
MBSE	Model-Based Systems Engineering (Modellbasiertes Systems Engineering)
ME	Modulebene
MOI	manuelle optische Inspektion
MP	Modulprüfung
MS	Meilenstein
n	Anzahl der an ein Prüfmittel angeschlossenen Prüflinge
NFA	nicht funktionale Anforderung
NPB	nichtprüfmerkmalbezogen
OBD	On-Board-Diagnose
P	Produkt
PM	Prüfmittel
PMM	Prüfmerkmal
PU	Prüfrelevante Unterlagen
PS	Produktionssystem
QFD	Quality Function Deployment
QM	Qualitätsmanagement
SA	Stakeholder Anforderungen
SAP	bezeichnet die verwendete ERP-Software des Unternehmens
SE	Systemebene

SNT	Schaltnetzteil
SOP	Start of Production
SP	Systemprüfung
SPC	Statistical Process Control
SVM	statistische Versuchsmethodik
SW	Software
SNT	Schaltnetzteil
u.a.	unter anderem
vgl.	vergleiche
V	Volt
VEP	Vorentwicklungsprojekt
z. B.	zum Beispiel
2D	zweidimensional
2,5D	zweieinhalbdimensional
3D	dreidimensional

8 Literaturverzeichnis

Publikationen

- [ABF10] ABRAMOVICI, M.; BREUER, M.; FRIEDMAN, A.: Digital Systems Testing and Testable Design. Published in arrangement with IEEE Press USA, Jaico Publishing House, Mumbai, 2010
- [AIS+77] ALEXANDER, C.; ISHIKAWA, S.; SILVERSTEIN, M.; JACOBSON, M.; FIKSDHL-KING, I.; ANGEL, S.: A Pattern Language. Oxford University Press, New York, 1st Edition, 1977
- [Alt12] ALT, O.: Modellbasierte Systementwicklung mit SysML. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [ALO03] ALGRAIN, M. C.; LANE, W. H.; ORR, D. C.: A Case Study in the Electrification of Class-8 Trucks. IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 1.-4. Juni 2003, Madison USA, 2003
- [Ana16] ANACKER, H.: Instrumentarium für einen lösungsmusterbasierten Entwurf fortgeschrittener mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 354, Paderborn, 2016
- [Ans65] ANSOFF, H. I.: Corporate Strategy – An Analytic Approach to Business Policy for Growth and Expansion. McGraw-Hill, New York, 1965
- [AR68] AWF – AUSSCHUSS FÜR WIRTSCHAFTLICHE FERTIGUNG E.V.; REFA – VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E.V. (HRSG.): Handbuch der Arbeitsvorbereitung Teil I – Arbeitsplanung. Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin, 1968
- [Bal97] BALTERS, M.: Qualitätsmanagement in der Elektroindustrie - Konzept für die integrierte Prüfplanung in der modernen Elektronikproduktion. Abhandlung zur Erlangung des Titels Doktor der technischen Wissenschaften der eidgenössischen technischen Hochschule Zürich, ETH Zürich Verlag, 1997
- [Bar13] BARTOSCH, P.: Design-for-Testability leicht gemacht – Prüfadapter ergänzen Testsysteme. In: productronic – Das Fertigungs-Magazin von all-electronics. Ausgabe 03/2013, Hüthig, Heidelberg
- [Bau16] BAUMGART, I.: Requirements Engineering. In: Lindemann U. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. Hanser Verlag, München, 2016
- [BC98] BALDWIN, C. Y.; CLARK, K. B.: Modularisierung: Ein Konzept wird universell. In: Harvard Business Manager. Ausgabe 2/1998, Manager Magazin, Hamburg
- [Ber05] BERNARDS, M.: Modulare Prüfplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2005
- [Ber12] BERGER, M.: Test- und Prüfverfahren in der Elektronikfertigung – Vom Arbeitsprinzip bis Design-for-Test-Regeln. VDE Verlag, Berlin, 2012
- [Ber80] BERENS, W.: Prüfung der Fertigungsqualität – Entscheidungsmodelle zur Planung von Prüfstrategien. In: Beiträge zur industriellen Unternehmensforschung. Band 10, Gabler, Wiesbaden, 1980
- [BF05] BÄCKER, B.; FORCHERT, T.: Prüfkonzept für elektronische Fahrzeugfunktionen im Montagewerk. In: Elektronik-Systeme im Automobil – 9. Jahrestagung EUROFORUM Deutschland GmbH in München, Februar 2005
- [BG14] BENES, G.; GROH, P.: Grundlagen des Qualitätsmanagements. Carl Hanser Verlag, München, 2014

- [BGH+96] BLECK, A.; GOEDECKE, M.; HUSS, M.; WALDSCHMIDT, K.: Praktikum des VLSI-Entwurfs. B. G. Teubner, Stuttgart, 1996
- [Bir80] BIRKHOFER, H.: Analyse und Synthese der Funktionen technischer Produkte. VDI-Verlag Fortschritts-Bericht VDI-Z, Reihe 1, Nr. 70, Düsseldorf, 1980
- [BS12] BASSE, I.; Schmitt, R.: Modulares Konzept zur produktgruppenübergreifenden Prüfplanung. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. Jahrg. 107 (2012) 11, Carl Hanser Verlag, München
- [Dae78] Daenzer, W. F. (Hrsg.): Systems Engineering – Leitfaden zur methodischen Durchführung umfangreicher Planungsvorhaben. Peter Hanstein Verlag, Köln, 2. Auflage, 1978/79
- [Dan03] DANGELMAIER, W.: Produktion und Information – System und Modell. Springer-Verlag, Berlin, 2003
- [Dem00] DEMING, W. E.: Out Of The Crisis. First MIT Press edition, originally published in Cambridge Massachusetts 1982, 2000
- [DGQ93] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR QUALITÄT E.V. (HRSG.): Begriffe zum Qualitätsmanagement. DGQ-Schrift 11-04, Beuth Verlag, Berlin, 5. Auflage, 1993
- [DGQ12] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR QUALITÄT E.V. (HRSG.): FMEA – Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse. DGQ-Band 13-11, Beuth Verlag, Berlin, 5. Auflage, 2012
- [DH94] DAENZER, W.F.; HUBER, F.: Systems Engineering – Methoden und Praxis. Verlag Industrielle Organisation, Zürich, 8. verbesserte Auflage, 1994
- [DK05] DUTSCHKE, W.; KEFERSTEIN, C. P.: Fertigungsmesstechnik – Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren. Teubner Verlag, Wiesbaden, 5. Auflage, 2005
- [Dor15] DOROCIAC, R. K.: Systematik zur frühzeitigen Absicherung der Sicherheit und Zuverlässigkeit fortschrittlicher mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 340, Paderborn, 2015
- [DS14] DIETRICH, E.; SCHULZE, A.: Eignungsnachweis von Prüfprozessen – Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld. Hanser-Verlag, München, 4. Auflage, 2014
- [Dud15a] DUDEN: Das Fremdwörterbuch. Dudenverlag, Berlin, 11. vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage, 2015
- [Dud15b] DUDEN: Deutsches Universalwörterbuch. Dudenverlag, Berlin, 8. Auflage, 2015
- [Dum11] DUMITRESCU, R.: Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortschrittliche mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 286, Paderborn, 2011
- [Dut75] DUTSCHKE, W.: Prüfplanung in der Fertigung. Krausskopf, Mainz, 1975
- [Dut96] DUTSCHKE, W.: Fertigungsmeßtechnik. B. G. Teubner, Stuttgart, 3. Auflage, 1996
- [EBL95] EVERSHEIM, W. (HRSG.); BOCHTLER, W.; LAUFENBERG, L.: Simultaneous Engineering - Erfahrungen aus der Industrie für die Industrie. Springer-Verlag, Berlin, 1995
- [Ehr09] EHRENSPIEL, K.: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. Carl Hanser Verlag, München, 4. aktualisierte Auflage, 2009
- [EM13] EHRENSPIEL, K.; MEERKAMM, H.: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. Carl Hanser Verlag, München, 5. überarbeitete und erweiterte Auflage, 2013
- [ES05] EVERSHEIM, W.; SCHUH, G. (HRSG.): Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Springer-Verlag, Berlin, 2005

- [Est08] ESTEFAN, J. A.: Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies. Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, Pasadena, California, USA. In: INCOSE MBSE Initiative, California, 2008
- [Eve97] EVERSHEIM, W.: Organisation in der Produktionstechnik Band 3 – Arbeitsvorbereitung. Springer-Verlag, Berlin, 3. Auflage, 1997
- [Fel09] FELDMANN, K.: MID – Zukunftstechnologie für mechatronisch integrierte Produkte, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS) 11/2009, Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2009
- [FG13] FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Methodik des schrittweisen Gestaltens. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Springer Verlag, Berlin, 8. Auflage, 2013, S. 479-491
- [FGK+04] FRANK, U.; GIESE, H.; KLEIN, F.; OBERSCHELP, O.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; VÖCKING, H.; WITTING, K.: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen und Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 155, Paderborn, 2004
- [FGN+13] FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.; NAGARAJAH, A.; PAHL, G.; BEITZ, W.; WARTZACK, S.: Vorgehen bei einzelnen Schritten des Produktentstehungsprozesses. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Springer Verlag, Berlin, 8. Auflage, 2013, S. 291-409
- [FLS07] FRÜHAUF, K.; LUDEWIG, J.; SANDMAYR, H.: Software-Prüfung – Eine Anleitung zum Test und zur Inspektion. vdf Hochschulverlag, Zürich, 6. Auflage, 2007
- [FMS12] FRIEDENTHAL, S.; MOORE, A.; STEINER, R.: A Practical Guide to SysML – The Systems Modeling Language. Elsevier/Morgan Kaufmann, Amsterdam, 2012
- [Fra06] FRANK, U.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinzipiellösung selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 175, Paderborn, 2006
- [Fra-ol] Fraunhofer IEM: Mechatronische Systembeschreibung – Effizienzsteigerung durch MBSE. Unter: <https://www.iem.fraunhofer.de/de/forschung/Forschungsbereiche/produktentstehung/leistungsangebot/mechatronische-systembeschreibung.html>, 10. Februar 2018
- [For09] FORCHERT, T.: Prüfplanung – Ein neues Prozessmanagement für Fahrzeugprüfungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH), Universitätsverlag Karlsruhe, Band 3 – 2009, Karlsruhe, 2009
- [GAC+13] GAUSEMEIER, J.; ANACKER, H.; CZAJA, A.; WASSMANN, H.; DUMITRESCU, R.: Auf dem Weg zu intelligenten technischen Systemen. In: Gausemeier, J.; Dumitrescu, R.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächtler, A. (Hrsg.): 9. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. 18./19. April 2013, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 310, Paderborn, 2013
- [Gau10] GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Frühzeitige Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme. Carl Hanser Verlag, München, 2010
- [GBK10] GAUSEMEIER, J.; BRANDIS, R.; KAISER, L.: Auswahl von Montageverfahren auf Basis der Produktkonzeption. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächtler, A. (Hrsg.): 7. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. 18./19. März 2010, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 272, Paderborn, 2010
- [GBR10] GAUSEMEIER, J.; BRANDIS, R.; REYES-PEREZ, M.: A Specification Technique for the Integrative Conceptual Design of Mechatronic Products and Production Systems. In: Proceedings of the Design 2010 – 11th International Design Conference. May 17-20 2010, Dubrovnik, Croatia, 2010
- [GDK+11] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; KAHL, S.; NORDSIEK, D.: Integrative development of product and production system for mechatronic products. In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Elsevier, Volume 27, Page 772–778, Issue 4, 2011

- [GEA16] GAUSEMEIER, J.; ECHTERFELD, J.; AMSHOFF, B.: Strategische Produkt- und Prozessplanung. In: Lindemann U. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. Hanser Verlag, München, 2016
- [GDS+13] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; STEFFEN, D.; CZAJA, A.; WIEDERKEHR, O.; TSCHIRNER, C.: Systems Engineering in der industriellen Praxis. Paderborn, 2013
- [GEK01] GAUSEMEIER, J.; EBBESMEYER, P.; KALLMEYER, F.: Produktinnovation – Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. Carl Hanser Verlag, München, 2001
- [GFD+08a] GAUSEMEIER, J.; FRANK, U.; DONOTH, J.; KAHL, S.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme des Maschinenbaus (Teil 1). Konstruktion, Heft 7/8–2008, Fachaufsatz Mechatronik, VDI-Verlag, Berlin, 2008
- [GFD+08b] GAUSEMEIER, J.; FRANK, U.; DONOTH, J.; KAHL, S.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme des Maschinenbaus (Teil 2). Konstruktion, Heft 9–2008, Fachaufsatz Mechatronik, VDI-Verlag, Berlin, 2008
- [GFD+09] GAUSEMEIER, J.; FRANK, U.; DONOTH, J.; KAHL, S.: Specification technique for the description of self-optimizing mechatronic systems. Research in Engineering Design, Vol. 20, No. 4, Springer Verlag, London, 2009
- [GGJ+13] GAUSEMEIER, J.; GAUKSTERN, T.; JÜRGENHAKE, C.; DUMITRESCU, R.: Eine Methodik für den wissensbasierten Entwurf von dreidimensionalen spritzgegossenen Schaltungsträgern (MID). In: Gausemeier, J.; Dumitrescu, R.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächtler, A. (Hrsg.): 9. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, 18.-19. April 2013, HNI Verlagsschriftenreihe, Band 310, Paderborn, 2013
- [GKK16] GEBHART, N.; KRUSE, M.; KRAUSE, D.: Gleichteile-, Modul- und Plattformstrategie. In: Lindemann, U.: Handbuch Produktentwicklung. Hanser Verlag, München, 2016
- [GLL12] GAUSEMEIER, J.; LANZA, G.; LINDEMANN, U. (Hrsg.): Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren – Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [GLR+00] GAUSEMEIER, J.; LINDEMANN, U.; REINHARDT, G.; WIENDAHL, H.-P.: Kooperatives Produktengineering – Ein neues Selbstverständnis des ingenieurmäßigen Wirkens. HNI Verlagsschriftenreihe, Band 79, Paderborn, 2000
- [GP14] GAUSEMEIER, J.; PLASS, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung – Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. Carl Hanser Verlag, München, 2. Auflage, 2014
- [Gro96] GROHMANN, D.: Ein hybrides Fahrzeugreferenzmodell für die Prüfsystementwicklung. VDI-Verlag, VDI Fortschrittsberichte Reihe 12 – Nr. 279, Düsseldorf, 1996
- [GRS09] GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.J.; SCHÄFER, W. (Hrsg.): Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen, Anwendungen, Konzepte. Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 234, Paderborn, 2009
- [GRS+11] GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 8. Paderborner Workshop – Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 294, Paderborn, 2011
- [GRS+14] GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F. J.; SCHÄFER, W.; SEXTRO, W. (Hrsg.): Dependability of Self-optimizing Mechatronic Systems. Springer Verlag, Heidelberg, 2014
- [GRS14] GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.J.; SCHÄFER, W. (Hrsg.): Design Methodology for intelligent technical systems – Develop Intelligent Technical Systems of the Future. Springer Verlag, Berlin, 2014
- [GTS14] GAUSEMEIER, J.; TRÄCHTLER, A.; SCHÄFER, W. (Hrsg.): Semantische Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme – Effektiver Austausch von Lösungswissen in Branchenwertschöpfungsketten. Carl Hanser Verlag, München, 2014

- [GW11] GAUSEMEIER, J.; WIENDAHL, H.-P. (Hrsg.): Deutschland braucht Wertschöpfungswachstum – Einführung. In: Gausemeier, J.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Wertschöpfung und Beschäftigung in Deutschland. Acatech DISKUTIERT, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Springer Verlag, Berlin, 2011
- [GZF+07] GAUSEMEIER, J.; ZIMMER, D.; FRANK, U.; KLÖPPER, B.; SCHMIDT, A.: Using active patterns for the conceptual design of self-optimizing systems exemplified by an air gap adjustment system. ASME International, 27th Computers and Information in Engineering Conference. September 4-7, Las Vegas, Nevada, 2007
- [Her97] HERTWECK, M.: Prüfverfahren für die Serienfertigung feldbusfähiger Automatisierungskomponenten. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München, Herbert Utz Verlag – Wissenschaft, München, 1997
- [HTB03] HERING, E., TRIEMEL, J., BLANK, H. P. (Hrsg.): Qualitätsmanagement für Ingenieure. Springer Verlag, Berlin, 5. Auflage, 2003
- [HWF+15] HABERFELLNER, R.; DE WECK, O.; FRICKE, E.; VÖSSNER, S.: Systems Engineering – Grundlagen und Anwendung. Orell Füssli Verlag, Zürich, 13. Auflage, 2015
- [IKD+13] IWANEK, P.; KAISER, L.; DUMITRESCU, R.; NYBEN, A.: Fachdisziplinübergreifende Systemmodellierung mechatronischer Systeme mit SysML und CONSENS. In: Maurer, M.; Schulze, S.-O. (Hrsg.): Tag des Systems Engineerings. Carl Hanser Verlag, München, 2013
- [INC09] INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING (INCOSE) (Hrsg.): SE Vision 2020, unter: www.incose.org/ProductsPubs/products/sevision2020.aspx, Februar 2009
- [INC10] INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING (INCOSE) (HRSG.): Systems Engineering Handbook – A Guide for System life cycle processes and activities. Version 3.2, 2010
- [INC11] INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING (INCOSE) (Hrsg.): Systems Engineering Handbook – A Guide for System life cycle processes and activities. San Diego, Version 3.2.2, 2011
- [Ise99] ISERMANN, R: Mechatronische Systeme – Grundlagen. Springer Verlag, Berlin, 1999
- [ITS] IT'S OWL CLUSTERMANAGEMENT GMBH (Hrsg.): 2017 – Jahresbilanz des Spitzenclusters it's OWL. Printmedien Heinemeyer, Höxter-Fürstenau
- [ITS17] IT'S OWL CLUSTERMANAGEMENT GMBH (Hrsg.): 2016 Jahresbericht. März 2017
- [Iwa17] IWANEK, P.: Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau. Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 366, Paderborn, 2017
- [Kai14] KAISER, L.: Rahmenwerk zur Modellierung einer plausiblen Systemstruktur mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 327, Paderborn, 2014
- [KCH+90] KANG, K. C.; COHEN, S. G.; HESS, J. A.; Novak, W. E.; Peterson, A. S.: Feature-Oriented Domain Analysis (FODA) – Feasibility Study. Technical Report, Carnegie-Mellon University, Software Engineering Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 1990
- [Kla97] KLAEGER, M.: Rechnergestützte Prüfplanung und Prüfmittelauswahl mit multimedialem on-line-Zugriff. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1997
- [Kli17] KLIEWE, D.: Entwurfssystematik für den präventiven Schutz Intelligenter Technischer Systeme vor Produktpiraterie. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 365, Paderborn, 2017

- [Klo98] KLONARIS, P.: Systemkonzept zur frühzeitigen Einsatzplanung von Prüfmitteln. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH), Shaker Verlag, Berichte aus der Produktionstechnik – Band 22/98, Aachen, 1998
- [Kno16] KNOCHE, T.: Der erfolgreiche Konstruktionsleiter – Führungswerkzeuge aus der Praxis. Haus der Technik in Essen, Schulungsunterlagen vom 10.03.2016 bis 11.03.2016 in Essen
- [KNT09] KAISER, L.; NORDSIEK, D.; TERFLOTH, A.: Softwaregestützte Konzipierung komplexer mechatronischer Systeme und der zugehörigen Produktionssysteme. In: ATZ Elektronik, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009
- [Köc04] KÖCKERLING, M.: Methodische Entwicklung und Optimierung der Wirkstruktur mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 143, Paderborn, 2004
- [KP13] KOHNHAUSER, V.; POLLHAMER, M.: Entwicklungsqualität. Carl Hanser Verlag, München, 2013
- [Kri89] KRING, J. R.: Ein Modell für ein integriertes Qualitäts- und Prüfplanungssystem in der Montage. In: Warnecke, H.J.; Bullinger, H.-J.(Hrsg.): IPA-IAP Forschung und Praxis – Band 134, Springer-Verlag, Berlin, 1989
- [KS16] KUKULIES, J.; SCHMITT, R.: Auf den Bedarf abgestimmt – Kontinuierliche Prüfplanung in Entwicklung und Produktion. In: QZ – Qualität und Zuverlässigkeit. Carl Hanser Verlag, Jahrgang 61 (2016) 3, München, 2016
- [KS15] KUKULIES, J.; SCHMITT, R.: Ganzheitliche Prüfplanung – Qualitätsprüfungen planen, anpassen und daraus lernen. In: MQ – Management und Qualität – Das Magazin für integrierte Managementsysteme. Ausgabe 11/2015, galledia verlag, Schweiz, Berneck, 2015
- [Küh17] KÜHN, A.: Systematik zur Release-Planung intelligenter technischer Systeme. Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Universität Paderborn, Paderborn, 2017
- [Lan00] LANGLITZ, G.: Ein Beitrag zur Funktionsstrukturentwicklung innovativer Produkte. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe, Forschungsberichte aus dem Institut für Rechneranwendung in Planung und Konstruktion RPK der Universität Karlsruhe, Shaker Verlag, Aachen, 2000
- [Let92] Holland-Letz, V.: Konzept eines rechnergestützten Prüfplanungssystems für die integrierte Produktion auf Basis eines Produktmodellierers. VDI-Verlag, Reihe: 20 – Rechnergestützte Verfahren – Nr. 77, Düsseldorf, 1992
- [LHD+16a] LUKEI, M.; HASSAN, B.; DUMITRESCU, R.; SIGGES, T.; DERKSEN, V.: Requirement Analysis of Inspection Equipment for Integrative Mechatronic Product and Production System Development – Model Based Systems Engineering Approach. In: Proceedings of IEEE International Systems Conference (SysCon2016), 13.-15. April 2016, Orlando, USA, 2016
- [LHD+16b] LUKEI, M.; HASSAN, B.; DUMITRESCU, R.; SIGGES, T.; DERKSEN, V.: Modular Inspection Equipment Design for Modular Structured Mechatronic Products – Model Based Systems Engineering Approach for an Integrative Product and Production System Development. In: Proceedings of the 3rd International Conference on System-integrated Intelligence: New Challenges for Product and Production Engineering (SysInt2016). 13.-15. Juni 2016, Paderborn, Germany, 2016
- [Lin11] LINß, G.: Qualitätsmanagement für Ingenieure. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 3., aktualisierte und erweiterte Auflage, München, 2011
- [Lin14] LINß, G.: Prüfplanung. In: Pfeiffer, T.; Schmitt, R. (Hrsg.): Masing - Handbuch Qualitätsmanagement. Carl Hanser Verlag, 6. überarbeitete Auflage, München, 2014

- [Mey92] MEYER, C.-J.: Methodisch unterstützte Prüfmittelplanung – Ein Beitrag zur kostenoptimierten Planung von Qualitätsprüfungen in der spanenden Serien- und Variantenfertigung. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, Chemnitz, 1992
- [MHC+04] MAYER, M.; HÖFLING, M.; CROSTACK, H. A.; HERMES, A.; ZIELKE, R.; HEINZ, K.; GRÜNZ, L.: QUINTE+ – Optimierung der Prüfplanung nach Kosten und Durchlaufzeit mit Hilfe der Simulation. In: FQS – Forschungsgemeinschaft Qualität e.V.; DGQ – Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V. (Hrsg.): FQS-DGQ-Band Nr. 84-04, Frankfurt am Main, 1. Auflage, 2004
- [MHD+07] MÜLLER, M.; HÖRMANN, L.; DITTMANN, L.; ZIMMER, J.: Automotive Spice in der Praxis – Interpretationshilfe für Anwender und Assessoren. dpunkt-Verlag, Heidelberg, 2007
- [NAS07] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA) (Hrsg.): Systems Engineering Handbook. Washington D.C., 2007
- [Neu92] NEUMANN, A.: Automatische Prüfplangenerierung. Hanser Fachbuchverlag, München, 1992
- [Nor12] NORDSIEK, D.: Systematik zur Konzipierung von Produktionssystemen auf Basis der Prinzipiellösung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 304, Paderborn, 2012
- [PB97] PAHL, G.; BEITZ, W.: Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung. Springer Verlag, Berlin, 4. Auflage, 1997
- [PBF+07] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHOUSEN, J.; GROTE, K. H.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. Springer-Verlag, 7. Auflage, Berlin, 2007
- [PL14] PAULWEBER, M.; LEBERT, K.: Mess- und Prüfstandstechnik – Antriebsstrangentwicklung · Hybridisierung · Elektrifizierung. In: List H.(Reihenherausgeber): Der Fahrzeugantrieb. Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2014
- [Pos05] POSCHMANN, H.: Abnahmekriterien für elektronische Baugruppen – jetzt Bleifrei – Der neue „Weltstandard“ IPC-A-610D. In: Productronic. 10-2005, S. 2-4
- [PS10] PFEIFER, T.; SCHMITT, R.: Fertigungsmesstechnik. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 3. Auflage, München, 2010
- [Ref93] REFA – VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E.V. (HRSG.): Methodenlehre der Betriebsorganisation – Lexikon der Betriebsorganisation. Carl Hanser Verlag, München, 1993
- [Rei98] REITER, R.: Integrierte Gestaltung automatischer Prüfmittel für die flexible Montage. VDI Verlag, Düsseldorf, 1998
- [Rei13] REINHARD SYSTEM- UND MESSELECTRONIC GMBH: Testfreundliches Design von elektronischen Baugruppen (Design for Testability). Diessen-Obermühlhausen, 22.05.2013
- [Rel85] RELES, T.: Rechnergestützte Auswahl von Prüfmerkmalen im Rahmen der Prüfplanung für die mechanische Fertigung. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Fotodruck J. Mainz GmbH, Aachen, 1985
- [Rot00] ROTH, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen – Band I Konstruktionslehre. Springer-Verlag, Berlin, 3. Auflage, 2000
- [SB94] SPATH, D.; BÖS, K.: Integration der Qualitäts- und Prüfplanung in die Produktentwicklung und Arbeitsplanung. In: VDI Berichte Nr. 1096. Karlsruhe, 1994
- [SB11] SCHMITT R.; BASSE, I.: Anspruchsvollere Prüfplanung mittels Entscheidungstheorie – Mit Entschiedenheit. In: QZ – Qualität und Zuverlässigkeit. Jahrgang 56 (2011) 5, Carl Hanser Verlag, München, 2011

- [Sch05] SCHMITZ, M.: Ein offenes, integratives Rahmenwerk für die Qualitätsprüfung variantenreicher Serienprodukte am Beispiel der Automobilmontage. Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Universität Stuttgart, Jost-Jetter Verlag, Heinsheim, 2005
- [Sch06] SCHMIDT, A.: Wirkmuster zur Selbstoptimierung – Konstrukte für den Entwurf selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 204, Paderborn, 2006
- [Sch07] SCHENK, J.: Prüfplattform für mechatronisch ausgestattete Fahrzeuge in Entwicklung und Produktion. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, RWTH Aachen, 2007
- [SDS+17] SIGGES, T.; DÜERKOP, C.; SCHULTE, T.; BROSE, M.; NEUMANN, A.; LUKEI, M.: Abschlussbericht Innovationsprojekt itsOWL-ImWR – Innovatives modulares Antriebswechselrichtersystem für die Elektrifizierung von Nebenaggregaten in Fahrzeuganwendungen. 06.09.2017
- [SK16] SCHMITT, H. R., KUKULIES, J.: Leitfaden zur Gestaltung einer ganzheitlichen Prüfplanung. FSQ-DGQ-Schriftenreihe, Frankfurt am Main, 2016
- [SP10] SCHMITT, R.; PFEIFER, T.: Qualitätsmanagement, Strategien – Methoden – Techniken. Carl Hanser Verlag, München, 4. vollständig überarbeitete Auflage, 2010
- [SP15] SCHMITT, R.; PFEIFER, T.: Qualitätsmanagement, Strategien – Methoden – Techniken. Carl Hanser Verlag, München, 5. aktualisierte Auflage, 2015
- [SPE1] SPEA: Design for Testability – Flying Probe 4020-4030-4060 Testers. Version 2, Code: 81110142.067
- [SPE2] SPEA: Design for Testability – User's Guide. Version: 2, Code 81190696.196, Volpiano-Italy
- [Ste07] STEFFEN, D.: Ein Verfahren zur Produktstrukturierung für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 207, Paderborn, 2007
- [Sti10] STINY, L.: Fertigung und Test elektronischer Baugruppen – Technologie, Fertigungskonzepte, Prüftechnik. Christiani, Konstanz, 2010
- [Stu96] STURM, J.: Prozessintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion. Meisenbach Verlag, Bamberg, 1996
- [SZ10] SCHÄUFFELE, J.; ZURAWKA, T.: Automotive Software Engineering – Grundlagen, Prozesse, Methoden und Werkzeuge effizient einsetzen. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 4. überarbeitete und erweiterte Auflage, 2010
- [Tue96] TUETE KWAM, A. M.: Methodik zur Integration der Prüfplanung in die Qualitätsplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, RWTH Aachen, Shaker Verlag, Band 31/96, Aachen, 1996
- [VDI90] VDI/VDE-GESELLSCHAFT FEINWERKTECHNIK (HRSG.): Prüfung von Leiterplatten-Baugruppen LPBG – Empfehlungen der VDI/VDE-Gesellschaft Feinwerktechnik – Ausschuss Leiterplatten-Baugruppentest, Carl Hanser Verlag, München, 1990
- [VDI92] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI Berichte 995: Arbeitsplanung – Das Bindeglied zwischen Konstruktion und Fertigung. VDI Verlag, Düsseldorf, 1992
- [Vie94] VIETHEN, U.: Systematik zum Prüfen in Flexiblen Fertigungssystemen. iwv Forschungsberichte, Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München, Springer-Verlag, Band 69, Berlin, 1994
- [Wei90] WEISS, M.: Wissensbasierte Werkzeuge für die optimierende Prüfplanung elektronischer Baugruppen. VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 20: Rechnergestützte Verfahren, Nr. 34, VDI Verlag, Düsseldorf, 1990

-
- [Wei14] WEILKIENS, T.: Systems Engineering mit SysML/UML – Anforderungen, Analyse, Architektur. dpunkt.verlag, Heidelberg, 2014
- [Wes91] WESTERMANN, K. F.: Prüfstrategie – Prüfplanung in der Elektronik und Feinwerktechnik. Hüthig, Heidelberg, 1991
- [Wes06] WESTKÄMPER, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. Springer Verlag, Berlin, 2006
- [WRN09] WIENDAHL, H.-P.; REICHARDT, J.; NYHUIS, P.: Handbuch Fabrikplanung – Konzepte, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. Carl Hanser Verlag, München, 2009
- [WWA06] WANG, L. T.; WEN, X.; ABDEL-HAFEZ, K. S.: Design for Testability. In: Morgan Kaufmann Publishers: VLSI Test Principles and Architectures. Amsterdam, 2006
- [Zel90] ZELLER, P.: Automatisierte Prüfplanerstellung und Prüfzeichnungsgenerierung. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1990
- [ZVEI06] FACHVERBAND ELETRONIC COMPONENTS AND SYSTEMS IM ZVEI – ZENTRALVERBAND ELETROTECHNIK- UND ELEKTRONIKINDUSTRIE (HRSG.): Produktorientierte Prüfstrategien für elektronische Baugruppen – Marktempfehlungen für Produzenten elektronischer Baugruppen. Frankfurt, 2006
- [Zwi71] ZWICKY, F.: Entdecken, Erfinden, Forschen im Morphologischen Weltbild. Droemer-Knaur Verlag, München, 1971

Normen und Richtlinien

- [DIN1319-1] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN): Grundlagen der Messtechnik – Grundbegriffe. DIN 1319 Teil 1, Beuth Verlag, Berlin, 1995
- [DIN1319-2] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN): Grundlagen der Messtechnik – Begriffe der Messtechnik. DIN 1319 Teil 2, Beuth Verlag, Berlin, 1995
- [DIN1338] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN): Formelschreibweise und Formelsatz. DIN1338, Beuth Verlag, Berlin, 2011
- [DIN2859-1] DIN ISO 2859-1: Annahmestichprobenprüfung anhand der Anzahl fehlerhafter Einheiten oder Fehler (Attributprüfung) – Teil 1: Nach der annehmbaren Qualitätsgrenzlage (AQL) geordnete Stichprobenpläne für die Prüfung einer Serie von Losen. Beuth Verlag, Berlin, 1993
- [DIN2859-3] DIN ISO 2859-3: Annahmestichprobenprüfung anhand der Anzahl fehlerhafter Einheiten oder Fehler (Attributprüfung) – Teil 3: Skip-lot-Verfahren. Beuth Verlag, Berlin, 2007
- [DIN3951] DIN ISO 3951: Verfahren und Tabellen für Stichprobenprüfung auf den Anteil fehlerhafter Einheiten in Prozent anhand quantitativer Merkmale (Variablenprüfung). Beuth Verlag, Berlin, 1992
- [DIN9000] DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 9000:2015. Beuth Verlag, Berlin, November 2015
- [DIN9001] DIN EN ISO 9001: Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen (ISO 9001:2008); Dreisprachige Fassung EN ISO 9001:2008. Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2008
- [DIN40080]³¹ DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN): Verfahren und Tabellen für Stichprobenprüfung anhand qualitativer Merkmale (Attributprüfung). DIN 40080, Beuth Verlag, Berlin, 1979
- [DIN55350-11] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN): Begriffe zum Qualitätsmanagement – Teil 11: Ergänzung zu DIN EN ISO 9000:2005. DIN 55350 Teil 11, Beuth Verlag, Berlin, 2008
- [DIN55350-12] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN): Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik – Merkmalsbezogene Begriffe. DIN 55350 Teil 12, Beuth Verlag, Berlin, 1989
- [DIN55350-15] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN): Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik – Begriffe zu Mustern. DIN 55350 Teil 15, Beuth Verlag, Berlin, 1986
- [DIN55350-17] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN): Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik – Begriffe der Qualitätsprüfungsarten. DIN 55350 Teil 17, Beuth Verlag, Berlin, 1988
- [DIN55350-23] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN): Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik – Begriffe der Statistik – Beschreibende Statistik. DIN 55350 Teil 23, Beuth Verlag, Berlin, 1983
- [DIN60812] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN): Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen – Verfahren für die Fehlzustandsart- und Auswirkungsanalyse (FMEA) (IEC 600812:2006); Deutsche Fassung 60812:2006. DIN EN 60812, Beuth Verlag, Berlin, 2006
- [DIN69901-5] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN): Projektmanagement – Projektmanagementsysteme. DIN 69901 Teil 5, Beuth Verlag, Berlin, 2009

³¹ Dokument wurde ersetzt durch DIN ISO 2859-1: 1993-04 bzw. DIN ISO 2859-1: 2004-01

- [IPC-A-610DE] FACHVERBAND FÜR DESIGN, LEITERPLATTEN- UND ELEKTRONIKFERTIGUNG E. V.: IPC-A-610F DE – Abnahmekriterien für elektronische Baugruppen. Deutsche Übersetzung der IPC-A-610F, übersetzt durch FED e.V. Berlin, Revision F-2014
- [PTB98] PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (Hrsg.): Benennungsgrundsätze Physikalischer Einheiten – Leitfaden für den Gebrauch des Internationalen Einheitensystems. Bearbeitet von Peter Drath, 1998
- [VDA5] VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE: Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie – Prüfprozesseignung – Eignung von Messsystemen, Eignung von Mess- und Prüfprozessen, Erweiterte Messunsicherheit, Konformitätsbewertung. VDA Band 5, 2. vollständig überarbeitete Auflage 2010, aktualisiert Juli 2011
- [VDI2206] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Richtlinie 2206, Beuth Verlag, Berlin, 2004
- [VDI2428-5] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Gerätetechnik – Prüfgerechtes Gestalten. VDI-Richtlinie 2428 Blatt 5, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1988
- [VDI2619] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI); VEREIN DEUTSCHER ELEKTROTECHNIKER (VDE); DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR QUALITÄT (DGQ): Prüfplanung. VDI/VDE/DGQ-Richtlinie 2619, Beuth Verlag, Berlin, 1985
- [VDI2815-5] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung – Betriebsmittel. VDI-Richtlinie 2815 Blatt 5, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1978
- [VDI5703] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Systematische Entwicklung modellbasierter Prüfungen für Medizinprodukte. VDI-Richtlinie 5703, Beuth Verlag, Berlin, 2015

Anhang

Inhaltsverzeichnis	Seite
A1 Beziehungen im Entwicklungsprozess.....	1
A1.1 Einfluss auf die Prüfplanung	2
A1.2 Einfluss der Prüfplanung auf die Funktionsbereiche	7
A1.3 Einfluss der Prüfplanung, Produkt- und Produktionssystementwicklung auf die Prüfmittelentwicklung	9
A1.4 Einfluss der Prüfmittelentwicklung auf die Entwicklungsbereiche	14
A2 Angepasste Prozess-FMEA zur Festlegung von Prüfmerkmalen....	18
A3 Alternative Verzahnung der V-Modelle von Produkt und Prüfmittel	20
A4 Ergänzende Informationen zum Anwendungsbeispiel.....	22
A5 Grundprinzip des Gesamtvorgehens in abstrahierter und komprimierter Form.....	25

A1 Beziehungen im Entwicklungsprozess

Nachfolgend werden die wesentlichen Beziehungen im Entwicklungsprozess, die in dem integrativen Entwicklungsprozess wiederzufinden sind (vgl. Kapitel 4 und Kapitel 5), detaillierter aufgelistet und beschrieben. Es werden dazu die Funktionsbereiche *Produktentwicklung*, (*Hauptprozess der*) *Produktionssystementwicklung*, *Prüfplanung*, *Prüfmittelentwicklung* und *Sonstige Quellen* unterschieden. Die *Prüfplanung* und *Prüfmittelentwicklung* ist dabei Bestandteil der *Produktionssystementwicklung* (Hinweis: In der Literatur werden die Prüfplanung und die Prüfmittelentwicklung oft nicht trennscharf abgegrenzt). Die Beziehungen werden dabei zunächst ohne zeitliche Abfolge dargestellt.

Es wird davon ausgegangen, dass in der *Produktentwicklung* und dem *Hauptprozess der Produktionssystementwicklung* mit den Partialmodellen der Spezifikationstechnik CONSENS frühzeitig konzipiert wird (vgl. Kapitel 2.3.3.3). Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die *Prüfmittelentwicklung* ebenfalls die Partialmodelle der Spezifikationstechnik CONSENS nutzt, um ein frühzeitiges Prüfmittelkonzept zu erstellen.

In der Prüfplanung werden zwei wesentliche Dokumente unterschieden. Dies sind der Prüfplan und die NPB Anforderungsliste (vgl. auch Kapitel 4.2.4.4, Kapitel 4.2.4.5 und Kapitel 4.2.4.6). Der Prüfplan beinhaltet die einzelnen Prüfmerkmale mit den zugehörigen Eigenschaften (zugehöriges Prüfmittel, Prüfumfang, Prüfort, Prüfzeitpunkt usw.), die sich durch die zehn Aufgaben der Prüfplanung (vgl. Kapitel 2.4.1 und Kapitel 4.2.4.1) ergeben (Hinweis: In Bild A-1 werden abweichend zu den Prüfplänen in Kapitel 4 und 5 auch Prüfort, Prüfanweisung usw. angedeutet, um die Abhängigkeiten zu verdeutlichen. Im Konzept des vierten Kapitels sind diese Informationen zum Teil in anderen Dokumenten bzw. den Partialmodellen der Spezifikationstechnik enthalten, wobei vom Prüfplan auf diese verwiesen wird). Prüfmerkmale sind dabei als Anforderungen an das bzw. die Prüfmittel zu verstehen. Der Vorteil dieser Unterteilung ist dabei, dass die Prüfmerkmale für außenstehende Aufgaben zur Verfügung stehen (die im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden). Werden z. B. Prototypen bzw. erste (Vor-)Seriengeräte noch nicht mit dem zu entwickelnden Prüfmittel überprüft, so können die aufgelisteten Prüfmerkmale dennoch herangezogen werden, um die Prüfungen mit vorhandenen Prüfmitteln (ggf. händisch) durchzuführen.

Die Erstellung der Beziehungen basiert dabei, wie die gesamte Systematik, auf der Erfahrung aus mehreren Industrieprojekten und der Analyse zahlreicher Literaturquellen. Weiterhin wurden zahlreiche Gespräche mit Firmen geführt, deren Schwerpunkt die Entwicklung und Fertigung von Prüfmitteln ist und Firmen, die Prüfmittel einsetzen und oftmals auch für ihre eigene Fertigung selbst entwickeln bzw. spezifizieren.

In Kapitel A1.1 werden zunächst die Abhängigkeiten der Prüfplanung von der Produkt- und Produktionssystementwicklung sowie von sonstigen Quellen beschrieben. In Kapitel A1.2 wird der Einfluss der Prüfplanung auf die Produkt-, Produktionssystem- und Prüfmittelentwicklung beschrieben. In Kapitel A1.3 wird der Einfluss der Funktionsbe-

reiche auf die Prüfmittelentwicklung untersucht. In Kapitel A1.4 wird der Einfluss der Prüfmittelentwicklung auf die Funktionsbereiche beschrieben.

Bei der Darstellung der Beziehungen wird ein einheitliches Schema zur Darstellung verwendet (vgl. Bilder A-1, A-2, A-3 und A-4). Es wird zwischen Informationsflüssen und unterstützenden Tätigkeiten unterschieden.

Die Informationsflüsse werden mittels Flussbezeichnern bezeichnet. Alle verwendeten Bezeichnungen beziehen sich auf das Ende des Flussbezeichners. Der erste Buchstabe der Flussbezeichnung steht für die Informationsquelle (kann Prozessschritt oder Dokument sein), der zweite für das Ziel der Information (kann Prozessschritt oder Dokument sein). Am Beispiel des Bezeichners *AP*, welcher einen Informationsfluss zwischen Produktentwicklung und Prüfmittelentwicklung bezeichnet (vgl. Bild A-3), wird das System der Flussbezeichner verdeutlicht. *A* steht dabei für die Prinzipiellösung des Produktes mit den Partialmodellen Umfeld und Wirkstruktur. *P* steht dabei für das Prüfmittel für Systemprüfungen auf das Einfluss genommen wird. Aus dem Umfeldmodell des Produktes können z. B. Schnittstellen zum Prüfmittel oder Störflüsse übernommen werden (Hinweis: Ein Prüfmittel stellt oftmals das Umfeld des Prüflings nach, um diesen zu prüfen, vgl. dazu auch Kapitel 2.4 und [Her97, S. 14ff.]). Die Bezeichner für Informationsflüsse werden im beschriebenen integrativen Entwicklungsprozess genutzt (vgl. Kapitel 4 und Kapitel 5). Dazu wird an den Bezeichner noch eine Zahl angefügt. *AP1* würde dann den beschriebenen Informationsfluss im ersten Durchlauf beschreiben (vgl. Bild 4-5).

Bei den Verweisen auf unterstützende Tätigkeiten gibt es zwei Arten: unterstützende Tätigkeiten durch die Prüfplanung, welche mit einem blauen Kreis gekennzeichnet sind und unterstützende Tätigkeiten durch die Prüfmittelentwicklung, welche mit einem gelben Kreis gekennzeichnet sind. Der Bezeichner ist dabei immer mit einem Buchstaben versehen und steht für die durchzuführende unterstützende Tätigkeit. So steht z. B. der gelbe Bezeichner *B* (vgl. Bild A-4) für die unterstützende Tätigkeit durch die Prüfmittelentwicklung bei der Produktentwicklung, um die Zugänglichkeit der Prüfmerkmale bzw. der dafür notwendigen Schnittstellen beim Produkt sicherzustellen. Auch diese Bezeichner werden im integrativen Entwicklungsprozess genutzt und geben bei bestimmten Prozessen die unterstützenden Tätigkeiten der Prüfmittelentwicklung bzw. der Prüfplanung an.

A1.1 Einfluss auf die Prüfplanung

Nachfolgend wird der Einfluss der *Produktentwicklung*, *Produktionssystementwicklung* und *Sonstiger Quellen* auf die *Prüfplanung* beschrieben (vgl. Bild A-1). In der Prüfplanung selbst wird zwischen dem Prüfplan und der NPB Anforderungsliste unterteilt.

In der Produktentwicklung können die Partialmodelle der Spezifikationstechnik CONSENS als Informationsquelle genutzt werden (Anforderungen, Anwendungsszenarien, Funktionen, Wirkstruktur, Grobgestalt). Weiterhin können Entwicklungsunterla-

gen wie z. B. Schaltpläne und CAD-Daten herangezogen werden. Das real aufgebaute Produkt, z. B. in Form erster Prototypen, kann ebenfalls Informationen zur Prüfplanung liefern.

In der Produktionssystementwicklung können die Partialmodelle der Spezifikationstechnik CONSENS als Informationsquelle genutzt werden (Ressourcen, Prozesse, Gestalt). Weiterhin können Entwicklungsunterlagen des Produktionssystems und das real aufgebaute Produktionssystem, bzw. auch Teile davon, zur Prüfplanung herangezogen werden.

Zu den sonstigen Quellen zählen prüfrelevante Unterlagen wie z. B. Prüfpläne von Vorgängerprodukten, Normen, Richtlinien, Kundenforderungen bezüglich Prüfungen usw. (vgl. auch Bild 2-18). Weiterhin können Informationen von Stakeholdern und Experten herangezogen werden (vgl. auch Bild 2-18).

In Bild A-1 werden diese Zusammenhänge mittels der Informationsflüsse dargestellt.

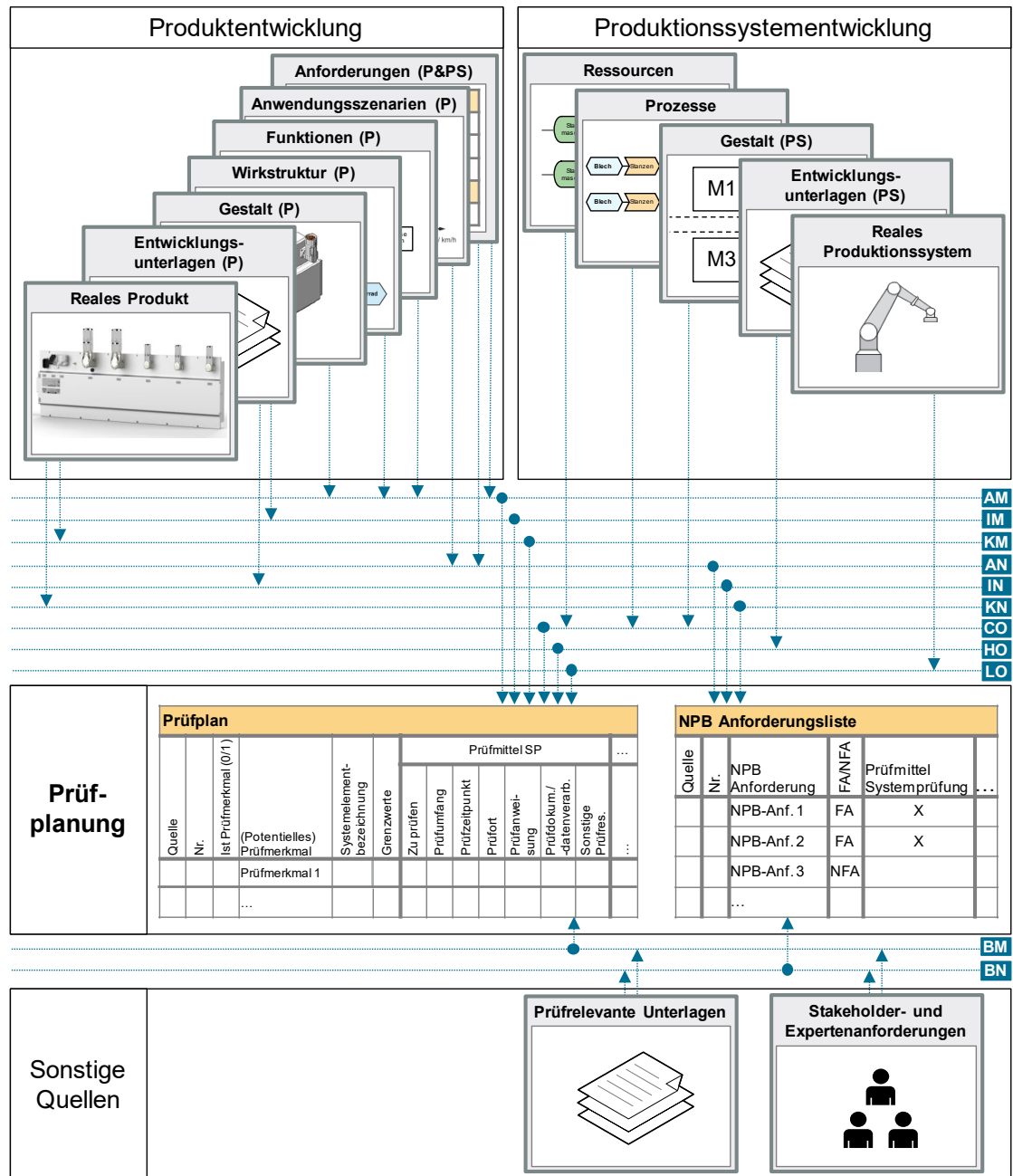


Bild A-1: Informationsflüsse von der Produkt- und Produktionssystementwicklung sowie von sonstigen Quellen zur Prüfplanung

Nachfolgend wird der Einfluss der Produkt- und Produktionssystementwicklung sowie der sonstigen Quellen anhand von Beispielen veranschaulicht, ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben:

- **Einfluss AM:** Hier handelt es sich um den Einfluss der Prinziplösung des Produktes auf die Ermittlung potentieller Prüfmerkmale (und damit letztlich auf die

Prüfmerkmale). Die Partialmodelle Anforderungen, Funktionen, Wirkstruktur und Gestalt können dazu herangezogen werden. Beispiel für Prüfmerkmale, die in den Prüfplan eingehen sind z. B. die Anforderung „Das Gehäuse muss wasserdicht sein“ oder die Funktion „Energie bereitstellen“. Für diese sind aus der Wirkstruktur die Bezeichnungen der zugehörigen Systemelemente in den Prüfplan zu übernehmen. Aus der Grobgestalt des Produktes können z. B. geometrische Merkmale als Prüfmerkmale übernommen werden.

- **Einfluss IM:** Zur Ermittlung potentieller Prüfmerkmale können die Produktentwicklungsunterlagen hinzugezogen werden. Anhand von Zeichnungen mit Toleranzangaben können z. B. die Grenzwerte eines Prüfmerkmals bestimmt werden.
- **Einfluss KM:** Das reale Produkt kann zusätzliche Informationen zur Ermittlung potentieller Prüfmerkmale liefern. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn ein potentielles Prüfmerkmal in den Spezifikationen nicht sichtbar ist. Sind z. B. bestimmte Verbindungskabel des zu prüfenden Produktes (Prüflings) nicht in der Spezifikation modelliert, sind diese nur hier sichtbar.
- **Einfluss XM:** Dieser Einfluss fasst die Einflüsse *AM*, *IM*, und *KM* zusammen und beschreibt die kompletten Entwicklungsartefakte des Produktes (reales Produkt, Spezifikationen, usw.), die zur Ermittlung von potentiellen Prüfmerkmalen genutzt werden können.
- **Einfluss BM:** Zur Ermittlung potentieller Prüfmerkmale können prüfrelevante Unterlagen und Stakeholder- bzw. Expertenanforderungen herangezogen werden. Zu den prüfrelevanten Unterlagen zählen z. B. der Entwicklungsauftrag, Prüfpläne ähnlicher Produkte bzw. Vorgängerprodukte, CE-Richtlinien oder die Auswertung einer System-FMEA. Letztere ermöglicht z. B. eine Aussage darüber zu treffen, ob eine Produktfunktion als Prüfmerkmal im Prüfplan aufzunehmen ist. Eine Analyse von Prüfunterlagen von Vorgängerprodukten oder ähnlichen Produkten kann Aufschluss über wichtige zu prüfende Merkmale liefern. Ferner sind bei der Prüfplanerstellung die Anforderungen der Stakeholder und Experten zu berücksichtigen. Ein Kunde kann z. B. fordern, dass eine bestimmte Produktfunktion zu prüfen ist. So kann auch Erfahrungswissen mit in die Prüfplanung einfließen. Insbesondere die Merkmale, die nicht in der Produktspezifikation auftauchen, können so identifiziert werden (vgl. Kapitel 4.2.4.4, Beispiel für ein KPI).
- **Einfluss AN:** Zur Ermittlung von NPB Anforderungen der Prüfmittel können die *Anwendungsszenarien (P)* und *Anforderungen (P)* des Produktes herangezogen werden. Die prüfrelevanten Anwendungsszenarien können z. B. Angaben über die Art der Verbindung zwischen Produkt und Prüfmittel liefern. Des Weiteren können Produkthanforderungen existieren, die an die einzusetzenden Prüfmittel gerichtet sind. Eine solche Anforderung könnte z. B. lauten: „Das Prüfmittel muss Fehler per Schnittstelle aus dem Produkt auslesen können“.

- **Einfluss IN:** Bei der Erstellung der NPB Anforderungsliste können die Produktentwicklungsunterlagen mit einbezogen werden – sobald diese vorhanden sind. Hierunter sind insbesondere die Unterlagen aus dem domänenspezifischen Entwurf des Produktes zu verstehen (Schaltpläne, Bauteilbeschreibungen, Schnittstellenbeschreibungen usw.).
- **Einfluss KN:** Das reale Produkt kann zur Festlegung der NPB Anforderungen herangezogen werden. Dies sind vor allem die verschiedenen Prototypen, die während der Entwicklung des Produktes entstehen (vgl. auch Prototypen zu den Meilensteinen in Kapitel 4, Bild 4-4). Soll in dem Prüfmittel z. B. die Position oder die Geometrie des Prüflings bestimmt werden, kann der Fall auftreten, dass bei einem Sensor der das Produkt berührt, sich durch die Krafteinwirkung das Produkt und/oder der Prüfling verformen würde. Gegebenenfalls fällt dies erst am realen Produkt auf. Es kann sich dadurch die Notwendigkeit ergeben an das Prüfmittel die Anforderung zu stellen, dass eine berührungslose Messung notwendig ist. Ein weiteres Beispiel wären bestimmte Umweltbedingungen, die bei dem Prüfling einzuhalten sind.
- **Einfluss XN:** Dieser Einfluss fasst die Einflüsse *AN*, *IN*, und *KN* zusammen und beschreibt die kompletten Entwicklungsartefakte des Produktes (reales Produkt, Spezifikationen, usw.), die zur Ermittlung von NPB Anforderungen genutzt werden können.
- **Einfluss BN:** Zur Ermittlung von NPB Anforderungen können prüfrelevante Unterlagen und Stakeholder- bzw. Expertenansforderungen herangezogen werden (vgl. auch Einfluss *BM*). Der Entwicklungsauftrag als prüfrelevantes Dokument liefert z. B. Angaben bzgl. der Produktionsmenge und gibt damit Aufschluss über die Anzahl zu prüfender Einheiten pro Zeitintervall. Die Anforderung, dass das Prüfmittel die Prüfergebnisse (in der Regel Messwerte) in einem bestimmten Datenformat speichern und an eine Prüfdatenbank übertragen soll, wäre ein Beispiel für eine Anforderung, die ein Stakeholder stellen könnte (z. B. IT-Abteilung oder Qualitätsabteilung des Unternehmens).
- **Einfluss CO:** Dieser Einfluss stellt die Abhängigkeit der Prüfplanung von der Prinzipiellösung des Produktionssystems dar. Es können die Partialmodelle *Prozesse*, *Ressourcen* und *Gestalt (PS)* herangezogen werden. In der Prozessfolge werden die Prüfprozesse integriert. Das Prüfmittel stellt eine Ressource (PS) dar. Prozessfähigkeitskennwerte von verwendeten Maschinen können genutzt werden, um zu beurteilen, ob ein bestimmtes Prüfmerkmal zu prüfen ist. Auf Basis der Prozesse kann dazu eine Prozess-FMEA durchgeführt werden. Mithilfe des Layoutplans, der dem Partialmodell *Gestalt (PS)* zu entnehmen ist, kann einer Prüfung ein Prüfort zugewiesen werden.

- **Einfluss HO:** Die Entwicklungsunterlagen bzw. Dokumentationen der Produktionssystementwicklung detaillieren die Angaben von Einfluss CO und sollen daher mit berücksichtigt werden.
- **Einfluss LO:** Das reale Produktionssystem kann weitere wichtige Hinweise zur Prüfplanung liefern. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn Teile des Produktionssystems bereits bestehen und die Dokumentation des Produktionssystems bestimmte Aspekte nicht berücksichtigt (vgl. Einflüsse CO und HO).
- **Einfluss XO4:** Der Einfluss fasst die Einflüsse CO, HO und LO zusammen und beschreibt Informationen, die von der Produktionssystementwicklung zur Prüfplanung genutzt werden können.

A1.2 Einfluss der Prüfplanung auf die Funktionsbereiche

Im vorangegangenen Kapitel wurden u.a. die Einflüsse von der *Produktentwicklung* und der *Produktionssystementwicklung* auf die *Prüfplanung* beschrieben. Umgekehrt kann die *Prüfplanung* auch Einfluss auf die *Produktentwicklung* und (den Hauptprozess der) *Produktionssystementwicklung* sowie die *Prüfmittelentwicklung* haben. In Bild A-2 sind diese Einflüsse dargestellt. Nicht enthalten in der Darstellung sind die „Sonstigen Quellen“, zu denen die prüfrelevanten Unterlagen und Stakeholder- und Expertenanforderungen zählen, da hier kein nennenswerter Einfluss ermittelt werden konnte.

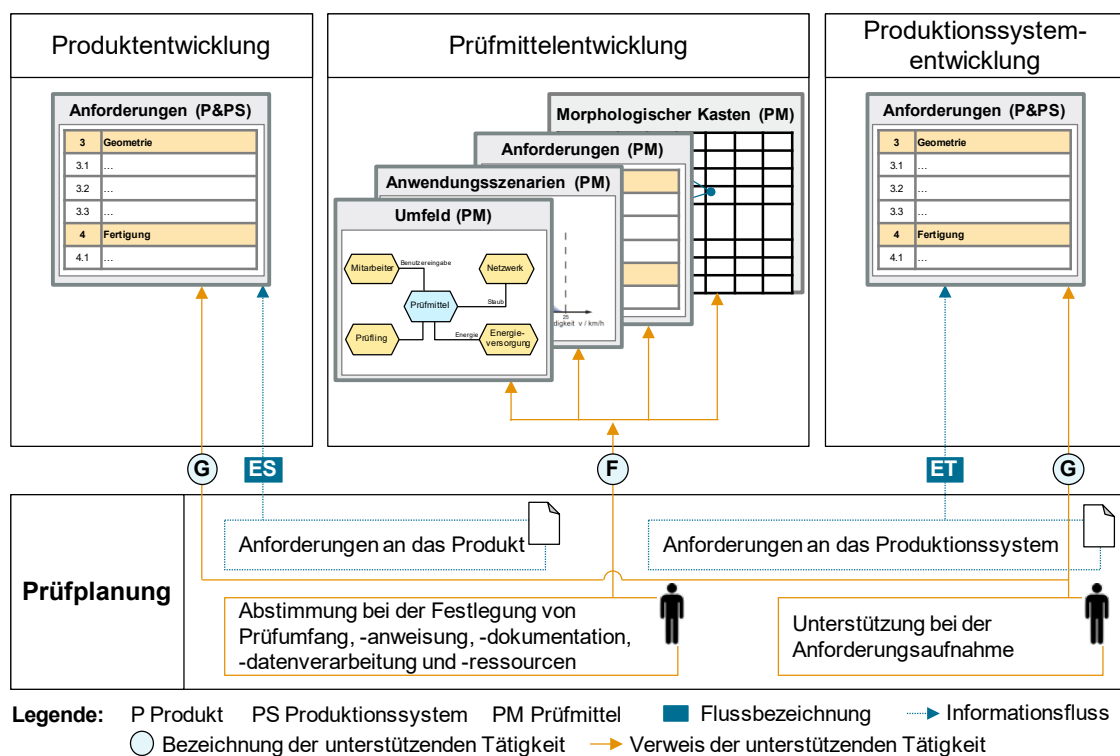


Bild A-2: Einfluss der Prüfplanung auf die Prüfmittelentwicklung, Produkt- und Produktionssystementwicklung

Nachfolgend wird der Einfluss der Prüfplanung auf die Prüfmittel-, Produkt- und Produktionssystementwicklung beschrieben. Es wird dabei kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben, sondern versucht die wesentlichen Einflüsse darzustellen. Es existieren dabei Informationsflüsse, die im Wesentlichen Anforderungen sind und unterstützende Tätigkeiten. Erfolgt, wie in dieser Arbeit, eine Unterteilung in Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung, sind die Anforderungen erfahrungsgemäß eher wenige. Mehr bzw. gravierendere Anforderungen sind eher von der Prüfmittelentwicklung an die Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung zu erwarten, da hier ein konkretes Konzept für ein Prüfmittel entsteht und somit die Interaktion mit dem Produkt Einflüsse generieren kann:

- **Einfluss ES:** Die Prüfplanung kann mithilfe von Anforderungen Einfluss auf die Produktentwicklung nehmen. Dies könnte z. B. der Fall sein, wenn das Produkt eine Funktion bieten soll, welche die Produktversion an das Prüfmittel sendet, um das richtige Prüfprogramm des Prüfmittels auszuwählen, abhängig von der Produktvariante.
- **Einfluss ET:** Es können Anforderungen von der Prüfplanung an die Produktionssystementwicklung gerichtet werden. Eine solche Anforderung könnte z. B. lauten: „Das Produktionssystem muss eine Datenanbindung für das Prüfmittel am Prüfort bereitstellen“.
- **Einfluss F:** Im Rahmen dieser Arbeit wird in Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung unterteilt. In der Literatur wird dies nicht immer trennscharf unterschieden. Oftmals ist keine Prüfmittelentwicklung vorgesehen und es wird davon ausgegangen, dass ein Prüfmittel lediglich ausgewählt werden muss. Grundsätzlich sind bei einer Prüfplanung bestimmte Aufgaben durchzuführen (vgl. zehn Prüfplanungsaufgaben in Kapitel 2.4.1 und Kapitel 4.2.4.1). Im Rahmen dieser Arbeit sind diese Aufgaben dabei teilweise der Prüfmittelentwicklung zugeordnet worden. Insbesondere unterstützt die Prüfplanung daher diese Tätigkeiten in der Prüfmittelentwicklung. Dazu zählen:
 - die Festlegung der Prüfanweisung in den *Anwendungsszenarien (PM)* des Prüfmittels
 - die Erstellung des *Morphologischen Kastens (PM)* des Prüfmittels, in dem durch Festlegung der Lösungsalternativen (Teil-)Prüfmittel und Prüfpersonal festgelegt werden sowie Prüfdatenverarbeitung und Prüfdokumentation
 - die Festlegung von Prüfumfang, Prüffart, Prüfort und ggf. weitere Prüfrésources
- **Einfluss G:** Bei der Aufnahme von Anforderungen aus der Prüfplanung an das Produkt und Produktionssystem können die Mitarbeiter der Prüfplanung unterstützen. Dadurch wird ein besseres Verständnis dieser Anforderungen ermöglicht.

A1.3 Einfluss der Prüfplanung, Produkt- und Produktionssystementwicklung auf die Prüfmittelentwicklung

Nachfolgend wird der Einfluss der *Prüfplanung*, *Produktentwicklung* und *Produktionssystementwicklung* auf die *Prüfmittelentwicklung* beschrieben (vgl. Bild A-3).

Einen wichtigen Einfluss auf die Prüfmittelentwicklung übt die Prüfplanung aus. Die in der Prüfplanung ermittelten Prüfmerkmale, die zum Teil aus den Produktspezifikationen abgeleitet werden, stellen dabei Anforderungen an das Prüfmittel dar. Zusätzlich kommen NPB Anforderungen hinzu.

Weiterhin können direkte Einflüsse zwischen Produktentwicklung und Prüfmittelentwicklung existieren. Beispielsweise kann das Umfeldmodell des Produktes genutzt werden, um das Umfeldmodell des Prüfmittels zu erstellen (ein Prüfmittel bildet oftmals das Umfeld des Produktes in weiten Teilen nach, vgl. dazu auch Kapitel 2.4.2 und Kapitel 2.4.3).

Die Produktionssystementwicklung kann wichtige Informationen zur Prüfmittelentwicklung zur Verfügung stellen. Ein Prüfmittel stellt eine Ressource in der Produktionssystementwicklung dar und ist dort auch im Layout der Produktion zu berücksichtigen (Platzbedarfe Prüfmittel und Pufferflächen/Lagerflächen für Prüflinge).

In Bild A-3 werden die Zusammenhänge mittels Informationsflüssen dargestellt. Dabei sind manche Informationsflüsse anscheinend mit mehreren Bezeichnern versehen, z. B. *AQ* und *AR*. Es wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass mehrere Prüfmittel zur Prüfung eines Gesamtsystems (und deren Bestandteilen) entwickelt werden können – z. B. ein Prüfmittel zur Prüfung des Gesamtsystems, ein Prüfmittel zur Prüfung eines Moduls des Gesamtsystems und ein Prüfmittel zur Prüfung einer Komponente des Gesamtsystems. Die anscheinend mehrfachen Flussbezeichner beziehen sich auf die unterschiedlichen möglichen Prüfmittel (Gesamtsystemprüfmittel, Modulprüfmittel, Komponentenprüfmittel). In der Regel werden die gleichen Informationsquellen zu Grunde gelegt, wobei dennoch unterschiedliche Teile dieser Informationsquellen herangezogen werden können.

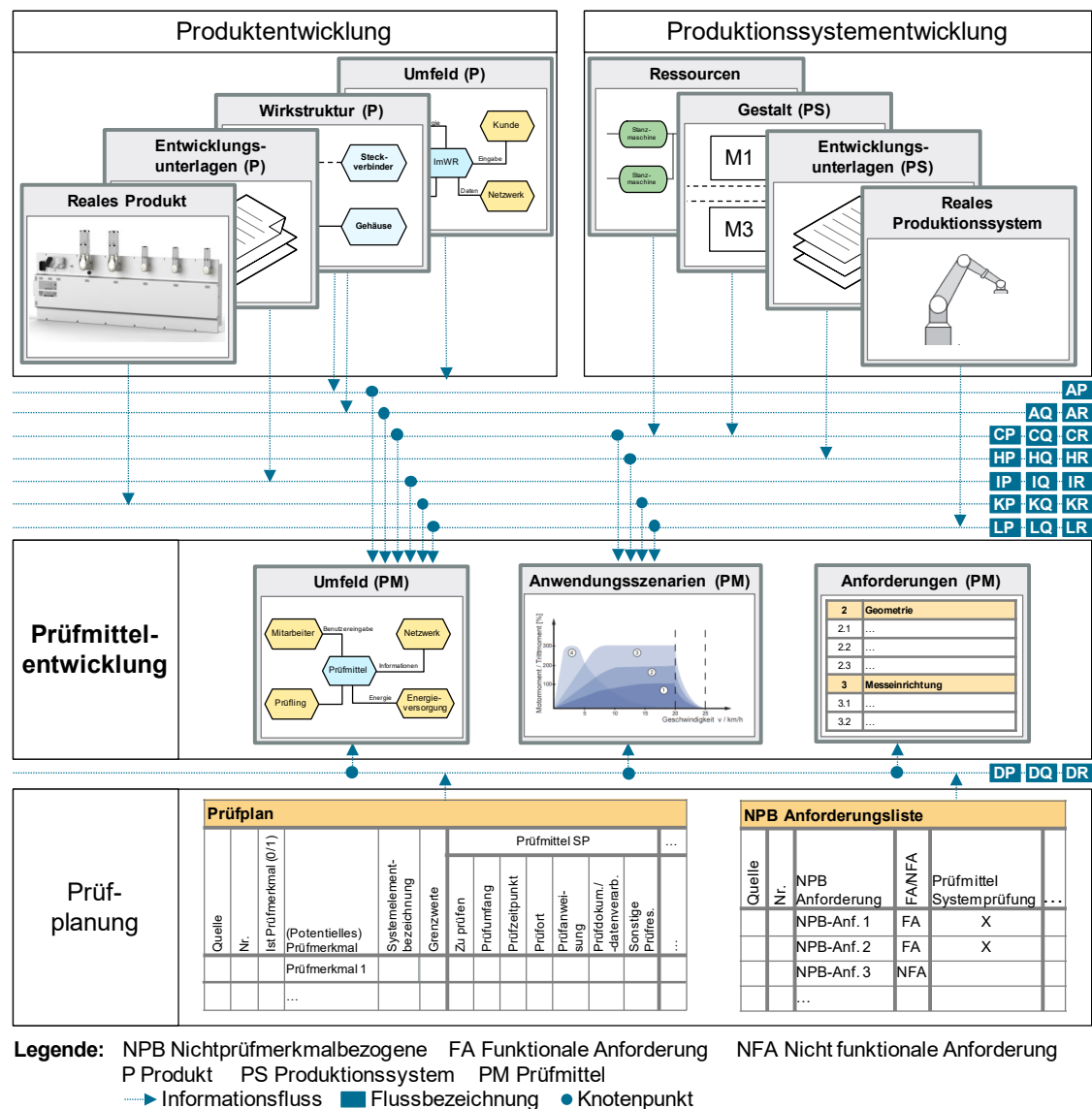


Bild A-3: Einfluss der Prüfplanung, Produkt- und Produktionssystementwicklung auf das Umfeld, die Anwendungsszenarien und die Anforderungen des Prüfmittels

Nachfolgend werden die gekennzeichneten Einflüsse erläutert und mithilfe von Beispielen veranschaulicht, ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben:

- Einfluss AP:** Aus der Prinzipiellösung des Produkts können die Modelle *Umwelt (P)* und *Wirkstruktur (P)* Einfluss auf die Umfeldmodellierung des Prüfmittels für **Systemprüfungen** nehmen (Prüfungen des Gesamtsystems). Das Prüfmittel simuliert oftmals das Umfeld des Produktes, also des Prüflings (vgl. Kapitel 2.4.2 und Kapitel 2.4.3). Dies können die gewünschten Flüsse wie z. B. Energieversorgung, Kommunikationsschnittstellen oder auch Sensoren des Prüflings (Produktes) sein. Ebenso bildet ein Prüfmittel oftmals auch Störflüsse nach, um die Reaktion des Prüflings bei bestimmten Störungen zu prüfen. Bei-

spiel sind dabei z. B. Prüfungen bei verschiedenen simulierten Temperaturen (Prüfungen in der Klimakammer).

Falls mit dem Prüfmittel für Systemprüfungen auch einzelne Module geprüft werden sollen, können aus der *Wirkstruktur (P)* die ein- und ausgehenden Flüsse der zu prüfenden Module relevant sein.

- **Einfluss AQ:** Für die Umfeldmodellierung der Prüfmittel für **Modulprüfungen** kann die *Wirkstruktur (P)* aus der Prinziplösung des Produktes herangezogen werden. Analog zu Einfluss AP bildet das Prüfmittel für Modulprüfungen das Umfeld des Moduls nach. Dies kann aus der Wirkstruktur des Produktes (Prüflings) abgeleitet werden, da die Wirkstruktur das natürliche Umfeld des zu prüfenden Moduls darstellt.
- **Einfluss AR:** Entspricht dem Einfluss AQ, wobei sich dieser auf die Entwicklung von Prüfmitteln für **Komponentenprüfungen** bezieht.
- **Einfluss CP:** Zur Erstellung der Partialmodelle *Umfeld (PM)* und *Anwendungsszenarien (PM)* des Prüfmittels für **Systemprüfungen** können aus der Prinziplösung des Produktionssystems die Modelle *Ressourcen* und *Gestalt (PS)* herangezogen werden. Der Layoutplan des Partialmodells *Gestalt (PS)* kann z. B. Lagerplätze/Pufferflächen für Prüflinge und Netzwerkzugänge beinhalten, die in *Anwendungsszenarien* und *Umfeldmodell (PM)* des Prüfmittels berücksichtigt werden. Weiterhin können daraus Informationen über die das Prüfmittel umgebenden Maschinen abgeleitet werden. Beispielsweise können Maschinen Wärme emittieren und damit auf das Prüfmittel imitieren, sie können durch eine unregelmäßige Stromaufnahme die elektrische Netzqualität beeinflussen bzw. Netzschwankungen hervorrufen und somit auch die Lichtqualität durch die angeschlossenen Leuchten beeinflussen, sie können EMV-Störungen (elektromagnetische Verträglichkeit) auslösen usw. Informationen darüber sind ggf. auch im Partialmodell Ressourcen abgelegt. Darin sind ggf. weitere zu berücksichtigende Informationen über Taktzeiten, Durchsatz, Maschinenfähigkeit usw. vorhanden, die bei der Prüfmittelentwicklung zu berücksichtigen sind.
- **Einfluss CQ:** Entspricht dem Einfluss CP, wobei sich dieser auf die Entwicklung von Prüfmitteln für **Modulprüfungen** bezieht.
- **Einfluss CR:** Entspricht dem Einfluss CP, wobei sich dieser auf die Entwicklung von Prüfmitteln für **Komponentenprüfungen** bezieht.
- **Einfluss HP:** Die Entwicklungsunterlagen des Produktionssystems können Einfluss auf die Entwicklung des Prüfmittels für **Systemprüfungen (PM-SP)** haben. Beispiel für einen solchen Einfluss sind z. B. vorgesehene Statusmeldungen über das zu fertigende Produkt, die in einer Datenbank den Fertigungsstatus/Fertigungsreifegrad nach bestimmten Fertigungsvorschriften abspeichert. Das Prüfmittel muss also in der Lage sein solche Statusmeldungen an die Da-

tenbank zu übermitteln. Der detaillierte Layoutplan des Produktionssystems kann z. B. genutzt werden, um Lagerorte für Prüflinge oder Zubehör zum Prüfmittel zu identifizieren bzw. festzulegen. Lagerorte können wiederum Einfluss auf die Anwendungsszenarien des Prüfmittels haben.

- **Einfluss HQ:** Entspricht dem Einfluss HP, wobei sich dieser auf die Entwicklung von Prüfmitteln für **Modulprüfungen** bezieht.
- **Einfluss HR:** Entspricht dem Einfluss HP, wobei sich dieser auf die Entwicklung von Prüfmitteln für **Komponentenprüfungen** bezieht.
- **Einfluss IP:** Die Entwicklungsunterlagen des Produktes können Einfluss auf das Prüfmittel für Systemprüfungen (PM-SP) haben (Prüfung des gesamten Produktes). Insbesondere im Umfeldmodell des Prüfmittels können dadurch Beziehungen zwischen Prüfling (Produkt) und Prüfmittel genauer spezifiziert werden. Als Beispiel kann hierzu die Spezifikation eines Datenbusses des Produktes genannt werden, über den das Prüfmittel mit dem Produkt kommuniziert. Dies entspricht einem Informationsfluss im Umfeldmodell des Prüfmittels.
- **Einfluss IQ:** Entspricht dem Einfluss IP, wobei sich dieser auf die Entwicklung von Prüfmitteln für **Modulprüfungen** bezieht.
- **Einfluss IR:** Entspricht dem Einfluss IP, wobei sich dieser auf die Entwicklung von Prüfmitteln für **Komponentenprüfungen** bezieht.
- **Einfluss KP:** Das reale Produkt kann Einfluss auf die Prüfmittelentwicklung vom Prüfmittel zur Prüfung des Gesamtsystems (PM-SP) haben (*Umfeld (PM)*, *Anwendungsszenarien (PM)*). Dies kann dort der Fall sein, wo die Spezifikation des Produktes nicht hinreichend detailliert ist, um die Prüfmittelentwicklung zu planen. Denkbar ist z. B. eine Kabelverbindung, deren geometrische Führung in der Produktspezifikation nicht erkennbar ist (oft werden diese in keinem Modell dokumentiert). Aus der Betrachtung des realen Produktes können sich so Einflüsse auf das *Umfeldmodell (PM)* des Prüfmittels ergeben oder auch auf *Anwendungsszenarien (PM)*, die Prüfanweisungen darstellen. Ein weiterer Einfluss wäre z. B. eine nicht berücksichtigte/bekannte Wärmeentwicklung des Produktes. Die Wärmeentwicklung würde in das Umfeldmodell des Prüfmittels als Störfluss eingehen.
- **Einfluss KQ:** Entspricht dem Einfluss KP, wobei sich dieser auf die Entwicklung von Prüfmitteln für **Modulprüfungen** bezieht.
- **Einfluss KR:** Entspricht dem Einfluss KP, wobei sich dieser auf die Entwicklung von Prüfmitteln für **Komponentenprüfungen** bezieht.
- **Einfluss LP:** Das reale Produktionssystem kann bei der Modellierung von *Umfeld (PM)* und *Anwendungsszenarien (PM)* mit einbezogen werden. Mit diesem kann z. B. ein hoher Wärmeeinfluss oder die Beeinflussung der Güte des

elektrischen Versorgungsnetzes durch eine Maschine aufgedeckt werden und ist daher im *Umfeld (PM)* des Prüfmittels für **Systemprüfungen** abzubilden. Sind z. B. durch die Umweltbedingungen in der Produktion bestimmte Dinge zu beachten, kann dies in den Anwendungsszenarien als Anweisung für das Prüfpersonal dokumentiert werden. Ein Beispiel könnte z. B. sein, dass bestimmte Teile des zu prüfenden Prüflings durch das Prüfpersonal abgedeckt werden müssen, um die störende Einwirkung von Staub/Dreck usw. in der Luft auf den Prüfling zu verhindern. Durch die Situation in der realen Produktion können sich weiterhin z. B. Anwendungsszenarien zum Lagern/Puffern von Prüflingen ergeben.

- **Einfluss LQ:** Entspricht dem Einfluss LP, wobei sich dieser auf die Entwicklung von Prüfmitteln für **Modulprüfungen** bezieht.
- **Einfluss LR:** Entspricht dem Einfluss LP, wobei sich dieser auf die Entwicklung von Prüfmitteln für **Komponentenprüfungen** bezieht.
- **Einfluss DP:** In der Prüfplanung entstehen grundsätzlich die wichtigsten und in der Regel meisten Informationen, die zur Entwicklung eines Prüfmittels herangezogen werden sollen. Der Prüfplan und die NPB Anforderungsliste liefern einen wichtigen Beitrag zur Erstellung von *Umfeld (PM)*, *Anwendungsszenarien (PM)* und *Anforderungen (PM)* des Prüfmittels für **Systemprüfungen**.

In der NPB Anforderungsliste (vgl. Bild 4-13) sind *Anforderungen* an das Prüfmittel zur Prüfung des Gesamtsystems (*PM-SP*) enthalten. Diese gehen in die Anforderungsliste des zu entwickelnden Prüfmittels (*PM-SP*) ein. Ebenso gehen Prüfmerkmale aus dem Prüfplan (vgl. Bild 4-12) in die *Anforderungsliste* des Prüfmittels für das Gesamtsystems (*PM-SP*) mit ein. Prüfmerkmale sind dabei als Anforderungen an das Prüfmittel zu verstehen, welches diese Merkmale prüfen soll. Aus einem Prüfmerkmal „Motortemperatur erkennen“ würde sich so z. B. die Anforderung „Das Prüfmittel muss in der Lage sein die Erfassung der Motortemperatur zu überprüfen“ an das Prüfmittel ergeben.

Zur Erstellung des *Umfeldmodells (PM)* können aus dem Prüfplan Informationen mit einbezogen werden. Der Prüfort kann z. B. wichtige Hinweise auf dort herrschende Umweltbedingungen liefern (z. B. innen/außen, Staubbelastung, EMV, elektrische Netzbedingungen usw.).

Weiterhin können zur Erstellung der *Anwendungsszenarien (PM)* aus dem Prüfplan die Prüfmerkmale, die Grenzwerte, der Prüfumfang, der Prüfzeitpunkt und der Prüfort hinzugezogen werden. In den Anwendungsszenarien können z. B. die Prüfanweisungen für bestimmte Prüfmerkmale definiert werden.

- **Einfluss DQ:** Entspricht dem Einfluss DP, wobei sich dieser auf die Entwicklung von Prüfmitteln für **Modulprüfungen** bezieht.
- **Einfluss DR:** Entspricht dem Einfluss DP, wobei sich dieser auf die Entwicklung von Prüfmitteln für **Komponentenprüfungen** bezieht.

- **Einfluss XP:** Dieser Einfluss fasst die Einflüsse AP, IP und KP zusammen und beschreibt die kompletten Entwicklungsartefakte des Produktes (reales Produkt, Spezifikationen, usw.), die Einfluss auf das Prüfmittel für **Systemprüfungen** (PM-SP) haben (Prüfungen des gesamten Produktes).
- **Einfluss XQ:** Dieser Einfluss fasst die Einflüsse AQ, IQ und KQ zusammen und beschreibt die kompletten Entwicklungsartefakte des Produktes (reales Produkt, Spezifikationen, usw.), die Einfluss auf das Prüfmittel für **Modulprüfungen** (PM-MP) haben. Der Einfluss entspricht somit dem Einfluss XP mit dem Unterschied, dass das oder die Prüfmittel für Modulprüfungen das Ziel der Informationen ist.
- **Einfluss XR:** Dieser Einfluss fasst die Einflüsse AR, IR und KR zusammen und beschreibt die kompletten Entwicklungsartefakte des Produktes (reales Produkt, Spezifikationen, usw.), die Einfluss auf das Prüfmittel für **Komponentenprüfungen** haben. Der Einfluss entspricht somit dem Einfluss XP und XQ, mit dem Unterschied, dass das oder die Prüfmittel für Komponentenprüfungen das Ziel der Informationen ist.
- **Einfluss YP:** Dieser Einfluss fasst die Einflüsse CP, HP und LP zusammen und beschreibt die kompletten Artefakte des Produktionssystems (reales Produktionssystem, Entwicklungsunterlagen, Spezifikationen, usw.), die zur Entwicklung des Prüfmittels für **Systemprüfungen** (PM-SP) genutzt werden können.
- **Einfluss YQ:** Dieser Einfluss fasst die Einflüsse CQ, HQ und LQ zusammen und beschreibt die kompletten Artefakte des Produktionssystems (reales Produktionssystem, Entwicklungsunterlagen, Spezifikationen, usw.), die zur Entwicklung des Prüfmittels für **Modulprüfungen** (PM-MP) genutzt werden können.
- **Einfluss YR4:** Dieser Einfluss fasst die Einflüsse CR, HR und LR zusammen und beschreibt die kompletten Artefakte des Produktionssystems (reales Produktionssystem, Entwicklungsunterlagen, Spezifikationen, usw.), die zur Entwicklung des Prüfmittels für **Komponentenprüfungen** (PM-KP) genutzt werden können.

A1.4 Einfluss der Prüfmittelentwicklung auf die Entwicklungsbereiche

Im vorangegangenen Kapitel wurden u. a. die Einflüsse der *Produktentwicklung* und *Produktionssystementwicklung* auf die *Prüfmittelentwicklung* beschrieben. Umgekehrt kann die *Prüfmittelentwicklung* auch Einfluss auf die *Produktentwicklung* und *Produktionssystementwicklung* haben. In Bild A-4 sind diese Einflüsse dargestellt. Durch die Einbeziehung der Prüfmittelentwicklung wird sichergestellt, dass relevante Informationen aus der Prüfmittelentwicklung berücksichtigt werden. Grundsätzlich können von

der Prüfmittelentwicklung auch Anforderungen an das Produkt und Produktionssystem gestellt werden.

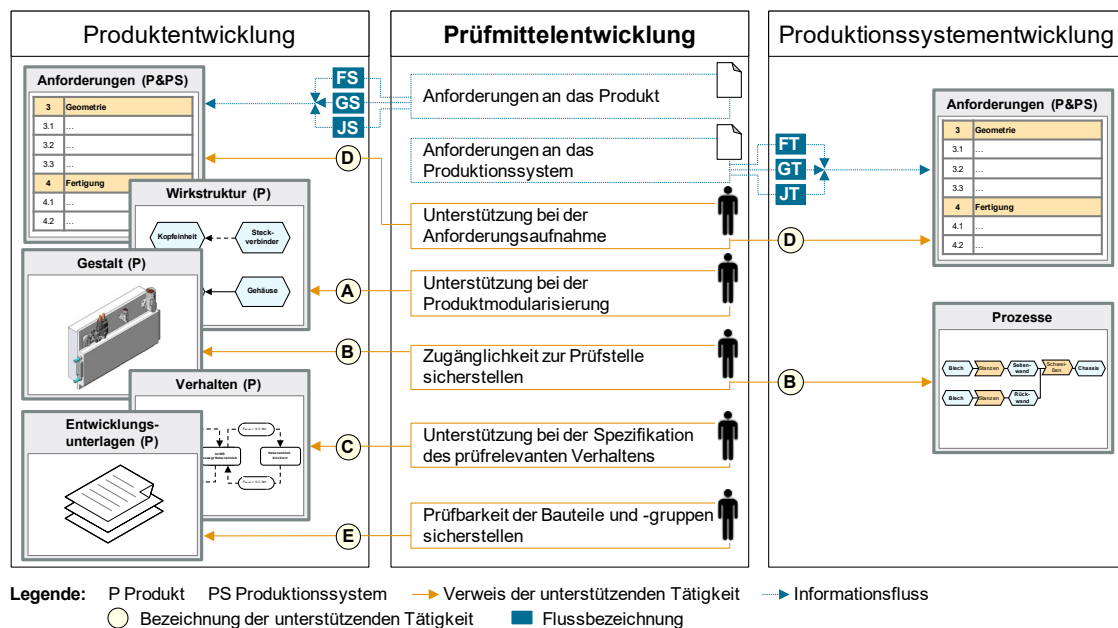


Bild A-4: Einfluss der Prüfmittelentwicklung auf die Produkt- und Produktionssystementwicklung

Nachfolgend wird der Einfluss der Prüfmittelentwicklung auf die Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung beschrieben. Es wird wieder kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben, sondern versucht die wesentlichen Einflüsse darzustellen. Es existieren dabei wieder Informationsflüsse und unterstützende Tätigkeiten:

- **Einfluss FS:** Bei der Entwicklung des Prüfmittels für **Systemprüfungen** des gesamten Produkts können Anforderungen an das zu prüfende Produkt gestellt werden. Ein Beispiel hierfür wäre eine zusätzliche oder angepasste (Daten-) Schnittstelle, die an dem mechatronischen Produkt zur Prüfung durch das Prüfmittel vorgesehen werden muss. Sensor-, Aktor- und Statusdaten können so zwischen Prüfmittel und Prüfling (Produkt) ausgetauscht werden.
- **Einfluss GS:** Bei der Entwicklung von Prüfmitteln für **Modulprüfungen** des Produktes können Anforderungen an das zu prüfende Produkt gestellt werden. Analog zu Einfluss FS könnte dies z. B. der Fall sein, wenn eine (Daten-) Schnittstelle an einem Modul erforderlich ist, um das Prüfmittel hiermit zu verbinden.
- **Einfluss JS:** Bei der Entwicklung von Prüfmitteln für **Komponentenprüfungen** des Produktes können Anforderungen an das zu prüfende Produkt gestellt werden. Ein Beispiel hierfür könnte z. B. eine selbst gefertigte Drossel (induktives Bauteil) sein. Diese soll möglichst so gestaltet sein, dass eine Kontaktierung mit der geforderten Güte einfach möglich ist. Ein weiteres Beispiel könnte ein Plati-

ne sein, bei der bestimmte Kontaktpunkte zum Aufsetzen von Prüfnadeln gefordert werden. Dazu können auch deren Zugänglichkeit und Position gehören.

Bei den Einflüssen *FS*, *GS* und *JS* kann allgemein auf das prüfgerechte Design/Design for testability/prüfgerechte Produktgestaltung aus Kapitel 2.4.2 und Kapitel 2.4.3 verwiesen werden.

- **Einfluss FT:** An das Produktionssystem können Anforderungen seitens des Prüfmittels für **Systemprüfungen** gestellt werden. Beispiele hierfür wären z. B. ein bereitzustellender Netzanschluss für das Prüfmittel, eine Pufferzone für Prüflinge oder die Anbindung an ein Transportsystem.
- **Einfluss GT:** An das Produktionssystem können Anforderungen seitens der Entwicklung von Prüfmitteln für **Modulprüfungen** gestellt werden, wenn dies notwendig ist. Ein Beispiel kann bei einer In-Line-Prüfung eine Befestigungsmöglichkeit sein, die beim Produktionssystem zur Befestigung des Prüfmittels in einer Anlage vorzusehen ist. Ebenso kann dazu der Platzbedarf vorgesehen werden.
- **Einfluss JT:** An das Produktionssystem können Anforderungen seitens des Prüfmittels für **Komponentenprüfungen** gestellt werden, wenn dies notwendig ist. Beispielsweise können entsprechende Beleuchtungsverhältnisse bei der Prüfung von Lichtschranken gefordert werden oder bestimmte klimatische Bedingungen bei der Prüfung von bestimmten Sensoren, um gleichbleibende Verhältnisse und somit vergleichbare Ergebnisse zu erzielen.
- **Einfluss A:** Die Prüfmittelentwicklung soll die Produktentwicklung bei der Festlegung der Modulgrenzen des mechatronischen Systems unterstützen, so dass die einzelnen Module als Einheit geprüft werden können. Ein Beispiel für eine unterstützende Tätigkeit bei der Festlegung von Modulgrenzen bzw. Schnittstellen ist bei dem Beispiel der Schnittstellen erläutert (vgl. Lichtschrankenbeispiel in 4.2.2.2 und Bild 4-7).
- **Einfluss B:** Insbesondere bei gestaltbehafteten Systemelementen soll seitens der Prüfmittelentwicklung sichergestellt werden, dass alle Prüfmerkmale bzw. die zur Prüfung dieser notwendigen Schnittstellen (in diesem Zusammenhang wird auch von Prüfstellen gesprochen) des mechatronischen Produktes gut zugänglich sind. Es wird also Einfluss auf den Produktaufbau/Produktstruktur/Gestalt und die Montagereihenfolge genommen. Aufgrund der Zugänglichkeit kann sich eine alternative Montagereihenfolge ergeben. Zum Beispiel kann aufgrund der durchzuführenden Prüfungen die Montage eines Gehäuseteils zu einem späteren Zeitpunkt vorgesehen werden.
- **Einfluss C:** Bei der Definition des Produktverhaltens soll die Prüfmittelentwicklung einbezogen werden. Beispiele für prüfrelevantes Verhalten sind z. B. die Abfrage der Softwareversion, die gezielte Ansteuerung von Aktoren für Prüf-

zwecke oder das Auslesen von Sensordaten des Produktes durch das Prüfmittel (vgl. auch Kapitel 2.4.2).

- **Einflüsse D:** Die Prüfmittelentwicklung kann bei der Aufnahme der von ihr gestellten Anforderungen an das Produkt und Produktionssystem hinzugezogen werden. Anforderungen können so besser erläutert bzw. deren Bedeutung kommuniziert werden.
- **Einfluss E:** Zur Gewährleistung der Prüfbarkeit von Bauteilen und -gruppen soll die Prüfmittelentwicklung in die Tätigkeiten der Produktentwicklung einbezogen werden und Einfluss auf die entsprechenden Entwicklungsunterlagen nehmen.

A2 Angepasste Prozess-FMEA zur Festlegung von Prüfmerkmalen

Allgemein ist eine FMEA (Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse) eine Methode des Qualitätsmanagements, mit dem Ziel, vorbeugend System- und Risikoanalysen bei der Untersuchung von Produkten und Prozessen durchzuführen. Es wird dabei systematisch vorgegangen und ein System hinsichtlich möglicher Fehlzustandsarten, ihren Ursachen und Auswirkungen analysiert. Durch die FMEA können Schwachstellen aufgedeckt sowie Maßnahmen eingeleitet und Risiken bewertet werden. Grundsätzlich erfolgt die FMEA präventiv bzw. vorzugsweise im frühen Entwicklungszyklus. Das Ziel der Durchführung einer FMEA ist es, potentielle Produkt- und Prozessfehler bei der Entwicklung eines Produktes bzw. bei (neuen) Fertigungsverfahren/Prozessen bereits während der Planung zu vermeiden. [SP15, S. 559 ff.], [DIN60812], [DGQ12]

Eine Prozess-FMEA wird oft im Zuge einer Prüfplanung genutzt, um Prüfmerkmale zu identifizieren (vgl. Bild 2-18). Zur Durchführung der Prozess-FMEA wird dazu der Fertigungsprozess analysiert. Daraus leiten sich dann die Prüfmerkmale ab. Die ermittelten Prüfmerkmale stellen Eigenschaften des Produktes dar.

Hauptgrund für Prüfungen in der Fertigung sind unsichere Prozesse. Idealerweise wären alle Prozessfähigkeiten bzw. Unsicherheiten mit ihren Auswirkungen in der Fertigung bekannt. Daraus würden dann die Prüfmerkmale abgeleitet. Eine gute Produktqualität wäre somit sichergestellt.

Da es insbesondere bei neuen Produkten/Technologien/Fertigungsverfahren usw. vorkommen kann, dass Fertigungsunsicherheiten nicht oder nur unzureichend bekannt sind (mangelndes Erfahrungswissen bzw. nicht ausreichende Kreativität zur Antizipierung), werden nicht immer alle möglichen Fehlerquellen berücksichtigt. Die Folge aus Sicht der Prüfplanung ist, dass daraus keine Prüfmerkmale abgeleitet werden können. Es kann also dazu kommen, dass wichtige Prüfmerkmale übersehen werden.

Daher kann das Produktkonzept hinzugezogen werden. Alle potentiellen Prüfmerkmale (entsprechende Eigenschaften des Produktes), die aus dem Produktkonzept resultieren (vgl. Kapitel 4.2.4.4 bzw. 4.2.4.6), sind grundsätzlich die gleichen Prüfmerkmale, wie sie über die Prozess-FMEA gefunden werden können.

Weiterhin ist es sinnvoll die potentiellen Prüfmerkmale bzw. die daraus ausgewählten Prüfmerkmale mit dem Fertigungsprozess zu verbinden. Also eine Zuordnung durchzuführen, die die Verbindung zwischen den Prüfmerkmalen aus dem Produktkonzept und den Ursachen bzw. den Fertigungsunsicherheiten in der Fertigung herstellt.

Ausgehend von diesen Überlegungen kann eine angepasste Prozess-FMEA genutzt werden, die die Verbindung zwischen Prüfmerkmalen, die aus der Prozessbetrachtung folgen und Prüfmerkmalen die dem Produktkonzept folgen, herstellt. Die Zuordnung geschieht dabei über die Systemelemente.

Zunächst werden alle potentiellen Prüfmerkmale und zugehörigen Systemelemente aus dem Prüfplan in die Prozess-FMEA übernommen (vgl. Bild A-5). Anschließend werden

die beteiligten Produktionsprozesse aus dem Partialmodell *Prozesse* (vgl. Flussbezeichnung *CO*) und die potentiell auftretenden Fehlerursachen den Systemelementen zugeordnet. Im Anschluss werden die potentiellen Fehler für das Systemelement und die Fehlerfolge (auch für das Gesamtsystem) bestimmt. Es können nun die Bewertungen von Bedeutung, Auftretenswahrscheinlichkeit und Entdeckungswahrscheinlichkeit durchgeführt werden. Dazu können Entwicklungsunterlagen des Produktionssystems (PS) wie z. B. Wertschöpfungsstufen, Kostenstrukturen und -daten herangezogen werden sowie prüfrelevante Unterlagen (*BM*) wie ggf. vorhandene Produkt-FMEA, Prüfpläne ähnlicher Produkte, Reklamations- und Schadensberichte ähnlicher Produkte. Zudem kann das reale Produktionssystem herangezogen werden.

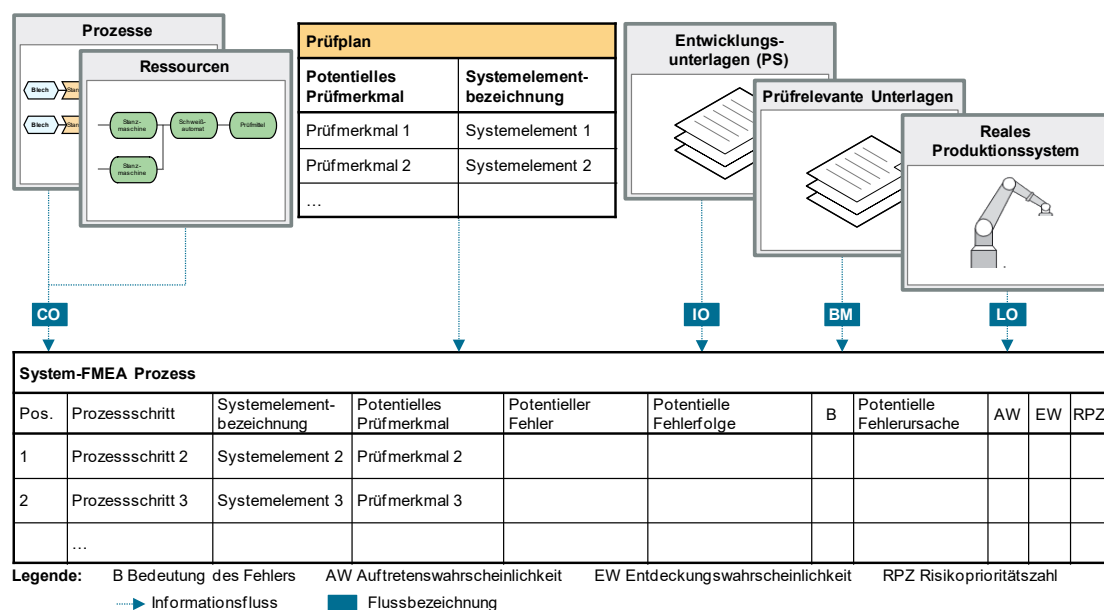


Bild A-5: Angepasste Prozess-FMEA in Anlehnung an [SP15, S. 559ff.]

Sind die Einträge in den beschriebenen Spalten gefüllt, können Bedeutung, Auftretenswahrscheinlichkeit und Entdeckungswahrscheinlichkeit mit Zahlen von 1 bis 10 bewertet werden. Eine 1 steht für eine geringe Bedeutung, eine 10 für eine hohe Bedeutung des Fehlers. Dies gilt ebenso für die Auftretenswahrscheinlichkeit. Bei der Entdeckungswahrscheinlichkeit wird eine hohe Entdeckungswahrscheinlichkeit mit 1 bewertet und eine niedrige mit 10. Nach Vergabe der einzelnen Bewertungen werden diese miteinander multipliziert und somit die Risikoprioritätszahl ermittelt.

Hinsichtlich der Prüfmerkmale sollte die Festlegung der zu prüfenden Prüfmerkmale nicht nur auf die einzelnen Werte der Risikoprioritätszahl gestützt werden. Auch die Kombination der Bewertungskriterien sollte betrachtet werden. So kann ein Prüfmerkmal z. B. die Entdeckungswahrscheinlichkeit deutlich erhöhen.

Durch die Prozess-FMEA dürfte eigentlich kein Fehler gefunden werden, der nicht schon vorher durch die potentiellen Prüfmerkmale (abgeleitet aus den Produktdaten) bekannt war. Die Verknüpfung ist über die Zuordnung in Bild A-5 gegeben.

A3 Alternative Verzahnung der V-Modelle von Produkt und Prüfmittel

In Bild A-6 ist ein grundsätzlich anderer Ablauf des beschriebenen integrativen Entwicklungsprozesses zur integrativen Entwicklung von Produkt und Prüfmittel dargestellt. Im Vergleich zu dem in Bild 4-4 dargestellten Prozess werden die Produktentwicklung und Prüfmittelentwicklung im „echten“ Wechselspiel betrieben.

In Bild 4-4 fährt die Produktentwicklung immer mit der Produktentwicklung fort, es wird also ein komplettes V-Modell nach dem nächsten durchlaufen. An bestimmten Absprungpunkten/Absprunghöhen (einmal pro V-Modell des Produktes möglich bzw. sinnvoll) wird dann von der Produktentwicklung in die Prüfmittelentwicklung gesprungen, z. B. nach der Produktkonzipierung auf Systemebene (vgl. erster Durchlauf in Bild 4-4). Zu Beginn des nächsten kompletten V-Modells der Produktentwicklung werden dann die Anforderungen der Prüfmittelentwicklung wieder mit in die Produktentwicklung aufgenommen. Die Produktentwicklung wird also nie wirklich „angehalten“.

In dem in Bild A-6 gezeigten Vorgehen wird zunächst die Produktentwicklung auf Systemebene durchgeführt. Danach wird nicht mit der Konzipierung des Produktes fortgefahren. Es wird die Konzipierung des Prüfmittels auf Systemebene durchgeführt. Produktentwicklung und Prüfmittelentwicklung stimmen sich dabei kontinuierlich ab. Danach ist der erste Meilenstein *M1* erreicht.

Zusammen mit den Anforderungen aus der Prüfmittelentwicklung an das Produkt, wird mit der Produktentwicklung wieder begonnen. Das bereits erstellte Produktkonzept auf Systemebene wird überarbeitet. Aufbauend darauf wird mit der Produktentwicklung auf Modulebene begonnen. Ausgehend davon wird wieder mit der Prüfmittelentwicklung begonnen usw.

Es wird also nicht, wie in Bild 4-4 dargestellt, parallel gearbeitet sondern im Wechselspiel. Die grundsätzlichen Informationsflüsse, Möglichkeiten der Absprungpunkte usw. ändern sich im Vergleich zu Bild 4-4 nicht.

Der Nachteil bei dem Vorgehen im Wechselspiel kann sein, dass die Produktentwicklung zu lange aufgehalten wird – während der Arbeit der Prüfmittelentwicklung.

Denkbar ist auch eine Kombination von dem Vorgehen in Bild A-6 und dem in Bild 4-4 gezeigten Vorgehen. Zum Beispiel wäre denkbar bis zu *M2* des in Bild A-6 dargestellten Vorgehens im Wechselspiel zu arbeiten (oder noch mehrere Wechselspiele) und danach wie in Bild 4-4 dargestellt fortzufahren.

Es wäre auch denkbar in diesem Fall den Anfang agil auszuprägen.

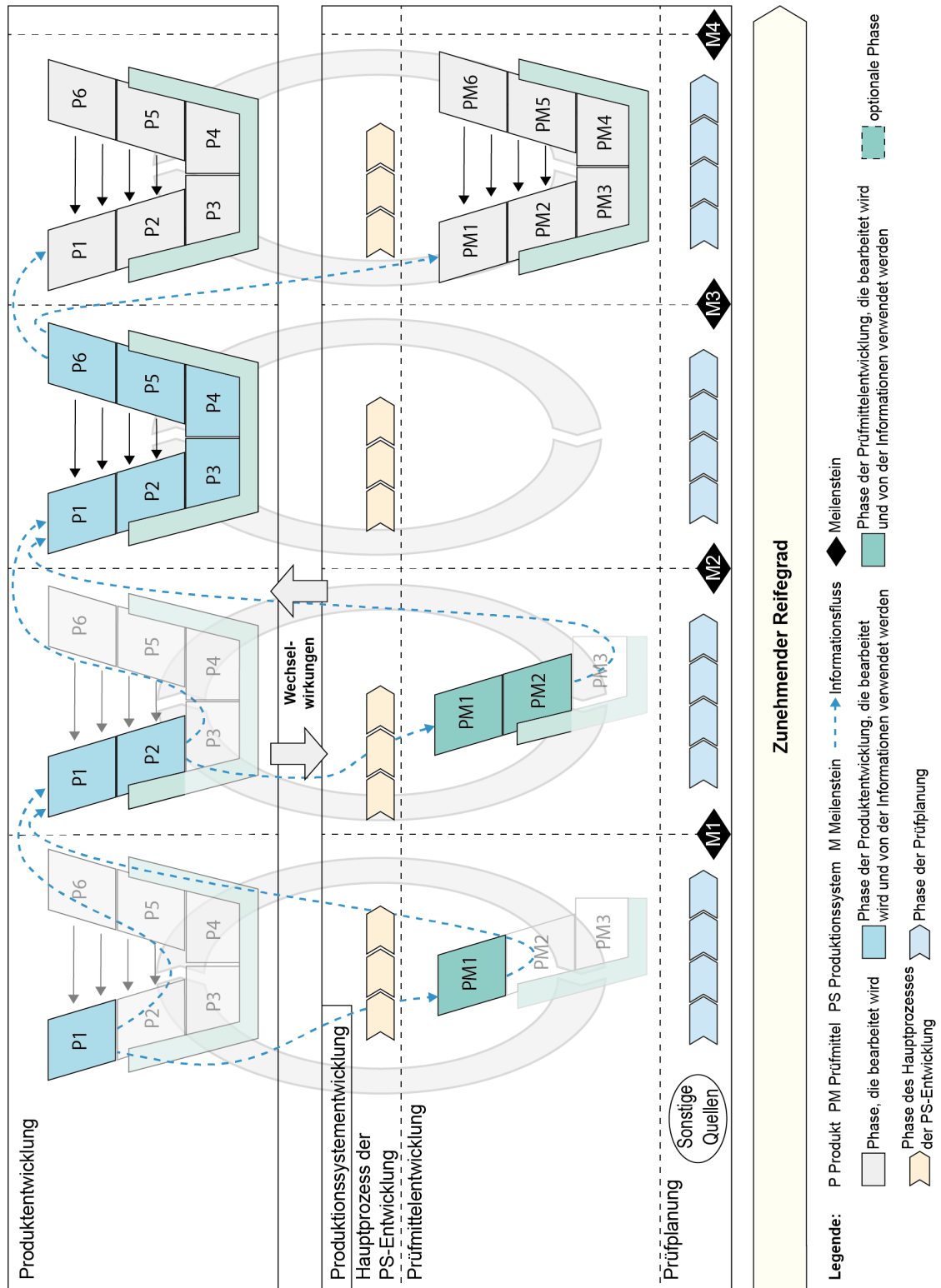


Bild A-6: Alternatives Vorgehen zur integrativen Entwicklung von Produkt und Prüfmittel – alternative Verzahnung der V-Modelle von Produkt und Prüfmittel

A4 Ergänzende Informationen zum Anwendungsbeispiel

Nachfolgend sind die Module des Prüfmittels einzeln dargestellt, die in der Wirkstruktur auf Systemebene in Bild 5-24 zu erkennen sind.

In Bild A-7 ist das Modul *Funktions- und Leistungsprüfung – Schaltschrank* dargestellt. In ihm sind auch die Widerstände aus dem Morphologischen Kasten (Funktion 1.1.2.2.1) zur Überprüfung der Motortemperaturwertverarbeitung enthalten. Diese bilden dabei die Temperatursensoren der Nebenantriebe nach und damit die Informationsflüsse *Temperaturwert* in den Umfeldmodellen und Wirkstrukturen im Anwendungsbeispiel (vgl.: Umfeldmodell des ImWR – Bild 5-5; Wirkstruktur des ImWR Systemebene – Bild 5-8; Umfeldmodell des Prüfmittels – Bild 5-16; Wirkstruktur des Prüfmittels auf Systemebene – Bild 5-24). Der Informationsfluss *Temperaturwert* geht dabei von dem Systemelement *Satz Widerstände* in dem Modul *FT- und Leistungsprüfung – Schaltschrank* aus. Auf Systemebene (Bild 5-24) verläuft dieser über den Prüfadapter (Tablettwagen) zum ImWR (Prüfling) und bildet somit die Temperaturwerte der im Betrieb angeschlossenen Motore (Nebenantriebe) nach.

Zur besseren/intuitiven Lesbarkeit sind im Anwendungsbeispiel die einzelnen Systemelemente mit je einem Piktogramm versehen worden. Exemplarisch ist dies anhand der Widerstände zur Nachbildung der Temperaturwerte in Bild A-7 dargestellt.

In Bild A-8 ist das Modul *HV-Prüfung* dargestellt.

In Bild A-9 ist das Modul *Steuerungsrechner* dargestellt. In diesem Modul sind die beiden Lösungselemente *Ethernetschnittstelle* und *Software* blau mittels eines Ovals gekennzeichnet, die die Funktion 1.1.1.2.3 des Morphologischen Kastens erfüllen (vgl. Bild 5-23).

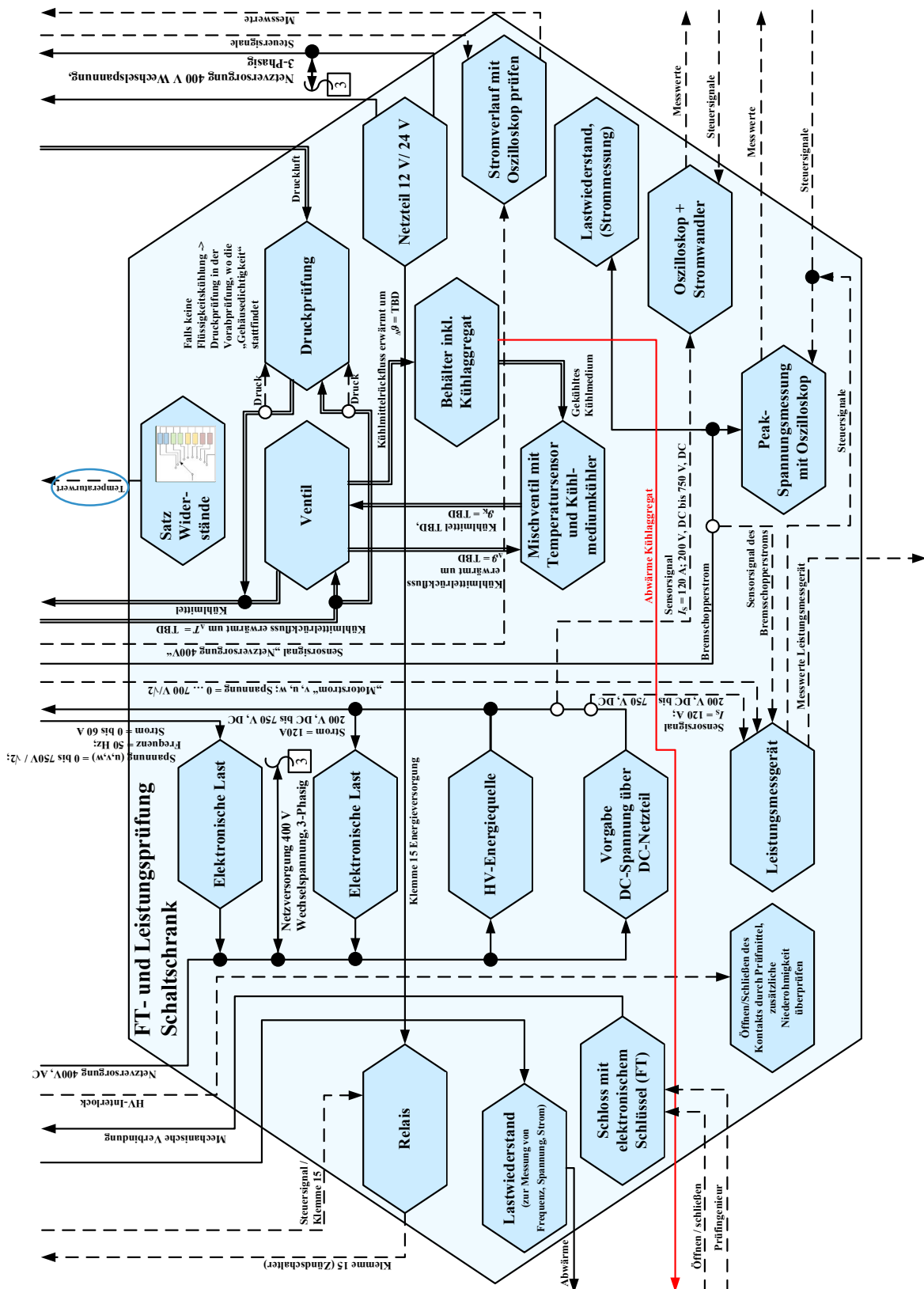


Bild A-7: Wirkstruktur des Moduls Funktions- und Leistungsprüfung – Schaltschrank

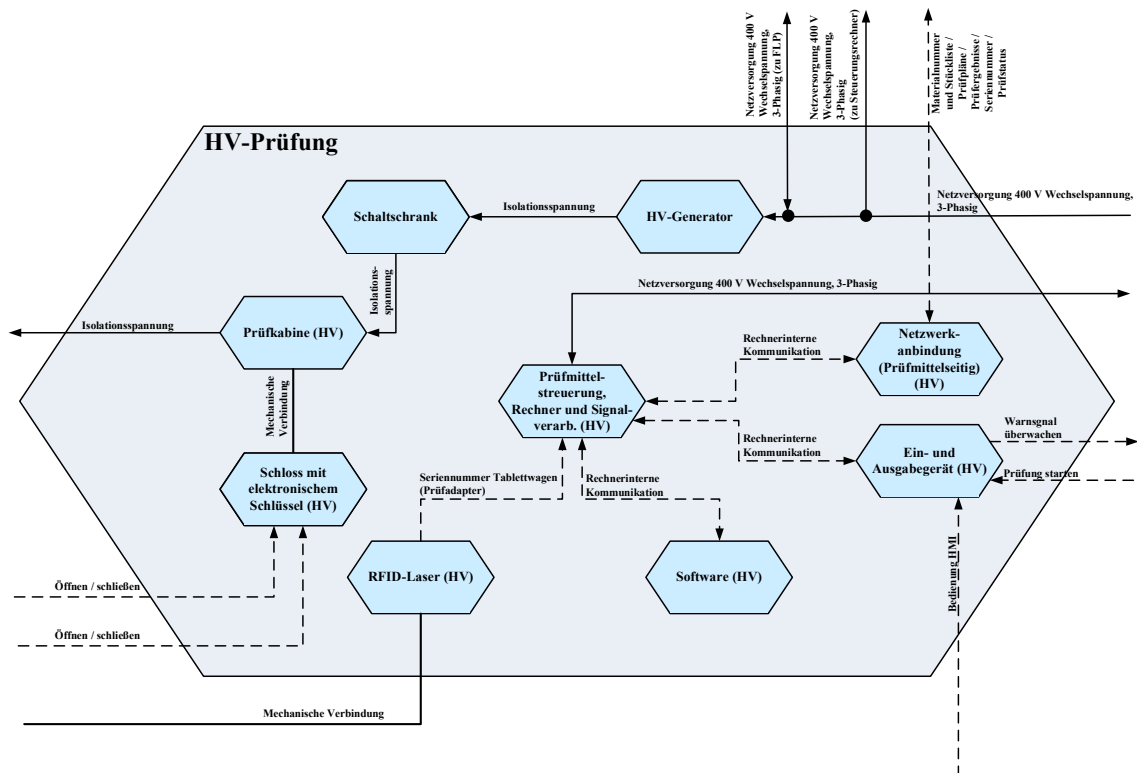


Bild A-8: Wirkstruktur des Moduls HV-Prüfung

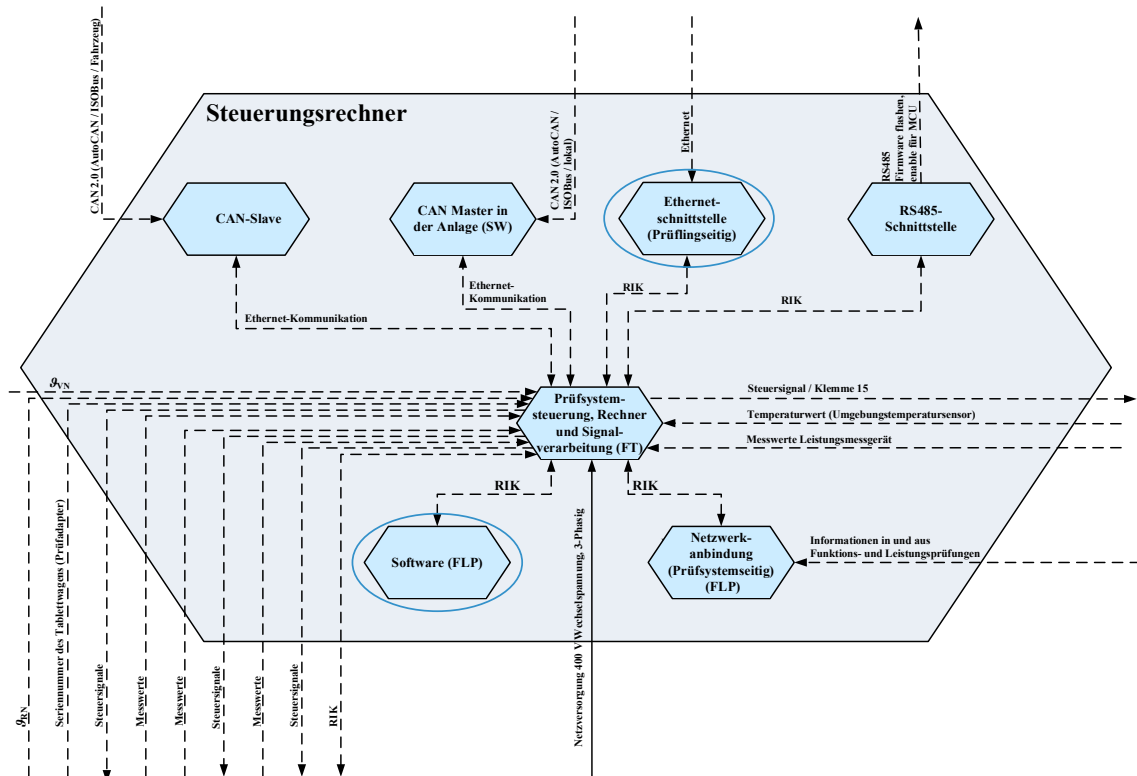


Bild A-9: Wirkstruktur des Moduls Steuerungsrechner

A5 Grundprinzip des Gesamtverfahrens in abstrahierter und komprimierter Form

Nachfolgend wird auf einer höheren Abstraktionsebene das Grundprinzip des Gesamtverfahrens komprimiert beschrieben. Auch ohne die Verwendung des V-Modells lässt sich so in groben Zügen der Prozess der Systematik nutzen.

Grobes Gesamtverfahren

Das 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung nach GAUSEMEIER (Bild 2-5) bildet weiterhin das Rahmenwerk. Dieses beschreibt den Prozess von der Produkt- bzw. der Geschäftsidee bis zum Serienanlauf von mechatronischen Systemen. Im 3-Zyklen-Modell wird die Produktentwicklung dem zweiten Zyklus zugeordnet. Dem dritten Zyklus werden die Produktionssystementwicklung mit der zugehörigen Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung zugeordnet. Die im 3-Zyklen-Modell beschriebene integrative Entwicklung des zweiten und dritten Zyklus wird weiter vertieft, insbesondere in Hinblick auf die Integration der Entwicklung des Prüfmittels und der zugehörigen Prüfplanung.

Die integrative Konzipierung von Produkt- und Produktionssystem, zu dem auch das Prüfmittel mit der zugehörigen Prüfplanung zählt, verfolgt dabei weiterhin folgende Ziele:

- frühzeitige Einbindung der Prüfplanung und Prüfmittelentwicklung in den Produktentstehungsprozess, um:
 - die Anzahl aufwändiger Iterationen im Entwicklungsprozess zu reduzieren
 - damit Kosten zu senken
 - das Prüfmittel zum Fertigungsbeginn (SOP) zu einem möglichst hohen Reifegrad zur Verfügung stehen zu haben
- Rückspielung von Anforderungen aus der Prüfmittelentwicklung zu den beteiligten Funktionsbereichen (insbesondere in die Produktentwicklung)
- Rückverfolgbarkeit insbesondere der Anforderungen an das Prüfmittel (PM) durch den gesamten Produktentstehungsprozess
- Berücksichtigung der Modularität des Produktes bei der Strukturierung des Prüfmittels
- Modularisierung des Prüfmittels, um Erweiterbarkeit des Prüfmittels (z. B. Durchsatz) und länderspezifische Anpassungen (andere Varianten) des Prüfmittels zu ermöglichen
- Strukturierung des Produktes, um eine möglichst gute Prüfbarkeit sicherzustellen

Es handelt sich bei der beschriebenen Vorgehensweise um ein zyklisches Vorgehen, welches sich an den Zyklen des V-Modells der Produktentwicklung und den dadurch

entstehenden Prototypen (Labormuster, Funktionsmuster, Vorserienprodukt, usw.) orientiert. In Bild A-10 ist das Vorgehen vereinfacht aus Sicht der Prüfmittelentwicklung dargestellt.

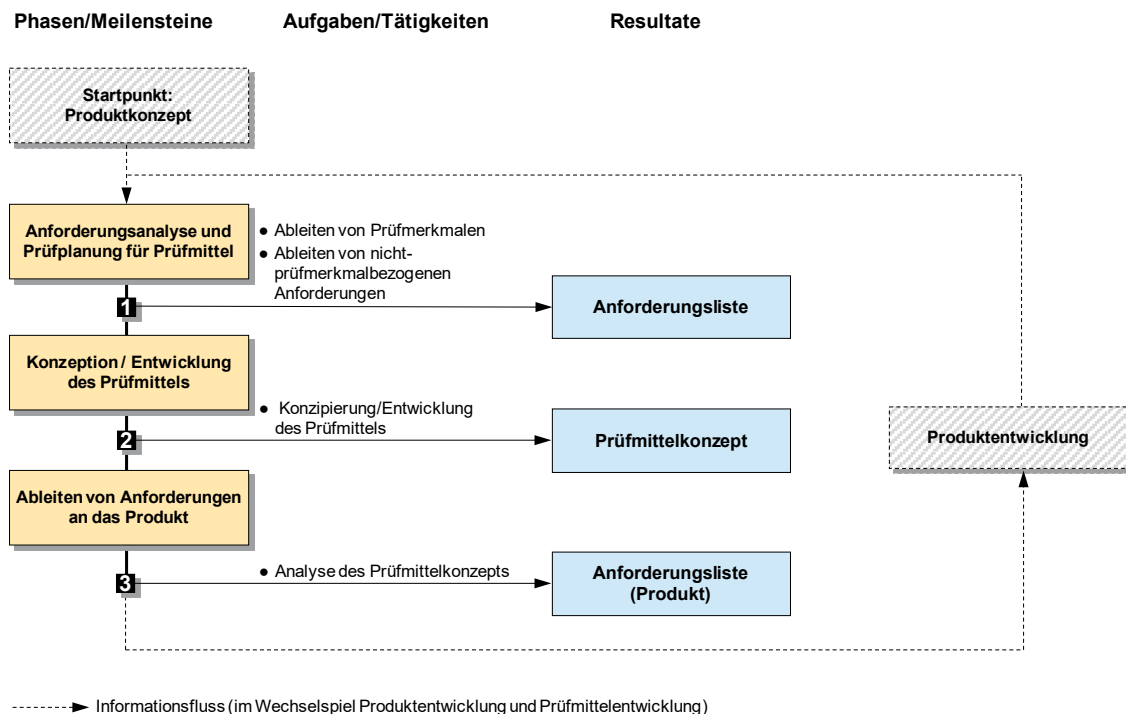


Bild A-10: Grobes Gesamtverfahren zur integrativen Produkt- und Prüfmittelentwicklung aus Sicht der Prüfmittelentwicklung

Startpunkt ist die initiale *Produktkonzipierung*. Bei dieser können bereits die Fachleute aus der Prüfmittelentwicklung und Prüfplanung mit einbezogen werden, um bei der Produktkonzipierung grobe Fehler hinsichtlich der Prüfbarkeit des Produktes zu vermeiden. Auch kann so auf eine prüfgerechte Gestaltung geachtet werden. Es wird dabei vorgeschlagen das initiale Produktkonzept mit der Spezifikationstechnik CONSENS zu beschreiben.

Die Spezifikation aus der Produktkonzipierung wird in der Phase *Anforderungsanalyse und Prüfplanung für Prüfmittel* zusammen mit weiteren im Produktentstehungsprozess auftretenden Informationen analysiert. Daraus werden Anforderungen an das Prüfmittel abgeleitet. Diese weiteren Informationen werden dazu zunächst identifiziert. Die Anforderungen an das Prüfmittel bestehen dabei aus einer Auflistung von Prüfmerkmalen und nichtprüfmerkmalbezogenen Anforderungen (NPB Anforderungen). NPB Anforderungen sind dabei Anforderungen an das oder die Prüfmittel, die nicht aus einem Prüfmerkmal hervorgehen, bzw. sich nicht auf ein Prüfmerkmal beziehen. Beispiel für eine NPB Anforderung wäre z. B. die Anforderung, dass das Prüfmittel in der Lage sein muss einen bestimmten Durchsatz pro Zeiteinheit zu prüfen. Prüfmerkmale können im Sinne der Prüfmittelentwicklung als Anforderungen an das bzw. die Prüfmittel interpretiert werden. Wenn das Prüfmerkmal z. B. eine zu prüfende Länge eines Bauteils ist,

lautet die Anforderung dazu „Das/die Prüfmittel muss/müssen in der Lage sein die Länge des Bauteils zu überprüfen“.

In der Phase *Konzeption/Entwicklung des Prüfmittels* werden ein oder ggf. mehrere anforderungsgerechte Prüfmittel konzipiert bzw. entwickelt. Dabei werden zur Konzipierung des Prüfmittels die ermittelten Anforderungen und zusätzlich auch die Modelle des Produktes zur Hilfe genommen (Partialmodelle der Spezifikationstechnik CONSENS des Produktes). Das Vorgehen bei der Konzipierung des Prüfmittels entspricht dabei in weiten Teilen der eines Produktes mit Hilfe der Spezifikationstechnik CONSENS (ein Prüfmittel kann bei einer Neuentwicklung auch als Produkt aufgefasst werden). In dieser Phase der Konzipierung des Prüfmittels wird ebenfalls die Strukturierung des Prüfmittels vorgenommen. Dabei kann es sinnvoll sein das Prüfmittel selbst zu modularisieren. Gründe dafür können z. B. sein: das Prüfmittel auf die Produktstruktur mit mehreren (vielleicht in Zukunft geplanten) Varianten anzupassen, die ggf. an unterschiedlichen Standorten produziert und geprüft werden sollen; oder das Prüfmittel so auszulegen, dass es für ggf. steigende Stückzahlen erweitert werden kann; oder eine Auslegung derart, dass das Prüfmittel mit geringem Aufwand für andere Standorte/Länder angepasst werden kann.

Es wird bei dieser Prüfmittelkonzipierung darauf geachtet, ein Konzept zu erarbeiten, welches konsistent zum Produktkonzept und der restlichen Produktionsplanung ist. Ziel ist es dabei ein Konzept zu erarbeiten, das so wenig wie möglich Anforderungen an andere Unternehmens- bzw. Funktionsbereiche, insbesondere die Produktentwicklung (an das Produkt), stellt.

Im Prozessschritt *Ableiten von Anforderungen an das Produkt* wird das Prüfmittelkonzept hinsichtlich Anforderungen analysiert, die sich an andere Funktionsbereiche, insbesondere aber die Produktentwicklung, ergeben. Eine Anforderung des Prüfmittels an das Produkt wäre beispielsweise „Das Produkt muss einen internen Speicherplatz besitzen, der die Statusdaten des Produktes speichert (Konfiguration, Versionsnummer, Seriennummer, Status der bisherigen Prüfungen, usw.)“. Diese Anforderung wäre z. B. notwendig, damit das Prüfmittel selbstständig das geeignete Prüfprogramm aufrufen kann. Diese Anforderungen werden zurück an die Produktentwicklung und die weiteren Funktionsbereiche gespielt.

Mit den Anforderungen aus der Prüfmittelentwicklung und weiteren Anforderungen an das Produkt, die sich aus dem restlichen Produktentstehungsprozess ergeben, wird die Phase der *Produktentwicklung* begonnen und somit ein neuer V-Modell-Produktentwicklungszyklus gestartet. Damit startet auch das gesamte Vorgehen erneut. Ausgehend von der *Produktentwicklung* werden wieder Anforderungen an die Prüfmittelentwicklung abgeleitet usw. Mit jedem Durchlauf des Gesamtverfahrens aus Bild A-10 wird ein V-Modell des Produktes durchlaufen. Ein V-Modell des Prüfmittels wird dabei Stück für Stück durchlaufen, so dass der Reifegrad des Prüfmittels mit der Anzahl der Durchläufe steigt und am Ende der Produktentstehung ein V-Modell für das Prüfmittel durchlaufen ist. Dieser Prozess wird in Kapitel 4.1.4 im Überblick und in

Kapitel 4.2 detailliert beschrieben, wobei das Hauptaugenmerk auf der Konzeption, also jeweils der frühen Phase eines Durchlaufes, liegt.

Ermittlung und Synchronisation der Anforderungen an das Prüfmittel

Anforderungen an das Prüfmittel können aus verschiedenen Funktionsbereichen des Unternehmens abgeleitet werden. Dazu zählen insbesondere die Produktentwicklung (Produktkonzept) aber auch die Produktion (Produktionssystemkonzept) sowie weitere Funktionsbereiche. Auf Basis der frühzeitigen Spezifikation des Produktes und des Produktionssystems können erste Anforderungen an das Prüfmittel abgeleitet werden (vgl. Bild A-11 oben).

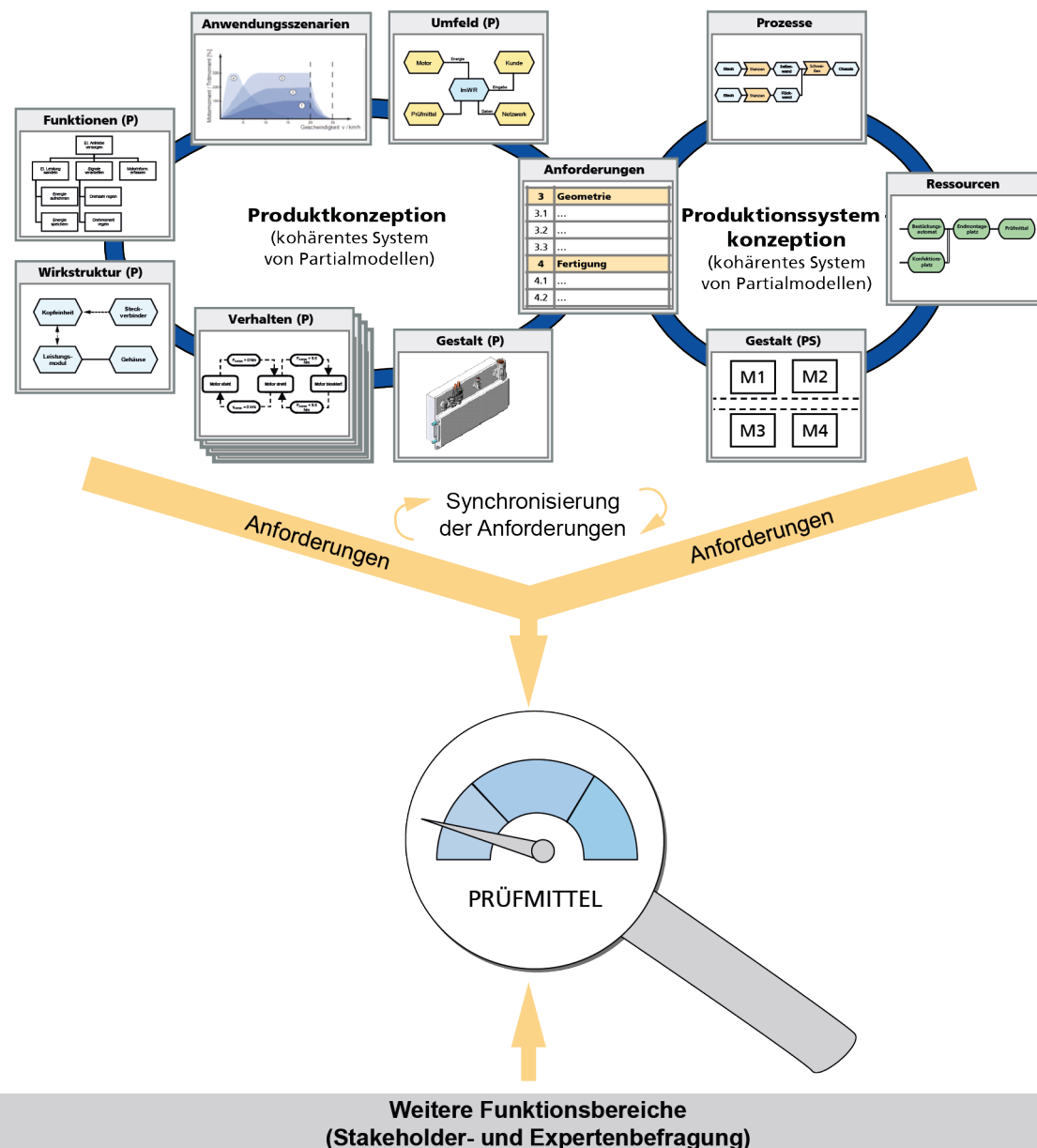


Bild A-11: Frühzeitige Informationsquellen für Anforderungen an das Prüfmittel

Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf den Prüfmerkmalen. Prüfmerkmale sind dabei als eine Teilmenge der Anforderungen an das Prüfmittel zu verstehen. Aus dem Produktkonzept werden zunächst potentielle Prüfmerkmale abgeleitet. Alle prüfbareren Eigenschaften des Produktes, die nicht ausschließlich durch Software realisiert sind, sind zunächst potentielle Prüfmerkmale (vgl. Fußnote 22). Aus diesen potentiellen Prüfmerkmalen werden Prüfmerkmale ausgewählt. Ein wesentliches Kriterium ist dabei die Prozesssicherheit in der Fertigung bezüglich des jeweiligen Prüfmerkmals. Ist auszuschließen, dass eine Eigenschaft des Produktes in der Fertigung durch einen unsicheren Fertigungsprozess negativ beeinflusst wird, braucht das entsprechende potentielle Prüfmerkmal nicht geprüft werden. Ebenfalls können Prüfmerkmale aus dem Fertigungskonzept abgeleitet werden. Oftmals sind diese Prüfmerkmale schon durch die Ableitung der potentiellen Prüfmerkmale aus dem Produktkonzept mit abgedeckt. Durch diese Betrachtung werden die potentiellen Prüfmerkmale identifiziert, die auf jeden Fall zu Prüfmerkmalen werden. Die Synchronisation zwischen den Merkmalen, die aus der Produktentwicklung und der Fertigungsplanung abgeleitet werden, werden in dieser Entwicklungssystematik hergestellt, so dass die Quellen der Prüfmerkmale zurückverfolgt werden können. Weitere Informationsquellen für Anforderungen an das Prüfmittel bilden Stakeholder und Experten, die hinsichtlich Anforderungen befragt werden.

Es ergeben sich zwei Vorteile zunächst mit potentiellen Prüfmerkmalen zu arbeiten. Zum einen können so Prüfmerkmale identifiziert werden, die ggf. durch die reine Analyse des Fertigungskonzeptes nicht gefunden werden. Zum anderen kann man, vor allem beim Fertigungsanlauf bei neuen Produkten oder mit neuen Fertigungstechnologien, zunächst bewusst mehr Produkteigenschaften prüfen. Nach dem Sammeln von Erfahrungen über die Prozesssicherheit der Produktionsprozesse können dann ggf. die Prüfmerkmale reduziert werden bzw. manche Prüfmerkmale nur noch stichprobenartig geprüft werden. Eine Kostenreduktion kann so erreicht werden. Die schrittweise Reduktion der Prüfmerkmale nach dem Fertigungsanlauf entspricht oftmals gängiger Praxis in der Industrie.