

Dipl.-Ing. Hans Peter Schnöll

INTEGRIERTE PRODUKTENTSTEHUNG

Ein Vorgehensmodell zur kontextspezifischen Gestaltung des
Produktentstehungsprozesses von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der
TECHNISCHEN UNIVERSITÄT GRAZ
Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften



Betreuer und Erstgutachter:
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Ramsauer

Zweitgutachter:
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Hubert Biedermann

Graz, November 2015

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

Hans Peter Schnöll

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Universitätsassistent am Institut für Industriebetriebslehre und Innovationsforschung an der Technischen Universität Graz. Mein besonderer Dank gilt Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Ramsauer für die Betreuung und Erstbegutachtung der Arbeit, die gebotenen Entfaltungsmöglichkeiten am Institut sowie die tatkräftige Unterstützung im Verlauf des Doktoratsstudiums.

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Hubert Biedermann danke ich für die Übernahme der Zweitbegutachtung.

Großer Dank richtet sich an alle Kolleginnen und Kollegen an den Instituten für Industriebetriebslehre und Innovationsforschung sowie Production Science and Management. Die konstruktive und freundschaftliche Zusammenarbeit in Projekten, Lehre und Forschung waren die Basis für den erfolgreichen Abschluss des Dissertationsvorhabens.

Weiterer Dank gilt dem Kooperationspartner. Der gewonnene Einblick in die betriebliche Praxis sowie die Evaluierung des entwickelten Vorgehensmodells durch die konstruktiven und fruchtbaren Diskussionen mit Experten beim Kooperationspartner lieferten einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis der Thematik und Fortschritt der Arbeit.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern Birgit und Hans-Peter, sowie Elisabeth, für die bedingungslose Unterstützung und Förderung im Verlauf der Umsetzung dieser Arbeit.

Graz, im November 2015

Hans Peter Schnöll

Kurzfassung

Der Produktentstehungsprozess (PEP) von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen ist wesentlich geprägt durch die intensiven Wechselbeziehungen der eingesetzten Materialien, der Bauteilgestaltung sowie des Herstellungsverfahrens. Die daraus resultierende Komplexität stellt besondere Herausforderungen an die Gestaltung eines effizienten und effektiven Produktentstehungsprozesses. Konzepte der Integrierten Produktentstehung stellen ein Rahmenwerk zur Beherrschung dieser Komplexität bereit. Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel der Entwicklung einer Unterstützung zur kontextspezifischen Gestaltung des Produktentstehungsprozesses von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen (FVK) unter den Aspekten einer Integrierten Produktentstehung.

In einem ersten Schritt erfolgt die Darstellung der Grundlagen der Integrierten Produktentstehung, der Produktentstehung von Komponenten aus Faserverbundkunststoffen sowie des Leichtbaus als Hauptmotivation des Einsatzes von Faserverbundkunststoffen. Im Rahmen der Analyse eines industriellen Fallbeispiels werden die identifizierten Defizite und Herausforderungen einer Integration des Produktentstehungsprozesses auf ihre Praxisrelevanz geprüft und ergänzt. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse erfolgt die Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Unterstützung der Bewältigung festgestellter Herausforderungen.

Das entwickelte Vorgehensmodell verfolgt das primäre Ziel der Sicherstellung von Effektivität und Effizienz im PEP von FVK-Bauteilen. Den Kern des Vorgehensmodells bildet die aus vier Teilschritten bestehende Projektanalyse zur Ableitung des adäquaten Projekttyps. In einem ersten Schritt erfolgt in Abstimmung mit dem Kunden die Definition der Nachfrage im Sinne des Bedingungsleichtbaus in Form eines Lastenheftes zur Sicherstellung der Effektivität. Darauf basierend erfolgt die Konzeptfindung zur Generierung einer oder mehrerer Lösungen. Die entwickelten Konzepte, determiniert durch eine Kombination FVK-spezifischer Produktmerkmale, werden in weiterer Folge hinsichtlich ihrer Wirkung auf den PEP auf Basis des Interdependenzgrades der beteiligten Disziplinen zur Berücksichtigung des Produkt-Kontextes bewertet. Der Interdependenzgrad gibt hierbei Aufschluss zur Wahl des, für das jeweilige Konzept, adäquaten Projekttyps als Beitrag zur Sicherstellung der Effizienz im PEP. Um die effiziente Durchführung des aus dem Produkt-Kontext abgeleiteten Projekttyps zu gewährleisten, müssen die projektkontextspezifischen Rahmenbedingungen den produktkontextspezifischen Anforderungen genügen. Werden hierbei Differenzen festgestellt, wird diesbezüglicher interner oder externer Handlungsbedarf abgeleitet und in das Pflichtenheft als Basis der Angebotslegung übernommen. Die Evaluierung des entwickelten Vorgehensmodells erfolgt durch leitfaden-gestützte Experteninterviews zur Absicherung der Zweckmäßigkeit und Anwendbarkeit des Vorgehens.

Das Vorgehensmodell unterstützt eine proaktive Gestaltung des Produktentstehungsprozesses von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen in Abhängigkeit der Anforderungen des Kunden an das Produkt, der im Unternehmen vorhandenen Lösungsmöglichkeiten sowie der allgemeinen Projektrahmenbedingungen.

Abstract

The product development process of components of fiber-reinforced plastics is strongly influenced by the interaction of used materials, the design of the components and the manufacturing process. The resulting complexity poses particular challenges for the design of an efficient and effective product development process. Concepts of integrated product development provide a framework to control this complexity. The aim of this work is the context-specific organization of product development processes of components made of fiber-reinforced plastics considering the aspects of integrated product development.

The first step is the determination of the state of the art of integrated product development, the development of components made of fiber-reinforced plastics and lightweight design as the main reason for utilizing fiber-reinforced plastics. Following, identified shortcomings and challenges of an integrated product development process for components of fiber-reinforced plastics are tested on their practical relevance by analyzing an industrial case study. Based on the findings, a process-model is derived to support the management of identified challenges.

Ensuring effectiveness and efficiency in the product development process of parts made of fiber reinforced plastics (FRP) is the primary goal of the developed process model. The key-element of the process is the project analysis, which consists of four process steps to derive the right choice of the project type. The first step is the collaborative development of the user specification by both, the customer and the supplier, based on conditional lightweight design to ensure effectiveness. Thereafter the conceptual design is conducted to generate one or more concepts. The concepts, determined by a combination of FRP-specific product characteristics, are subsequently evaluated regarding their effects on the product development process based on the degree of interdependency of involved disciplines, to take into account the given product context. The degree of interdependency gives an indication on the choice of the adequate project-type to ensure efficiency in the product development process. To ensure the efficient execution of the derived process-type, the project specific framework needs to satisfy the requirements of the given product context. In case of the identification of mismatches, needs for action are derived and integrated in the functional specifications, which serve as the basis for quotation. The evaluation of the process model is based on guideline-based expert interviews to verify the applicability and practicability of the model.

The process model supports a proactive design of the product development process of components made of fiber-reinforced plastics, depending on the requirements of the customer to the product, the company's existing solutions as well as the general project conditions.

Inhalt

1 Einleitung	1
1.1 Allgemeine Problemstellung.....	2
1.2 Zielsetzung, Forschungsfragen und Hypothese	4
1.3 Wissenschaftlicher Ansatz.....	5
1.4 Aufbau der Arbeit	6
2 Integration im Produktentstehungsprozess	9
2.1 Die Produktentstehung.....	9
2.1.1 Ziele der Produktentstehung	10
2.1.2 Entwicklung der Produktentstehung	10
2.1.3 Effektivität und Effizienz in der Produktentstehung.....	11
2.2 Integration in der Produktentstehung.....	12
2.3 Ausgewählte Modelle und Rahmenkonzepte der Integrierten Produktentstehung.....	15
2.3.1 Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung	15
2.3.2 Integrierte Produkterstellungsmethodik.....	18
2.3.3 Kooperatives Produktengineering.....	21
2.3.4 Das Integrierte Produktentstehungs-Modell	24
2.3.5 Concurrent / Simultaneous Engineering	26
2.4 Zusammenfassung	31
3 Faserverbundkunststoffe	32
3.1 Grundlagen der Faserverbundkunststoffe.....	32
3.2 Der Produktentstehungsprozess von FVK-Bauteilen	34
3.2.1 Bauteilgestaltung und -auslegung	35
3.2.2 Materialien	40
3.2.3 Produktion.....	44
3.3 Innovation und Faserverbundkunststoffe.....	48
3.3.1 Werkstofforientierte Innovationen.....	48
3.3.2 Das Innovationsystem der Kunststoffverarbeitenden Industrie.....	51
3.4 Grundlegende Herausforderungen im Produktentstehungsprozess von FVK-Bauteilen	54
3.5 Integrative Ansätze für FVK-Produktentstehungsprozesse	55
3.6 Zusammenfassung	60
4 Leichtbau.....	62
4.1 Leichtbaustrategien.....	62
4.2 Leichtbauweisen	64
4.3 Leichtbauökonomie	69
4.4 Konstruktion von Leichtbaukomponenten.....	70
4.5 Grundlegende Herausforderungen im Produktentstehungsprozess von Leichtbaukomponenten	72
4.6 Zusammenfassung	77

5 Ein FVK-PEP in der betrieblichen Praxis	78
5.1 Der Soll-Produktentstehungsprozess	78
5.1.1 Datenerhebung	79
5.1.2 Ergebnisse zum Soll-Produktentstehungsprozess	82
5.2 Der Ist-Produktentstehungsprozess	85
5.2.1 Datenerhebung	86
5.2.2 Ergebnisse zum Ist-Produktentstehungsprozess	87
5.3 Identifizierte Herausforderungen	100
5.4 Zusammenfassung	103
6 Zwischenfazit	104
6.1 Grundlegende Handlungsschwerpunkte	104
6.2 Spezifische Anforderungen an die Methodik	107
7 Vorgehensmodell zur kontextspezifischen Gestaltung des Produktentstehungsprozesses von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen	109
7.1 Einordnung des Vorgehensmodells	109
7.1.1 Modelltheoretische Einordnung	109
7.1.2 Systemtheoretische Einordnung	111
7.2 Grundstruktur des Vorgehensmodells	113
7.3 Projektanstoß	115
7.3.1 Kundenanfrage Extern	116
7.3.2 Projekt Intern	117
7.4 Angebot	117
7.4.1 Leistungsangebot Intern	118
7.4.2 Leistungsangebot Extern	119
7.5 Projektanalyse	119
7.5.1 Definition der Nachfrage	119
7.5.2 Konzeptfindung	122
7.5.3 Projektdesign	127
7.5.4 Erstellung des Pflichtenheftes als Grundlage der Angebotslegung	138
7.6 Projektabwicklung	138
7.7 Zusammenfassung	141
8 Evaluierung des Vorgehensmodells	143
8.1 Vorgehen	143
8.2 Ergebnisse	143
8.2.1 Grundstruktur des Vorgehensmodells	144
8.2.2 Projektanstoß	144
8.2.3 Angebot	145
8.2.4 Projektanalyse	145
8.2.5 Projektabwicklung	148
8.3 Zusammenfassung	149
9 Zusammenfassung und Ausblick	151

Literaturverzeichnis	156
Abbildungsverzeichnis	166
Tabellenverzeichnis	170
Abkürzungsverzeichnis	171
Formelverzeichnis	172
Anhang A	173
Anhang B	174
Anhang C	181

1 Einleitung

„Weniger ist mehr, aber nicht einfacher“

(Heinrich Timm)

Nachhaltigkeit, effizienter Einsatz von Ressourcen und Schadstoffreduktion sind Schlagworte, welche aus dem aktuellen Tagesgeschehen nicht mehr wegzudenken sind. Insbesondere im Bezug auf den Verkehr gewinnen jene Aspekte immer mehr an Bedeutung. Die Vorstellung einer emissionsarmen oder emissionsfreien Fortbewegungsmöglichkeit, sowohl im Personen- und Warenverkehr bildet die Triebfeder für die angeregte Forschungs- und Entwicklungstätigkeit in diesen Bereichen.

Zur Erreichung dieser hochgesteckten Ziele im Bereich des Fahrzeugverkehrs gibt es grundsätzlich 3 Ansatzpunkte an denen Forschung und Entwicklung ansetzen. Es sind dies die Antriebstechnologie, die Aerodynamik sowie der Leichtbau.

Die Entwicklungen im Bereich der Antriebstechnologien reichen von der Elektrifizierung des Antriebsstranges, über die Weiterentwicklung der etablierten Antriebstechnologien wie Otto- und Dieselmotoren bis hin zu Kombinationen der vorher genannten Möglichkeiten in Form von hybriden Ausprägungsformen.

Der Fahrwiderstand eines Fahrzeuges setzt sich aus den Komponenten Rollwiderstand, Beschleunigungswiderstand, Steigungswiderstand und Luftwiderstand zusammen. Der Luftwiderstand eines Fahrzeuges ist abhängig von der äußeren Gestalt des Fahrzeugs sowie dessen Luftangriffsfläche und steigt quadratisch in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit. Betrachtet man den Roll-, Beschleunigungs- und den Steigungswiderstand so lässt sich daraus ein gemeinsamer, „gewichtiger“ Faktor ableiten – die Fahrzeugmasse.¹

Durch Leichtbau kann eine Reduzierung des Energieverbrauchs und eine Steigerung der Fahrdynamik eines Fahrzeuges induziert werden. Im Sinne einer nachhaltigen Mobilität ist der Reduktion des Fahrzeuggewichts, unabhängig vom eingesetzten Antriebskonzept, höchste Beachtung zu schenken.²

Im Rahmen einer Studie wurden 200 Automobilzulieferbetriebe mit der Frage, „[...]welche Technologie in Zukunft wichtiger werde“³, konfrontiert. Die meistgenannte Antwort war der Leichtbau, gefolgt von E-Mobility, Automatisierung und alternativen Antrieben.⁴

¹ Vgl. Wallentowitz/Freidalhoven/Olschewski (2011), S.95ff.

² Vgl. Eckstein/Schmitt/Hartmann (2010), S.789; Vgl. Deinzer (2011), S.1

³ X-Puls Marktforschung (2011), S.1

⁴ Vgl. X-Puls Marktforschung (2011), S.1

Im Besonderen bei Elektrofahrzeugen gewinnt der Einsatz von Leichtbau starke Bedeutung, da durch den sinkenden Energiebedarf kleinere Energiespeicher eingesetzt werden können und die Wirtschaftlichkeit dieser Fahrzeuge dadurch erhöht werden kann.⁵

Betrachtet man im Speziellen Leichtbau unter Einsatz von Kohlefaser-verstärkten Kunststoffen (CFK), so zeichnen sich diese durch eine im Vergleich zu Stahl um 80% und im Vergleich zu Aluminium um 40% geringere Dichte bei gleichzeitig hoher Festigkeit aus. Diese Zahlen lassen das Potential dieses Verbundwerkstoffes im Leichtbau erahnen. Es bestehen jedoch vielfältige Herausforderungen welche einem intensiveren Einsatz von Faserverbundkunststoffen im Allgemeinen entgegenstehen. Diese müssen gemeistert werden um dieses Material mit seinen hervorragenden Materialeigenschaften im Leichtbau als festen Bestandteil zu integrieren.⁶

HAB/WAGNER beschreiben den Übergang des „magischen Dreiecks“ aus Kosten, Zeit und Qualität in der Automobilindustrie in ein sogenanntes „teuflisches Dreieck“. Dieses bringt zum Ausdruck, dass immer hochwertigere Fahrzeuge unter immer geringerem Einsatz sowohl von Geld als auch Zeit für den Markt bereitgestellt werden müssen. Dies ist nur durch eine gesteigerte Effizienz sowie Effektivität über den gesamten Produktentstehungsprozess zu erreichen. Die ersten dahingehenden Optimierungsmaßnahmen wurden vorwiegend im Bereich der Produktion gesetzt, beispielsweise durch Umsetzung der Lean-Production-Prinzipien. Der Fokus der Bemühungen wird zunehmend auch auf die Prozesse der Produktentwicklung gelegt.⁷

1.1 Allgemeine Problemstellung

Eine Besonderheit in der Entwicklung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen (FVK) im Vergleich zur Entwicklung von Bauteilen aus klassischen, isotropen Werkstoffen wie Stahl oder Aluminium liegt darin, dass eine größere Anzahl von Freiheitsgraden wie z.B. die Wahl der Faser-Matrix-Kombination, die Faserorientierung, der Faservolumengehalt sowie die Wahl des geeigneten Fertigungsprozesses aufeinander abzustimmen ist. Der wesentliche Unterschied ist die Tatsache, dass die Eigenschaften des Werkstoffs maßgeblich durch die Kombination aus Bauteilgeometrie und gewähltem Fertigungsverfahren determiniert werden, d.h. die Eigenschaften des faserverstärkten Kunststoffes entstehen erst während der Fertigung.⁸

„In der heutigen betrieblichen (Ingenieurs-)Praxis besteht immer noch eine Unsicherheit darüber, wie bei der Entwicklung und Dimensionierung eines Bauteils aus faserverstärkten Kunststoffen vorgegangen werden soll.“⁹

Diese einleitende Aussage im Kapitel „Gestaltung eines Produktes“ im Handbuch Faserverbundkunststoffe lässt großes Potential zur Weiterentwicklung der Gestaltungsprozesse von Produkten aus FVK erahnen.

⁵ Vgl. Eckstein/Schmitt/Hartmann (2010), S.789

⁶ Vgl. Hoven-Nivelstein (2011), S.1; Vgl. Jäger (2011), S.1

⁷ Vgl. Hab/Wagner (2013), S.10

⁸ Vgl. Wiedemann (2009a), S.2; Vgl. Avk (2014), S.295

⁹ Avk (2014), S.295

ABELE/REINHART sehen „[...]d]as synergetische Zusammenwirken aller an der Produktentstehung beteiligten Fachdisziplinen [...]“ im Produktentstehungsprozess als Herausforderung und zukünftigen Fokus¹⁰. Das „optimale“ Zusammenwirken der beteiligten Disziplinen ist insbesondere in der Anwendung von FVK von großer Wichtigkeit. Die Entwicklung von Bauteilen aus FVK erfordert die intensive Zusammenarbeit von Konstrukteuren, Berechnern, Fertigungsspezialisten sowie Experten aus dem Bereich der Qualitätssicherung im Sinne des Simultaneous Engineering¹¹.

WIEDEMANN führt unter anderem folgende Barrieren für den Einsatz von FVK an:¹²

- Fehlender intensiver Austausch und Gleichzeitigkeit der Arbeit der beteiligten Disziplinen
- Fehlende Durchgängigkeit in der Prozesskette für Faserverbundtechnologie mit den richtigen Daten in der Übergabe zwischen den einzelnen Disziplinen
- Gegenläufige Interessen zwischen Bauteilanforderungen und dem Fertigungsprozess
- Zu späte Entwicklung geeigneter Fertigungsverfahren im Entwicklungsprozess

Die genannten Barrieren für den verstärkten Einsatz von Bauteilen aus FVK lassen sich insbesondere den Bereichen Produktentwicklung, Produktionssystementwicklung sowie Prozessentwicklung zuordnen und verdeutlichen die Notwendigkeit der intensiven Integration genannter Bereiche im Rahmen eines integrierten und abgestimmten Vorgehens.

Es ist davon auszugehen, dass eine kontextspezifische Integration in der Entwicklung von Produkt, Produktionssystem und Produktionsprozess einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Effizienz und Effektivität des Produktentstehungsprozesses von Bauteilen aus FVK leisten kann.

Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren auf den FVK-Produktentstehungsprozess sind hierbei im direkten Zusammenhang mit der Verwendung von FVK und ihren spezifischen Eigenheiten (Produktkontext) und sowie dem jeweiligen Projektkontext begründet. Faserverbundkunststoffe werden aufgrund ihrer sehr guten dichte-spezifischen technischen Eigenschaften vorwiegend als Werkstoff zur Realisierung von Leichtbaulösungen eingesetzt. *„Gerade im Leichtbau ist die systematische Betrachtung der Produktentstehung im ganzheitlichen Zusammenhang von höchster Bedeutung, um z. B. Fertigungsrestriktionen bereits bei der Gestaltmodellierung gerecht zu werden.“*¹³ Die Entwicklung von Leichtbaukomponenten zieht besondere Herausforderungen mit sich, welche die Entwicklung von FVK-Bauteilen beeinflussen und sehr stark mit dieser verknüpft ist.

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt auf der Untersuchung der spezifischen Charakteristika des Produktentstehungsprozesses von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen und der Ableitung einer Unterstützung zur kontextspezifischen Gestaltung des Produktentstehungsprozesses zur Steigerung von Effektivität und Effizienz.

¹⁰ Vgl. Abele/Reinhart (2011), S.60; Abele/Reinhart (2011), S.60

¹¹ Vgl. Maschinenmarkt-Industrieportal (2011), S.o.A., Zugriffsdatum 09.01.2013

¹² Vgl. Wiedemann (2009a), S.2f.; Vgl. Wiedemann (2009b), S.6

¹³ Albers/Braun (2011), S.7

1.2 Zielsetzung, Forschungsfragen und Hypothese

Die Arbeit soll einen Beitrag zum Verständnis und der Gestaltung des Produktentstehungsprozesses für Bauteile aus Faserverbundkunststoffen liefern. Dazu soll der Stand der Technik der Produktentstehung von FVK-Bauteilen analysiert werden, um die spezifischen Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren auf den Produktentstehungsprozess abzuleiten. Basierend darauf soll die Ableitung eines Vorgehensmodells zur kontextspezifischen Gestaltung eines integrierten Prozesses der Produktentstehung für FVK-Bauteile erfolgen.

Die Ziele können wie folgt formuliert werden:

- Ziel 1:** Identifikation von Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren des Produktentstehungsprozesses von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen
- Ziel 2:** Identifikation zu setzender Aktivitäten im Produktentstehungsprozess von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen
- Ziel 3:** Ableitung eines Vorgehensmodells zur kontextspezifischen Gestaltung eines integrierten Produktentstehungsprozesses von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen
- Ziel 4:** Evaluierung des entwickelten Vorgehensmodells

Zur Erreichung der beschriebenen Ziele sollen folgende forschungsleitenden Fragestellungen beantwortet werden:

- Frage 1:** Welche Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren bestehen im Produktentstehungsprozess von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen?
- Frage 2:** Welche Aktivitäten werden im Produktentstehungsprozess von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen gesetzt?
- Frage 3:** Wie kann ein Vorgehensmodell zur kontextspezifischen Gestaltung eines integrierten Produktentstehungsprozesses von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen aussehen?

Die der Arbeit zugrunde liegende Hypothese lautet:

Hypothese: Die kontextspezifische Integration von Produktentwicklung, Produktionssystementwicklung und Produktionsprozessentwicklung führt zu gesteigerter Effizienz und Effektivität im Produktentstehungsprozess von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen.

1.3 Wissenschaftlicher Ansatz

Das Vorgehen der vorliegenden Arbeit orientiert sich an der Design Research Methodology (DRM) nach BLESSING/CHAKRABARTI. Der Forschungsansatz gliedert sich in vier Stufen:¹⁴

- Research Clarification (Klärung der Forschungsziele)
- Descriptive Study I (Erste deskriptive Studie)
- Prescriptive Study (Präskriptive Studie)
- Descriptive Study II (Zweite deskriptive Studie)

Die Hauptintention des gewählten wissenschaftlichen Ansatzes ist die Gewährleistung der Relevanz, der Effektivität sowie der Effizienz der Forschung im Bereich Produktkonstruktion und Produktgestaltung.¹⁵

Nach BLESSING/CHAKRABARTI soll die Forschung im Bereich der „Design Research“ primär einen Beitrag zum Verstehen des Forschungsgegenstandes sowie zur Entwicklung von entsprechender Unterstützung gewährleisten. Die Ziele der Forschung sind die Erstellung validierter Modelle und Theorien zum Forschungsgegenstand unter Einbeziehung seiner Ausprägungen und Eigenschaften sowie die darauf basierende Entwicklung von Unterstützung zur Verbesserung der Abläufe und Vorgänge im Rahmen der Produktentwicklung.¹⁶

BLESSING/CHAKRABARTI verwenden für den Begriff der Unterstützung den Begriff des „Support“ und verstehen darunter Mittel, Hilfsmittel und Maßnahmen um den Entwicklungsprozess zu verbessern und zählen dazu unter anderem Strategien, Methoden, Techniken, Software-Tools oder Richtlinien.¹⁷

Im Rahmen der „Research Clarification“ (RC) werden die Grundlagen der Arbeit dargestellt und geklärt. Dies beinhaltet die Identifizierung des grundsätzlichen Forschungsgebietes sowie die Darstellung des Problemverständnisses sowie der gestellten Erwartungen. Des Weiteren erfolgt die Darstellung des Istzustands inklusive einer Abschätzung der Herausforderungen und Einflussfaktoren auf den Betrachtungsbereich. Darauf aufbauend erfolgen die Aufstellung zu klärender Hypothesen sowie der Forschungsfragen.¹⁸

Die „Descriptive Study I“ (DSI) hat die Aufgabe ein fundiertes Verständnis des festgelegten Forschungsbereiches (Ist-Situation) zu erarbeiten, die beeinflussenden Faktoren zu bestimmen und liefert dadurch einen Beitrag zum besseren Verständnis des Forschungsgebietes durch die intensive Auseinandersetzung mit dem Stand der Technik. Daraus wird in weiterer Folge der Bedarf einer Unterstützung abgeleitet.¹⁹

¹⁴ Vgl. Blessing/Chakrabarti (2009), S.14

¹⁵ Vgl. Blessing/Chakrabarti (2009), S.viii

¹⁶ Vgl. Blessing/Chakrabarti (2009), S.5

¹⁷ Vgl. Blessing/Chakrabarti (2009), S.4

¹⁸ Vgl. Blessing/Chakrabarti (2009), S.43f.

¹⁹ Vgl. Blessing/Chakrabarti (2009), S.75

Die Ergebnisse der DSI sind eine exakte Beschreibung der Ausgangssituation und Schärfung der Problemstellung, der Relevanznachweis des Forschungsthemas, die Feststellung der Schlüsselfaktoren sowie Erfolgskriterien zur Verbesserung der Ausgangssituation.²⁰

Die Ergebnisse der DSI führen unter Umständen zur Detaillierung und Schärfung der in der PS beschriebenen Forschungsfragen, Hypothesen und des in der RC beschriebenen Ist- sowie Soll-Zustandes. Die DSI bildet die Basis für die nachfolgende „Prescriptive Study“.²¹

Nach BLESSING/CHAKRABARTI liegt das Hauptaugenmerk der Forschung im Bereich der Entwicklung auf der Generierung von Unterstützung zur Verbesserung der Entwicklungsprozesse und -abläufe. Die Generierung dieser Unterstützung, der Lösung der eigentlichen Problemstellung, erfolgt aufbauend auf den Ergebnissen der RC sowie DRI im Rahmen der „Prescriptive Study“ (PS).²²

Die Ergebnisse der PS sind die Dokumentation der beabsichtigten Unterstützung sowie die Erarbeitung der tatsächlich entwickelten Unterstützung. Die tatsächliche Unterstützung kann beispielsweise in Form von Leitfäden oder Checklisten dargestellt werden.²³

Abschließend wird im Rahmen der „Descriptive Study II“ (DSII) die in der PS erarbeiteten Unterstützung evaluiert. Die DSII umfasst im Wesentlichen die Evaluierung der erarbeiteten Lösung hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit sowie Sinnhaftigkeit auf Basis empirischer Daten sowie die Ableitung von Verbesserungspotentialen.²⁴

Der hier beschriebene Forschungsansatz bietet ein Vorgehensmodell mit sequentiell aufeinanderfolgenden Phasen. BLESSING/CHAKRABARTI weisen jedoch darauf hin, dass bei der Durchführung des Forschungsprojektes die einzelnen Phasen teilweise parallel und iterativ bearbeitet werden sowie nicht jedes Forschungsprojekt dieselbe Intensität und Tiefe der Bearbeitung der einzelnen Stufen erfordert.²⁵

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit orientiert sich an den Grundsätzen des hier vorgestellten wissenschaftlichen Ansatzes nach BLESSING/CHAKRABARTI und wird im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

1.4 Aufbau der Arbeit

Kapitel 1 erörtert die der Arbeit zu Grunde liegende allgemeine Problemstellung. Darauf basierend werden das Forschungsziel, die forschungsleitenden Fragestellungen und die Hypothese abgeleitet. Des Weiteren erfolgt die Vorstellung des wissenschaftlichen Ansatzes sowie des Aufbaus der Arbeit.

Kapitel 2 geht auf die begriffliche Abgrenzung des Themas der Integration im Produktentstehungsprozess ein. Es werden ausgewählte Rahmenkonzepte der integrierten

²⁰ Vgl. Blessing/Chakrabarti (2009), S.33

²¹ Vgl. Blessing/Chakrabarti (2009), S.75f.

²² Vgl. Blessing/Chakrabarti (2009), S.33f.

²³ Vgl. Blessing/Chakrabarti (2009), S.35

²⁴ Vgl. Blessing/Chakrabarti (2009), S.35ff.

²⁵ Vgl. Blessing/Chakrabarti (2009), S.14ff.

Produktentwicklung sowie Methoden mit integrierender Wirkung auf Produktentstehungsprozesse beschrieben und diskutiert.

Kapitel 3 beschreibt und diskutiert die spezifischen Herausforderungen im Produktentstehungsprozess von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen. Dazu werden begriffliche Abgrenzungen getroffen, der Produktentwicklungs- bzw. Auslegungsprozess von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen beschrieben und darauf aufbauend die spezifischen Herausforderungen herausgearbeitet. Des Weiteren erfolgt die Beschreibung und Analyse in der Literatur beschriebener Produktentstehungsprozesse von FVK-Bauteilen mit integrierendem Charakter.

Kapitel 4 beschreibt und diskutiert die spezifischen Herausforderungen des Leichtbaus. Aufbauend auf einer begrifflichen Abgrenzung von Leichtbaustrategien, Leichtbauweisen und Leichtbauökonomie werden Themen der Leichtbaukonstruktion beschrieben und daraus die spezifischen Herausforderungen des Produktentstehungsprozesses von Leichtbaulösungen abgeleitet.

Kapitel 5 beschreibt das Vorgehen, die Analyse sowie die Ergebnisse einer Fallstudie eines Produktentstehungsprozesses von FVK-Bauteilen in der industriellen Praxis.

Kapitel 6 beinhaltet die Zusammenfassung des aufgezeigten Handlungsbedarfes in Form eines Zwischenfazits sowie der Beschreibung der Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik.

In **Kapitel 7** erfolgt, basierend auf den Ergebnissen der DSI, die Herleitung und Beschreibung des entwickelten Vorgehensmodells zur kontextspezifischen Gestaltung eines integrierten Produktentstehungsprozesses von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen. Aufbauend auf einer Beschreibung der Grundstruktur erfolgt die Beschreibung der einzelnen Schritte des Vorgehensmodells.

In **Kapitel 8** wird die Zweckmäßigkeit und Anwendbarkeit der entwickelten Methodik anhand von Experteninterviews evaluiert.

In **Kapitel 9** werden die forschungsleitenden Fragestellungen beantwortet sowie ein Ausblick auf einen möglichen weiteren Forschungsbedarf gegeben.

Der Aufbau der Arbeit sowie die Zuordnung der einzelnen Kapitel zu den vier Stufen der DRM ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Research Clarification erfolgt in Kapitel 1. Die Kapitel 2 bis 6 bilden die Descriptive Study I. Die Prescriptive Study erfolgt in Kapitel 7. In Kapitel 8 erfolgt die Descriptive Study II.

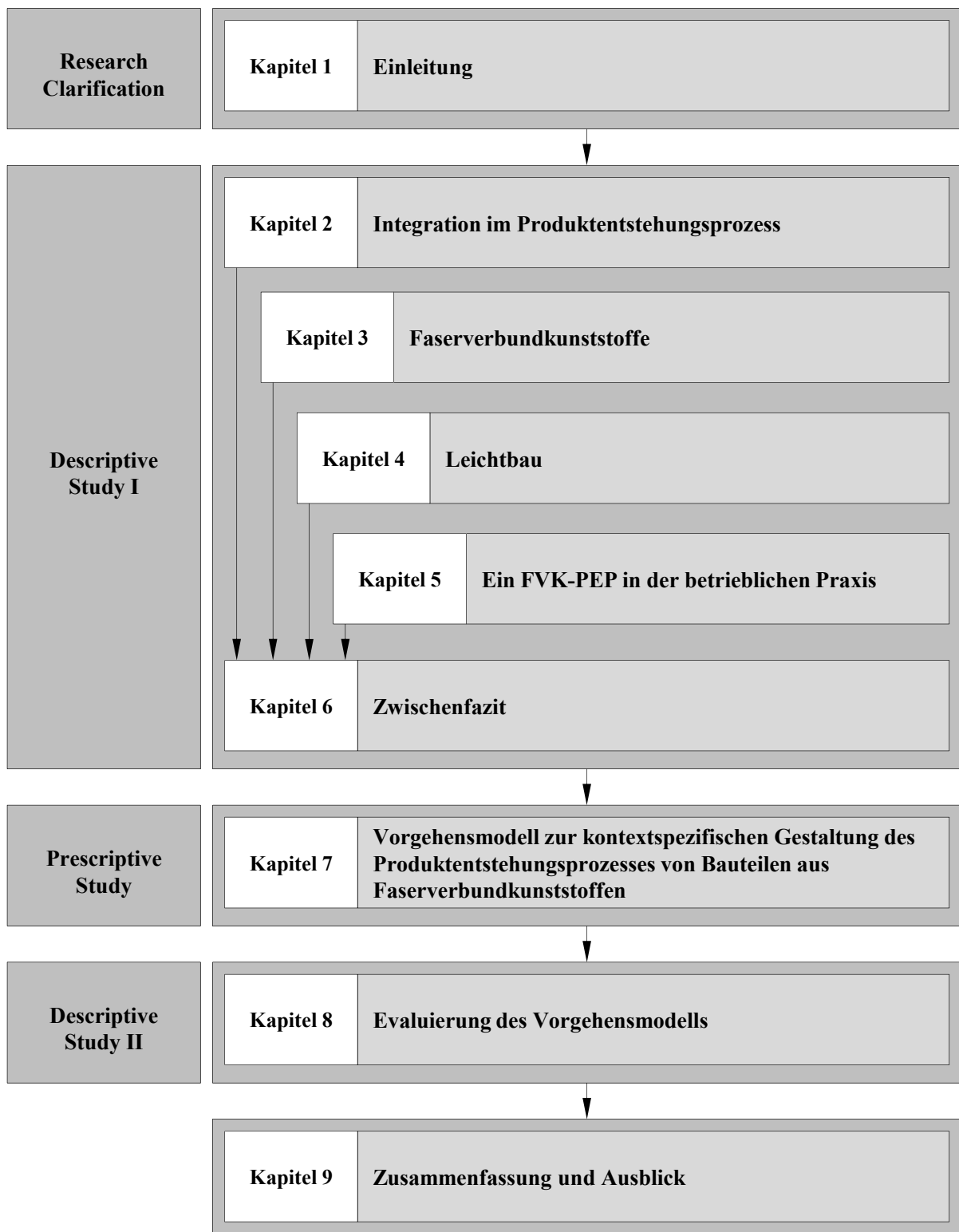


Abbildung 1: Gliederung und Aufbau der Arbeit in Anlehnung an die Design Research Methodology nach BLESSING/CHAKRABARTI²⁶

²⁶ Eigene Darstellung; in Anlehnung an: Blessing/Chakrabarti (2009), S.15

2 Integration im Produktentstehungsprozess

Im Zusammenhang der Integration im Produktentstehungsprozess im Allgemeinen und der Integration von Produkt- und Produktionssystementwicklung im Speziellen finden eine Vielzahl von Begrifflichkeiten Verwendung. Die Literatur beschreibt eine große Auswahl an Modellen, Methoden und Prozessen. Die folgenden Ausführungen dieses Abschnitts sollen den diesbezüglichen Stand der Technik als Basis für die Ausführungen in den nachfolgenden Kapiteln darstellen. Dazu werden in einem ersten Schritt die grundlegenden Begriffe abgegrenzt und darauf folgend ausgewählte Modelle und Rahmenkonzepte der Integrierten Produktentstehung vorgestellt.

2.1 Die Produktentstehung

In der Literatur finden sich eine Vielzahl von unterschiedlichen Begrifflichkeiten und Definitionen im Zusammenhang der Produktentstehung, wie beispielsweise Produkterstellung oder auch Produktengineering wieder.

„Produkterstellung ist der gesamte Prozess, der abläuft, bis ein Produkt benutzt wird: von der Produktplanung und dann der Ideensuche, bei der das Produkt genutzt wird, bzw. bei der Einzelfertigung: von Auftrag bis zur Auslieferung des Produktes an den Nutzer.“²⁷

Kern der Produkterstellung nach EHRENSPIEL/MEERKAMM ist die Entwicklung und Konstruktion im Rahmen derer alle beeinflussenden Disziplinen zusammenwirken sollen. Die Produkterstellung umfasst im Wesentlichen die Produktplanung, die Produktkonzipierung, den Produktentwurf sowie die Ausarbeitung. Die Autoren verweisen darauf, dass für den Begriff der Produkterstellung synonym auch der Begriff der Produktentstehung Verwendung findet.²⁸

Nach ALBERS/GAUSEMEIER ist *„[d]ie Produktentstehung [...] Teil des Produktlebenszyklus und beschreibt den grundsätzlichen Ablauf von der Produkt- bzw. Geschäftsidee bis zum Serienanlauf.“²⁹* In den nachfolgenden Ausführungen kommt diese Definition (siehe dazu Abbildung 2) zur Anwendung.

GAUSEMEIER verwendet in früheren Publikationen synonym für den Begriff der Produktentstehung den Begriff des Produktengineering. Das *„Produktengineering umfasst die Bereiche Strategische Geschäftsfeldplanung (von der Geschäfts-/Produktidee zum erfolversprechenden Geschäftsplan und Entwicklungsauftrag), die Produktentwicklung (vom Entwicklungsauftrag zur Produktkonstruktion) und die Prozessentwicklung (von der*

²⁷ Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.1

²⁸ Vgl. Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.1f.

²⁹ Albers/Gausemeier (2012), S.18

*Produktkonstruktion bis zur Realisierung technologischer und logistischer Produktionssysteme) sowie ihre zeitliche und inhaltliche Verknüpfung.*³⁰

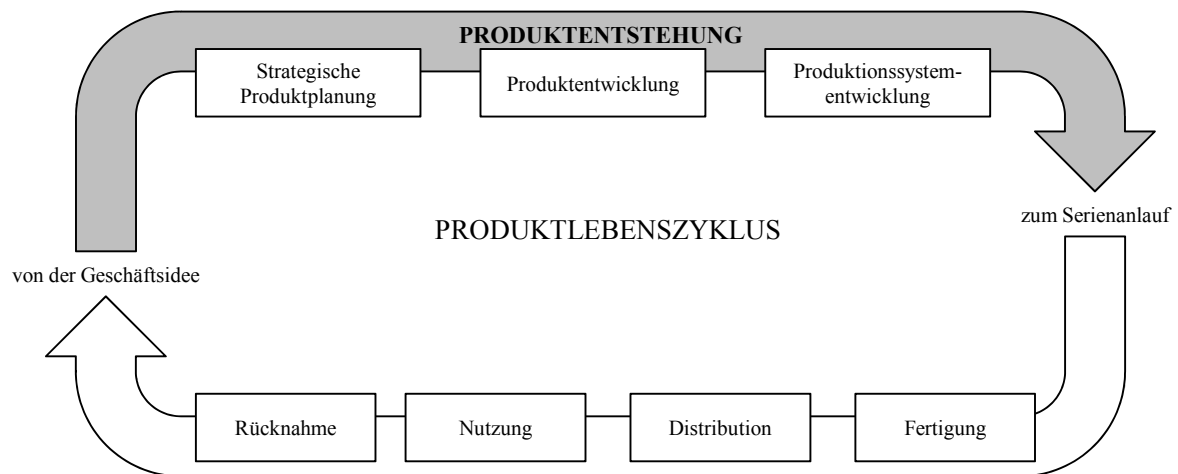


Abbildung 2: Die Produktentstehung als Teil des Produktlebenszyklus³¹

2.1.1 Ziele der Produktentstehung

ALBERS/GAUSEMEIER beschreiben das Ziel der Produktentstehung in Anlehnung an die Systemklassifizierung nach ROPOHL³². Demnach ist das „Ziel eines Produktentstehungsprozesses [...], ein gefordertes Zielsystem (alle Ziele, die mit einem neuen Produkt verfolgt werden) durch das Handlungssystem (z.B. Unternehmen mit allen zur Verfügung stehenden Ressourcen) in ein geeignetes Objektsystem (z.B. Simulationsmodell, Prototyp, serienreifes Produkt) zu überführen.“³³

2.1.2 Entwicklung der Produktentstehung

Die Produktentstehung unterliegt einem ständigen Wandel bedingt durch sich ändernde Rahmenbedingungen. Bis zum Ende des 19. Jahrhunderts wurde ein großer Teil des benötigten Wissens für die Produktentstehung von Meistern abgedeckt und nötige Arbeiten von Handwerkern ganzheitlich ausgeführt. Die einsetzende Industrialisierung führte zu einer Auftrennung der Arbeitsfolgen in kleinere Elemente und in weiterer Folge auch zur Aufspaltung von planenden und ausführenden Tätigkeiten. Diese Vorgehensweisen werden den Herausforderungen der heutigen Produktentstehung nur mehr bedingt gerecht. Änderungen vollzogen sich beispielsweise hinsichtlich immer kürzerer Produktlebenszyklen, gesteigerter Komplexität von Produkten und der Produktion, dem gestiegenem Bildungsniveau der Arbeiter, des Wandels vom Verkäufer- zum Käufermarkt sowie der Globalisierung von Produktion und Entwicklung.³⁴

³⁰ Gausemeier et al. (2000), S.2

³¹ Vgl. Gausemeier et al. (2000), S.3; Albers/Gausemeier (2012), S.19; Eigene Darstellung

³² Vgl. Ropohl (2009), S.93ff.

³³ Albers/Gausemeier (2010), S.250

³⁴ Vgl. Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.187ff.

Abbildung 3 zeigt den beschriebenen Wandel vom konzentrierten Wissen des Meisters, der Differenzierung in spezialisierte Fachbereiche sowie deren Integration beispielsweise in Simultaneous Engineering Teams.

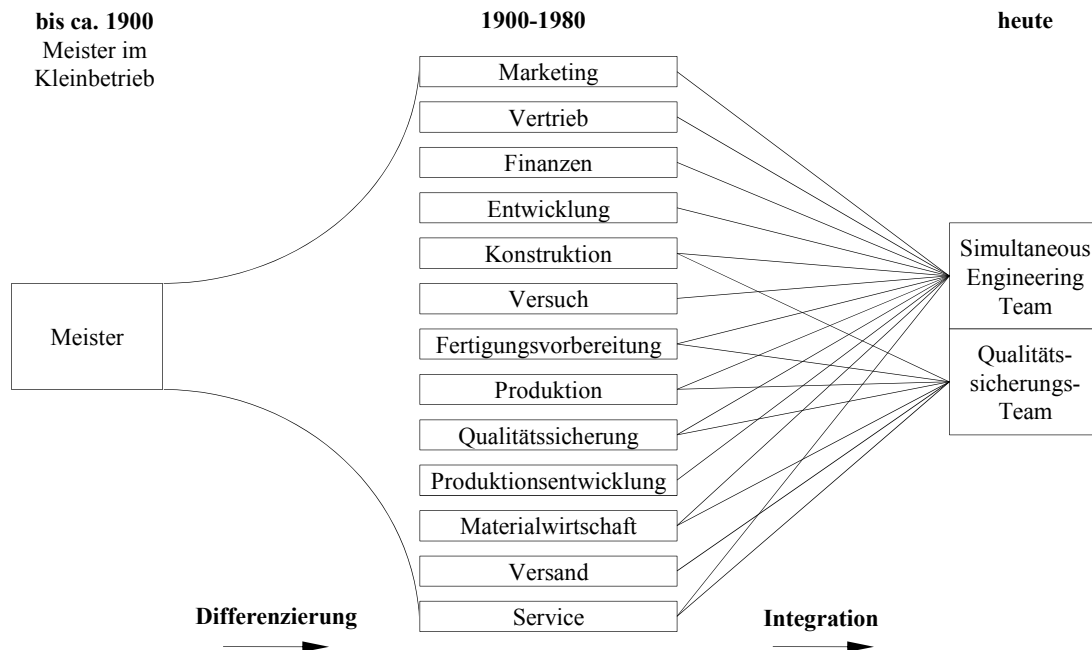


Abbildung 3: Entwicklung der Produktentstehung³⁵

Eine nicht integrierte Produktentstehung wird den heute gestellten Anforderungen oft nur schwer gerecht. EHRENSPIEL/MEERKAMM sehen drei Problembereiche in der Entwicklung und Konstruktion im Speziellen und der nicht integrierten Produktentstehung im Allgemeinen. Sie unterscheiden in organisatorische Probleme, Probleme im Entwicklungs- und Konstruktionsprozess und technisch-wirtschaftliche Probleme.³⁶

2.1.3 Effektivität und Effizienz in der Produktentstehung

WOHINZ bezeichnet in Anlehnung an PÜMPIN/PRANGE die Legitimität, die Effektivität sowie die Effizienz als die Kenngrößen des industriellen Managements. Die Legitimität dient hierbei als Maßstab der Erfüllung der Gesamtaufgabe, die Effektivität (PÜMPIN/PRANGE benutzen den Ausdruck der Wettbewerbsfähigkeit) als Maßstab die richtigen Dinge zu tun sowie die Effizienz als Maßstab die Dinge richtig zu tun.³⁷

COOPER beschreibt die Effektivität und die Effizienz als die zwei wesentlichen Wege zur Realisierung einer erfolgreichen Produktinnovation. Einerseits gilt es „*die richtigen Projekte zu machen*“ (Effektivität) und andererseits „*[die] Projekte richtig zu machen*“ (Effizienz).³⁸

³⁵ Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.200; eigene Darstellung

³⁶ Vgl. Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.189

³⁷ Vgl. Wohinz (2003), S.24; Vgl. Pümpin/Prange (1991), S.20

³⁸ Vgl. Cooper (2010), S.43; Cooper (2010), S.43

Die Effektivität ist ein „*Beurteilungskriterium, mit dem sich beschreiben lässt, ob eine Maßnahme geeignet ist, ein vorgegebenes Ziel zu erreichen.*“³⁹ Beispielsweise haben die klare Regelung von Aufgaben, Kompetenzen und Verantwortlichkeiten der an der Produktentstehung Beteiligten, sowie die Sicherstellung einer Klarheit bzgl. der Zielsetzung zur Vermeidung von Reibungsverlusten und Konflikten Potential eine Effektivitätssteigerung zu bewirken⁴⁰. Weitere effektivitätssteigernde Aspekte sind der Einsatz der richtigen Technologie, für die richtigen Produkte sowie die richtige Allokation von Ressourcen⁴¹.

Die Effizienz ist ein „*Beurteilungskriterium, mit dem sich beschreiben lässt, ob eine Maßnahme geeignet ist, ein vorgegebenes Ziel in einer bestimmten Art und Weise zu erreichen.*“⁴² Wesentliche Kriterien für die Effizienz im Produktentstehungsprozess sind die zeitliche Überlappung der Tätigkeiten sowie die Integration aller Beteiligten um geforderte Entwicklungszeiten und Qualitäten sicherstellen zu können⁴³. Effizienz im Produktentstehungsprozess bedarf der optimierten Gestaltung von Prozessen und Strukturen zur Erreichung der gesetzten Ziele mit dem geringsten möglichen Ressourcenaufwand⁴⁴.

WOHINZ beschreibt das Effizienzmanagement als Teil der Funktionsmodule in der Differenzierungszone des Grazer Modells für Industrielles Management. Grundaufgabe des Effizienzmanagements ist die Sicherstellung eines „*möglichst günstige[n] Verhältnis[ses] zwischen dem erreichten Output [...] und dem dafür notwendigen Ressourceneinsatz als Input [...]*“. Grundlage eines effizienten Handelns ist die Berücksichtigung des ökonomischen Prinzips. Dieses Prinzip kann einerseits in das Minimumprinzip (Realisierung eines „*[...] definierten Outputs mit minimalem Ressourceneinsatz [...]*“) und andererseits das Maximumprinzip (Realisierung eines maximalen Outputs bei gegebenen Ressourcen) auf Basis der gestellten Zielsetzung differenziert werden.⁴⁵

Nach LINDEMANN führt der Einsatz von Methoden zu gesteigerter Effektivität und Effizienz im Produktentwicklungsprozess. Er führt dies auf eine direktere Erreichung der Ziele sowie die Vermeidung von Fehlern und Schwachstellen durch die Anwendung von Methoden zurück. Die Reduktion von Fehlentwicklungen ist messbar und kann so einen Beitrag zur Bewertung von Methoden leisten.⁴⁶

2.2 Integration in der Produktentstehung

Integration bedeutet die „*[Wieder]herstellung einer Einheit [aus Differenziertem]*“.⁴⁷

Eine Integrierte Produktentstehung ist geprägt durch eine enge Kooperation aller am PEP Beteiligten und ist durch eine Ausrichtung an einer gemeinsamen Zielsetzung hinsichtlich

³⁹ www.wirtschaftslexikon.gabler.de (Zugriffsdatum 26.09.2014)

⁴⁰ Vgl. Hab/Wagner (2013), S.43ff.

⁴¹ Vgl. Berndes/Stanke (1996), S.10

⁴² www.wirtschaftslexikon.gabler.de (Zugriffsdatum 26.09.2014a)

⁴³ Vgl. Eversheim/Schuh (2005), S.1

⁴⁴ Vgl. Berndes/Stanke (1996), S.10

⁴⁵ Vgl. Wohinz (2003), S.265; Wohinz (2003), S.265

⁴⁶ Vgl. Lindemann (2009), S.229

⁴⁷ www.duden.de (Zugriffsdatum 10.09.2014); Hervorhebung durch Klammern im Original

Qualität, Zeit sowie Kosten gekennzeichnet. Ein weiteres Kennzeichen einer Integrierten Produktentstehung ist die Parallelisierung der zu erledigenden Aktivitäten.⁴⁸

Integration in der Produkterstellung kann in vielfältigen Ausprägungen zur Anwendung kommen. EHRENSPIEL/MEERKAMM unterscheiden im Zusammenhang der Produktentwicklung als Kern der Produktentstehung in menschliche, methodische, organisatorische sowie technische Integration⁴⁹. Unter dem Begriff der Integrierten Produktentwicklung verstehen Sie die „[...] zielorientierte Kombination organisatorischer, methodischer und technischer Maßnahmen/Hilfsmittel [...]“⁵⁰. VAJNA et. al unterscheiden zusätzlich in die Dimension Produkt⁵¹. Eine erfolgreiche Integration im PEP hängt wesentlich von der konsequenten und gleichzeitigen Umsetzung nachfolgend beschriebene Ansätze ab⁵².

Menschliche Integration

„Das Wichtigste sind [...] nicht die [...] Methoden und Techniken, sondern dass die Menschen zusammenarbeiten wollen und Freude daraus schöpfen. Sie schaffen dann „von selbst“ alles andere. Und Mitarbeiter sind dann erfolgreich, wenn sie in ihrem Bereich Gestaltungsfreiheit haben und wenn sie für Ihre Arbeit motiviert sind.“⁵³

Nur der Mensch *„als kreativer Problemlöser ist in der Lage, Wissen zu generieren und anzuwenden, Probleme und Aufgaben zu strukturieren, Organisationsstrukturen zu erstellen, geeignete Lösungen zu finden und neueste Technologien anzuwenden“⁵⁴*.

Die Integration der an der Produktentstehung beteiligten Individuen zu einer ganzheitlich denkenden Einheit ist von größter Wichtigkeit. Diese Integration muss in einem *„partnerschaftlichem, interdisziplinären Arbeiten sowohl innerhalb des Unternehmens als auch mit Kunden und Zulieferern“⁵⁵* umgesetzt werden.

EHRENSPIEL/MEERKAMM nennen in diesem Zusammenhang die Integration der Leistungsbereitschaft, die Integration der Ziele sowie integratives Wissen. Eine Integration in der Leistungsbereitschaft der Beteiligten Individuen ist durch ein gemeinsames Wollen sowie der Motivation gemeinsam ein Ziel zu erreichen gekennzeichnet. Ein gemeinsames Ziel hat integrierende Wirkung und gibt eine gemeinsame Richtung des Handels vor. Integratives Wissen kann durch die Vermittlung von Wissen zu einem Gesamtsystem an Spezialisten oder die über die Ausbildung von Generalisten erreicht werden. Dies kann beispielsweise durch Job-Rotation unterstützt werden.⁵⁶

⁴⁸ Vgl. Ehrlenspiel (2003), S.176

⁴⁹ Vgl. Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.209

⁵⁰ Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.194

⁵¹ Vgl. Vajna et al. (2009), S.410f.

⁵² Vgl. Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.194

⁵³ Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.194

⁵⁴ Vajna et al. (2009), S.410

⁵⁵ Vgl. Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.195

⁵⁶ Vgl. Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.209

Methodische Integration

Der Bereich der methodischen Integration umfasst die Anwendung von Methoden zur Unterstützung des integrativen Gedankens in der Produktentstehung wie beispielsweise Design for X-Methoden (DFX-Methoden). EHRENSPIEL/MEERKAMM beschreiben auch die Kundenintegration sowie die Aufgabenintegration als Teil der methodischen Integration. Die Integration der Kunden kann durch die Beteiligung der Kunden am Produktentwicklungsprozess oder die Kooperation mit Pilotkunden erreicht werden. Aufgabenintegration meint die Integration von Aufgaben in Unternehmensbereiche, welche vorher außerhalb deren Aufgabenbereiche gelegen sind.⁵⁷

Organisatorische Integration

Die Integration in organisatorischer Hinsicht umfasst die Aufbauintegration, die Ablaufintegration sowie die örtliche Integration und hat die Aufgabe der Förderung des gemeinsamen Arbeitens sowie Verständnisses über Abteilungs- und Gruppengrenzen hinweg. Die Aufbauintegration stellt Organisationsformen im Sinne der Gedanken der integrierten Produktentwicklung bereit. Beispiele hierfür sind eine produktorientierte Organisation (z.B. Profit-Center) oder die Realisierung einer flachen Hierarchie. Die Ablaufintegration erfolgt durch die Anwendung integrierender Vorgehensweisen wie Simultaneous/Concurrent Engineering oder FMEA (Failure Mode and Effects Analysis). Die örtliche Integration kann beispielsweise durch die Bereitstellung gemeinsamer Arbeitsräume oder der Schaffung von Entwicklungs-Zentren umgesetzt werden und verfolgt das Ziel der Verringerung der Kommunikationswege.⁵⁸

Eine organisatorische Integration ist insbesondere aufgrund des oft dynamischen Charakters der Produktentwicklung infolge von sich ändernden Anforderungen und Randbedingungen zielführend. Durch die organisatorische Integration kann ein dynamisches Netzwerk entstehen welches sich „[...]selbstständig an jede Form der Auftragsbearbeitung anpassen“ kann.⁵⁹

Technische Integration

Die technische Integration soll die „[...]durchgängige, digitale Entwicklung, Produktion und den Vertrieb[...]“ ermöglichen.⁶⁰

EHRENSPIEL/MEERKAMM nennen in diesem Zusammenhang die Integration von Daten sowie die integrative Eigenschaftsfrüherkennung. Datenintegration kann beispielsweise durch den Einsatz von PDM-Systemen erfolgen sowie der Bereitstellung gemeinsamer Schnittstellen wie CAD-CAM-Schnittstellen erreicht werden. Integrative Eigenschaftsfrüherkennung kann unter anderem durch den Einsatz von Simulation oder Rapid Prototyping erfolgen.⁶¹

⁵⁷ Vgl. Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.197ff.

⁵⁸ Vgl. Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.208f.

⁵⁹ Vgl. Vajna et al. (2009), S.411; Vajna et al. (2009), S.411

⁶⁰ Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.210

⁶¹ Vgl. Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.209f.

VAJNA et al. nennen zusätzlich zum Einsatz von CAx-Systemen und Datenverwaltungssystemen den Einsatz von Bewertungs- und Kommunikationssystemen als Enabler einer technischen Integration.⁶²

2.3 Ausgewählte Modelle und Rahmenkonzepte der Integrierten Produktentstehung

Nach VAJNA/BURCHARDT existiert bisher „[...] weder ein einheitliches Verständnis noch eine einheitliche Definition für die [Integrierte Produktentwicklung] [...]“⁶³. Die Integrierte Produktentwicklung ist der Kern einer Integrierten Produktentstehung – auch für die integrierte Produktentstehung liegt daher keine einheitliche Definition vor. Die folgenden Ausführungen dieses Kapitels sollen einen Überblick zu ausgewählten Modellen und Rahmenkonzepten einer Integrierten Produktentstehung bereitstellen. Dazu werden stellvertretend für die Vielzahl in der Literatur beschriebener Modelle und Rahmenkonzepte die Inhalte und Grundintentionen der „Integrierten Produkt- und Prozessgestaltung“ nach EVERSHEIM/SCHUH/ASSMUS, der „Integrierten Produktentwicklungsmethodik“ nach EHRENSPIEL/MEERKAMM, das „Kooperativen Produktengineering“ nach GAUSEMEIER, das „Integrierte Produktentstehungs-Modell“ nach MEBOLDT sowie die Grundlagen des Simultaneous/Concurrent Engineering vorgestellt.

2.3.1 Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung

EVERSHEIM/SCHUH/ASSMUS beschreiben das Rahmenkonzept der integrierten Produkt- und Prozessgestaltung durch die drei Hauptbereiche Organisation und Informationsmanagement, Integrierte Produktdefinition und Technologieplanung sowie Integrierte Produkt- und Produktionsprozessgestaltung (siehe Abbildung 4). Das Hauptaugenmerk liegt auf den frühen Phasen der Produktentstehung, von der Sammlung erster Informationen aus dem Umfeld bis zur Planung der Fertigung der entwickelten Produkte.⁶⁴

⁶² Vgl. Vajna et al. (2009), S.411

⁶³ Vajna/Burchardt (2014), S.17

⁶⁴ Vgl. Eversheim/Schuh/Assmus (2005), S.11

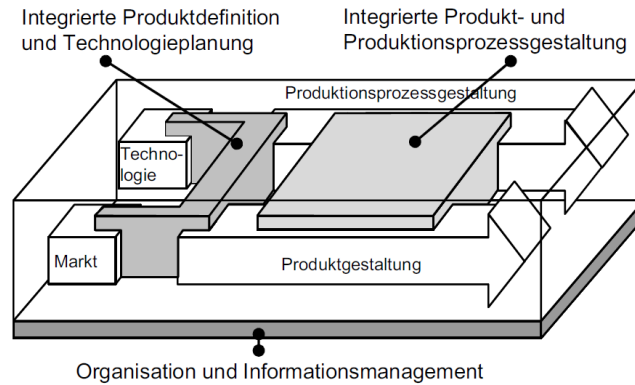


Abbildung 4: Rahmenkonzept der integrierten Produkt- und Prozessgestaltung nach EVERSHEIM/SCHUH/ASSMUS⁶⁵

Organisation und Informationsmanagement

Der Bereich Organisation und Informationsmanagement stellt die Basis des Rahmenkonzeptes dar. Es beschreibt einerseits die Abläufe der integrierten Produkt- und Prozessentwicklung und stellt andererseits das Informationsmanagement bereit. Die Organisation der Entwicklungsteams ist in der Integrierten Produkt- und Prozessgestaltung von maßgeblicher Bedeutung und hat wesentlichen Einfluss auf deren Effizienz. Ein Risikomanagement als Teil des Projektmanagements hat dafür Sorge zu tragen, dass Entscheidungen im Laufe eines Projektes in Bezug auf auftretende Risiken bewertet werden können um im Bedarfsfall entsprechende Maßnahmen hinsichtlich von Zeit-, Kosten- und Kapazitätsaspekten setzen zu können. Im Falle der Einbindung von externen Kooperationspartnern kommt dem Projektmanagement besondere Bedeutung zu. Zu beachtende Aspekte hierbei sind die Bewertung potentieller Partner sowie die Konfiguration des Kooperationsnetzwerkes durch die Planung und Gestaltung des Kooperationsprojektes, die Planung des Projektinhaltes, dessen Aufteilung auf die verschiedenen Kooperationspartner und die Festlegung der organisatorischen Rahmenbedingungen. Insbesondere zur Absicherung der Kooperationsergebnisse werden ein unternehmensübergreifendes Qualitätsmanagementsystem sowie die Einführung eines Controlling-Systems zur begleitenden Identifizierung und Bewertung von Risiken vorgeschlagen.⁶⁶

Das Informationsmanagement unterstützt das Projektmanagement in der Projektarbeit und basiert auf einem integrierten Produkt- und Prozessmodell sowie dem Kommunikationssystem. Das integrierte Produkt- und Prozessmodell erzeugt und speichert Information und Daten. Das Kommunikationssystem hat die Aufgabe, Information und Daten zu verteilen sowie die Verfolgung deren Verteilung, um Wartezeiten und Zeiten der Beschaffung von Daten und Informationen zu minimieren.⁶⁷

⁶⁵ Eversheim/Schuh/Assmus (2005), S.11

⁶⁶ Vgl. Eversheim/Schuh/Assmus (2005), S.11f.

⁶⁷ Vgl. Eversheim/Schuh/Assmus (2005), S.12

Integrierte Produktdefinition und Technologieplanung

„Die integrierte Produktdefinition und Technologieplanung dient der Zusammenführung von Markt-/Kundenbedürfnissen und technologischen Innovationen. Die Kunden- und Umwelтанforderungen sind frühzeitig und systematisch zu erfassen sowie in Form einer Produktdefinition umzusetzen.“⁶⁸

Um langfristigen Trends des Unternehmensumfelds gerecht werden zu können wird ein Frühinformationssystem eingesetzt. Dieses hat die Aufgabe in strategischer Hinsicht relevante Informationen seitens des Kunden und/oder der Umwelt des Unternehmens in diesen Bereich einzubinden. Ein weiterer wesentlicher Bestandteil dieses Bereiches ist eine integrative Qualitätsplanungssystematik. Diese dient der „[...]frühzeitige[n] Definition und Absicherung von Produktmerkmalen[...]“, „[...]der kosten- und umweltorientierten Betrachtung der frühen Phasen der Produktentwicklung“ und stellt „[...]die Schnittstelle zwischen der Definition der Produktmerkmale und der Konstruktion“ dar.⁶⁹

Die Produktdefinition beinhaltet die Produktstrukturierung und die Zuordnung von Merkmalen zu einzelnen Produktstrukturelementen. Dies kann zu komplexen Abhängigkeiten führen und erfordert besondere Aufwendungen hinsichtlich der „[...]Modellierung und Haltung der Daten, um ihre Konsistenz und Verfügbarkeit im Unternehmensnetzwerk sicherzustellen“.⁷⁰

Innovationen im Bereich der Fertigungstechnologien müssen aufgrund ihres starken Einflusses auf die Produktstruktur und die Produktgestaltung frühzeitig in den Prozess der Produktentwicklung integriert werden. Diesbezügliche Informationen können unternehmensintern in Form von unternehmensspezifischen Wissen oder extern von Technologiegebern bereitgestellt werden. Besondere Herausforderungen in diesem Zusammenhang sind der Umgang mit sehr oft unsicheren Informationen und deren Interpretation. EVERSHEIM/SCHUH/ASSMUS schlagen dazu die Einführung eines unternehmensspezifischen Technologiemanagementsystems vor.⁷¹

Die wesentlichen Ergebnisse der integrierten Produktdefinition und Technologieplanung beschreiben EVERSHEIM/SCHUH/ASSMUS mit der Festlegung der Produktstruktur, der Festlegung der Bauteilgestaltung mit der Beschreibung der Parameterausprägungen und deren Beziehungen sowie möglicher Herstellungstechnologien.⁷²

Integrierte Produkt- und Produktionsprozessgestaltung

Die integrierte Produkt- und Produktionsprozessgestaltung verfolgt das Ziel einer „[...]frühzeitigen Abstimmung von Produkten und Produktionsprozessen“. Durch ein frühzeitiges

⁶⁸ Eversheim/Schuh/Assmus (2005), S.13

⁶⁹ Vgl. Eversheim/Schuh/Assmus (2005), S.13f.; Eversheim/Schuh (2005), S.13

⁷⁰ Vgl. Eversheim/Schuh (2005), S.13f.; Eversheim/Schuh (2005), S.14

⁷¹ Vgl. Eversheim/Schuh/Assmus (2005), S.14

⁷² Vgl. Eversheim/Schuh/Assmus (2005), S.14f.

Erkennen von Abhängigkeiten bei der Gestaltung von Produkten und Produktionsprozessen kann eine integrierende Gestaltung beider Bereiche unterstützt werden.⁷³

Aufgrund der Determinierung der Herstellkosten bereits in der frühen Phase der Produktentstehung kommt der integrierten Produkt- und Produktionsprozessgestaltung besondere Bedeutung zu. Zur Bewältigung der gestellten Herausforderung in diesem Bereich beschreiben EVERSHEIM/SCHUH/ASSMUS die Aktivitäten der konstruktionsbegleitenden Prüf-ablauf- und Prüfmitteleinsatzplanung, der Bewertung von Fertigungsfolgen, der Funktionsbewertung und Prototypenfertigung, der Arbeits- und Betriebsorganisation in der frühen Produktionsgestaltung sowie der frühzeitigen Gestaltung der Fertigungsleittechnik. Die Prüf-ablauf- und Prüfmitteleinsatzplanung hat die Aufgabe festgelegte Toleranzen zu definieren, hinsichtlich ihrer Notwendigkeit zu bewerten und eine entsprechende Prüfstrategie zu entwickeln. Unnötig enge Toleranzen haben unter Umständen negativen Einfluss auf die Auswahlmöglichkeit bezüglich der Fertigungsverfahren sowie die Herstellkosten bei gegebenen Fertigungsverfahren. Im Rahmen der Bewertung der Fertigungsfolgen werden für eine gegebene Bauteilgestaltung unterschiedliche Fertigungs- und Technologiefolgen erstellt und bewertet. Die gewonnenen Erkenntnisse können in Abstimmung mit der Konstruktion zu einer Optimierung der Fertigungsfolge hinsichtlich Zeit und Kosten führen. Rapid Prototyping Techniken unterstützen den Prozess der Funktionsbewertung und können den Optimierungsprozess hinsichtlich Materialien und Verfahren beschleunigen. Die Ablauf- und Aufbauorganisation im Rahmen eines Produktentstehungsprozesses wird durch den Einsatz von neuen Produkt- und Fertigungstechnologien beeinflusst. Diese Auswirkungen müssen erhoben und bewertet werden um im Rahmen der Arbeitsorganisation notwendige Anpassungen vornehmen zu können. Revolutionäre Sprünge in Produkt- und/oder Fertigungstechnologien können umfangreiche Anpassungsmaßnahmen bestehender Prozesse mit sich ziehen. Die frühzeitige Abstimmung der Fertigungsleittechnik soll einen reibungslosen Anlauf der Produktion unterstützen.⁷⁴

2.3.2 Integrierte Produkterstellungsmethodik

EHRLENSPIEL/MEERKAMM beschreiben mit der Integrierten Produkterstellungsmethodik (IPE-Methodik) eine „*Methodik zur Produkterstellung unter besonderer Berücksichtigung der Zielsetzung und Zusammenarbeit der daran beteiligten Menschen*“.⁷⁵

Die IPE-Methodik ist prinzipiell für die gesamte Produkterstellung (Entwicklung und Konstruktion, Produktion, Vertrieb, Materialwirtschaft) einsetzbar. Sie basiert auf Erfahrungen der Konstruktionsmethodik und stellt eine Methodik zur Problemlösung innerhalb der Produkterstellung dar. Die Vorteile einer derartigen Methodik sehen EHRLENSPIEL/MEERKAMM in der Erleichterung eines integrierten, abgestimmten, ganzheitlichen, optimalen Handelns durch gemeinsame Begrifflichkeiten, Denkweisen und Methoden der beteiligten Individuen und der daraus resultierenden Entwicklung von besseren Produkten hinsichtlich der Aspekte Qualität, Kosten und Zeit. Sie vergleichen die Situation in

⁷³ Vgl. Eversheim/Schuh/Assmus (2005), S.15; Eversheim/Schuh/Assmus (2005), S.15

⁷⁴ Vgl. Eversheim/Schuh/Assmus (2005), S.15f.

⁷⁵ Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.749

der Produkterstellung mit einem Orchester. Ein Orchester benötigt Notenschriften, einen Orchester-Aufbau und einen durch einen Dirigenten geregelten Prozessablauf um ein Musikstück zum Besten zu geben. Ein Instrument für sich alleine wäre in einem Konzertsaal relativ wirkungslos – ein Orchester füllt dagegen den ganzen Raum. Demnach muss die Gemeinsamkeit von Spezialisten gestärkt werden um ganzheitlich hochwertigere Produkte entwickeln zu können.⁷⁶

EHRENSPIEL/MEERKAMM fassen folgende, notwendige Eigenschaften einer integrierenden Methodik für die Produkterstellung zusammen. Die Methodik soll:⁷⁷

- *produkt- und betriebsspezifisch anpassbar,*
- *für den gesamten Produktlebenslauf (life-cycle) geeignet,*
- *für alle Hauptforderungen geeignet*
- *für alle Unternehmensbereiche gültig, aber bereichsspezifisch ausbaufähig,*
- *dem natürlichen Denken entsprechen, leicht erlernbar, didaktisch günstig*
- *für Anfänger und Fortgeschrittene gleichermaßen geeignet,*
- *in Teilbereichen für die Rechnerunterstützung algorithmisierbar sein,*
- *Unterstützung für durchgängige Denk- und Handlungsprozesse darstellen,*
- *bezüglich sinnvollem Zeit- Arbeitseinsatz flexibel erweiterbar sein.*

Die beteiligten Teilsysteme an der Produktstellung sind das Sachsystem Produkt, das Sachsystem Produktion, das Ziel- und Handlungssystem Mensch, das Ziel- und Handlungssystem Entwicklung und Konstruktion, das Handlungssystem Kunde, das Sachsystem Produktion sowie die Bereiche X, welche alle sonstigen an der Produkterstellung beteiligten Bereiche (Vertrieb, Lieferanten, etc.) beinhalten (siehe Abbildung 5).⁷⁸

⁷⁶ Vgl. Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.325f.

⁷⁷ Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.326

⁷⁸ Vgl. Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.327f.

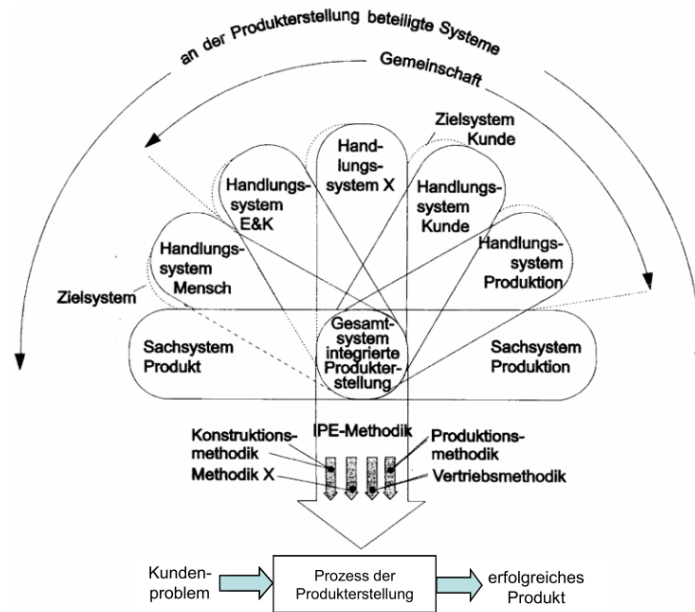


Abbildung 5: Methodik der integrierten Produkterstellung nach EHRENSPIEL/ MEERKAMM⁷⁹

Das Sachsystem Produkt wird durch physikalische und gestalterische Merkmale beschrieben. Das Sachsystem Produktion beinhaltet die Eigenschaften und Lösungsmöglichkeiten der Produktionstechnik zur Produktion des im Sachsystem Produkt beschriebenen Produkts. Das Ziel- und Handlungssystem Mensch beschreibt das an der Produktentstehung beteiligte Individuum (Zielsysteme sind in Abbildung 5 gestrichelt dargestellt). Das Zielsystem Mensch beschreibt die Wünsche und die Motivation, das Handlungssystem Mensch die Fähigkeiten, Kenntnisse und Kompetenzen des Menschen. Der Schnittbereich aller Teilsysteme steht für das Gesamtsystem der IPE. Die IPE umfasst organisatorische und sachgebundene Einzelmethoden zur Unterstützung eines von einem Kundenproblem ausgelösten Produkterstellungsprozesses mit dem Ziel ein erfolgreiches Produkt zu entwickeln.⁸⁰

EHRENSPIEL/MEERKAMM weisen darauf hin, dass der Einsatz von Methodiken nicht starr vorgenommen werden kann, sondern hinsichtlich spezifischer Herausforderungen angepasst werden muss.⁸¹ In diesem Zusammenhang unterscheiden sie sechs Gründe für den flexiblen Einsatz einer Methodik:⁸²

- Ergebnisunsicherheit des Entwicklungsprozesses (z.B. Unvorhersehbarkeit der Abläufe im Entwicklungsprozess)
- Problem- und Zielabhängigkeit (z.B. Unterscheidung in Neu- oder Verbesserungskonstruktion)
- Produktabhängigkeit (z.B. Produktkomplexität)
- Personenabhängigkeit (z.B. Unterschiedlicher Erfahrungsschatz von beteiligten Personen)

⁷⁹ Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.328

⁸⁰ Vgl. Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.327f.

⁸¹ Vgl. Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.331

⁸² Vgl. Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.333ff.

- Umsatz- und Zeitabhängigkeit (z.B. sinnvoller Methodeneinsatz für unterschiedliche Stückzahlen)
- Unternehmensabhängigkeit (z.B. Unternehmensgröße)

2.3.3 Kooperatives Produktengineering

GAUSEMEIER et al. fassen mit dem Begriff des Produktengineering die Bereiche strategische Geschäftsfeldplanung, Produktentwicklung, die Prozessentwicklung sowie deren inhaltliche und zeitliche Verknüpfung zusammen. Der Zweck des Kooperativen Produktengineering ist die effiziente und zeitgerechte Erstellung von Produkten und Dienstleistungen entsprechend der zukünftigen Anforderungen des Marktes.⁸³

Kooperatives Engineering verfolgt drei Zielsetzungen:⁸⁴

- *Frühzeitiges Erkennen der Produkte und der Dienstleistungen für die Märkte von morgen (Strategische Geschäftsfeldplanung).*
- *Entwicklung neuer Problemlösungen für völlig neue Produkte bzw. Steigerung des Preis-Leistungsverhältnisses heute bekannter Produkte auf der Grundlage der Integration von Technologien (z.B. Mechatronik) und neuer Technologien wie Miniaturisierung (Produktinnovation, Produktentwicklung).*
- *Sicherstellung des Produkterfolges und Erhöhung der Umsetzungsgeschwindigkeit durch frühzeitiges Einbeziehen aller Aspekte und Schlüsselpersonen aus dem Produktlebenszyklus*

Die Erreichung der gesetzten Ziele führt über eine Integration der an den beschriebenen Bereichen beteiligten Disziplinen. Kooperatives Produktengineering basiert nach GAUSEMEIER et al. auf Verhaltens- und Verfahrensinnovationen. Verhaltensinnovationen bauen über Grenzen wie Disziplinen, Abteilungen und Unternehmungen hinweg „[...] besonders ausgeprägte Fähigkeiten zu kreativem Denken und Handeln sowie zur zielgerichteten effizienten Zusammenarbeit [...]“ auf und bilden so eine wesentliche Voraussetzung für Produktinnovationen und Umsetzungsstärke. Verfahrensinnovationen stärken die Methodenkompetenz in beschriebenen Bereichen. Verhaltens- und Verfahrensinnovationen können wesentliche Alleinstellungsmerkmale im Vergleich zur Konkurrenz darstellen, da sie verglichen zu Produktinnovationen wesentlich schwerer greif- und imitierbar sind.⁸⁵

In späteren Publikationen von ALBERS/GAUSEMEIER wird für den Begriff des Produktengineering synonym der Begriff der Produktentstehung verwendet. Für die Begriffe der strategischen Geschäftsfeldplanung und Prozessentwicklung werden synonym die Begriffe Strategische Produktplanung und Produktionssystementwicklung verwendet.⁸⁶

⁸³ Vgl. Gausemeier et al. (2000), S.2

⁸⁴ Gausemeier et al. (2000), S.2f.

⁸⁵ Vgl. Gausemeier et al. (2000), S.3f; Gausemeier et al. (2000), S.3

⁸⁶ Vgl. Albers/Gausemeier (2012), S.18f.; Vgl. Albers/Gausemeier (2010), S.248

Die Produktentstehung ist Teil des Produktlebenszyklus und beschreibt „den grundsätzlichen Ablauf von der Produkt- bzw. Geschäftsidee bis zum Serienanlauf“ (siehe Abbildung 2) und gliedert sich demnach in die Hauptaufgabenbereiche Strategische Produktplanung, Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung.⁸⁷

Strategische Produktplanung

Die Strategische Produktplanung „[...]charakterisiert den Ablauf vom Finden der Erfolgspotentiale der Zukunft bis zum Entwicklungsauftrag“ und „[...]umfasst die Tätigkeitsbereiche der Potentialfindung, Produktfindung und Geschäftsplanung“.⁸⁸

Im Rahmen der Strategischen Produktplanung werden die zukünftigen Möglichkeiten einer Unternehmung durch die Feststellung und Abschätzung des Marktbedarfs, der Marktsegmente, der Potentiale, sowie der Entwicklung des technologischen und wirtschaftlichen Umfelds beschrieben.⁸⁹

Die Potentialfindung befasst sich mit der Identifikation zukünftiger Erfolgspotentiale und der Ableitung darauf ausgerichteter Handlungsoptionen. Darauf aufbauend ist es Aufgabe der Produktfindung, mögliche Produkte und/oder Dienstleistungen abzuleiten und diese in Form von Anforderungen zu beschreiben. Die Geschäftsplanung beschäftigt sich mit Fragestellungen hinsichtlich der Geschäfts- und Produktstrategie. Basierend auf den Ergebnissen der Geschäftsplanung wird als Ergebniss der Entwicklungsauftrag abgeleitet.⁹⁰

Produktentwicklung

Die Produktentwicklung umfasst „[...]die Produktkonzipierung, den fachspezifischen Entwurf und die entsprechende Ausarbeitung sowie Integration der Ergebnisse der einzelnen Fachdisziplinen zu einer Gesamtlösung“.⁹¹

Das Ergebnis der Produktentwicklung ist die Beschreibung und Dokumentation des Produktes. Diese beinhaltet eine detaillierte, exakte und verbindliche Beschreibung des Produkts hinsichtlich technischer Funktionsfähigkeit, Kosten, Qualität und Zeit und bildet so die Basis zur Beurteilung der Machbarkeit hinsichtlich wirtschaftlicher und technischer Aspekte.⁹²

Produktionssystementwicklung

Die Produktionssystementwicklung beginnt mit einer Konzipierungsphase unter der integrativen Beachtung der Aspekte der Arbeitsablaufplanung, Arbeitsmittelplanung, Arbeitsstättenplanung und Produktionslogistik. Die Konzipierungsphase ist auf Grund der wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen Produkt und Produktionssystem in Abstimmung mit der Produktkonzipierung durchzuführen. Auf Basis des mit der Produktkonzipierung

⁸⁷ Albers/Gausemeier (2012), S.18

⁸⁸ Albers/Gausemeier (2012), S.19

⁸⁹ Vgl. Albers/Gausemeier (2012), S.18f.

⁹⁰ Vgl. Albers/Gausemeier (2012), S.19

⁹¹ Albers/Gausemeier (2012), S.20

⁹² Vgl. Albers/Gausemeier (2012), S.20

abgestimmten Konzeptes erfolgt die Ausarbeitung der Ergebnisse getrennt nach den vier Aspekten.⁹³

Die beschriebenen Teilbereiche der Produktentstehung sind jedoch nicht als eindeutige, aufeinanderfolgende Phasen zu verstehen, sondern sind als großes Ganzes zu betrachten. Durch die Integration der Phasen entstehen die Integrationsbereiche Strategische Produktentwicklung, Strategische Produktionssystementwicklung, Integrierte Produkt- und Produktionssystementwicklung sowie Systems Engineering als Kooperationskern (Abbildung 6).⁹⁴

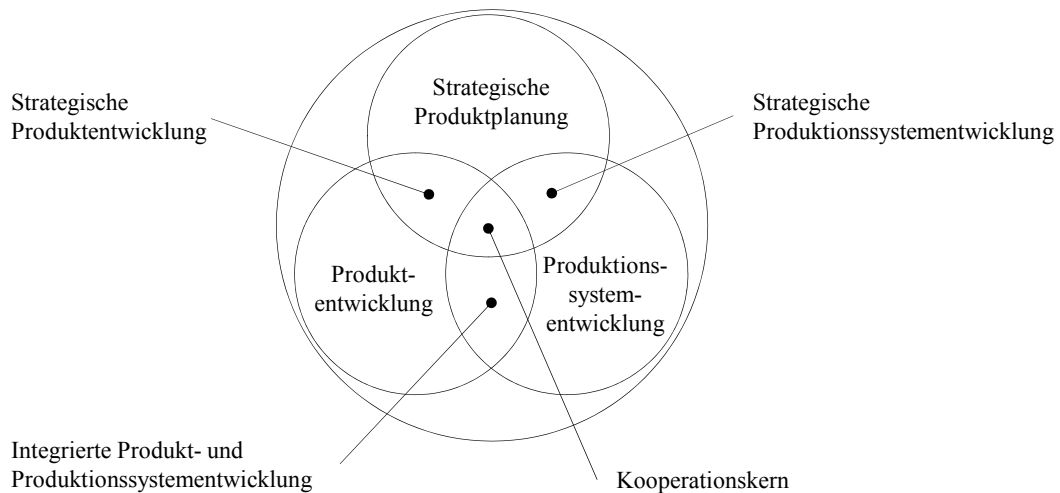


Abbildung 6: Integrationsbereiche des Themenfeldes Innovationsprozesse und Produktentwicklung nach GAUSEMEIER et al.⁹⁵

Strategische Produktentwicklung

„Gegenstand dieser Schnittmenge aus strategischer Produktplanung und Produktentwicklung ist die Entwicklung von Produkten und komplementären Dienstleistungen gemäß eines auf unternehmerischen Erfolgspotenzialen basierenden Geschäftsplanes.“⁹⁶

Strategische Produktionssystementwicklung

Das Ziel der strategischen Produktionssystementwicklung ist die „[...] langfristige, gezielte Herausbildung und Entwicklung produktionstechnischer Kernkompetenzen“. Hierfür müssen die Entwicklungen des produktionstechnischen Unternehmenspotentials aufgezeigt, mit den Unternehmenszielen abgeglichen und bei Bedarf eine Erweiterung der Prozessfähigkeit veranlasst werden.⁹⁷

⁹³ Vgl. Albers/Gausemeier (2012), S.20

⁹⁴ Vgl. Albers/Gausemeier (2012), S.21

⁹⁵ Vgl. Gausemeier et al. (2000), S.18; Vgl. Albers/Gausemeier (2010), S.251; eigene Darstellung

⁹⁶ Gausemeier et al. (2000), S.18

⁹⁷ Vgl. Gausemeier et al. (2000), S.18; Gausemeier et al. (2000), S.18

aller Prozesse der Produktentstehung durch die Beschreibung der Syntax sowie den Methoden, Werkzeugen und Ressourcen für den Einsatz im Rahmen der Produktentstehung.¹⁰³

Die Syntax wird durch die „SPALTEN-Aktivitätsmatrix“ beschrieben. Die SPALTEN-Aktivitätsmatrix ist ein Metamodell der Aktivitäten des Produktentstehungsprozesses und beschreibt diesen durch 70 Aktivitäten. Diese Aktivitäten entstehen aus der Überlagerung von Mikro- und Makroaktivitäten.¹⁰⁴

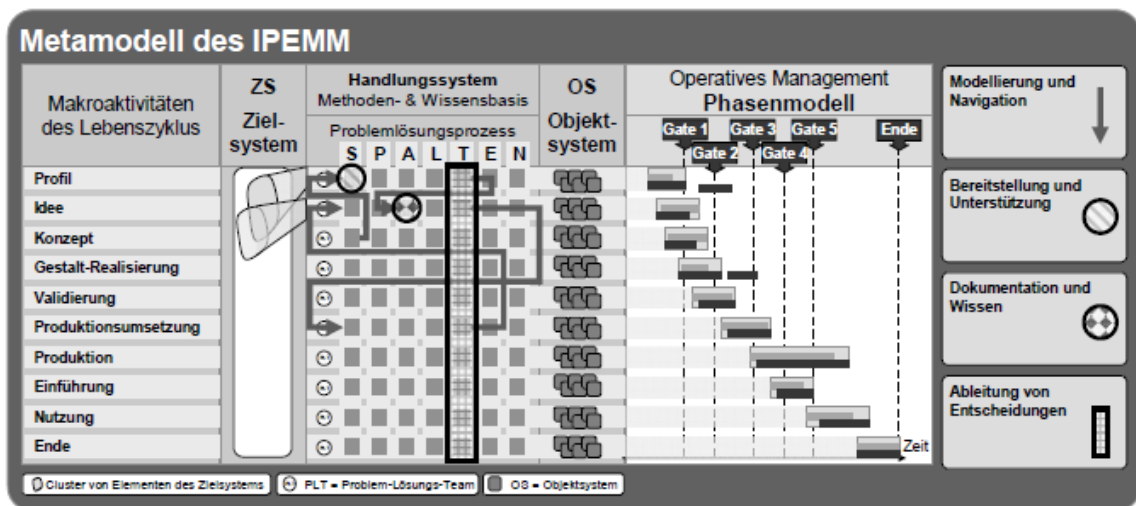


Abbildung 8: Metamodell in der Produktentstehung¹⁰⁵

Der SPALTEN-Prozess ist ein ganzheitlicher Problemlösungsprozess für komplexe Problemstellungen.¹⁰⁶ Das Akronym SPALTEN steht für die sieben Module:¹⁰⁷

- Situationsanalyse
- Problemeingrenzung
- Alternative Lösungssuche
- Lösungsauswahl
- Tragweitenanalyse
- Entscheiden und Umsetzen
- Nacharbeiten und Lernen

Die genannten sieben Module stellen die Mikroaktivitäten dar.¹⁰⁸ Die Makroaktivitäten sind von den Phasen des Produktentstehungsprozesses nach ALBERS abgeleitet.¹⁰⁹ Diese Phasen wurden zu folgenden zehn Makroaktivitäten weiterentwickelt:¹¹⁰

¹⁰³ Vgl. Meboldt (2008), S.204

¹⁰⁴ Vgl. Meboldt (2008), S.173

¹⁰⁵ Meboldt (2008), S.204

¹⁰⁶ Vgl. Albers/Meboldt (2007), S.4ff.

¹⁰⁷ Albers/Saak/Burkhardt (2002), zitiert in: Albers et al. (2005), S.4

¹⁰⁸ Vgl. Albers/Meboldt (2007), S.4

¹⁰⁹ Vgl. Albers/Burkardt (1998), S.3

¹¹⁰ Vgl. Meboldt (2008), S.161ff.; Meboldt (2008), S.161ff.

- Aktivitäten des **Profils**:
„[...] Schaffung der ökonomischen Grundlage für das Produkt aus Sicht des Marktes und der Kunden“
- Aktivitäten der **Idee**:
Erzeugung, Darlegung und Dokumentation von Lösungen
- Aktivitäten des **Konzepts**:
„[...] hinreichende Darlegung der technisch-wirtschaftlichen Machbarkeit“
- Aktivitäten der **Gestalt-Realisierung**:
„[...] Umsetzung, Dokumentation und Beschreibung des Produkts [mit verbindlichen und exakten] Aussagen bezüglich Kosten, Qualität und Zeit“
- Aktivitäten der **Validierung**:
Laufender Abgleich der Eigenschaften des Zielsystems mit den einzelnen Objektsystemen durch Simulation und Experiment
- Aktivitäten der **Produktionsumsetzung**:
„[...] Entwicklung der Produktionsanlagen und der dazu nötigen Ressourcen und Infrastruktur“
- Aktivitäten der **Produktion**:
„[...] Herstellung und Auslieferung des Produkts“
- Aktivitäten der **Einführung**:
„[...] Marketingmaßnahmen und der Aufbau der Infrastruktur zwischen Kunde und Anbieter [...]“
- Aktivitäten der **Nutzung**:
Erfüllung des Kundenwunsches sowie der geforderten Qualität, Umsatzgenerierung, Erkenntnisgewinn aus der Nutzung

Die Makroaktivitäten stellen nicht die sequentielle Abfolge eines Entwicklungsprozesses dar. Die Abfolge wird erst durch die Anwendung festgelegt. Prinzipiell kann ein Entwicklungsprozess unterschiedliche Startaktivitäten aufweisen.¹¹¹

Eine praktische Anwendung des iPeM wird in Abschnitt 3.5 am Beispiel der Entwicklung einer Felge aus Faserverbundkunststoffen beschrieben.

2.3.5 Concurrent / Simultaneous Engineering

Die Begriffe des Simultaneous Engineering (SE) und Concurrent Engineering (CE) finden in der Literatur häufig synonym Verwendung. SE und CE kommen zur organisatorischen Integration im Rahmen einer integrierten Produktentstehung zum Einsatz¹¹².

Eine mögliche grundsätzliche Unterscheidung zwischen SE und CE kann basierend auf deren Schwerpunkten getroffen werden. Das Concurrent Engineering verfolgt demnach das primäre Ziel der Integration von technologischen und organisatorischen Schnittstellen im

¹¹¹ Vgl. Meboldt (2008), S.162

¹¹² Vgl. Vajna et al. (2009), S.411

Produktentstehungsprozess. Das Simultaneous Engineering legt hingegen Hauptaugenmerk auf die Gleichzeitigkeit von einzelnen Schritten im Produktentstehungsprozess.¹¹³

EHRENSPIEL/BOCHTLER/LAUFENBERG verweisen auch im Zusammenhang mit SE auf dessen integrativen Charakter. Demnach ist „*Simultaneous Engineering [...] die integrierte und zeitparallele Abwicklung der Produkt- und Prozessgestaltung [...]*“.¹¹⁴

BERNDES/STANKE verweisen darauf, dass die Unterschiede zwischen beiden Methoden nicht signifikant sind und verwenden zur Betonung dieses Sachverhalts den Begriff des „Concurrent Simultaneous Engineering“ (CSE).¹¹⁵ EHRENSPIEL et al. verweisen auf die häufigere Verwendung des Begriffs Concurrent Engineering im englischsprachigen Raum.¹¹⁶

Im Rahmen dieser Arbeit kommen beide Begrifflichkeiten synonym zur Anwendung.

Der Einsatz von SE verfolgt das Ziel der Optimierung des sogenannten „magischen Dreiecks“ der Produktentwicklung aus Kosten, Zeit und Qualität. Diese Optimierung kann durch die Verkürzung der Time-to-Market, der Reduzierung von Entwicklungs- und Herstellungskosten sowie die Verbesserung von Produkt-, Prozess und Planungsqualität erreicht werden.¹¹⁷

SE basiert auf den drei wesentlichen Leitsätzen Parallelisierung, Integration und Standardisierung. Der Fokus der Parallelisierung von Teilprozessen im Produktentstehungsprozess liegt auf der Reduktion der Zeitdauer des Gesamtprozesses (siehe Abbildung 9). Voneinander unabhängige Teilprozesse können prinzipiell parallel durchgeführt werden. Im Produktentstehungsprozess bestehen jedoch häufig Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Teilprozessen. Bestehen Abhängigkeiten, so erfolgt im Zuge einer Parallelisierung der Start des abhängigen Teilprozesses auf Basis unvollständiger Daten und Informationen. Dies führt jedoch nicht zwangsläufig zu einer schlechteren Ergebnisqualität des nachgelagerten Schrittes, da für dessen Start meist nicht alle Ergebnisse des vorgelagerten Schrittes vorliegen müssen.¹¹⁸

In diesem Fall können gute Kommunikation zwischen den beteiligten Individuen sowie die abgestimmte Festlegung vorläufiger Annahmen einen wesentlichen Beitrag leisten.¹¹⁹

¹¹³ Vgl. Berndes/Stanke (1996), S.15

¹¹⁴ Vgl. Eversheim et al. (1995), S.2; Eversheim et al. (1995), S.2

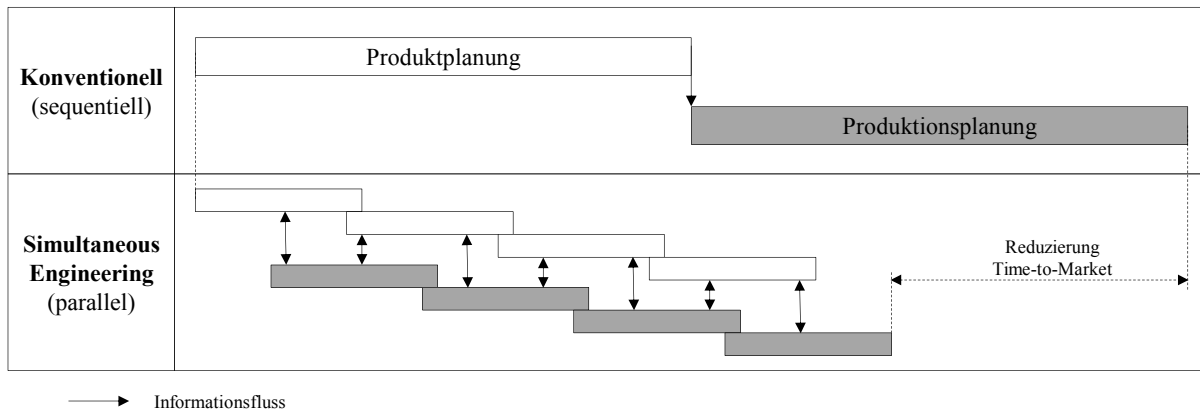
¹¹⁵ Vgl. Berndes/Stanke (1996), S.15

¹¹⁶ Vgl. Ehrlenspiel et al. (2014), S.47

¹¹⁷ Vgl. Eversheim/Bochtler/Laufenberg (1995), S.2ff.; Vgl. Berndes/Stanke (1996), S.18

¹¹⁸ Vgl. Berndes/Stanke (1996), S.18f.

¹¹⁹ Vgl. Ehrlenspiel et al. (2014), S.47

Abbildung 9: Systematik des Simultaneous Engineering¹²⁰

Die Parallelisierung abhängiger Teilprozesse führt zu häufigeren und komplexeren Entscheidungssituationen aufgrund des erhöhten Bedarfs an Informationen, deren Austausch sowie einer teils unsicheren und unvollständigen Datenbasis. Durch die parallele Abarbeitung der einzelnen Teilprozesse kann zusätzlich zur Zeiteinsparung jedoch auch eine Reduktion von Änderungskosten in späteren Phasen des Produktentstehungsprozesses aufgrund der intensiveren Abstimmung der beteiligten Akteure erreicht werden.¹²¹

Auf den Leitsatz der Integration wurde bereits in Abschnitt 2.2 eingegangen.

Standardisierung kann einerseits hinsichtlich der Strukturierung von Prozessen und andererseits hinsichtlich der Strukturierung des zu entwickelnden Produktes erfolgen. BERNDES/STANKE unterscheiden Aspekte der Standardisierung in technisch strukturelle (Module, Bauteile, Schnittstellen), in prozessuale (Phasen, Ablauforganisation) sowie in aufbauorganisatorische Aspekte (Schnittstellen von Abteilungen und Projekten). Standardisierung liefert einen Beitrag zur Vermeidung der Wiederholung von Tätigkeiten sowie der Vermeidung von unnützen Tätigkeiten. BERNDES/STANKE sehen in der Standardisierung die wesentliche Basis für die erfolgreiche Umsetzung von Parallelisierung und Integration im Rahmen des CSE durch die Sicherstellung von Transparenz und Stabilität.¹²²

ANDREASEN verweist darauf, dass ein Vorgehen im Sinne des SE immer der jeweiligen Situation angepasst werden muss. „Für das Management von Integration bzw. Simultaneous und Concurrent Engineering gibt es kein Patentrezept.“¹²³

WARD et al. unterscheiden zwischen “Point-based Concurrent Engineering” (PBCE) und “Set-based Concurrent Engineering” (SBCE).¹²⁴

¹²⁰ Vgl. Eversheim/Bochtler/Laufenberg (1995), S.2; eigene Darstellung

¹²¹ Vgl. Berndes/Stanke (1996), S.19ff.

¹²² Vgl. Berndes/Stanke (1996), S.21f.

¹²³ Vgl. Andreasen (2005), S.294; Andreasen (2005), S.294

¹²⁴ Vgl. Ward et al. (1995), S.44

Point-based Concurrent Engineering

Der Begriff des Point-based Concurrent Engineering steht für den traditionellen, iterativen Ansatz des CE, welcher sich aus dem sequentiellen Ansatz der Produktentwicklung entwickelt hat.¹²⁵

„Point-based“-Ansätze sind durch die Entwicklung von einem Punkt/einer Lösung zum nächsten Punkt/einer Lösung im Lösungsraum gekennzeichnet (Abbildung 10).¹²⁶

Beim Point-based Serial Engineering werden in unterschiedlichen Phasen des Entwicklungsprozesses Lösungen auf Basis der Lösung der vorangegangenen Phasen in sequenzieller Abfolge erarbeitet (Abbildung 10). Die nachgelagerten Phasen haben keinen Einfluss auf die Vorhergehenden. Durch falsch getroffene Entscheidungen können umfangreiche Iterationsschleifen über mehrere Phasen des sequentiellen Prozesses erforderlich werden.¹²⁷

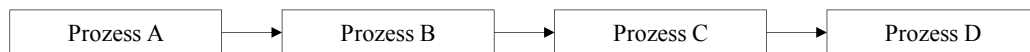


Abbildung 10: Point-based Serial Engineering¹²⁸

Beim PBCE haben nachgelagerte Phasen die Möglichkeit auf vorgelagerte Aktivitäten auf Basis ihrer Expertise Einfluss zu nehmen (Abbildung 11). Durch diese Feedback-Schleifen, bereits in frühen Phasen, können nötige Änderungen mit geringerem Aufwand und kostengünstiger vorgenommen werden. Auch beim PBCE wird jedoch an einer einzelnen Lösung gearbeitet welche Schritt für Schritt weiterentwickelt wird.¹²⁹

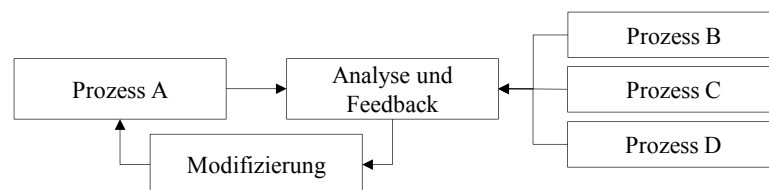


Abbildung 11: Point-based Concurrent Engineering¹³⁰

Set-based Concurrent Engineering

Wesentliche Merkmale des SBCE sind die Betrachtung von sogenannten Sets an Lösungsmöglichkeiten über mehrere Phasen des Entwicklungsprozesses und die späte Festlegung auf die finale Lösung¹³¹. WARD et al. bezeichnen den Einsatz von SBCE bei

¹²⁵ Vgl. Ward et al. (1995), S.44

¹²⁶ Vgl. Ward et al. (1995), S.44

¹²⁷ Vgl. Sobek Ii/Ward/Liker (1999), S.69

¹²⁸ Vgl. Sobek Ii/Ward/Liker (1999), S.69; eigene Darstellung

¹²⁹ Vgl. Sobek Ii/Ward/Liker (1999), S.69

¹³⁰ Vgl. Sobek Ii/Ward/Liker (1999), S.69; eigene Darstellung

¹³¹ Vgl. Sobek Ii/Ward/Liker (1999), S.68

Toyota auch als das „Zweite Toyota Paradoxon“ (das Toyota Produktionssystem gilt als das Erste Toyota Paradoxon)¹³².

Abbildung 12 zeigt die Grundzüge des SBCE an einem einfachen Beispiel der Abstimmung der Bereiche Konstruktion und Entwicklung sowie der Produktion. In einem ersten Schritt erfolgt der Abgleich des Sets an Gestaltungsvarianten der Konstruktion und Entwicklung mit dem Set der produzierbaren Gestaltungsvarianten der Produktion. Die Überschneidung beider Sets grenzt den prinzipiellen, für beiden Seiten machbaren Lösungsraum ein. Mit fortlaufendem Projektfortschritt werden unter Einhaltung unten beschriebener Prinzipien weitere Festlegungen getroffen. Dies führt zu einer Einengung des Lösungsraumes über die Zeit bis hin zur finalen Lösungsausgestaltung unter der Wahrung der Interessen der beteiligten Bereiche.

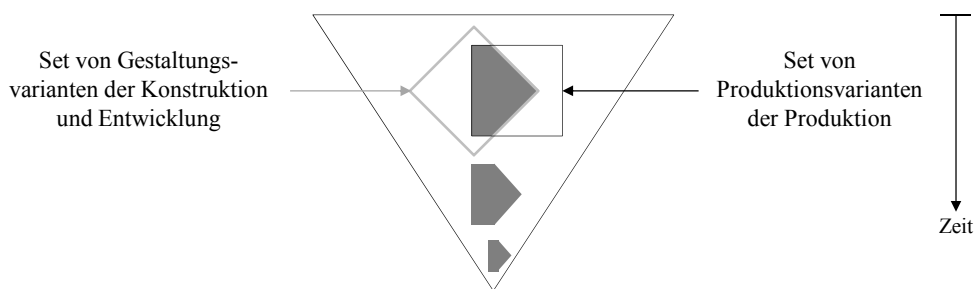


Abbildung 12: Set-based Concurrent Engineering¹³³

SOBEK II et al. beschreiben in einer späteren Publikation drei Grundprinzipien des SBCE:¹³⁴

- *[Principle] 1: Map the design space.*
 - *Define feasible regions.*
 - *Explore trade-offs by designing multiple alternatives. Communicate sets of possibilities.*
 - *Communicate sets of possibilities.*
- *[Principle] 2: Integrate by Intersection.*
 - *Look for intersections of feasible sets.*
 - *Impose minimum constraint.*
 - *Seek conceptual robustness.*
- *[Principle] 3: Establish Feasibility before Commitment.*
 - *Narrow sets gradually while increasing detail.*
 - *Stay within sets once committed.*
 - *Control by managing uncertainty at process gates.*

WARD et al. sehen mehrere Vorteile des Einsatzes von Set-based Concurrent Engineering. SBCE führt zu effizienter Kommunikation der beteiligten Parteien, unterstützt die Parallelisierung von Prozessen, stützt frühe Entscheidungen auf Daten durch die

¹³² Vgl. Ward et al. (1995), S.44

¹³³ In Anlehnung an: Sobek II/Ward/Liker (1999), S.70; eigene Darstellung

¹³⁴ Sobek II/Ward/Liker (1999), S.73

Untersuchung möglicher Sets an Lösungen, unterstützt interorganisationales Lernen und führt zur tieferen Betrachtung unterschiedlicher Lösungsvarianten im Projektablauf.¹³⁵

2.4 Zusammenfassung

„Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“

(Aristoteles)

Ein Produktentstehungsprozess, von der Geschäftsidee bis zum SOP, kann zusammenfassend im Wesentlichen durch die Elemente Markt, Technologie, Produkt, Produktion und Mensch beschrieben werden. Abbildung 13 zeigt die Produktentstehung im Spannungsfeld der beeinflussenden Elemente und illustriert die Vernetzung der Elemente zueinander.

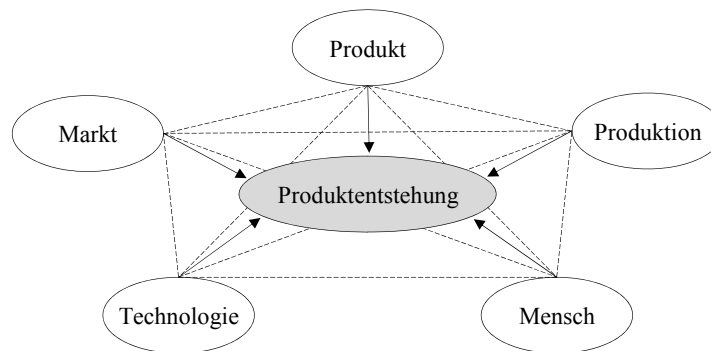


Abbildung 13: Die Produktentstehung im Spannungsfeld der beeinflussenden Elemente¹³⁶

Es gilt, entsprechend den Anforderungen des Marktes/der Kunden, unter Einsatz der richtigen Technologien, die richtigen Produkte richtig zu entwickeln und diese richtig zu produzieren. Hierbei stellt sich die Frage „Was ist richtig?“. Die Antwort auf diese Frage lässt sich für die einzelnen Elemente, unter isolierter Betrachtung, verhältnismäßig einfach finden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass eine einfache Summation der isoliert ermittelten Antworten nicht zu einem „Richtig“ im Sinne eines Gesamtoptimums für den Produktentstehungsprozess führt. Die Beantwortung der Einzelfragen muss in Abstimmung aller Elemente erfolgen.

Eine Integration im Rahmen des Produktentstehungsprozesses verfolgt das Ziel, die Entscheidungsprozesse von einer isolierten und/oder sequentiellen Betrachtung zu einer abgestimmten und/oder parallelen Betrachtung zu führen.

Die vorgestellten Modelle und Rahmenkonzepte der integrierten Produktentstehung können hierbei als Basis für eine Implementierung herangezogen werden. Diese müssen jedoch generell auf die kontextspezifischen Bedürfnisse eines Unternehmens abgestimmt und angepasst werden.

¹³⁵ Vgl. Ward et al. (1995), S.57f.

¹³⁶ Eigene Darstellung

3 Faserverbundkunststoffe

Faserverbundkunststoffe gehören zur Gruppe der Verbundwerkstoffe (engl. Composite).¹³⁷ Unter einem Verbundwerkstoff versteht man einen „Feststoff bestehend aus zwei oder mehr unterschiedlichen Phasen, umfassend eine Matrix und eine aus Teilchen oder Fasern bestehende Phase. (Es werden auch Feststoffe aus zwei oder mehr Schichten unterschiedlicher Materialien wie Kunststofffolien oder –platten, Holz, Metall, Schaumstoff usw. mit oder ohne Klebstoffzwischenlagen als Verbundwerkstoffe bezeichnet.)“.¹³⁸

SCHÜRMANN weist darauf hin, dass FVK eigentlich Konstruktionen im Sinne der Verbund-Konstruktion sind (siehe dazu auch die späteren Ausführungen zur Verbundbauweise in Abschnitt 4.2).¹³⁹

Außerhalb der Fachwelt der Faserverbundkunststoffe wird fälschlicherweise oft von Kohlefaserbauteilen oder Bauteilen aus Glasfasern gesprochen. Diese Bezeichnungen meinen jedoch immer Bauteile aus Faserverbundkunststoffen mit Verstärkungen, in den genannten Fällen in Form von Kohlenstoff- bzw. Glasfasern.¹⁴⁰

In den Ausführungen dieser Arbeit wird der auch in der Ausgabe des „Handbuch Faserverbundkunststoffe“ aus dem Jahr 2014, herausgegeben durch die „AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V.“, verwendete Begriff der Faserverbundkunststoffe bzw. die Abkürzung FVK verwendet.

3.1 Grundlagen der Faserverbundkunststoffe

Fasern können sehr hohe Belastungen in Zugrichtung aufnehmen. Sie sind jedoch nicht geeignet Biege- und/oder Schubbelastungen aufzunehmen. Die Herstellung von Bauteilen nur aus Fasern ist also nur in einem engen Bereich möglich und sinnvoll. Bauteile aus Kunststoffen können sowohl Zug-, Biege- und Schubbelastungen aufnehmen, sind jedoch in ihrem Einsatz infolge relativ niedriger technologischer Eigenschaften beschränkt, Bauteile für hohe Belastungen darzustellen.¹⁴¹

Der Einsatz von Faserverbundkunststoffen bietet im Vergleich zu klassischen isotropen Konstruktionswerkstoffen besondere konstruktive Möglichkeiten. Durch die Möglichkeit der maßgeschneiderten Kombination von Matrix und Phase(n) sind Werkstoffe mit anwendungsoptimierten Eigenschaften darstellbar. Die Abstimmung der Produktgestaltung

¹³⁷ Vgl. Avk (2014), S.33

¹³⁸ Vgl. Avk (2014), S.32

¹³⁹ Vgl. Schürmann (2007), S.13

¹⁴⁰ Vgl. Avk (2014), S.33

¹⁴¹ Vgl. Avk (2014), S.33

mit den Produktionsprozessen ist hierbei von besonderer Wichtigkeit um einen effizienten Materialeinsatz zu gewährleisten.¹⁴²

Um den Einsatz von FVK zu etablieren ist es nötig zusätzlich zum Dichtevorteil auch dessen spezifischen Vorteile im Sinne einer faserverbundgerechten Konstruktion zu nutzen.

SCHÜRMANN nennt in diesem Zusammenhang beispielsweise die Möglichkeit der gezielten Einstellung von Steifigkeiten und Festigkeiten, die Nutzung des schichtweisen Aufbaus von Laminaten oder die Nutzung des besonderen thermischen Verhaltens. Steifigkeiten und Festigkeiten können durch die Auswahl des Fasertyps, der Matrix, des Faservolumengehalts, durch Kombination verschiedener Faserorientierungen oder die Gestaltung der Schichtenreihenfolge beeinflusst werden. Der schichtweise Aufbau von Laminaten kann zur Anpassung von Wandstärken an Belastungsverläufe, zur Einbringung von Verstärkungen oder Funktionsschichten (z.B. Metallgewebe als Blitzschutz) benutzt werden. Das thermische Verhalten kann zum Ausgleich der thermischen Ausdehnung von eingebrachten Metallbauteilen herangezogen werden.¹⁴³

In der Literatur wird eine Vielzahl möglicher Vorteile von FVK-Strukturen im Vergleich zu traditionellen metallischen Konstruktionswerkstoffen beschrieben. Nachfolgende Aufzählung bietet eine Auswahl genannter Aspekte:¹⁴⁴

- Hohe dichte-spezifische Festigkeit und Steifigkeit
- Freie Formgestaltung
- Hohes Potential hinsichtlich des Einsatzes der Integralbauweise
- Hohe Chemikalien und Korrosionsbeständigkeit
- Hohe Dauerfestigkeit
- Hohe UV- und Witterungsbeständigkeit
- Geringe Wärmeleitfähigkeit
- Einstellbare elektrische Eigenschaften (Bandbreite vom Isolator bis zum Leiter)
- Hohes dichte-spezifisches Energieaufnahmevermögen (z.B. für Crash-Elemente)
- Vorteile bei Betrachtung einer Gesamt-Energiebilanz durch Einsparungspotentiale in der Nutzungsphase durch den Einsatz im Sinne des Leichtbaus
- Umsetzbarkeit von Bauteilen in Kleinserie

Der primäre Nachteil des Einsatzes von FVK als Leichtbauwerkstoff ist der im Vergleich zu klassischen, metallischen Konstruktionswerkstoffen höhere Materialpreis.¹⁴⁵ Abbildung 14 zeigt einen Gewichts- und Kostenvergleich von Strukturbauteilen für Automobile (Stand 2012).

¹⁴² Vgl. Edwards (1998), S.1

¹⁴³ Vgl. Schürmann (2007), S.631ff.

¹⁴⁴ Vgl. Evertz et al. (2013), S.397; Vgl. Moeller (2014), S.770; Vgl. Schürmann (2007), S.4f.

¹⁴⁵ Vgl. Schürmann (2007), S.5

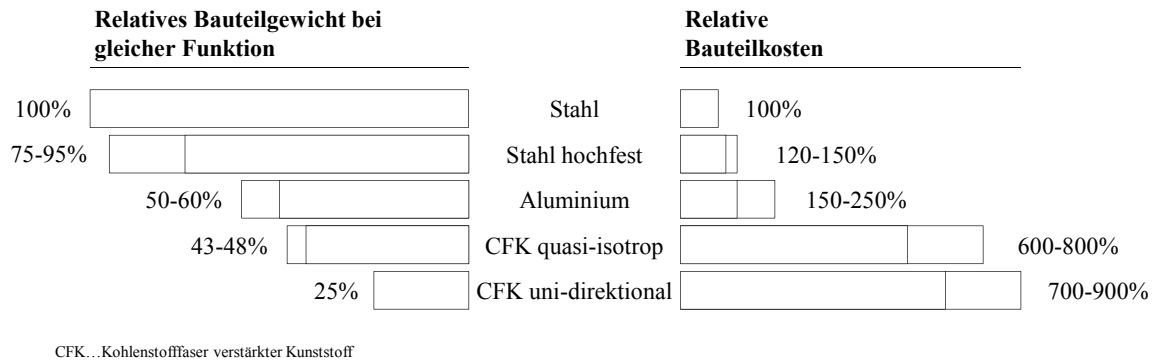


Abbildung 14: Gewichts- und Kostenvergleich verschiedener Konstruktionswerkstoffe für Strukturbauteile im Automobilbau¹⁴⁶

Die grundlegenden, in der Literatur beschriebenen, Einflussfaktoren auf die Eigenschaften eines Faserverbundkunststoffes können wie folgt zusammengefasst werden:¹⁴⁷

- der Fasertyp
- die Orientierung der Fasern
- der Faservolumengehalt
- die Verteilung der Fasern
- die Größe und Form der Faser
- die Verbindung von Faser und Matrix
- der Matrixtyp
- die Belastungsrichtung
- Gehalt an Poren (Lufteinschlüsse)

Genannte Einflussfaktoren werden in unterschiedlichen Phasen des Produktentstehungsprozesses wirksam. Nachfolgend erfolgt die grundsätzliche Beschreibung des PEP von FVK-Bauteilen inklusive der Beschreibung genannter Einflussfaktoren.

3.2 Der Produktentstehungsprozess von FVK-Bauteilen

Durch den Einsatz von Faserverbundkunststoffen können gezielt, an bestehende Anforderungen angepasste, Werkstoffe geschaffen werden. Diese Möglichkeit stellt einen der größten Mehrwerte von FVK dar, zugleich entstehen daraus resultierend aber auch große Herausforderungen. Die große Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten von Materialien (Matrix- und Fasermaterialien), Produktionsverfahren und geometrischer Bauteilausführung verursachen komplexe Entscheidungszusammenhänge im Laufe des Produktentstehungsprozesses. Die bei klassischen, isotropen Werkstoffen üblichen

¹⁴⁶ Lässig et al. (2012), S.14; eigene Darstellung

¹⁴⁷ Vgl. Edwards (1998), S.2ff.; Vgl. Moeller (2014), S.770

Vorgehensweisen sind nur beschränkt einsetzbar, da beispielsweise Materialkennwerte nicht wie üblich Diagrammen oder Tabellen entnommen werden können.¹⁴⁸

Bei der Entwicklung von FVK-Bauteilen ist es nicht möglich bzw. nicht zielführend Entscheidungen bzgl. des Materials, des Herstellungsprozesses sowie der Bauteilgestaltung einzeln ohne Beachtung ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten zu treffen¹⁴⁹.

3.2.1 Bauteilgestaltung und -auslegung

Besondere Bedeutung kommt der Bauteilgestaltung zu. Diese beinhaltet zusätzlich zur Formgestaltung des Bauteils auch die Gestaltung des Werkstoffes durch einen bestimmten Materialaufbau und bestimmt dadurch die Werkstoffeigenschaften im Anwendungsfall für eine spezifische Materialkombination (Matrix-/Verstärkungs-Material(lien)).¹⁵⁰

Die Besonderheit im Vergleich zur Entwicklung von Bauteilen aus klassischen, isotropen Werkstoffen wie Stahl oder Aluminium liegt darin, dass es im Bereich der FVK eine größere Anzahl von Freiheitsgraden wie z.B. die Wahl der Faser-Matrix-Kombination, die Faserorientierung, der Faservolumengehalt sowie die Wahl des geeigneten Fertigungsprozesses gibt (siehe Abbildung 15).¹⁵¹

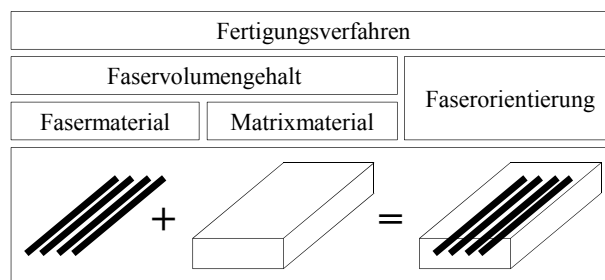


Abbildung 15: Einflussgrößen auf die Eigenschaften eines verstärkten Werkstoffes¹⁵²

Bedingt durch die Wechselwirkungen des Faserverbundkunststoffes mit der geometrischen Gestaltung eines Bauteiles, sind Untersuchungen und der Nachweis von Materialeigenschaften an Bauteilen selbst durchzuführen und können nicht an vereinfachten oder standardisierten Proben erfolgen.¹⁵³

Der Bauteilentwicklungsablauf von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund nach VDI 2014/Blatt 2

Die VDI Richtlinie 2014/Blatt 2 gibt eine Empfehlung zur Bauteilentwicklung in Form eines Vorgehensplanes (siehe Abbildung 16). Dieser beschreibt ein mehrphasiges Vorgehen beginnend mit der Konzeptphase (Phase 0), der Konstruktionsentwicklung (Phase 1 und 2),

¹⁴⁸ Vgl. Wilkins/Karbhari (1991), S.259

¹⁴⁹ Vgl. Henshaw (1989); zitiert in: Wilkins/Karbhari (1991), S.259

¹⁵⁰ Vgl. Wilkins/Karbhari (1991), S.259

¹⁵¹ Vgl. Wiedemann (2009a), S.2; Vgl. Avk (2014), S.295

¹⁵² Avk (2014), S.295; eigene Darstellung

¹⁵³ Vgl. Eichseder/Schöneburg (2013), S.141

der Qualifikation (Phase 3) bis zur Produktion eines Serienbauteils (Phase 4). Die Ergebnisse der einzelnen Phasen in aufsteigender Reihenfolge sind eine Studie, die Definition, der Nachweis, die Verifikation sowie das nutzbare Bauteil für die Serie. Den beschriebenen Phasen werden Aufgaben in den Teilbereichen Konstruktion (zeichnerische Darstellung und Strukturanalyse) und Versuch (Art des Tests, benutzte Testkörper) zugeordnet.¹⁵⁴

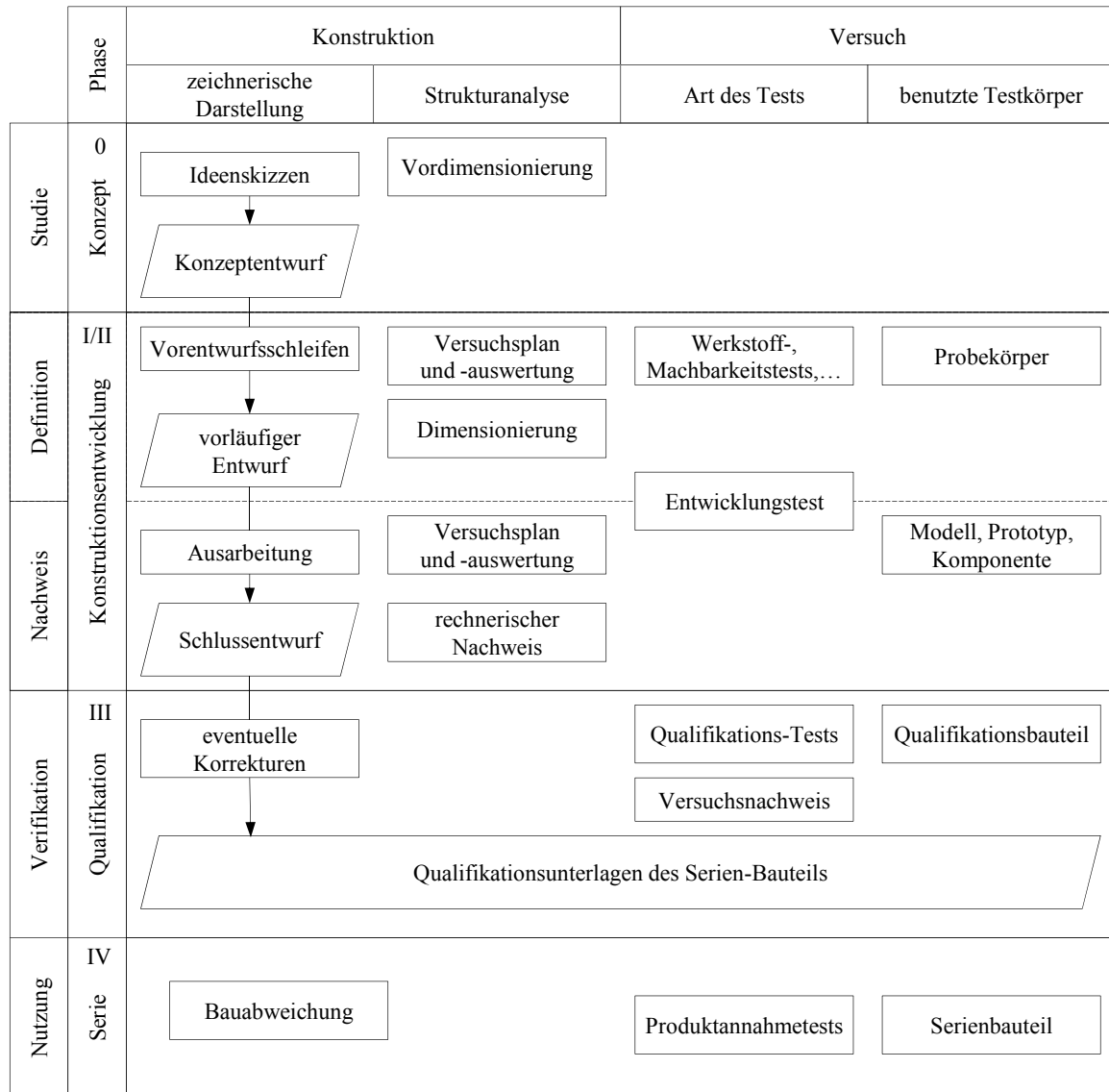


Abbildung 16: Vorgehensplan in der Entwicklung von FVK-Bauteilen nach VDI 2014¹⁵⁵

Des Weiteren gibt die Richtlinie einen Überblick über die zu erfüllenden Spezifikationsanforderungen und gliedert diese in die drei Gruppen Rahmenbedingungen, Einwirkungen und geforderte Eigenschaften.¹⁵⁶

¹⁵⁴ Vgl. Verein Deutscher Ingenieure e.V. (1993), S.4f.

¹⁵⁵ Verein Deutscher Ingenieure e.V. (1993), S.4, eigene Darstellung

¹⁵⁶ Vgl. Verein Deutscher Ingenieure e.V. (1993), S.5f.

Rahmenbedingungen, Aussehen	Einwirkungen (generell)	Geforderte Eigenschaften
<ul style="list-style-type: none"> - Gewicht - Geometrie, Raumeinhüllende, Schwerpunktlage - Oberflächenstruktur - Kosten und Termin - Umweltverträglichkeit, Recycling 	<ul style="list-style-type: none"> - Ruhende und veränderliche Lasten (Schlagenenergie) - Setzungen und Zwängungen - Temperaturbereich und Gradient (Ruhe und Betrieb) - Feuchte (Sättigungs-, Gleichgewichtsfeuchte) - Chemikalieneinwirkung - Strahlung - Blitzschlag 	<ul style="list-style-type: none"> - Erlaubte Verformungen - Lebensdauer - Einzuhaltende Anschlusssteifigkeiten - Eigenfrequenzen, Dämpfung - Massenträgheitsmomente - Elektrische Anforderungen (leitend, magnetisch) - Wärmedehnung, -leitung (gut, schlecht) - Brennbarkeit - Toxizität - Ausgasrate, Permeationsrate - Erosion

Abbildung 17: Spezifikationen für FVK-Bauteile nach VDI 2014¹⁵⁷

Diese Spezifikationsanforderungen müssen beim Start der Entwurfsgestaltung bekannt sein, in weiterer Folge mit dem bekannten Wissen abgeglichen und unter der Bewertung möglicher Risiken zu einem Entwurf entwickelt werden.¹⁵⁸ „Ziel der Bauteilgestaltung ist es, einen Entwurf zu finden, der einen ausgewogenen Kompromiß zwischen hohen technischen Wert und hohen wirtschaftlichen Wert bei vertretbarem Risiko darstellt.“¹⁵⁹

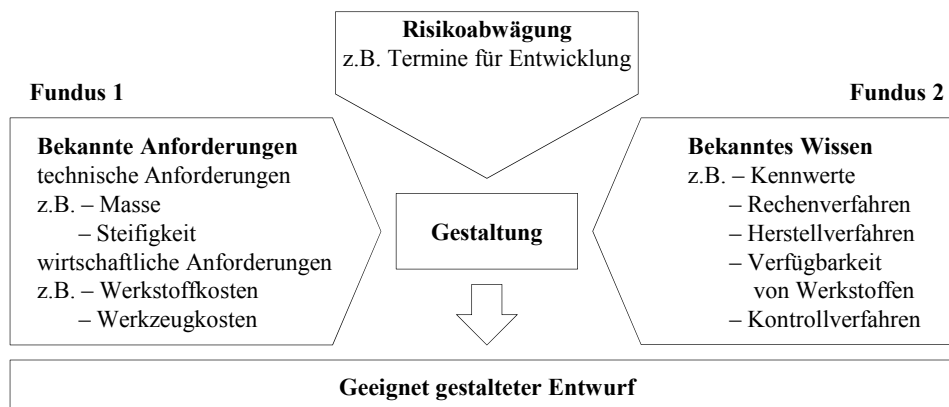


Abbildung 18: Einflüsse bei der Bauteilgestaltung nach VDI 2014¹⁶⁰

Dimensionierung und Auslegung eines FVK-Bauteils

Der wesentliche Unterschied in der Dimensionierung und Auslegung von FVK im Vergleich zu isotropen Werkstoffen ist deren mehrschichtiger Aufbau. Die Schichten können sich hinsichtlich der Faserorientierung und der verwendeten Materialien unterscheiden. Diese Unterschiede zwischen den einzelnen Schichten erfordern eine getrennte Betrachtung der Schichten. Dies erhöht im Vergleich zu isotropen Werkstoffen den Rechenaufwand.¹⁶¹

¹⁵⁷ Verein Deutscher Ingenieure e.V. (1993), S.5; eigene Darstellung

¹⁵⁸ Vgl. Verein Deutscher Ingenieure e.V. (1993), S.6

¹⁵⁹ Verein Deutscher Ingenieure e.V. (1993), S.6

¹⁶⁰ Verein Deutscher Ingenieure e.V. (1993), S.6; eigene Darstellung

¹⁶¹ Vgl. Avk (2014), S.300

Abbildung 19 zeigt den Ablauf der Dimensionierung eines FVK-Bauteils. Dieser ist sequentiell geprägt und beinhaltet mehrere (mögliche) Iterationsschleifen.

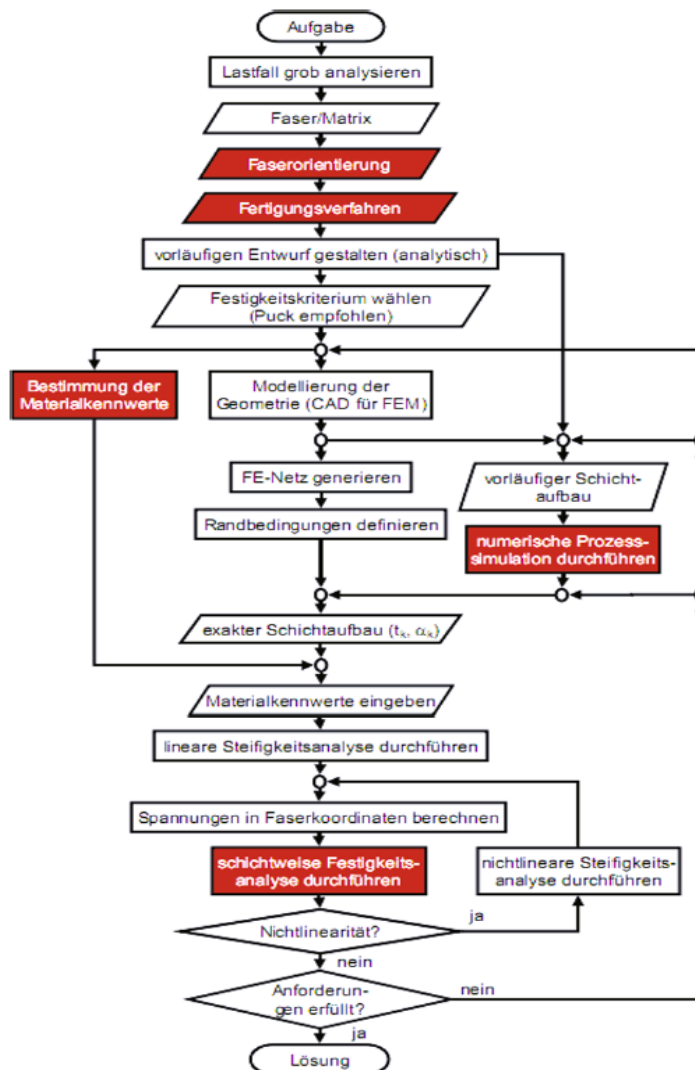


Abbildung 19: Ablauf für die Dimensionierung eines FVK-Bauteils¹⁶²

Faserorientierung

Die Orientierung der Fasern im FVK bestimmt wesentlich dessen mechanische Eigenschaften. Abbildung 20 zeigt beispielhaft die relativen Eigenschaften einer unidirektionalen Einzelschicht eines glasfaserverstärkten Kunststoffes (GFK) in Abhängigkeit der Abweichung der Faserorientierung von der Belastungsrichtung. Eine Abweichung der Faserorientierung von 20 Grad zur Belastungsrichtung führt bereits zu einer Reduktion der Festigkeit um 70% sowie der Steifigkeit um 45%.¹⁶³

¹⁶² Avk (2014), S.296

¹⁶³ Vgl. Avk (2014), S.302

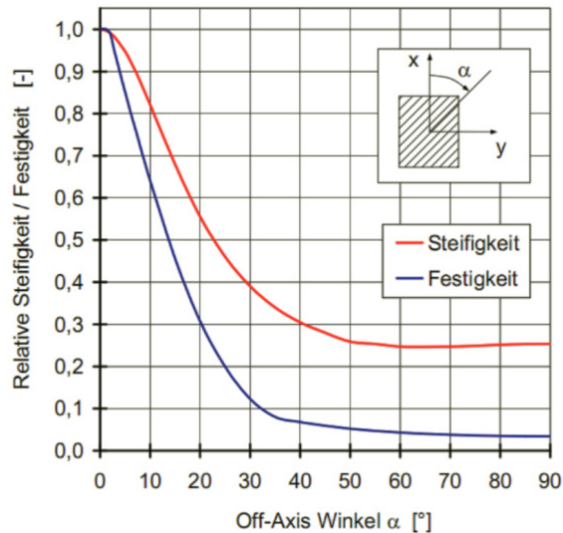


Abbildung 20: Mechanische Eigenschaften einer unidirektionalen Einzelschicht in Abhängigkeit der Abweichung der Faserorientierung von der Belastungsrichtung¹⁶⁴

Faservolumenanteil

Die Eigenschaften eines FVK hängen neben den Eigenschaften der Matrix- und Fasermaterialien insbesondere mit deren Anteilen im FVK zusammen. Der Faservolumenanteil ist einer der wichtigsten Konstruktionsparameter in der Entwicklung von FVK-Bauteilen. Er gibt Auskunft über die Anteile von Fasern und Matrix im FVK und beeinflusst wichtige Eigenschaften des FVK, wie beispielsweise Festigkeit, Steifigkeit oder thermische Ausdehnung. In einem FVK übernehmen primär die Fasern die Aufnahme der Lasten. Daher gilt es den Faservolumenanteil möglichst zu maximieren und den Matrixanteil zu minimieren. Die obere Grenze des Faservolumenanteils liegt bei ca. 65%. Höhere Faservolumenanteile führen zu ungenügend benetzten und verklebten Fasern. Für hochbeanspruchte Bauteile werden Faservolumenanteile von 60% angestrebt. Das erreichbare Faservolumen ist vom gewählten Herstellungsverfahren abhängig. Durch Anwendung der Prepregtechnologie oder von Wickelverfahren kann der gewünschte Faservolumenanteil gut auf 60% eingestellt werden. Beim Handlaminieren kann maximal ein Faservolumenanteil von rund 40% erreicht werden.¹⁶⁵

Der Faservolumenanteil ist für die Qualitätssicherung von FVK-Bauteilen der wichtigste zu überprüfende Parameter.¹⁶⁶

Faserlänge

Verstärkungsfasern werden auf Basis ihrer Länge in Kurzfasern (0,1mm bis 1mm), Langfasern (1mm bis 50mm) und Endlosfasern (länger als 50mm) unterschieden.¹⁶⁷

¹⁶⁴ Avk (2014), S.302

¹⁶⁵ Vgl. Schürmann (2007), S.161f.

¹⁶⁶ Vgl. Schürmann (2007), S.165

¹⁶⁷ Vgl. Schürmann (2007), S.138

„Generell gilt: Je länger die Fasern sind, umso besser ist ihre Verstärkungswirkung. Mit Endlosfasern – insbesondere wenn sie gerichtet orientiert vorliegen – werden eindeutig die höchsten Steifigkeiten und Festigkeiten erreicht. Auch die Schlagzähigkeit lässt sich mit der Faserlänge steigern.“¹⁶⁸

3.2.2 Materialien

Ein Verbundwerkstoff im Allgemeinen kann aus einer Kombination aus zwei (Matrix und Verstärkungsmaterial) oder mehrerer Materialien bestehen und bietet für sich ohne Beachtung möglicher Restriktionen seitens der Bauteilgestaltung sowie der Verarbeitung eine äußerst hohe Anzahl möglicher Materialkombinationen. Diese Variationsmöglichkeiten seitens der Materialauswahl stellen einen großen Vorteil, gleichzeitig jedoch auch eine große Herausforderung beim Einsatz von Faserverbundkunststoffen dar.¹⁶⁹

3.2.2.1 Verstärkungsfasern

Verstärkungsfasern sind in einem FVK für die Aufnahme der Lasten zuständig. Die Faserform führt bei den meisten Werkstoffen zu höheren Festigkeiten (seltener zur Erhöhung der Steifigkeiten) im Vergleich zum selben, in kompakter Form, vorliegenden Werkstoff. Dies kann im Wesentlichen mit der Wirkung von 4 Mechanismen begründet werden – dem Größeneffekt, dem Orientierungseffekt, der Verminderung von Fehlstellen und Kerben sowie Eigenspannungen.¹⁷⁰

Die am häufigsten eingesetzten Verstärkungsfasern in FVK sind Glasfasern, Kohlenstofffasern, Aramidfasern sowie Naturfasern wobei Glasfasern die mit Abstand am häufigsten eingesetzte Faserart darstellen.¹⁷¹ Die Dominanz der Glasfaser ist auf ihr gutes Preis-/Leistungsverhältnis zurück zu führen.¹⁷²

Zur Verstärkung von hoch beanspruchten Faserverbundkunststoffen (High-Performance Composites) werden vorwiegend Glas-, Kohlenstoff- und Aramidfasern eingesetzt. Naturfasern werden als Verstärkungsfasern für Innenraumverkleidungen von Fahrzeugen eingesetzt und leisten so einen Beitrag zur Integration von nachwachsenden Rohstoffen in den Automobilbau.¹⁷³

Nachfolgend werden die 3 wichtigsten Faserarten mit ihren wesentlichen Vor- und Nachteilen beschrieben. Für weiterführende Informationen wird auf die einschlägige Literatur¹⁷⁴ verwiesen.

¹⁶⁸ Schürmann (2007), S.137

¹⁶⁹ Vgl. Wilkins/Karbhari (1991), S.259

¹⁷⁰ Vgl. Schürmann (2007), S.21ff.

¹⁷¹ Vgl. Avk (2014), S.33

¹⁷² Vgl. Moeller (2014), S.770

¹⁷³ Vgl. Schürmann (2007), S.26

¹⁷⁴ Beispielsweise: AVK (2014), Schürmann (2013)

Glasfasern

Glasfasern sind unter anderem durch sehr hohe Längs-Zug – sowie hohe Längsdruckfestigkeit, hohe Bruchdehnung, gute Drapierbarkeit, hohe elektrische und thermische Isolierfähigkeit, Unbrennbarkeit, sehr geringe Feuchtigkeitsaufnahme sowie guter chemischer und mikrobiologischer Widerstandsfähigkeit gekennzeichnet. Glasfaserverstärkte und transparente Kunststoffe können visuell auf die Tränkung, auf Lufteinschlüsse sowie auf die Güte von Verklebungen von integrierten Komponenten (z.B. Kernmaterialien) untersucht werden. Dadurch kann eine hohe Fertigungsqualität erreicht werden. Durch die Transparenz des Materials können auch Schlagschäden sehr gut an einer Milchigfärbung des Materials erkannt werden.¹⁷⁵

Eine Schwäche der Glasfaser ist der niedrige Elastizitätsmodul (E-Modul). Die Verwendung von Glasfaser verstärkten Kunststoffen (GFK), insbesondere für schlanke Biegestrukturen, ist daher nicht uneingeschränkt möglich. Der niedrige E-Modul kann jedoch in Verbindung mit der hohen Bruchdehnung für spezielle Anwendungen, beispielsweise dem Einsatz von GFK als Federwerkstoff, vorteilhaft sein.¹⁷⁶

Kohlenstofffasern

Kohlenstofffasern (C-Faser) „[...] verfügen über extrem hohe Festigkeiten und sehr hohe Elastizitätsmoduln“ bei gleichzeitig geringer Dichte, welche deutlich unter jener von Glasfasern liegt. Im Vergleich zu Glasfasern weisen C-Fasern ein wesentlich anisotropes Verhalten auf. Der E-Modul in Faserlängsrichtung liegt eine Größenordnung über jenem in Faserquerrichtung. Die hohe Steifigkeit der C-Fasern führt zu einer hohen Lastaufnahme und dadurch zu einer Entlastung der Matrix sowie der Grenzschicht zwischen Fasern und Matrix und führt so zum späteren Auftreten von Rissen in der Matrix oder der Grenzschicht bei wesentlich höheren Spannungen. Aufgrund des anisotropen thermischen Ausdehnungskoeffizienten (negativ in Faserrichtung, positiv quer zur Faserrichtung) können Bauteile auf einen bestimmten Ausdehnungskoeffizienten eingestellt werden. C-Fasern können des Weiteren aufgrund ihrer Durchlässigkeit von Röntgenstrahlen als Verstärkungsfasern in der Medizintechnik eingesetzt werden.¹⁷⁷

Der Einsatz von C-Fasern bringen jedoch auch Nachteile mit sich. Die Kontrolle von C-Faser verstärkten Bauteilen ist im Vergleich zu Bauteilen aus GFK aufgrund der Intransparenz der Fasern wesentlich erschwert und kann nicht visuell erfolgen. Die Intransparenz der Fasern erschwert des Weiteren die Kontrolle der Benetzung der Fasern mit der Matrix und erfordert so besondere Vorkehrungen um eine ausreichende Tränkung der Fasern gewährleisten zu können. Aufgrund der hohen Steifigkeit der C-Fasern sind Eckradien von Bauteilen nach Möglichkeit groß auszugestalten. Einer der wesentlichen Hindernisgründe eines stärkeren Einsatzes von C-Faser verstärkten Kunststoffen (CFK) ist der hohe Preis der C-Faser.¹⁷⁸

¹⁷⁵ Vgl. Schürmann (2007), S.28

¹⁷⁶ Vgl. Schürmann (2007), S.28f.

¹⁷⁷ Vgl. Schürmann (2007), S.39f.

¹⁷⁸ Vgl. Schürmann (2007), S.40f.

C-Fasern werden in verschiedenen Faserklassen auf Basis unterschiedlicher Festigkeiten und Steifigkeiten der Fasern unterschieden.¹⁷⁹

Aramidfasern

Aramidfasern zeichnen sich durch hohe Zugfestigkeiten, einen hohen Zugelastizitätsmodul, hohe Bruchdehnung, niedrige Dichte, einem negativen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, gute Chemikalienbeständigkeit sowie Temperaturbeständigkeit, niedrige Wärmeleitfähigkeit aus und sind selbstverlöschend.¹⁸⁰ Weitere positive Eigenschaften sind ein hohes Energieaufnahmevermögen sowie eine niedrige elektrische Leitfähigkeit.¹⁸¹

Beim Einsatz von Aramidfasern zu beachtende negative Aspekte sind die Neigung zur Feuchtigkeitsaufnahme sowie die Empfindlichkeit gegen UV-Strahlung.¹⁸² Des Weiteren weisen Aramidfasern eine geringe Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung auf.¹⁸³

Faserhalbzeuge

Faserhalbzeuge dienen zur Verringerung des Aufwandes der korrekten Positionierung eingesetzter Fasern und leisten so einen Beitrag zur Vereinfachung bestimmter Herstellungsprozesse. Die Verarbeitung von Fasern zu textilen Halbzeugen bringt aber auch den Nachteil der Reduzierung von erreichbaren Festigkeiten und Steifigkeiten verglichen zur optimal gestreckten, unidirektional Faseranordnung durch eingebrachte Störungen wie beispielsweise der Krümmung der Fasern mit sich. Beispiele für textile Halbzeuge sind Gewebe, Axialgelege, Matten/Vliese oder Geflechte.¹⁸⁴

3.2.2.2 Matrix

Die Matrix eines FVK ist der „[...] *Kunststoff, der mit Fasern verstärkt wird*“.¹⁸⁵

Die Matrix hat in einem FVK vielschichtige Aufgaben zu erfüllen. Sie ist unter Anderem für die Fixierung der Fasern in der geometrischen Anordnung, für die Aufrechterhaltung des Abstand zwischen den Fasern, die Verklebung der Fasern miteinander, die Übernahme von mechanischen Lasten, die Stützung der Fasern bei Druckbeanspruchung, die Verklebung von Laminatschichten sowie den Schutz der Fasern vor Umgebungseinflüssen verantwortlich. Die Matrix ist zwar der schwächere Partner im Verbund mit Verstärkungsfasern, hat jedoch wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften des FVK.¹⁸⁶

¹⁷⁹ Vgl. Schürmann (2007), S.41

¹⁸⁰ Vgl. Avk (2014), S.141f.; Vgl. Moeller (2014), S.771

¹⁸¹ Vgl. Avk (2014), S.142

¹⁸² Vgl. Moeller (2014), S.771f.; Vgl. Schürmann (2007), S.45

¹⁸³ Vgl. Avk (2014), S.143; Vgl. Schürmann (2007), S.44

¹⁸⁴ Vgl. Schürmann (2007), S.57f.

¹⁸⁵ Moeller (2014), S.774

¹⁸⁶ Vgl. Schürmann (2007), S.83

Die Matrix von FVK für Strukturbauteile ist meist aus Duroplasten oder Thermoplasten. Der Einsatz von Elastomeren ist nur für Strukturen, welche auf ein- oder zweiachsigen Zug belastet sind, sinnvoll.¹⁸⁷

Duroplaste sind das am häufigsten für FVK verwendete Matrixmaterial. Die Ausgangsstoffe für Duroplaste sind Reaktionsharze sowie Härter. Die Vermengung des Reaktionsharzes mit dem geeigneten Härter führt zu einer chemischen Vernetzungsreaktion im Zuge derer der eigentliche Matrixwerkstoff entsteht. Die Vorteile von Duroplasten sind unter anderem ein hoher E-Modul, eine geringe Krichneigung, gute thermische und chemische Beständigkeit sowie gute Verarbeitbarkeit. Duroplaste sind nach der Vernetzungsreaktion nicht mehr aufschmelzbar. Sie sind daher einerseits nicht schweißbar, und andererseits nur schwer zu recyceln. Duroplaste zeigen aufgrund des hohen Vernetzungsgrades sprödes Verhalten und sind unverstärkt als Konstruktionswerkstoff beschränkt einsetzbar.¹⁸⁸

Thermoplaste sind im Gegensatz zu Duroplasten ab bestimmten Temperaturen wieder form- bzw. aufschmelzbar und können daher geschweißt und leichter recycelt werden. Des Weiteren verfügen sie über eine geringere Festigkeit und einen geringeren E-Modul, sowie eine höhere Krichneigung als Duroplaste.¹⁸⁹

3.2.2.3 Faser-Matrix-Halbzeuge

Durch pre-imprägnierte Faser-Matrix-Halbzeuge kann bei Herstellungsverfahren, welche die Fasertränkung nicht beinhalten, eine Rationalisierung der Fertigung erreicht werden. Durch die Verwendung dieser Halbzeuge wird die Imprägnierung an einen Zulieferer ausgelagert. Ein weiterer Vorteil ist eine gesteigerte Qualität. Durch die gleichmäßigere maschinelle Tränkung der Fasern können reproduzierbare Faserverteilungen und Faservolumenanteile erreicht werden.¹⁹⁰

Abbildung 21 zeigt eine Einteilung vorimprägnierter Faser-Matrix-Halbzeuge auf Basis der verwendeten Matrix sowie Längen der Fasern.

¹⁸⁷ Vgl. Schürmann (2007), S.84ff.

¹⁸⁸ Vgl. Schürmann (2007), S.84f.

¹⁸⁹ Vgl. Moeller (2014), S.774

¹⁹⁰ Vgl. Schürmann (2007), S.137

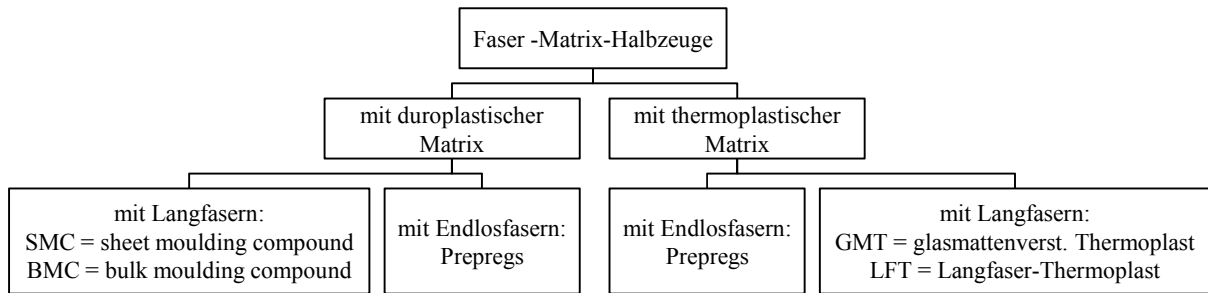


Abbildung 21: Gliederung vorimprägnierter Faser-Matrix-Halbzeuge¹⁹¹

3.2.3 Produktion

KARBHARI/WILKINS beschreiben den Produktionsprozess von FVK-Bauteilen als Material-Transformations-Prozess. Dieser beinhaltet mehrere Produktionsschritte beginnend beim Rohmaterial bis zum Fügen/Montieren eines Bauteiles (siehe Abbildung 22).¹⁹²

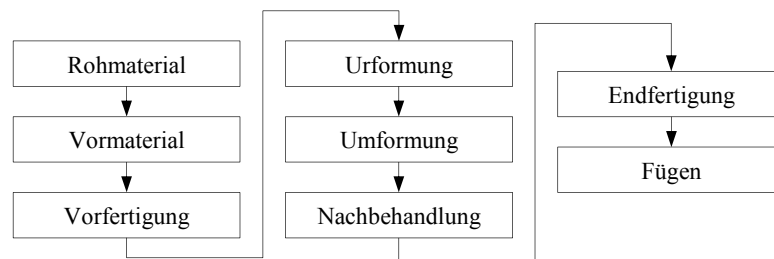


Abbildung 22: Produktionsschritte im Material-Transformationsprozess¹⁹³

Produktionsprozesse von FVK-Bauteilen können aus allen genannten Produktionsschritten, aus einer Auswahl davon bestehen oder auch durch Zwischenschritte ergänzt werden. Die einzelnen Produktionsschritte können in einer Vielzahl möglicher Umsetzungsvarianten bewerkstelligt werden. Dies führt zu einer großen Anzahl von Kombinationsmöglichkeiten der Produktionsschritte mit daraus resultierenden Folgen für den Aufbau des Faserkunststoffverbundes sowie dessen Leistungseigenschaften.¹⁹⁴

3.2.3.1 Herstellungsverfahren

Zur Herstellung von Bauteilen aus FVK findet eine vielfältige Auswahl an Herstellungsverfahren Anwendung. Die Auswahl eines Herstellungsverfahrens kann

¹⁹¹ Schürmann (2007), S.138; eigene Darstellung

¹⁹² Vgl. Karbhari/Wilkins (1991), S.333f.

¹⁹³ Karbhari/Wilkins (1991), S.334

¹⁹⁴ Vgl. Karbhari/Wilkins (1991), S.333f.

beispielsweise auf Basis erforderlicher Werkstoffeigenschaften, der zu erstellenden Geometrie oder den benötigten Stückzahlen erfolgen.¹⁹⁵

Abbildung 23 gibt einen Überblick gängiger Verfahren in Abhängigkeit der Komplexität des herzustellenden Bauteils sowie des möglichen Automatisierungsgrades des Verfahrens.

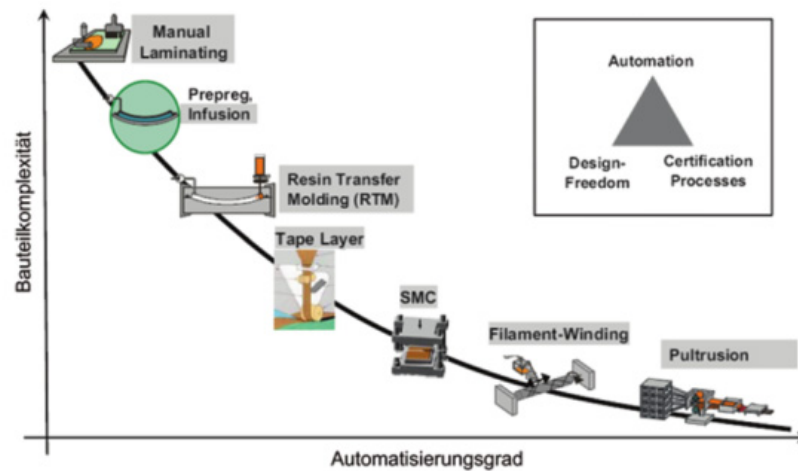


Abbildung 23: Herstellungsverfahren für FVK-Bauteile in Abhängigkeit von Bauteilkomplexität und Automatisierungsgrad¹⁹⁶

Handlaminieren

Das Handlaminieren ist das einfachste und älteste Verfahren zur Herstellung eines FVK-Bauteils. Bei diesem Verfahren werden das Faser- sowie das Matrixmaterial in ein meist offenes Formwerkzeug per Hand aufgebracht. Das Verfahren ist mit hohem Personalaufwand aufgrund des hohen Anteils an handwerklichen Tätigkeiten verbunden. Das Faserspritz-Verfahren, als Weiterentwicklung des Handlaminierens, führt zu einer teilweisen Mechanisierung der Arbeitsgänge, ist jedoch nach wie vor von einem hohen handwerklichen Arbeitsanteil geprägt. Die Vorteile der Verfahren liegen beispielsweise in großen Freiheiten hinsichtlich der Bauteilgestaltung, einer flexiblen Gestaltung des Laminataufbaus, der Darstellbarkeit von Bauteilen mit hochwertigen Oberflächen sowie in der Wirtschaftlichkeit in der Herstellung von Einzelbauteilen oder Kleinstserien. Als Nachteile können der bereits erwähnte hohe Personalaufwand sowie eine bedingte Reproduzierbarkeit des Fertigungsprozesses aufgrund der hohen Einflüsse des ausführenden Personals genannt werden.¹⁹⁷

¹⁹⁵ Vgl. Avk (2014), S.297

¹⁹⁶ Günnel (2012), zitiert in: Evertz et al. (2013), S.403

¹⁹⁷ Vgl. Avk (2014), S.326f.

Prepreg Layup

Durch den Einsatz von sogenannten Prepregs können die oben beschriebenen Nachteile der handwerklichen Verarbeitung von Fasern und Matrix durch eine vorhergehende maschinelle Imprägnierung der Fasermaterialien reduziert werden.¹⁹⁸

Für die Herstellung von Einzelstücken oder kleinen Serien werden Prepregs meist von Hand zugeschnitten und in die Formen eingelegt. Bei größeren Serien erfolgen der Zuschnitt sowie die Positionierung der Prepregs automatisiert mit CNC-gesteuerten Cuttern und Lege-Robotern. Der Aushärtvorgang erfolgt bei Bauteilen mit hohen Qualitätsanforderungen in einem Autoklav. Ein Autoklav ist ein Ofen mit einem Innendruck von bis zu 10 bar welcher als Anpressdruck auf das Laminat wirkt. Dies führt zur Reduktion von Lufteinschlüssen und der Reduktion von Faser-Welligkeiten. Bei geringeren Qualitätsanforderungen kann die Aushärtung auch nur unter Anlegen eines Unterdrucks erfolgen.¹⁹⁹

Abbildung 24 zeigt den Aufbau eines Prepreg-Bauteils als Vorbereitung für einen Härtevorgang sowie den prinzipiellen Aufbau eines Autoklavs.

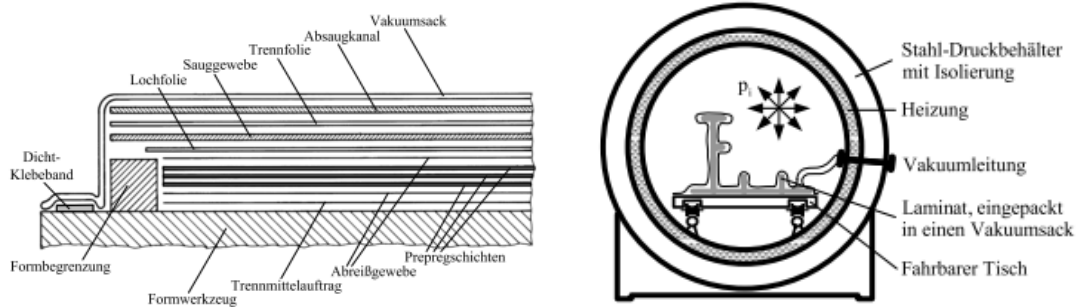


Abbildung 24: Vorbereitung eines Prepreg-Bauteils für den Aushärtvorgang und Aufbau eines Autoklavs²⁰⁰

Injektionsverfahren - Resin Transfer Moulding

Beim Resin Transfer Moulding (RTM) werden trockene Faserhalbzeuge in Formen eingebracht und aktiviertes Harz unter Überdruck in die geschlossene Form injiziert. Die Aushärtung erfolgt anschließend unter Druck und Wärme.²⁰¹ Abbildung 25 zeigt die grundlegenden Prozessschritte des RTM-Verfahrens.

¹⁹⁸ Vgl. Schürmann (2007), S.145f.

¹⁹⁹ Vgl. Avk (2014), S.147f.

²⁰⁰ Schürmann (2007), S.148; Schürmann (2007), S.149

²⁰¹ Vgl. Eggers et al. (2013), S.613

Abbildung 25: Prozessschritte des RTM-Verfahrens²⁰²

Durch den Einsatz von hochreaktiven Harzsystemen können Taktzeiten kleiner 3 Minuten erreicht werden. Die kurze Taktzeit ist ein wesentliches Argument für den verstärkten Einsatz dieses Verfahrens für die Herstellung von Bauteilen für den Automobilbau.²⁰³

Tape-lege Verfahren

lege-Verfahren bieten die Möglichkeit der „[...] richtungs- und positionsvariable[n] Ablage unidirektional faserverstärkten Tapes.“ Sie ermöglichen dadurch die Herstellung leistungsfähiger Leichtbauteile.²⁰⁴

Heißpressen

Dieses Verfahren wird vorwiegend zur Verarbeitung von Sheet Moulding Compounds (SMC) und Bulk Moulding Compounds (BMC) eingesetzt. Auch das sogenannte Nasspressen kann zu diesen Verfahren gezählt werden. Hierbei werden trockene Faserhalbzeuge in das Presswerkzeug eingebracht, während des Schließens der Form imprägniert und anschließend unter Druck und Wärme ausgehärtet. Als Formmaterial wird vorwiegend Stahl eingesetzt.²⁰⁵

Wickelverfahren

Das Wickelverfahren ist geeignet zur Herstellung von rotationssymmetrischen Bauteilen wie beispielsweise Rohre oder Behälter. Die Form des späteren Bauteils wird durch den sogenannten Wickelkern vorgegeben, welcher im Zuge des Verfahrens mit imprägnierten Fasern umwickelt wird.²⁰⁶

Abbildung 26 zeigt die mit dem Wickelverfahren herstellbaren Grundformen sowie eine Prinzip-Darstellung des Verfahrens.

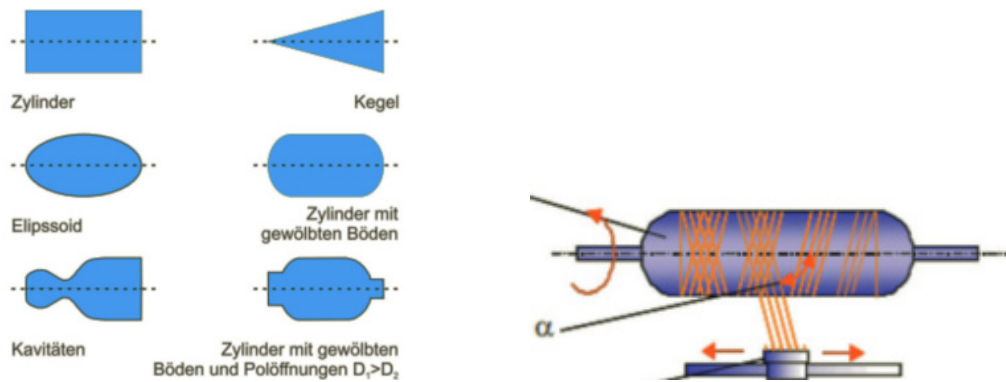
²⁰² Avk (2014), S.391

²⁰³ Vgl. Eggers et al. (2013), S.613

²⁰⁴ Vgl. Avk (2014), S.492; Avk (2014), S.492

²⁰⁵ Vgl. Avk (2014), S.407

²⁰⁶ Vgl. Avk (2014), S.361f.

Abbildung 26: Mögliche Grundformen und Prinzip des Wickelverfahrens²⁰⁷

3.3 Innovation und Faserverbundkunststoffe

SCHUMPETER definiert in „Theorie der Wirtschaftlichen Entwicklung“ die Durchsetzung neuer Kombinationen und damit das Wesen der Innovation. Dabei unterscheidet er fünf Fälle:²⁰⁸

- *Herstellung eines neuen, d. h. dem Konsumentenkreise noch nicht vertrauten Gutes oder einer neuen Qualität eines Gutes.*
- *Einführung einer neuen, d.h. dem betreffenden Industriezweig noch nicht praktisch bekannten Produktionsmethode [...]*
- *Erschließung eines neuen Absatzmarktes[...]*
- *Eroberung einer neuen Bezugsquelle von Rohstoffen oder Halbfabrikaten [...]*
- *Durchführung einer Neuorganisation, wie Schaffung einer Monopolstellung [...] oder Durchbrechen eines Monopols*

In den folgenden Ausführungen wird primär auf die beiden erstgenannten Fälle, die Produkt- und Prozessinnovation eingegangen. Dazu werden die Aspekte Werkstofforientierter Innovationen sowie das Innovationssystem der Kunststoffverarbeiteten Industrie zur Darstellung der grundsätzlichen Zusammenhänge der Begriffe Innovation und Faserverbundkunststoffe beschrieben.

3.3.1 Werkstofforientierte Innovationen

Im Zusammenhang der Begriffe Innovation und Werkstoff unterscheidet SCHNEIDER die Begrifflichkeiten der „Werkstofforientierten Innovation“, der „Werkstoffinnovation“, der „Komplementärinnovation“ sowie der „Werkstoffinduzierten Innovation“.²⁰⁹

²⁰⁷ Avk (2014), S.363

²⁰⁸ Schumpeter (1987), S.100f.

²⁰⁹ Vgl. Schneider (1992), S.24ff.

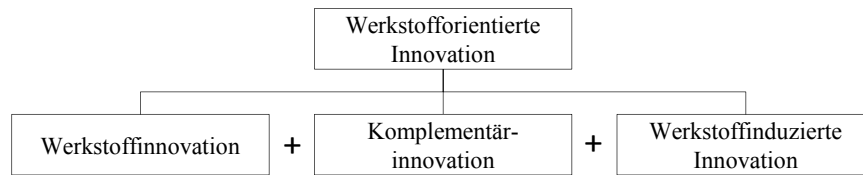


Abbildung 27: „Innovationskonglomerat“ Werkstofforientierter Innovationen nach SCHNEIDER²¹⁰

Der Begriff der „Werkstofforientierten Innovation“ bezeichnet als Überbegriff das durch eine Werkstoffinnovation initiierte Innovationssystem. Dieses Innovationssystem umfasst dabei die Werkstoffinnovation selbst, die Komplementärinnovation sowie die Werkstoffinduzierte Innovation.

Werkstofforientierte Innovationen umfassen Innovationen welche „[...] erst durch das Vorhandensein neuer Werkstoffe einschließlich der Komplementärinnovationen ermöglicht werden.“²¹¹

„Eine Werkstoffinnovation liegt dann vor, wenn aus der Sicht eines Unternehmens denjenigen Komponenten des materiellen Inputs, die nach Vornahme von Form- und/oder Substanzveränderungen Bestandteile des marktfähigen betrieblichen Outputs werden, Änderungen auftreten. Diese Änderungen können sowohl bekannte als auch neue Anwendungen ermöglichen.“²¹²

Erfolgreiche Werkstoffinnovationen basieren insbesondere auf einem Grundverständnis von auf den Anwendungsfall abgestimmten Werkstoffen und bedingen die intensive Zusammenarbeit mit Lieferanten und gegebenenfalls auch mit deren Unterlieferanten.²¹³ Der Begriff der Komplementärinnovation umfasst alle durch eine Werkstoffinnovation induzierten Innovationen, „[...] die erforderlich sind, um einen neuen Werkstoff herzustellen, zu be- und verarbeiten sowie sinnvoll einzusetzen.“²¹⁴ Mit dem Begriff der werkstoffinduzierten Innovation beschreibt SCHNEIDER neue oder verbesserte Produkte oder neue oder verbesserte Verfahren welche durch eine Werkstoffinnovation und damit verbundenen Komplementärinnovationen ermöglicht werden.²¹⁵ Abbildung 28 zeigt das Systeminnovationsmodell werkstofforientierter Innovationen nach SCHNEIDER und stellt die grundsätzlichen Material- und Informationsflüsse der an einer werkstofforientierten Innovation beteiligten Industriebereiche von der Rohstoffgewinnung bis hin zur Herstellung des Endproduktes dar.

²¹⁰ Schneider (1992), S.43; eigene Darstellung, gekürzt

²¹¹ Schneider (1992), S.41

²¹² Schneider (1992), S.25

²¹³ Vgl. Klose/Gänzle (2009), S.45

²¹⁴ Schneider (1992), S.41

²¹⁵ Vgl. Schneider (1992), S.41

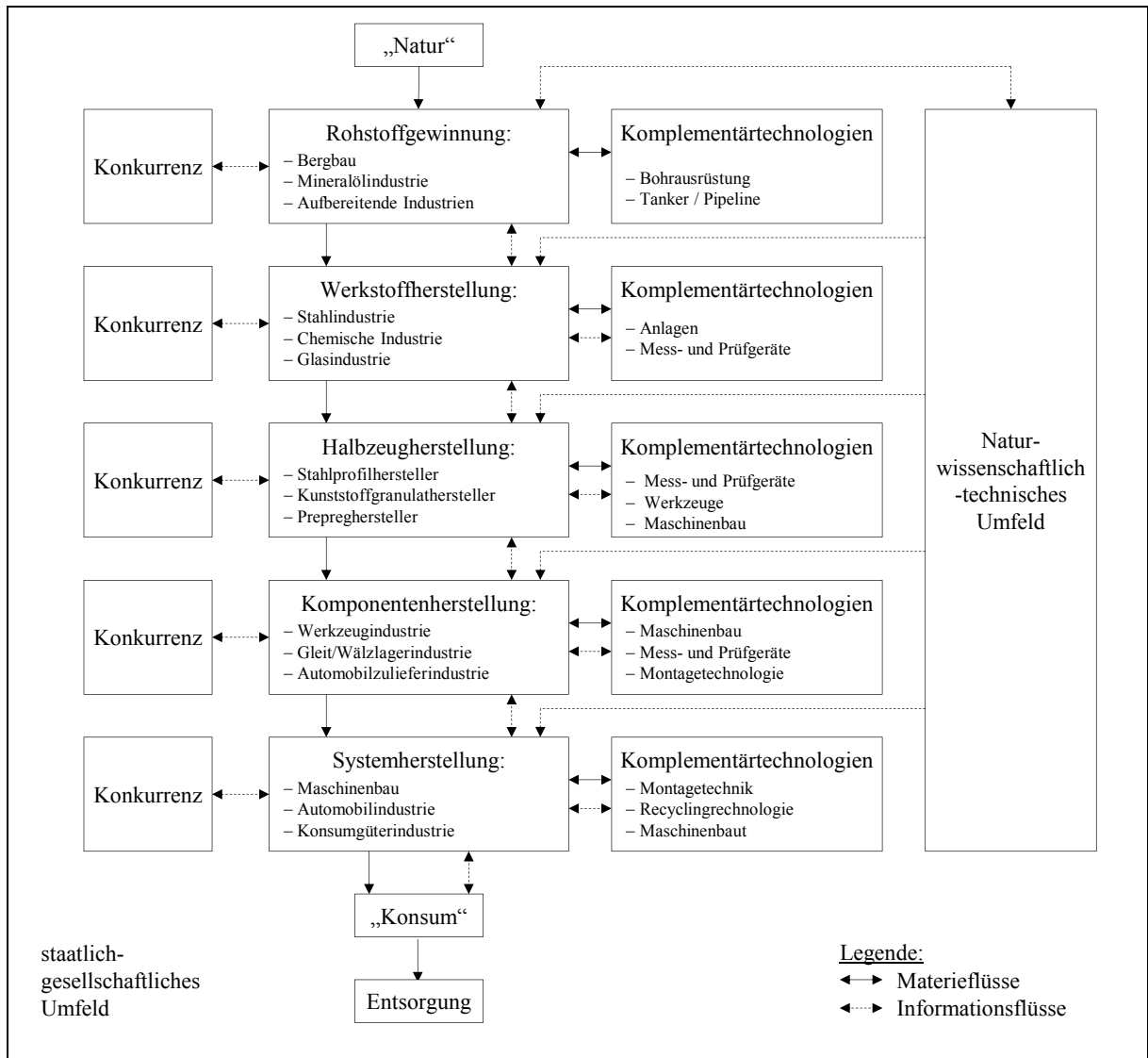


Abbildung 28: Systeminnovationsmodell werkstofforientierter Innovationen²¹⁶

Diese Klassifizierungen von Innovationen spiegeln den möglichen Umfang des „Innovationssystem Faserverbundkunststoff“ sehr gut wieder. Der Einsatz von FVK führt nach obiger Definition grundsätzlich zu einer Werkstoffinnovation. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass FVK in Abhängigkeit der Kombination von Matrix, Faser und Faserorientierung für jeden Anwendungsfall einen Werkstoff mit spezifischen und neuen Eigenschaften darstellen. Komplementärinnovationen werden beispielsweise in Form neuer Werkzeug- und Produktionstechnologien, Betriebsmittel oder auch neuer Hilfs- und Betriebsstoffe zur Realisierung der Werkstoffinnovation erforderlich. Der Einsatz von FVK kann schlussendlich zur Ermöglichung einer werkstoffinduzierten Innovation führen.

²¹⁶ Schneider (1992), S.51; eigene Darstellung

3.3.2 Das Innovationsystem der Kunststoffverarbeitenden Industrie

Die Verarbeitung von Faserverbundkunststoffen kann dem übergeordneten Industriebereich der Kunststoffverarbeitenden Industrie zugeordnet werden, welcher sich in die Bereiche Kunststoffherzeuger, Kunststoffverarbeiter und Kunststoff-Maschinenbau gliedert. In Europa stellen die kunststoffverarbeitenden Betriebe, welche meist den kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) zuzuordnen sind, den Großteil des Industriezweiges dar. Der Bereich der Verarbeitung von FVK stellt nur einen kleinen, aber dennoch bedeutenden Bereich der Kunststoffverarbeitenden Industrie dar (für Europa weniger als 5% der gesamten verarbeiteten Kunststoffmenge). Der FVK-Markt ist vorwiegend geprägt durch Business-to-Business Beziehungen. Nichts desto trotz ist es für die FVK-Branche von großer Bedeutung die Bedürfnisse der Endkunden zu verfolgen und zu kennen um dem Business-to-Business Kunden der Nachfrage entsprechende Angebote machen zu können.²¹⁷

Betrachtet man den FVK-Markt hinsichtlich der genannten Unterteilung der Kunststoffverarbeiteten Industrie so kann unterschieden werden in Erzeuger und Händler von Rohstoffen (z.B. Harze, Fasern, Betriebs- und Hilfsstoffe, etc.), Verarbeiter (Hersteller von Halbzeugen sowie Zwischen- und Fertigprodukten) sowie Maschinenbauer (Ausrüster für Produktionsverfahren und Equipment).²¹⁸

Abbildung 29 zeigt unterschiedliche Umfänge der Beteiligung kunststoffverarbeitender Unternehmen am Produktentstehungsprozess von der Produktentwicklung, der Werkzeugentwicklung, dem Formenbau bis zum Produktionsprozess.

²¹⁷ Vgl. Avk (2014), S.34f.

²¹⁸ Vgl. Avk (2014), S.35

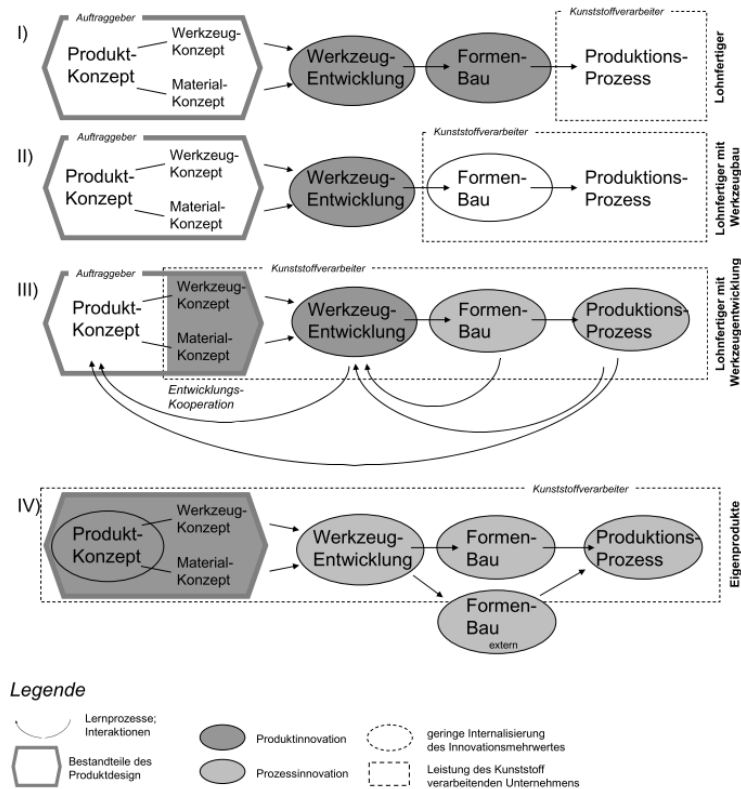


Abbildung 29: Schlüsselstellung von Werkzeugbau und der Werkzeugentwicklung²¹⁹

Die Bandbreite ist determiniert durch die Höhe des Wertschöpfungsanteils und reicht vom reinen Lohnfertiger bis zum Kunststoffverarbeiter mit eigenen Kunststoffprodukten. HANDKE verweist auf die Schlüsselstellung der Werkzeugentwicklung im Rahmen der Kunststoffverarbeitung. Die Integration der Werkzeugentwicklung hat für einen Kunststoffverarbeiter mehrschichtige Vorteile. Durch die zusätzlichen Leistungen bietet sich dem Auftragnehmer die Möglichkeit der Beeinflussung der Wertschöpfungstiefe in späteren Stufen. Des Weiteren wird durch die intensive Kommunikation zwischen den beteiligten Akteuren, Wissen bzgl. der Produkte sowie der notwendigen Werkzeuge und Herstellungsprozesse generiert. Der reine Lohnfertiger (Prozess I, siehe Abbildung 29) zieht aufgrund des fehlenden Einblickes und der fehlenden Integration nur im begrenzten Maße Nutzen aus Innovationen der vorgelagerten Wertschöpfungsstufen. Prozess II zeigt einen Lohnfertiger mit integriertem Werkzeugbau. Dieser kann durch den Einblick in eine vorgelagerte Produktinnovation im Bereich der Werkzeugentwicklung Mehrwert generieren. Die Implementierung der Aspekte der Werkzeugwartung sowie von Werkzeugrekonstruktionen wirken sich positiv auf den nachfolgenden Produktionsprozess aus. Prozess III zeigt einen Lohnfertiger mit Werkzeugbau und Werkzeugentwicklung. Der Vorteil dieser Konstellation liegt im direkten Zugang zu Informationen zur Produktinnovation im Bereich der Werkzeugentwicklung und der Transferierung der gewonnenen Erkenntnisse in die nachgelagerten Wertschöpfungsstufen. Die im Prozess III dargestellten Iterationen

²¹⁹ Handke (2005), S.40

bieten die Möglichkeit Erfahrungen aus dem Werkzeugbau und dem Produktionsprozess in zukünftige Werkzeugentwicklungen einfließen zu lassen. Prozess IV beinhaltet schlussendlich die Abdeckung der gesamten Wertschöpfungskette vom Produktkonzept bis zur Produktion.²²⁰

Die Klassifizierung von Innovationen in der kunststoffverarbeitenden Industrie ist oft nicht eindeutig möglich. Gründe hierfür sind einerseits unterschiedliche Blickwinkel und andererseits unterschiedliche Wertschöpfungstiefen von Kunststoffverarbeitern. HANDKE beschreibt eine mögliche Innovationsklassifizierung aus der Sicht eines Unternehmens der kunststoffverarbeitenden Industrie unter Beachtung der Aspekte des Grades Neuigkeit (Radikale und Inkrementelle Innovationen) sowie der Unterscheidung in Produkt- und Prozessinnovationen (siehe dazu Abbildung 30).²²¹

	Produktinnovation	Prozessinnovation
Inkrementelle Innovation	Design eines Produktes oder eines Werkzeuges nach Kundenwünschen unter Ausnutzung vorangegangener Erfahrungen	Erfüllung einer vom Kunden geforderten Industrienorm
	Beteiligung an einer Produktentwicklung	> Erhöhung der Maschinenproduktivität
	Weiterentwicklung eines eigenen Produktes	Veränderungen an einem Werkzeug
		Weiterentwicklung eines Verfahrens
Radikale Innovation	Erweiterung des Leistungsspektrums, z.B. durch die Integration vor- oder nachgelagerter Wertschöpfungsschritte	Übernahme der Selbstvermarktung eines bisher über Vertriebspartner vermarkteten Produktes
	Entwicklung und Vermarktung eines Produktes einer bisher nicht belieferten Produktbranche	> Aufstocken des Maschinenparks mit einer neuen Technologie

	Innovationen bei Lohnfertigern
	Innovationen bei Eigenprodukt-Entwicklern
>	Erweiterungsmaßnahmen

Abbildung 30: Kategorisierung von Innovationen aus der Sicht kunststoffverarbeitender Unternehmen nach HANDKE²²²

²²⁰ Vgl. Handke (2005), S.39ff.

²²¹ Vgl. Handke (2005), S.34

²²² Handke (2005), S.35; eigene Darstellung

3.4 Grundlegende Herausforderungen im Produktentstehungsprozess von FVK-Bauteilen

„In der heutigen betrieblichen (Ingenieurs-)Praxis besteht immer noch einige Unsicherheit darüber, wie bei der Entwicklung und Dimensionierung eines Bauteils aus faserverstärkten Kunststoffen vorgegangen werden soll.“²²³

Werkstoffbedingte Komplexität

SCHÜRMANN verweist auf die Vielzahl von Parametern welche Einfluss auf den FVK selbst, als auch auf dessen Herstellung haben. Die Abstimmung dieser Parameter führt einerseits zu komplexen Entscheidungssituationen als auch zu komplexen Prozessen um der Erfüllung der Problemstellung gerecht zu werden. Diese Parameter haben in Abhängigkeit des Anwendungsfalles nicht dieselbe Tragweite und Wichtigkeit. Daher gilt es sich frühzeitig auf die relevanten Parameter zu konzentrieren und den unwichtigen Parametern nicht mehr Aufmerksamkeit als nötig zukommen zu lassen.²²⁴

Multidimensionale Entscheidungsprozesse

Die Produktentstehung von FVK-Bauteilen erfordert insbesondere die Abstimmung von Bauteilgeometrie, Materialauswahl sowie der Wahl des Herstellungsverfahrens unter Berücksichtigung der allgemeinen Aspekte Zeit, Kosten und Qualität.²²⁵

Für verschiedene Entwicklungsschwerpunkte wurden sogenannte „Design for X“-Ansätze“(DFX-Ansätze) entwickelt. Das X steht stellvertretend für die unterschiedlichen Ansätze, beispielsweise „Design for Manufacturing“ (DFM) oder „Design for Cost“ (DFC).²²⁶

Die Verfolgung eines einzelnen DFX-Ansatzes ist insbesondere im Bereich der Entwicklung von FVK-Bauteilen im Sinne des Leichtbaus nur bedingt zielführend. Die gleichzeitige Anwendung verschiedener DFX-Ansätze führt jedoch zu einer Steigerung der Komplexität der Entscheidungsprozesse durch die große Anzahl an Interdependenzen²²⁷.

KARBHARI/WILKINS betonen die Abhängigkeiten von Entwurf, Herstellung und Wirtschaftlichkeit in der Entwicklung von FVK-Bauteilen und verweisen auf folgende, voneinander abhängige zu beachtende Kriterien:²²⁸

- Auswahl des Produktionsprozesses
- Werkstoff (Faser, Matrix, Faservolumenanteil)
- Bauteilgeometrie (Form-Komplexität, Max. Abmessungen)
- mechanische Belastung des Bauteils
- Stückzahl (Gesamt oder pro Zeiteinheit)
- Werkzeug(Form)-Anforderungen

²²³ Avk (2014), S.295

²²⁴ Vgl. Schürmann (2007), S.619

²²⁵ Vgl. Wilkins/Karbhari (1991), S.261

²²⁶ Vgl. Lindemann (2007), S.1

²²⁷ Vgl. Lindemann (2007), S.1

²²⁸ Vgl. Karbhari/Wilkins (1991), S.335f.

- Wirtschaftlichkeit
- Qualität (Einfachheit, Vermeidung von Abfall, Wirkung auf Umwelt, Robustheit der Produkte, kurze Zykluszeiten, Erfüllung von Verpflichtungen)
- Oberflächenqualität
- Temperaturexpansion
- Prozessflexibilität
- Wiederholbarkeit der Materialeigenschaften
- Wiederholbarkeit von Prozessen
- Kosten
- Prozesszuverlässigkeit

Kooperation über Disziplinen-Grenzen hinweg

WILKINS/KARBHARI verweisen darauf, dass eine erfolgreiche Durchführung von Entwicklungsprojekten von Bauteilen aus FVK in engem Zusammenhang mit der Zusammensetzung des Entwicklungsteams steht. Die Zusammensetzung ist demnach abhängig vom Umfang und den Anforderungen eines Projektes.²²⁹

Die Entwicklung von Bauteilen aus FVK erfordert die intensive Zusammenarbeit von Konstrukteuren, Berechnern, Fertigungsspezialisten sowie Experten aus dem Bereich der Qualitätssicherung im Sinne des Simultaneous Engineering.²³⁰

3.5 Integrative Ansätze für FVK-Produktentstehungsprozesse

Der aktuelle Stand der Forschung hinsichtlich des Einsatzes von integrativen Produktentstehungsprozessen für die Entwicklung von FVK ist in der Literatur in begrenztem Ausmaß beschrieben. Gründe hierfür könnten in der bewussten Geheimhaltung vieler Unternehmungen liegen, da die Gestaltung des Produktentstehungsprozesses als kompetitiver Erfolgsfaktor eingeschätzt wird.²³¹

Concurrent Engineering for Composites nach KARBHARI/WILKINS

*„Concurrent Engineering thus is an ideal tool for composites product development, to the extent that were it not established in other fields, it would have been invented for composites out of necessity“*²³². Die Autoren verstehen hierbei CE als Ansatz zur kooperativen Produktentwicklung durch die beteiligten Unternehmensbereiche (siehe dazu Abbildung 31)²³³.

²²⁹ Vgl. Wilkins/Karbhari (1991), S.263

²³⁰ Vgl. Maschinenmarkt-Industrieportal (2011), S.1, Zugriffsdatum 09.01.2013

²³¹ Vgl. Töpfer et al. (2002), S.25

²³² Wilkins/Karbhari (1991), S.259

²³³ Vgl. Wilkins/Karbhari (1991), S.261

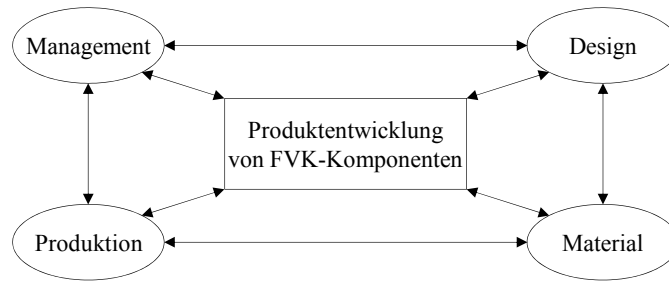


Abbildung 31: Integration in der Produktentwicklung von FVK-Komponenten²³⁴

Die Motivation für den Einsatz des Concurrent Engineering Ansatzes ist die Erfüllung der Kundenbedürfnisse, die Steigerung der Effizienz der betrieblichen Abläufe durch die Integration der Beteiligten Individuen, die Reduktion der Entwicklungszeit, die Erhöhung der Produktivität sowie die Sicherstellung einer hohen Produktqualität durch die optimierte Abstimmung von Materialien, Prozessen und Produktgestaltung.²³⁵

Concurrent engineering system for design of composite structures nach KIM et. al

Ziel dieses CE-Systems ist die Minimierung von Entwicklungszeit und Entwicklungskosten durch die effektive Integration der erforderlichen Tätigkeiten im Bereich der Gestaltung und Analyse von Faserverbundbauteilen. Der beschriebene Entwicklungsprozess von Faserverbundbauteilen besteht aus den Modulen Materialauswahl, Produktentwicklung/-gestaltung und Analyse/Simulation (siehe Abbildung 32). Der Prozess startet mit der Materialauswahl. Hierbei werden für den Anwendungsfall geeignete Materialien ausgewählt. In weiterer Folge besteht eine Vielzahl von Wechselbeziehungen zwischen den einzelnen Modulen. Die Wechselbeziehungen zwischen Materialwahl und Produktentwicklung/-Gestaltung sind primär der Komplexität und Vielzahl möglicher Faser-Matrix-Kombinationen geschuldet. Nach erfolgter Materialwahl kommt es zu einem starken Informationsaustausch zwischen dem Modul Produktentwicklung/-gestaltung vor- und rückwärts des Entwicklungsprozesses. Das Modul Produktentwicklung/-gestaltung stellt für die nachfolgende Analyse/Simulation Daten hinsichtlich der Materialeigenschaften, Spezifikationen bzgl. des Produktdesigns sowie Konstruktionsdaten bereit. Das Ergebnis der Analyse/Simulation ist ein verifizierter Produktentwurf.²³⁶

²³⁴ Vgl. Wilkins/Karbhari (1991), S.262; eigene Darstellung

²³⁵ Vgl. Wilkins/Karbhari (1991), S.268

²³⁶ Vgl. Kim et al. (2000), S.298f.

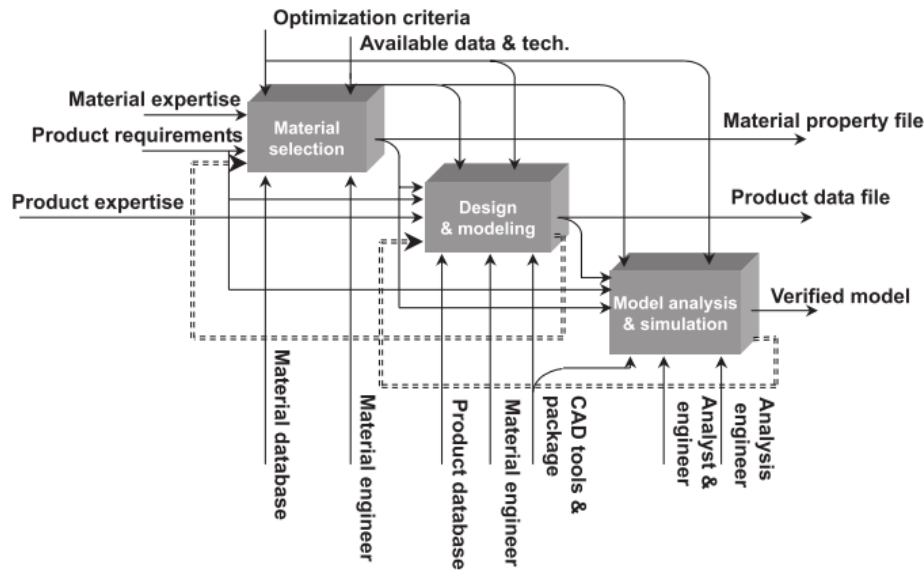


Abbildung 32: Entwicklungsprozess von Faserverbund-Strukturen nach KIM et al.²³⁷

Das von KIM et al. beschriebene Concurrent Engineering System ist ein Softwarepaket zur Durchführung unterschiedlicher Analysen für die Auslegung und Gestaltung von Bauteilen aus FKV.

Concurrent Engineering Approach nach LAURENZI/MARCHETTI

LAURENZI/MARCHETTI verfolgen mit der Implementierung eines Concurrent Engineering Ansatzes im Bereich der Entwicklung von im RTM- Verfahren hergestellten FVK-Bauteilen folgende Ziele:²³⁸

- Verkürzung der Entwicklungszeit
- Minimierung von Kosten und Verschwendung von Materialien
- Optimierung der Gestaltungsparameter hinsichtlich des Herstellungsprozesses
- Reduzierung des Zeitaufwands für Modifikation und Abstimmung der Formen/Werkzeuge
- Integration von Herstellungsprozess und der Optimierung der Bauteile unter Beachtung gegebener Restriktionen

Abbildung 33 zeigt das Ablaufdiagramm des Entwicklungsprozesses von RTM Bauteilen in Anlehnung an den Concurrent Engineering Ansatz basierend auf der Entwicklung mehrerer Bauteile für Helikopter am DIAEE (Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica) der Sapienza Universität in Rom. Die Darstellung zeigt insbesondere die Kopplung von struktureller Gestaltung und Herstellungsverfahren der entwickelten Bauteile.²³⁹

²³⁷ Kim et al. (2000), S.299

²³⁸ Vgl. Laurenzi/Marchetti (2012), S.215

²³⁹ Vgl. Laurenzi/Marchetti (2012), S.216

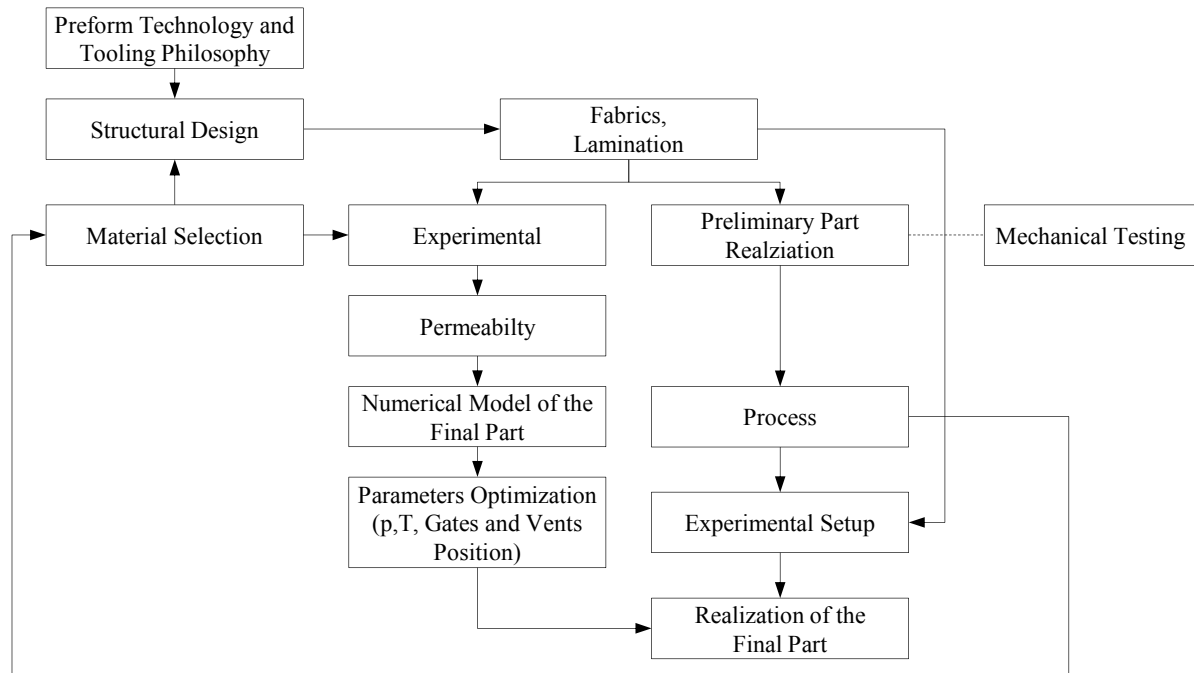


Abbildung 33: Ablaufdiagramm einer simultanen Produkt- und Produktionssystementwicklung von RTM Helikopter-Komponenten²⁴⁰

Prozessparameter (Fließverhalten des Harzes, Fülldauer der Form) werden in einer sehr frühen Phase des Entwicklungsprozesses als Restriktionen für die Materialauswahl festgelegt. Nach LAURENZI/MARCHETTI ist die Entwicklung von RTM-Bauteilen ein Kompromiss aus der Optimierung des Bauteils und des Herstellungsprozesses. Diese starke Kopplung von Bauteilgestaltung und Herstellungsprozess erfordert die gleichzeitige und abgestimmte Entwicklung beider Komponenten zur Optimierung des Gesamtergebnisses.²⁴¹

Anwendung des iPeM bei der Entwicklung einer Felge aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff

ALBERS/BRAUN beschreiben die Entwicklung einer Felge aus CFK unter der Anwendung des integrierten Produktenstehungsmodells (siehe dazu auch Abschnitt 2.3.4). Ziel des nachfolgend beschriebenen Anwendungsfalls war die Entwicklung einer Felge unter Berücksichtigung der Randbedingungen und Anforderungen zum Einsatz an einem Fahrzeug zur Teilnahme am studentischen Wettbewerb „Formula Student“²⁴².

Primäres Ziel war die Reduktion der Masse der Felge zur Steigerung der Leistungsfähigkeit des Gesamtfahrzeugs. Randbedingungen bezüglich der Geometrie und technischen Eigenschaften wurden in einem ersten Schritt von der bisher verwendeten, 4,3 Kilogramm schweren, Aluminium-Felge übernommen. Weitere Randbedingungen konnten von den

²⁴⁰ Laurenzi/Marchetti (2012), S.217

²⁴¹ Vgl. Laurenzi/Marchetti (2012), S.216

²⁴² Die Formula Student ist ein vom Verein Deutscher Ingenieure e.V. veranstalteter studentischer Wettbewerb; Detailinformationen siehe www.formulastudent.de

Einsatzumständen (z.B. keine Rad an Rad-Duelle, ebene Fahrbahn) im Rahmen eines Bewerbes der Formula Student abgeleitet werden. Im Zielsystem wurden die anfänglichen Randbedingungen der Felge festgehalten. Im Rahmen der Ermittlung der Zielwerte für die erforderliche Steifigkeit und Festigkeit konnte eine starke Überdimensionierung der bisher zum Einsatz gebrachten Felgen nachgewiesen werden und in das Zielsystem übernommen werden. Abbildung 34 zeigt das Anwendungsmodell des Produktentstehungsprozesses.²⁴³

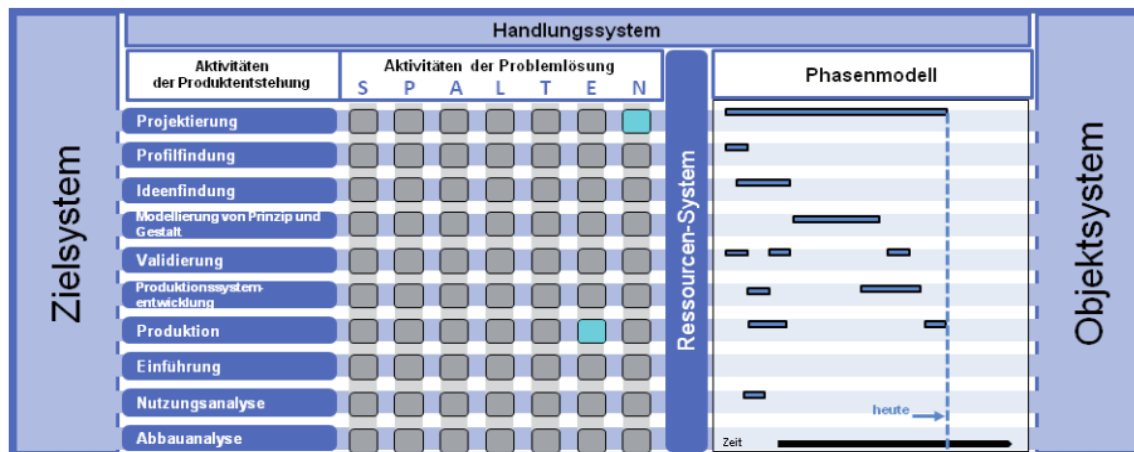


Abbildung 34: Anwendungsmodell eines Produktentstehungsprozesses einer Felge aus Faserverbundkunststoff²⁴⁴

In einem ersten Schritt erfolgte die Untersuchung der Eignung verschiedener Herstellungsverfahren für FVK-Bauteile und darauf basierend die Erstellung eines CAD-Modells sowie von Unterlagen für die Fertigung eines Funktionsmusters. Das Phasenmodell in Abbildung 34 zeigt die zu Beginn durchgeführte Profilfindung sowie die teilweise parallel verlaufende, von Produktionsthemen dominierte Ideenfindung sowie Validierungszyklen.²⁴⁵

In einem zweiten Schritt erfolgte die Modellierung von Prinzip und Gestalt in Form eines CAD-Modells für die Fertigung und den Formenbau (Produktionssystementwicklung). Im durchgeführten Projekt erfolgte eine unzureichende Weitergabe der Fertigungsrestriktionen (Ergebnis aus erstem Schritt) mit der Folge des Abbruchs des Produktentstehungsprozesses in der Produktion. Das aus dem CAD-Modell entwickelte und abgeleitete Formwerkzeug konnte aufgrund zu großer Krümmungen der Formflächen nicht wie geplant mit den Laminat-Schichten belegt werden. Die Validierung dieses Teilschrittes war unzureichend. Abhilfe hätte beispielsweise eine Drapiersimulation schaffen können. Da die Nichtberücksichtigung der Fertigungsrestriktionen erst in der Produktion augenscheinlich wurde, musste das Zielsystem im Rahmen einer Iterationsschleife angepasst und dieses Wissen so in den Prozess integriert werden.²⁴⁶

²⁴³ Vgl. Albers/Braun (2011), S.25f.

²⁴⁴ Albers/Braun (2011), S.27

²⁴⁵ Vgl. Albers/Braun (2011), S.26

²⁴⁶ Vgl. Albers/Braun (2011), S.26f.

Auf Basis der gewonnenen Erfahrung und des generierten Wissens konnte aus dem Anwendungsmodell (Abbildung 34) ein Referenzmodell für die Entwicklung von Produkten aus Faserverbundkunststoffen (Abbildung 35) entwickelt werden.²⁴⁷

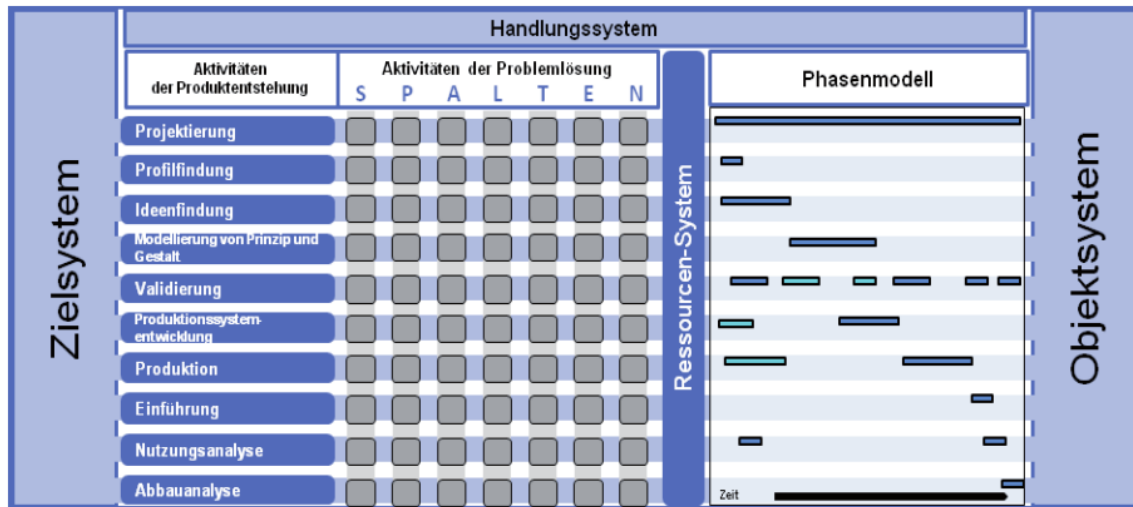


Abbildung 35: Referenzmodell für die Entwicklung von Produkten aus Faserverbundkunststoffen nach ALBERS/BRAUN²⁴⁸

3.6 Zusammenfassung

Faserverbundkunststoffe gehören zur Gruppe der Verbundwerkstoffe und bestehen aus mehreren Phasen – der Matrix (Kunststoff) und Verstärkungsmaterial(-ien) (Fasern). Durch die abgestimmte Kombination von Matrix- und Verstärkungsmaterialien kann ein speziell für einen Anwendungsfall optimierter Werkstoff designt werden. Die Eigenschaften des Werkstoffes werden beispielsweise durch die Wahl des Fasertyps, des Matrixmaterials, des Faservolumengehaltes, der Orientierung der Verstärkungsfasern, der unterschiedlichen Gestaltung einzelner Schichten des Laminates sowie des Aufbaus des Bauteils durch die einzelnen Schichten bestimmt. Diese Möglichkeit der gezielten Gestaltung des Materials bietet vielfältige Vorteile im Vergleich zu traditionellen, isotropen Konstruktionswerkstoffen wie Stahl oder Aluminium.

Dieser Vorteil der FVK verursacht jedoch eine gesteigerte Komplexität in den Entscheidungsprozessen im Rahmen der Produktentstehung durch die Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten (Abbildung 36) der beeinflussenden Faktoren. Entscheidungen hinsichtlich der Bauteilgestaltung, der Materialgestaltung sowie der Produktion müssen aufgrund ihrer starken wechselseitigen Abhängigkeiten generell aufeinander abgestimmt getroffen werden.

²⁴⁷ Vgl. Albers/Braun (2011), S.29

²⁴⁸ Albers/Braun (2011), S.26

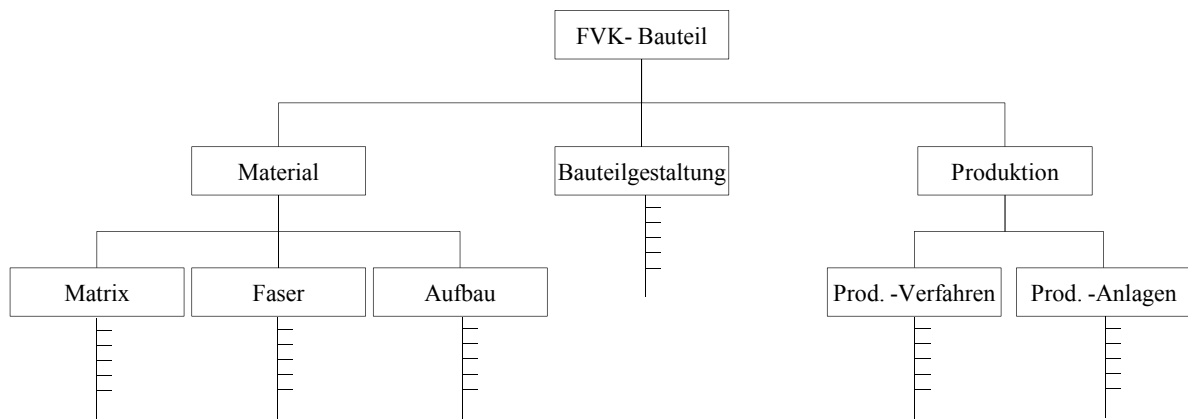


Abbildung 36: Determinierende Faktoren der Eigenschaften eines FVK-Bauteils²⁴⁹

In der Literatur beschriebene integrative Ansätze für FVK-Produktentstehungsprozesse legen den Schwerpunkt meist auf eine technische Integration im Produktentstehungsprozess, bieten jedoch keine Lösungen hinsichtlich einer menschlichen und organisatorischen Integration.

Die adäquate Gestaltung der Kooperation zwischen den beteiligten Disziplinen und Individuen ist ein wesentlicher Faktor zur Durchführung eines effektiven und effizienten Produktentstehungsprozesses von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen.

²⁴⁹ Eigene Darstellung

4 Leichtbau

Faserverbundkunststoffe werden aufgrund ihrer hervorragenden masse-spezifischen Eigenschaften sehr häufig als Werkstoffe für Leichtbauanwendungen eingesetzt. Leichtbau ist meist das Hauptmotiv für den Einsatz von FVK. Die Ausführungen des folgenden Abschnitts geben einen Überblick über die Grundsätze der Entwicklung von Leichtbaukomponenten, um daraus die Auswirkungen dieser Grundsätze auf den Produktentstehungsprozess von FVK abzuleiten.

Nach WIEDEMANN ist Leichtbau eine Absichtserklärung „[...] aus funktionalen oder ökonomischen Gründen das Gewicht zu reduzieren oder zu minimieren, ohne die Tragfähigkeit, die Steifigkeit oder andere Funktionen der Konstruktion zu schmälern oder, was schließlich dasselbe bedeutet: die Tragfunktionen ohne Gewichtszunahme zu verbessern“.²⁵⁰

Maßnahmen zur Reduktion des Eigengewichts einer Konstruktion unter Berücksichtigung der geforderten Sicherheit und Langlebigkeit sind:²⁵¹

- *Realisierung von fortschrittlichen Bauweisenlösungen*
- *Einsatz leichter und hochfester Werkstoffe*
- *Entwicklung neuer Herstellungstechnologien*
und
- *die analytische Beherrschung des Beanspruchungs- bzw. Instabilitätsfalls durch hochwertige Analysemethoden (FEM, BEM).*

Die Literatur beschreibt im Zusammenhang des Leichtbaus Begriffe wie Leichtbaustrategien, Leichtbauprinzipien und Leichtbauweisen.²⁵² Diese Begriffe werden im Folgenden erörtert.

4.1 Leichtbaustrategien

Leichtbaustrategien dienen der Gestaltung eines zielgerichteten Prozesses zur Entwicklung gewichtsoptimierter Bauteile im Sinne des Leichtbaus und beziehen dabei die Hauptfaktoren Bauweisen, Werkstoffe und Fertigungstechnologien in den Prozess mit ein.²⁵³

KLEIN klassifiziert Leichtbau-Konstruktionsstrategien in den Formleichtbau (Umsetzung von leichtbaufördernden Konstruktionsprinzipien, geeigneten Profilgeometrien und eindeutigen Kraftleitungspfaden), den Stoffleichtbau (Ersatz von spezifisch schweren Werkstoffen durch

²⁵⁰Wiedemann (2007), S.1f.

²⁵¹ Klein (2009), S.3

²⁵² Vgl. Ellenrieder et al. (2013), S.44

²⁵³ Vgl. Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.62f.

leichtere Werkstoffe mit hohen Gütekennzahlen) sowie den Fertigungsleichtbau (mit dem Ziel der Funktionsintegration bei geringstem Materialeinsatz).²⁵⁴

Nach ELLENRIEDER et al. und KOPP et al. ist zusätzlich zu der von KLEIN getroffenen Klassifizierung der Bedingungsleichtbau, den Leichtbaustrategien zuzuordnen. Zur Erreichung einer optimierten Leichtbaulösung müssen alle unterschiedlichen Strategien berücksichtigt werden.²⁵⁵

Stoffleichtbau

Der Stoffleichtbau erfolgt durch den Austausch des eingesetzten Materials durch ein Material geringerer Dichte (artfremd – z.B. Stahl durch Aluminium) oder durch den Einsatz eines Materials mit besseren masse-spezifischen technologischen Eigenschaften (artgleich – z.B. (Stahl durch Stahl mit besonderer Güte wie z. B. formgehärtete hochfeste Stähle).²⁵⁶

Die Substitution eines Werkstoffes ist jedoch auch meist mit erforderlichen Anpassungen beispielsweise hinsichtlich der Formgebung, der Fertigungstechnologien, der eingesetzten Fügetechniken und der Bauteilgestaltung (Geometrie) sowie Änderungen hinsichtlich der auftretenden Kosten für die Realisierung des zu entwickelnden Bauteils verbunden.²⁵⁷

Als Werkstoffkenngrößen zur Beschreibung des Werkstoffeinflusses rein durch das Gewicht hervorgerufen, können das spezifische Volumen, die spezifische Festigkeit sowie die spezifische Steifigkeit herangezogen werden.²⁵⁸

„Je größer das spezifische Volumen ist, desto größer ist auch das je kg Gewicht G eingenommene Volumen. Die Reißlänge L_R ist die Länge, bei der ein Werkstoff (Stab) mit konstanter Querschnittsfläche unter seinem Eigengewicht als Zugkraft reißt. Sie ist somit ein Maß für die Werkstoffausnutzung bei reiner Zugbeanspruchung. Die Dehnlänge L_D ist ein Maß für elastische Verformbarkeiten bei reiner Zugbeanspruchung.“²⁵⁹

Formleichtbau

Formleichtbau ist die Optimierung eines Bauteils hinsichtlich der Materialverteilung. Bereiche hoher Beanspruchung werden gezielt verstärkt – Bereiche mit geringer Belastung werden geschwächt bzw. eliminiert. Möglichkeiten dazu sind beispielsweise die Veränderung von Wandstärken, das Einbringen von Versteifungsrippen oder das Schließen offener Profile. Im Rahmen des Formleichtbaus können sogenannte Topologie-Optimierungsverfahren zum Einsatz kommen. Ausgangspunkt dieser Verfahren ist die Festlegung des zur Verfügung stehenden Bauraumes sowie die Definition der Krafteinleitungen. Unter Beachtung dieser Rahmenbedingungen werden verschiedene Lastfälle simuliert und in weiterer Folge eine optimierte Struktur hinsichtlich der Lastpfade abgeleitet.²⁶⁰

²⁵⁴ Vgl. Klein (2009), S.3

²⁵⁵ Vgl. Ellenrieder et al. (2013), S.45; Vgl. Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.63

²⁵⁶ Vgl. Ellenrieder et al. (2013), S.52ff.

²⁵⁷ Vgl. Friedrich et al. (2008), S.323; Vgl. Ellenrieder et al. (2013), S.54

²⁵⁸ Vgl. Niemann/Winter/Höhn (2005), S.169

²⁵⁹ Niemann/Winter/Höhn (2005), S.169

²⁶⁰ Vgl. Ellenrieder et al. (2013), S.67ff.

Bedingungsleichtbau

Der Fokus des Bedingungsleichtbaus liegt auf der detaillierten Untersuchung und Kenntniss der Einsatzbedingungen des Leichtbauteils. Durch die genaue Kenntnis der auf ein Produkt oder Bauteil einwirkenden Rahmenbedingungen und die entsprechende Auslegung dieser Produkte oder Bauteile kann Leichtbaupotential generiert werden.²⁶¹

Folgende Ansatzpunkte können die Basis von Leichtbaupotentialen im Sinne des Bedingungsleichtbaus darstellen:²⁶²

- Reduzierung der erwarteten Lebensdauer
- Angleichung der Lebensdauer unterschiedlicher Bauteile oder Baugruppen eines Produktes
- Reduzierung der Beanspruchbarkeit
- Anpassung von Produkten an die spezifischen Herausforderungen unterschiedlicher Märkte (z. B. Crash-Anforderungen)

Konzeptleichtbau

Der Konzeptleichtbau verfolgt den Ansatz, nicht nur einzelne Bauteile zu betrachten, sondern eine ganzheitliche Sicht auf ein Teil- und/oder ein Gesamtsystem. Durch die gezielte Abstimmung von Einzelbauteilen zu Teilsystemen bis hin zum Gesamtsystem kann Leichtbaupotential generiert werden.²⁶³

Nach ELLENRIEDER et al. wählt der Konzeptleichtbau „[...] die beste bzw. geeignetste Bauweise aus dem Verhältnis zwischen Funktion und Gewicht eines Systems oder Teilsystems“.²⁶⁴

Fertigungsleichtbau

Unter Fertigungsleichtbau werden Gewichtseinsparungen durch den Einsatz bestimmter Herstellungsverfahren, Fertigungsverfahren und Montageverfahren zusammengefasst. Als Beispiel können hier sogenannte Tailored Blanks genannt werden durch deren Einsatz die Realisierung von Blechbauteilen mit variablen und optimierten Wandstärken ermöglicht wird.²⁶⁵

4.2 Leichtbauweisen

Nach FRIEDRICH/KRISHNAMOORTHY beschreibt der Begriff der Bauweise „[...] die kreative Ausführung einer Leichtbaulösung“.²⁶⁶

²⁶¹ Vgl. Ellenrieder et al. (2013), S.71

²⁶² Vgl. Ellenrieder et al. (2013), S.71

²⁶³ Vgl. Friedrich et al. (2008), S.324

²⁶⁴ Ellenrieder et al. (2013), S.68

²⁶⁵ Vgl. Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.67

²⁶⁶ Friedrich/Krishnamoorthy (2013), S.2

Nach WIEDEMANN definieren sich Bauweisen „[...] nach ihren technologischen Merkmalen und Bedingungen: solchen der Fertigung, der Fügung und des Materials“.²⁶⁷ Die Unterscheidung der Leichtbauweisen erfolgt in die Differentialbauweise, Integralbauweise, Integrierende Bauweise sowie die Verbundbauweise.²⁶⁸

Unter Leichtbauweisen sind nach ELLENRIEDER et al. unterschiedliche Herangehensweisen der Lösung eines bestimmten Leichtbauproblems zu verstehen. Sie zählen, zusätzlich zur von WIEDEMANN getroffenen Zuteilung, die Hybridbauweise, die Modulbauweise, sowie die Vollwand- und Schalensysteme zu den Leichtbauweisen.²⁶⁹

KOPP et al. ordnen die Hybridbauweise sowie das Multi-Material-Design der Verbundbauweise zu.²⁷⁰

Differentialbauweise

Bei der Differentialbauweise werden Gesamtstrukturen aus Einzelteilen (Bauteile, Konstruktionselemente, Halbzeuge) aufgebaut.²⁷¹ Die Einzelteile werden durch unterschiedliche Fügetechnologien, wie beispielsweise überlappendes Kleben, Schweißen oder Nieten, miteinander verbunden.²⁷²

Durch Anwendung der Differentialbauweise besteht die Möglichkeit des Einsatzes unterschiedlicher Werkstoffe in einer Gesamtstruktur – durch den Einsatz des richtigen Materials am richtigen Ort kann eine Gewichtseinsparung erreicht werden.²⁷³ Die Differentialbauweise bietet des Weiteren eine verhältnismäßig leicht umsetzbare Möglichkeit des Einsatzes unterschiedlicher Wandstärken der verwendeten Materialien für die Einzelteile und trägt so zur Gewichtseinsparung bei.²⁷⁴

Durch die Trennbarkeit der Einzelteile können im Schadensfall Reparaturen gezielt am beschädigten Einzelteil erfolgen. Dadurch kann unter Umständen der Austausch der Gesamtstruktur vermieden werden. Die Trennbarkeit der Einzelteile wirkt sich positiv auf die Recyclierbarkeit der Gesamtstruktur am Ende der Lebensdauer aus.²⁷⁵

Neben den beschriebenen Vorteilen bringt die Differentialbauweise jedoch auch Nachteile mit sich. Beim Einsatz verschiedener metallischer Werkstoffe im Rahmen der Differentialbauweise kann es beispielsweise zu Korrosionsproblemen infolge von Kontaktkorrosion kommen.²⁷⁶ Des Weiteren führen nötige Überlappungen an Fügeflanschen sowie der nötige Einsatz von Montageelementen zu erhöhtem Materialeinsatz.²⁷⁷ Ebenso

²⁶⁷ Wiedemann (2007), S.7

²⁶⁸ Vgl. Wiedemann (2007), S.7f.

²⁶⁹ Vgl. Ellenrieder et al. (2013), S.45

²⁷⁰ Vgl. Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.72ff.

²⁷¹ Vgl. Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.70

²⁷² Vgl. Klein (2009), S.17

²⁷³ Vgl. Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.70; Vgl. Ellenrieder et al. (2013), S.69

²⁷⁴ Vgl. Ellenrieder et al. (2013), S.69

²⁷⁵ Vgl. Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.70

²⁷⁶ Vgl. Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.70

²⁷⁷ Vgl. Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.70; Vgl. Ellenrieder et al. (2013), S.69

erfordert die Bauweise hohen Montageaufwand zum Aufbau einer Gesamtstruktur aus mehreren Einzelteilen.²⁷⁸

Integralbauweise

Im Gegensatz zur Differentialbauweise verfolgt die Integralbauweise das Ziel der Einstückigkeit von Gesamtstrukturen sowie die Integration mehrerer Funktionen in diese Gesamtstruktur.²⁷⁹

Im Vergleich zur Differentialbauweise ergeben sich folgende Vorteile durch die Umsetzung der Integralbauweise:

- Die Integralbauweise führt zu einem geringeren Bauteilgewicht durch die Vermeidung von Fügstellen (insbesondere durch den Wegfall von Fügeflanschen und Verbindungsmaterial).²⁸⁰
- Die Integralbauweise führt zu reduziertem Montageaufwand.²⁸¹
- Zur Umsetzung eines Integralbauteils ist nur ein Werkzeug nötig.²⁸²
- Integralbauteile sind bei Verwendung einer einzigen Materialart gut recyclebar.²⁸³

Diesen Vorteilen stehen im Vergleich zur Differentialbauweise unter anderem auch folgende Nachteile gegenüber:

- Kommt es zu Beschädigungen des Integralbauteils ist eine Reparatur meist sehr aufwendig. Ist die Reparatur trotz hohem Aufwand nicht möglich muss das gesamte Bauteil ersetzt werden.²⁸⁴
- Im Rahmen der Integralbauweise ist die Kombination verschiedener Materialien in einer Gesamtstruktur eingeschränkt.²⁸⁵
- Die Integralbauweise verursacht oft eine aufwendigere Fertigung sowie teurere Werkzeuge.²⁸⁶

Integrierende Bauweise

Nach KLEIN versteht man unter dieser Bauweise die sinnvolle Kombination aus Differential- und Integralbauweise. Es sollen die jeweils positiven Aspekte beider Bauweisen genutzt werden und in Abhängigkeit der Anforderungen hinsichtlich Reparaturfreundlichkeit, Recyclierbarkeit und des Schädigungsverhaltens abgestimmt und zur Anwendung gebracht werden.²⁸⁷

Modulbauweise

²⁷⁸ Vgl. Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.70; Vgl. Ellenrieder et al. (2013), S.68

²⁷⁹ Vgl. Klein (2009), S.18; Vgl. Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.70; Vgl. Friedrich et al. (2008), S.316

²⁸⁰ Vgl. Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.70; Vgl. Ellenrieder et al. (2013), S.69

²⁸¹ Vgl. Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.70; Vgl. Ellenrieder et al. (2013), S.68

²⁸² Vgl. Ellenrieder et al. (2013), S.69

²⁸³ Vgl. Ellenrieder et al. (2013), S.69

²⁸⁴ Vgl. Ellenrieder et al. (2013), S.69

²⁸⁵ Vgl. Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.70

²⁸⁶ Vgl. Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.70

²⁸⁷ Vgl. Klein (2009), S.18f.

„Ein Modul ist eine Baugruppe eines größeren Zusammenbaus. Es zeigt eine starke Vernetzung innerhalb seines umfassenden Bereiches und eine im Vergleich dazu schwächere Vernetzung zu seinen Nachbarbauteilen bzw. –modulen.“²⁸⁸

Die Bildung von Modulen kann funktionsbezogen (z.B. Fahrwerksmodul), prozessbezogen (z.B. Entwicklungsmodul, Fertigungsmodul, Montagemodul) oder strukturbezogen (z.B. Vorderwagen) erfolgen.²⁸⁹

Als Beispiel einer Modulbauweise kann das Konzept des BMW i3 angeführt werden. Dieses Fahrzeug basiert auf zwei Hauptmodulen - dem Drive-Modul und dem Life-Modul. Das Drive-Modul umfasst das Fahrwerk, den Antrieb sowie den Energiespeicher. Das Life-Modul stellt die Fahrgastzelle dar. Die oben angeführte Einteilung der Aspekte der Modulbildung ist in diesem Beispiel jedoch in mehrerlei Hinsicht interpretierbar. Die getroffenen Modulgrenzen können sowohl funktionsbezogen (Fahrzeugantrieb zu Insassenschutz), prozessbezogen (Drive-Modul aus Aluminium zu Life-Modul aus CFK) oder strukturbezogen (Antriebseinheit zu Fahrgastraum) interpretiert werden.²⁹⁰

Durch die Bildung von Modulen konnte im beschriebenen Beispiel der Einsatz des richtigen Materials an der richtigen Stelle realisiert werden.

Verbundbauweise

Diese Bauweise zeichnet sich durch die gezielte Kombination unterschiedlicher Materialien aus. Durch die Kombination unterschiedlicher Materialien mit deren spezifischen Eigenschaften können auf den Anwendungsfall abgestimmte Leichtbauteile oder Leichtbaustrukturen erreicht werden. Als Beispiel können hier Sandwichstrukturen angeführt werden. Diese zeichnen sich durch die Kombination von Kernen (Schäumen oder Waben) mit Decklagen beispielsweise aus Metall- oder Kunststoffplatten aus. Durch die Anwendung von Sandwichstrukturen im Vergleich zu Vollmaterial können bei zumindest gleicher Biegesteifigkeit geringere Strukturgewichte erreicht werden.²⁹¹

Diesen durch die Verbundbauweise generierbaren Vorteilen stehen auch Nachteile gegenüber. Herausforderungen im Einsatz der Verbundbauweise sind beispielsweise:²⁹²

- Geringere Fail-Safe-Eigenschaften
- Die Gestaltung von Krafteinleitungspunkten
- Höherer Fertigungsaufwand
- Unter Umständen höhere Werkstoffkosten
- Schwierige Realisierung von Geometriesprüngen
- Begrenzte Reparaturfähigkeit

²⁸⁸ Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.71

²⁸⁹ Vgl. Friedrich et al. (2008), S.315f.

²⁹⁰ Vgl. Friedrich/Krishnamoorthy (2013), S.13; www.bmw.de (Zugriffdatum 30.07.2014)

²⁹¹ Vgl. Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.72

²⁹² Vgl. Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.72f.

Hybridbauweise:

Hybridstrukturen werden in zwei Gruppen unterteilt – Hybridstrukturen als Materialmischbauweise und Hybridstrukturen als Bauteilmischbauweise.²⁹³

Hybridstrukturen als Materialmischbauweise zeichnen sich dadurch aus, dass „[...] mindestens ein Werkstoff in formgebender Fertigung (z.B. Spritzgießen, Gießen, Sintern) mit einer weiteren Werkstoffkomponente verbunden wird“.²⁹⁴ Die Verbindung wird ohne Einsatz von kalten oder warmen Fügeverfahren erreicht und kann sowohl form- als auch stoffschlüssig ausgebildet sein.²⁹⁵

Im Gegensatz dazu sind Hybridstrukturen in Bauteilmischbauweise durch den Einsatz von kalten oder warmen Fügeverfahren gekennzeichnet.²⁹⁶

Die Hybridbauweise kombiniert unterschiedliche Werkstoffe auf Bauteilebene wodurch durch die sich ergänzende Kombination unterschiedlicher Werkstoffeigenschaften Leichtbaupotential generiert werden kann. Als Nachteile sind ein erhöhter Fertigungsaufwand (insbesondere im Falle von Hybridstrukturen als Materialmischbauweise durch den Aufwand für die Urformverfahren), eingeschränkte Reparaturmöglichkeiten und Schadensbeurteilung sowie mögliche Korrosionsprobleme in den Verbindungsstellen zwischen den unterschiedlichen Werkstoffen zu nennen.²⁹⁷

Durch die Kombination unterschiedlicher Werkstoffe kann es auch durch unterschiedliche Wärmeausdehnungen der verwendeten Materialien zu sogenannter thermischer Unverträglichkeit kommen. Dabei kann es sowohl beim Einsatz eines in Hybridbauweise hergestellten Bauteils (Änderung der Betriebstemperatur) als auch bereits während der Fertigung (z.B. bei Abkühlung nach bestimmten Fertigungsschritten) zu Problemen hinsichtlich auftretender Eigenspannungen oder Verformungen kommen.²⁹⁸

Multi-Material-Design:

Kerngedanke des Multi-Material-Design (MMD) ist der Einsatz des „richtigen Materials“ am „richtigen Ort“. Durch das MMD werden Bauteile aus den jeweiligen anforderungsgerechten Materialien gezielt zur Erreichung eines Gewichtsoptimums kombiniert. Von besonderer Bedeutung in diesem Zusammenhang sind die eingesetzten Fügeverfahren zur Verbindung der einzelnen Bauteile. Diese müssen unter anderem den Herausforderungen hinsichtlich Montierbarkeit, geforderter mechanischen Eigenschaften, thermischen Unverträglichkeiten, Lebensdauer, Temperatur- und Wärmebeständigkeit, Korrosionsbeständigkeit sowie Recyclingfähigkeit gerecht werden.²⁹⁹

²⁹³ Vgl. Henning/Weidenmann/Bader (2011), S.415

²⁹⁴ Henning/Weidenmann/Bader (2011), S.415f.

²⁹⁵ Vgl. Henning/Weidenmann/Bader (2011), S.415f.

²⁹⁶ Vgl. Henning/Weidenmann/Bader (2011), S.416

²⁹⁷ Vgl. Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.73

²⁹⁸ Vgl. Wiedemann (2007), S.500

²⁹⁹ Vgl. Klein (2009), S.38; Vgl. Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.73f.

Synonym für den Begriff MMD wird auch der Begriff der Mischbauweise verwendet.³⁰⁰ Das Ergebnis eines konsequent umgesetzten MMD sind „[...] *Hybride aus Bauweisen und Materialien*“.³⁰¹

4.3 Leichtbauökonomie

WIEDEMANN definiert 3 Klassen des Leichtbaus, in denen das Gewicht eines Bauteils mehr oder weniger Einfluss auf die Kosten oder die Systemfunktionen eines Leichtbauteils hat - den Spar-Leichtbau, den Öko-Leichtbau und den Zweckleichtbau. Spar-Leichtbau ist die direkte Einsparung an Material oder Herstellungskosten. Die indirekte Rechtfertigung des Öko-Leichtbaus ist beispielsweise der gesenkte Energieverbrauch eines bewegten Bauteils in Leichtbauweise. Der Zweckleichtbau kann als Bedingung für das Funktionieren einer Maschine gesehen werden – beispielsweise beim Auftreten von hohen Beschleunigungen in und auf Maschinen oder extremen Ausmaßen dieser.³⁰²

ELLENRIEDER et al. erweitern diese von WIEDEMANN getroffene Klassifizierung um den Begriff des Ultraleichtbau – hierbei wird ohne Beachtung der verursachten Kosten eine Entscheidung immer zugunsten der leichtesten Lösungsvariante getroffen.³⁰³ Abbildung 37 zeigt den Zusammenhang von Kosten und Gewichtseinsparung sowie die Einordnung der genannten Kategorien der Leichtbauökonomie.

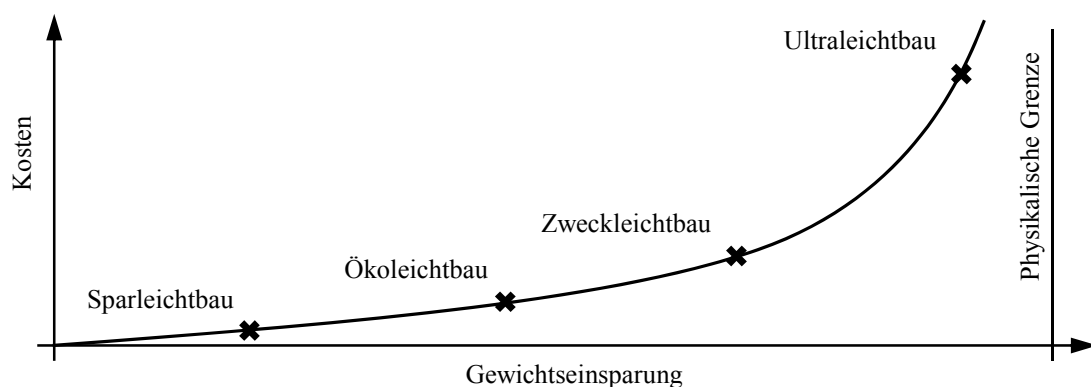


Abbildung 37: Darstellung der Kosten der Gewichtseinsparung und Leichtbauökonomie nach ELLENRIEDER et al.³⁰⁴

Als Ursachen für höhere Herstellkosten für Systeme mit höherem Leichtbaugrad nennt KLEIN folgende Faktoren:³⁰⁵

³⁰⁰ Vgl. Friedrich et al. (2008), S.313

³⁰¹ Friedrich et al. (2008), S.313

³⁰² Vgl. Wiedemann (2007), S.2

³⁰³ Vgl. Ellenrieder et al. (2013), S.47

³⁰⁴ Ellenrieder et al. (2013), S.48; eigene Darstellung

³⁰⁵ Klein (2009), S.4

- *Die Ingenieurkosten aus Design, Berechnung und Erprobung [...] können bei Leichtbaukonstruktionen um den Faktor 5-10fach höher liegen.*
- *Mit sinkendem spezifischem Gewicht werden gewöhnlich die Werkstoffe teurer [...].*
- *Des Weiteren können die Fertigungskosten infolge höherer Werkzeug- und Prozesskosten bis zu 3fach höher liegen.*

Nach KLOSE/GÄNZLE ist die ganzheitliche Betrachtung von Werkstoffen, Oberflächentechnologien, der Konstruktion, der Fertigungstechnologie sowie ein „Umdenken in der Prozesskette und Organisation [...]“ zur Erreichung eines kosteneffizienten Leichtbaus von Nöten.³⁰⁶ Leichtbaumaßnahmen sind immer unter dem Gesichtspunkt eines gerechtfertigten Verhältnisses von Aufwand zu Nutzen zu betrachten bzw. zu bewerten.³⁰⁷

4.4 Konstruktion von Leichtbaukomponenten

PAHL beschreibt mit dem Begriff der Konstruktionsmethodik „[...] ein geplantes Vorgehen mit konkreten Handlungsanweisungen zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme [...]. Dazu gehören „[...] Vorgehenspläne zur inhaltlichen und organisatorischen Verknüpfung von Arbeitsschritten und Konstruktionsphasen, die flexibel an die jeweilige Problemlage angepasst werden“ unter der „[...] Beachtung von generellen Zielsetzungen und die Verwirklichung von Regeln und Prinzipien (Strategien) insbesondere bei der Gestaltung [...] sowie Methoden zur Lösung einzelner Konstruktionsprobleme oder –teilaufgaben[...].“³⁰⁸

Systematische Vorgehensweise des leichtbaugerechten Konstruierens nach KLEIN

Nach KLEIN erfordert die Leichtbaukonstruktion keine eigene Konstruktionslehre. Sie bedarf jedoch einer Modifizierung zur Berücksichtigung der leichtbauspezifischen Herausforderungen.³⁰⁹

Grundsätzlich ist auch im Rahmen der Lösung von Leichtbauproblemen die Erfüllung einer vorgegebenen Funktion zu erreichen, wobei ein möglichst geringes Gewicht die wichtigste Nebenbedingung darstellt und gleichzeitig die Erfüllung ergänzender Erfordernisse wie beispielsweise Sicherheitsaspekte, erforderliche Lebensdauer, Herstellbarkeit oder Umweltverträglichkeit gewahrt bleiben müssen.³¹⁰

KLEIN gliedert die Vorgehensweise des leichtbaugerechten Konstruierens in die vier Hauptarbeitsschritte Klärung der Randbedingungen, Konzeptfindung, Umsetzen in Entwürfen und Ausarbeiten von Fertigungsunterlagen. Die Klärung der Randbedingungen umfasst die Erstellung einer Anforderungsliste, die Eingrenzung bestehender Bedingungen, das Festlegen einer Lösungsrichtung sowie die Erörterung technisch-wirtschaftlicher Konsequenzen. Der folgende und darauf aufbauende Schritt der Konzeptfindung befasst sich mit der Analyse des Kernproblems, dessen Aufspaltung in Teilprobleme, der Lösungssuche für die Teilprobleme,

³⁰⁶ Vgl. Klose/Gänzle (2009), S.41; Klose/Gänzle (2009), S.41

³⁰⁷ Vgl. Klein (2009), S.3; Vgl. Wiedemann (2007), S.2

³⁰⁸ Pahl et al. (2005), S.10

³⁰⁹ Vgl. Klein (2009), S.10; Vgl. Feyerabend (1991), S.2

³¹⁰ Vgl. Klein (2009), S.10

deren Kombination zu Gesamtlösungsansätzen sowie der Bewertung dieser Ansätze und führt zur Erstellung von Konzeptskizzen. Im Rahmen der Umsetzung in Entwürfen werden die erarbeiteten Konzepte konkretisiert, bewertet, gegebenenfalls überarbeitet und schlussendlich zu einem finalen Entwurf umgesetzt. Die darauf folgende Ausarbeitung der Fertigungsunterlagen erfolgt auf Basis der exakten Bestimmung der Geometrie, deren Dimensionen sowie der gewählten Werkstoffe und Herstellungsverfahren. Zur Optimierung der entwickelten Lösung kommt es im Anschluss daran zu Optimierungsschleifen durch die Herstellung von Prototypen, beispielsweise zur Kontrolle der Einhaltung der geforderten Funktionen oder der Überprüfung geforderter Belastbarkeiten. Abschließend erfolgen die Freigabe und deren Dokumentation unter Beachtung der in der jeweiligen Branche geltenden Normen und Richtlinien.³¹¹

Abbildung 38 zeigt die systematische Vorgehensweise des leichtbaugerechten Konstruierens nach KLEIN.

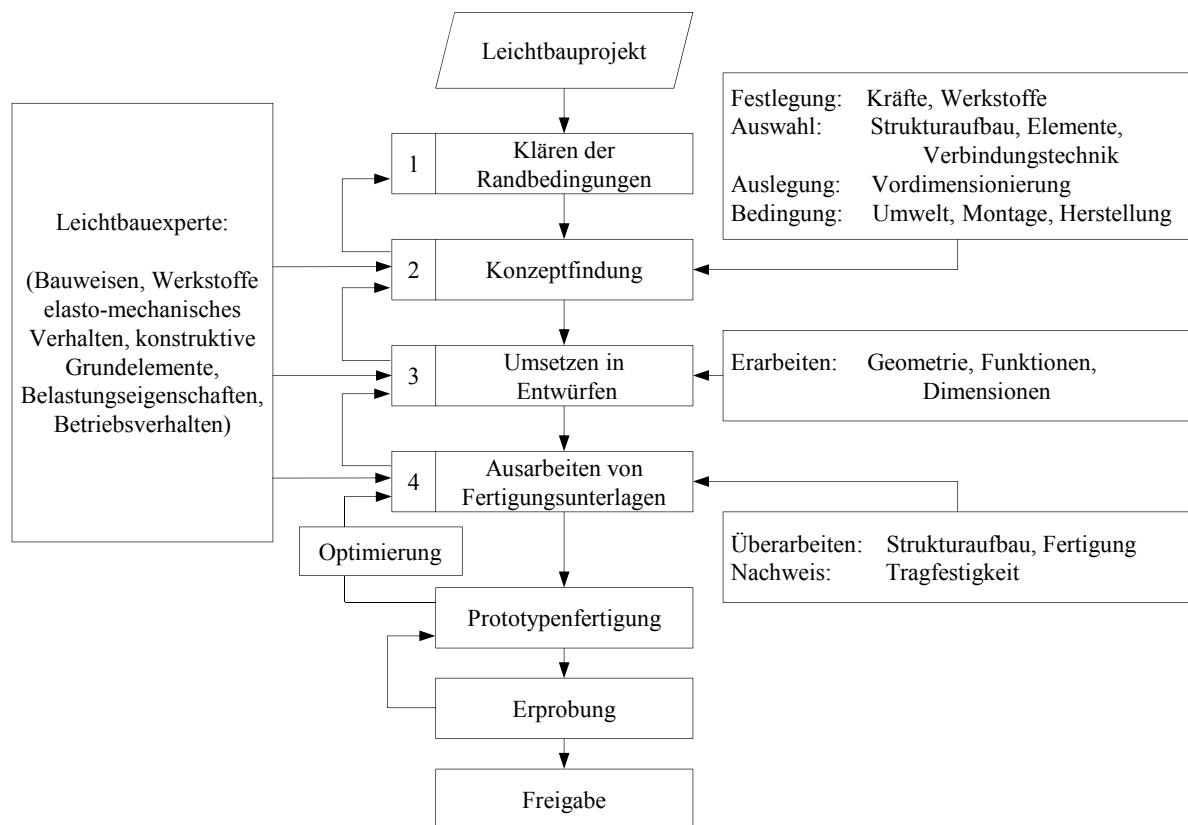


Abbildung 38: Systematische Vorgehensweise des leichtbaugerechten Konstruierens nach KLEIN³¹²

KLEIN beschreibt insbesondere die Wichtigkeit der Konzeptfindung als Teil der Leichtbaukonstruktion, deren Qualität wesentlich auf der möglichst exakten Kenntnis der vorherrschenden Randbedingungen basiert. Die beschriebene Vorgehensweise erfordert zur Umsetzung des Leichtbaugedankens „gesichertes Leichtbauwissen“. KLEIN beschreibt damit eine Kombination von theoretischem Wissen und Praxiserfahrung. Es umfasst beispielsweise

³¹¹ Vgl. Klein (2009), S.10f.

³¹² Klein (2009), S.12, eigene Darstellung

Kenntnisse der Werkstoffe, deren Auswirkungen auf Bauweisen, deren Herstellungsverfahren sowie einzusetzender Methoden und Werkzeuge. Erst durch die zielgerichtete Kombination unterschiedlichster Parameter können Effekte im Sinne eines umfassenden Leichtbaus erreicht werden.³¹³

4.5 Grundlegende Herausforderungen im Produktentstehungsprozess von Leichtbaukomponenten

„Die Entwicklung von Leichtbaustrukturen ist ein komplexer und interdisziplinärer Prozess.“³¹⁴

Die verknüpfte Betrachtung unterschiedlicher Leichtbaustrategien ist im Entwicklungsprozess von Leichtbaustrukturen von großer Wichtigkeit.³¹⁵ ELLENRIEDER et al. beschreiben eine Anwendungsstrategie als Leitfaden für die Lösung eines Leichtbauproblems (siehe Abbildung 39).³¹⁶

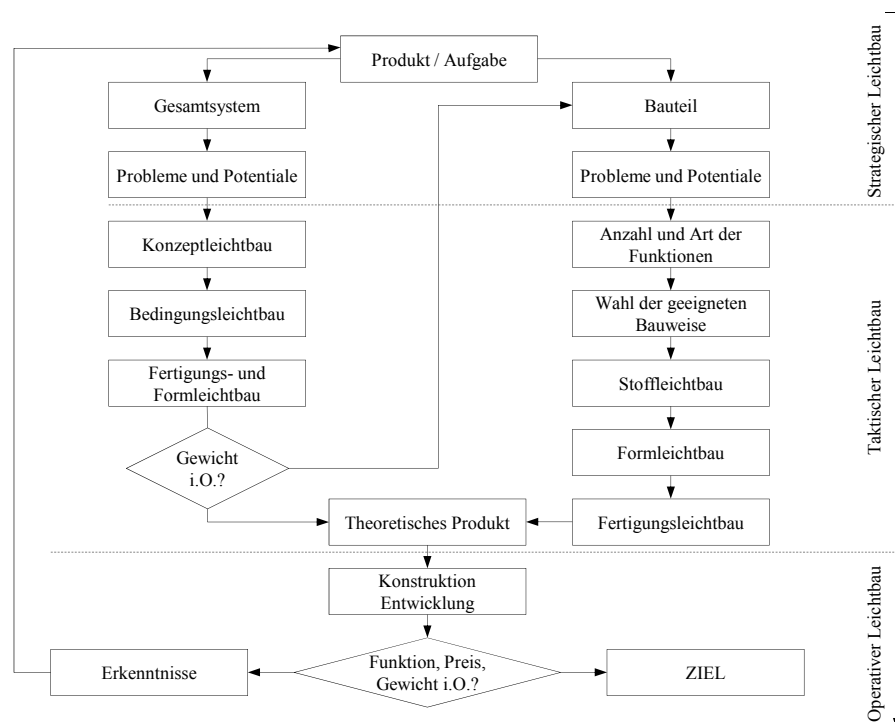


Abbildung 39: Ablauf einer ganzheitlichen Anwendungsstrategie nach ELLENRIEDER et al.³¹⁷

Diese Anwendungsstrategie ist in den strategischen, taktischen und operativen Leichtbau gegliedert. Der strategische Leichtbau umfasst die Zielfindung, der taktische Leichtbau die Planungsphase und der operative Leichtbau die Umsetzung.³¹⁸

³¹³ Vgl. Klein (2009), S.11

³¹⁴ Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.59

³¹⁵ Vgl. Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.75

³¹⁶ Vgl. Ellenrieder et al. (2013), S.50f.

³¹⁷ Ellenrieder et al. (2013), S.51, eigene Darstellung

Ausgehend von einem definierten zu entwickelnden Produkt (Aufgabe) wird in einem ersten Schritt das Gesamtsystem analysiert und daraus auftretende Probleme und Potentiale abgeleitet. Das Gesamtsystem wird im Anschluss hinsichtlich der Aspekte des Konzeptleichtbaus, des Bedingungsleichtbaus sowie des Fertigungs- und Formleichtbaues beleuchtet. Ist die Erreichung des Gewichtsziels nicht gewährleistet erfolgt eine weitere Betrachtung auf Bauteilebene beginnend mit der Analyse des Bauteils hinsichtlich bestehender Probleme und Potentiale. Auf Basis der festgelegten zu erfüllenden Funktionen erfolgen die Wahl der geeigneten Bauweise sowie die Bewertung hinsichtlich der Aspekte des Stoff-, Form- und Fertigungsleichtbaus. Darauf erfolgt die finale Entwicklung und konstruktive Umsetzung des entwickelten Konzepts. Kann das entwickelte Produkt hinsichtlich aller geforderten technischen und monetären Kriterien positiv bewertet werden ist das Ziel erreicht. Werden bestimmte Kriterien nicht erfüllt so kommt es bis zur Erfüllung aller Kriterien zu Optimierungsschleifen. Diese können auf Produkt-, Teilsystem- oder Bauteilebene ansetzen.³¹⁹

Iterationen / Optimierungsschleifen

Die optimale Ausgestaltung einer Leichtbaukonstruktion mit hohen Anforderungen wird meist nicht unmittelbar mit dem ersten erstellten Konzept erreicht. Die Konzepte müssen oft im Rahmen von Optimierungsschleifen möglichst nahe an ein theoretisches Optimum herangeführt werden. Optimierungen bedürfen der Festlegung eines klaren Optimierungsziels, die Festlegung zu erfüllender Rahmenbedingungen sowie der Festlegung einer Optimierungsstrategie. Im Falle des Leichtbaus sind die Minimierung der Masse bzw. die möglichst hohe Belastbarkeit von Bauteilen unter der Beachtung bestimmter Rahmenbedingungen die dominierenden Ziele.³²⁰

KOPP/BURKARDT/MAJIC schlagen zur Optimierung von Leichtbaukonstruktionen die Anwendung der Leichtbaustrategien des Konzeptleichtbaus, des Stoffleichtbaus, des Formleichtbaus sowie des Fertigungsleichtbaus auf Basis des Bedingungsleichtbaus vor (siehe dazu Abbildung 40). Diese Leichtbaustrategien können bei Bedarf in mehreren Iterationsschleifen angewandt werden und können sich dabei auf Bauteile, Baugruppen, Module oder auf die Gesamtstruktur beziehen.³²¹

³¹⁸ Vgl. Ellenrieder et al. (2013), S.50f.

³¹⁹ Vgl. Ellenrieder et al. (2013), S.52

³²⁰ Vgl. Rammersdorfer/Daxner (2009), S.44

³²¹ Vgl. Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.63

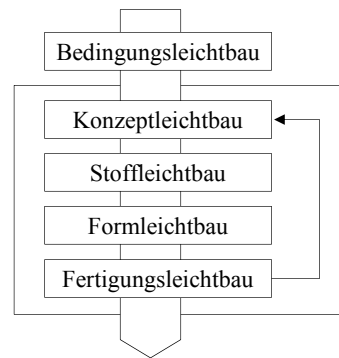


Abbildung 40: Leichtbaustrategien und vorgeschlagener Ablauf während des Entwicklungsprozesses nach KOPP/BURKARDT/MAJIC³²²

RAMMERSDORFER/DAXNER unterscheiden die Optimierungsstrategien in die Topologie-Optimierung, Form-Optimierung, Parameter-Optimierung sowie Material-Optimierung. Die Topologie-Optimierung verfolgt das Ziel der optimalen Materialverteilung bei gegebenem Bauraum. Bei bekannter und geeigneter Topologie des Bauteils kann die Form des Bauteils zur Optimierung herangezogen werden. Sind die Topologie sowie die Form eines Bauteils festgelegt so kann in weiterer Folge durch die Variation einiger weniger Parameter Optimierungspotential gehoben werden. Die Material-Optimierung ist nur bei bestimmten Werkstoffgruppen möglich. Als Beispiel kann hier der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen genannt werden. Durch die Optimierung der Orientierung sowie des Volumenanteils der zur Verstärkung eingesetzten Fasern kann der Werkstoff gezielt auf den Anwendungsfall abgestimmt werden.³²³

SCHMIDT/PURI verweisen darauf, dass Optimierungsmaßnahmen nur dann zu wirklichen optimalen Lösungen führen können, wenn die dafür einzuhaltenden Grenzen bekannt und bestimmt sind. Diese Grenzen werden oft zu Beginn eines Projektes mit den an das Produkt gestellten Anforderungen festgelegt. Das mögliche Optimierungsergebnis ist also wesentlich von der Korrektheit der festgelegten Anforderungen determiniert.³²⁴

Front-Loading und Bestimmung der Anforderungen

Zu Beginn der Produktentstehung ist es im Speziellen im Bereich des Leichtbaus von größter Wichtigkeit die gestellten Anforderungen und die bestehenden Rahmenbedingungen möglichst genau zu kennen und festzulegen. Durch falsche diesbezügliche Annahmen kann Leichtbaupotential verhindert werden. Werden falsch getroffene Annahmen in einer späten Phase im Produktentstehungsprozess geändert, führt dies zu erheblichem Mehraufwand in zeitlicher und monetärer Hinsicht.³²⁵

³²² Kopp/Burkardt/Majic (2011), S.63; eigene Darstellung

³²³ Vgl. Rammersdorfer/Daxner (2009), S.44f.

³²⁴ Vgl. Schmidt/Puri (2001), S.24

³²⁵ Vgl. Schürmann (2007), S.607

Anforderungslisten enthalten selten bzw. nicht explizit den Leichtbau als Hauptmerkmal. Die Festlegung von Anforderungen hat jedoch oft eine einschränkende Wirkung auf eine mögliche leichtbauorientierte Gestaltung von Bauteilen.³²⁶

Die Feststellung der Anforderungen sowie eine darauf ausgerichtete und abgestimmte Werkstoff- und Technologieberatung stellt nach KLOSE/GÄNZLE einen wesentlichen Faktor zur Erstellung eines praxismgerechten Leichtbaukonzeptes dar.³²⁷

SCHMIDT/PURI geben folgende Empfehlungen für die Erstellung einer Anforderungsliste für eine Leichtbaukonstruktion:³²⁸

- Dezidierte Berücksichtigung des Leichtbaus als ein Hauptmerkmal, falls Leichtbau die Hauptaufgabe der Entwicklung darstellt
- Hervorhebung der leichtbauspezifischen Zusammenhänge und Einflüsse in der Anforderungsliste oder deren getrennte detaillierte Betrachtung in einer getrennten Leichtbau –Anforderungsliste
- Berücksichtigung des Leichtbaus in einer verfeinerten Anforderungsliste, für den Fall dass Leichtbau kein eigenes Hauptmerkmal darstellt.
- Frühzeitige Quantifizierung von qualitativen Forderungen zur Aufnahme in die Anforderungsliste

Komplexität

Die nötige ganzheitliche Betrachtung von unterschiedlichen Einflussfaktoren (Vielzahl von Materialien, Vielzahl von Verbindungstechniken) mit dabei auftretenden Abhängigkeiten, In- und Interabhängigkeiten führen zu komplexen Entwicklungsprozessen (verschiedene mögliche Lösungsansätze).

Interdisziplinarität

Der Leichtbau ist eine interdisziplinäre Ingenieurwissenschaft und vereint die Erkenntnisse der Festigkeitslehre, Rechentechnik, Werkstoffkunde und Fertigungstechnik.³²⁹

Nach KLOSE/GÄNZLE zeigen Analysen von erfolgreich umgesetzten Leichtbauprojekten eine „[...]Wiederbelebung traditioneller Zusammenarbeitsmodelle in „Systempartnerschaften“ mit ausgewählten Zulieferanten, Forschungseinrichtungen und hocheffizienten, integrativ handelnden Projektteams“. Die intensive Kommunikation innerhalb dieser Projektteams ist dabei von hoher Wichtigkeit.³³⁰

Werkstoffinnovationen stehen beispielsweise im engen Zusammenhang mit einem Grundverständnis des an den Anwendungsfall angepassten Werkstoffes. Werkstoffe werden oftmals von Lieferanten und deren Unterlieferanten entwickelt und bereit gestellt. Das Wissen der Lieferanten hinsichtlich des Anwendungsfalls ist nicht immer vorhanden und wird so

³²⁶ Vgl. Schmidt/Puri (2001), S.24

³²⁷ Vgl. Klose/Gänzle (2009), S.42

³²⁸ Vgl. Schmidt/Puri (2001), S.24f.

³²⁹ Vgl. Klein (2009), S.2

³³⁰ Vgl. Klose/Gänzle (2009), S.42; Klose/Gänzle (2009), S.42

nicht oder ungenügend in der Entwicklung einer Werkstoffinnovation mit einbezogen. Diese Schnittstelle muss beispielsweise durch einen Projektleiter mit entsprechenden systemübergreifenden und interdisziplinären Kenntnissen gemanagt werden. Eine fehlende Abstimmung der Beteiligten kann umfangreiche Iterationsschleifen im Produktentstehungsprozess auslösen oder die Notwendigkeit einer Neuentwicklung hervorrufen.³³¹

Projektorganisation

Die Realisierung von umfassenden Leichtbaukonzepten erfordert eine Anpassung der Unternehmensorganisationen von einer funktionalen Gliederung hin zu einer prozessorientierten Organisation zur Bewältigung der bestehenden Herausforderungen. Diese „interne Integration“ muss des Weiteren durch eine Integration von externen Partnern, vom Lieferanten bis zum Kunden ergänzt und unterstützt werden. Dabei werden Partnerschaften entstehen, um das Risiko aufwändiger Innovationen und deren Finanzierung auf mehrere Schultern zu verteilen und so erst zu ermöglichen.³³²

Dynamische Entwicklung von Werkstoffsystemen

Die Entwicklung von neuen Werkstoffsystemen erfolgt in immer kürzeren Zyklen. Es entstehen dabei immer mehr unterschiedliche Werkstoffsysteme, welche rasch in Produkte umgesetzt werden müssen um deren Potentiale insbesondere im Sinne des Stoffleichtbaus nutzen zu können.³³³

³³¹ Vgl. Klose/Gänzle (2009), S.45

³³² Vgl. Klose/Gänzle (2009), S.46

³³³ Vgl. Klose/Gänzle (2009), S.42

4.6 Zusammenfassung

„Ein Megatrend moderner Produktentwicklung ist die zunehmende Leichtbauorientierung, aufbauend auf einer systematischen Identifikation von Technologiepotentialen für Leichtbauprodukte.“³³⁴

Leichtbau ist die wesentliche Motivation für den Einsatz von Faserverbundkunststoffen.

Abbildung 41 zeigt den „Leichtbau-Trialog“ nach FRIEDRICH/KRISHNAMOORTHY und beschreibt die Leichtbau-Innovation getrieben durch die abgestimmte Wahl geeigneter Bauweisen (Konstruktion), Werkstoffen und Fertigungsverfahren. Die treibende Kraft der Leichtbauinnovation liegt in der ganzheitlichen Betrachtung dieser Haupteinflussfaktoren.³³⁵

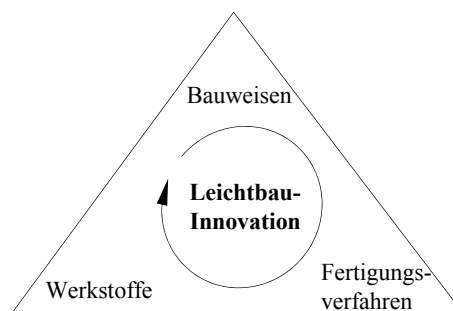


Abbildung 41: Leichtbau-Trialog nach FRIEDRICH/KRISHNAMOORTHY³³⁶

Zur Realisierung von Leichtbaulösungen kommen im Wesentlichen die Strategien des Stoffleichtbaus, des Formleichtbaus, des Bedingungsleichtbaus, des Fertigungsleichtbaus sowie des Konzeptleichtbaus zum Einsatz, welche in abgestimmter Betrachtung zu einer optimierten Leichtbaulösung führen sollen. Eine dem Optimum nahe Leichtbaulösung kann nur durch eine zielgerichtete Kombination einer Vielzahl von Parametern, oft durch mehrere Optimierungsschleifen erreicht werden.

Die Kenntnis der Rahmenbedingungen und Anforderungen an ein zu entwickelndes Leichtbauteil im Sinne des Bedingungsleichtbaus sind hierbei von besonderer Wichtigkeit. Diese müssen bereits in der Konzeptionierungsphase bekannt sein.

Leichtbauprojekte sind geprägt durch eine intensive Kommunikation innerhalb integrativ arbeitender Projektteams. Diese Projektteams müssen des Weiteren intensiv mit dem Lieferanten-Netzwerk sowie externen Forschungseinrichtungen und Experten kooperieren, um die Realisierung eines Optimums im Sinne des Leichtbaus sicherzustellen zu können.

³³⁴ Albers/Braun (2011), S.4

³³⁵ Vgl. Friedrich/Krishnamoorthy (2013), S.2

³³⁶ Friedrich/Krishnamoorthy (2013), S.3; eigene Darstellung

5 Ein FVK-PEP in der betrieblichen Praxis

Der nachfolgend beschriebene Einblick in die Praxis dient der Absicherung und gegebenenfalls der Erweiterung der in den vorangegangenen Ausführungen festgestellten Rahmenbedingungen, Herausforderungen und Einflussfaktoren im Produktentstehungsprozess von Bauteilen aus FVK.

Der Praxiseinblick eines Produktentstehungsprozesses von FVK-Bauteilen erfolgte im Rahmen einer Kooperation des Institutes für Industriebetriebslehre und Innovationsforschung der Technischen Universität Graz mit einem Unternehmen der Zulieferindustrie für Bauteile aus Faserverbundkunststoffen im Zeitraum Mai 2014 bis Mai 2015. Das Unternehmen kann auf Grund seines Marktanteils sowie des technologischen Standards als ein wesentlicher Vertreter des Industriezweiges bezeichnet werden und bezugnehmend auf das Systeminnovationsmodell werkstofforientierter Innovationen nach SCHNEIDER (siehe Abbildung 28) der Gruppe der Komponentenhersteller zugeordnet werden. Hinsichtlich des Umfangs der Beteiligung am Produktentstehungsprozess (siehe hierzu Abbildung 29) kann das Unternehmen dem „Typ III - Lohnfertiger mit Werkzeugentwicklung“ zugeordnet werden. Die Erweiterung der Leistungsumfänge um die Entwicklung eigener Produkte zum „Typ IV – Eigenprodukte“ ist vom Unternehmen initiiert.

Im Rahmen des Kooperationsprojektes erfolgten die Analyse bereits dokumentierter Soll-Prozesse der Produktentstehung sowie der gelebten Ist- Prozesse und Vorgehensweisen im Rahmen von Experteninterviews.

Aufgrund getroffener Geheimhaltungsvereinbarungen mit dem Kooperationspartner sind die erhobenen Primärdaten (Audiomitschnitte, Interviewprotokolle) sowie Sekundärdaten (Prozessdokumentationen) nicht in der vorliegenden Arbeit integriert. Konkrete und detaillierte Aussagen zu Aufwand, Kosten und Potentialen der betrieblichen Abläufe erfolgen im Folgenden nur bedingt. Die Ausführungen beschränken sich aufgrund der bestehenden Geheimhaltungsvereinbarungen weitgehend auf qualitative und vergleichende Aussagen, stellen jedoch ein umfassendes und grundlegendes Bild der Ergebnisse dar. Der Praxiseinblick erhöht den Detaillierungsgrad der in der allgemeinen Literatur beschriebenen betrieblichen Abläufe eines Produktentstehungsprozesses von FVK-Bauteilen.

In einem ersten Schritt wurde der Soll-Produktentstehungsprozess auf Basis bestehender Prozessdokumentationen erfasst und aufbereitet. In einem zweiten Schritt erfolgte eine Erhebung des Ist-Produktentstehungsprozesses durch Experteninterviews.

5.1 Der Soll-Produktentstehungsprozess

Der Soll-Produktentstehungsprozess wurde vom kooperierenden Unternehmen in einem knapp zwei Jahre andauernden Prozess unter Einbezug der beteiligten Akteure in einem iterativen Vorgehen erarbeitet und in Form von Prozessschaubildern unter Zuhilfenahme einer

grafischen Prozess-Modellierungs-Software dokumentiert. Die primäre Motivation zur Dokumentation war eine Standardisierung des sich immer komplexer gestaltenden Produktentstehungsprozesses sowie die Notwendigkeit entsprechenden Vorgaben seitens zu erfüllender Normen (z.B. ISO 9001) und Kunden-Vorgaben Genüge zu tun.

Aufgrund des hohen Detailierungsgrads des erhobenen Gesamtprozesses ist dessen vollständige Darstellung mit allen Abhängigkeiten in einem Prozessschaubild sehr unübersichtlich.³³⁷ Daher wurden die Prozesse mit ihren Aktivitäten und deren Beziehungen auf Basis der zur Verfügung gestellten Prozessschaubilder in einem ersten Schritt vom Autor in eine Design Struktur Matrix übergeführt.

5.1.1 Datenerhebung

Die ursprünglich auf STEWARD³³⁸ zurückgehende Design Struktur Matrix (DSM) bietet die Möglichkeit der Darstellung komplexer Systeme mit ihren Elementen und deren Beziehungen in kompakter und verständlicher Weise.³³⁹

Es werden zwei unterschiedliche Konventionen der Darstellung der Beziehungen von Elementen in Prozessen in einer DSM unterschieden - die „Input-Row/Feedback-Above-Diagonal Convention“ (IR/FAD Konvention) sowie die „Input-Column/Feedback-Below-Diagonal Convention“ (IC-FBD Konvention). Beide Konventionen stellen den gleichen Sachverhalt dar und sind die Transponierung der jeweils anderen.³⁴⁰

Für nachfolgend in dieser Arbeit dargestellten und beschriebenen DSMs gilt die IC/FBD-Konvention. Abbildung 42 zeigt exemplarisch die Darstellung von dependenten, independenten, interdependenten und kontingenten Beziehungen zwischen Aktivitäten mittels einer Prozessarchitektur-DSM unter Anwendung der IC/FBD-Konvention.

³³⁷ Vgl. Browning (2002), S.184

³³⁸ Siehe dazu Steward (1981), S.9ff.; und Steward (1981), S.72ff.

³³⁹ Vgl. Browning (2002), S.184

³⁴⁰ Vgl. Eppinger/Browning (2012), S.131; Vgl. Eppinger/Browning (2012), S.4f.

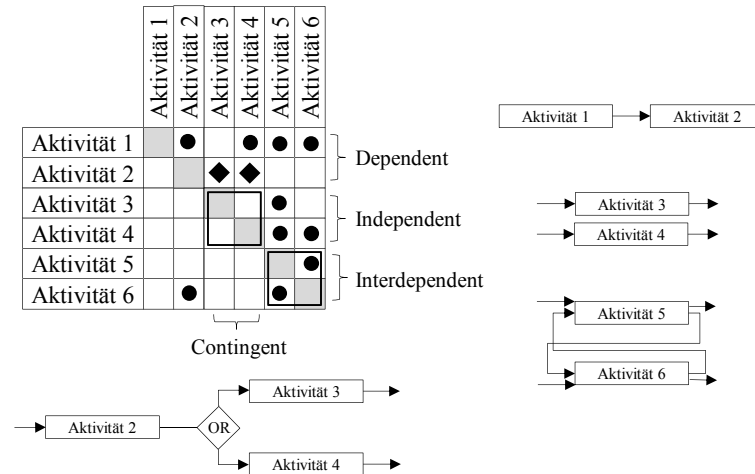


Abbildung 42: Darstellung verschiedener Beziehungsarten von Aktivitäten mit Hilfe einer Prozessarchitektur Design Struktur Matrix unter Anwendung der IC/FBD-Konvention ³⁴¹

Liest man die Matrix entlang einer Spalte nach unten, erhält man Informationen über den erforderlichen Input der Aktivität welche der Spalte zugeordnet ist. Im dargestellten Beispiel ist Aktivität 2 abhängig von einem Input von Aktivität 1 und Aktivität 6. Liest man die Matrix entlang einer Spalte, erhält man Informationen darüber welche Aktivitäten von der der Zeile zugeordneten Aktivität abhängig sind beziehungsweise von dieser mit Input versorgt werden. Das dargestellte Beispiel zeigt, dass Aktivität 1 Inputs für die Aktivitäten 2, 4, 5, und 6 bereitstellt.

Die Aufgliederung des Gesamtprozesses in seine Elemente (Aktivitäten) sowie die Identifizierung ihrer Beziehungen konnte im Rahmen der Sekundärdatenerhebung den bestehenden Prozessdokumentationen entnommen werden und in eine DSM übertragen werden. Diese Prozessarchitektur-DSM beschreibt die Beziehung innerhalb der Domäne „Aktivität“ und wird im Folgenden als Aktivitäts-DSM (DSM_A) bezeichnet.

Aktivitäten umfassen alle Elemente eines Prozesses wie beispielsweise auszuführende Aufgaben, zu generierende Informationen, zu treffende Entscheidungen oder zu bestimmende Gestaltungsparameter. ³⁴²

Zusätzlich zu den Aktivitäten und ihren Beziehungen konnten den einzelnen Aktivitäten ihre „Ausführende Einheit“ im Unternehmen zugeordnet werden. Diese Zuordnungen wurden in Form einer Domain Mapping Matrix dokumentiert.

Domain Mapping Matrix

Im Gegensatz zu einer DSM welche die Beziehungen von Elementen einer Domäne darstellt, können mit einer Domain Mapping Matrix (DMM) die Beziehungen von Elementen

³⁴¹ Browning (2002), S.186; eigene Darstellung

³⁴² Vgl. Eppinger/Browning (2012), S.130

unterschiedlicher Domänen dargestellt werden. Eine DMM ist eine (meist) nicht-quadratische Matrix.³⁴³

Die erstellte DMM beschreibt die Zuordnung der Domäne „Ausführende Einheit“ zur Domäne „Aktivität“ und wird im Folgenden als Ausführende Einheit/ Aktivitäten Einheit-DMM (DMM_{AE-A}) bezeichnet. Als „Ausführende Einheit“ werden alle Elemente einer Organisation wie beispielsweise Einzelpersonen, Teams, Gruppen oder Abteilungen verstanden.³⁴⁴

Die Domäne „Ausführende Einheit“ ist in der zur Verfügung gestellten Prozessdokumentation durch unterschiedliche Elemente (Einzelpersonen, Team, Gruppen, Abteilungen) beschrieben.

Multiple Domain Matrix

Eine Multiple Domain Matrix (MDM) ist eine Erweiterung der obig beschriebenen DSM Modellierung und stellt zwei oder mehr DSMs sowie DMMs unterschiedlicher Domänen gleichzeitig dar. Mit Hilfe einer MDM kann ein „System der Systeme“ beschrieben werden, wobei die DSMs auf der Diagonale und die DMMs abseits der Diagonale der MDM liegen.³⁴⁵

Abbildung 43 zeigt den Grundaufbau der im Kooperationsprojekt erstellten MDM.

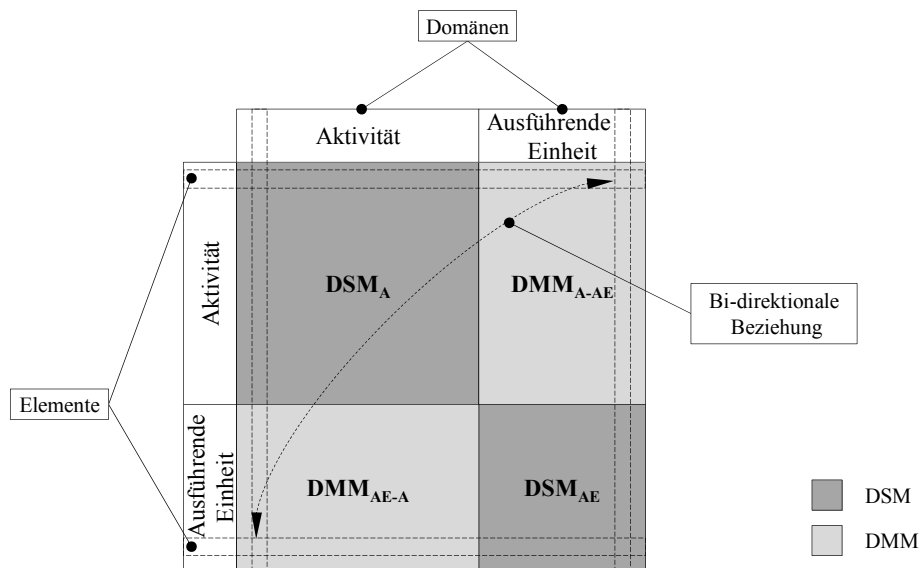


Abbildung 43: Grundaufbau der erstellten Multidomain Matrix auf Basis der Sekundärdatenanalyse³⁴⁶

Die Ergebnisse der Sekundärdatenanalyse umfassen die Aktivitäten des Produktentstehungsprozesses sowie die Zuordnung der Ausführenden Einheiten zu den Aktivitäten. Sowohl die DSM_A als auch die DMM_{AE-A} konnten auf Basis der vorhandenen Prozessdokumentationen erstellt werden. Die DSM_{AE} beschreibt die Abhängigkeiten der

³⁴³ Vgl. Eppinger/Browning (2012), S.234

³⁴⁴ Vgl. Eppinger/Browning (2012), S.80

³⁴⁵ Vgl. Eppinger/Browning (2012), S.234ff.

³⁴⁶ In Anlehnung an: Maurer (2007), S.80; eigene Darstellung

ausführenden Einheiten und konnte auf Basis der DMM_{AE-A} unter Verwendung folgender Formel abgeleitet werden

Formel 1: DSM_{AE} ³⁴⁷

$$DSM_{AE} = DMM_{AE-A} \times DMM_{AE-A}^T$$

5.1.2 Ergebnisse zum Soll-Produktentstehungsprozess

Abbildung 44 zeigt die Hauptprozess-Phasen des Produktentstehungsprozesses beim Kooperationspartner, welcher sich nach dessen Definition in die drei Hauptphasen Angebotserstellung (Phase I), Projektentwicklung (Phase II) sowie Projektauslauf (Phase III) gliedert.

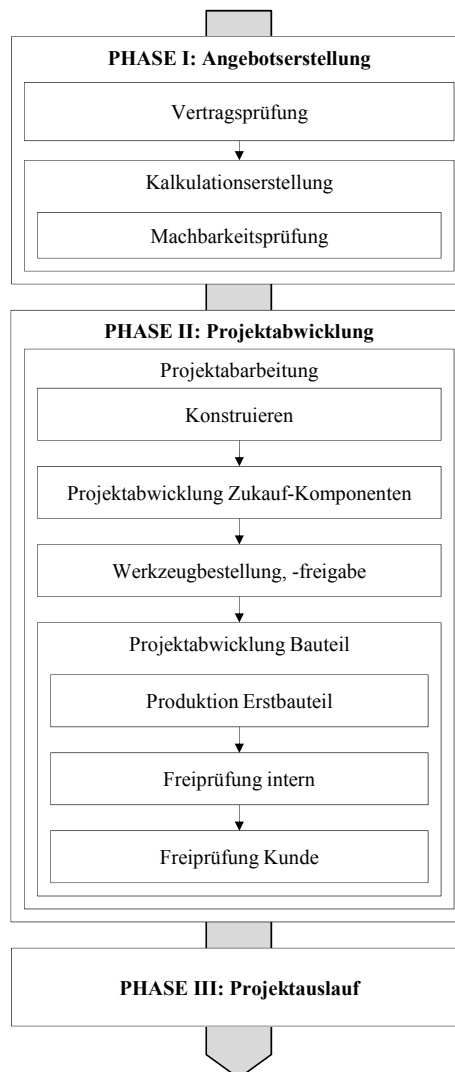


Abbildung 44: Phasen des Soll-Produktentstehungsprozesses beim Kooperationspartner³⁴⁸

³⁴⁷ Vgl. Lindemann/Maurer/Braun (2009), S.199

Diese Definition weicht von der in Abschnitt 2.1 festgelegten und für die Arbeit relevante Definition des PEP ab. Laut gewählter Definition endet der PEP mit Ende der als Projektabwicklung bezeichneten Phase II.

Die Phase der Angebotserstellung beinhaltet im Wesentlichen eine Vertragsprüfung sowie eine Kalkulationserstellung. Die Vertragsprüfung erfolgt unter Einbeziehung verschiedener Abteilungen unter der Führung der Abteilung „Verkauf“. Es erfolgt eine Überprüfung des Vertrages unter den Gesichtspunkten der beteiligten Abteilungen und Fachbereiche und bei Bedarf die Abklärung von unklaren Vertragsbestandteilen in Form von Iterationsschleifen in Zusammenarbeit mit dem Kunden. Die Ergebnisse werden als Entscheidungsgrundlage zur Beurteilung für das Projektmanagement und die Geschäftsführung zusammengefasst. Nach Vertragsunterzeichnung wird das Projekt nach Einholung der relevanten Daten vom Kunden an das Projektmanagement übergeben. Unter der Führung des Projektmanagements erfolgt in einem nächsten Schritt die Kalkulationserstellung. Wesentlicher Bestandteil hierbei ist eine Machbarkeitsprüfung unter Beteiligung der am Projekt beteiligten Fachbereiche. Hierbei wird ein erster Lösungsvorschlag als Basis für die Kalkulation erarbeitet. Je nach Komplexität des Projektes können zur Findung des Lösungsvorschlages mehrere Iterationsschleifen erforderlich sein. Auf Basis des erstellten Lösungsvorschlags wird die Projektkalkulation vom Projektmanagement durchgeführt und nach Freigabe durch die Geschäftsführung an den Kunden übermittelt. Eine negative Rückmeldung des Kunden kann mehrmals eine erneute Machbarkeitsprüfung und Kalkulationserstellung auslösen. Wird ein Angebot vom Kunden angenommen erfolgt die Anforderung der finalen Daten zum Projekt und damit die Überleitung zur Phase II.

Zu Beginn der Projektabwicklung erfolgen Aktivitäten zur Vorbereitung der nachfolgenden Abläufe. Dies beinhaltet beispielsweise die Anlage des Projektes im ERP-System, die Ablage der benötigten Daten und die Durchführung eines Projekt-Kickoff. Im Anschluss erfolgt die eigentliche Projektarbeit. Nach eingehender Prüfung der zur Verfügung gestellten Daten erfolgt in einem ersten Schritt die Bauteil- und Werkzeugkonstruktion. Die Durchführung der Bauteilkonstruktion ist abhängig vom Projekt und kann auch entfallen, falls diese vom Kunden selbst durchgeführt wird. Auf Basis der Bauteilkonstruktion werden Daten für erforderliche Zukaufteile und Komponenten abgeleitet und dem Bereich Einkauf zur Verfügung gestellt. In einem weiteren Schritt wird die Bestellung des Werkzeuges nach erfolgter Freigabe ausgelöst. Im Anschluss werden vom Fachbereich Konstruktion Hilfsdokumente und Arbeitsanweisungen erstellt und an den Fachbereich Produktion übergeben. Darauf folgend starten die Produktion des Erstbauteils und die Weiterentwicklung bis zum Start of Production (SOP). Die Produktion beinhaltet die Vorbereitung der verwendeten Halbzeuge, die Aushärtung des Bauteils sowie die Endfertigung der Bauteile. Diese Schritte werden bei Bedarf laufend in einem iterativen Prozess geändert und verbessert. Sobald das Bauteil die geforderten Eigenschaften aufweist, wird dieses einer Prüfung sowohl beim Kooperationspartner selbst auch beim Kunden unterzogen. Fällt die Prüfung des Kunden positiv aus, erfolgt die Erstbemusterung durch den Kunden und die Freigabe für den SOP.

³⁴⁸ Eigene Darstellung

Der Projektauslauf beinhaltet die Produktion des Bauteils bis zur Erreichung der geforderten Stückzahlen sowie die Administration der im Produktionsprozess verwendeten Formen, Modelle und Vorrichtungen.

Abbildung 45 zeigt die gesamte, auf Basis der Prozessbeschreibung des Kooperationspartners erstellte DSM_A . In Summe wurden 210 unterschiedliche Aktivitäten und deren Beziehungen erfasst. Es ist anzumerken, dass der beim Kooperationspartner dokumentierte PEP noch weitere Sub-Aktivitäten der erhobenen Aktivitäten beinhaltet und in höherem Detaillierungsgrad dokumentiert ist. Die Tiefe der Datenerhebung wurde vom Autor beschränkt, sobald kein Beitrag zum grundsätzlichen Verständnis und der grundsätzlichen Zusammenhänge des PEP erwartet werden konnte.

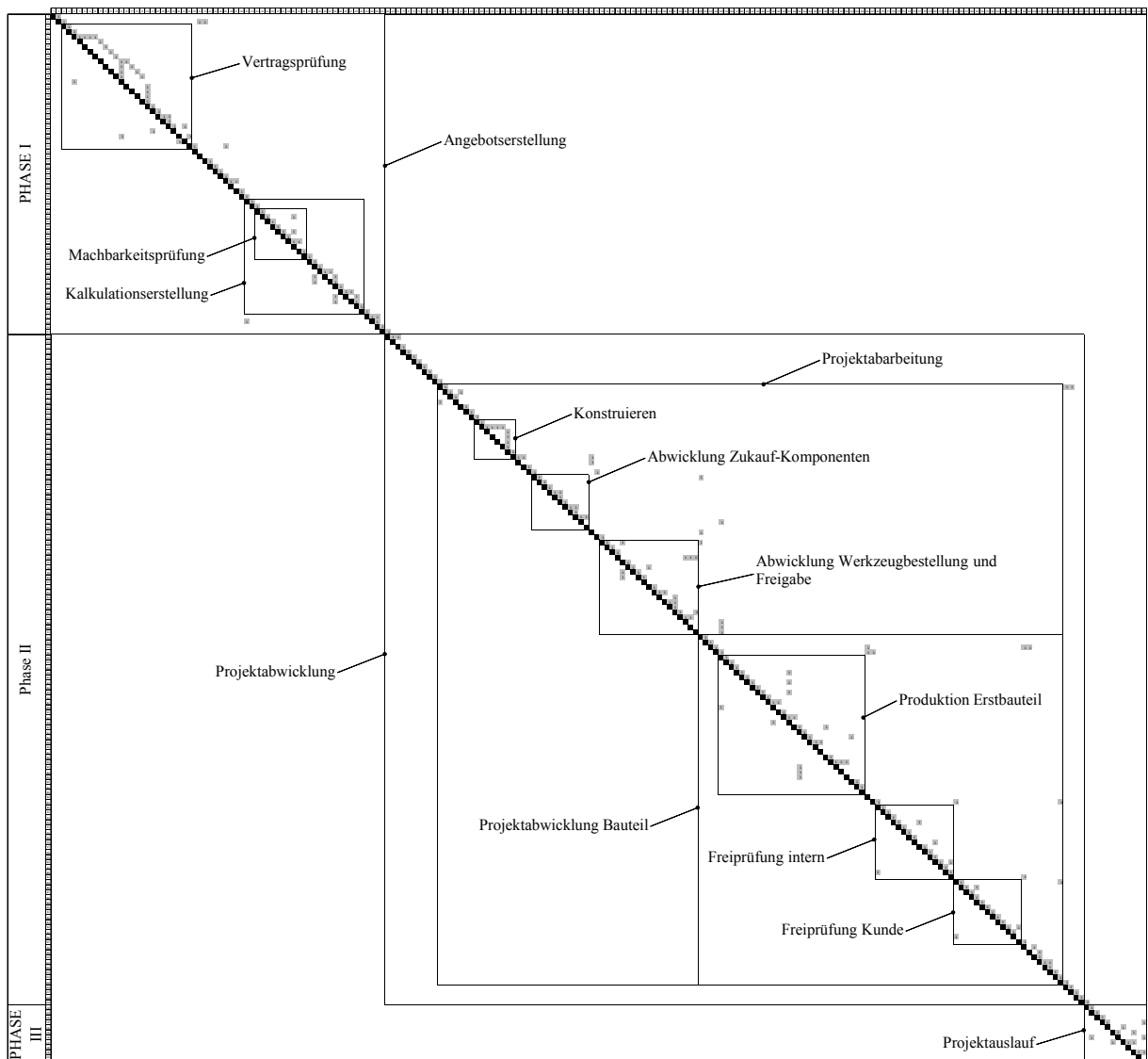


Abbildung 45: DSM_A ³⁴⁹

³⁴⁹ Eigene Darstellung

Wie Abbildung 45 zeigt, sind die drei Hauptphasen des PEP in weitere Teil-Phasen untergliedert. Die getroffene Gliederung in Teil-Phasen berücksichtigt mögliche Iterationsschleifen.

Ausführende Einheiten und ihre Vernetzung

Den Aktivitäten des Produktentstehungsprozesses konnten in einem zweiten Schritt 27 „Ausführende Einheiten“ zugeordnet werden. Basierend auf dieser Zuordnung in Form einer Domain Mapping Matrix (DMM_{A-AE}) konnten die Beziehungen der ausführenden Einheiten abgeleitet werden. Abbildung 46 zeigt die Beziehungen der ausführenden Einheiten. Der Durchmesser der Kreisdarstellungen illustriert die Gewichtung verbundener Kanten.

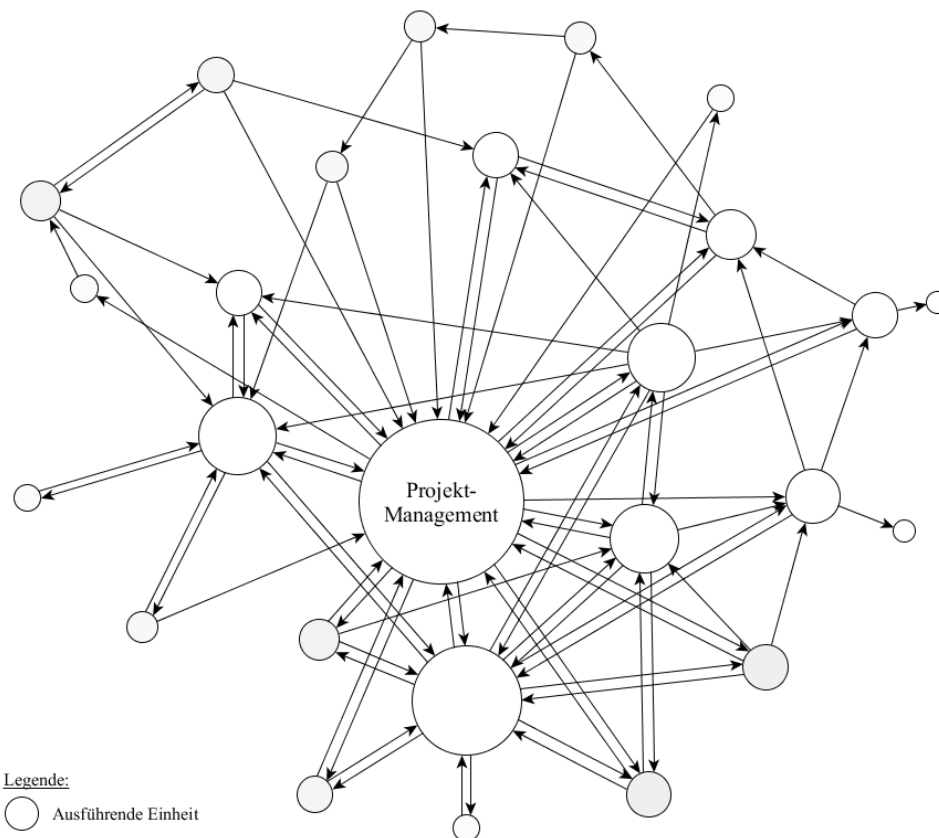


Abbildung 46: Beziehungen der ausführenden Einheiten³⁵⁰

Als wichtigste Schnittstelle im PEP kann das Projektmanagement identifiziert werden. Dies lässt auf einen hohen Abstimmungsbedarf zwischen den ausführenden Einheiten, welcher vom Projektmanagement gesteuert wird, schließen.

5.2 Der Ist-Produktentstehungsprozess

Ergänzend zur Erhebung des Soll-Produktentstehungsprozesses wurde eine Erhebung des gelebten Ist-Produktentstehungsprozesses durchgeführt.

³⁵⁰ Eigene Darstellung

5.2.1 Datenerhebung

Die Datenerhebung erfolgte über leitfadengestützte Experteninterviews. MEUSER/NAGEL beschreiben Experten als „[...] FunktionsträgerInnen innerhalb eines organisatorischen oder institutionellen Kontext. Die damit verknüpften Zuständigkeiten, Aufgaben, Tätigkeiten und die aus diesen gewonnenen exklusiven Erfahrungen und Wissensbestände sind die Gegenstände des ExpertInneninterviews“³⁵¹.

Der Einsatz eines Interviewleitfadens trägt zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der durchgeführten Experteninterviews bei. Ein Interviewleitfaden bildet den Umfang der relevanten Themen ab, und führt so, durch seine Anwendung, zu einer Fokussierung auf diese Themen.³⁵²

Die leitenden Fragestellungen im Sinne eines Interviewleitfadens sind der Arbeit in Anhang A angehängt.

Expertenauswahl

Die Auswahl der Experten erfolgte in Abstimmung mit Entscheidungsträgern beim Kooperationspartner und orientierte sich an den folgenden Fragestellungen.³⁵³

- „Wer verfügt über die relevanten Informationen?“
- „Wer ist am ehesten in der Lage, präzise Informationen zu geben?“
- „Wer ist am ehesten bereit, Informationen zu geben?“
- „Wer von den Informanten ist verfügbar?“

Experte 1 verfügt über 8 Jahre Erfahrung im Umgang mit FVK. Die Basis des vorhandenen Wissens wurde im Rahmen eines Maschinenbaustudiums gelegt. Zu erwähnen ist hier insbesondere ein Engagement im Rahmen eines Studentischen Teams zur Teilnahme an Bewerbungen der Formula Student. Bereits während des Studiums konnte dadurch der praktische Umgang mit Faserkunststoffverbunden erlernt werden. Der Berufseinstieg erfolgte beim Kooperationspartner mit Tätigkeiten in den Bereichen Bauteilentwicklung, Werkzeugbau und Bauteilauslegung.

Experte 2 verfügt über 8 Jahre Erfahrung im Umgang mit FVK. Die Basis des vorhandenen Wissens wurde im Rahmen eines Fahrzeugtechnikstudiums gelegt. Auch Experte 2 engagierte sich in einem Studentischen Team zur Teilnahme an Bewerbungen der Formula Student und konnte dadurch Erfahrung im praktischen Umgang mit Faserkunststoffverbunden sammeln. Der Berufseinstieg erfolgte beim Kooperationspartner. Die bisherigen Tätigkeiten lagen im Bereich der Bauteilentwicklung sowie Bauteilauslegung. Zum Zeitpunkt des Interviews bekleidet der Experte die Position eines Gruppenleiters im Bereich der Bauteilauslegung und zeichnet verantwortlich für eine strategische, intern initiierte Produktentwicklung.

Experte 3 verfügt über 13 Jahre Berufserfahrung in der FVK-Branche. Die technische Grundausbildung des Experten bildet ein Studium des Maschinenbaus. Der Berufseinstieg

³⁵¹ Meuser/Nagel (1991), S.444

³⁵² Vgl. Meuser/Nagel (1991), S.453

³⁵³ Gorden (1975), zitiert in: Gläser/Laudel (2010), S.117

erfolgte bei einem OEM im Bereich der Werkzeugentwicklung für FVK-Bauteile. Nach dem Wechsel zum Kooperationspartner waren die Bauteil- und Werkzeugentwicklung die primären Tätigkeitsfelder. Zum Zeitpunkt des Interviews bekleidet der Experte die Position eines Gruppenleiters im Bereich der Bauteilkonstruktion.

Durchführung der Datenerfassung

Die Durchführung der Experteninterviews erfolgte vor Ort beim Kooperationspartner in Form von Einzelgesprächen mit den Experten. Die Interviews wurden in Form von digitalen Audiodateien dokumentiert.

Datenauswertung

Die Auswertung der durchgeführten Experteninterviews erfolgte in Anlehnung an die Auswertungsstrategie nach MEUSER/NAGEL mit den Phasen Transkription, Paraphrase, der Verdichtung des Materials sowie dem thematischen Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Interviews.³⁵⁴

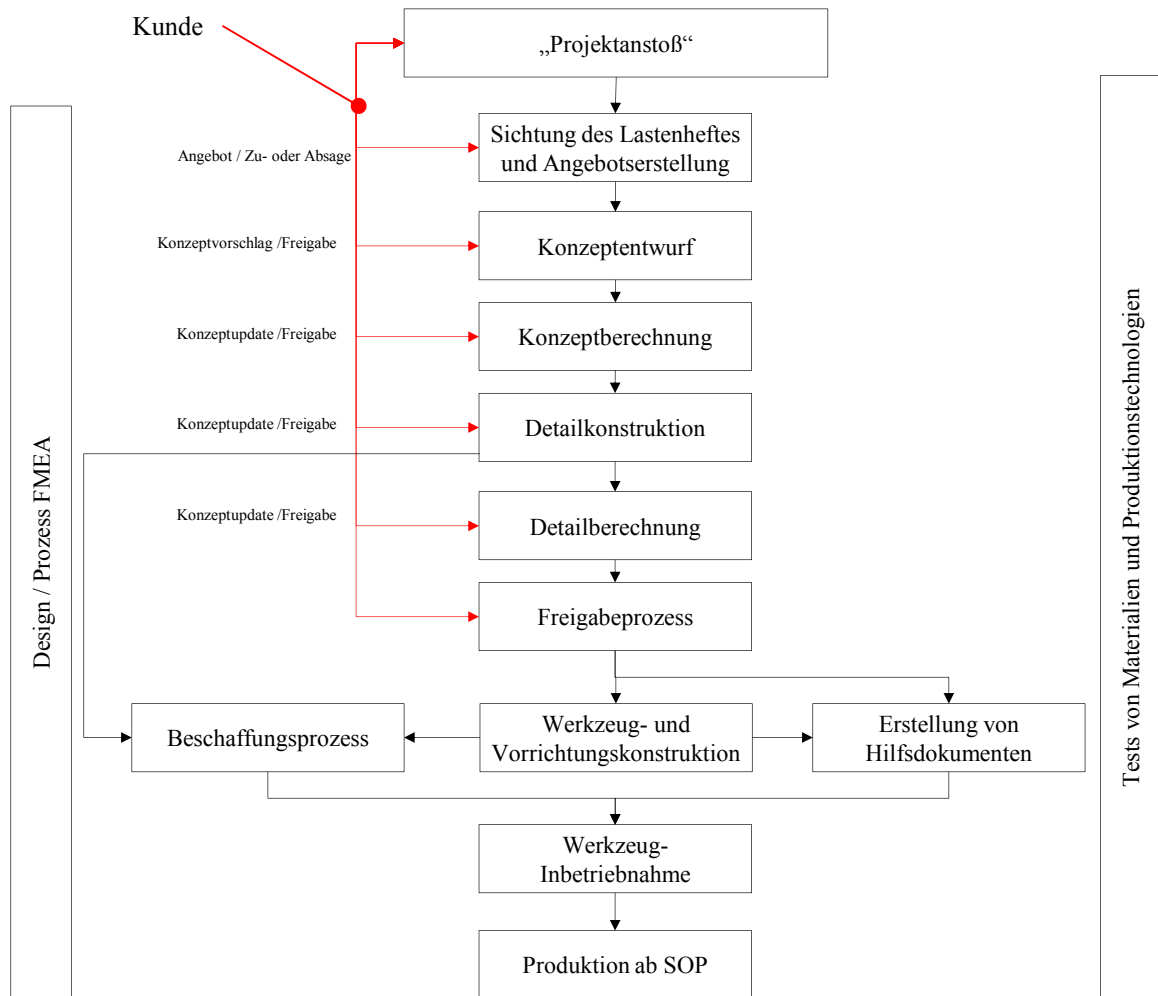
Nachfolgend erfolgt die Darstellung der Ergebnisse der Experteninterviews bezüglich der Herausforderungen im FVK-PEP sowie der zu setzenden Aktivitäten im FVK-PEP.

5.2.2 Ergebnisse zum Ist-Produktentstehungsprozess

Aktivitäten im Produktentstehungsprozess von FVK-Bauteilen

Aus den Experteninterviews konnte ein Modell des Ist-Produktentstehungsprozesses abgeleitet werden. Abbildung 47 zeigt den Ist-PEP des Kooperationspartners aus Sicht der Experten. Dieser setzt sich aus 11 Makroaktivitäten zusammen. Die abgeleitete modellhafte Darstellung des Ist-PEP weist wesentliche Ähnlichkeiten mit dem von KLEIN (siehe dazu Abschnitt 3.2.1) beschriebenen Vorgehen auf. Die Experten verweisen jedoch auf eine starke Integration des Kunden in den PEP, beginnend vom Projektanstoß bis hin zum Freigabeprozess.

³⁵⁴ Vgl. Meuser/Nagel (1991), S.455ff.

Abbildung 47: Ist-Produktentstehungsprozess³⁵⁵

Der Projektanstoß kann einerseits extern durch eine Kundenanfrage oder andererseits intern durch eine Produktidee erfolgen. Kundenanfragen oder Produktideen beinhalten im optimalen Fall die in einem Lastenheft gesammelten Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt.

Die Sichtung des Lastenheftes und Angebotserstellung wird mit dem Erhalt des Lastenheftes vom Kunden gestartet. Auf Basis der zu erfüllenden Anforderungen werden zu erfüllende Randbedingungen erfasst, gesammelt und hinsichtlich ihrer Wirkung bewertet. Auf Basis dieser Ergebnisse wird ein Grobkonzept erstellt und zur Klärung der Machbarkeit von den beteiligten Unternehmensbereichen diskutiert. Beim Auftreten von Unklarheiten oder dem offensichtlich werden von fehlenden Informationen, werden diese mit dem internen oder externen Auftraggeber abgeklärt und in die Machbarkeitsbetrachtungen mit einbezogen. Ist die Machbarkeit des Projektes aus Sicht des Auftragnehmers gegeben, erfolgt auf Basis des erstellten Grobkonzeptes die Angebotserstellung. Die Ergebnisse dieser Aktivität sind ein Grobkonzept (konstruktive Ausgestaltung, Fertigungsprozess und Material), eine Machbarkeitsstudie sowie das Angebot.

³⁵⁵ Eigene Darstellung

Die Qualität und Vollständigkeit des Lastenhefts vom Kunden hängt wesentlich vom Erfahrungsschatz des Kunden in der Anwendung von Faserverbundkunststoffen ab. Lastenhefte von Kunden können des Weiteren überzogene und nicht erfüllbare Anforderungen enthalten, welche im Rahmen der Machbarkeitsstudie mit dem Kunden abgeklärt werden müssen.

Der Konzeptentwurf startet auf Basis des mit dem Kunden überarbeiteten Lastenhefts, Informationen zum erfolgreichen Angebot sowie Informationen bezüglich etwaigen gesetzlichen und branchenspezifischen Rahmenbedingungen. Kern dieser Aktivität ist die detaillierte Betrachtung der Problemstellung. Diese führt zur Ausgestaltung eines oder mehrerer Lösungskonzepte welche dem Kunden zur Auswahl vorgelegt werden. Das Ergebnis ist ein finales ausgewähltes Konzept. Dieses Konzept beinhaltet die konstruktive Gestaltung des Bauteils, die Bestätigung/Anpassung des Fertigungsverfahrens sowie die Bestätigung/Anpassung der Materialauswahl. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, dass mehrere Konzeptentwürfe zur weiteren Betrachtung ausgewählt werden und die finale Konzeptentscheidung zu einem späteren Zeitpunkt im Projektablauf getroffen wird.

Die Konzeptberechnung basiert auf den im Lastenheft festgelegten Anforderungen sowie den Ergebnissen des Konzeptentwurfes. Kernaufgaben dieser Makroaktivität sind die Finalisierung der Materialwahl, die Bestimmung des Lagenaufbaus, die Ermittlung nötiger Wandstärken sowie die Ableitung nötiger Änderungen der Bauteilgeometrie um die Erfüllung der geforderten Anforderungen gewährleisten zu können. Die Ergebnisse der Konzeptberechnung werden mit dem Kunden abgestimmt und bei Akzeptanz zur weiteren Bearbeitung freigegeben.

Die Detailkonstruktion erfolgt auf Basis des Konzeptentwurfs sowie der in der Konzeptberechnung aufgezeigten erforderlichen Anpassungen der Bauteilgeometrie sowie vom Auftraggeber bereitgestellten Informationen bezüglich Beistellteilen, Anbauteilen und Anbindungsstellen. Es erfolgt die detaillierte Konstruktion der Bauteilflächen, Inserts und Wandstärken. Der Output der Detailkonstruktion sind finale Geometriedaten des Bauteils.

Die Detailberechnung dient der finalen Festlegung der Faserorientierung sowie des Lagenaufbaues in Form eines Berechnungsberichtes.

Im Freigabeprozess werden dem Kunden die bisher erarbeiteten Ergebnisse zur finalen Freigabe vorgelegt. Der Freigabeprozess führt schlussendlich im Regelfall zum Design-Freeze.

Basierend auf den Daten des Design Freeze, sowie Informationen zu erforderlichen Stückzahlen, der Projektdauer sowie der Kammlinien des Kunden erfolgen die Konstruktion von Werkzeugen und erforderlichen Vorrichtungen.

Die Beschaffung von Werkzeugen und Vorrichtungen wird bei Bedarf bereits im Laufe der Konstruktion auf Basis von Vorabdaten gestartet um eine Lieferantenauswahl treffen zu können und sich die benötigten Kapazitäten bei den Lieferanten zu sichern.

Die Erstellung von Fertigungsdokumenten kann ebenso wie die Beschaffung parallel zur Werkzeug- und Vorrichtungskonstruktion erfolgen. Fertigungsdokumente beinhalten Arbeitsanweisungen für das Einlegen des Laminates bzw. der Preforms sowie die

Endfertigung. Beim Einsatz bestimmter Herstellungsverfahren erfolgt des Weiteren die Erstellung einer Arbeitsanweisung für die Preform-Herstellung. Eine allgemeine Verfahrensbeschreibung sowie die Ableitung von CAD-Daten für eine maschinelle Bearbeitung von ausgehärteten Bauteilen sind ebenso Teil der Fertigungsdokumente.

Nach Eingang des physischen Werkzeuges erfolgt dessen Montage und Werkzeuginbetriebnahme. Während der Inbetriebnahme erfolgt die Optimierung und Abstimmung des Produktionsprozesses. Anpassungen können beispielsweise hinsichtlich der Verfahrensparameter, des Bauteils, des Lagenaufbaus oder des Werkzeuges erforderlich werden. Die Erstbauteile werden intern geprüft und anschließend dem Kunden für eigene Tests zur Verfügung gestellt. Die Kundentests umfassen beispielsweise die Prüfung der Montierbarkeit des Bauteils im Gesamtsystem oder die Durchführung von Crashtests von strukturelevanten Bauteilen. Treten im Rahmen der intern oder extern beim Kunden durchgeführten Tests Probleme auf kommt es zu Änderungsschleifen. Werden die geforderten Anforderungen erfüllt, wird das Werkzeug in die Serienproduktion übernommen und der SOP erfolgt.

Die Experten verweisen darauf, dass die einzelnen Aktivitäten des oben beschriebenen Produktentstehungsprozesses, in Abhängigkeit der Projektanforderungen unterschiedlich abgearbeitet werden. Im Rahmen der Erhebungen konnten diesbezüglich drei unterschiedliche Projekt-Typen abgegrenzt werden.

Projekttypen

Die Experten beschreiben allgemein eine Bandbreite von Projekt-Typen vom „Standardprojekt“ bis zum „Forschungsprojekt“. Als Mittelstufe zwischen diesen beiden Projekt-Typ Extrema wird vom Autor der Projekt-Typ des „Agilen Projektes“ eingeführt, dessen Bezeichnung auf identifizierten Ähnlichkeiten zu Merkmalen einer Agilen Produktentwicklung basiert.

Diese drei Projekt-Typen werden nachfolgend anhand deren spezifischer Charakteristika beschrieben. Die Abläufe aller Projekt-Typen bauen grundsätzlich auf dem in Abbildung 47 dargestellten Ist-Produktentstehungsprozess auf.

Die Projekt-Typen lassen sich hinsichtlich ihrer Disziplinarität, der Definierbarkeit der Schnittstellen zwischen den beteiligten Disziplinen, dem subjektiven Neuigkeitsgrad, der Definierbarkeit der Anforderungen zu Projektbeginn, Eingrenzbarkeit des Lösungsraumes zu Projektbeginn, der erforderlichen Integration des Kunden im Rahmen des Produktentstehungsprozesses sowie dem in der Regel verfolgten ökonomischen Prinzip unterscheiden.

Begriffe wie „Interdisziplinarität“ bzw. „interdisziplinäre Kooperation“ werden in der Literatur sehr häufig im Zusammenhang mit der Produktentstehung bzw. Produktentwicklung verwendet³⁵⁶. Im Zusammenhang der Zusammenarbeit einzelner Forschungsdisziplinen über deren Grenzen hinweg unterscheidet BRAND die Begriffe Disziplinarität,

³⁵⁶ Vgl. Klein (2009), S.2; Vgl. Eigner/Anderl/Stark (2012), S.5ff.; Vgl. Ehrlenspiel et al. (2014), S.45ff.; Vgl. Abele/Reinhart (2011), S.12ff.

Multidisziplinarität, Interdisziplinarität sowie Transdisziplinarität. Die Disziplinarität beschreibt die Bearbeitung eines Forschungsgegenstandes durch eine Disziplin (Abbildung 48a). Multidisziplinarität meint die Bearbeitung unterschiedlicher Forschungsgegenstände durch unterschiedliche Disziplinen, wobei „[...]weder die Disziplinen noch die Forschungsgegenstände untereinander eine Beziehung oder Verbindung haben müssen“ (Abbildung 48b). Das Endergebnis multidisziplinärer Forschung kann beispielsweise die Zusammenfassung der getrennt erarbeiteten Forschungsergebnisse sein. Die interdisziplinäre Forschung (Abbildung 48c) unterscheidet sich von der multidisziplinären Forschung durch die Bearbeitung ein und desselben Forschungsgegenstandes durch verschiedene Disziplinen. Die einzelnen Disziplinen stehen hierbei nicht zwangsmäßig in Beziehung. Transdisziplinarität ist aufbauend auf dem Verständnis der Interdisziplinarität dadurch gekennzeichnet, „[...] dass die verschiedenen Disziplinen miteinander in Beziehung treten können und sich über ihre Grenzen hinaus auf andere Disziplinen zu bewegen“ (Abbildung 48d).³⁵⁷

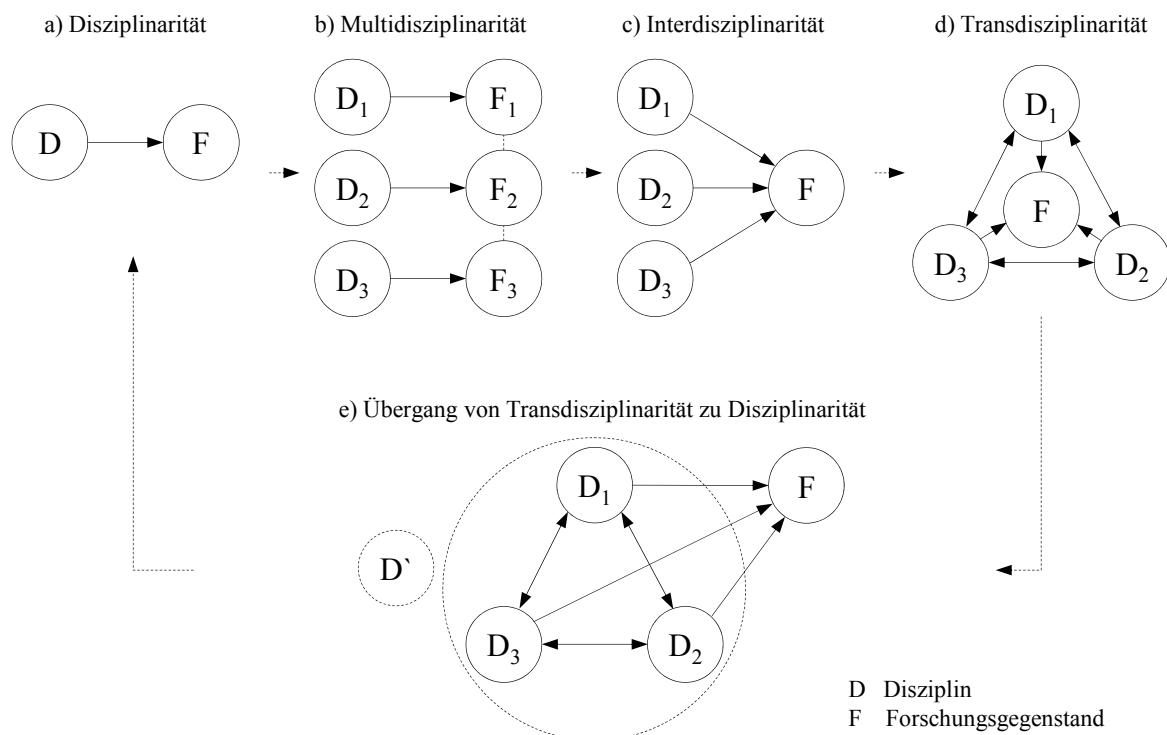


Abbildung 48: Disziplinarität, Multidisziplinarität, Interdisziplinarität und Transdisziplinarität³⁵⁸

Die Überschreitung der Grenzen im Falle der Transdisziplinarität kann inhaltlich und/oder methodisch erfolgen und dadurch infolge der (teilweisen) Auflösung der Grenzen zwischen den Disziplinen besondere Herausforderungen mit sich bringen. BRAND verweist hierbei auf die besondere Wichtigkeit des Wollens der beteiligten Forscher sowie des Managements transdisziplinärer Zusammenarbeit. Eine transdisziplinäre Zusammenarbeit kann bei

³⁵⁷ Vgl. Brand (2004), S.52ff.; Brand (2004), S.52

³⁵⁸ In Anlehnung an: Brand (2004), S.55; eigene Darstellung

fortschreitendem Abbau der Grenzen zwischen den Disziplinen zu einem Übergang eines ursprünglich transdisziplinär gestalteten Prozesses zu einem neuen, disziplinär gestalteten Prozess führen. Aus den vormals getrennten und transdisziplinär kooperierenden Disziplinen entwickelt sich in diesem Fall eine neue Disziplin D` (Abbildung 48e).³⁵⁹

Im Rahmen des Praxiseinblickes konnten bezugnehmend auf die Definition nach BRAND, interdisziplinäre und transdisziplinäre Formen insbesondere in der Zusammenarbeit der Kerndisziplinen Design (Konstruktion und Berechnung), Produktion sowie F&E festgestellt werden.

Zur Illustration der Transdisziplinarität im Produktentstehungsprozess von FVK-Komponenten vom Projektstart bis zum Start of Production wurde eine modellhafte Darstellung der Zusammenhänge zwischen den Kerndisziplinen, in Abhängigkeit der Disziplinen-spezifischen Herausforderungen sowie der Interdependenzen zwischen den Disziplinen entwickelt.³⁶⁰

Standardprojekte zeichnen sich durch eine interdisziplinäre Kooperation der beteiligten Disziplinen im Rahmen der einzelnen Phasen des PEP aus. Diese Kooperationsform wird durch einen geringen subjektiven Neuigkeitsgrad für die Disziplinen, einer eindeutigen Definierbarkeit der Schnittstellen zwischen den Disziplinen, einem hohen Detailliertheitsgrad der Aufgabenstellung bzw. der Anforderungen bereits zu Projektbeginn, einer geringen Notwendigkeit der Integration des/der Kunden in den Produktentstehungsprozess, sowie der Möglichkeit der Einschränkung des Lösungsraumes auf ein Lösungskonzept zu Projektbeginn ermöglicht. Abbildung 49 zeigt den grundsätzlichen Ablauf des Projekttyps „Standard“.

Startpunkt eines Standardprojektes ist das Pflichtenheft als Ergebnis der Angebotsstellung. Auf Basis dieser Anforderungsliste starten die Kerndisziplinen Design, Produktion und F&E mit dem Konzeptentwurf. Die Aufgaben der einzelnen Disziplinen sowie die Schnittstellen zwischen ihnen sind aufgrund der klaren Aufgabenstellung im Pflichtenheft dokumentiert. Die Wahrscheinlichkeit von Iterationsschleifen wird in Standardprojekten aufgrund ihrer Vorhersehbarkeit als gering eingeschätzt. Die Notwendigkeit von Iterationen im Prozessablauf kann im Rahmen von zwischenzeitlichen Abstimmungen zwischen den einzelnen Disziplinen nach Abschluss der einzelnen Projekt-Phasen (nach Zusammenführung der getrennt erarbeiteten Ergebnisse) festgestellt werden. Aufgrund der genauen Klärung der Anforderungen an das Produkt muss der Kunde erst nach der Phase der Detailberechnung wieder mit einbezogen werden. Hier erfolgt der Design Freeze und die Werkzeug- und Vorrichtungskonstruktion kann ausgelöst werden. Die Kerndisziplinen werden über den gesamten Produktentstehungsprozess bei Bedarf von den „Support-Disziplinen“, wie Qualitätssicherung, Einkauf, Sales, Customer Service, etc. unterstützt.

³⁵⁹ Vgl. Brand (2004), S.54f.

³⁶⁰ Vgl. Schnöll/Böhm/Ramsauer (2015)

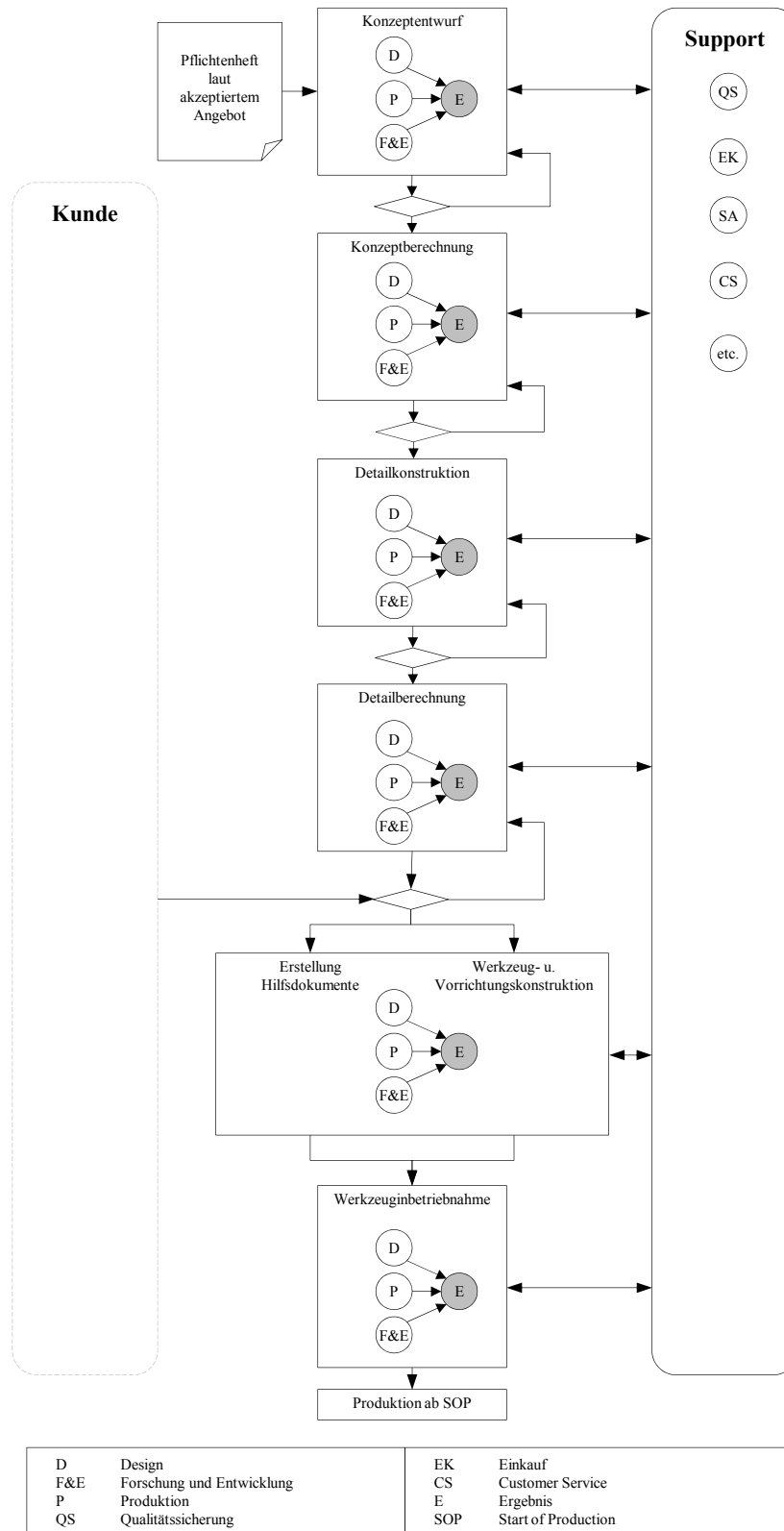


Abbildung 49: Projekttyp Standard³⁶¹

³⁶¹ Eigene Darstellung

Der zweite Projekttyp, im Folgenden als „**Agiles Projekt**“ bezeichnet, unterscheidet sich grundlegend von Standardprojekten. Das Adjektiv „agil“ bedeutet „*von großer Beweglichkeit zeugend*“ oder auch „*regsam und wendig*“.³⁶² Das Nomen „Agilität“ steht synonym für „*Gewandtheit*“, „*Vitalität*“ und „*Wendigkeit*“.³⁶³

Wesentliches Merkmal von Agilen Projekten im Vergleich zu Standardprojekten im betrachteten Praxisbeispiel ist die intensivere Kooperation der Disziplinen untereinander sowie mit dem Kunden im Rahmen der einzelnen Phasen des PEP, hervorgerufen durch einen erhöhten Abstimmungsbedarf.

Der höhere Abstimmungsbedarf kann auf mehrere Ursachen zurückgeführt werden. Ausgangspunkt für ein Agiles Projekt ist ein Pflichtenheft, welches im Gegensatz zu einem Pflichtenheft eines Standardprojektes, nicht im selben Umfang bzw. derselben Sicherheit Anforderungen an das Produkt sowie mögliche Lösungen klar festlegen kann. Ursache hierfür sind ein höherer subjektiver Neuigkeitsgrad - sowohl für den Kunden als auch für den Lieferanten. Der Neuigkeitsgrad führt zu Unsicherheiten im Ablauf des Produktentstehungsprozesses. Diese Unsicherheiten erschweren eine klare Definition der Aufgaben der einzelnen Disziplinen sowie der Schnittstellen zwischen den Disziplinen. Dem wird durch den Einsatz von transdisziplinär kooperierender Teams, sowie der intensiveren Einbindung des Auftraggebers Rechnung getragen. Die transdisziplinäre Arbeitsweise unterstützt die Agilität im Produktentstehungsprozess.

Die Integration des Kunden erfolgt insbesondere in den Abstimmungen zwischen den einzelnen Phasen des PEP. Im Rahmen dieser Abstimmung wird das Pflichtenheft gemeinsam, von Auftraggeber und Auftragnehmer, auf Basis der aktuellen Erkenntnisse weiterentwickelt. Dieses weiterentwickelte und nachgeschärfte Pflichtenheft (in Abbildung 50 als Anforderungsliste (kurz AF) 1 bis Anforderungsliste 4 illustriert) dient als Grundlage der nachfolgenden Phasen. Die verstärkte Integration des Kunden unterstützt daher ebenfalls die Agilität des Produktentstehungsprozesses.

Abbildung 50 zeigt den grundsätzlichen Ablauf des Projekttyps „Agil“.

³⁶² www.duden.de (Zugriffsdatum 15.06.2015)

³⁶³ www.duden.de (Zugriffsdatum 29.06.2015)

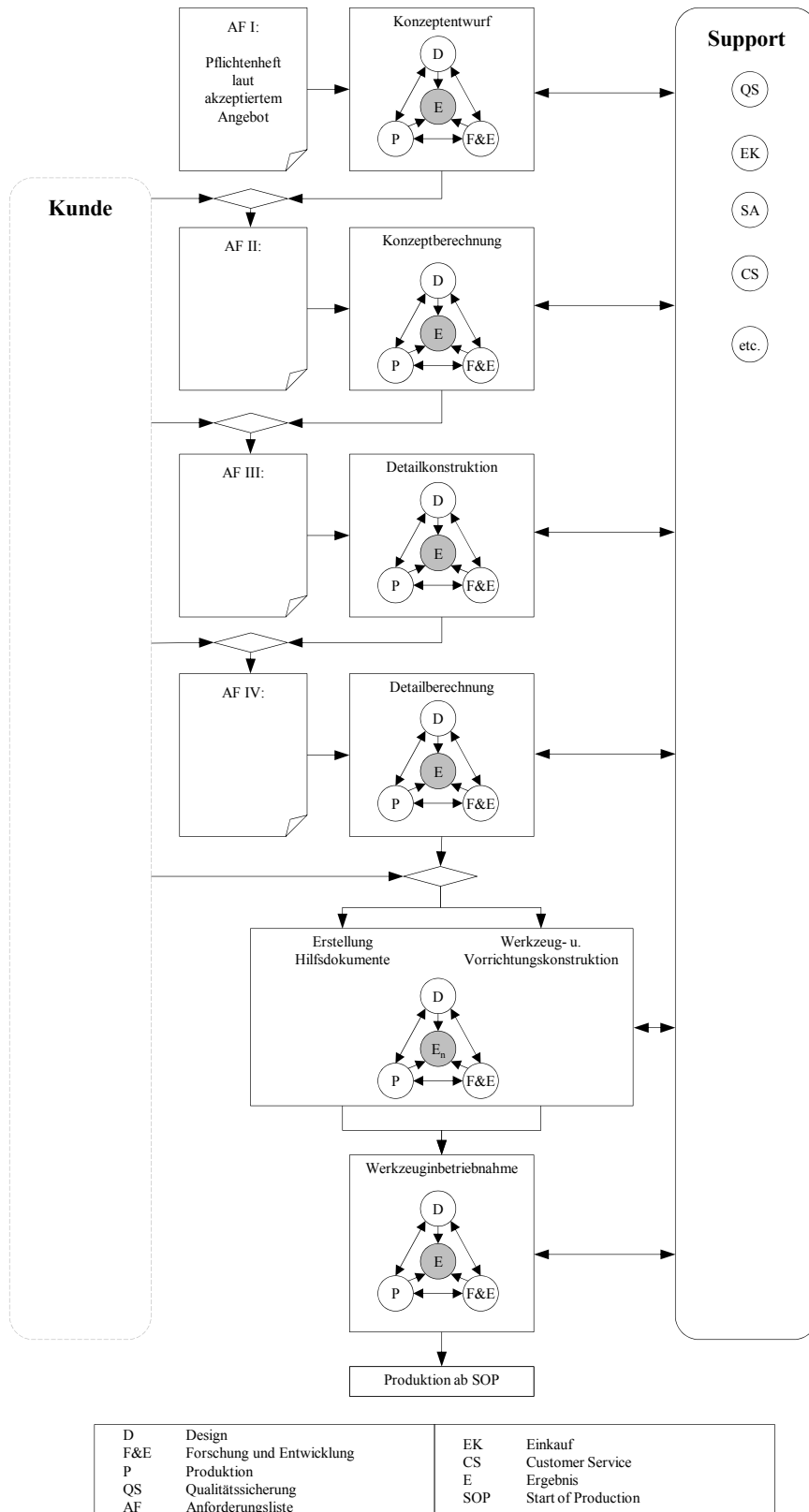


Abbildung 50: Projekttyp Agil³⁶⁴

³⁶⁴ Eigene Darstellung

Der Begriff der Agilität in Verbindung zu Produktentstehungsprozessen findet sich ursprünglich insbesondere im Bereich der Agilen Softwareentwicklung wieder. Die Grundlagen Agiler Softwareentwicklungsmethoden beruhen auf den im „Agile Manifesto“ formulierten Werten. Abbildung 51 zeigt die offizielle deutsche Übersetzung.

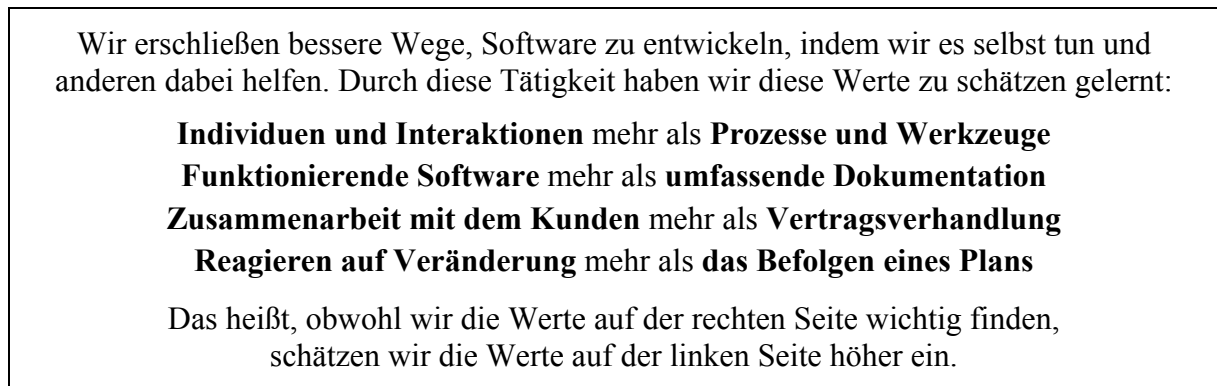


Abbildung 51: Agiles Manifest für Agile Softwareentwicklung³⁶⁵

Beim Abgleich des in Abbildung 50 illustrierten Ablaufes eines Agilen Projektes beim Kooperationspartner und der im Agilen Manifest beschriebenen Werte lassen sich insbesondere drei Werte der linken Seite wiedererkennen – es sind dies eine transdisziplinäre Gestaltung der Projektteams zur Unterstützung der Individuen und ihrer Interaktionen, die verstärkte Integration des Kunden in den Produktentstehungsprozess sowie die Anwendung einer dynamischen Anforderungsliste zur Unterstützung und Ermöglichung der Reaktion auf Veränderungen.

Scrum, als ein Vertreter der Agilen (Software-) Entwicklung, ist definiert als „*[a] framework within which people can address complex adaptive problems, while productively and creatively delivering products of the highest possible value.*“³⁶⁶ Diese Definition legt nahe, dass die Grundsätze der Agilen Entwicklung, aufgrund der in spezifischen Fällen ähnlichen Herausforderungen in der Entwicklung von FVK-Bauteilen, auch hierbei einen wertvollen Beitrag zur Effektivitäts- und Effizienzsteigerung im Produktentstehungsprozess leisten können.

Die Anwendung von Scrum gewährleistet die Transparenz sowie eine laufende Überprüfung und Anpassung von Entwicklungsprozessen. Wesentliche Bestandteile dieses Rahmenwerks sind Scrum Teams, Ereignisse, Artefakte und Regeln.³⁶⁷

Tabelle 1 zeigt eine Auflistung der Scrum Team Zusammensetzung, der Ereignisse und Artefakte sowie im Rahmen des Praxiseinblicks identifizierte Ähnlichkeiten zu einigen Bestandteilen von Scrum im Rahmen von Agilen Projekten beim Kooperationspartner.

³⁶⁵ Beck et al. (2001), S.o.A.; eigene Darstellung

³⁶⁶ Schwaber/Sutherland (2013), S.3

³⁶⁷ Vgl.Schwaber/Sutherland (2013), S.3f.; Für die detaillierte Beschreibung der Bestandteile von Scrum wird auf den Scrumguide, herausgegeben von SUTHERLAND/SCHWABER auf www.scrumguide.org verwiesen.

Tabelle 1: Identifizierte Bestandteile von Scrum in Agilen Projekten im Rahmen des Praxiseinblickes³⁶⁸

	Scrum	Praxiseinblick
Team	Product Owner	x
	Entwicklungsteam	x
	Scrum Master	-
Ereignisse	Sprint	x
	Sprint Planning	x
	Daily Scrum	x
	Sprint Review	x
	Sprint Retrospektive	x
Artefakte	Product Backlog	x
	Sprint Backlog	-
	Inkrement	x

Bezüglich der Teamzusammensetzung im Rahmen eines agilen Projektes konnten sowohl ein Product Owner als auch interdisziplinäre und (teilweise) selbstorganisierte Entwicklungsteams identifiziert werden. Die Rolle eines Scrum Masters wurde nicht aktiv bzw. bewusst besetzt. Ein Scrum Master hat dafür Sorge zu tragen, dass das gesamte Scrum Team „[...] die Theorie, Praktiken und Regeln von Scrum einhält“³⁶⁹.

Hinsichtlich der beschriebenen Ereignisse konnten zumindest Ähnlichkeiten zu allen beim Kooperationspartner auftretenden Ereignissen festgestellt werden. Hinsichtlich der im Scrum beschriebenen Artefakte konnte ein Product Backlog in Form einer dynamischen Anforderungsliste sowie Inkremente in Form der Ergebnisse der Makroaktivitäten identifiziert werden. Eindeutige Entsprechungen eines Sprint Backlogs und Inkrements fehlen jedoch.

SCHURIG/RABITSCH/RAMSAUER verstehen im Kontext des Produktionskonzepts der Agilen Produktion „[...] unter Agilität, sich aktiv auf Unsicherheiten vorzubereiten und so die Fähigkeit zu erlangen, innerhalb kürzester Zeit auf Veränderungen zu reagieren mit dem Ziel, die wirtschaftliche Situation eines Unternehmens ständig zu optimieren“. Die Autoren beschreiben des Weiteren die Notwendigkeit agiler Produktionsunternehmen „proaktiv Maßnahmen zur Reaktion auf Veränderungen“ vorzubereiten.³⁷⁰

Durch die Durchführung eines Agilen Projektes bereitet sich der Lieferant im vorliegenden Fall proaktiv auf wahrscheinliche Änderungen, beispielsweise der Anforderungen an das Produkt, vor und kann so, bei Eintreten dieser Veränderungen, schnell darauf reagieren.

³⁶⁸ Eigene Darstellung

³⁶⁹ Schwaber/Sutherland (2013), S.6

³⁷⁰ Vgl. Schurig/Rabitsch/Ramsauer (2014), S.956f.; Schurig/Rabitsch/Ramsauer (2014), S.956f.

Auch **Forschungsprojekte** werden in Form einer transdisziplinären Kooperation im Rahmen der einzelnen Phasen des PEP agil durchgeführt. Sie unterscheiden sich von Agilen Projekten durch eine noch unklarere Definition der Schnittstellen zwischen den Disziplinen, einem äußerst hohen subjektiven Neuigkeitsgrad und einer sehr unklaren Definition der Anforderungen. Diese Ausprägungen eines Projektes erfordern einerseits eine intensive Kundenintegration im Produktentstehungsprozess sowie andererseits die Notwendigkeit der Betrachtung eines größeren Lösungsraumes zu Projektbeginn. Abbildung 52 zeigt den grundsätzlichen Ablauf des Projekttyps „Forschung“.

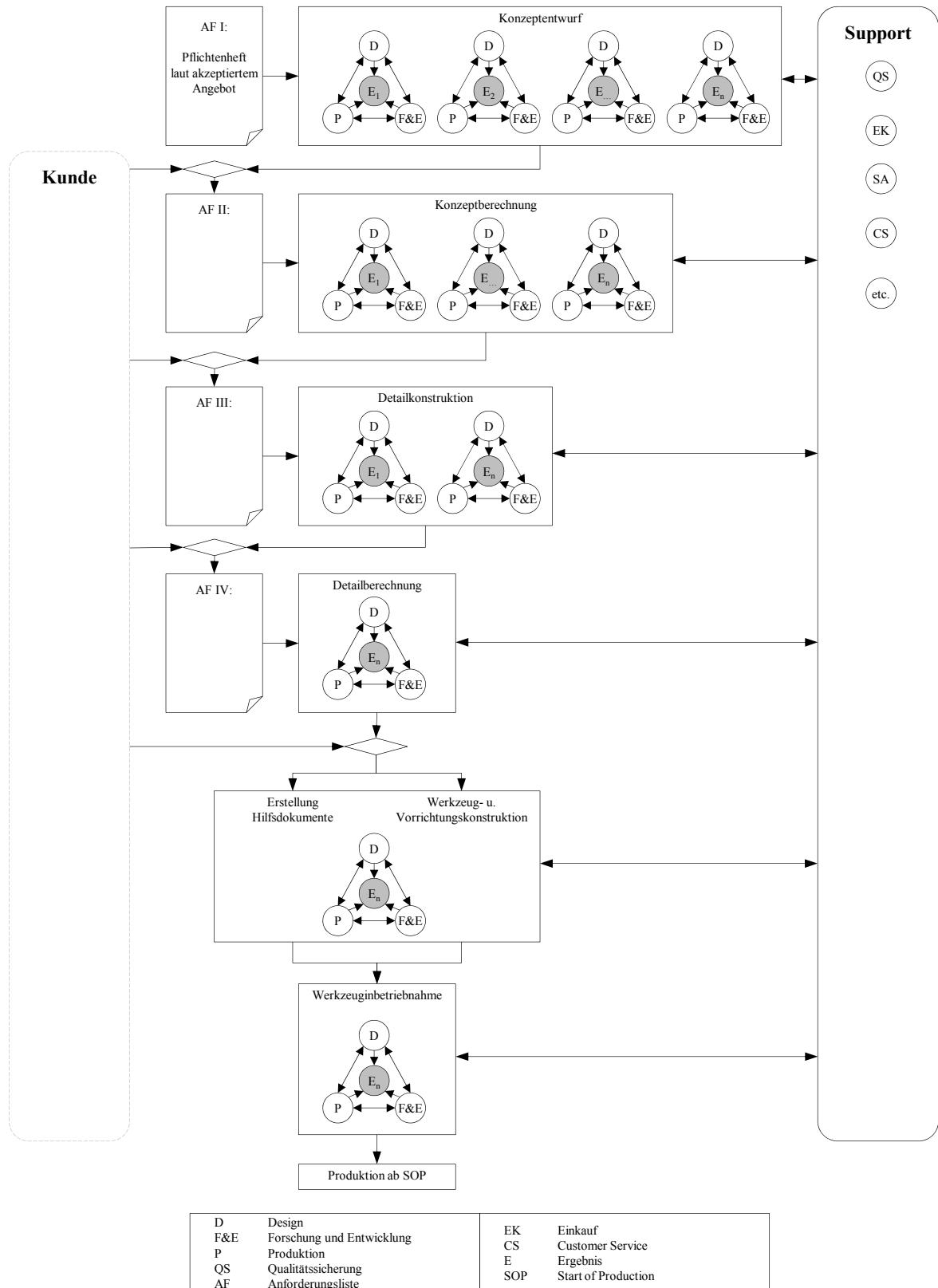


Abbildung 52: Projekttyp Forschung³⁷¹

³⁷¹ Eigene Darstellung

Standardprojekte sowie Agile Projekte sind „point-based“, d.h. sie verfolgen nur ein Lösungskonzept bereits ab einer Projektzusage des Auftragsgebers. Forschungsprojekte hingegen sind „set-based“, d.h. zu Beginn bestehen die Sets (Lösungsräume) der beteiligten Disziplinen (siehe dazu auch Abschnitt 2.3.5). Einzelne Lösungsvarianten der Disziplinen werden erst im Laufe des Produktentstehungsprozesses im Optimalfall bis zum Ende des PEP zu einer finalen Lösung eingegrenzt und abgestimmt.

In Bezug auf das zur Anwendung kommende ökonomische Prinzip (siehe dazu Abschnitt 2.1.3) unterscheiden sich Standard Projekte und Agile Projekte von Forschungsprojekten hinsichtlich ihrer Orientierung am Minimumprinzip, d.h. im Rahmen dieser Projekte wird versucht eine Lösungsvariante unter dem minimalen Einsatz von Ressourcen zu realisieren. Im Gegensatz dazu wird im Rahmen von Forschungsprojekten versucht bei gegebenem Maximal-Einsatz von Ressourcen ein maximales Projektergebnis zu erreichen.

Die beschriebenen Unterscheidungsmerkmale sind zusammenfassend in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Differenzierungsmerkmale festgestellter Projekttypen³⁷²

Projektmerkmale	Projekt-Typus		
	Standard	Agil	Forschung
subjektiver Neuigkeitsgrad	gering	hoch	sehr hoch
Schnittstellendefinition	eindeutig	schwierig	unklar
Wahrscheinlichkeit von Änderungen der Anforderungen im Projektverlauf	sehr gering	hoch	sicher
Kundenintegration	gering	hoch	sehr hoch
Lieferantenintegration	gering	hoch	sehr hoch
Eingrenzung des Lösungsraumes	möglich		nicht möglich
SE/CE Ansatz	point-based		set-based
Kooperationsform	interdisziplinär	transdisziplinär	
Ökonomisches Prinzip	Minimumprinzip		Maximumprinzip

5.3 Identifizierte Herausforderungen

Ergänzend zur Ableitung des Ist-PEP konnten im Rahmen der Experteninterviews sowie einer Vielzahl semi-formeller Diskussionen mit Experten beim Kooperationspartner nachfolgend beschriebene Herausforderungen im Produktentstehungsprozess beim Kooperationspartner identifiziert werden.

Geringe Erfahrung der Kunden mit FVK

Alle Experten nannten eine geringe Erfahrung der Kunden mit FVK als besondere Herausforderung im Rahmen des Produktentstehungsprozesses. Kunden müssen oftmals zu Beginn eines möglichen Projektes einerseits über die Möglichkeit und Besonderheiten des Einsatzes von FVK, und andererseits über mögliche Einschränkungen aufgeklärt und informiert werden. Als Beispiele hierfür wurden fehlendes Verständnis von Kontaktkorrosionsproblemen bei der Kombination von CFK mit metallischen Inserts oder das

³⁷² Eigene Darstellung

fehlende Wissen über die prinzipiellen Abläufe eines Produktentstehungsprozesses von FVK-Bauteilen genannt.

Verfügbarkeit von Materialdaten

Mehrmals wurde die Nichtverfügbarkeit von Materialdaten als besondere Herausforderung genannt. Der Nachweis der Materialkenndaten muss vielfach erst im Laufe eines Projektes erbracht werden. Dadurch muss beispielsweise die Bauteilauslegung oft auf Basis geschätzter und dadurch unsicherer Materialkennwerte gestartet werden und nachträglich mit den realen Materialkennwerten korrigiert werden. Des Weiteren muss teilweise der Prototypenbau mit Ersatzmaterialien durchgeführt werden, da das für die finalen Bauteile geplante Material zu diesem Zeitpunkt noch nicht zur Verfügung steht.

Die Motivation für den Einsatz von neuen Materialien ist meist nicht technisch begründet, sondern basiert auf wirtschaftlichen Überlegungen (z.B. zur Ermöglichung kürzerer Aushärtezeiten). Zur Berücksichtigung dieser wirtschaftlichen Gründe wird meist auf bestehende Angebote zurückgegriffen. Werden neue Materialien aus technischen Gründen benötigt, so muss vielfach das entsprechende Material mit einem Zulieferer erst entwickelt werden. Die zeitliche Gestaltung von derartigen Forschungsprojekten weicht wesentlich von Standardprojekten ab, da sich Materialentwicklungen über mehrere Jahre ziehen können. Der Einsatz neuer Materialien wird als eine der größten Herausforderungen gesehen.

Innovatives Entwicklungsfeld

Entwicklungen bezüglich Materialien, Technologien und Anlagen entwickeln sich nach Aussage mehrerer Experten sehr dynamisch. Der aktuelle State of the Art kann in einem kurzen Zeitraum irrelevant werden. In einem über mehrere Jahre laufenden Projekt gewonnene Erkenntnisse können so oft nach Projektabschluss für neue Projekte nicht mehr eingesetzt werden.

Komplexität durch Interdependenzen von Material- und Prozessparametern

Beim Einsatz von FVK ist im Vergleich zum Einsatz von traditionellen metallischen Werkstoffen eine höhere Anzahl von Materialparametern wie Matrixeigenschaften, Fasereigenschaften, Faserorientierung oder Lagenaufbau sowie eine Vielzahl von Prozessparametern miteinander abzustimmen. Dies stellt aufgrund deren Wechselbeziehungen eine besondere Herausforderung dar.

Komplexität durch fehlende Erfahrungswerte

Komplexität im PEP von FVK entsteht oft durch fehlende Erfahrungswerte beispielsweise hinsichtlich von Zulassungsvorschriften, Auslegungsrichtlinien und relevanten Lastfällen beim erstmaligen Einsatz des Werkstoffes für ein spezifisches Produkt. Daraus resultiert ein erhöhter Kommunikations- und Abstimmungsaufwand mit dem Kunden.

Unterschiedlicher Projektumfang

Der Umfang der Beteiligung am PEP determiniert Projekte mit einer Bandbreite vom kompletten PEP bis zu reinen Fertigungsaufträgen im Rahmen derer vom Kunden Vorarbeit

im Bereich der Produktentwicklung bereitgestellt wird. Der Projektablauf wird auch dadurch charakterisiert ob ein bereits existierendes metallisches Bauteil durch ein FVK-Bauteil ersetzt werden soll, oder eine komplette Bauteil-Neuentwicklung erforderlich ist. Projekte unter Beteiligung mehrerer Partner sind aufgrund eines erhöhten Abstimmungsbedarfs komplexer in ihren Abläufen. Die Bandbreite der Projekte reicht von der reinen Eigenentwicklung bis zu Kooperationsprojekten mit mehreren Partner-Unternehmen.

Zusammenarbeit über Disziplinen-Grenzen hinweg

Die Trennung und Zuordnung von Aufgaben und Aktivitäten im Produktentstehungsprozess gestaltet sich schwierig, da sich die Aufgabenbereiche projektspezifisch unterschiedlich überschneiden.

Intransparente und Schwierige Festlegung des Projekttyps

Die Wahl der Projektorganisation erfolgt in der Regel durch den dem Projekt zugeteilten Projektmanager. Dieser Auswahlprozess jedes einzelnen Projektmanagers ist für die am Produktentstehungsprozess Beteiligten nicht nachvollziehbar definiert und standardisiert.

Weites Produktspektrum

Ein Zulieferer von FVK-Bauteilen ist mit einer Vielzahl unterschiedlicher Projekteinhalten konfrontiert. Es muss daher ein breites Wissen aufgebaut werden. Vom Kunden oder externen Experten bereitgestelltes Spezialwissen ist für den Produktentstehungsprozess von großer Wichtigkeit.

Projektdauer versus Simulationsdauer

Die Simulation des Herstellungsprozesses von komplexen FVK-Bauteilen (z.B. im RTM-Verfahren) erfordert im Vorfeld die Bestimmung einer Vielzahl von Parametern (z.B. Preform-Durchlässigkeit). Vielfach steht im Rahmen der Projekte die Zeit dafür nicht zur Verfügung. Dies führt dazu, dass zwar prinzipiell Simulationswerkzeuge zur Verfügung stehen würden, diese aufgrund des beschriebenen Sachverhalts jedoch nicht zum Einsatz gebracht werden können.

Verzicht auf Prototypenwerkzeuge

Ein weiterer Grund für den oftmaligen Entfall von Simulationen der Herstellungsprozesse ist der Trend zum Verzicht auf Prototypenwerkzeuge. Die Motivation dafür ist eine erwartete Kosten- und Zeitersparnis. Es muss daher sofort nach dem Design-Freeze die Beschaffung der Serienwerkzeuge ausgelöst werden.

Entscheidungen unter Unsicherheit

Zum Start eines Projektes müssen oft auf Basis unsicherer Daten erste Angebote erstellt werden. Im Laufe eines Projektes werden Anforderungen und Rahmenbedingungen sehr häufig vom Kunden geändert und angepasst. Des Weiteren kann es zu Technologiesprüngen in Bezug auf das Lösungskonzept kommen.

5.4 Zusammenfassung

Im Rahmen des Praxiseinblickes wurde einerseits der dokumentierte Soll-Produktentstehungsprozess analysiert und andererseits der gelebte Ist-Produktentstehungsprozess im Rahmen von Expertenbefragungen erhoben und dokumentiert.

Die Ergebnisse zum Soll-Produktentstehungsprozess zeigen das Projektmanagement als die wesentliche Schnittstelle im PEP. Die Ursache hierfür liegt in der bei der Entwicklung von FVK-Bauteilen notwendigen intensiven Abstimmung der beteiligten Disziplinen.

Die Ergebnisse des gelebten Ist-Produktentstehungsprozess weisen auf den ersten Blick geringe Abweichungen zum Soll-Produktentstehungsprozess auf. Die Experten beschreiben jedoch hinsichtlich der Organisation des PEP eine Bandbreite von „Standardprojekten“ bis hin zu „Forschungsprojekten“.

Die adäquate Wahl des Projekttyps liefert demnach einen wesentlichen Beitrag zur effizienten Bearbeitung der gestellten Herausforderungen. Die Wahl ist dabei abhängig von den an das zu entwickelnde Bauteil gestellten Anforderungen (Produktkomplexität – primär extern beeinflusst), der dadurch verursachten internen Komplexität des Produktentstehungsprozesses sowie den allgemeinen Rahmenbedingungen eines Projektes.

Zur Entscheidungsfindung hinsichtlich der Wahl des Projekttyps konnten spezifische Projektmerkmale abgeleitet werden, anhand derer eine proaktive und abgestimmte Auswahl des richtigen Projekttyps bereits in einer frühen Phase des Produktentstehungsprozess ermöglicht wird.

6 Zwischenfazit

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Grundlagen der integrierten Produktentstehung, der Faserverbundkunststoffe sowie des Leichtbaues herausgearbeitet und beschrieben. Ergänzend dazu, wurde im Rahmen eines Praxiseinblicks in Kooperation mit einem renommierten Vertreter der Branche ein realer Produktentstehungsprozess von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen untersucht. Nachfolgend erfolgt eine Zusammenfassung des in den vorhergehenden Kapiteln erarbeiteten grundlegenden Handlungsbedarfes sowie der spezifischen Anforderungen an die Methodik hinsichtlich der Grundsätze einer Integrierten Produktentstehung, der Anwendung von Faserverbundkunststoffen sowie des Leichtbaus.

6.1 Grundlegende Handlungsschwerpunkte

Komplexitätsmanagement

Ein grundlegender Handlungsbedarf ist in den Interdependenzen zwischen Material, Bauteilgestaltung und Herstellungsverfahren und der daraus resultierenden Komplexität begründet. Diese Wechselwirkungen existieren sowohl bei der Entwicklung von FVK-Bauteilen als auch im Zusammenhang mit Leichtbau. Diese Komplexität kann nicht beseitigt sondern muss „gemanagt“ werden.

Die Komplexität ist ein wesentliches Klassifikationsmerkmal eines Systems. Nach PATZAK ist ein komplexes System einerseits durch eine hohe Anzahl sowie Arten von Systemelementen (Varietät) als auch durch eine hohe Anzahl sowie Arten von Verknüpfungen (Konnektivität) der Systemelemente gekennzeichnet (Abbildung 53).³⁷³

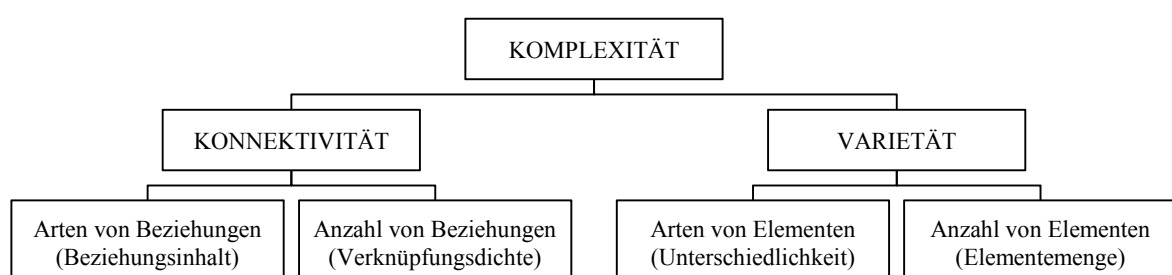


Abbildung 53: Komplexität von Systemen³⁷⁴

Nach SCHUH umfasst das Komplexitätsmanagement „[...] die Gestaltung, Steuerung und Entwicklung der Vielfalt des Leistungsspektrums (Produkte, Prozesse und Ressourcen) im Unternehmen. Durch die Verstärkung und Dämpfung der Komplexität wird die Fähigkeit angestrebt, die Vielfalt in allen Wertschöpfungsstufen so zu beherrschen, dass ein maximaler

³⁷³ Vgl. Patzak (1982), S.22f.

³⁷⁴ Vgl. Patzak (1982), S.23; eigene Darstellung, gekürzt

*Beitrag zum Kundennutzen bei gleichzeitig hoher Wirtschaftlichkeit des Leistungserstellers erzielt werden kann.*³⁷⁵

Es gilt externe Komplexität in einem optimalen Verhältnis mit der daraus resultierenden internen Komplexität abzustimmen. KAISER beschreibt in diesem Zusammenhang beispielsweise das Variantenmanagement als Schnittstelle zwischen den internen und externen Komplexitätstreibern.³⁷⁶

Die Literatur beschreibt eine Vielzahl von Komplexitätstreibern. SCHOENEBERG zeigt eine umfassende Zusammenstellung von externen und internen Komplexitätstreibern. Externe Komplexitätstreiber sind gegliedert in die Gesellschaftskomplexität sowie die Marktkomplexität. Die Marktkomplexität wird bestimmt durch die Nachfragekomplexität, die Wettbewerbskomplexität sowie die Beschaffungskomplexität. Die interne Komplexität wird in die Korrelierte Unternehmenskomplexität (Zielkomplexität, Kundenstrukturkomplexität, Produkt- und Produktprogrammkomplexität sowie Technologiekomplexität) und die Autonome Unternehmenskomplexität (Prozesskomplexität, Organisationskomplexität, Strukturkomplexität sowie Planungs- und Steuerungskomplexität) unterschieden. Einflüsse auf die autonome Unternehmenskomplexität lassen sich ausschließlich auf interne Faktoren zurückführen. Im Gegensatz dazu können Einflüsse auf die korrelierte Unternehmenskomplexität intern und extern begründet sein.³⁷⁷

WILDEMANN beschreibt 3 Grundstrategien des Komplexitätsmanagements. Die Komplexitätsreduzierung verfolgt das Ziel der Reduktion bereits bestehender Komplexität, die Komplexitätsbeherrschung beschreibt die „[e]ffiziente Handhabung der nicht vermeidbaren Komplexität“. Die Komplexitätsvermeidung soll durch ihre frühe Anwendung in der Entstehung neuer Produkte dem Aufbau von Komplexität entgegenwirken.³⁷⁸

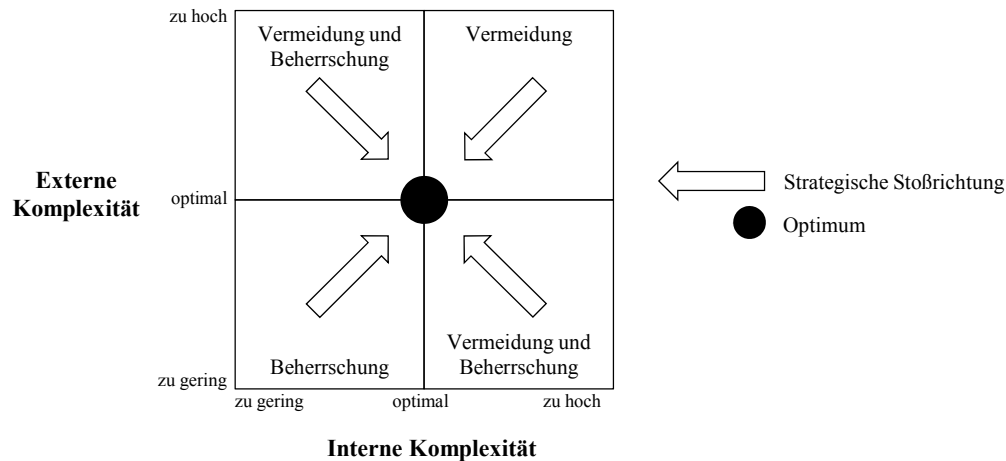
Abbildung 54 illustriert die Anwendung der Strategien der Komplexitätsvermeidung und -beherrschung zur optimierten Abstimmung von externer und interner Komplexität.

³⁷⁵ Schuh (2005), S.36

³⁷⁶ Vgl. Kaiser (1995), S.100

³⁷⁷ Vgl. Schoeneberg (2014), S.17f.

³⁷⁸ Vgl. Wildemann (2013), S.75ff.; Wildemann (2013), S.78

Abbildung 54: Komplexitätsoptimum nach KAISER³⁷⁹

Die zu entwickelnde Methodik soll die beschriebene, notwendige Abstimmung der externen und internen Komplexität im Sinne einer Optimierung durch die Berücksichtigung der Grundstrategien des Komplexitätsmanagements unterstützen.

Management von Unsicherheiten im Produktentstehungsprozess

THOMKE beschreibt in diesem Zusammenhang den Begriff der Entwicklungsflexibilität. Diese beschreibt eine Funktion in Abhängigkeit der Kosten der Modifizierung eines Produktes als Reaktion auf externe (z.B. Änderungen der Kundenbedürfnisse) oder interne (z.B. Entwicklung eines besseren Lösungskonzeptes) Veränderung. Je höher die Kosten einer Modifikation, desto geringer ist die Entwicklungsflexibilität.³⁸⁰ THOMKE beschreibt drei Hauptstrategien zur Steigerung der Entwicklungsflexibilität:³⁸¹

- Einsatz flexibler Entwicklungsstrategien
- Einsatz von Managementansätzen zur Reduktion von Änderungskosten
- Einsatz von Produktarchitekturen welche Änderungen im Entwicklungsprozess erleichtern

Entwicklungsflexibilität sollte bewusst als eine Fähigkeit eines Unternehmens verstanden werden.³⁸² Sie kann ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal im Vergleich zur Konkurrenz darstellen.

Projektmanagement

EVERSHEIM/SCHUH beschreiben Auswirkungen auf den Produktentstehungsprozess infolge des Einsatzes von neuen Produkt- und Fertigungstechnologien auf die Ablauf- und Aufbauorganisation.³⁸³

³⁷⁹ Kaiser (1995), S.102; eigene Darstellung

³⁸⁰ Vgl. Thomke/Reinertsen (1998), S.8

³⁸¹ Vgl. Thomke/Reinertsen (1998), S.27

³⁸² Vgl. Thomke/Reinertsen (1998), S.27

³⁸³ Vgl. Eversheim/Schuh (2005), S.15

Diese Thematik ist insbesondere mit dem PEP von FVK-Bauteilen untrennbar verbunden. Wie beschrieben, kann der PEP von FVK-Bauteilen von großer Komplexität geprägt sein. Wie der Praxiseinblick zeigte, hat der Grad der Komplexität wesentlichen Einfluss auf die adäquate Gestaltung eines Projektes. Die zu entwickelnde Methodik soll das Projektmanagement bei der Gestaltung eines integrativen PEP von FVK-Bauteilen in Abhängigkeit der Rahmenbedingungen und gestellten Anforderungen (externe Komplexität) und der daraus resultierenden internen Komplexität unterstützen.

Integration der Prinzipien der Leichtbaus

Der Leichtbau ist Hauptmotivation für den Einsatz von Faserverbundkunststoffen. Die Berücksichtigung der Grundsätze von Leichtbaustrategien und -bauweisen zur richtigen Zeit im Produktentstehungsprozess liefert einen wesentlichen Beitrag dazu, die richtigen Produkte richtig zu entwickeln.

6.2 Spezifische Anforderungen an die Methodik

Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen, grundlegenden Handlungsschwerpunkte sollen unter der Beachtung der nachfolgend beschriebenen Anforderungen in einer Methodik umgesetzt werden.

Grundsätze einer integrierten Produktentstehung

Eine Integration im PEP kann in menschlicher, methodischer, organisatorischer und technischer Hinsicht erfolgen. Sowohl in der Literatur als auch im Rahmen des Praxiseinblicks konnte ein Fokus auf methodische und technische Integration für Produktentstehungsprozesse von FVK festgestellt werden. Der Fokus des zu entwickelnden Modells liegt daher auf der menschlichen und organisatorischen Integration unter der besonderen Berücksichtigung der Anforderungen des spezifischen Anwendungsfalls und soll so einen weiteren Beitrag zur Steigerung von Effektivität und Effizienz eines integrierten PEP von FVK-Bauteilen liefern.

FVK-spezifische Anforderungen

- Unterstützung der Nutzung der Vorteile von Faserverbundkunststoffen
- Frühzeitige Berücksichtigung spezifischer Rahmenbedingungen, Einwirkungen und geforderter Eigenschaften
- Unterstützung des Managements der werkstoffbedingten Komplexität
- Unterstützung einer abgestimmten Entscheidungsfindung hinsichtlich Material, Herstellprozess und Bauteilgestaltung
- Abgleich von Angebot (Bekanntes Wissen) und Nachfrage (Bekanntes Anforderungen)
- Berücksichtigung und Unterstützung der notwendigen Kooperation der beteiligten Disziplinen
- Unterstützung zur Berücksichtigung des dynamischen Innovationsumfeldes

Leichtbauspezifische Anforderungen

- Berücksichtigung der Grundsätze der Leichtbaustrategien und Leichtbauweisen
- Integration der Gedanken der Leichtbauökonomie
- Fokus auf die Konzeptfindung auf Basis vorherrschender Rahmenbedingungen
- Berücksichtigung von Iterationen und Optimierungsschleifen
- Berücksichtigung der Transdisziplinarität des Entwicklungsprozesses von LB-Komponenten

Anforderungen aus den Ergebnissen des Praxiseinblickes

- Frühzeitige Integration aller beteiligten Bereiche bereits während der Machbarkeitsprüfung im Rahmen der Kalkulationserstellung
- Berücksichtigung der mangelnden Erfahrung der Kunden mit FVK
- Berücksichtigung fehlender Verfügbarkeit von Materialdaten
- Berücksichtigung der Komplexität durch fehlende Erfahrungswerte in neuen Anwendungsgebieten zu entwickelnder FVK-Bauteile
- Berücksichtigung der Änderungen von Anforderungen und Rahmenbedingungen im Laufe eines Projektes
- Berücksichtigung des unterschiedlichen Umfangs von Projekten
- Berücksichtigung unterschiedlicher Projekttypen
- Unterstützung des Projektmanagements zur transparenten Bewertung, Organisation und Leitung von Projekten

Allgemeine Anforderungen

Die Methodik soll:

- unter vertretbarem Aufwand anwendbar sein.
(Die Strukturen des Großteils der Unternehmen der Branche entsprechen kleinen und mittleren Unternehmen. Aufgrund der eingeschränkt zur Verfügung stehenden Ressourcen ist es nicht zielführend die am Produktentstehungsprozess Beteiligten mit einer nur mit hohem Aufwand zu administrierenden Methodik zu konfrontieren.)
- dabei helfen Wesentliches vom Unwesentlichen zu trennen.
- Kunden in den Produktentstehungsprozess mit einbeziehen.
- die Qualität des Konzeptentwurfes steigern.
- die Möglichkeit bieten, maßgeschneiderte Projektablaufpläne und Projektorganisationen abzuleiten.
- den Fokus auf die Anwendbarkeit durch die beteiligten Individuen zur Schaffung des einheitlichen und gemeinsamen Bewusstseins der Herausforderungen und gegenseitigen Abhängigkeiten im Projektablauf legen.
- die Zusammenhänge und Abhängigkeiten im Laufe der Produktentstehung sicht- und begreifbar machen.

7 Vorgehensmodell zur kontextspezifischen Gestaltung des Produktentstehungsprozesses von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen

„Das Richtige richtig entwickeln!“³⁸⁴

Die der Produktentstehung inhärente Komplexität kann nicht „gelöst“ werden – sie kann jedoch gestaltet/gemanagt werden. Dazu müssen die komplexitätsverursachenden Aspekte verstanden und nach Möglichkeit reduziert werden um die richtigen Entscheidungen beispielsweise hinsichtlich der Gestaltung des Produktentstehungsprozesses, den erforderlichen Aktivitäten sowie der Projektdurchführung und -koordination treffen zu können.³⁸⁵

Es gilt die internen und externen Komplexitätstreiber zu erkennen und zu verstehen und unter der Anwendung der Strategien des Komplexitätsmanagements eine optimale Abstimmung der nicht vermeidbaren internen und externen Komplexität zu erreichen.

Das entwickelte, und im Folgenden beschriebene Vorgehensmodell, verfolgt das Ziel, unter der Berücksichtigung der in den vorangegangenen Abschnitten identifizierten komplexitätsverursachenden Aspekte im Produktentstehungsprozess von FVK-Bauteilen, die systematische Ableitung eines kontextspezifisch integrierten Produktentstehungsprozesses zu unterstützen. Das Vorgehensmodell soll es Herstellern von FVK-Bauteilen ermöglichen, die Effektivität („die richtigen Dinge tun“) und Effizienz („die Dinge richtig tun“) im Produktentstehungsprozess zu gewährleisten und zu unterstützen.

In einem ersten Schritt erfolgen die model- und systemtheoretische Einordnung des Vorgehensmodells sowie die Beschreibung der Systemgrenzen. Danach erfolgt die Beschreibung der Grundstruktur des Vorgehensmodells mit den einzelnen Modellschritten welche anschließend im Detail diskutiert werden.

7.1 Einordnung des Vorgehensmodells

7.1.1 Modelltheoretische Einordnung

STACHOWIAK beschreibt im gegebenen Zusammenhang ein Modell als „*Abbild von etwas sowie [...] als Vorbild von etwas*“ oder als „*Repräsentation eines bestimmten Originals*“ und

³⁸⁴ Albers/Braun (2011), S.8

³⁸⁵ Vgl. Danilovic/Browning (2007), S.309

definiert das Abbildungsmerkmal, das Verkürzungsmerkmal sowie das Pragmatische Merkmal als die drei Hauptmerkmale des Modelbegriffs.³⁸⁶

Das Abbildungsmerkmal besagt, dass *„Modelle [...] stets Modelle von etwas [sind], nämlich Abbildungen, Repräsentationen natürlicher oder künstlicher Originale, die selbst wieder Modelle sein können.“*³⁸⁷

Das Verkürzungsmerkmal bringt zum Ausdruck, dass *„Modelle [...]im allgemeinen nicht alle Attribute des durch sie repräsentierten Originals [erfassen], sondern nur solche, die den jeweiligen Modellerschaffern und/oder Modellbenutzern relevant scheinen.“*³⁸⁸

Die Abstraktion eines Originals in ein Modell ist stets beeinflusst durch die Bestimmung des Modellerschaffers der Relevanz von Eigenschaften des Originals durch den Modellerschaffer. Wichtige Eigenschaften werden im Modell verstärkt, unwichtige Eigenschaften abgeschwächt oder vernachlässigt. Es kann daher von einem Original mehrere verschiedene Modelle in Abhängigkeit der Betrachtungsweise geben.³⁸⁹

Das Pragmatische Merkmal besagt, dass *„Modelle [...]ihren Originalen nicht per se eindeutig zugeordnet [sind]. Sie erfüllen ihre Ersetzungsfunktion [...] für bestimmte – erkennende und/oder handelnde, modellbenutzende – Subjekte [...] innerhalb bestimmter Zeitintervalle und [...] unter Einschränkung auf bestimmte gedankliche oder tatsächliche Operationen.“*³⁹⁰

Es gibt Auskunft über den Zweck des Modells, das repräsentierte Original, und den Nutzer des Modells³⁹¹. Die drei Hauptmerkmale können für das in den folgenden Abschnitten beschriebene Vorgehensmodell wie folgt zusammengefasst werden:

- **Abbildungsmerkmal**
Das Vorgehensmodell repräsentiert einen Produktentstehungsprozess von FVK-Bauteilen auf Basis der Literatur (Abschnitt 3 und 4) sowie eines Praxiseinblickes (Kapitel 5).
- **Verkürzungsmerkmal**
Das Vorgehensmodell umfasst nicht alle Attribute des PEP. Die vorgenommene Verkürzung beruht einerseits auf den Ergebnissen des Praxiseinblicks sowie der persönlichen Erfahrung und Einschätzung des Autors.
- **Pragmatisches Merkmal**
Der Zweck des Vorgehensmodells ist die Unterstützung der Gestaltung eines kontextspezifischen, integrierten Produktentstehungsprozesses von FVK-Bauteilen zur Nutzung durch die handelnden Individuen.

³⁸⁶ Stachowiak (1973), S.129; Vgl. Stachowiak (1973), S.131ff.

³⁸⁷ Stachowiak (1973), S.131

³⁸⁸ Stachowiak (1973), S.132

³⁸⁹ Vgl. Krallmann/Frank/Gronau (2002), S.33

³⁹⁰ Stachowiak (1973), S.132f.

³⁹¹ Vgl. Krallmann/Frank/Gronau (2002), S.33

7.1.2 Systemtheoretische Einordnung

Die Bedeutung der allgemeinen Systemtheorie besteht nach ROPOHL darin, „[...] eine einheitliche formale Sprache für die geordnete Beschreibung verschiedenartiger Erfahrungsbereiche anzubieten und auf diese Weise deren Ähnlichkeiten, Überschneidungen und Verknüpfungen aufzudecken und zu präzisieren“. Sie kann daher einen Beitrag zur „[...]Synthese interdisziplinärer Forschung[...]“ leisten.³⁹²

Nach EHRENSPIEL/MEERKAMM ist die Gliederung in Zielsystem, Handlungssystem, und Sachsystem im gegebenen Zusammenhang der Themenstellung der vorliegenden Arbeit von besonderer Bedeutung. Sie unterscheiden des Weiteren in den Modell- und Objektbereich. Im Modellbereich wird ein Produkt gedanklich modelliert und im Rahmen der Produktion in den Objektbereich überführt und in die physische Realität umgesetzt (Abbildung 55).³⁹³

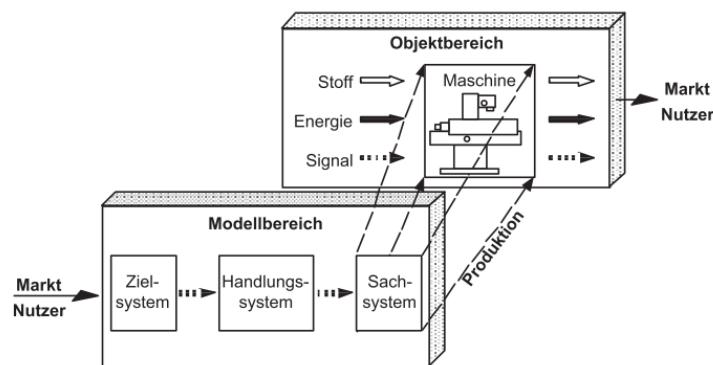


Abbildung 55: Zielsystem, Handlungssystem und Sachsystem³⁹⁴

Handeln ist darauf ausgerichtet Ziele zu erreichen. Im Falle des technischen Handelns kann beispielsweise die Schaffung eines Sachsystems ein Ziel darstellen. Ein Handlungssystem verfolgt jedoch nicht zwingend immer nur ein Ziel, sondern mehrere miteinander in Beziehung stehende Ziele. In diesem Fall kann von einem Zielsystem gesprochen werden.³⁹⁵

Nach ROPOHL ist „[e]in Handlungssystem [...] eine Instanz, die Handlungen vollzieht“³⁹⁶ und das Handeln eine „[...]Funktion eines Handlungssystems, die darin besteht, bestimmte, für die Anfangssituation kennzeichnende Inputs, Zustände und Ziele derart in Zustände und Outputs der Endsituation zu überführen, dass damit die Ziele erfüllt werden“³⁹⁷. Das grundlegende Bestimmungsmerkmal des Sachsystems besteht darin, dass es künstlich, also von Menschen gemacht ist“³⁹⁸. In Bezug auf die Technik sind Sachsysteme „[...]die aus der

³⁹² Ropohl (2009), S.88; Vgl. Ropohl (2009), S.88

³⁹³ Vgl. Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.24

³⁹⁴ Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.26

³⁹⁵ Vgl. Ropohl (2009), S.151f.

³⁹⁶ Ropohl (2009), S.93

³⁹⁷ Ropohl (2009), S.106

³⁹⁸ Ropohl (2009), S.120

Arbeit der Ingenieure, Techniker, usw. entstehenden technischen Gebilde wie Maschinen, Maschinenteile, Geräte, Apparate [...]“³⁹⁹.

MEBOLDT verweist darauf, dass nur durch die Integration von Ziel-, Sach-, und Objektsystem „[...] ein Produktentstehungsprozess hinreichend modelliert werden [...]“ kann⁴⁰⁰. Auf den Begriff der Komplexität, einem wesentlichen Merkmal von Systemen, wurde bereits in Abschnitt 6.1 eingegangen.

Im vorliegenden Fall bildet ein Lastenheft eines Kunden das initiale Zielsystem. Dieses wird zu einem finalen Zielsystem in Form eines FVK-spezifischen Pflichtenhefts in Kooperation von Kunde und Lieferant weiterentwickelt. Das Handlungssystem wird vom Unternehmen mit seinen Ressourcen, und das Sachsystem vom digitalen (Modellbereich) oder physischen FVK-Bauteil (Objektbereich) repräsentiert.

Systemgrenzen

Die Abgrenzung des Systems orientiert sich am Systeminnovationsmodell werkstofforientierter Innovationen nach SCHNEIDER (siehe dazu Abschnitt 3.3.1). Die Umwelt des Systems „FVK-Komponentenhersteller“ wird gebildet durch die Halbzeughersteller als Lieferanten der eingesetzten Materialien, den Lieferanten von Komplementärtechnologien (z.B. Anlagen), der Konkurrenz, den Systemherstellern als Kunden sowie durch das naturwissenschaftlich-technische Umfeld.

Das entwickelte Vorgehensmodell soll FVK-Komponenten-Hersteller im Rahmen des Produktentstehungsprozesses von der strategischen Produktplanung bis zum Start of Production unterstützen. Bezugnehmend auf HANDKE (siehe dazu Abschnitt 3.3.2) soll es FVK-Komponentenhersteller vom Produktkonzept, dem Werkzeug- und Materialkonzept, der Werkzeugentwicklung, dem Formenbau bis zur Produktionsprozessentwicklung unterstützen.

Abbildung 56 zeigt die Abgrenzung eines FVK-Komponentenherstellers von seiner Umwelt.

³⁹⁹ Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S.24

⁴⁰⁰ Vgl. Meboldt (2008), S.184; Meboldt (2008), S.184

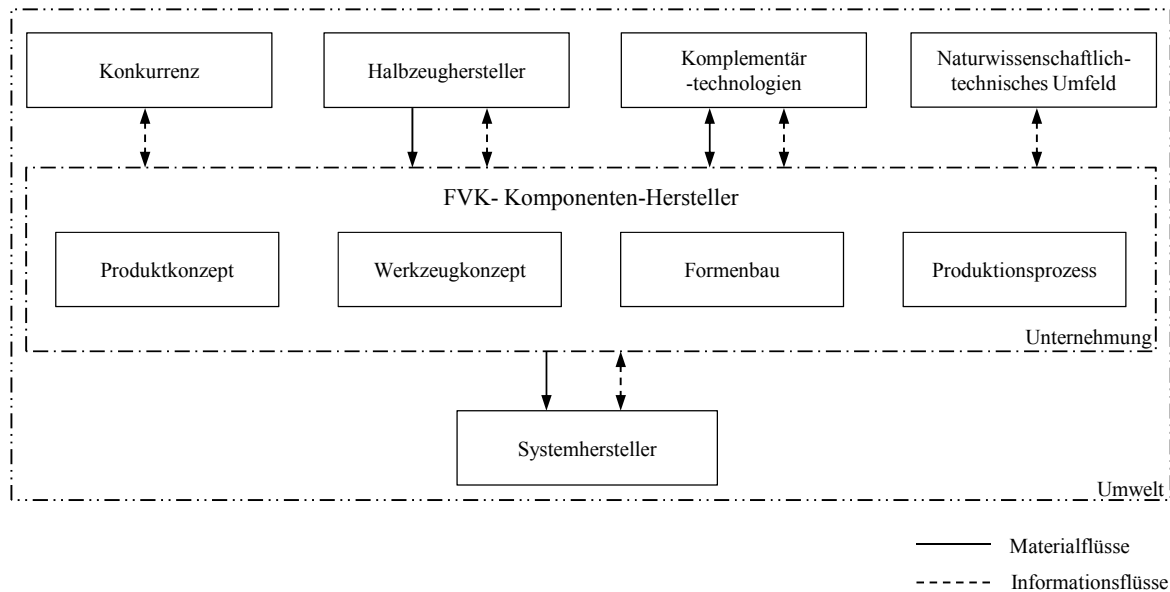


Abbildung 56: Systemgrenzen⁴⁰¹

7.2 Grundstruktur des Vorgehensmodells

Abbildung 57 zeigt die Grundstruktur des Vorgehensmodells mit den nachfolgend beschriebenen Modellschritten.

Ausgangspunkt und Initialzündung für den Produktentstehungsprozess ist der **Projektanstoß (A)**. Dieser kann extern, durch eine Kundenanfrage, oder durch ein intern initiiertes Projekt ausgelöst werden.

Es besteht somit eine Nachfrage – diese trifft auf ein **Angebot (B)**. Das Angebot (B) gliedert sich in das Interne und Externe Leistungsangebot. Das Interne Leistungsangebot stellt die im Unternehmen bereits vorhandenen Ressourcen (Know-how, Personal, Anlagen, Kapazitäten, etc.) dar. Das Externe Leistungsangebot stellt jene Ressourcen dar, welche (noch) nicht im Unternehmen vorhanden, jedoch bekannt sind.

Im Rahmen der **Projektanalyse (C)**, dem Kern des Vorgehensmodells und Fokus der vorliegenden Arbeit, erfolgt die Definition der Nachfrage (I), die Konzeptfindung (II), die Ableitung des (der) Projektdesigns (III) sowie die Erstellung eines Pflichtenheftes (IV) als Basis für die folgende Angebotslegung.

Die **Definition der Nachfrage (I)** beinhaltet die in Abstimmung mit dem Auftraggeber durchgeführte Anforderungsanalyse sowie die Ableitung einer Anforderungsdokumentation in Form eines finalen Lastenheftes. Die abgestimmte Betrachtung der Anforderungen leistet einen wesentlichen Beitrag, die Effektivität („die richtigen Dinge tun“) des Produktentstehungsprozesses sicherzustellen.

⁴⁰¹ In Anlehnung an: Schneider (1992), S.51; und Handke (2005), S.40; eigene Darstellung

Auf Basis des finalen Lastenheftes, erfolgt im Rahmen der **Konzeptfindung (II)** ein Abgleich von Angebot und Nachfrage, auf Basis dessen, ein oder mehrere Konzepte erarbeitet werden.

Das **Projektdesign (III)** beinhaltet die Bewertung der erarbeiteten Lösungskonzepte sowie der kontextspezifischen Rahmenbedingungen hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Gestaltung des Produktentstehungsprozesses. In einem ersten Schritt erfolgt die Bewertung der Merkmale der(des) Lösungskonzepte(s) durch die Kerndisziplinen Design, F&E und Produktion hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf deren Aktivitäten. Die Ergebnisse dieser Bewertung sind einerseits der subjektive Neuigkeitsgrad jeder einzelnen Disziplin, sowie daraus abgeleitet der Interdependenzgrad zwischen den Disziplinen als Maßzahl für die notwendige Intensität der Abstimmung zwischen den Disziplinen im Produktentstehungsprozess. Des Weiteren erfolgt im Rahmen des Projektdesigns eine Bewertung der kontextspezifischen Rahmenbedingungen. Zum Abschluss des Projektdesigns erfolgt ein Abgleich der produktspezifischen Anforderungen an den Produktentstehungsprozess sowie der kontextspezifischen Rahmenbedingungen. Werden Differenzen festgestellt kommt es zur Ableitung eines Handlungsbedarfes, welcher im nächsten Modellschritt in das Pflichtenheft aufgenommen werden muss.

Die Ergebnisse der Konzeptfindung (II) und des Projektdesigns (III) werden im letzten Teilschritt der Projektanalyse (C) im Rahmen der **Erstellung des Pflichtenhefts zur Angebotslegung (IV)** zusammengefasst. Durch die frühzeitige Ableitung der kontextspezifischen Gestaltung des Produktentstehungsprozesses können die Pflichten des Auftraggebers zur Ermöglichung einer effizienten Durchführung des Projektes in das Pflichtenheft mit aufgenommen werden.

Erfolgt die Annahme eines Angebotes durch den Auftraggeber, kommt es zur operativen **Projektabschluss (D)** auf Basis der Ergebnisse des Projektdesigns (III).

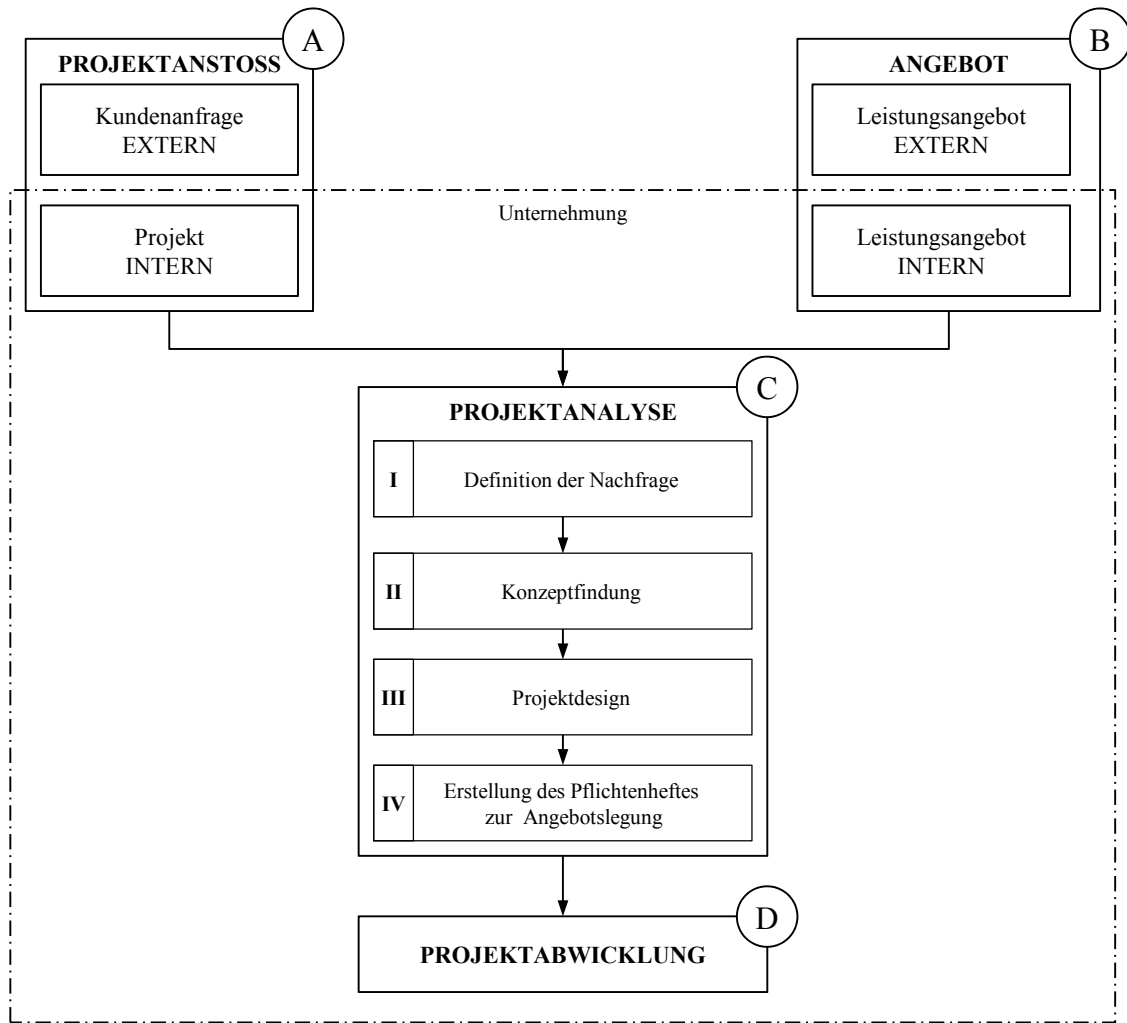


Abbildung 57: Grundstruktur des Vorgehensmodells zur kontextspezifischen Gestaltung des Produktentstehungsprozesses von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen⁴⁰²

Der Aufbau der Grundstruktur orientiert sich einerseits an VDI 2014⁴⁰³ (vgl. dazu Abbildung 18) sowie an EVERSHEIM/BOCHTLER/LAUFENBERG⁴⁰⁴.

7.3 Projektanstoß

Ein Produktentstehungsprozess wird immer von einer Bedarfssituation ausgelöst. Der Bedarf kann unternehmensextern oder unternehmensintern bestehen.⁴⁰⁵

⁴⁰² Eigene Darstellung

⁴⁰³ Vgl. Verein Deutscher Ingenieure e.V. (1993), S.6

⁴⁰⁴ Vgl. Eversheim/Bochtler/Laufenberg (1995), S.22

⁴⁰⁵ Vgl. Jackstien/Vajna (2014), S.72

Allgemeine Auslöser für einen Produktentstehungsprozess als Teil eines Produktlebenszyklus sind beispielsweise:⁴⁰⁶

- Änderungen im Produktumfeld (z.B. Gesetzesänderungen)
- „[...] Unzufriedenheit mit existierenden Produkten [...]“ und dem daraus resultierenden Wunsch nach „[...] Verbesserung beziehungsweise Weiterentwicklung [...]“ der Produkte
- „[der] menschliche [...] Drang nach neuen Produkten“

Beispielsweise werden Automobilhersteller infolge immer strengerer umweltrelevanter Gesetze gezwungen, verbrauchsärmere Fahrzeuge zu entwickeln. Die Reduktion der Fahrzeugmasse kann hier einen wesentlichen Beitrag dazu leisten. Die Gesetzesänderungen lösen dadurch den Bedarf an Leichtbaulösungen, beispielsweise durch den Einsatz von FVK, aus. Ein Leichtbau triggernder Wunsch nach Verbesserung kann die Steigerung der Quer- und Längsdynamik von Fahrzeugen durch eine Massenreduktion darstellen. Der Drang nach neuen Produkten kann, erst durch Leichtbau induzierte, neue Produkte hervorbringen und dadurch die Umsetzung von Leichtbaulösungen unter dem Einsatz von FVK forcieren.

7.3.1 Kundenanfrage Extern

Im Falle eines Kundenbedarfes erfolgt der Projektanstoß meist durch die Anfrage des Kunden mit der Übermittlung der Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt. Anforderungen gliedern sich, wie in Abbildung 58 dargestellt, allgemein in technisch wirtschaftliche und organisatorische Anforderungen.

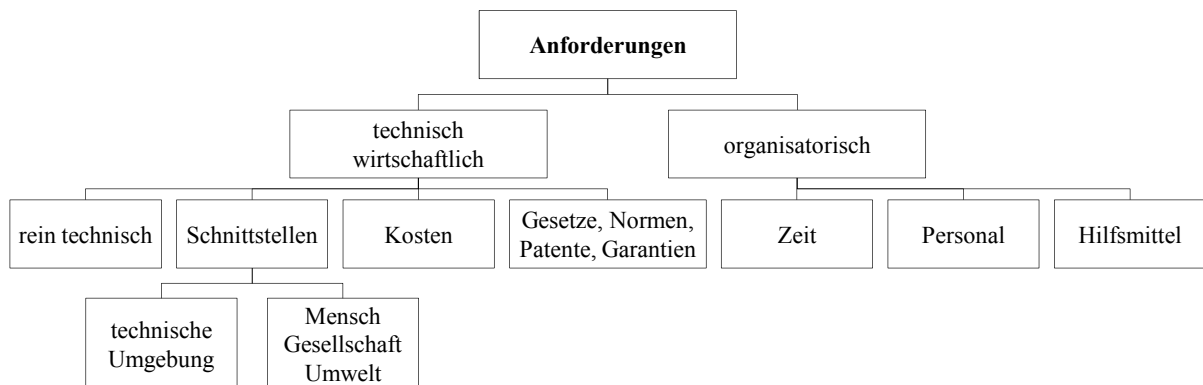


Abbildung 58: Anforderungsarten⁴⁰⁷

Anforderungen des Kunden werden in der Regel in einem Lastenheft beschrieben. Nach DIN 69901-5 dokumentiert ein Lastenheft die „vom Auftraggeber festgelegte Gesamtheit der Forderungen an die Lieferungen und Leistungen eines Auftragnehmers innerhalb eines (Projekt-)Auftrags“.⁴⁰⁸

⁴⁰⁶ Vgl. Jackstien/Vajna (2014), S.72; Jackstien/Vajna (2014), S.72

⁴⁰⁷ Vgl. Ehrlenspiel et al. (2014), S.59; eigene Darstellung

⁴⁰⁸ Deutsches Institut für Normung e.V. (2009), S.9

7.3.2 Projekt Intern

Die Motivation von Zulieferern in der FVK-Industrie, Produkte ohne spezifischen Kundenauftrag, und ohne die Absicht selbst als Verkäufer an Endkunden herangehen zu wollen zu entwickeln, steht meist im Zusammenhang mit einer strategischen Produktentwicklung (siehe dazu die Ausführungen in Abschnitt 2.3.3). Die Strategische Produktentwicklung verfolgt das Ziel der Entwicklung von Produkten basierend auf einer strategischen Produktplanung⁴⁰⁹. Durch eine strategische Produktentwicklung kann die Machbarkeit und Leistungsfähigkeit neuer Lösungskonzepte/Produkte demonstriert und dadurch Interesse bei möglichen Kunden geweckt werden.

7.4 Angebot

Das Angebot umfasst die bekannten Realisierungsmöglichkeiten zur Befriedigung der durch die Nachfrage ausgelösten Kundenbedürfnisse. Die Realisierungsmöglichkeiten setzen sich primär aus verschiedenen Ausprägungen von Produktmerkmalen sowie den Ausprägungen der zur Herstellung nötigen Verfahren und Anlagen zusammen⁴¹⁰.

Die wesentlichen Produktmerkmale von FVK-Bauteilen sind die Faser-Materialien, die Matrix-Materialien, die Insert-Materialien sowie die geometrische Gestaltung der Bauteile. Die Produktionsmerkmale gliedern sich in Produktions-Verfahren (Technologien) sowie die Produktionsanlagen (siehe dazu Abbildung 59). Diese Produkt- und Produktionsmerkmale müssen aufgrund ihrer Interdependenzen stets gesamthaft betrachtet und in einem integrierten Gesamtkonzept kombiniert werden.

Das Leistungsangebot, in Form von Merkmalsausprägungen, kann bereits im Unternehmen intern verfügbar sein, oder extern bezogen werden.

⁴⁰⁹ Vgl. Gausemeier et al. (2000), S.18

⁴¹⁰ Vgl. Eversheim/Bochtler/Laufenberg (1995), S.23

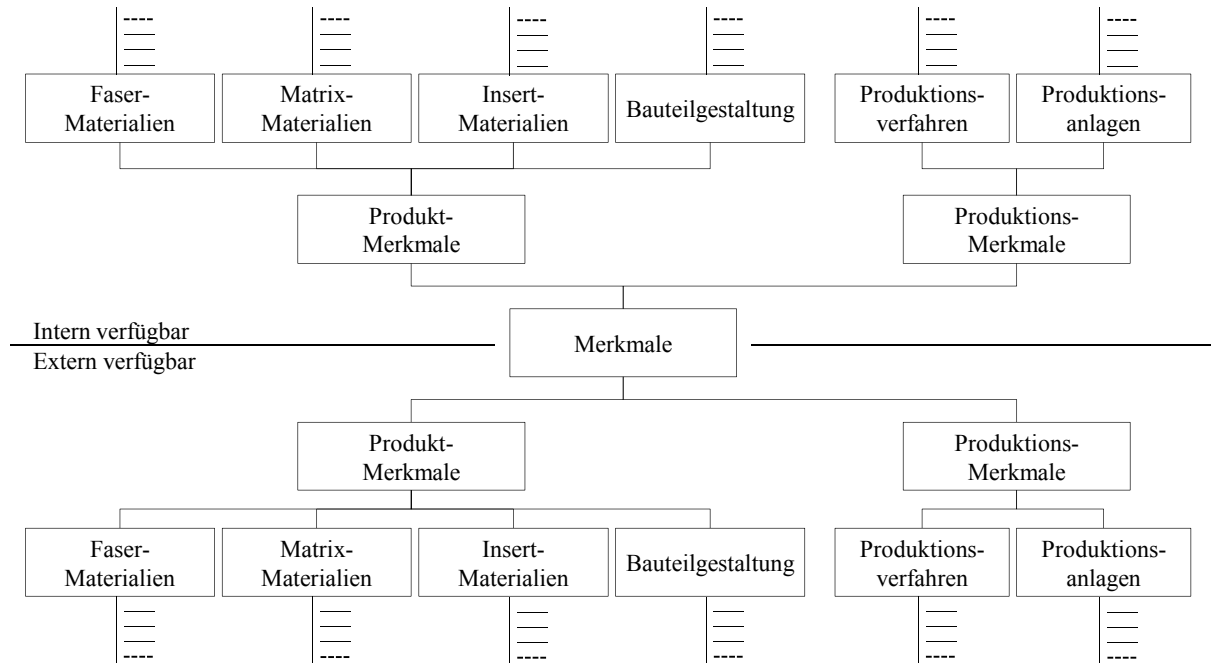


Abbildung 59: Merkmale von FVK-Bauteilen⁴¹¹

7.4.1 Leistungsangebot Intern

Das intern verfügbare Leistungsangebot zeichnet sich dadurch aus, dass es im Unternehmen bereits bekannt ist und angewendet wird bzw. zur Anwendung kommen kann. Dabei handelt es sich im Optimal-Fall um sogenannte Kernkompetenzen. Nach WILDEMANN sind Kernkompetenzen „[...] herausragende

- technologische,
- organisatorische und
- methodische

Fähigkeiten, die

- vom Kunden wahrgenommen und honoriert werden sowie
- vom Mitbewerber nicht oder nur mit erheblichen zeitlichen und kostenmäßigen Aufwendungen imitiert werden können.“⁴¹²

Das interne Leistungsangebot umfasst also neben den oben beschriebenen primären Merkmalen des Produktes bzw. der Produktion spezifische organisatorische und methodische Fähigkeiten zur Umsetzung dieser primären Merkmale in ein Produkt. Diese organisatorischen und methodischen Fähigkeiten stellen wesentliche Alleinstellungsmerkmale im Vergleich zur Konkurrenz dar⁴¹³.

⁴¹¹ Eigene Darstellung

⁴¹² Wildemann (2013), S.63

⁴¹³ Vgl. Gausemeier et al. (2000), S.4

7.4.2 Leistungsangebot Extern

Das extern verfügbare Leistungsangebot ist der Unternehmung bekannt, wird jedoch noch nicht zur Realisierung von FVK-Bauteilen eingesetzt und ist daher nicht direkt verfügbar.

Bauteile aus Faserverbundkunststoffen, insbesondere High Performance Composites können den High-Tech Produkten zugeordnet werden. Die Herausforderungen in der Entwicklung von High-Tech Produkten sind die Notwendigkeit einer parallelen Technologieentwicklung, eines schnellen Transfers von neuen Technologien in die Serienproduktion, eine von Zeitdruck geprägte Produktentwicklung sowie die Gewährleistung einer flexiblen Massenproduktion⁴¹⁴.

Um den genannten Herausforderungen gerecht werden zu können muss das externe Leistungsangebot im Sinne einer Technologiefrüherkennung als Teil eines Technologiemanagements identifiziert, bewertet und bei positiver Bewertung für die Anwendung im Unternehmen (und somit für einen möglichen Übergang vom externen zum internen Leistungsangebot) auf- und vorbereitet werden⁴¹⁵. Die Bewertung beinhaltet nach ZWECK „die Analyse und Abschätzung potentieller Anwendungsfelder und deren zeitliche Realisierungsperspektiven“, „die Analyse des für diese Anwendungsoptionen notwendigen Aufwands“ sowie „die Analyse der Auswirkung auf andere Technologien und Entwicklungslinien“⁴¹⁶.

7.5 Projektanalyse

Die Projektanalyse setzt sich aus den Teilschritten der Definition der Nachfrage, der Konzeptfindung, des Projektdesigns sowie der abschließenden Erstellung des Pflichtenheftes zur Angebotserstellung zusammen.

7.5.1 Definition der Nachfrage

Die Nachfrage wird durch die Anforderungen an das Produkt definiert. Im Rahmen von Modellschritt I liegt der Fokus auf den technisch-wirtschaftlichen Anforderungen. Die organisatorischen Anforderungen werden zu einem späteren Zeitpunkt im Modellschritt III berücksichtigt.

Kunden sind zu Beginn einer Produktentwicklung oft nicht in der Lage Anforderungen an das Produkt präzise zu beschreiben und mitzuteilen. Der Kunde kann einerseits den Anwendungsbereich des Produktes noch nicht klar definieren, oder aber auch die gegebenen Möglichkeiten nicht ausreichend einschätzen. Insbesondere im Business-to-Business Bereich besteht die Notwendigkeit der gemeinsamen Erarbeitung der Anforderungen an das Produkt

⁴¹⁴ Vgl. Wördenweber/Wickord (2008), S.162

⁴¹⁵ Vgl. Zweck (2005), S.174

⁴¹⁶ Zweck (2005), S.177

durch Kunde und Lieferant auf Basis einer kooperativ durchgeführten Analyse des Anwendungsfeldes und den sich dadurch gegebenen Rahmenbedingungen.⁴¹⁷

Die Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt werden in Form eines Lastenheftes dokumentiert. Eine gemeinsame Erarbeitung des Lastenheftes leistet hier insbesondere im Fall einer geringen Erfahrung eines Kunden im Umgang mit FVK einen wesentlichen Beitrag zur Effektivität im gesamten Produktentstehungsprozess.

Die Entwicklung von Lastenheften kann vom Auftraggeber auch direkt an den Auftragnehmer ausgelagert werden. Verfügen Systemhersteller als Kunden von Zulieferern von FVK-Bauteilen nicht über das nötige Know-How, kann durch diese intensivste Integration des Zulieferers in die Erstellung des Lastenheftes eine höhere Qualität des Lastenheftes erreicht werden⁴¹⁸.

Bezugnehmend auf die Strategien des Komplexitätsmanagements, kommt im Rahmen dieses Modellschrittes die Komplexitätsvermeidung zu tragen. Einerseits kann durch die genaue und abgestimmte Kenntniss der Anforderungen an das Produkt die Produktkomplexität, und andererseits eine mögliche, daraus resultierende, Prozesskomplexität im Laufe des Produktentstehungsprozesses vermieden werden. Eine erhöhte Komplexität des PEP kann beispielsweise durch späte Änderungen von Anforderungen, welche im Vorfeld im Rahmen einer Anforderungsanalyse bereits festgestellt werden hätten können, oder durch erst im Laufe des PEP erkannte und ergänzte Anforderungen verursacht werden.

Ausgangsbasis für die Anforderungsanalyse, als erstem Teilschritt des Modellschritt I, ist das vom Kunden, im Rahmen einer Anfrage übermittelte, Lastenheft (im Folgenden als „Initiales Lastenheft“ bezeichnet) oder der Auftrag vom Kunden zur Erstellung eines Lastenheftes an den Zulieferer.

Die Qualität dieses Lastenheftes wird in der Regel maßgeblich von der Erfahrung des Kunden im Umgang mit FVK abhängen. Es sollte daher insbesondere unerfahrenen Kunden, bzw. Neukunden eine FVK-spezifische Grundstruktur des Lastenheftes vom Zulieferer im Vorfeld der Anforderungsanalyse zur Verfügung gestellt werden.

Anforderungsanalyse

Es ist zielführend, bereits die Analyse der Produkthanforderungen und die Produktdefinition unternehmensintern disziplinübergreifend durchzuführen, um die Produkthanforderungen und ihre wechselseitigen Wirkungen auf produktspezifische Prozesse feststellen zu können⁴¹⁹. Die im initialen Lastenheft beschriebenen Anforderungen müssen von den Kerndisziplinen Design, F&E und Produktion gemeinsam mit dem Kunden hinterfragt und diskutiert werden. Der Ursprung von Anforderungen an ein zu entwickelndes FVK-Bauteil liegt häufig in Annahmen hinsichtlich seines Einsatzgebietes. Diese Annahmen müssen einer kritischen Überprüfung unterzogen werden.

⁴¹⁷ Vgl. Schäppi (2005), S.15

⁴¹⁸ Vgl. Hab et al. (2003), S.41

⁴¹⁹ Vgl. Schäppi (2005), S.15

Die Grundsätze des Leichtbaus, als eine hauptsächliche Motivation für den Einsatz von FVK, müssen bereits in dieser Phase des Produktentstehungsprozesses Berücksichtigung finden. Der Bedingungsleichtbau bildet hierbei die Basis für die weiteren Betrachtungen. Die Beachtung des Bedingungsleichtbaus trägt dazu bei, nicht schon zu Beginn eines Leichtbauprojektes, auf Grund fehlerhafter Annahmen beispielsweise der Einsatzbedingungen eines FVK-Bauteils, Leichtbaupotential ungenützt zu lassen.

Die frühzeitige interne und externe Abstimmung von Auftraggeber und Auftragnehmer im Rahmen der Anforderungsanalyse bietet mehrfache Vorteile:⁴²⁰

- Frühzeitige, abgestimmte Festlegung von Anforderungen im Sinne des Front-Loading
- Verhinderung von unnötigem Änderungsaufwand im weiteren Verlauf des Produktentstehungsprozesses
- Gesteigerte interne und externe (beim Kunden) Akzeptanz der getroffenen Festlegungen
- Gewährleistung eines kongruenten Zielverständnisses von Auftraggeber und Auftragnehmer

Anforderungsdokumentation – Lastenhefterstellung

Ein gemeinsames Zielverständnis ist, durch die Vermeidung von Missverständnissen und Spekulationen im Laufe des Produktentstehungsprozesses, ein wesentlicher Faktor für eine erfolgreiche Projektabwicklung⁴²¹. Zur Sicherstellung des gemeinsamen Zielverständnisses werden die Ergebnisse der Anforderungsanalyse zu einem weiterentwickelten Lastenheft zusammengefasst und dokumentiert. Dieses Lastenheft (im Folgenden als „Finales Lastenheft“ bezeichnet) bildet das Zielsystem des Produktentstehungsprozesses.

Das finale Lastenheft, sollte neben der Auflistung der Anforderungen und ihren Zielwerten des Weiteren eine Einschätzung der Bedeutung der jeweiligen Anforderung aus Kundensicht beinhalten. Die Priorisierung der gestellten Anforderungen als Ausdruck ihrer Bedeutung soll durch den Kunden erfolgen. Dazu kommt folgendes, in

Tabelle 3 dargestellte, Bewertungsschema zur Anwendung.

⁴²⁰ Vgl. Hab/Wagner (2013), S.281

⁴²¹ Vgl. Albers/Braun (2011), S.17

Tabelle 3: Bewertungsschema für die Priorisierung gestellter Anforderungen⁴²²

Priorität	Beschreibung	Punktbewertung
1	Unbedingt zu erfüllende Anforderungen "must have"	9
2	Nach Möglichkeit zu erfüllende Anforderungen "should have"	3
3	Anforderungen mit geringem Einfluss auf den Kundennutzen "nice to have"	1
4	Anforderungen mit keinem direkten Einfluss auf den Kundennutzen	0

Das beschriebene Vorgehen entspricht weitgehend dem Vorgehen des House of Quality im Rahmen des Quality Function Deployment zur Beantwortung des „Was“ in Form von Anforderungen mit der nachfolgenden Bewertung der Bedeutung der einzelnen Anforderungen für den Kunden.⁴²³

Abbildung 60 zeigt zusammenfassend das Vorgehen von Modellschritt I. Das vom Kunden bereitgestellte Initiale Lastenheft wird gemeinsam von Kunde und Lieferant zum finalen Lastenheft entwickelt. Die im finalen Lastenheft definierten Anforderungen werden vom Kunden priorisiert.

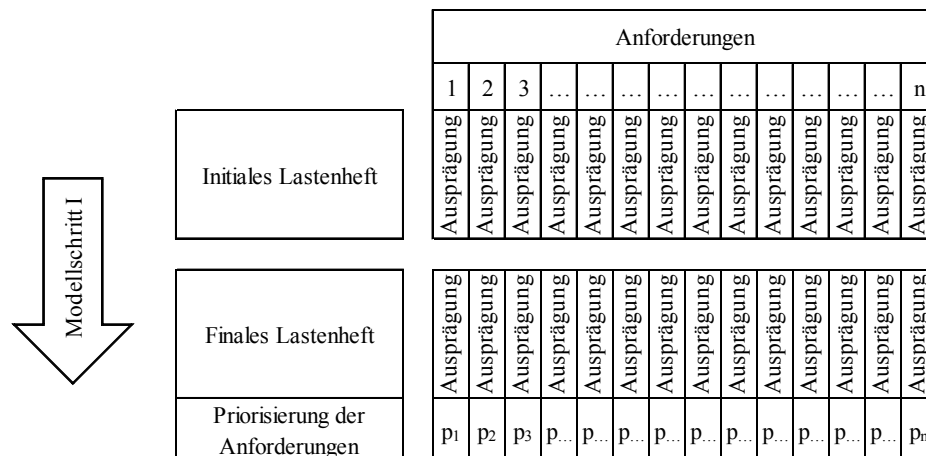


Abbildung 60: Modellschritt I⁴²⁴

7.5.2 Konzeptfindung

Die Konzeptfindung (Abbildung 61) erfolgt in Form einer transdisziplinären Kooperation der Kern-Disziplinen Design, F&E und Produktion auf Basis des entwickelten finalen

⁴²² Vgl. Fähnrich/Meiren (2005), S.688, eigene Darstellung

⁴²³ Vgl. Eversheim/Bochtler/Laufenberg (1995), S.64ff.

⁴²⁴ Eigene Darstellung

Lastenheftes (Zielsystem) im Sinne einer technischen Machbarkeitsanalyse. Die intensive Abstimmung der Kern-Disziplinen zu diesem sehr frühen Zeitpunkt ist notwendig, um den Interdependenzen zwischen Bauteil- Material- und Produktionsmittelgestaltung gerecht zu werden. Die Kerndisziplinen werden bei Bedarf von Support-Disziplinen (Projektmanagement, Qualitätssicherung, Einkauf, etc.) unterstützt.

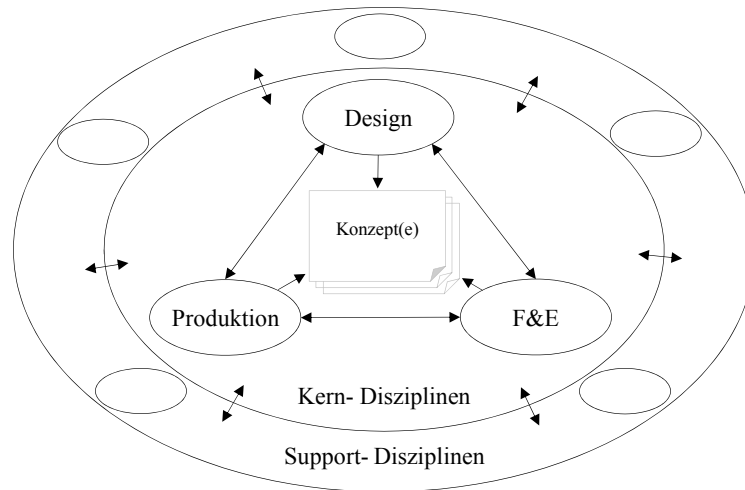


Abbildung 61: Transdisziplinäre Konzeptfindung der Kerndisziplinen⁴²⁵

Ein entwickeltes Konzept ist durch die Wahl der Merkmale definiert. Die wesentlichen Merkmale zur Charakterisierung eines FVK-Bauteils sind:

- Faser-Material(ien)
- Matrix-Material(ien)
- Insertmaterial(ien)
- Produktionsverfahren
- Produktionsanlage(n)
- Bauteilgestaltung

Abgleich von Anforderungen und Merkmalen

In einem ersten Schritt erfolgt eine allgemeine Bewertung der Abhängigkeiten geforderter Anforderungen von den Produkt- und Produktionsmerkmalen durch die Kerndisziplinen. Dabei soll folgende Frage beantwortet werden:

„Welche Merkmale haben Einfluss auf die Erfüllung welcher Anforderungen?“

Zur Handhabung der Bewertung wird eine Domain Mapping Matrix (DMM) eingeführt. Diese wird im Folgenden als DMM_{M-A} bezeichnet. Die DMM_{M-A} stellt die Zusammenhänge von Merkmalen und Anforderungen dar - der Index steht für Merkmale (M) und Anforderungen (A).

⁴²⁵ In Anlehnung an: Friedrich/Krishnamoorthy (2013), S.3; Wilkins/Karbhari (1991), S.262; Anpassungen auf Basis der Erkenntnisse des Praxiseinblicks

Die Bewertung erfolgt über eine binäre Skala. Der Eintrag „1“ kennzeichnet den Einfluss eines Merkmals auf die Erfüllung einer Anforderung. Der Eintrag „0“ besagt, dass keine Beeinflussung eines Merkmals auf die Erfüllung einer bestimmten Anforderung gegeben ist. Abbildung 62 zeigt eine beispielhafte Bewertung. „Anforderung 1“ ist im illustrierten Beispiel von den Faser-, Matrix- und Insert-Materialien abhängig und vom Produktionsverfahren, der Produktionsanlage sowie der Bauteilgestaltung unabhängig.

Nach erfolgter Bewertung wird aus der DMM_{M-A} in einem nächsten Schritt eine Design Struktur Matrix (DSM) – im Folgenden als DSM_M bezeichnet – abgeleitet.

Die DSM_M bildet den Zusammenhang der Merkmale zueinander ab. Die DSM_M stellt zwei unterschiedliche Informationen bereit. Die Diagonalwerte der Matrix entsprechen der Summe der Anforderungen welche vom jeweiligen Merkmal beeinflusst werden. Die Anwendung der Farbskala für die Diagonalwerte von grün (Wert „0“) bis rot (auftretender Maximalwert) bietet Hilfestellung zur Identifizierung der relevantesten und einflussreichsten Merkmale. Die Werte der unteren Dreiecks-Matrix geben Auskunft darüber, wie viele Anforderungen von bestimmten Merkmalspaaren gemeinsam beeinflusst sind. Die DSM_M ist eine symmetrische Matrix. Die Werte oberhalb der Diagonale bieten daher keine zusätzliche Aussage und sind in Abbildung 62 geschwärzt dargestellt. Die in Abbildung 62 dargestellte DSM_M sagt aus, dass die Merkmale Matrix-Material, Insert-Material und Produktionsverfahren in Summe die meisten Anforderungen beeinflussen. Die Berechnung der DSM_M erfolgt mit folgender Formel:

Formel 2: DSM_M ⁴²⁶

$$DSM_M = DMM_{M-A} \times DMM_{M-A}^T$$

Nicht alle Anforderungen sind jedoch für den Kunden von gleicher Bedeutung. Die Priorisierung der Anforderungen wurde vom Kunden bereits in Modellschritt I durchgeführt. Bezieht man die Priorisierung der Anforderungen in die Betrachtungen mit ein, so können unter Umständen Verschiebungen der Einflussgewichte einzelner Merkmale auf die Befriedigung der Kundenbedürfnisse festgestellt werden. Die Prioritätsbewertungen können in Form einer Diagonalmatrix – im Folgenden als D_{Prio} bezeichnet – modelliert werden⁴²⁷.

Formel 3: D_{Prio}

$$D_{Prio} = \text{diag}(p_1, p_2, \dots, p_n) = \begin{bmatrix} p_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & p_n \end{bmatrix}$$

⁴²⁶ Vgl. Lindemann/Maurer/Braun (2009), S.199

⁴²⁷ Vgl. Biedermann/Maurer/Lindemann (2007), S.288

Die nach den Prioritäten gewichtete $DMM_{M-A/Prio}$ wird wie folgt berechnet:

Formel 4: $DMM_{M-A/Prio}$

$$DMM_{M-A/Prio} = DMM_{M-A} \times D_{Prio}$$

Die Ableitung der $DSM_{M/Prio}$ erfolgt mit folgender Formel:

Formel 5: $DSM_{M/Prio}$ ⁴²⁸

$$DSM_{M/Prio} = DMM_{M-A/Prio} \times DMM_{M-A/Prio}^T$$

Die DSM_M repräsentiert eine allgemeine, projektunabhängige Darstellung der Einflüsse der Merkmale auf die Erfüllung der Anforderungen. Die $DSM_{M/Prio}$ stellt diese Einflüsse in den projektspezifischen Kontext. Bei Betrachtung des in Abbildung 62 dargestellten Beispiels, kann festgestellt werden, dass sich durch die Integration der Priorisierung in die Betrachtungen die relative Bedeutung der einzelnen Merkmale verschiebt. Das Merkmal „Insertmaterial“ hat zwar nach wie vor die höchste Bedeutung, die vor der Priorisierung gleich relevanten Merkmale „Matrix-Material“ und „Produktionsverfahren“ verlieren jedoch relativ zum Merkmal „Insertmaterial“ an Bedeutung zur Erfüllung der gestellten Anforderungen.

⁴²⁸ Vgl. Lindemann/Maurer/Braun (2009), S.199

7 Vorgehensmodell zur kontextspezifischen Gestaltung des Produktentstehungsprozesses von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen

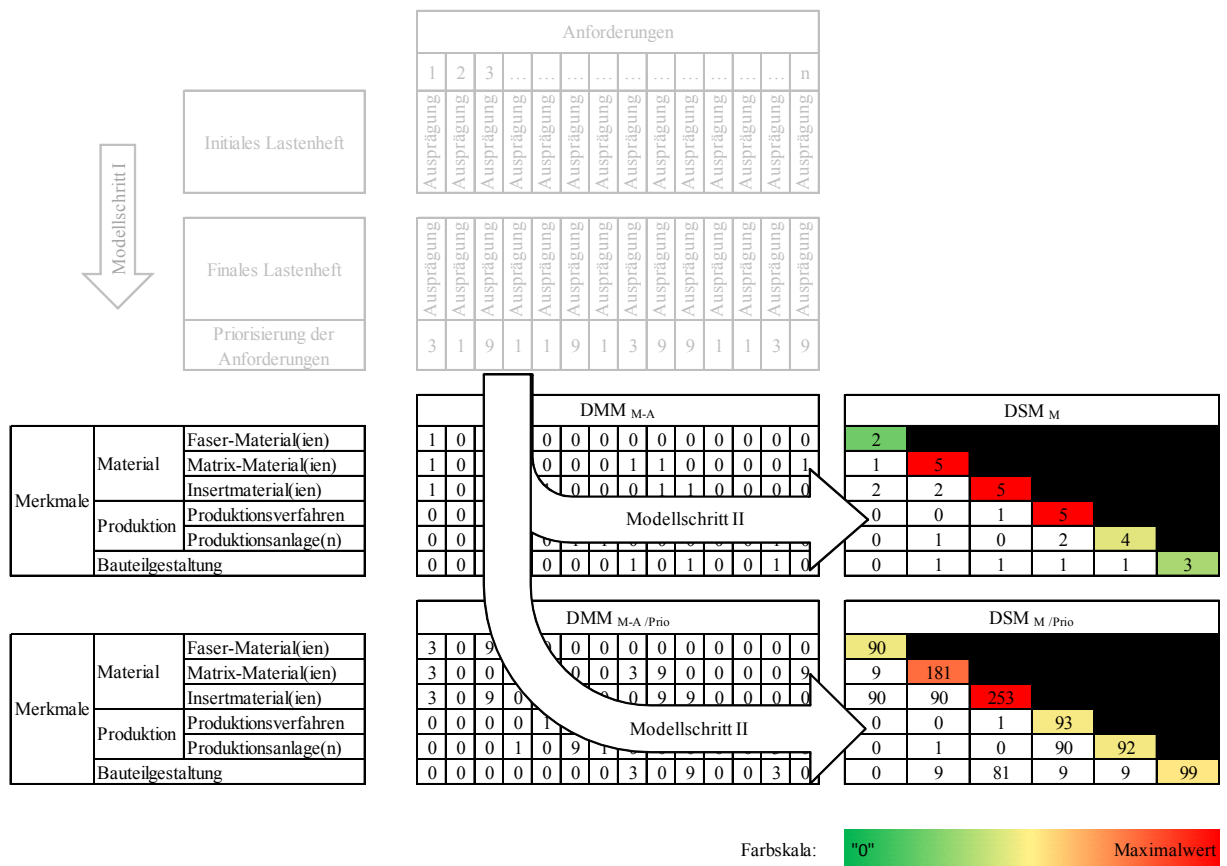


Abbildung 62: Modellschritt II ⁴²⁹

Die $DSM_{M/Prio}$ bietet eine Orientierungshilfe welche Merkmale besondere Bedeutung für die Befriedigung der Kundenbedürfnisse besitzen. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse kann die eigentliche Konzeptfindung beginnen und die Schwerpunkte auf die zur Kundenbefriedigung besonders wesentlichen Merkmale gelegt werden.

Im Rahmen der Konzeptfindung sind die Grundsätze der Leichtbaustrategien und Leichtbauweisen im Sinne der Komplexitätsbeherrschung anzuwenden. Die Anwendung des Bedingungsleichtbaus erfolgt bereits in Modellschritt I im Sinne der Komplexitätsvermeidung. Aufbauend auf diesen Ergebnissen kommen in diesem Modellschritt die Leichtbaustrategien des Konzept-, Stoff-, Form- und Fertigungsleichtbaus im Sinne der Komplexitätsbeherrschung zur Anwendung.

Ergebnis der Konzeptfindung sind ein oder mehrere Konzepte. Jedes der entwickelten Konzepte ist durch eine spezifische Kombination von Merkmalsausprägungen definiert ⁴³⁰. Im Fall von FVK-Bauteilen sind dies, wie in Tabelle 4 zusammengefasst, primär Ausprägungen der eingesetzten Materialien, der Produktion sowie der Bauteilgestaltung.

⁴²⁹ Eigene Darstellung

⁴³⁰ Vgl. Vajna/Jackstien/Gatzky (2014), S.95

Tabelle 4: Merkmalsausprägungen von Konzepten für FVK-Bauteile⁴³¹

		Konzept 1	Konzept 2	...	Konzept n
Merkmale	Material	Faser-Material(ien)	...	...	...
		Matrix-Material(ien)	...	...	...
		Insertmaterial(ien)	...	...	...
	Produktion	Produktionsverfahren	...	...	...
		Produktionsanlage(n)	...	...	...
	Bauteilgestaltung	...	...	...	...

Können im Rahmen der Konzeptfindung realisierbare, oder als realisierbar einschätzbare, Merkmalskombinationen gefunden werden, kann zu Modellschritt III, dem Projektdesign übergegangen werden.

7.5.3 Projektdesign

*„Es stehen immer geringere Budgets für die Erzielung hochwertiger Fahrzeuge bei einer verkürzten „Time-to-Market“ zur Verfügung“.*⁴³²

Dieses Eingangszitat spiegelt den zunehmenden Druck zur Steigerung von Effektivität und Effizienz am Beispiel der Fahrzeugindustrie wider. Diese Steigerungen wurden in der Vergangenheit vorwiegend in der Produktion realisiert. In Folge des zunehmenden Drucks müssen die Bestrebungen vermehrt auf den Produktentstehungsprozess ausgeweitet werden um hochwertigste Produkte, zu geringsten Kosten und der Einhaltung einer möglichst kurzen Time-to-Market bereitstellen zu können.⁴³³

Zulieferer nehmen sich oftmals nicht die nötige Zeit den Start von Projekten systematisch vorzubereiten und durchzuführen. Dadurch unterbleibt die Festlegung einer Strategie und eines Projektplanes in Abstimmung mit dem Auftraggeber mit der Konsequenz von „[...] operativer Hektik und Plan- bzw. Ziellosigkeit, d[em] Gegenteil von Effektivität.“⁴³⁴

Der nachfolgend beschriebene Modellschritt des Projektdesigns unterstützt eine Ableitung der erforderlichen kontextspezifischen Projektgestaltung. Der Abgleich von Angebot und Nachfrage hinsichtlich der Wirkung auf die Organisation des PEP erfolgt vor der Lösungsauswahl (mit dem Kunden). Dies ist erforderlich, da beispielsweise bestimmte Kombinationen aus Angebot und Nachfrage eine unterschiedliche Organisation des PEP und eine unterschiedliche erforderliche Beteiligung des Kunden erfordern, welche in das Pflichtenheft als Basis der Angebotslegung mit einfließen müssen.

Im Rahmen des Projektdesign erfolgt eine Bewertung einerseits hinsichtlich des Produktkontextes (Anforderungen und die Merkmale zu deren Erfüllung) und andererseits

⁴³¹ Eigene Darstellung

⁴³² Hab/Wagner (2013), S.10

⁴³³ Vgl. Hab/Wagner (2013), S.10

⁴³⁴ Vgl. Hab/Wagner (2013), S.62; Hab/Wagner (2013), S.62

hinsichtlich der Rahmenbedingungen der Projektdurchführung.⁴³⁵ Die Rahmenbedingungen werden des Weiteren in den internen und externen Kontext gegliedert.

Bewertung der Lösungsvarianten – Produktkontext

Die entwickelten Lösungsvarianten als Ergebnis der Konzeptfindung, bedingen aufgrund des dynamischen Innovationfeldes der Branche oftmals die Umsetzung von neuen Merkmals-Ausprägungen. Diese Merkmals-Ausprägungen müssen in weiterer Folge zu neuen Kombinationen dieser neuen Merkmals-Ausprägungen entwickelt werden. Merkmals-Ausprägungen besitzen einen, für die handelnden Disziplinen, subjektiven Neuigkeitsgrad.

Die Ergebnisse der Konzeptfindung, werden in einem nächsten Schritt hinsichtlich ihres subjektiven Neuigkeitswertes für die Kerndisziplinen bewertet. Zur Handhabung dieser Bewertung wird auf eine Domain Mapping Matrix (DMM) zurückgegriffen. Die DMM_{M-D} stellt die Zusammenhänge von Merkmalen (Index M) und Disziplinen (Index D) dar.

Die Bewertung erfolgt durch die Anwendung des in Tabelle 5 beschriebenen Bewertungsschemas.

Tabelle 5: Bewertungsschema für den Neuigkeitswert der Merkmale für die Disziplinen⁴³⁶

Beschreibung	Punktbewertung
Merkmalsausprägung wurde noch nicht umgesetzt Es ist mit erhöhtem Aufwand hinsichtlich der Realisierung zu rechnen Machbarkeit kann nicht als eindeutig positiv eingeschätzt werden Sehr hoher Kommunikationsaufwand	2
Merkmalsausprägung wurde noch nicht umgesetzt Keine besonderen Hindernisse in der Umsetzung des Merkmals zu erwarten Machbarkeit als positiv einschätzbar Erhöhter Kommunikationsaufwand	1
Merkmalsausprägung (oder Ähnliche) wurde bereits realisiert Einfache Umsetzung Niedriger Kommunikationsaufwand	0

Nach erfolgter Bewertung wird aus der DMM_{M-D} in einem nächsten Schritt eine Design Struktur Matrix (DSM) – im Folgenden als DSM_D bezeichnet – abgeleitet. Die DSM_D bildet den Zusammenhang der Disziplinen zueinander ab. Die Berechnung erfolgt nach folgender Formel:

⁴³⁵ Vgl. Noack (2001), S.562ff.

⁴³⁶ Eigene Darstellung

Formel 6: DSM_D ⁴³⁷

$$DSM_D = DMM_{M-D}^T \times DMM_{M-D}$$

Die abgeleitete DSM_D stellt zwei unterschiedliche Informationen bereit. Die Diagonalwerte der Matrix entsprechen dem subjektiven Neuigkeitswert jeder Disziplin. Die Werte der unteren Dreiecksmatrix geben Auskunft über den gemeinsamen subjektiven Neuigkeitswert für bestimmte Disziplinen-Paarungen.

Der Neuigkeitsgrad berechnet sich aus dem Verhältnis des Neuigkeitswertes für eine Disziplin zum maximal möglichen Neuigkeitswert. Werden alle Merkmale von allen Disziplinen mit höchstem Neuigkeitswert „2“ bewertet, so ergibt sich, für das in Abbildung 63 dargestellte Beispiel ein maximal möglicher Neuigkeitswert von 24. Die Realisierung und Umsetzung von Merkmalsausprägungen mit hohem subjektivem Neuigkeitswert bedingen erhöhten Aufwand in der Umsetzung, d.h. ein hoher Neuigkeitsgrad lässt auf erhöhten Aufwand schließen. Auf den Zusatz „subjektiv“ wird im weiteren Verlauf der Arbeit verzichtet. Der Neuigkeitsgrad (NG) kann wie folgt berechnet werden:

Formel 7: Neuigkeitsgrad

$$\text{Neuigkeitsgrad} = \frac{\text{Neuigkeitswert}}{\text{max. mögl. Neuigkeitswert}} = \frac{n_{NW}}{n_{NW,max}}$$

Das in Abbildung 63 illustrierte Beispiel zeigt einen hohen Neuigkeitsgrad der Disziplinen Design und F&E. Der Neuigkeitsgrad der umzusetzenden Merkmalsausprägungen für die Produktion ist wesentlich geringer.

Der Neuigkeitsgrad gibt Aufschluss darüber, inwieweit ein Mehraufwand in der Umsetzung neuer Merkmalsausprägungen für jede einzelne Disziplin zu erwarten ist. Die Umsetzung dieser neuen Merkmalsausprägungen kann im Falle des Einsatzes von FVK in der Regel nicht ohne Abstimmung mit den anderen Kerndisziplinen erfolgen.

Zur Bewertung dieser Abhängigkeiten wird der Interdependenzgrad (IG) herangezogen. Der Interdependenzgrad gibt Aufschluss darüber, wie unabhängig eine Disziplin in der Realisierung neuer Merkmalsausprägungen agieren kann⁴³⁸. Je niedriger der IG, umso geringer ist die Abhängigkeit einer Disziplin von den anderen Disziplinen. Der IG ist somit ein Maß, für den Abstimmungsbedarf zwischen den Disziplinen. Der Interdependenzgrad wird wie folgt berechnet:

⁴³⁷ Vgl. Lindemann/Maurer/Braun (2009), S.199

⁴³⁸ Vgl. Egelhoff (1991), S.352f.

Formel 8: Interdependenzgrad ⁴³⁹

$$Interdependenzgrad = \frac{Interdependenzwert}{max. mögl. Interdependenzwert} = \frac{n_{IW}}{n_{IW,max}}$$

Die in Abbildung 63 dargestellte Bewertung zeigt den höchsten Interdependenzgrad, und damit den höchsten Bedarf an Abstimmung zwischen den Disziplinen Design und F&E.

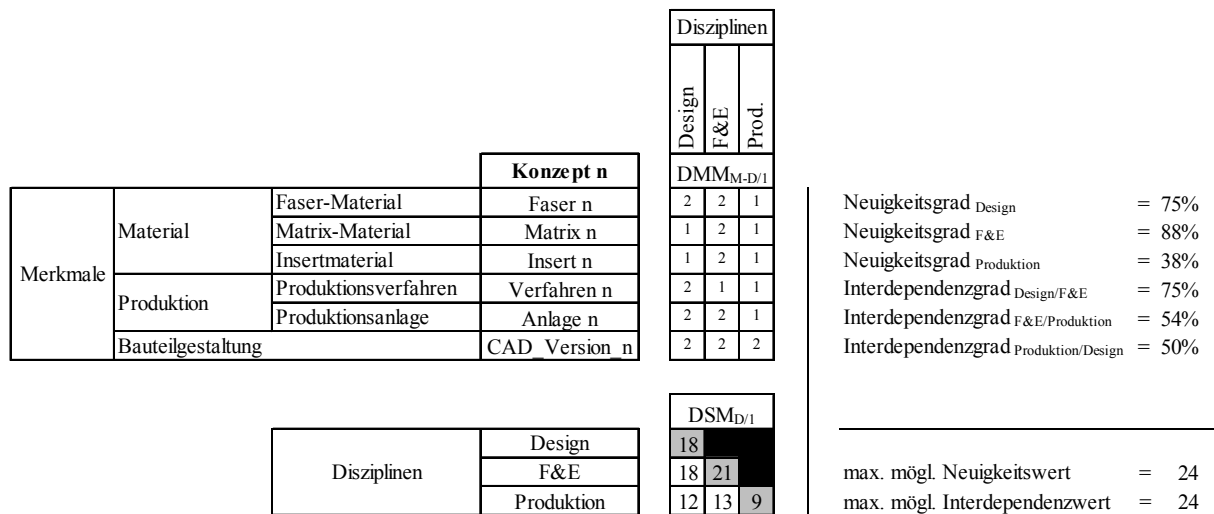


Abbildung 63: Beispielhafte Bewertung von Neuigkeitsgrad und Interdependenzgrad ⁴⁴⁰

Werden alle Merkmale von allen Disziplinen mit „2“ bewertet, so ergibt sich, für das in Abbildung 63 dargestellte Beispiel, ein maximal möglicher Interdependenzwert von 24. Dieser beschriebene, produktspezifische Kontext, stellt den oberen Extremwert für den Interdependenzgrad dar und ist ein eindeutiger Indikator für die Durchführung eines Forschungsprojektes.

Werden alle Merkmale von allen Disziplinen mit „1“ bewertet, so beschreibt dies den typischen produktspezifischen Kontext für die Durchführung eines Agilen Projektes.

Werden alle Merkmale von allen Disziplinen mit „0“ bewertet, so ergibt dies den typischen produktspezifischen Kontext für die Durchführung eines Standardprojektes.

Das in Abbildung 64 dargestellte Diagramm bietet die Möglichkeit der Bestimmung des Projekttyps in Abhängigkeit des Interdependenzgrades. Bezüglich des in Abbildung 63 illustrierten Beispiels können folgende Erkenntnisse gewonnen werden. Während der Interdependenzgrad zwischen dem Design und der F&E zur Empfehlung der Durchführung eines Forschungsprojektes führt, so kann aus den beiden anderen Interdependenzgraden keine

⁴³⁹ In Anlehnung an: Gerberich (2011), S.216

⁴⁴⁰ Eigene Darstellung

eindeutige Empfehlung gewonnen werden. Beide liegen im Grenzbereich zwischen einer agilen Projektdurchführung und einer Durchführung im Sinne eines Forschungsprojektes.

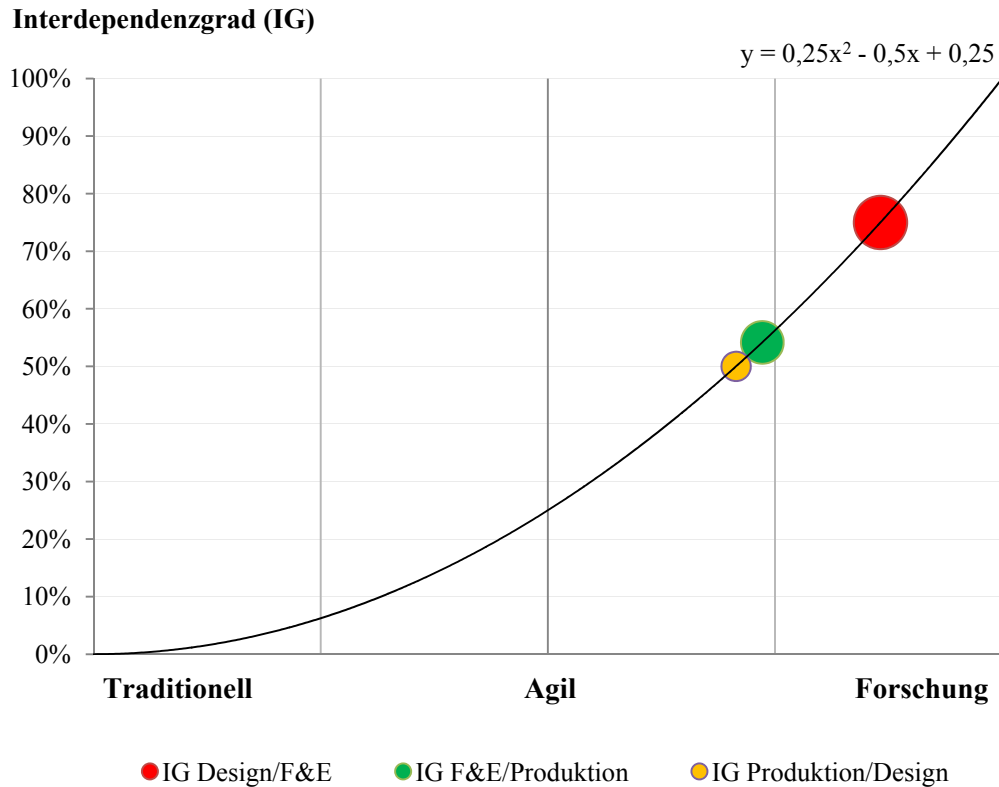


Abbildung 64: Diagramm zur Bestimmung des Projekt-Typs in Abhängigkeit des Interdependenzgrades⁴⁴¹

Die Bewertung des Neuigkeitsgrades und des Interdependenzgrades muss für jedes Lösungskonzept einzeln durchgeführt werden. Zu bevorzugen ist schlussendlich jenes Lösungskonzept, welches den geringsten subjektiven Neuigkeitsgrad und dadurch verursachten Interdependenzgrad aufweist und gleichzeitig die Kundenbedürfnisse befriedigt.

Abbildung 65 zeigt eine Illustration der Zusammenhänge von Neuigkeitsgrad und Interdependenzgrad des in Abbildung 63 gezeigten Beispiels. Die Eckpunkte des auf der Grundfläche des Diagrammes dargestellten Dreiecks, stellen die Kerndisziplinen Produktion (Index P), Design (Index D) und F&E (Index F&E) dar. Die Säulen auf den Eckpunkten repräsentieren den Neuigkeitsgrad (NG) der jeweiligen Disziplin. Die Säulen auf den Verbindungsgeraden zeigen den Interdependenzgrad (IG) zwischen den Disziplinen.

⁴⁴¹ Eigene Darstellung

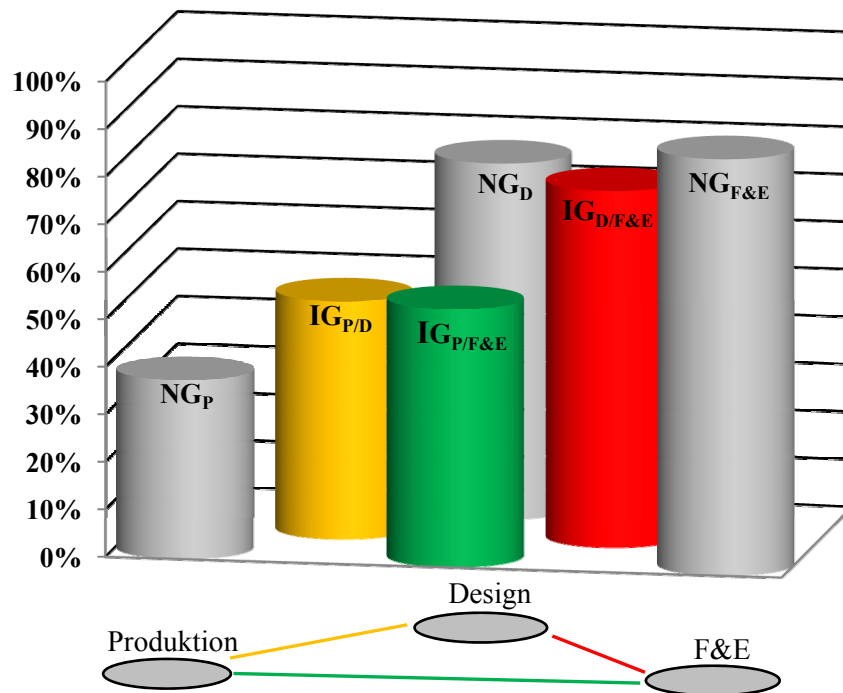


Abbildung 65: Visualisierung der Interdependenzgrade (IG) zwischen den Disziplinen sowie deren Neuigkeitsgrade (NG)⁴⁴²

Die Visualisierung in Abbildung 65 zeigt die durch die externe Komplexität (Anforderungen an das Produkt) verursachte interne Komplexität (die Auswirkungen der gewählten Merkmale auf die Kerndisziplinen). Das bewertete Lösungskonzept bedeutet insbesondere für das Design sowie die F&E einen hohen Neuigkeitsgrad, sowie einen erhöhten Abstimmungsbedarf zwischen den Disziplinen. Der Neuigkeitsgrad der Produktion ist im Verhältnis zu den anderen Disziplinen gering.

Bewertung der Projektkontextspezifischen Rahmenbedingungen

Im vorangegangenen Schritt wurde die Bewertung des für die Projektdurchführung relevanten Produktkontextes beschrieben. Im nächsten Schritt erfolgt die Bewertung der kontextspezifischen Rahmenbedingungen.

Die Durchführung eines Projektes unterliegt immer kontextspezifischen Rahmenbedingungen. Diese haben unterschiedlichen Einfluss auf die Durchführbarkeit und Sinnhaftigkeit von bestimmten Vorgehensweisen in der Projektabwicklung.

⁴⁴² Eigene Darstellung

Die Literatur beschreibt Kriterien zur Auswahl eines agilen oder traditionellen Vorgehens zur Abwicklung eines Projektes:⁴⁴³

- Externer Kontext:
 - Im Falle einer hohen **Stabilität der Anforderungen** zu Projektbeginn, kann ein Projekt traditionell durchgeführt werden. Ist jedoch mit laufenden Anpassungen und Änderungen der Anforderungen zu rechnen, ist eine agile Durchführung des Projektes von Vorteil.
 - Eine lange **Projektlaufzeit** ermöglicht eine traditionelle Projektdurchführung.
 - Je größer die **Neuartigkeit eines Produktes** ist, umso sinnvoller ist eine agile Projektdurchführung.
 - Ein großer **Projektumfang** fordert eine traditionelle Projektumsetzung.
 - Eine hohe **Sicherheitsrelevanz** des zu entwickelnden Produktes spricht für eine traditionelle Projektdurchführung.
 - Eine agile Projektabwicklung fordert eine hohe **Verfügbarkeit des Kunden**.
 - Kann davon ausgegangen werden, dass ein stabiles allgemeines **Projektumfeld** während der Projektabwicklung eine traditionelle Projektabwicklung ermöglicht.
 - Im Falle einer stark **verteilten Entwicklung** ist eine traditionelle Projektdurchführung zu bevorzugen.
 - Je höher die **Beteiligung des Kunden**, umso eher kann ein Projekt agil umgesetzt werden.
- Interner Kontext:
 - Eine agile Projektdurchführung erfordert eine höhere **technische Qualifikation der Mitarbeiter**.
 - Die **Erfahrung des Teams** hat wesentlichen Einfluss darauf, ob ein Projekt agil abgewickelt werden kann. Agile Projekte erfordern eine hohe Erfahrung der Teammitglieder.
 - Eine Agile Projektabwicklung fordert des Weiteren die Gewährleistung einer hohen **Teamkontinuität** während der Projektlaufzeit.
 - Ein agiles Projekt erfordert eine **Flexibilität der Organisation** um sich laufenden Änderungen anpassen zu können.

Der Einfluss einiger hier beschriebener Kriterien auf die Wahl des Projekt-Typs konnte auch im Rahmen des Praxiseinblicks (vgl. dazu Tabelle 2) festgestellt werden. Tabelle 6 fasst die Kriterien und deren Ausprägungen hinsichtlich der Wahl der Form der Projektdurchführung, ergänzt um Erkenntnisse des Praxiseinblicks, zusammen.

⁴⁴³ Vgl. Schienmann (2002), S.93f.; Vgl. Jorgensen/Jepsen (2002), zitiert in: Smith (2007), S.28; Vgl. Welge/Friedrich/Shair (2012), S.345

Tabelle 6: Kriterien zur Bewertung der Projektkontextspezifischen Rahmenbedingungen⁴⁴⁴

Projektkontext Rahmenbedingungen		Projekttyp		
		Standard	Agil	Forschung
extern	Stabilität der Anforderungen	hoch	niedrig	ungewiss
	Projektlaufzeit	lang	kurz	sehr lang
	Neuartigkeit des Produktes	gering	hoch	meist hoch
	Projektumfang	groß	klein	groß
	Sicherheitsrelevanz	hoch	gering	-
	Verfügbarkeit des Kunden	gering	hoch	sehr hoch
	Stabilität des Projektumfeldes	hoch	gering	sehr gering
	Verteilte Entwicklung	hoch	gering	gering
	Beteiligung des Kunden	gering	hoch	sehr hoch
intern	Technische Qualifikation der Mitarbeiter	gering	hoch	sehr hoch
	Erfahrung des Teams	gering	hoch	sehr hoch
	Teamkontinuität	gering	hoch	sehr hoch
	Flexibilität der Organisation	gering	hoch	sehr hoch

Die Bewertung des externen und internen Kontext erfolgt durch die Kerndisziplinen in Kooperation mit dem Projektmanagement. Abbildung 66 zeigt eine beispielhafte Bewertung des Kontextes hinsichtlich der externen und internen Rahmenbedingungen sowie die Gegenüberstellung mit der Bewertung der Anforderungen an die Projektgestaltung im Kontext des Produktes.

Die Produkt- Projektkontext Matrix

Abbildung 66 zeigt eine Bewertung des Produkt- sowie Projektkontextes. Die Abbildung zeigt beispielhaft das Ergebnis einer Bewertung des Produktkontextes mit der daraus abgeleiteten Anforderung der agilen Durchführung eines Projektes zwischen F&E und Produktion sowie zwischen Produktion und Design. Die Kooperation zwischen Design und F&E erfordert eine Projektdurchführung als Forschungsprojekt. Um Agile Projekte bzw. Forschungsprojekte umsetzen zu können sollten die projektkontextspezifischen Rahmenbedingungen den Anforderungen des durch den Produktkontext induzierten Projekttyps entsprechen.

⁴⁴⁴ Eigene Darstellung

7 Vorgehensmodell zur kontextspezifischen Gestaltung des Produktentstehungsprozesses von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen

Produktkontext Anforderungen an die Organisation		Projekttyp		
		Standard	Agil	Forschung
Interdependenzgrad	Design / F&E			
	F&E / Produktion			
	Produktion / Design			

Projektkontext Rahmenbedingungen		Projekttyp		
		Standard	Agil	Forschung
extern	Stabilität der Anforderungen	hoch	niedrig	ungewiss
	Projektlaufzeit	lang	kurz	sehr lang
	Neuartigkeit des Produktes	gering	hoch	meist hoch
	Projektumfang	groß	klein	groß
	Sicherheitsrelevanz	hoch	gering	-
	Verfügbarkeit des Kunden	gering	hoch	sehr hoch
	Stabilität des Projektumfeldes	hoch	gering	sehr gering
	Verteilte Entwicklung	hoch	gering	gering
	Beteiligung des Kunden	gering	hoch	sehr hoch
intern	Technische Qualifikation der Mitarbeiter	gering	hoch	sehr hoch
	Erfahrung des Teams	gering	hoch	sehr hoch
	Teamkontinuität	gering	hoch	sehr hoch
	Flexibilität der Organistaion	gering	hoch	sehr hoch

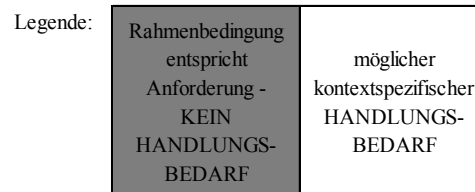
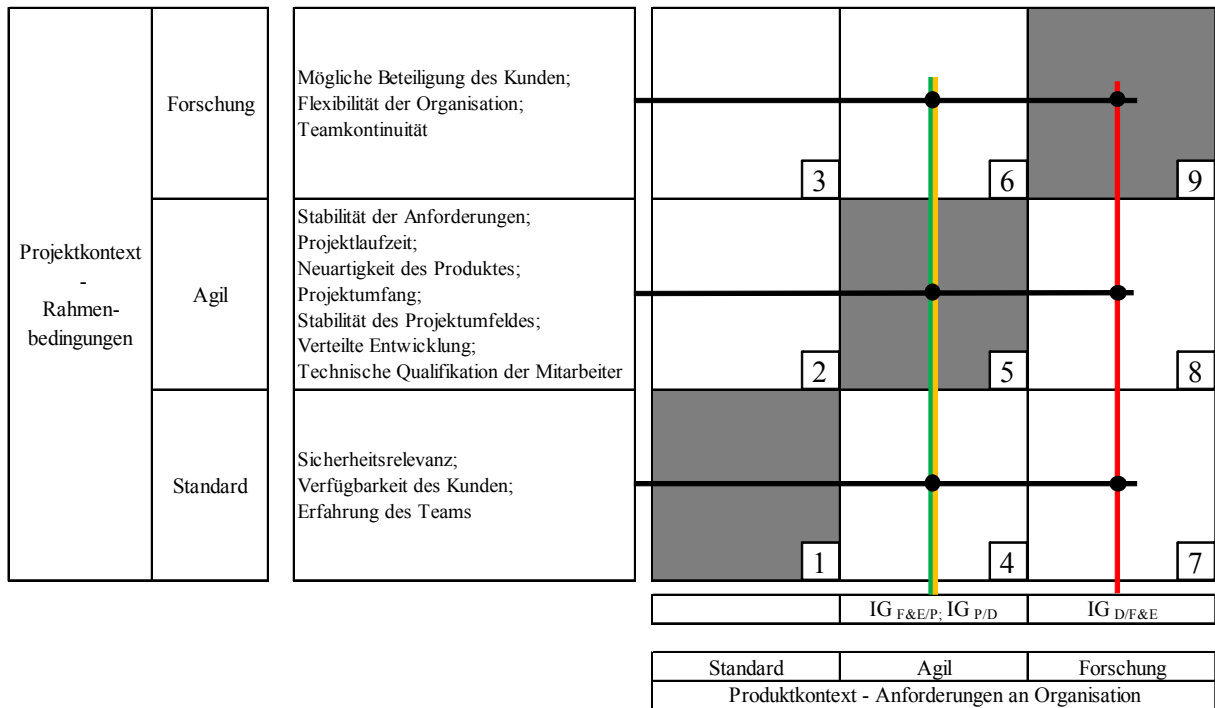
Abbildung 66: Beispiel einer Bewertung des Gesamtkontextes⁴⁴⁵

Stellt man die durch den Produktkontext gestellten Anforderungen den Projektkontextspezifischen Rahmenbedingungen gegenüber, spannt sich die Produkt-Projektkontext Matrix (PPK-Matrix) auf (siehe dazu Abbildung 67). Die Matrix bildet auf der horizontalen Achse die Anforderungen seitens des Produktes hinsichtlich Wahl des Projekttyps und auf der vertikalen Achse die projektkontextspezifischen Rahmenbedingungen zur möglichen Durchführung eines bestimmten Projekttyps ab.

Decken sich die gestellten Anforderungen mit den vorherrschenden Rahmenbedingungen ist kein Handlungsbedarf gegeben (Matrix-Felder 1, 5 und 9). Entsprechen jedoch die Rahmenbedingungen nicht den Anforderungen ist ein möglicher, kontextspezifischer Handlungsbedarf indiziert. Abbildung 67 zeigt die PPK-Matrix der in Abbildung 66 illustrierten Bewertung des Gesamtkontextes.

⁴⁴⁵ Eigene Darstellung

7 Vorgehensmodell zur kontextspezifischen Gestaltung des Produktentstehungsprozesses von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen



IG_{F&E/P}...Interdependenzgrad zwischen F&E und Produktion
 IG_{P/D}.....Interdependenzgrad zwischen Produktion und Design
 IG_{D/F&E}....Interdependenzgrad zwischen Design und F&E

Abbildung 67: Beispielhafte Bewertung mittels PPK-Matrix⁴⁴⁶

Für die Ableitung spezifischer Handlungsmöglichkeiten zur Reaktion hinsichtlich des Projektkontextes oder des Produktkontextes wurde für jeden Projektkontext eine spezifische PPK-Matrix abgeleitet. Die gesammelten spezifischen PPK-Matrizen sind der Arbeit in Anhang B angefügt.

Abbildung 68 zeigt exemplarisch die PPK-Matrix des Projektkontextes der „Stabilität der Anforderungen“ zur Ableitung eines möglichen Handlungsbedarfes. Die Stabilität der Anforderungen ist als niedrig bewertet und bedingt somit eine agile Projektdurchführung, um die auftretenden Änderungen der Anforderungen, ohne das Überspringen von interdisziplinären Hindernissen in Form von Schnittstellen, in den Produktentstehungsprozess einfließen lassen zu können. Im, in Abbildung 67 illustrierten, Beispiel entspricht die Rahmenbedingung den Anforderungen des gewählten Projekttyps (Agil) zwischen Forschung und Entwicklung sowie zwischen Produktion und Design (Matrix Feld 5). Ein möglicher

⁴⁴⁶ Eigene Darstellung

Handlungsbedarf wird jedoch für die Durchführung eines Forschungsprojektes zwischen Design und F&E indiziert (Matrix Feld 8). Im vorliegenden Kontext der „Stabilität der Anforderung“ liegt jedoch kein konkreter Handlungsbedarf vor, da im Rahmen eines Forschungsprojektes auch sehr ungewisse und unsichere Anforderungen gehandhabt werden können.

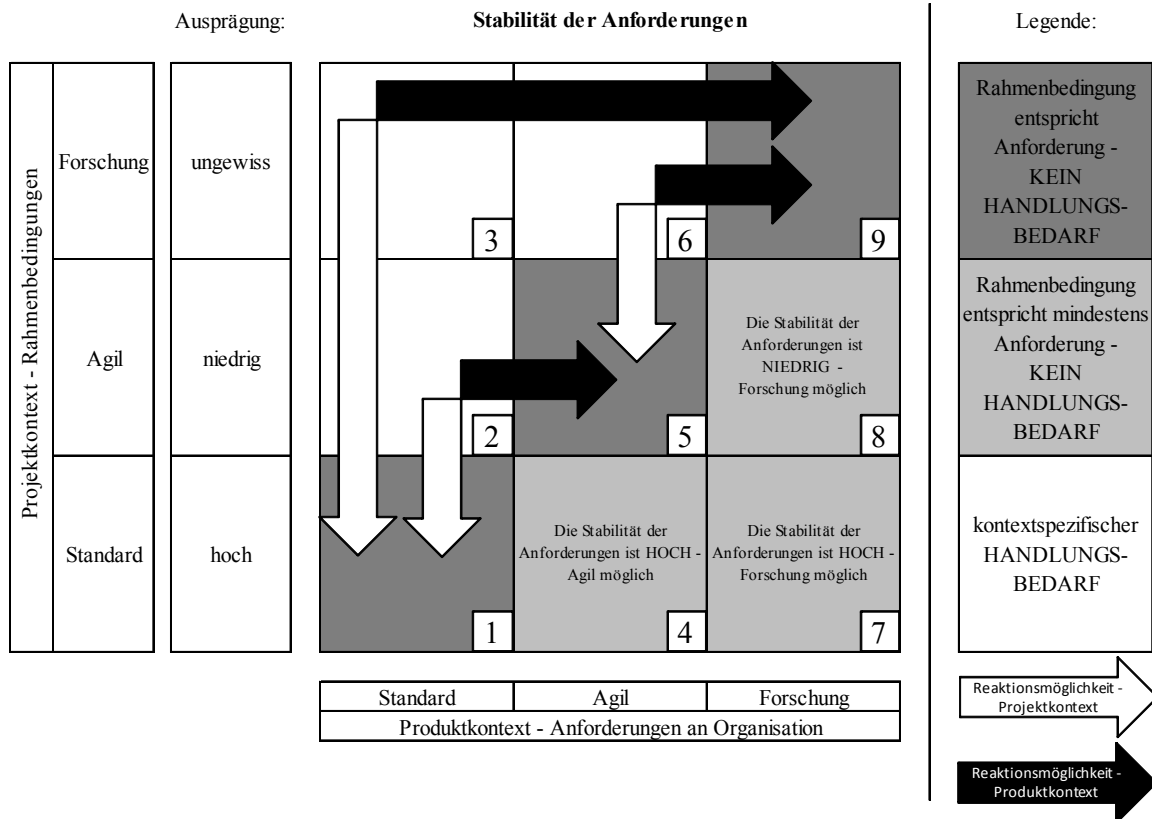


Abbildung 68: PKK-Matrix - Stabilität der Anforderungen⁴⁴⁷

Wäre die Stabilität der Anforderungen als ungewiss einzuschätzen, würde beispielsweise für die Kooperation zwischen Forschung und Entwicklung sowie zwischen Produktion und Design ein Handlungsbedarf entstehen (Matrix Feld 6). Als Reaktion auf diesen Sachverhalt bieten sich 2 Möglichkeiten. Es sollte immer danach gestrebt werden, die vom Produktkontext geforderte Projekt-Typ-Wahl zu realisieren. Erster Ansatzpunkt sollte hier nach Möglichkeit die Erhöhung der Stabilität der Anforderungen durch und mit dem Kunden sein (weißer Pfeil). Die zweite Möglichkeit ist die Änderung des Projekt-Typs von Agil auf Forschung für die Kooperation der Bereiche Forschung und Entwicklung sowie zwischen Produktion und Design (schwarzer Pfeil). Erste Handlungsoption sollte nach Möglichkeit die Reaktion in Richtung der weißen Pfeile (Projektkontext) sein, um die aus dem Produktkontext als optimal begründete Wahl des Projekt-Typs realisieren zu können.

⁴⁴⁷ Eigene Darstellung

Der aufgezeigte Handlungsbedarf muss mit dem Kunden abgeklärt werden. Nötige Anpassungen des externen Kontextes seitens des Kunden müssen mit diesem abgestimmt und in das Pflichtenheft übernommen werden.

7.5.4 Erstellung des Pflichtenheftes als Grundlage der Angebotslegung

Nach DIN 69901-5 beinhaltet ein Pflichtenheft die „vom Auftraggeber erarbeitete[n] Realisierungsvorgaben auf der Basis des vom Auftraggeber vorgegebenen Lastenheftes“.⁴⁴⁸ Im entwickelten Vorgehensmodell basiert das Pflichtenheft auf einem von den Kerndisziplinen Design, F&E und Produktion mit dem Kunden abgestimmten Lastenheft zur Sicherstellung der Effektivität im Produktentstehungsprozess. Aufbauend auf diesem abgestimmten Lastenheft werden Lösungskonzepte entwickelt, der Produkt- und Projektkontext bewertet und etwaiger Handlungsbedarf aufgezeigt, welcher in das Pflichtenheft übernommen wird.

7.6 Projektabwicklung

Die Ableitung des für den Produkt- und Projektkontext adäquaten Projekt-Typs erfolgte in Modellschritt III, dem Projektdesign. Der im Projektdesign aufgezeigte etwaige Handlungsbedarf bezüglich Anpassungen hinsichtlich des Projektkontextes wurde im Anschluss in das Pflichtenheft übernommen. Bei Annahme des Angebots durch den Kunden und der damit verbundenen Akzeptanz des Pflichtenheftes beginnt der Kern des Produktentstehungsprozesses – die Projektabwicklung.

Standardprojekte

Standardprojekte zeichnen sich durch eine hohe Stabilität der Anforderungen aus. Es ist daher möglich die Schnittstellen zwischen den Kerndisziplinen bereits zu Projektbeginn klar zu definieren um die Makroaktivitäten interdisziplinär mit zwischenzeitlichen Abstimmungen durchzuführen zu können (siehe dazu Abbildung 49).

Agile Projekte

Abbildung 69 zeigt den Prozessrahmen zur Durchführung eines agilen Projektes in Anlehnung an das Gerüst von Scrum nach SCHWABER. Ausgehend vom Pflichtenheft (Anforderungsliste 1) werden die Makroaktivitäten vom Konzeptentwurf bis zum Start der Produktion ab dem SOP im Rahmen einer transdisziplinären Kooperation der Kerndisziplinen durchgeführt. Nach jeder Makroaktivität erfolgt die Überarbeitung und Konkretisierung der Anforderungsliste auf Basis der vorangegangenen Makroaktivität als Ausgangsbasis für die nachfolgende Makroaktivität in Abstimmung mit dem Kunden. Der Output einer jeden Makroaktivität sind Inkremente des Produktes. Inkremente müssen hierbei nicht physischer Natur sein. Das Inkrement der Makroaktivität „Detailberechnung“ stellt beispielsweise der vom Kunden abgesegnete Berechnungsbericht dar.

⁴⁴⁸ Deutsches Institut für Normung e.V. (2009), S.10

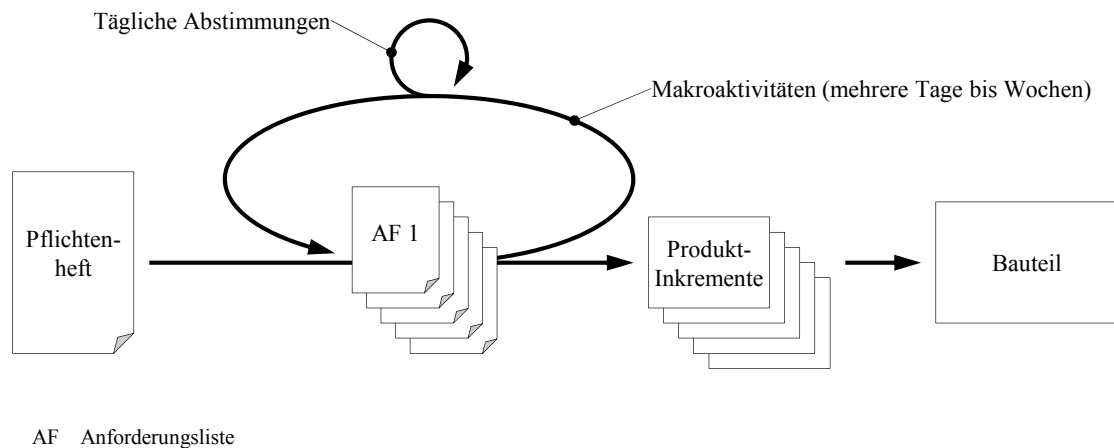


Abbildung 69: Prozessrahmen des Vorgehens in einem Agilen Projekt⁴⁴⁹

Im Rahmen der Makroaktivitäten sind tägliche Abstimmungen zwischen den Kerndisziplinen durchzuführen. Durch diese intensive Abstimmung zur Sicherung der Transdisziplinarität sollen lange Iterationsschleifen vermieden werden (siehe dazu Abbildung 50).

Forschungsprojekte

Untersuchungen zeigten, dass die Anwendung des Set-Based Concurrent Engineering (SBCE) insbesondere für jene Projekte Vorteile bietet, im Rahmen derer die Entwicklungsteams mit neuen und/oder unerprobten Technologien konfrontiert werden. Weitere Indikatoren für den Einsatz des SBCE sind unklare Marktanforderungen und die Bereitstellung unklarer Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt durch den Kunden.⁴⁵⁰

Diese Randbedingungen, welche die Sinnhaftigkeit der Anwendung der Grundsätze des SBCE indizieren, konnten im Rahmen des Praxiseinblicks festgestellt und dem Projekt-Typ „Forschung“ zugeordnet werden.

Set-based Concurrent Engineering beruht auf drei wesentlichen Prinzipien (siehe dazu auch Abschnitt 2.3.5):⁴⁵¹

- Bestimmung des Lösungs-Raumes („*Map the design space*“)
- Integration durch Verschneidung („*Integrate by Intersection*“)
- Nachweis der Machbarkeit vor der Lösungsauswahl („*Establish Feasibility before commitment*“)

RAUDBERGET beschreibt einen Entwurfsprozess unter der Berücksichtigung beschriebener Prinzipien (Abbildung 70). Die, im Rahmen einer Ideengenerierung gewonnenen, Ideen zur Problemlösung werden in einer erweiterten Morphologischen Box gesammelt und bestimmen

⁴⁴⁹ In Anlehnung an: Schwaber (2007), S.120; eigene Darstellung

⁴⁵⁰ Vgl. Raudberget (2010), S.693

⁴⁵¹ Vgl. Sobek Ii/Ward/Liker (1999), S.73; Sobek Ii/Ward/Liker (1999), S.73

den Lösungsraum. Die beschriebene erweiterte Morphologische Box beinhaltet zusätzlich zu konstruktiven Lösungen weitere Domänen wie beispielsweise Herstellungsverfahren.⁴⁵²

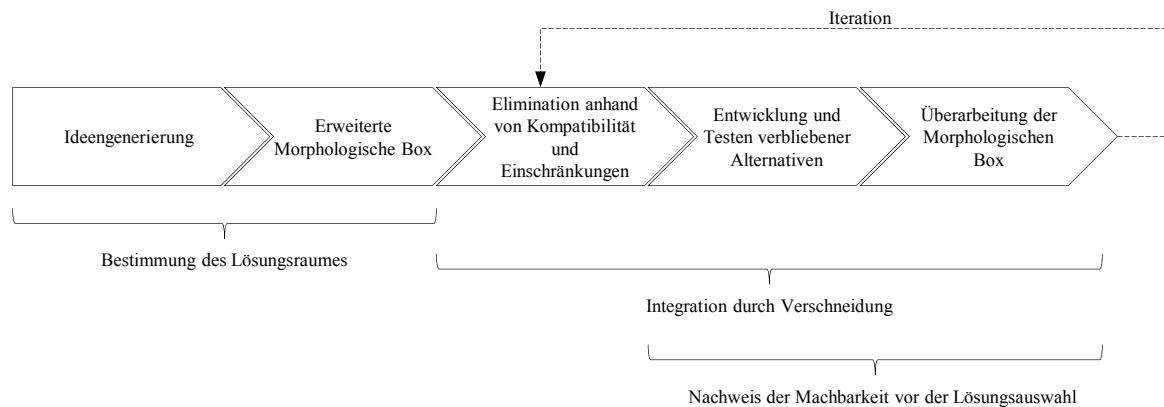


Abbildung 70: Prozessrahmen unter Berücksichtigung der Prinzipien des Set-Based Concurrent Engineering nach RAUDBERGET⁴⁵³

Die von RAUDBERGET beschriebene Iterationsschleife entspricht einer Makroaktivität des Produktentstehungsprozesses (siehe dazu Abbildung 52).

Visualisierung des Projektfortschrittes

Zur Visualisierung des Projektfortschrittes kann auf die in Abbildung 65 illustrierte Darstellungsform zurückgegriffen werden. Abbildung 65 zeigt den Ausgangszustand eines Projektes. Mit der Durchführung der Makoaktivitäten und einer neuerlichen Bewertung des Produktkontextes zwischen den Makroaktivitäten werden bzw. können sich die Neuigkeitsgrade für die einzelnen Kerndisziplinen sowie die Interdependenzgrade zwischen den Kerndisziplinen verringern. Mit fortlaufendem Projektfortschritt werden die Säulen des Diagramms niedriger. Sobald alle Säulen verschwunden sind, wurde ein Projekt zum Abschluss gebracht. Abbildung 71 zeigt auf der linken Seite die Visualisierung des Ausgangszustandes sowie auf der rechten Seite die des Projektendes.

⁴⁵² Vgl. Raudberget (2011), S.3f.

⁴⁵³ Vgl. Raudberget (2012), S.51; eigene Übersetzung und Darstellung

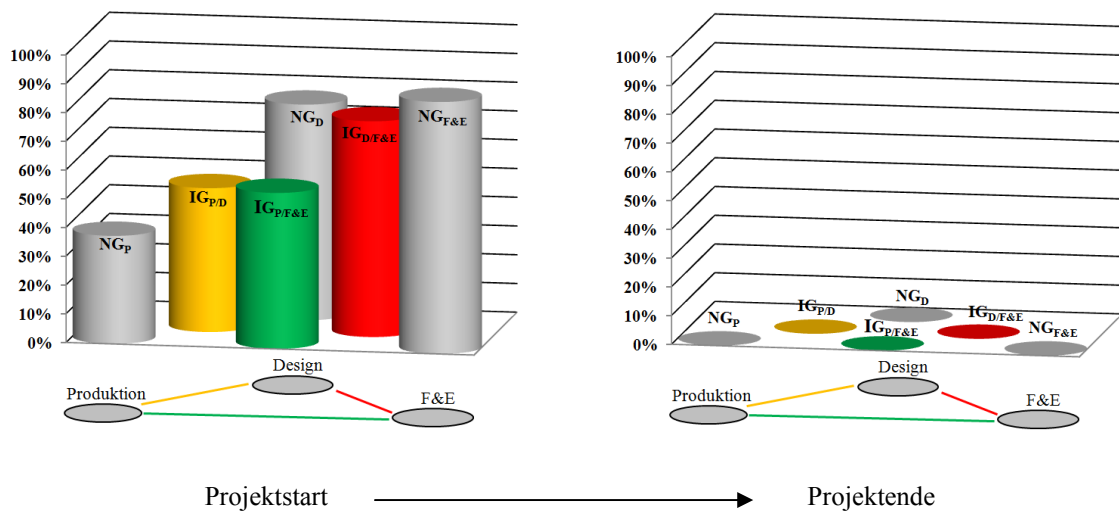


Abbildung 71: Visualisierung von Neuigkeitsgraden (NG) und Interdependenzgraden (IG) zur Illustration des Projekt-Status⁴⁵⁴

Die in Abbildung 71 dargestellte Visualisierung kann im Sinne eines Burndown-Charts genutzt werden. Burndown-Charts finden im Rahmen von Scrum Verwendung und dienen beispielsweise dazu, den Status eines Projektes für alle Beteiligten und Interessierten schnell zu erfassen⁴⁵⁵.

7.7 Zusammenfassung

Kapitel 7 beschreibt das entwickelte Vorgehensmodell zur kontextspezifischen Gestaltung des Produktentstehungsprozesses von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen. Ein Projekt kann extern (Kundenanfrage) oder intern (strategische Produktentwicklung) angestoßen werden. Diese Nachfrage trifft auf ein verfügbares Leistungsangebot. Im Rahmen der Projektanalyse wird die Nachfrage mit dem Angebot im Sinne der Komplexitätsvermeidung sowie der Komplexitätsbeherrschung abgeglichen und etwaige Handlungsempfehlungen abgeleitet. Die Projektanalyse mit den vier Teilschritten der Definition der Nachfrage, der Konzeptfindung, dem Projektdesign sowie der abschließenden Erstellung eines Pflichtenheftes zur Angebotslegung bildet das Kernelement des entwickelten Vorgehensmodells.

Die **Definition der Nachfrage** verfolgt das Ziel, im Sinne der Leichtbaustrategie des Bedingungsleichtbaus, die Anforderungsspezifikationen gemeinsam mit dem Kunden zu überarbeiten und zu definieren. Die kooperative Überarbeitung des Lastenheftes von Kunde und Lieferant liefert einen wesentlichen Beitrag zur Sicherung der Effektivität im Produktentstehungsprozess. Ergebnis der Definition der Nachfrage sind die gesammelten, an das Bauteil gestellten und hinsichtlich ihrer Bedeutung für den Kunden bewerteten, Anforderungen.

⁴⁵⁴ Eigene Darstellung

⁴⁵⁵ Vgl. Gloger (2011), S.209

Auf Basis dieser spezifizierten Anforderungen erfolgt im Modellschritt der **Konzeptfindung** der Abgleich von Angebot („Was kann der Lieferant anbieten?) und Nachfrage („Was erwartet der Kunde?). Die Konzeptfindung erfolgt in transdisziplinärer Kooperation der Kerndisziplinen Design, F&E, und Produktion. Dazu erfolgt in einem ersten Schritt die Bewertung der Abhängigkeiten der Anforderungen von den Produkt- und Produktionsmerkmalen eines FVK-Bauteils. Aus dieser Bewertung wird in weiterer Folge unter Berücksichtigung der Anforderungspriorisierung des Kunden eine relative Bedeutung einzelner Merkmale für die Befriedigung des Kundenbedürfnisses ermittelt. Auf Basis der Kenntnisse dieser projektspezifischen Bedeutung einzelner Merkmale werden ein oder mehrere Konzepte erstellt.

Im nachfolgenden Schritt des **Projektdesigns** werden die erstellten Konzepte hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Produktentstehungsprozess bewertet. Zur Bewertung der Wirkung werden der Neuigkeitsgrad sowie der Interdependenzgrad herangezogen. Der Neuigkeitsgrad ist ein Indikator für den erwarteten Mehraufwand in der Umsetzung eines Konzeptes. Der Interdependenzgrad gibt Auskunft darüber, wie unabhängig eine Disziplin in der Umsetzung einer neuen Merkmalsausprägung agieren kann – je höher der Interdependenzgrad, umso höher ist der Abstimmungsbedarf. Auf Basis des Interdependenzgrad kann auf die produktkontextspezifisch optimale Gestaltung des Produktentstehungsprozesses (Standardprojekt, Agiles Projekt oder Forschungsprojekt) rückgeschlossen werden. Nach der Bewertung der Wirkung des Produktkontextes wird des Weiteren der Projektkontext einer Bewertung unterzogen. Der Projektkontext beschreibt die spezifischen Rahmenbedingungen eines Projektes. Die entwickelte PKK-Matrix stellt die produktkontextspezifischen Anforderungen an die Gestaltung des PEP sowie die projektkontextspezifischen Rahmenbedingungen gegenüber und ermöglicht die Ableitung eines Handlungsbedarfes.

Der identifizierte Handlungsbedarf wird in weiterer Folge mit dem Kunden abgestimmt und in das Pflichtenheft aufgenommen. Dieses **Pflichtenheft** dient **als Basis der Angebotslegung**.

Bei Annahme eines Angebotes wird der Kern des PEP, die **Projektentwicklung** auf Basis der kontextspezifisch optimalen Gestaltung im Sinne der Effizienz in Angriff genommen.

8 Evaluierung des Vorgehensmodells

Die nachfolgende Evaluierung verfolgt das Ziel der Beurteilung der Anwendbarkeit und der Zweckmäßigkeit des entwickelten Vorgehensmodells. Des Weiteren werden Anpassungen und Verbesserungen des Vorgehensmodells aus Anwendersicht identifiziert.

8.1 Vorgehen

Die Evaluierung des entwickelten Vorgehensmodells erfolgte durch eine leitfaden-gestützte Befragung von Experten beim Kooperationspartner. Eine allgemeine Beschreibung des Kooperationspartners, der Experten sowie die Begründung des Vorgehens erfolgte bereits in Abschnitt 5. Als Diskussionsgrundlage diente eine zusammenfassende Darstellung der Grundzüge des Forschungsprojekts sowie des entwickelten Vorgehensmodells. Die leitenden Fragestellungen sind der Arbeit in Anhang C angehängt. Die Interviews wurden vor Ort beim Kooperationspartner, im Zeitraum von Juli 2015 bis September 2015, im Rahmen von Einzelgesprächen durchgeführt.

Die Interviews wurden in die folgenden Abschnitte gegliedert:

- Vorstellung der Grundzüge des Forschungsprojektes
- Vorstellung der Grundstruktur des entwickelten Vorgehensmodells
- Detaillierte Vorstellung und Diskussion der Teilschritte des Vorgehensmodells hinsichtlich ihrer Nachvollziehbarkeit, Anwendbarkeit und Zweckmäßigkeit

8.2 Ergebnisse

Die im Praxiseinblick identifizierte Unterscheidung in die drei Projekttypen, Standard Projekt, Agiles Projekt und Forschungsprojekt wird bestätigt und als notwendig erachtet. Ein zu Beginn gewählter Projekttyp wird meist, trotz auftretender Änderungen von Anforderungen und/oder Rahmenbedingungen, bis zum Projektende beibehalten. Es wird jedoch darauf verwiesen, dass sich die unterschiedlichen Projekttypen mit Fortlauf eines Projektes immer mehr annähern. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass sich beispielsweise das Projektumfeld oder die Anforderungen an das Produkt im Projektverlauf stabilisieren. So werden Projekte, welche als Forschungsprojekte gestartet werden, nach einer Festlegung auf ein realisierbares Lösungskonzept, als Agiles Projekt fortgeführt. Die Festlegung auf ein Lösungskonzept wird hierbei beispielsweise durch einen Innovationssprung im Lieferantennetzwerk des Zulieferers, in Form neuer Werkstoffe, Verfahren, Anlagen, etc. begünstigt. Es gibt jedoch auch die Möglichkeit, Teilaspekte eines Standardprojektes in ein temporäres Forschungsprojekt auslagern zu müssen. Dieser Fall tritt in jenen Projekten ein, im Rahmen derer entweder seitens des Kunden unerwartet Änderungen an den Produkthanforderungen vorgenommen werden oder die Machbarkeit des Lösungskonzeptes bzw. die Projektrahmenbedingungen

vom Lieferanten falsch eingeschätzt werden. Agile Projekte entwickeln sich beim Kooperationspartner immer mehr zum typischen Projekttyp. Die Begründung hierfür liegt in der Tatsache, dass der Kooperationspartner eine Stellung als Technologieführer in der Branche innehat, und den Anspruch stellt diese zu behalten.

8.2.1 Grundstruktur des Vorgehensmodells

Die getroffene Systemabgrenzung wird den realen Gegebenheiten gerecht und wird als zweckmäßig beurteilt. Die Grundstruktur des Vorgehensmodells wird als verständlich, logisch und nachvollziehbar bewertet. Die Sinnhaftigkeit des Ansatzes, die Lösungskonzepte und ihre Auswirkungen auf den Produktenstehungsprozess bereits in der Angebotsphase in der entsprechenden Tiefe zu analysieren, wird bestätigt. Die intensive Integration des Kunden bietet dabei die Möglichkeit, nachfolgend auftretende Probleme zu vermeiden. Die Strukturiertheit des Vorgehens trägt dazu bei Fehler zu vermeiden.

Kritisch angemerkt wird die Tatsache, dass die beschriebene, lineare Abfolge der einzelnen Phasen in der Projektanalyse lediglich den Idealfall darstellt. Die Realität zeigt jedoch, insbesondere in der Projektanalyse, häufig das Auftreten von Iterationsschleifen (Abbildung 72). Mögliche Auslöser dieser Iterationen werden nachfolgend in den Ausführungen zu den einzelnen Phasen der Projektanalyse in Abschnitt 8.2.4 beschrieben.

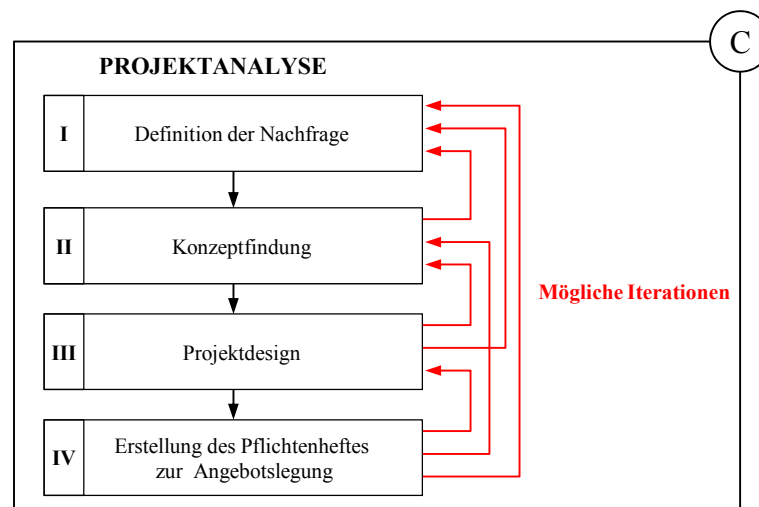


Abbildung 72: Mögliche Iterationen im Rahmen der Projektanalyse⁴⁵⁶

8.2.2 Projektanstoß

Der Projektanstoß in Form von extern ausgelösten Kundenprojekten bzw. intern motivierten strategischen Produktentwicklungen wird bestätigt. Strategische Produktentwicklungen dienen hierbei im Wesentlichen dazu, die Machbarkeit von innovativen Lösungskonzepten mit hohem Marktpotential nachzuweisen. Diese strategischen Produktentwicklungen werden in der Regel intern vorfinanziert.

⁴⁵⁶ Eigene Darstellung

8.2.3 Angebot

Die vorgeschlagenen Merkmale zur Beschreibung des Angebotes werden grundsätzlich bestätigt. Die Bauteilgestaltung wird als ein besonders wesentliches Merkmal herausgestrichen. Von Kunden gestaltete Bauteile, insbesondere im Falle geringer Erfahrung mit FVK, basieren sehr oft auf langjährig umgesetzten Bauweisen, beispielsweise aus dem Stahl- oder Aluminium-Blechbau. Diese werden den Anforderungen eines zweckmäßigen Einsatzes von FVK nicht gerecht und verursachen einen oft langwierigen Lernprozess zwischen Kunden und Lieferant. Wünsche zur Erweiterung der Angebotsmerkmale wurden in zwei Richtungen geäußert.

Als wesentliches Merkmal werden Verbindungstechnologien in Hinblick auf die Beherrschung eines Multi-Material-Design gesehen. Diese stellen ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal im Vergleich zur Konkurrenz dar. Zulieferer von FVK-Komponenten in der Fahrzeugindustrie müssen die Integration ihrer Komponenten in den Produktionsablauf beim OEM beherrschen - Verbindungstechnologien sind hierzu der Schlüssel zum Erfolg. Verbindungstechnologien sind ein Kernelement der aktuellen strategischen Produktentwicklungen beim Kooperationspartner.

Des Weiteren wird eine Ergänzung um die Beherrschung einer möglichen Bauteilverantwortung vorgeschlagen. Mit der „Beherrschung einer Bauteilverantwortung“ wird die Fähigkeit beschrieben, für bestimmte Rahmenbedingungen spezifische Entwicklungsprozesse zu beherrschen bzw. für die Entwicklung von Bauteilen für spezielle Einsatzgebiete zertifiziert zu sein. Diese Fähigkeiten können einerseits intern bereits vorhanden sein, bzw. extern vorbereitet und vorgehalten werden, beispielsweise in Form von Kooperationen. Diese Fähigkeiten stellen demnach ebenso ein wesentliches Unterscheidungs- bzw. Alleinstellungsmerkmal im Vergleich zur Konkurrenz dar.

8.2.4 Projektanalyse

Definition der Nachfrage

Hinsichtlich der Definition der Nachfrage wird die Möglichkeit des Auftrages für die Erstellung des Lastenheftes vom Auftragnehmer an den Auftraggeber sowie die Wichtigkeit und Sinnhaftigkeit der Beachtung der Grundsätze des Bedingungsleichtbaues bestätigt.

Die Priorisierung der gestellten Anforderungen durch den Kunden wird als positiv bewertet. Aktuell wird die Situation beim Kooperationspartner so beschrieben, dass „eher darauf losmarschiert wird“, und die Prioritäten gestellter Anforderungen nicht dezidiert hinterfragt werden. Die Ursache liegt nach Ansicht eines Interviewten im geschichtlichen Hintergrund des Unternehmens mit seinen Ursprüngen im Bereich des Motorsports und den damit verbundenen, in der Regel, zeitgetriebenen Prozessen.

Die Umsetzung des vorgeschlagenen, strukturierten Vorgehens zur Definition der Nachfrage in Kooperation mit dem Kunden wird als wesentliches Verbesserungspotential im Vergleich zu den aktuellen Abläufen eingeschätzt. Als größter Hindernisgrund der Durchführung des vorgeschlagenen Vorgehens wird der Faktor Zeit genannt. Nach Einschätzung der Experten würde jedoch eine Investition in Zeit zu diesem frühen Zeitpunkt im

Produktentstehungsprozess in Form vermiedener Fehler, über den Gesamt-Prozess gesehen, Rendite liefern. Die Rendite ergibt sich demnach sowohl für den Kunden als auch für den Lieferanten. Eine entsprechende Anwendung des Vorgehens müsste gut vorbereitet werden, um den Aufwand für den Kunden bei maximalem Output zu minimieren. Die gemeinsame Erarbeitung eines finalen Lastenheftes muss im Interesse des Lieferanten und des Kunden liegen. Es wird davon ausgegangen, dass das Vorgehen von den Kunden positiv aufgenommen wird und die Bereitschaft der Kunden daran mitzuwirken gegeben ist. Für Kunden mit geringer Erfahrung im Umgang mit FVK, sollte ein Basis-Lastenheft bereitgestellt werden um sie bei der Erstellung des initialen Lastenheftes zu unterstützen.

Durch die genaue Kenntniss der Anforderungen im Sinne des Bedingungsleichtbaus kann das Leichtbaupotential maximiert werden. Die Hauptmotivation für den Einsatz von Faserverbundkunststoffen ist nach Aussage eines Experten nachwievor der Leichtbau. Um FVK-Bauteile erfolgreich am Markt zu platzieren, ist es daher nötig die Vorteile des Werkstoffes insbesondere im Sinne des Leichtbaus bestmöglich umzusetzen. Das vorgestellte Vorgehen kann hier einen Beitrag leisten.

Konzeptfindung

Die Zweckmäßigkeit der primär durch die Kerndisziplinen Design, F&E sowie Produktion durchgeführten Konzeptfindung wird bestätigt. Die Support-Disziplinen werden meist in der Endphase der Konzeptfindung bei Bedarf hinzugezogen.

Das Vorgehen, mit der Bewertung des Einflusses einzelner Produktmerkmale auf gestellte Anforderungen an das Bauteil und der zusätzlichen Gewichtung dieser Einflüsse auf Basis der Anforderungspriorisierung durch den Kunden wird als logisch und positiv bewertet. Dadurch lässt sich nach Aussage der Experten eine Absicherung der Lösungsorientierung im Rahmen der Konzeptentwicklung erreichen. In der, im beschriebenen Vorgehen berücksichtigten, Beachtung der Priorisierung der Kundenanforderungen wird ein wesentlicher Mehrwert im Vergleich zum aktuellen Vorgehen beim Kooperationspartner gesehen.

Es wird angemerkt, dass ein Lastenheft oft auch im Rahmen der Konzeptfindung in Abstimmung mit dem Kunden auf Basis eines tieferen Verständnisses der Anwendungssituation einer weiteren Überarbeitung unterliegt. Hierbei wird insbesondere versucht, Kompromisse im Sinne einer „zweckmäßigen“ Konzeptfindung, im beiderseitigen Interesse von Kunde und Lieferant, zu erreichen. Diese Abstimmung des Lastenheftes ist für spätere Agile Projekte und insbesondere für Forschungsprojekte eher die Regel als die Ausnahme. Standardprojekte kommen hingegen meist ohne wesentliche Anpassungen des Lastenheftes während der Konzeptfindung aus. Diese iterative Anpassung des Lastenheftes kann dadurch Änderung in der Priorisierung der Anforderungen und in weiterer Folge der Merkmale mit sich bringen. Als typisches Beispiel hierfür wurde die Abkehr von einer kompletten Integralbauweise durch die Auslagerung bestimmter Funktionen in ein separates Bauteil aufgezeigt.

Die Ausarbeitung mehrerer Konzepte in der Konzeptfindung wird als sinnvoll eingeschätzt, da die vorbereiteten Konzepte in Gesprächen mit Kunden dargelegt und zur Untermauerung der vom Lieferanten bevorzugten Konzeptvariante eingesetzt werden können. Des Weiteren

kann auf diese Konzepte im Falle einer Anpassung der Anforderungen zurückgegriffen werden.

Projektdesign

Die Zweckmäßigkeit der Bewertung des Produkt- und Projektkontextes wird von den Experten bestätigt. Die Experten bestätigen hierbei die Abhängigkeit der adäquaten Wahl des Projekttyps vom Transdisziplinaritätsgrad zwischen den Kerndisziplinen. Der notwendige Kommunikationsaufwand für ein Projekt wird aktuell meist auf Basis einer „gefühlsmäßigen“ Beurteilung erfahrener Mitarbeiter unterschätzt. Dies führt in weiterer Folge zu Problemen in der Projektabwicklung. Dies bestätigt die Notwendigkeit und Zweckmäßigkeit eines strukturierten diesbezüglichen Handelns. Die explizite Beachtung des Abstimmungsaufwandes zwischen den Kerndisziplinen wird als wesentlicher Mehrwert gesehen.

Besonders wesentlich ist die Abschätzung, ob ein Forschungsprojekt zur Umsetzung eines Lösungskonzeptes erforderlich ist. Bei einer diesbezüglichen Fehleinschätzung kommt es zu starken Verzögerungen im Rahmen eines Projektes, da insbesondere der veranschlagte Zeitrahmen für ein Forschungsprojekt nicht ausreicht.

Die Logik und Zweckmäßigkeit der Bewertung des Produktkontextes mit der Ableitung des Neuigkeitsgrades sowie des Interdependenzgrades als wesentlicher Beitrag zu einer treffsicheren Planung eines Projektes wird bestätigt. Aktuell erfolgt beim Kooperationspartner keine Einschätzung des Produktkontextes im Sinne des vorgeschlagenen Interdependenzgrades. Durch die Bewertung erfolgt des Weiteren eine Dokumentation der Entscheidungsfindung. So ergibt nach Aussage eines Experten der Mehrwert der Möglichkeit einer Retrospektive hinsichtlich der getroffenen Entscheidungen nach Projektabschluss zur Identifikation etwaiger Fehlinterpretationen bzw. Fehlinformationen.

Die Anwendung der entwickelten Visualisierung der Neuigkeitsgrade sowie der Interdependenzgrade (vgl. dazu Abbildung 65) wird positiv bewertet. Ein Mehrwert wird einerseits in der Darstellung der Ausgangssituation zur Konzeptauswahl, und andererseits in der Nutzung als projektbegleitende Visualisierung des Projektfortschrittes erwartet.

Im Rahmen der Diskussion der externen und internen Projektrahmenbedingungen zur Bewertung des Projektkontextes wird die Projektlaufzeit von den Experten als das wesentlichste und eindeutigste Kriterium beschrieben. Kritik bezüglich der Kategorisierung der Projektlaufzeit wurde jedoch hinsichtlich der Zuordnung einer langen Projektlaufzeit zu Standardprojekten geäußert. Aufgrund des geringen Neuigkeitsgrades können Standardprojekte oft auch in kurzen Projektlaufzeiten abgewickelt werden. Des Weiteren wurde die Sicherheitsrelevanz nicht als eindeutiges Kriterium für die Auswahl eines Projekt-Typs bestätigt. Sicherheitsrelevante Projekte könnten in allen Projekt-Typen, unter Berücksichtigung und Einbindung etwaiger Vorschriften oder Normen, abgehandelt werden. Der Grad der Beteiligung des Kunden, ist nach Expertenaussage stark vom Kunden selbst abhängig. So ist beispielsweise die Bereitschaft zur Beteiligung eines Kunden, welcher Interesse hat Know-how im Bereich FVK aufzubauen (z. B. aus der Automobilindustrie), wesentlich größer als bei fehlendem Interesse. Hinsichtlich einer Verteilten Entwicklung im Produktentstehungsprozess wird von den Experten darauf verwiesen, dass eine erfolgreich

umgesetzte Verteilte Entwicklung entweder klare Regeln in Form standardisierter Abläufe (Standardprojekt), oder ausreichend Zeit (Forschungsprojekt) voraussetzt. Eine stark verteilte Entwicklung im Rahmen von Agilen Projekten führt demnach oft zu Schwierigkeiten im Projektverlauf. Des Weiteren wird darauf verwiesen, dass eine hohe Beteiligung des Kunden im Rahmen von Forschungsprojekten nicht unbedingt erforderlich ist. Die internen Rahmenbedingungen und deren Kategorisierung werden von den Experten bestätigt.

Erstellung des Pflichtenheftes zur Angebotslegung

Nach Expertenaussage werden beim Kooperationspartner in den meisten Fällen Pflichtenhefte nicht explizit erstellt. Pflichtenhefte werden insbesondere für große Projekte erstellt. Durch die vorgeschlagene Integration der abgeleiteten Pflichten des Kunden in das Pflichtenheft wird eine gesteigerte Qualität des Pflichtenheftes erwartet und das Vorgehen daher positiv bewertet.

Ein Experte verweist darauf, dass bei der Erstellung eines Pflichtenheftes die Wettbewerbssituation am Markt Berücksichtigung finden muss. Wenn dem Unternehmen bestimmte Stärken des Mitbewerbers für die Umsetzung eines bestimmten Projektes bekannt sind, welche ein Unternehmen aber nicht in selber Form bieten kann, so muss dem Mitbewerber gezielt mit eigenen Stärken entgegengetreten werden, um ein in Summe überzeugenderes, und somit erfolgreiches Angebot abgeben zu können.

Iterationen in der Projektanalyse werden laut eines Experten sehr oft zu diesem späten Zeitpunkt kurz vor oder mit der Abgabe des Erstangebotes ausgelöst. Auslöser hierzu ist oftmals der Kunde, da dieser aufgrund des Vergleiches unterschiedlicher, vorliegender Angebote Erkenntnisgewinne erzielt und diese zu seinem eigenen Vorteil an ausgewählte Lieferanten weitergibt. Dies kann einen kompletten Neustart der Projektanalyse zur Folge haben.

8.2.5 Projektabwicklung

Die Auswahl des adäquaten Projekttyps erfolgt beim Kooperationspartner aktuell in der Regel zu Projektbeginn auf Basis einer (Bauch-)Entscheidung der handelnden Personen. Die Wahl des Projekttyps kann daher, auch bei eigentlich sehr ähnlichen produkt- und projektkontextspezifischen Anforderungen, sehr unterschiedlich ausfallen. Durch die einheitliche und strukturierte Bewertung des Produkt- sowie des Projektkontextes werden Potentiale durch einen erhöhten Lerneffekt und einer daraus resultierenden laufenden Verbesserung und Optimierung des Produktentstehungsprozesses gesehen. Es könnten so gezielt, die richtigen Teams, auf die richtigen Projekte angesetzt werden, und so die Projektabwicklung in ihrer Effizienz gesteigert werden.

Die Scrum-Grundsätze werden hinsichtlich ihrer Berücksichtigung in der Abwicklung Agiler Projekte und Forschungsprojekten als sinnvoll und zweckmäßig erachtet. Des Weiteren wird das Fehlen einer Entsprechung eines „Scrum Masters“ beim Kooperationspartner sowie die Sinnhaftigkeit eines „Scrum Masters“ bestätigt. Alle Projektbeteiligten sind aktuell „Projektgetrieben“. Somit fehlt die Sicht von außen auf die Abläufe eines Projektes sowie der Fokus auf die Einhaltung beschriebener Scrum-Grundsätze. Die transdisziplinäre Kooperation

zwischen den Kerndisziplinen erfolgt beim Kooperationspartner meist nicht zwischen allen in den Kerndisziplinen beteiligten Teammitgliedern, sondern primär zwischen den Entscheidungsbefugten der Kerndisziplinen.

Die Prinzipien des Set-based Concurrent Engineering werden ebenso als sinnvoll und zweckmäßig in der Anwendung im Rahmen von Forschungsprojekten erachtet. Der Grundsatz des „Nachweis der Machbarkeit vor Lösungsauswahl“ kann jedoch nicht immer sichergestellt werden. Der Nachweis einer Machbarkeit, muss in der Regel auf eine Absicherung durch Simulationen oder die Einholung von internen und externen Expertenmeinungen reduziert werden.

8.3 Zusammenfassung

„Man hat nicht die Zeit etwas richtig zu machen.“⁴⁵⁷

Der dominierende, beeinflussende Faktor auf den Produktentstehungsprozess beim Kooperationspartner ist der Faktor Zeit. Das einleitende Zitat spiegelt die Zeitgetriebenheit treffend wieder. Alle Interviewten Experten äußerten bezüglich des zeitlichen Aufwandes, wenn auch nicht direkte Kritik, gewisse Bedenken hinsichtlich der Umsetzbarkeit des Vorgehens im Unternehmensalltag. Alle Interviewten bestätigten jedoch auch, dass das vorgeschlagene Vorgehen summa summarum, über den gesamten Produktentstehungsprozess betrachtet, zu einem Mehrwert hinsichtlich der Ergebnisqualität als auch der Reduktion der benötigten Zeit für den Produktentstehungsprozess führt. Diesbezüglich wird darauf verwiesen, dass die Umsetzung des Vorgehens gut vorbereitet und unbürokratisch durchführbar sein muss. Vorgeschlagen wird hierzu die Schaffung eines eigenen „Angebotsteams“. Dieses sollte den zeitlichen Druck von den Kerndisziplinen im Laufe der Angebotsstellung nehmen und dafür Sorge tragen, dass das Vorgehen auch eingehalten wird. Die Einführung eines eigenen Teams zur Angebotsstellung wurde zum Zeitpunkt der Interviews beim Kooperationspartner bereits diskutiert.

Das entwickelte Vorgehen zur Projektanalyse stellt nach Aussagen der Experten den Idealfall dar. In der Realität kann es zwischen den vier Teilschritten der Projektanalyse zu Iterationsschleifen kommen.

Folgende Anregungen hinsichtlich der Beschreibung des Angebots wurden geäußert:

- Verbindungstechnologien sollten zur Darstellung der Beherrschung des Multi-Material-Designs in die Liste der Merkmale aufgenommen werden.
- Mögliche Bauteilverantwortungen sollten in die Liste der Merkmale aufgenommen werden.

⁴⁵⁷ Experte 2, Interview vom 22.9.2015

Kritik wurde seitens der Experten hinsichtlich der Kategorisierung ausgewählter Rahmenbedingungen des Externen Projektkontextes geäußert. Diesbezügliche Kritikpunkte lauten wie folgt:

- Die Sicherheitsrelevanz stellt kein eindeutiges Kriterium zur Auswahl eines Projekttyps dar.
- Die Projektlaufzeit eines Standardprojektes ist im Vergleich zu einem Agilen Projekt per se nicht höher. Vielmehr können Standardprojekte in bestimmten Fällen besonders schnell abgewickelt werden.

Zusammenfassend kann ein grundsätzlich positives Fazit aus den Interviews zur Evaluierung des entwickelten Vorgehensmodells gezogen werden. Die Experten bestätigen die Zweckmäßigkeit und Anwendbarkeit des entwickelten Vorgehensmodells zur kontextspezifischen Gestaltung des Produktentstehungsprozesses von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen und sehen einen Mehrwert durch dessen Anwendung in der betrieblichen Praxis gegeben.

„Ich vermute, dass das eigentlich die perfekte Vorgehensweise ist.“⁴⁵⁸

Die Umsetzung der Gedanken des Bedingungsleichtbaus in enger Kooperation mit dem Kunden im Rahmen der Definition der Nachfrage hat positive Wirkung auf die Effektivität im Produktentstehungsprozess. Die Effizienz wird durch die Produkt- und Projektkontextspezifische Wahl des Projekttyps gewährleistet. Zusätzlich wird durch das Vorgehen die Nachvollziehbarkeit getroffener Entscheidungen sichergestellt und die Ableitung möglicher Lerneffekte im Rahmen einer Retrospektive ermöglicht.

⁴⁵⁸ Experte 3, Interview vom 23.9.2015

9 Zusammenfassung und Ausblick

Zum Zwecke der zusammenfassenden Darstellung der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit werden nachfolgend die forschungsleitenden Fragestellungen beantwortet sowie ein Ausblick auf möglichen weiteren und ergänzenden Forschungsbedarf gegeben.

Welche Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren bestehen im Produktentstehungsprozess von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen?

Der Produktentstehungsprozess von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen ist geprägt durch Interdependenzen zwischen den eingesetzten Materialien, der Bauteilgestaltung sowie dem Herstellungsverfahren. Die Eigenschaften eines FVK-Bauteils werden primär durch die Kombination von Fasermaterial(ien), Matrixmaterial(ien), Insertmaterial(ien), der geometrischen Gestaltung des Bauteils, der (des) Herstellungsverfahren(s) sowie der (den) eingesetzten Produktionsanlage(n) determiniert. Dies unterscheidet den Produktentstehungsprozess von FVK-Bauteilen wesentlich von traditionellen Produktentstehungsprozessen im Umgang mit traditionellen, isotropen Konstruktionswerkstoffen. So können beispielsweise Materialkennwerte nicht (wie z.B. für Stahl) aus Datenblättern entnommen werden, sondern können und müssen erst am physisch produzierten Bauteil final bestimmt werden.

Durch eine, für einen spezifischen Anwendungsfall abgestimmte Kombination beschriebener Merkmale, sind jedoch Werkstoffe mit einem anwendungsoptimierten Eigenschaftsprofil realisierbar. Dieser, insbesondere im Vergleich zu traditionellen isotropen Konstruktionswerkstoffen bestehende Vorteil bringt aber auch eine gesteigerte Komplexität in den Entscheidungsprozessen im Rahmen des Produktentstehungsprozesses mit sich. Die Entscheidungen hinsichtlich der Merkmalsauswahl müssen generell aufeinander abgestimmt und unter Mitwirkung der beteiligten Disziplinen getroffen werden.

Der Leichtbau, ein aktueller Megatrend in der Produktentwicklung, stellt die primäre Motivaton für den Einsatz von Faserverbundkunststoffen dar. Zusätzlich zum Dichtevorteil von FVK müssen zur Steigerung des Leichtbaugrades die weiteren spezifischen Vorteile einer faserverbundgerechten Konstruktion genutzt werden um Leichtbauteile aus FVK erfolgreich am Markt zu etablieren.

Die Ausgestaltung einer Leichtbaulösung ist in der Regel durch Iterationen und Optimierungsschleifen geprägt. Aufbauend auf der Leichtbaustrategie des Bedingungsleichtbaus, kommen der Konzeptleichtbau, der Stoffleichtbau, der Formleichtbau sowie der Fertigungsleichtbau in einer oder mehreren Iterationsschleifen zum Einsatz. Der Bedingungsleichtbau verfolgt das Ziel, durch die genaue Kenntniss der Einsatzbedingungen eines Bauteils das erreichbare Leichtbaupotential zu maximieren und leistet einen wesentlichen Beitrag zur Sicherstellung der Effektivität des Produktentstehungsprozesses.

Der Einblick in die betriebliche Praxis eines etablierten Zulieferers von FVK-Bauteilen in der Automobilindustrie zeigte Abhängigkeiten der optimalen organisatorischen Gestaltung des

Produktentstehungsprozesses von den an das Produkt gestellten Anforderungen seitens des Kunden, den vorherrschenden Rahmenbedingungen eines Projektes sowie des internen Leistungsangebotes zur Bewerkestellung eines Projektes. Durch eine vom Kunden geforderte externe Komplexität (Rahmenbedingungen, Einwirkungen auf das Bauteil, geforderte Eigenschaften) entsteht in Abhängigkeit des Leistungsangebotes des Lieferanten eine interne Komplexität im Produktentstehungsprozess. Hierbei gilt es die externe Komplexität im Sinne der Komplexitätsvermeidung und Komplexitätsbeherrschung mit der internen Komplexität abzustimmen.

Welche Aktivitäten werden im Produktentstehungsprozess von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen gesetzt?

Die VDI Richtlinie 2014/Blatt 2 beschreibt einen allgemeinen Vorgehensplan zur Entwicklung von FVK-Bauteilen. Dieser gliedert sich in chronologischer Abfolge von der Konzeptphase, über die Konstruktionsentwicklung, die Bauteilqualifikation bis hin zur Produktion eines Serienbauteils. Die drei letztgenannten Phasen beinhalten neben den konstruktiven Tätigkeiten der zeichnerischen Darstellung und Strukturanalyse zusätzlich Aufgaben hinsichtlich der Durchführung von Versuchen insbesondere zur Berücksichtigung der Notwendigkeit des Nachweises von Material- und Bauteileigenschaften an Probekörpern und dem finalen Bauteil selbst.

KLEIN beschreibt eine systematische Vorgangsweise des leichtbaugerechten Konstruierens. Er verweist darauf, dass es hierfür keiner eigenen Konstruktionslehre bedarf, jedoch Modifizierungen zur Unterstützung der Bewältigung der leichtbauspezifischen Herausforderungen vorzunehmen sind. Der Start eines Leichtbauprojektes erfolgt durch die Klärung der Randbedingungen im Sinne des Bedingungsleichtbaus. Eine exakte Kenntnis der Anforderungen ist die wesentliche Basis für die darauf folgende Konzeptfindung. Die Konzeptfindung beschreibt KLEIN als die wesentliche Aktivität einer erfolgreichen Leichtbaukonstruktion.

Die im Rahmen eines Praxiseinblickes erhobenen und analysierten Soll- bzw. Ist-Produktentstehungsprozesse weisen starke Ähnlichkeiten hinsichtlich zu setzender Aktivitäten mit den in der Literatur beschriebenen FVK- bzw. leichtbauspezifischen Produktentstehungsprozessen auf. In Abhängigkeit des Produkt- und Projektkontextes konnten jedoch drei Projekt-Typen (Standardprojekt, Agiles Projekt, Forschungsprojekt) hinsichtlich der Gestaltung des Produktentstehungsprozesses unterschieden werden.

Wie kann ein Vorgehensmodell zur kontextspezifischen Gestaltung eines integrierten Produktentstehungsprozesses von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen aussehen?

Das in Kapitel 7 der vorliegenden Arbeit beschriebene Vorgehensmodell unterstützt die kontextspezifische Ausgestaltung des Produktentstehungsprozesses von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen.

Der Anstoß zum Produktentstehungsprozess kann extern, in Form einer Kundenanfrage, oder intern, zum Zwecke einer strategischen Produktentwicklung erfolgen. Diese Nachfrage wird durch technische, wirtschaftliche, und organisatorische Anforderungen definiert. Die Nachfrage trifft beim Lieferanten auf ein bestehendes Leistungsangebot. Das

Leistungsangebot ist durch bekannte Realisierungsmerkmale zur Befriedigung der durch die Nachfrage beschriebenen Kundenbedürfnisse bestimmt. Die primären Merkmale zur Beschreibung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen sind hierbei die Produktmerkmale Faser-Material(ien), Matrix-Material(ien), Insert-Material(ien) und Bauteilgestaltung sowie die Produktionsmerkmale Produktionsverfahren und Produktionsanlagen. Das Leistungsangebot gliedert sich in intern und extern verfügbares Leistungsangebot. Das interne Leistungsangebot ist einer Unternehmung bekannt, wird bereits angewendet oder kann unmittelbar angewendet werden. Externes Leistungsangebot ist einer Unternehmung bekannt, wird jedoch noch nicht angewendet und ist nur mittelbar anwendbar.

Im Rahmen der Projektanalyse, dem Kern des Vorgehensmodells, erfolgt ein Abgleich der Nachfrage mit dem bestehenden Angebot, die Ableitung der für den Anwendungsfall adäquaten Gestaltung des Produktentstehungsprozesses sowie die Ableitung eines möglichen Handlungsbedarfes um die effiziente Durchführung des Produktentstehungsprozesses sicherzustellen. Die Projektanalyse gliedert sich in die Teilschritte der Definition der Nachfrage, der Konzeptfindung, dem Projektdesign und der Erstellung des Pflichtenheftes zur Angebotslegung. Eine in Kooperation von Kunde und Lieferant abgestimmte Definition der Nachfrage stellt die Vermeidung von auf falschen Annahmen beruhender Komplexität im Sinne des Bedingungsleichtbaus sicher. Das Ergebnis ist ein gemeinsam erarbeitetes, finales Lastenheft. Dieses beinhaltet neben den definierten Anforderungen eine Priorisierung der Anforderungen seitens des Kunden und leistet so einen wesentlichen Beitrag zur Effektivität im Produktentstehungsprozess.

Im Rahmen der Konzeptfindung wird in einem ersten Schritt ein Abgleich der gestellten Anforderungen sowie deren Priorisierung und den das Produkt definierenden Merkmalen durchgeführt. Hierbei können jene Merkmale identifiziert werden, welche besondere Bedeutung für die Befriedigung der Kundenbedürfnisse besitzen. Basierend auf diesen Erkenntnissen werden die gesammelten Anforderungen in einer transdisziplinären Kooperation der Kerndisziplinen Design (Konstruktion und Berechnung), Forschung und Entwicklung sowie Produktion in ein oder mehrere Konzepte übersetzt. Jedes der entwickelten Konzepte ist durch eine spezifische Kombination von Merkmalsausprägungen definiert, unterscheidet sich dadurch in seiner Wirkung auf die Gestaltung des Produktentstehungsprozesses und beschreibt so einen spezifischen Produktkontext.

Im Rahmen des Projektdesigns erfolgt zunächst die Bewertung des Produktkontextes hinsichtlich seiner Wirkung auf die Gestaltung des Produktentstehungsprozesses. Diese wird in Abstimmung der Kerndisziplinen durchgeführt und erlaubt die Ableitung des Interdependenzgrades. Dieser gibt Aufschluss darüber, wie unabhängig eine Disziplin in der Realisierung einer Merkmalsausprägung agieren kann und erlaubt die Ableitung einer für den jeweiligen Produktkontext adäquaten Gestaltung des Produktentstehungsprozesses in Form eines Standardprojektes, Agilen Projektes oder Forschungsprojektes. Jeder dieser Projekt-Typen erfordert jedoch spezifische Rahmenbedingungen zu dessen effizienter Abwicklung. Die Rahmenbedingungen beschreiben den Projektkontext. Dieser wird einer Bewertung unterzogen und mit den Anforderungen des aus dem Produktkontext abgeleiteten Projekt-Typs abgeglichen. Entsprechen die Rahmenbedingungen nicht den Anforderungen wird ein Handlungsbedarf abgeleitet. Aufgezeigtem Handlungsbedarf kann durch produkt- oder

projektkontextspezifischen Reaktionen begegnet werden. Ein aufgezeigter Handlungsbedarf wird in das Pflichtenheft aufgenommen. Dieses Pflichtenheft bildet die Basis für die Angebotslegung. Bei Annahme des Angebotes kann die Projektabwicklung unter Anwendung des in Abhängigkeit des Produktkontextes und des Projektkontextes abgeleiteten Projekttyps zur Sicherstellung der Effizienz in Angriff genommen werden.

Die Hypothese, wonach die kontextspezifische Integration von Produktentwicklung, Produktionssystementwicklung und Produktionsprozessentwicklung zu gesteigerter Effizienz und Effektivität im Produktentstehungsprozess von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen führt, konnte für einen Anwendungsfall bei einem etablierten und renommierten Vertreter der Branche bestätigt werden.

Ausblick

WILKINS/KARBHARI beschreiben bereits 1991 das Concurrent Engineering als ein ideales Werkzeug für die Entwicklung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen. Wäre CE nicht schon in anderen Anwendungsbereichen etabliert gewesen, wäre es, nach Aussage der Autoren, für die Entwicklung von Bauteilen aus FVK entwickelt worden.⁴⁵⁹

Insbesondere der Praxiseinblick zeigte eine über den traditionellen, interdisziplinären Ansatz des Concurrent Engineering hinausgehende, transdisziplinäre Kooperation der beteiligten Disziplinen. Es konnten hierbei Ähnlichkeiten mit Agilen Entwicklungs-Methoden identifiziert werden. Die Grundsätze, dieser insbesondere in der Softwareentwicklung etablierten Methoden, wurden im Produktentstehungsprozess beim Kooperationspartner jedoch nicht bewusst berücksichtigt. Die Anwendung von agilen Entwicklungs-Methoden in der Entwicklung von Hardware wird aktuell intensiv diskutiert. Eine vertiefte Untersuchung von Produktentstehungsprozessen von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen ermöglicht unter Umständen die Ableitung eines Beitrags zur verstärkten Etablierung von Agilen Entwicklungs-Methoden in der Hardwareentwicklung. Erfahrungen aus der Entwicklung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen könnten hier einen Beitrag leisten. Eine mögliche weiterführende Fragestellung lautet wie folgt:

- Welche Handlungsempfehlungen können aus den Erfahrungen in Produktentstehungsprozessen von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen für eine Agile Hardwareentwicklung abgeleitet werden?

Der Einsatz von Faserverbundkunststoffen, beispielsweise im Fahrzeugbau, kann einen Beitrag zur Reduktion von CO₂ in der Nutzungsphase liefern. Bei isolierter Betrachtung des CO₂ Ausstoßes von Fahrzeugen in der Nutzungsphase bietet der Einsatz von FVK Vorteile aufgrund geringerer zu bewegender Massen. Diese Reduktion ist jedoch sehr oft mit einem höheren CO₂ Ausstoß in der Produktion, beispielsweise im Vergleich mit dem Einsatz von Stahl, verbunden.⁴⁶⁰ Es ist davon auszugehen, dass zukünftig vermehrt die ökologischen Aspekte (von der Produktion bis zum Recycling) in den Fokus der Betrachtungen rücken

⁴⁵⁹ Vgl. Wilkins/Karbhari (1991), S.259

⁴⁶⁰ Vgl. Schnöll et al. (2015), S.1ff.

werden⁴⁶¹. Dem könnte durch die Integration einer Life Cycle Analyse in das entwickelte Vorgehensmodell Rechnung getragen werden. Mögliche weiterführende Fragestellungen lauten wie folgt:

- Wie kann eine Life Cycle Analyse in das entwickelte Vorgehensmodell integriert werden?
- Welcher Mehrwert ist durch eine Integration zu erreichen?

Die Anwendbarkeit und Zweckmäßigkeit des entwickelten Vorgehensmodells konnte im Rahmen der Evaluierung für den Einsatz bei einem etablierten Zulieferer für Komponenten aus Faserverbundkunststoffen bestätigt werden. Es ist davon auszugehen, dass der Einsatz des Vorgehensmodells in weiteren, mit ähnlichen Rahmenbedingungen hinsichtlich zu entwickelnden Produkte sowie des Unternehmensumfeldes konfrontierten, Branchen Mehrwert bieten kann. Grundsätzliche allgemeine Rahmenbedingungen, möglicher weiterer Einsatzgebiete des Vorgehensmodells lauten wie folgt:

- Starke Interdependenzen zwischen den beteiligten Disziplinen im Produktentstehungsprozess
- Hohe Wahrscheinlichkeit von Technologiesprüngen in einem dynamischen Innovationumfeld
- Hohe Wahrscheinlichkeit von Änderungen der Anforderungen und Rahmenbedingungen im Verlauf des Produktentstehungsprozesses
- Auftreten unterschiedlicher Projekttypen in Abhängigkeit der Anforderungen und Rahmenbedingungen

Am Institut für Industriebetriebslehre und Innovationsforschung sind dahingehend Untersuchungen in Kooperation mit einem Hersteller metallischer Hochleistungswerkstoffe geplant.

⁴⁶¹ Vgl. Kraus/Kühnel (2014), S.43

Literaturverzeichnis

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion - Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen, München 2011

Albers, A.; Braun, A.: Der Prozess der Produktentstehung, in: Frank, H. et al. (Hrsg.): Handbuch Leichtbau, München/Wien 2011, S. 1-30

Albers, A.; Burkardt, N.: Experiences with the new educational model "Integrated Product Development" at the University of Karlsruhe, 4th International Symposium on Product Development in Engineering Education '98, Lohmar, 10.-11.12.1998

Albers, A. et al.: Spalten Problem Solving Methodology in the Product Development, International Conference on Engineering Design ICED 05, Melbourne, 15.-18.8.2005

Albers, A.; Gausemeier, J.: Von der fachdisziplinentorientierten zur vorausschauenden und systemorientierten Produktentstehung, in: Ruprecht, R. (Hrsg.): Produktion in Deutschland hat Zukunft - "Forschung für die Produktion von morgen" - Zusammenfassung der Beiträge zum BMBF-Kongress "10. Karlsruher Arbeitsgespräche Produktionsforschung 2010" Karlsruhe 2010, S. 248-256

Albers, A.; Gausemeier, J.: Von der fachdisziplinentorientierten Produktentwicklung zur Vorausschauenden und Systemorientierten Produktentstehung, in: Anderl, R. et al. (Hrsg.): Smart Engineering - Interdisziplinäre Produktentstehung (acatech DISKUSSION), Heidelberg u.a. 2012, S. 17-29

Albers, A.; Meboldt, M.: IPEDM - Integrated product development process management model, based on systems engineering and systematic problem solving, International Conference on Engineering Design ICED'07, Paris, 28.-31.08.2007

Andreasen, M. M.: Concurrent Engineering - effiziente Integration der Aufgaben im Entwicklungsprozess, in: Schäppi, B. et al. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung, München/Wien 2005, S. 293-315

AVK: Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites - Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen, 4. Auflage, Wiesbaden 2014

Beck, K. et al.: Manifest für Agile Softwareentwicklung, 2001, <http://agilemanifesto.org/iso/de/>, Zugriffsdatum 29.06.2015

- Berndes, S.; Stanke, A.: A Concept for Revitalisation of Product Development, in: Bullinger, H.-J. et al. (Hrsg.): Concurrent Simultaneous Engineering Systems, London 1996, S. 7-56
- Biedermann, W.; Maurer, M.; Lindemann, U.: The Multiple-Domain-Approach and Cost Attributes, in: (Hrsg.): München S. 287-289
- Blessing, L. T. M.; Chakrabarti, A.: DRM - a design research methodology, London 2009
- Brand, F.: Transdisziplinarität – Voraussetzung für naturwissenschaftlichen und mathematischen Erkenntnisgewinn?, in: Brand, F. et al. (Hrsg.): Transdisziplinarität. Bestandsaufnahme und Perspektiven. Beiträge zur THESIS-Arbeitstagung im Oktober 2003 in Göttingen, Göttingen 2004, S. 49-61
- Browning, T. R.: Process integration using the design structure matrix, in: Systems Engineering 5/2002, S. 180-193
- Cooper, R. G.: Top oder Flop in der Produktentwicklung - Erfolgsstrategien: Von der Idee zum Launch, Weinheim 2010
- Danilovic, M.; Browning, T. R.: Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices, in: International Journal of Project Management 25/2007, S. 300-314
- Deinzer, D.: Die nächste Generation automobiler Leichtbauwerkstoffe - Statement zum Pressegespräch "Kohlenstofffasern im Automobil", Mannheim 2011, <https://www.vdi.de/uploads/media/wf-2011-04-06-Statement-KiA-Deinzer.rtf>, Zugriffsdatum 21.01.2015
- Deutsches Institut für Normung e.V. : DIN 69901-5: Projektmanagement-Projektmanagementsysteme - Teil 5: Begriffe, Berlin 2009
- Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI 2014 Blatt 2- Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund - Konzeption und Gestaltung, Düsseldorf 1993
- Eckstein, L.; Schmitt, F.; Hartmann, B.: Leichtbau bei Elektrofahrzeugen, in: ATZ 11/2010, S. 788-795
- Edwards, K. L.: An overview of the technology of fibre-reinforced plastics for design purposes, in: Materials & Design 19/1998, S. 1-10

- Egelhoff, W. G.: Information-Processing Theory and the Multinational Enterprise, in: Journal of International Business Studies 22 (3), S. 341-368
- Eggers, U. et al.: Werkstoff- und Halbzeugtechnologien für Leichtbau-Anwendungen, in: Friedrich, H. E. (Hrsg.): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, Wiesbaden 2013, S. 443-726
- Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, 2. Auflage, München/Wien 2003
- Ehrlenspiel, K. et al.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren, 7. Auflage, Berlin/Heidelberg 2014
- Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, 5. Auflage, München/Wien 2013
- Eichlseder, W.; Schöneburg, R.: Anforderungen an den Leichtbau im Fahrzeug, in: Friedrich, H. E. (Hrsg.): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, Wiesbaden 2013, S. 119-175
- Eigner, M.; Anderl, R.; Stark, R.: Interdisziplinäre Produktentstehung, in: Anderl, R. et al. (Hrsg.): Smart Engineering, 2012, S. 7-16
- Ellenrieder, G. et al.: Die Leichtbaustrategien, in: Friedrich, H. E. (Hrsg.): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, Wiesbaden 2013, S. 43-118
- Eppinger, S.; Browning, T. R.: Design structure matrix methods and applications, Cambridge 2012
- Eversheim, W.; Bochtler, W.; Laufenberg, L.: Simultaneous engineering - Erfahrungen aus der Industrie für die Industrie, Berlin/Heidelberg 1995
- Eversheim, W. et al.: A Methodology for an Integrated Design and Process Planning Based on a Concurrent Engineering Reference Model, in: CIRP Annals - Manufacturing Technology 44/1/1995, S. 403-406
- Eversheim, W.; Schuh, G.: Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung, Berlin/Heidelberg 2005
- Eversheim, W.; Schuh, G.; Assmus, D.: Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung, in: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung, Berlin/Heidelberg 2005, S. 5-20

- Evertz, T. et al.: Die Leichtbauwerkstoffe für den Fahrzeugbau, in: Friedrich, H. E. (Hrsg.): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, Wiesbaden 2013, S. 199-442
- Fährlich, K. P.; Meiren, T.: Entwicklung von Dienstleistungen, in: Schäppi, B. et al. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung, München/Wien 2005, S. 677-698
- Feyerabend, F.: Methodische Gewichtsreduzierung - am Beispiel von Industrierobotern, Düsseldorf 1991
- Friedrich, H. E.; Krishnamoorthy, S.: Leichtbau als Treiber von Innovationen, in: Friedrich, H. E. (Hrsg.): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, Wiesbaden 2013, S. 1-30
- Friedrich, H. E. et al.: Werkstoffe und Bauweisen ermöglichen neue Fahrzeugkonzepte, in: Schindler, V. (Hrsg.): Forschung für das Auto von Morgen, Berlin/Heidelberg 2008, S. 301-347
- Gausemeier, J. et al.: Kooperatives Produktengineering - ein neues Selbstverständnis des ingenieurmäßigen Wirkens, Paderborn 2000
- Gerberich, T.: Lean oder MES in der Automobilzulieferindustrie - Ein Vorgehensmodell zur fallspezifischen Auswahl, 2011
- Gläser, J.; Laudel, G.: Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse, 4. Auflage, Wiesbaden 2010
- Gloger, B.: Scrum - Produkte zuverlässig und schnell entwickeln, 3. Auflage, München 2011
- Hab, G. et al.: Automobilentwicklung in Deutschland - wie sicher in die Zukunft? Chancen, Potenziale und Handlungsempfehlungen für 30 Prozent mehr Effizienz Stuttgart 2003
- Hab, G.; Wagner, R.: Projektmanagement in der Automobilindustrie - effizientes Management von Fahrzeugprojekten entlang der Wertschöpfungskette, 4. Auflage, Wiesbaden 2013
- Handke, M.: Innovationen im Mittelstand - Low Tech Unternehmen in Zulieferketten - das Beispiel der Kunststoff verarbeitenden Industrie, in: Schamp, E. W. (Hrsg.): ISWG working papers, o.O. 2005
- Henning, F.; Weidenmann, K.; Bader, B.: Hybride Werkstoffverbunde, in: Frank, H. et al. (Hrsg.): Handbuch Leichtbau, München/Wien 2011, S. 413-428

- Hoven-Nivelstein, W.: Mit neuer Chemie zum Carbon-Serieneinsatz - Statement zum Pressegespräch "Kohlenstofffasern im Automobil", Mannheim 2011, <https://www.vdi.de/uploads/media/wf-2011-04-06-Statement-KiA-Hoven-Nivelstein.rtf>, Zugriffsdatum 21.01.2015
- Jackstien, K.; Vajna, S.: Grundlagen des Integrated Design Engineering, in: Vajna, S. (Hrsg.): Integrated Design Engineering, 2014, S. 51-94
- Jäger, H.: Leicht, fest, steif - Carbonfaser-Verbundwerkstoffe im Automobilbau - Statement zum Pressegespräch "Kohlenstofffasern im Automobil", Mannheim 2011, <https://www.vdi.de/uploads/media/wf-2011-04-06-Statement-KiA-Jaeger.rtf>, Zugriffsdatum 21.01.2015
- Kaiser, A.: Integriertes Variantenmanagement mit Hilfe der Prozesskostenrechnung, Dissertation, Hochschule St. Gallen, 1995
- Karbhari, V. M.; Wilkins, D. J.: Metrics and scales of comparison - links between design and manufacturing of composites, in: International Journal of Materials and Product Technology 6/4/1991, S. 331-345
- Kim, J.-S. et al.: Development of concurrent engineering system for design of composite structures, in: Composite Structures 50/2000, S. 297-309
- Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion - Berechnungsgrundlagen und Gestaltung, 8. Auflage, Wiesbaden 2009
- Klose, P. L. M.; Gänzle, S.: Wirtschaftliche Fahrzeugleichtbaukonzepte großer Baureihen, in: MP Materials Testing 51/2009/1-2, S. 39-47
- Kopp, G.; Burkardt, N.; Majic, N.: Leichtbaustrategien und Bauweisen, in: Frank, H. et al. (Hrsg.): Handbuch Leichtbau, München/Wien 2011, S. 57-76
- Krallmann, H.; Frank, H.; Gronau, N.: Systemanalyse im Unternehmen: Vorgehensmodelle, Modellierungsverfahren und Gestaltungsoptionen, 4. Auflage, München/Wien 2002
- Kraus, T.; Kühnel, M.: Der Globale CFK-Markt, in: O.A. (Hrsg.): Composites-Marktbericht 2014 - Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen, 2014, S. 19-44
- Lässig, R. et al.: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen - Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau, o.O. 2012

- Laurenzi, S.; Marchetti, M.: Advanced Composite Materials by Resin Transfer Molding for Aerospace Applications, in: Hu, N. (Hrsg.): Composites and Their Properties, Rijeka 2012, S. 197-226
- Lindemann, U.: A vision to overcome “chaotic” design for X processes in early phases, International Conference on Engineering Design, ICED'07, Paris, 28.-31.8. 2007
- Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte - Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden, 3. Auflage, Berlin/Heidelberg 2009
- Lindemann, U.; Maurer, M.; Braun, T.: Structural Complexity Management - An Approach for the Field of Produkt Design, Berlin/Heidelberg 2009
- Maschinenmarkt-Industrieportal: Im CFK-Bereich ist ganzheitliches Engineering noch wichtiger als bei Metallen, o.O. 2011, <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/digitalefabrik/articles/329875/>, Zugriffsdatum 21.01.2015
- Maurer, M. S.: Structural Awareness in Complex Product Design, Dissertation, Technische Universität München, 2007
- Meboldt, M.: Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung – als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM), in: Albers, A. (Hrsg.): IPEK Forschungsberichte, Band 29, Karlsruhe 2008
- Meuser, M.; Nagel, U.: ExpertInneninterviews - vielfach erprobt, wenig bedacht: ein Beitrag zur qualitativen Methodendiskussion, in: Garz, D. et al. (Hrsg.): Qualitativ-empirische Sozialforschung: Konzepte, Methoden, Analysen., Opladen 1991, S. 441-471
- Moeller, E.: Polymere Verbundwerkstoffe, in: Moeller, E. (Hrsg.): Handbuch Konstruktionswerkstoffe - Auswahl, Eigenschaften, Anwendung, 2. Auflage, München/Wien 2014, S. 767-784
- Niemann, G.; Winter, H.; Höhn, B.-R.: Maschinenelemente - Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen, Band 1, 4. Auflage, Berlin/Heidelberg 2005
- Noack, J.: Techniken der objektorientierten Softwareentwicklung, Berlin/Heidelberg 2001
- Pahl, G. et al.: Konstruktionslehre - Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung - Methoden und Anwendung, 6. Auflage, Berlin/Heidelberg 2005

- Patzak, G.: Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme - Grundlagen, Methoden, Techniken, Berlin/Heidelberg 1982
- Pümpin, C.; Prange, J.: Management der Unternehmensentwicklung - Phasengerechte Führung und der Umgang mit Krisen, Frankfurt am Main/New York 1991
- Rammersdorfer, F.; Daxner, T.: Berechnungs- und Design Konzepte für den Leichtbau, in: Degischer, H. P. et al. (Hrsg.): Leichtbau - Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsverfahren, Weinheim 2009, S. 14-48
- Raudberget, D.: Practical Applications of Set-Based Concurrent Engineering in Industry, in: Journal of Mechanical Engineering 56(2010)11, S. 685-695
- Raudberget, D.: Enabling Set-Based Concurrent Engineering in Traditional Product Development, in: Culley, S. J. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 18th international Conference on Engineering Design (ICED11), Lyngby/Copenhagen S. 45-56
- Raudberget, D.: Industrial Experiences of Set-Based Concurrent Engineering - Effects, Results and Applications, Chalmers University, 2012
- Ropohl, G.: Allgemeine Technologie - eine Systemtheorie der Technik, 3. Auflage, Karlsruhe 2009
- Schäppi, B.: Integrierte Produktentwicklung - Entwicklungsprozesse zielorientiert und effizient gestalten, in: Schäppi, B. et al. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung, München/Wien 2005,
- Schienmann, B.: Kontinuierliches Anforderungsmanagement - Prozesse-Techniken-Werkzeuge, München 2002
- Schmidt, W.; Puri, W.: Betrachtungen zur Konzeptphase im Konstruktionsprozess von Leichtbauteilen, 12. Symposium "Design for X", Neukirchen, 11.-12.10. 2001
- Schneider, H.: Management werkstofforientierter Innovationen - Ein theoretisch-konzeptioneller Ansatz zur Erklärung und Ausgestaltung einer strategischen Vorsteuerung, Göttingen 1992
- Schnöll, H. P.; Böhm, T.; Ramsauer, C.: Transdisziplinarität im Produktentstehungsprozess von Komponenten aus Faserverbundkunststoffen, in: ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 11/2015, Veröffentlichung zugesagt

- Schnöll, H. P. et al.: CO₂ Reduction Potential of CFRP-Bodywork Concepts Considering Production and In-Use Phase, 7th International Conference: Management of Technology - Step to Sustainable Production, MOTSP 2015, Brela, 10.-12.6.2015
- Schoeneberg, K.-P.: Komplexität – Einführung in die Komplexitätsforschung und Herausforderungen für die Praxis, in: Schoeneberg, K.-P. (Hrsg.): Komplexitätsmanagement in Unternehmen, 2014, S. 13-27
- Schuh, G.: Produktkomplexität managen - Strategien - Methoden - Tools, 2. Auflage, München/Wien 2005
- Schumpeter, J. A.: Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung - Eine Untersuchung über Unternehmergewinn, Kapital, Kredit, Zins und den Konjunkturzyklus, 7. Auflage, Berlin 1987
- Schurig, M.; Rabitsch, C.; Ramsauer, C.: Agile Produktion - Ein Produktionskonzept für volatile Zeiten, in: ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109 (2014), S. 956-959
- Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, 2. Auflage, Berlin/Heidelberg 2007
- Schwaber, K.: Scrum im Unternehmen, Unterschleißheim 2007
- Schwaber, K.; Sutherland, J.: The Scrum Guide - The Definitive Guide to Scrum: The Rules of the Game, o.A. 2013, <http://www.scrumguides.org/docs/scrumguide/v1/Scrum-Guide-DE.pdf#zoom=100>, Zugriffsdatum 20.04.2015
- Smith, P. G.: Flexible Product Development - Building Agility for Changing Markets, San Francisco 2007
- Sobek II, D. K.; Ward, A. C.; Liker, J. K.: Toyota's Principles of Set-Based Concurrent Engineering, in: Sloan Management Review Winter 1999, S. 67-83
- Stachowiak, H.: Allgemeine Modelltheorie, Wien 1973
- Steward, D. V.: The design structure system: a method for managing the design of complex systems, in: IEEE Transactions on Engineering Management EM-28, S. 71-74
- Steward, D. V.: Systems Analysis and Management: Structure, Strategy and Design, 1981

- Thomke, S.; Reinertsen, D.: Agile Product Development: Managing development flexibility in uncertain environments, in: California Management Review Fall 1998; Vol. 41; No. 1, S. 8-30
- Töpfer, G. E. et al.: Arbeitspaket AP1000, Informations System Concurrent/Integrated Engineering (ISCIE), in: Dlr (Hrsg.): "Schwarzer Rumpf" - Realisierung von CFK-Rumpf-komponenten unter Einbeziehung des Concurrent Engineering, Braunschweig 2002, S. 9-26
- Vajna, S.; Burchardt, C.: Modelle und Vorgehensweisen in der integrierten Produktentwicklung, in: Vajna, S. (Hrsg.): Integrated Design Engineering, Berlin/Heidelberg 2014, S. 3-50
- Vajna, S.; Jackstien, K.; Gatzky, T.: Attribute im IDE, in: Vajna, S. (Hrsg.): Integrated Design Engineering, 2014, S. 95-129
- Vajna, S. et al.: CAx für Ingenieure - Eine praxisbezogene Einführung, 2. Auflage, Berlin/Heidelberg 2009
- Wallentowitz, H.; Freidalhoven, A.; Olschewski, I.: Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges, Wiesbaden 2011
- Ward, A. C. et al.: The second Toyota Paradoxon: How Delaying Decisions Can Make Better Cars Faster, in: Sloan Management Review Spring 1995, S. 43-61
- Welge, M.; Friedrich, R.; Shair, A.: Integration von agilen Methoden in der Systementwicklung, Tag des Systemsengineering 2012, Paderborn, 7.-9.11.2012
- Wiedemann, J.: Leichtbau - Elemente und Konstruktion, 3. Auflage, Berlin/Heidelberg 2007
- Wiedemann, M.: CFK - Status der Anwendung und Produktionstechnik im Flugzeugbau, Präsentation im Rahmen der Konferenz Faszination Karosserie, Braunschweig, 26.03.2009
- Wiedemann, M.: CFK - Status der Anwendung und Produktionstechnik im Flugzeugbau, Faszination Karosserie, Braunschweig, 26.03.2009
- Wildemann, H.: Komplexitätsmanagement in Vertrieb, Beschaffung, Produkt, Entwicklung und Produktion, 14. Auflage, München 2013
- Wilkins, D. J.; Karbhari, V. M.: Concurrent engineering for composites, in: International Journal of Materials and Product Technology 6/3/1991, S. 257-268

Wohinz, J. W.: Industrielles Management - Das Grazer Modell, Wien/Graz 2003

Wördenweber, B.; Wickord, W.: Technologie- und Innovationsmanagement im Unternehmen
- Lean Innovation, 3. Auflage, Berlin/Heidelberg 2008

www.bmw.de: <http://www.bmw.de/de/topics/faszination-bmw/bmw-i/konzept.html>,
Zugriffsdatum 30.07.2014

www.duden.de: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Integration>, Zugriffsdatum 10.09.2014

www.duden.de: <http://www.duden.de/rechtschreibung/agil>, Zugriffsdatum 15.06.2015

www.duden.de: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Agilitaet>, Zugriffsdatum 29.06.2015

www.wirtschaftslexikon.gabler.de:
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/effektivitaet.html>, Zugriffsdatum
26.09.2014

www.wirtschaftslexikon.gabler.de:
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/effizienz.html>, Zugriffsdatum 26.09.2014a

Zweck, A.: Technologiemanagement - Technologiefrüherkennung und Technikbewertung, in:
Schäppi, B. et al. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung, München/Wien 2005, S. 169-
193

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gliederung und Aufbau der Arbeit in Anlehnung an die Design Research Methodology nach BLESSING/CHAKRABARTI.....	8
Abbildung 2: Die Produktentstehung als Teil des Produktlebenszyklus.....	10
Abbildung 3: Entwicklung der Produktentstehung	11
Abbildung 4: Rahmenkonzept der integrierten Produkt- und Prozessgestaltung nach EVERSHEIM/SCHUH/ASSMUS	16
Abbildung 5: Methodik der integrierten Produkterstellung nach EHRENSPIEL/MEERKAMM	20
Abbildung 6: Integrationsbereiche des Themenfeldes Innovationsprozesse und Produktentwicklung nach GAUSEMEIER et al.....	23
Abbildung 7: Modellebenen in der Produktentstehung nach MEBOLDT	24
Abbildung 8: Metamodell in der Produktentstehung	25
Abbildung 9: Systematik des Simultaneous Engineering	28
Abbildung 10: Point-based Serial Engineering	29
Abbildung 11: Point-based Concurrent Engineering	29
Abbildung 12: Set-based Concurrent Engineering.....	30
Abbildung 13: Die Produktentstehung im Spannungsfeld der beeinflussenden Elemente	31
Abbildung 14: Gewichts- und Kostenvergleich verschiedener Konstruktionswerkstoffe für Strukturbauteile im Automobilbau	34
Abbildung 15: Einflussgrößen auf die Eigenschaften eines verstärkten Werkstoffes.....	35
Abbildung 16: Vorgehensplan in der Entwicklung von FVK-Bauteilen nach VDI 2014.....	36
Abbildung 17: Spezifikationen für FVK-Bauteile nach VDI 2014.....	37
Abbildung 18: Einflüsse bei der Bauteilgestaltung nach VDI 2014	37
Abbildung 19: Ablauf für die Dimensionierung eines FVK-Bauteils.....	38
Abbildung 20: Mechanische Eigenschaften einer unidirektionalen Einzelschicht in Abhängigkeit der Abweichung der Faserorientierung von der Belastungsrichtung.....	39
Abbildung 21: Gliederung vorimprägnierter Faser-Matrix-Halbzeuge.....	44
Abbildung 22: Produktionsschritte im Material-Transformationsprozess	44
Abbildung 23: Herstellungsverfahren für FVK-Bauteile in Abhängigkeit von Bauteilkomplexität und Automatisierungsgrad.....	45
Abbildung 24: Vorbereitung eines Prepreg-Bauteils für den Aushärtvorgang und Aufbau eines Autoklav	46
Abbildung 25: Prozessschritte des RTM-Verfahren	47

Abbildung 26: Mögliche Grundformen und Prinzip des Wickelverfahrens.....	48
Abbildung 27: „Innovationskonglomerat“ Werkstofforientierter Innovationen nach SCHNEIDER.....	49
Abbildung 28: Systeminnovationsmodell werkstofforientierter Innovationen	50
Abbildung 29: Schlüsselstellung von Werkzeugbau und der Werkzeugentwicklung.....	52
Abbildung 30: Kategorisierung von Innovationen aus der Sicht kunststoffverarbeitender Unternehmen nach HANDKE	53
Abbildung 31: Integration in der Produktentwicklung von FVK-Komponenten	56
Abbildung 32: Entwicklungsprozess von Faserverbund-Strukturen nach KIM et al.....	57
Abbildung 33: Ablaufdiagramm einer simultanen Produkt- und Produktionssystementwicklung von RTM Helikopter-Komponenten	58
Abbildung 34: Anwendungsmodell eines Produktentstehungsprozesses einer Felge aus Faserverbundkunststoff	59
Abbildung 35: Referenzmodell für die Entwicklung von Produkten aus Faserverbundkunststoffen nach ALBERS/BRAUN.....	60
Abbildung 36: Determinierende Faktoren der Eigenschaften eines FVK-Bauteils	61
Abbildung 37: Darstellung der Kosten der Gewichtseinsparung und Leichtbauökonomie nach ELLENRIEDER et al.	69
Abbildung 38: Systematische Vorgehensweise des leichtbaugerechten Konstruierens nach KLEIN	71
Abbildung 39: Ablauf einer ganzheitlichen Anwendungsstrategie nach ELLENRIEDER et al.	72
Abbildung 40: Leichtbaustrategien und vorgeschlagener Ablauf während des Entwicklungsprozesses nach KOPP/BURKARDT/MAJIC.....	74
Abbildung 41: Leichtbau-Trialog nach FRIEDRICH/KRISHNAMOORTHY	77
Abbildung 42: Darstellung verschiedener Beziehungsarten von Aktivitäten mit Hilfe einer Prozessarchitektur Design Struktur Matrix unter Anwendung der IC/FBD-Konvention	80
Abbildung 43: Grundaufbau der erstellten Multidomain Matrix auf Basis der Sekundärdatenanalyse	81
Abbildung 44: Phasen des Soll-Produktentstehungsprozesses beim Kooperationspartner.....	82
Abbildung 45: DSM _A	84
Abbildung 46: Beziehungen der ausführenden Einheiten	85
Abbildung 47: Ist-Produktentstehungsprozess	88
Abbildung 48: Disziplinarität, Multidisziplinarität, Interdisziplinarität und Transdisziplinarität	91
Abbildung 49: Projekttyp Standard	93

Abbildung 50: Projekttyp Agil	95
Abbildung 51: Agiles Manifest für Agile Softwareentwicklung	96
Abbildung 52: Projekttyp Forschung	99
Abbildung 53: Komplexität von Systemen	104
Abbildung 54: Komplexitätsoptimum nach KAISER	106
Abbildung 55: Zielsystem, Handlungssystem und Sachsystem	111
Abbildung 56: Systemgrenzen	113
Abbildung 57: Grundstruktur des Vorgehensmodells zur kontextspezifischen Gestaltung des Produktentstehungsprozesses von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen	115
Abbildung 58: Anforderungsarten.....	116
Abbildung 59: Merkmale von FVK-Bauteilen.....	118
Abbildung 60: Modellschritt I	122
Abbildung 61: Transdisziplinäre Konzeptfindung der Kerndisziplinen.....	123
Abbildung 62: Modellschritt II	126
Abbildung 63:Beispielhafte Bewertung von Neuigkeitsgrad und Interdependenzgrad	130
Abbildung 64: Diagramm zur Bestimmung des Projekt-Typs in Abhängigkeit des Interdependenzgrades	131
Abbildung 65: Visualisierung der Interdependenzgrade (IG) zwischen den Disziplinen sowie deren Neuigkeitsgrade (NG).....	132
Abbildung 66: Beispiel einer Bewertung des Gesamtkontextes	135
Abbildung 67: Beispielhafte Bewertung mittels PPK-Matrix.....	136
Abbildung 68: PPK-Matrix - Stabilität der Anforderungen	137
Abbildung 69: Prozessrahmen des Vorgehens in einem Agilen Projekt.....	139
Abbildung 70: Prozessrahmen unter Berücksichtigung der Prinzipien des Set-Based Concurrent Engineering nach RAUDBERGET	140
Abbildung 71: Visualisierung von Neuigkeitsgraden (NG) und Interdependenzgraden (IG) zur Illustration des Projekt-Status.....	141
Abbildung 72: Mögliche Iterationen im Rahmen der Projektanalyse	144
Abbildung 73: PPK-Matrix - Stabilität der Anforderungen	174
Abbildung 74: PPK-Matrix - Mögliche Projektlaufzeit.....	175
Abbildung 75: PPK-Matrix - Neuartigkeit des Produktes	175
Abbildung 76: PPK-Matrix - Erwarteter Projektumfang.....	176
Abbildung 77: PPK-Matrix – Sicherheitsrelevanz	176
Abbildung 78: PPK-Matrix - Verfügbarkeit des Kunden.....	177

Abbildung 79: PKK-Matrix - Stabilität des Projektumfeldes	177
Abbildung 80: PKK-Matrix - Grad der Verteilten Entwicklung	178
Abbildung 81: PKK-Matrix - Mögliche Beteiligung des Kunden	178
Abbildung 82: PKK-Matrix - Technische Qualifikation der Mitarbeiter	179
Abbildung 83: PKK-Matrix - Erfahrung des Teams	179
Abbildung 84: PKK-Matrix - Teamkontinuität	180
Abbildung 85: PKK-Matrix - Flexibilität der Organisation	180

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Identifizierte Bestandteile von Scrum in Agilen Projekten im Rahmen des Praxiseinblickes.....	97
Tabelle 2: Differenzierungsmerkmale festgestellter Projekttypen.....	100
Tabelle 3: Bewertungsschema für die Priorisierung gestellter Anforderungen.....	122
Tabelle 4: Merkmalsausprägungen von Konzepten für FVK-Bauteile.....	127
Tabelle 5: Bewertungsschema für den Neuigkeitswert der Merkmale für die Disziplinen....	128
Tabelle 6: Kriterien zur Bewertung der Projektkontextspezifischen Rahmenbedingungen...	134

Abkürzungsverzeichnis

AF	.....	Anforderungsliste
BMC	.....	Bulk Moulding Compound
CAD	.....	Computer Aided Design
CAM	.....	Computer Aided Manufacturing
CE	.....	Concurrent Engineering
C-Faser	.....	Kohlenstoff-Faser
CFK	.....	Kohlenstoff-Faser verstärkter Kunststoff
CSE	.....	Concurrent Simultaneous Engineering
DFX	.....	Design for X
DMM _{AE-A}	.....	Aktivitäten Ausführende Einheit Domain Mapping Matrix
DMM _{M-A}	.....	Merkmals Anforderungen Domain Mapping Matrix
DMM _{M-A/Prio}	.....	priorisierte Merkmals Anforderungs Domain Mapping Matrix
DMM _{M-D}	.....	Merkmal Disziplinen Design Struktur Matrix
D _{Prio}	.....	Priorisierungs Diagonalmatrix
DRM	.....	Design Research Methodology
DSI	.....	Descriptive Study I
DSII	.....	Descriptive Study II
DSM	.....	Design Struktur Matrix
DSM _A	.....	Aktivitäts-Design Struktur Matrix
DSM _D	.....	Disziplinen Design Struktur Matrix
DSM _M	.....	Merkmals Design Struktur Matrix
DSM _{M/Prio}	.....	priorisierte Merkmals Design Struktur Matrix
FMEA	.....	Failure Mode and Effects Analysis
FVK	.....	Faserverbundkunststoff
GFK	.....	Glasfaser verstärkter Kunststoff
IC/FBD-Konvention	.....	Input-Column/Feedback-Below-Diagonal Konvention
IG	.....	Interdependenzgrad
IPE-Methodik	.....	Integrierte Produkterstellungsmethodik
IR/FAD Konvention	.....	Input-Row/Feedback-Above-Diagonal Convention
KMU	.....	Kleine und mittlere Unternehmen
MDM	.....	Multiple Domain Matrix
MMD	.....	Multi Material Design
NG	.....	Neuigkeitsgrad
PBCE	.....	Point-based Concurrent Engineering
PKK-Matrix	.....	Produkt- Projektkontext-Matrix
PLM	.....	Product Lifecycle Management
PS	.....	Prescriptive Study
RC	.....	Research Clarification
RTM	.....	Resin Transfer Moulding
SBCE	.....	Set-based Concurrent Engineering
SE	.....	Simultaneous Engineering
SMC	.....	Sheet Moulding Compound

Formelverzeichnis

Formel 1: DSM_{AE}	82
Formel 2: DSM_M	124
Formel 3: D_{Prio}	124
Formel 4: $DMM_{M-A/Prio}$	125
Formel 5: $DSM_{M/Prio}$	125
Formel 6: DSM_D	129
Formel 7: Neuigkeitsgrad	129
Formel 8: Interdependenzgrad	130

Anhang A

Leitende Fragestellungen zur Erhebung des Produktentstehungsprozesses in der betrieblichen Praxis

Einstiegsfragen:

- Welche Erfahrung haben Sie im Bereich Faserverbundkunststoffe?
- Welche Ausbildung haben Sie?
- Welche Position im Unternehmen haben Sie inne?
- Welche Erfahrungen in anderen Bereichen haben Sie?

Leitende Fragestellungen zum Produktentstehungsprozess allgemein:

- Wie läuft die Entwicklung eines Bauteils aus FVK allgemein ab?
- Welche besonderen Herausforderungen bestehen im Entwicklungsprozess von FVK-Bauteilen?
- Welche Aktivitäten müssen im Produktentstehungsprozess von Bauteilen aus FVK gesetzt werden?
- Im Rahmen welcher Aktivität(en) sind Sie tätig?

Leitende Fragestellungen zu den einzelnen Aktivitäten im Produktentstehungsprozess:

- Beschreiben Sie die Aufgabe dieser Aktivität!
- Welche Inputs (Daten) benötigt man um die Aktivität zu erledigen?
- Wer sind die Lieferanten der benötigten Inputs?
- Welche(n) Input(s) benötigen Sie um mit der Aktivität starten zu können (Reihenfolge)?
- Welche Entscheidungen müssen im Rahmen der beschriebenen Aktivität getroffen werden?
- Welche Outputs (Daten) werden bei der Ausführung der Aktivität generiert?
- Wer sind die Kunden der generierten Outputs?
- In welcher Reihenfolge können Sie die generierten Outputs den Kunden bereitstellen?

Anhang B

Produkt- Projektkontext (PKK)-Matrizen

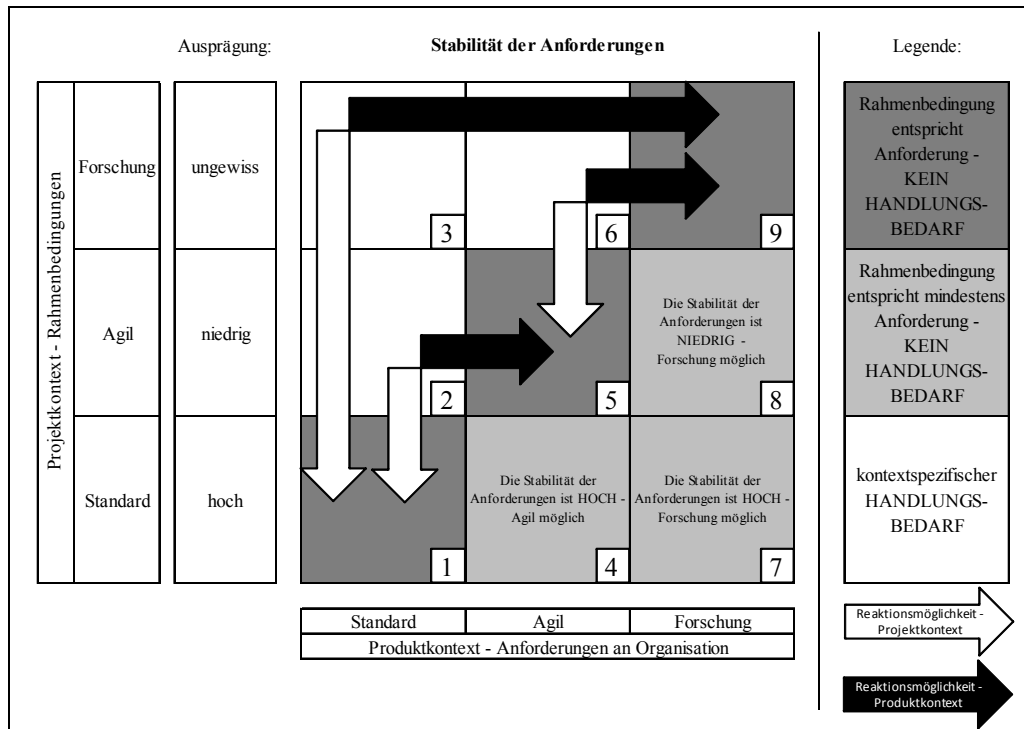


Abbildung 73: PKK-Matrix - Stabilität der Anforderungen⁴⁶²

⁴⁶² Eigene Darstellung

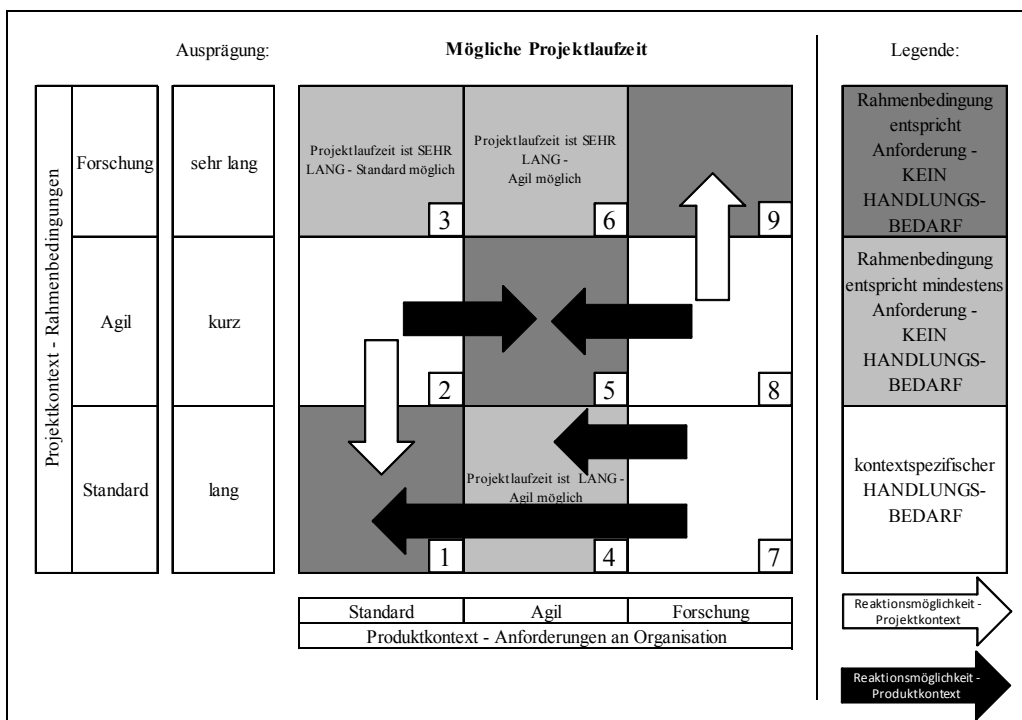


Abbildung 74: PKK-Matrix - Mögliche Projektlaufzeit⁴⁶³

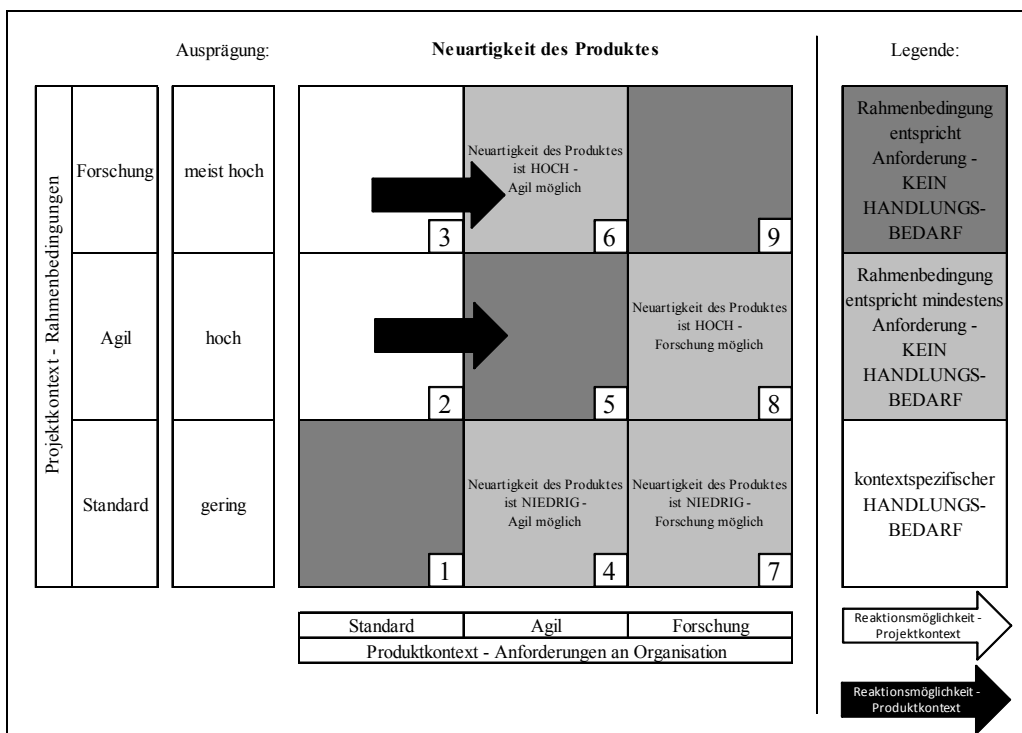


Abbildung 75: PKK-Matrix - Neuartigkeit des Produktes⁴⁶⁴

⁴⁶³ Eigene Darstellung

⁴⁶⁴ Eigene Darstellung

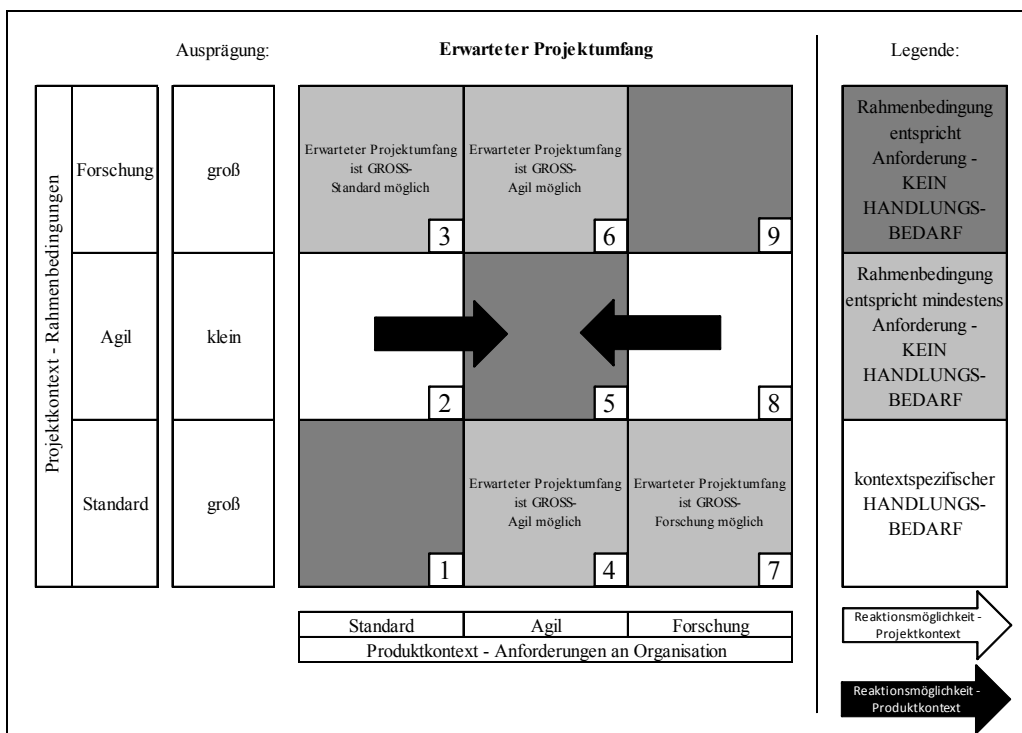


Abbildung 76: PKK-Matrix - Erwarteter Projektumfang⁴⁶⁵

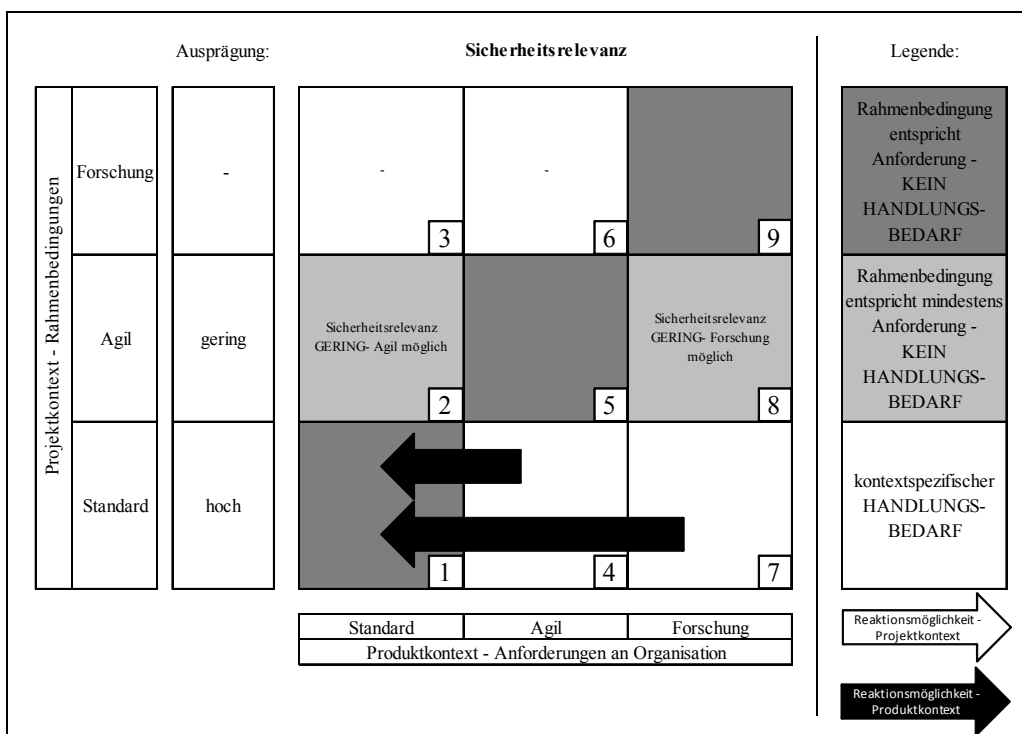


Abbildung 77: PKK-Matrix – Sicherheitsrelevanz⁴⁶⁶

⁴⁶⁵ Eigene Darstellung

⁴⁶⁶ Eigene Darstellung

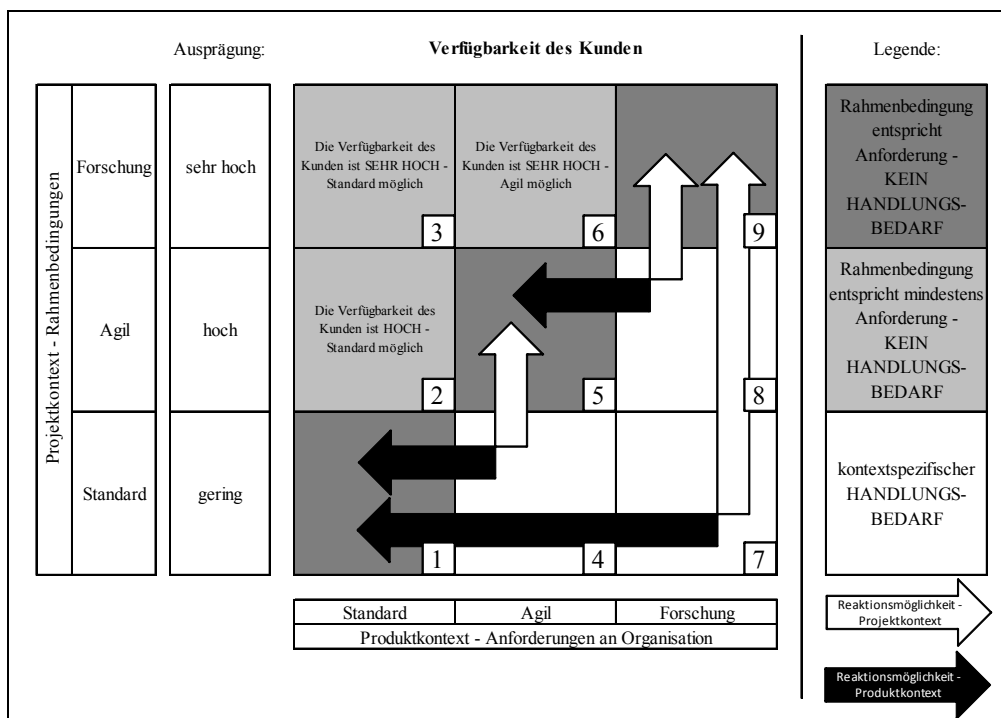


Abbildung 78: PKK-Matrix - Verfügbarkeit des Kunden⁴⁶⁷

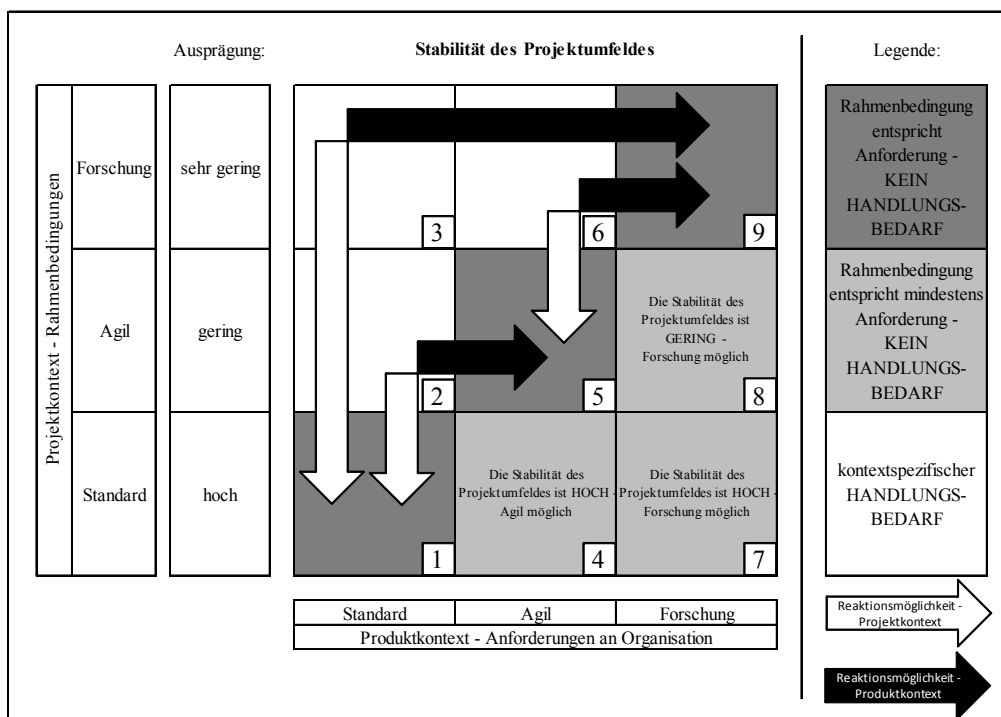


Abbildung 79: PKK-Matrix - Stabilität des Projektumfeldes⁴⁶⁸

⁴⁶⁷ Eigene Darstellung

⁴⁶⁸ Eigene Darstellung

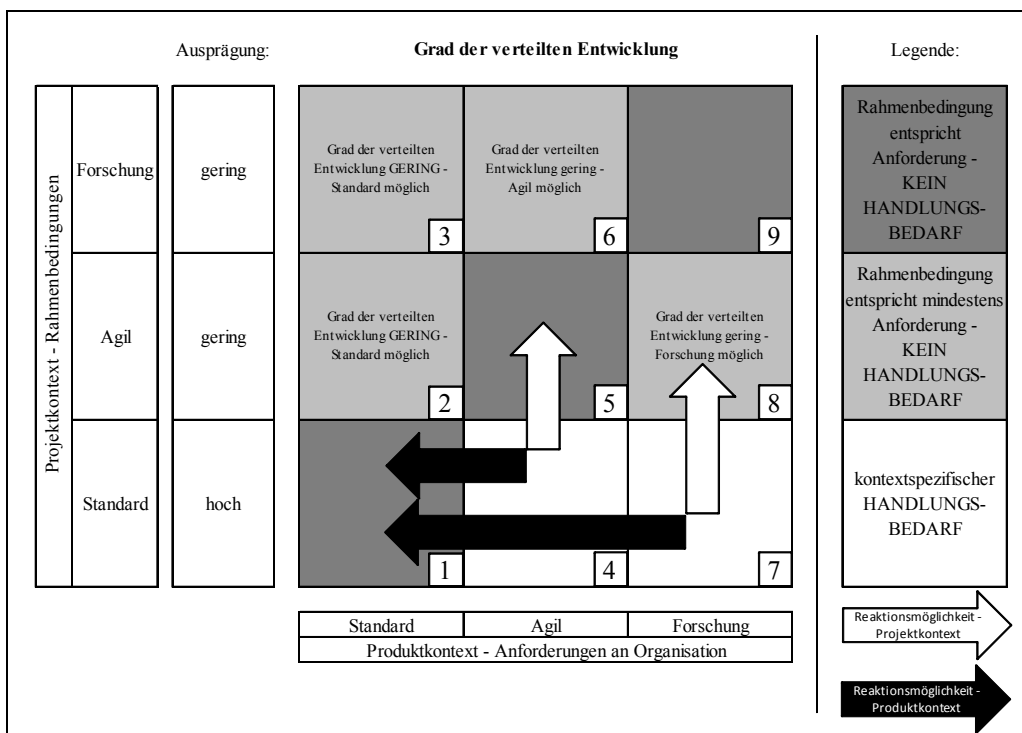


Abbildung 80: PKK-Matrix - Grad der Verteilten Entwicklung⁴⁶⁹

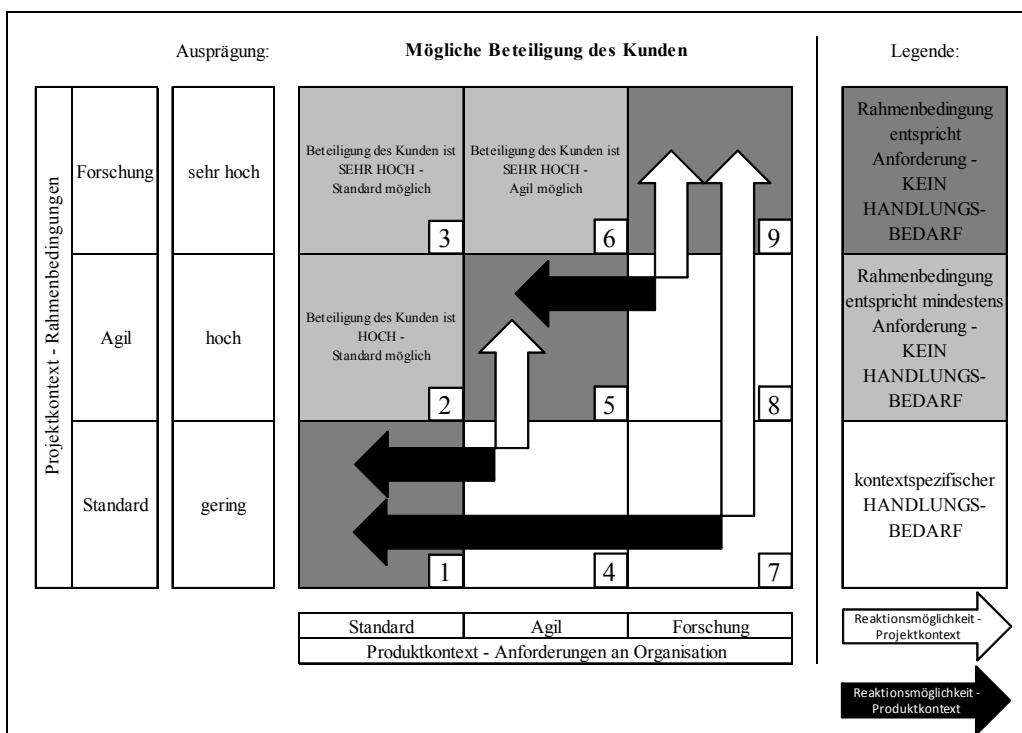


Abbildung 81: PKK-Matrix - Mögliche Beteiligung des Kunden⁴⁷⁰

⁴⁶⁹ Eigene Darstellung

⁴⁷⁰ Eigene Darstellung

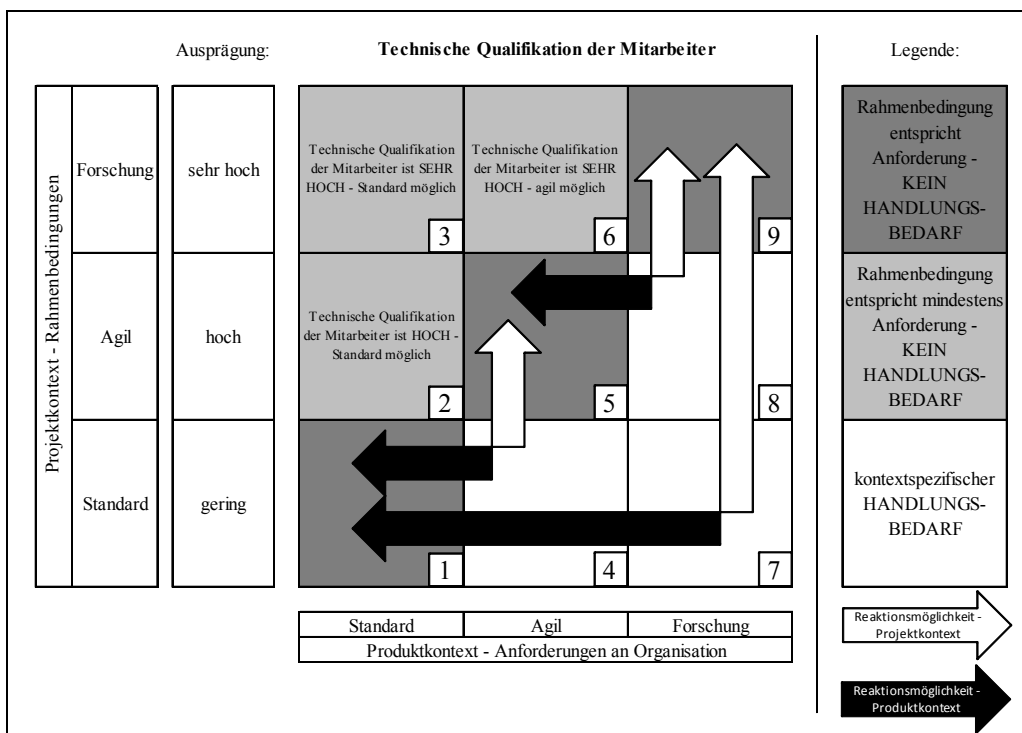


Abbildung 82: PKK-Matrix - Technische Qualifikation der Mitarbeiter⁴⁷¹

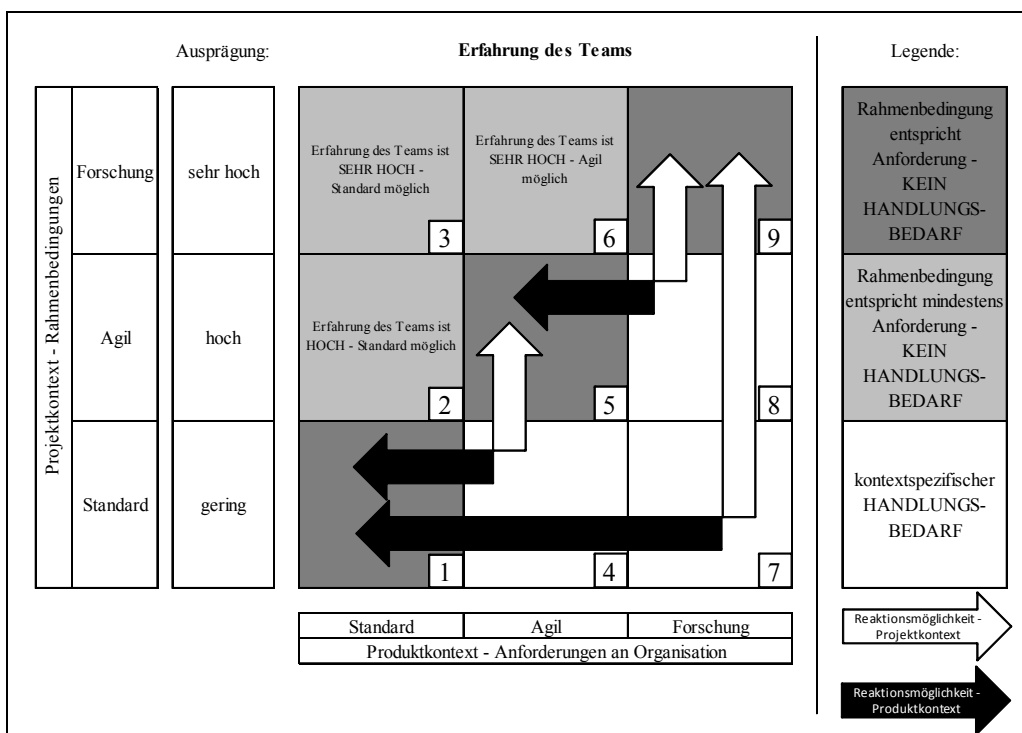


Abbildung 83: PKK-Matrix - Erfahrung des Teams⁴⁷²

⁴⁷¹ Eigene Darstellung

⁴⁷² Eigene Darstellung

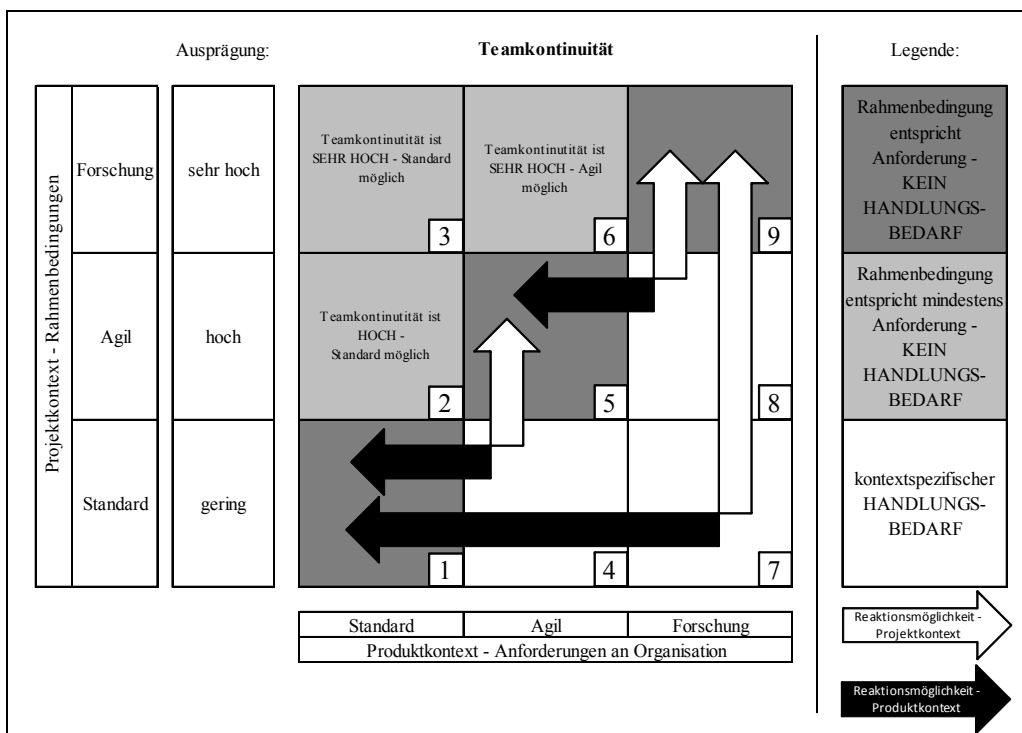


Abbildung 84: PKK-Matrix - Teamkontinuität⁴⁷³

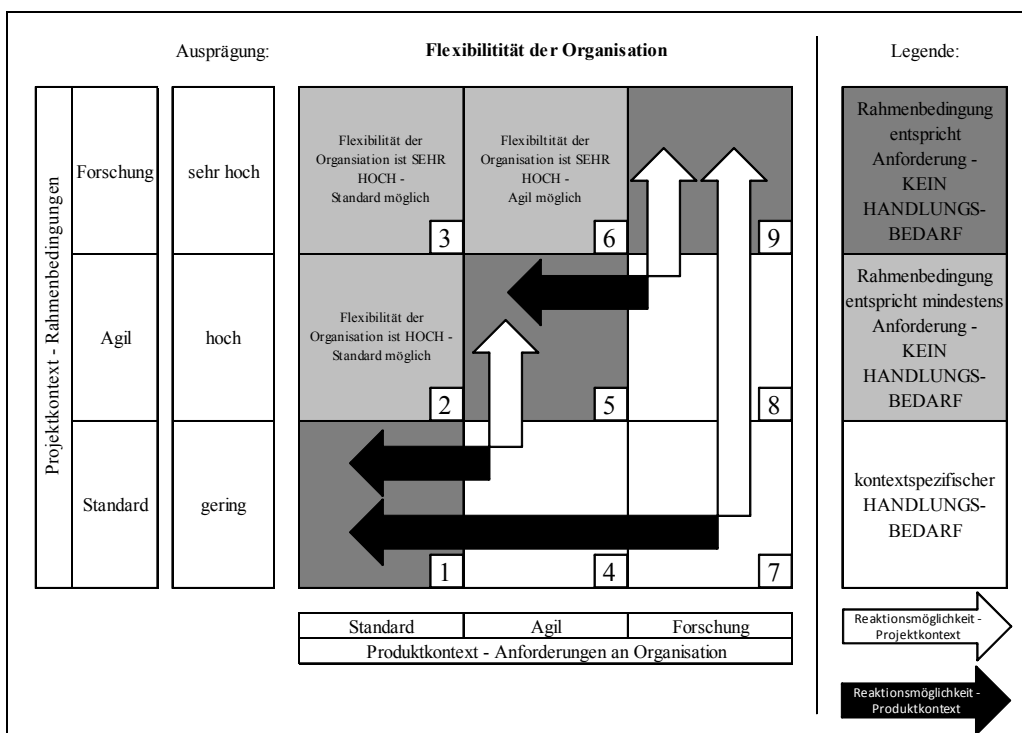


Abbildung 85: PKK-Matrix - Flexibilität der Organisation⁴⁷⁴

⁴⁷³ Eigene Darstellung

⁴⁷⁴ Eigene Darstellung

Anhang C

Leitende Fragestellungen zur Evaluierung des entwickelten Vorgehensmodells

Einstiegsfragen:

- Welche Erfahrung haben Sie im Bereich Faserverbundkunststoffe?
- Welche Ausbildung haben Sie?
- Welche Position im Unternehmen haben Sie inne?
- Welche Erfahrungen in anderen Bereichen haben Sie?

Zur Grundstruktur des entwickelten Vorgehensmodells:

- Ist das Vorgehen verständlich und nachvollziehbar?
- Ist das Vorgehensmodell logisch aufgebaut?
- Gibt es Ähnlichkeiten zum Vorgehen in Ihrer Unternehmung?

Zur Diskussion der Teilschritte des Vorgehensmodells:

A/B: Angebot und Nachfrage

- Beschreiben die Anforderungen seitens des Kunden ein FVK-Bauteil ausreichend?
- Charakterisierung die Merkmale ein FVK-Bauteil ausreichend?

C-I: Definition der Nachfrage

- Ist das Vorgehen zur Definition der Nachfrage zweckmäßig und umsetzbar?
- Welcher Mehrwert würde sich durch das Vorgehen ergeben?
- Welche limitierenden Faktoren für die Anwendung könnten bestehen?

C-II: Konzeptfindung

- Ist das Vorgehen zur Konzeptfindung zweckmäßig und umsetzbar?
- Welcher Mehrwert würde sich durch das Vorgehen ergeben?
- Welche limitierenden Faktoren für die Anwendung könnten bestehen?

C-III: Projektdesign – Bewertung des Produktkontext

- Ist das Vorgehen zur Bewertung des Produktkontextes zweckmäßig und umsetzbar?
- Welcher Mehrwert würde sich durch das Vorgehen ergeben?
- Welche limitierenden Faktoren für die Anwendung könnten bestehen?

C-III: Projektdesign – Bewertung des Projektkontext

- Beschreiben die genannten Rahmenbedingungen den Projektkontext hinreichend?
- Ist das Vorgehen zur Bewertung des Projektkontextes zweckmäßig und umsetzbar?
- Welcher Mehrwert würde sich durch das Vorgehen ergeben?
- Welche limitierenden Faktoren für die Anwendung könnten bestehen?

C-III: Projektdesign – Abgleich von Produkt- und Projektkontext

- Ist das Vorgehen zum Abgleich von Produkt- und Projektkontext zweckmäßig und umsetzbar?
- Welcher Mehrwert würde sich durch das Vorgehen ergeben?
- Welche limitierenden Faktoren für die Anwendung könnten bestehen?

C-IV: Projektdesign – Erstellung des Pflichtenheftes zur Angebotserstellung

- Ist das Vorgehen zur Erstellung des Pflichtenheftes zweckmäßig und umsetzbar?
- Welcher Mehrwert würde sich durch das Vorgehen ergeben?
- Welche limitierenden Faktoren für die Anwendung könnten bestehen?

D: Projektabwicklung

- Sind die Umsetzung der Prinzipien der Agilen Entwicklung und des Set-based Concurrent Engineering zweckmäßig und umsetzbar?
- Welcher Mehrwert würde sich durch das Vorgehen ergeben?
- Welche limitierenden Faktoren für die Anwendung könnten bestehen?

