

Komplexität im U-Bootbau beherrschen – ein methodischer Ansatz

Sandra Eilmus¹, Eren Erkul², Thomas Gumpinger¹, Robert Munde², Dr. Marc Pein², Sven Werner²

¹ *Odego GmbH*

² *thyssenkrupp Marine Systems*

Abstract

Managing complexity is a crucial success factor building highly integrated technological products as submarines are. Facing this challenge thyssenkrupp Marine System developed a methodical approach combining Model Based Systems Engineering (MBSE) with modular product family design. To ensure applicability a product architecture model is developed and realized by a software tool. The underlying meta-model is enhanced with domains and partial models supporting modularization.

Keywords: Modularization, Systems Engineering, Modelling, Complexity

1 Ausgangslage an zwei Beispielen aus der Praxis

Produktentwicklungsprozesse im U-Bootbau unterliegen Randbedingungen, die ein durchgängiges Komplexitätsmanagement auf verschiedenen Ebenen erfordern. Geringe Stückzahlen und hohe Kundenindividualität führen zu hohen wiederkehrenden Aufwänden in der Produktdefinition und Entwicklung. Extrem lange Zeiten vom Auftrag bis zur Auslieferung und hohe Absicherungsaufwände erzeugen komplexe und langwierige Prozesse. Die ausgeprägte technische

Komplexität der Produkte sowie der hohe Integrationsgrad verstärken die Aufwände hervorgerufen durch Produktvielfalt, Anforderungsvielfalt und diverse beteiligte Disziplinen.

Die folgenden zwei kurzen Beispiele veranschaulichen oben genannte Komplexität, sowie die Notwendigkeit, zwischen Organisationseinheiten abgestimmte Prozesse zu etablieren.

U-Boote besitzen sogenannte Tauchzellen, um den Auftrieb des Bootes beeinflussen zu können. Diese Zellen sind unten offene Tanks im Außenschiff, die Be- und Entlüftungsventile besitzen, um Seewasser in den Tank hineinströmen zu lassen oder durch Druckluft das Seewasser auszudrücken. Die Zellen besitzen folgende Schnittstellen zu konstruierenden Gewerken: Schiffbau (u.a. Auslegung Stahlstrukturen gegen Überdruck bei dem Ausblasen), Schiffstechnik (Druckluftsystem), Projektierung (Sicherstellen der maximalen Zeit bis die Zelle geleert ist) und räumliche Koordinierung bzw. CAD-Konstruktion der Zellen. Im vorliegenden Beispiel wurde während der Erprobung eines Bootes festgestellt, dass die maximale Zeit zum Leeren der Tauchzellen überschritten wird. Da dieses System über vier verschiedene Organisationseinheiten verteilt ist, gestaltet sich die Fehlersuche entsprechend komplex, da jede Organisationseinheit zunächst die in ihrem Fachbereich liegenden Konstruktionsergebnisse untersucht und mit den bekannten Schnittstellenparametern abgleicht, womit entsprechende Zeitaufwände verbunden sind. Die Lösung des Problems liegt in der interdisziplinären Betrachtung des Problems, unabhängig von der Organisationseinheit. Hierbei wurde festgestellt, dass eine Druckerhöhung des Ausblasedrucks aufgrund der Festigkeit der Zellen nur mit hohem Umbauaufwand möglich ist, jedoch die Reduzierung der Druckverluste des ausströmenden Wassers durch Änderungen der Rohrleitungsdimensionierung vergleichsweise einfach möglich ist, womit die geforderte Zeit zum Leeren erfüllt wurden. Fehlerursache sind damit unklare Zuständigkeiten für die Gesamtfunktion des Systems, sowie ungenügende Schnittstellenbeschreibungen der Systemnahtstellen. Wie im Folgenden gezeigt wird, lässt sich beides durch Einsatz einer systemorientierter Organisation und strukturierter Methoden vermeiden.

Das zweite Beispiel beschreibt die Wirkung von Variantenvielfalt am Beispiel von Armaturen (z.B. Kugelhähne, Ventile...). Verschiedene Kundenanforderungen, daraus resultierende Auslegungskriterien, Anforderungen an die Zertifikate und eine Vielzahl eingebundener Personen zu verschiedenen Zeitpunkten führen dazu, dass die Wiederverwendung gleicher Armaturen in der gleichen Bootsklasse oder über verschiedene Bootsaufträge hinweg minimal sein kann. Im Extremfall können verschiedene Organisationsbereiche, z.B. die Schiffstech-

nik einen Kugelhahn für das Seekühlwassersystem beschreiben, der in den Anforderungen und der Dimensionierung genau dem Kugelhahn entspricht, den die Kollegen des Waffenrohres anfordern. Beide Organisationseinheiten fragen anschließend die Armatur getrennt bei Herstellern an. Einhergehend treten Aufwände bei der administrativen Bewirtschaftung im PLM-System auf. Ohne organisationsübergreifende Instanz, die solche Doppelbeschreibung und -anfragen verhindert, ist der Armaturenvielelt keine Grenze gesetzt. Um diese zu begrenzen, bedarf es eindeutiger Definitionsprozesse, im PLM verfügbare, standardisierte Beschreibungen von Armaturen und deren Modelle, sowie modular aufgebaute Armaturen, um mit geringer interner Varianz eine größtmögliche Abdeckung der Anforderungen zu erlangen.

2 Methodischer Ansatz

Um diesen Herausforderungen gerecht zu werden, wird im Rahmen des Projekts Subflex ein neuer Ansatz auf den Ebenen Methode, Prozess und Modellbildung entwickelt (Abbildung 1).

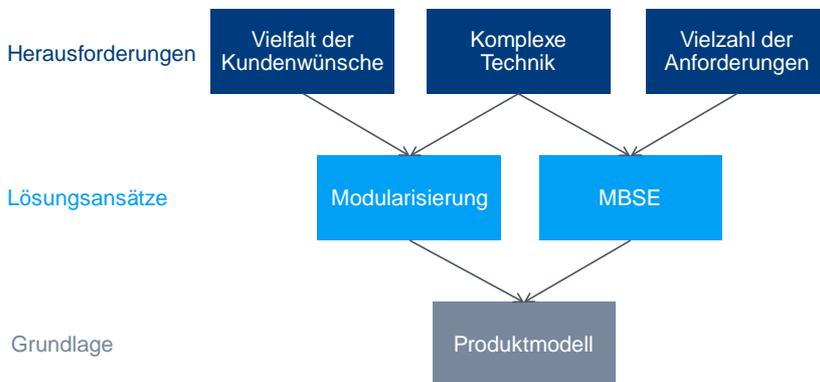


Abbildung 1: Herausforderung, Lösungen und Grundlagen für das Komplexitätsmanagement im Schiffbau

Um sowohl die technische als auch die varianzinduzierte Komplexität zu handhaben, werden modulare Strukturen entwickelt. Kundenaufträge werden zukünftig aus einem modularen Baukasten konfiguriert. Methoden der Modularisierung aus dem Integrierten PKT-Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilien [1] gelten als Grundlage dafür und werden für die spezifischen Anforderungen weiterentwickelt.

Systems Engineering (SE) ermöglicht einen transparenten Prozess über die gesamte Wertschöpfungskette. SE ist ein bereichsübergreifender Ansatz und

ein Mittel, um die erfolgreiche Realisierung von anforderungsgerechten Systemen zu ermöglichen. Es konzentriert sich darauf, Kundenbedarf und erforderliche Funktionalität früh im Entwicklungsprozess zu definieren, Anforderungen zu dokumentieren und dann fortzufahren mit Designsynthese und Design-Bestätigung unter Berücksichtigung aller Aspekte des Lebenszyklus: Anwendung, Kosten und Zeitplan, Leistung, Schulung und Unterstützung, Nachweis, Produktion und Verwertung. SE berücksichtigt sowohl den wirtschaftlichen als auch den technischen Bedarf aller Kunden mit dem Ziel, ein Qualitätserzeugnis bereitzustellen, das den Benutzerbedarf deckt [2].

In diesem Kontext ist ein System eine Kombination aus interagierenden Elementen, um ein oder mehrere festgelegte Zwecke zu erfüllen. Dabei werden die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des Systems und zwischen dem System und seiner Umgebung abgebildet und untersucht. Die Wechselwirkungen geschehen durch Stoff-, Energie- und/oder Informations-Fluss [3].

Diverse Aspekte des SE werden schon seit vielen Jahren bei thyssenkrupp Marine Systems angewendet. Zum Beispiel wird das V-Modell XT in weiten Bereichen eingesetzt. Neu ist die Sammlung und Anpassung der Prozesse an die ISO/IEC 15288 und der modellbasierte Ansatz (MBSE) [2], der auch die Entwicklung eines modular aufgebauten U-Bootes unterstützen soll.

thyssenkrupp Marine Systems hat eine lange Tradition im U-Bootbau. U-Boote wurden und werden an dem Standort Kiel konstruiert und gebaut, lange bevor sich Systems Engineering als Ingenieurdisziplin etabliert hat. Durch einen ständigen Wandel des Unternehmens und dem Einbringen immer neuer punktueller Innovationen (Brennstoffzelle, Antriebstechnologie, Kompositwerkstoffe, Batterietechnologien, Waffensysteme) hat sich das Unternehmen erfolgreich zum Weltmarktführer nicht-nuklearer U-Boote entwickelt. Im globalen Umfeld eines wachsenden Wettbewerbs und steigender Kundenanforderungen ist ein proaktiver Wandel notwendig, um damit die zu erwartenden Bedürfnisse der Kunden zu erfüllen. Die Kosten zu senken, ist ebenfalls ein wichtiger Treiber. Dies wird sowohl durch das Beseitigen von überflüssigen Elementen ermöglicht als auch durch Modularität. Diese sorgt neben der Konfigurierbarkeit für eine erhöhte Flexibilität, die ebenfalls von Kunden erwartet wird. Zuletzt wird sich zukünftig mehr und mehr die Komplexität von U-Booten erhöhen, Off-the-Shelf Forderungen und kürzer getaktete Technologiesprünge in der Mechatronik sind zu erwarten. Ein modularer systematischer Produktentwicklungsansatz ermöglicht hier eine bessere Skalierbarkeit und Austauschbarkeit als der traditionelle Ansatz.

3 Übergeordnetes Architekturmodell

Sowohl die Modularisierung als auch das MBSE greifen auf ein sauber hinterlegtes Produktmodell zurück, siehe Abbildung 2. Dieses wird in einer eigens im Konzern entwickelt und in einer konzerneigenen Software (Design Database) abgebildet. Kern des Produktmodells ist die systemorientierte Produktstruktur. Diese wird mit Elementen verschiedener anderer Domänen verknüpft, um für jeden Arbeitsschritt bei der Modularisierung und im MBSE die notwendigen Informationen abbilden zu können.

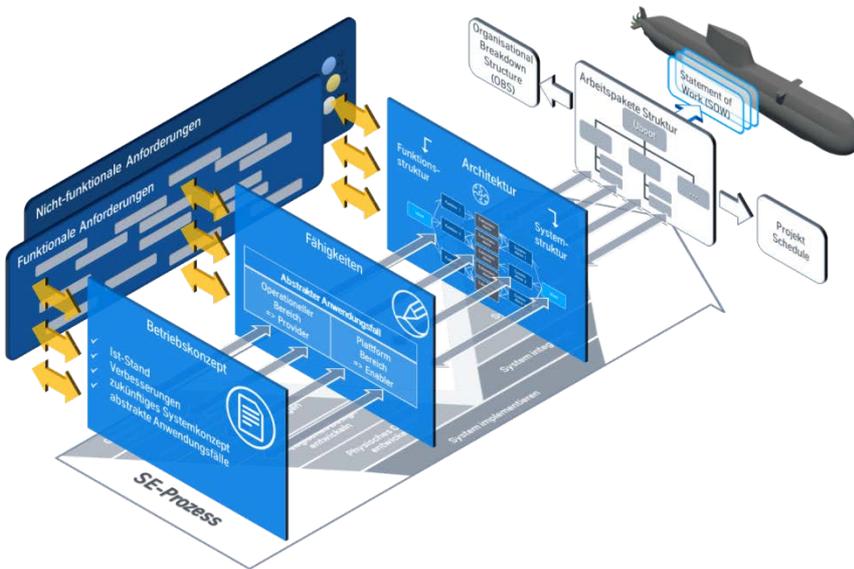


Abbildung 2: thysenkruupp Marine Systems Architekturmodell

3.1 Strukturen im Architekturmodell

Die Systemarchitektur setzt sich aus einer Funktionsstruktur und Systemstruktur zusammen.

Die Funktionen einer technischen Umsetzung des U-Boots sind bekannt. Daher wurde eine Standardstruktur für thysenkruupp Marine Systems entwickelt, die diese hierarchisch gliedert und in der Zukunft für alle U-Boots Entwicklungen herangezogen werden soll. Diese Struktur wird sich weiterentwickeln. Da Funktionen aber technologieunabhängig sind, wird diese Weiterentwicklung relativ langsam vorstattengehen. Die Funktionsstruktur ermöglicht

eine intern standardisierte Sicht auf die Anforderungen des Kunden, die, wenn möglich, den Funktionen innerhalb des Funktionsbaumes zugeordnet werden. Wenn bspw. der Kunde eine bestimmte Mindestverlegegeschwindigkeit fordert, so wird diese Anforderung an der Funktion „Unterwasserfahrt“ & „Überwasserfahrt“ angesiedelt.

Bei der Erstellung einer Funktionsstruktur sprechen der hohe Integrationsgrad von U-Booten und die starke Quervernetzung von Funktionalitäten sowie die mehrfache Nutzung von Systemfunktionalitäten nicht für eine 1:1-Zuordnung von funktionalen Elementen auf physikalische Elemente. Ulrich beschreibt [4], dass integrale Architekturen eine komplexe (nicht 1:1) Zuordnung von funktionalen Elementen zu physikalischen Komponenten und/oder ihrer Schnittstellen aufweisen.

Die Systemstruktur stellt die logische Sicht auf die Komponenten eines U-Boots dar. Dies ist ein zentraler Aspekt, um zu einer modularen U-Bootentwicklung zu kommen. Eine Systemstruktur zu erstellen, die alle Stakeholder zufrieden stellt, erwies sich als eine größere Herausforderung als zunächst angenommen. Insbesondere stellte sich die Frage, inwieweit personelle Verantwortungen, Abteilungsstrukturen, Produktionsstrukturen etc. sich an dieser Struktur orientieren müssen.

Um einen sinnvollen Ausgangspunkt zu haben, wurde das U-Boot methodisch über alle Produktfamilien hinweg in rund hundert Systeme zerlegt. Diese Methodik basiert auf der Analyse der vorhandenen Varianten, der Produktnähe und der Kommunizierbarkeit der Systeme [1]. Als nächstes wurden die Abhängigkeiten dieser Systeme zueinander in Form einer Design Structure Matrix analysiert und zu Clustern zusammengeführt. Zur ersten Gruppierung wurde ein automatischer Algorithmus verwendet, der insgesamt über 80.000 Schnittstelleninformationen auswertete. Da diese mit einem Algorithmus berechneten Gruppierungen rein mathematisch entstehen und ggf. nicht immer technisch sinnvoll sind, wurden sie in Details von Hand überarbeitet.

Konflikte konnten dadurch aufgelöst werden, dass alle Stakeholder die hundert identifizierten Systeme für die richtigen hielten. Vorteil des modellbasierten Ansatzes ist an dieser Stelle, in spezifischen Sichten arbeiten zu können. Da lediglich bei dem hierarchischen Überbau Unstimmigkeiten auftraten, war schnell ein Kompromiss zu finden, der alle Stakeholder im ausreichenden Maße abdeckte.

Durch die intern standardisierten Bäume für Funktionen und Systeme ist nun ein Mapping möglich, welches die Abhängigkeiten untereinander darstellt,

siehe Abbildung 6. Wenn über die Anforderungen die für einen Kunden benötigten Funktionen identifiziert wurden, können deshalb bereits die benötigten (logischen) Systeme aus dem Systembaum identifiziert werden.

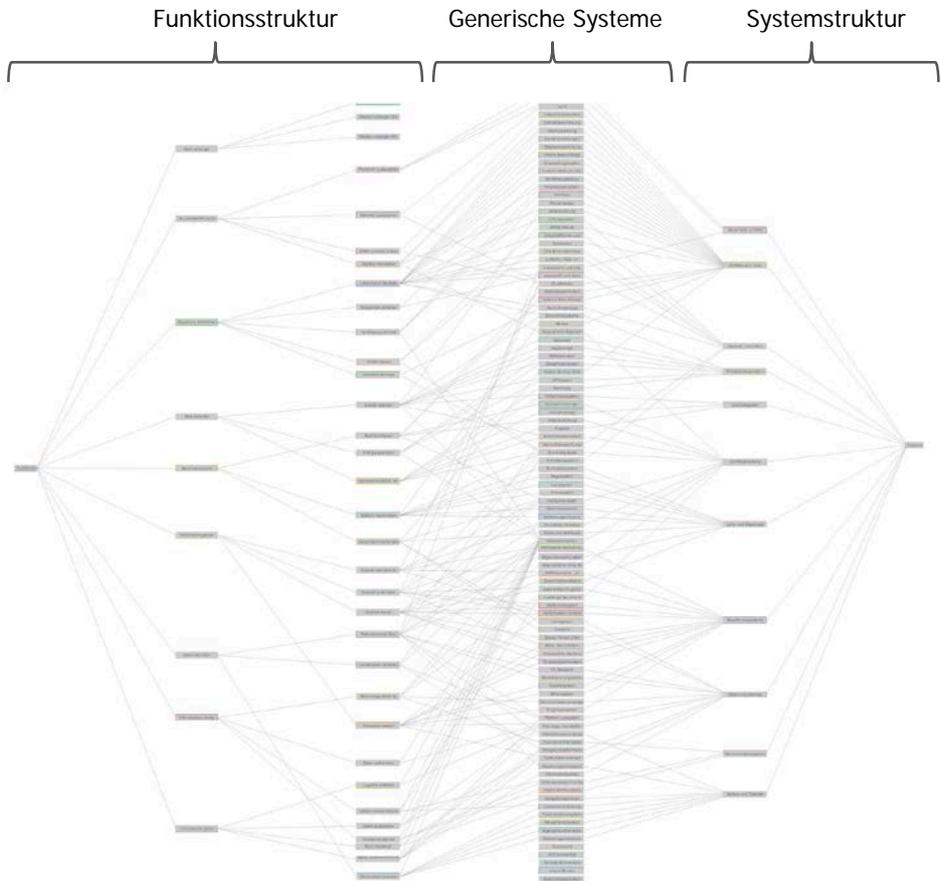


Abbildung 3: Zuordnung von Funktionen zu Systemen

3.2 Zugrundeliegendes Metamodell

Generische Metamodellkonzepte, beschreiben die notwendigen Domänen und Relationen für modulare Produktfamilien. Eine Systematik, in der die zugrundeliegenden Metamodelle von bekannten Ansätzen aus der Fachliteratur analysiert wurde, bieten Hackl et al. [5]. Darauf aufbauend wurde für dieses Projekt ein spezifisches Metamodell entwickelt, das sich in das bestehende Metamodell der bestehenden Software (vgl. Kapitel 3.3) von thyssenkrupp Marine

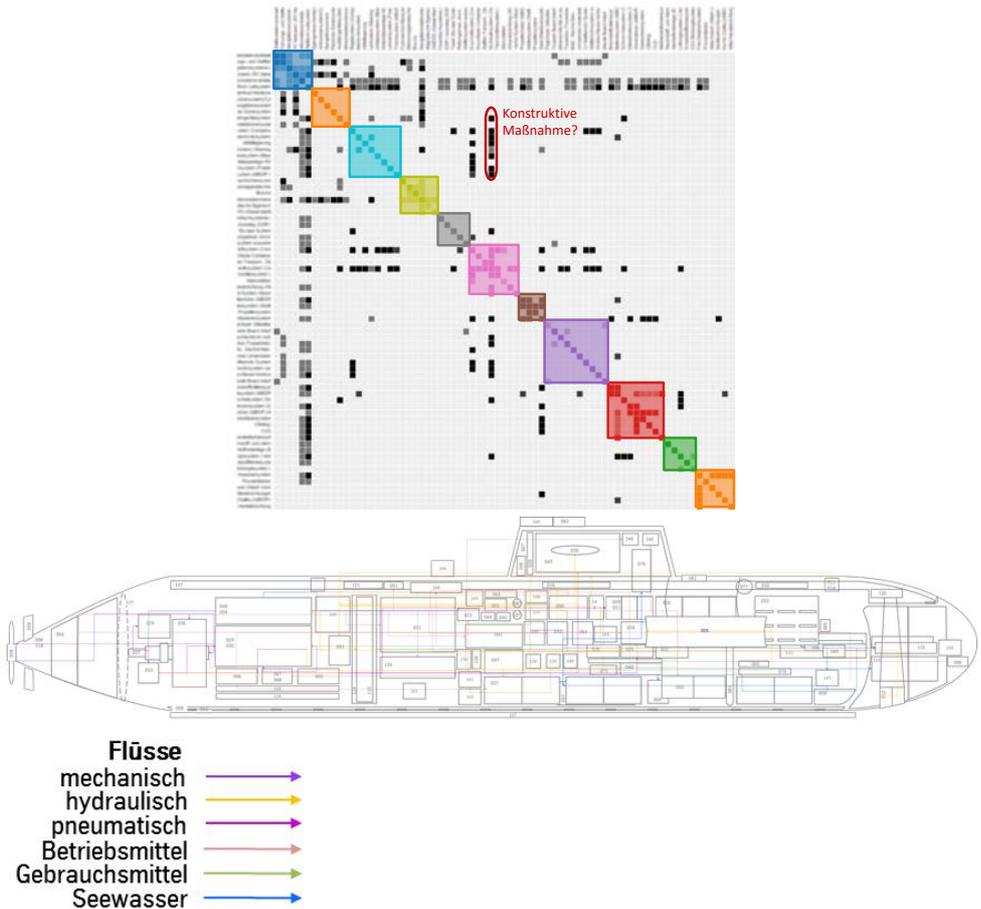


Abbildung 5: Partialmodelle Design Structure Matrix (DSM, oben) und Module Interface Graph (MIG, unten) auf Basis des Metamodells

3.3 Realisierung in der Design Database

Die Design Database (DDB) ist ein Model-Based Systems Engineering-Werkzeug, welches den Design Prozess komplexer Systeme unterstützt. Sie verbindet hierbei in einem Tool verschiedene Entwicklungsphasen komplexer Systeme miteinander, indem Inhalte nachhaltig geschaffen, verknüpft und schließlich sogar in verschiedene Ansichten projiziert werden können.

Über ein eigenes in der Design Database definiertes Metamodell werden Elemente (sogenannten Engineering Elemente) in verschiedenen Domänen auf einem definierten Detaillierungsgrad modelliert. Mit dieser Modellierung wird ein Informationsnetz geschaffen, aus dem dann komplexe Informationen zu konsistenten Dokumenten zusammengetragen werden.

Die Entwicklung der Design Database begann vor rund 15 Jahren im Konzern, nachdem vorhandene reine Anforderungsmanagementtools die Erkenntnis hervorbrachten, dass für eine durchgängige Anforderungsverfolgbarkeit ein durchgängiges modellbasiertes Tool notwendig ist. Bereits bestehende Tools waren in allererster Linie nicht durchgängig und sicherten außerdem Informationen in nicht-wiederverwendbaren Formaten und erzwangen damit weitere parallele Entwicklungen um diese bestehenden Tools herum. Weiterhin muss ein Tool, welches Anforderungen an das gesamte System beinhaltet im Unternehmen allumfänglich verfügbar sein, was allerdings durch hohe Lizenzkosten bei proprietären Tools gehemmt wird. Diese konzerneigene Entwicklung ist lizenzkostenfrei.

Über die Jahre hinweg wurde die Design Database im Konzern immer weiter entwickelt und an die Unternehmensprozesse und Technologieentwicklungen angepasst. So auch für das SubFlex Projekt. Die methodischen Ansätze die in diesem Projekt entstehen spezifizieren Use-Cases die in der DDB implementiert werden. Dazu gehört unter anderem das Produktfamilienkonzept (Abbildung 5).

Die technische Realisierung des Produktfamilienkonzeptes baut auf eine Dateninfrastruktur auf, in der eine zentrale Produktfamiliendatenbank (PFDB) anderen Projekt- und Auftragsdatenbanken (PDB) als Quelle dient. In der PFDB werden zwischen den einzelnen Engineering Elementen und deren Attributen Constraints gesetzt, welche eine teils automatisierte Übernahme von Fähigkeiten und den dazugehörigen Engineering Elementen in die PDB sicher-stellt.

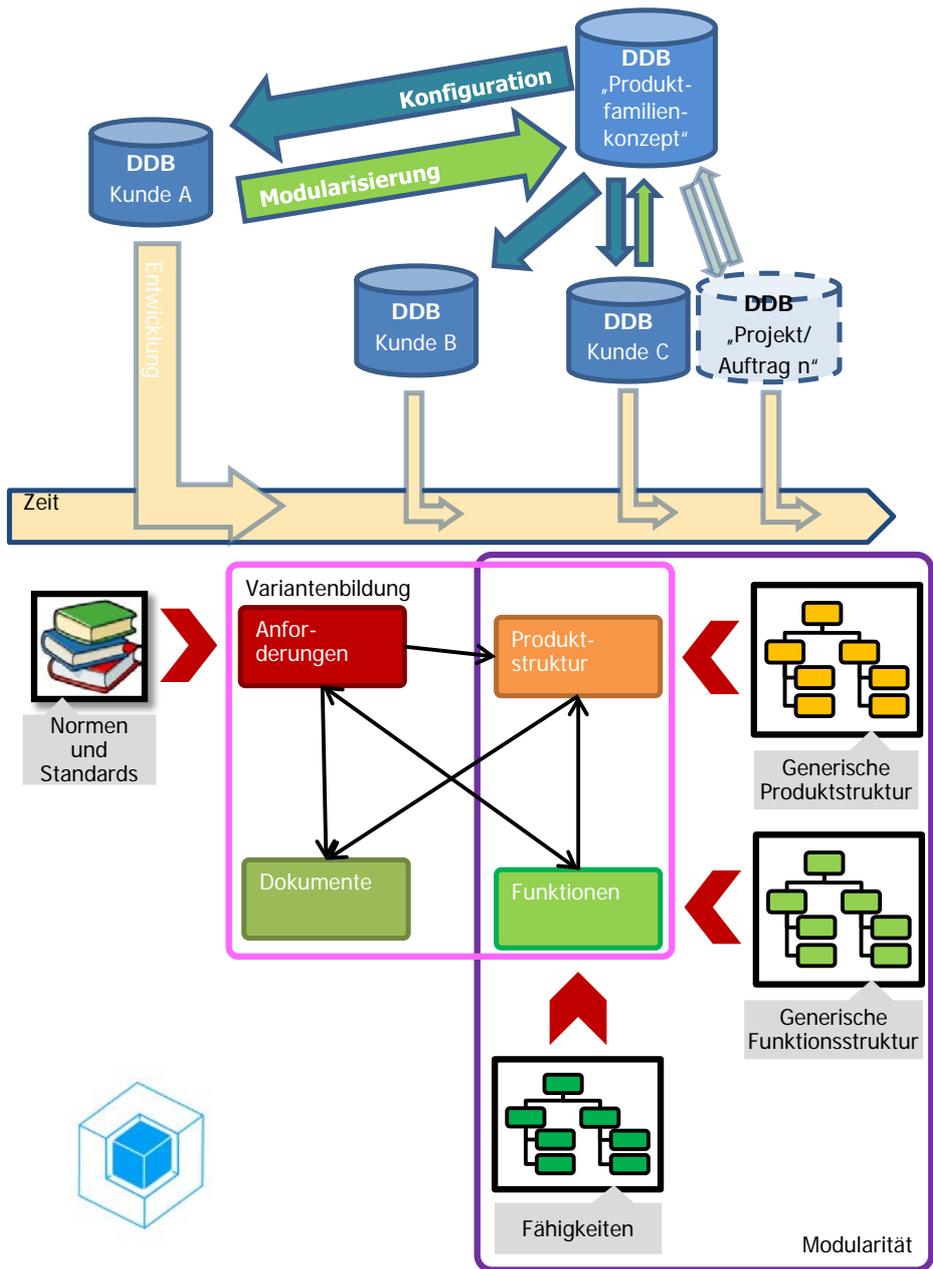


Abbildung 6: Datenkonzept DDB

4 Ausblick und konkreter praktischer Nutzen

Methodik, Prozess und Modellbildung werden derzeit erstmalig generisch erzeugt, um Situationen wie die eingangs beschriebenen Praxisbeispiele zukünftig besser beherrschen zu können. Im Fall der Tauchzellen soll künftig die Zuordnung von Systemen und Funktionen einen ganzheitlichen funktionsorientierten Lösungsansatz ermöglichen. Die Armaturen werden über Variantentreiber modular konfiguriert, was durch die DDB unterstützt werden kann. In nächsten Schritten wird das generische Modell auf ein konkretes Entwicklungsprojekt angewendet und weiterentwickelt.

Literatur

- [1] Krause, D.; Beckmann, G.; Eilmus, S.; Gebhardt, N.; Jonas, H.; Rettberg, R.: Integrated Development of Modular Product Families: A Methods Toolkit. In: Simpson, T. W. et al. (Eds.), *Advances in product family and product platform design*, Springer New York, 2014.
- [2] Tim Weilkiens: "Systems Engineering mit SysML/UML", dpunkt Verlag, 2008
- [3] INCOSE: *Systems Engineering Handbook*, International Council on Systems Engineering, 2006.
- [4] Ulrich, K.: „The role of product architecture in the manufacturing firm“. In: „Research policy: policy and management studies of science, technology and innovation“, Vol24/3, Amsterdam, 1995
- [5] Hackl, J.; Gumpinger, T.; Krause, D.: Generating a meta-model for modularization models, 13th International Design Conference (Design 2014), Dubrovnik (2014).