Entscheidungsframework zur Auswahl von Wiederholkomponenten im Anlagenbau

Lorenz Krüger, Bernhard Saske & Kristin Paetzold-Byhain

Abstract

Anlagen sind kundenspezifische Produkte, die in Auftragsprojekten (Engineer to Order, ETO) entwickelt und gebaut werden. Bei jedem Projekt besteht ein Zielkonflikt zwischen dem Erfüllen der Kundenanforderungen auf der einen, und der Wirtschaftlichkeit der Anlagenentwicklung auf der anderen Seite. Ein zentrales Instrument für die Wirtschaftlichkeit ist die Verwendung von Wiederholkomponenten. Diese müssen zunächst im Bestand gefunden werden, wozu verschiedene Ansätze bekannt sind. Allerdings genügt das im Anlagenbau nicht, da bislang nicht gezeigt wurde, wie Suchvorgänge in das Gesamtvorgehen zu integrieren sind, auf welchen Strukturen sie aufsetzen müssen und wo Wiederholentscheidungen getroffen werden. Dieser Beitrag unterbreitet daher den Vorschlag, ein Entscheidungsframework zur Auswahl von Wiederholkomponenten aufzustellen. Es werden grundlegende Aspekte hierzu diskutiert und die Bedeutung von Suchen hervorgehoben.

Keywords: Anlagenbau, Komponentenwiederholung, Entscheidungsfindung, Iteration, Suchen

DOI: 10.25368/2024.EEE.019

1 Motivation und Zielstellung

Bei jeder Produktentwicklung besteht ein Zielkonflikt zwischen dem Erfüllen von Kundenanforderungen auf der einen, und der Wirtschaftlichkeit auf der anderen Seite (vgl. Huckriede et al.: 2016, 151f). Eine wirtschaftliche Entwicklung kann durch die Verwendung von Wiederholkomponenten (vorhandene Baugruppen oder Bauteile) erzielt werden und gilt insbesondere für Anlagen, da der Entwicklungsaufwand nicht über erhöhte Stückzahlen ausgeglichen werden kann. Ziel ist es

- möglichst viele Komponenten direkt wiederzuverwenden (Wiederholkonstruktion)
- oder nur geringfügig zu modifizieren (Anpassungskonstruktion).

Zunächst müssen passende Teile anhand des Fachwissens und der Dokumentation wiedergefunden werden (Identifikation). Es gibt zwar Werkzeuge, um diese zu erschließen (siehe Krüger et al.: 2023), es fehlt aber an einem methodischen Gesamtansatz, welcher die Auswahlvorgänge (Entscheidung) in projektspezifisch verzweigten Strukturen, wie sie im Anlagenbau üblich sind, systematisch einfügt.

Eine herkömmliche Wiederholstrategie ist das Anbieten aus Baukästen (alle Teile bzw. Artikel vordefiniert). Das allein ist im Anlagenbau unzureichend. – Es können zwar lokal

Wiederholeffekte eintreten, wirkt sich bei fehlender Anpassungsfähigkeit an Kundenwünsche aber auch negativ aus. Die Entscheidungsfindung, ob Komponenten wiederholt, angepasst oder neuentwickelt werden, ist daher ganzheitlich zu unterstützen, wie Abbildung 1 verdeutlicht (vgl. Haberfellner et al.: 2019, 43f).

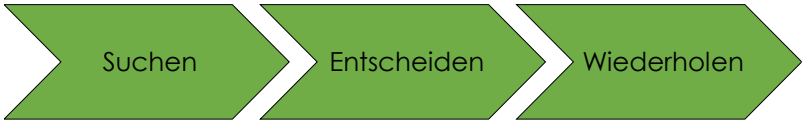

Abbildung 1: Suchen und Entscheiden als Fundament der Teilewiederholung

Anlagen sind unikat und bestehen aus sehr vielen Teilen – diese Volatilität erschwert konsistente Entscheidungen. Eine Wiederholteileauswahl kann selten pauschal je Gesamtprodukt getroffen werden, sondern muss granular *pro Komponente* erfolgen (vgl. Schnoor & Ahrens: 2016). Ausgewählte Komponenten können mit anderen, bereits ausgewählten konfligieren, was weitere Entscheidungen erfordert.

Ein Framework könnte hier helfen, eine strukturierte Lösung im Gesamtkontext der Anlagenentwicklung anzubieten. Des Weiteren kann bereits bei der Angebotslegung eine wirtschaftlich sinnvolle wie technisch umsetzbare Lösung kalkuliert werden (Wilke et al.: 2023, 6–9; Gadzo et al.: 2022 und 2023).

2 Verfügbare Produktinformationen und Teilstrukturen

Die wesentlichen Strukturen bei jeder Produktentwicklung sind die Anforderungsstruktur, die Funktionsstruktur und die Artikelstruktur. Diese müssen zum einen granular vorliegen, um Auswahlentscheidungen einzelner Elemente formal abzubilden, und zum anderen integriert werden (vgl. Huth & Vietor: 2020; Westermann & Dumitrescu: 2018), um den Gesamtkontext herzustellen.

Etabliert hat sich ein Idealbild der Produktentwicklung als serieller Vorgang, bei dem *zunächst* die Kunden- oder Marktanforderungen an ein Erzeugnis in eine Funktionsgliederung (Aufstellung in Stoff-, Energie- und Signalflüsse) überführt, und diese Elemente *danach* auf Funktionsträger (physische Bauteile) abgebildet werden, deren materielle Zusammensetzung das Gesamtprodukt repräsentiert (siehe Bender & Gericke: 2021; VDI 2221 Bl.1: 2019-11).

Praktisch gesehen ist aber jede Entwicklung von Iterationen zwischen Anforderungen, Funktionen und Artikeln geprägt. Im Anlagenbau tritt das durch die kundenspezifischen Umsetzungen verstärkt zutage – daher müssen hier *alle* Wege zwischen diesen Strukturen explizit berücksichtigt werden, wie aus Abbildung 2 hervorgeht:

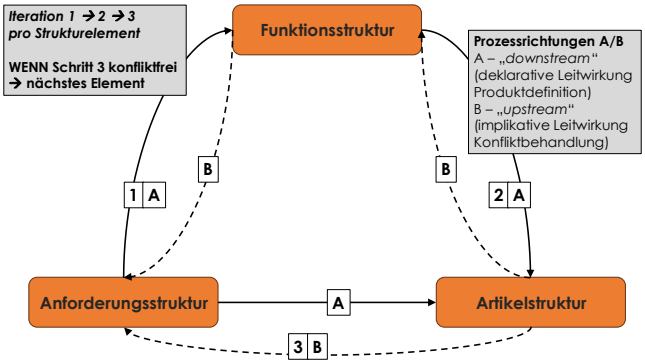

Abbildung 2: Interferierende Strukturen bei der Anlagenentwicklung

Zum Beispiel wird bei der VON ARDENNE GmbH bei der ETO-Entwicklung von Vakuumanlagen für kundenspezifische Beschichtungslösungen ein Teil der Anforderungen direkt auf die Artikel abgebildet, sofern für häufige und Standardprozesse eine Baukastenlösung vorliegt. Neuartige Anforderungen oder Parameter (für die komplette Anlage) hingegen werden über die Funktion entwickelt. Tritt ein Konflikt auf, z.B. indem ein Neuteil mit einem Baukastenteil kollidiert, muss entschieden werden, was im Gesamtkontext anzupassen ist.

In der Literatur werden bei der Produktentwicklung auftretende Iterationen zunehmend beleuchtet (Bender & Gericke: 2021 und Wynn & Eckert: 2017; vgl. mit Feldhusen & Grote: 2013), branchenspezifische Ansätze existieren (VDI 2221 Bl.2: 2019-11) genauso wie die Erkenntnis, dass bei allen Schritten Entscheidungen getroffen werden, die die Produktvarianz beeinflussen (Dambietz: 2021).

Es bleibt aber offen, wie bei Anlagen konkret vorzugehen ist: Die VDI-Richtlinie 2221 Bl.2 (a.a.O.) empfiehlt für den Sondermaschinenbau zwar, zur Angebotserstellung vorhandene Baugruppen zu prüfen und kritische Teile vorzeitig auszulösen – gibt aber keine Hinweise darauf, in welchem Ablauf diese Baugruppen gesucht werden und wo Auswahlentscheidungen zu treffen sind.

Einhellig ist, dass kundenspezifische (einmalige) und projektunspezifische (wiederholbare) Teile voneinander zu entkoppeln sind, um die Wiederholbarkeit prinzipiell zu ermöglichen (Meixner et al.: 2023). Können Anforderungen aus einem (projektunabhängigen) Baukasten bedient werden, so werden die Entscheidungen zur Teileauswahl anhand von Parametern der Leitkomponenten (z.B. bei einer Vakuumanlage: „Pumpe 70kW *oder* 150kW“) getroffen und die weiteren Teile gemäß der vorliegenden Plattformlogik („Anlage mit Pumpe 70kW nur für Grobvakuum“) ausgewählt.

Für Anlagen gibt es aber so viele spezifische Anforderungen, dass diese *nie vollumfänglich* aus einem Baukasten bedient werden können. Jeder Kundenauftrag beinhaltet zahlreiche Anpassungen, selbst wenn auf vorhandenen Modulen aufgesetzt wird (vgl. Klein: 2014). Hierbei kommt es zu Vorrangproblemen zwischen Anforderungen, Funktionen und Artikeln, dabei auftretende Entscheidungssituationen müssen gelöst werden. Folgende, in Tabelle 1 aufgeführte Szenarien sind denkbar:

Tabelle 1: Entscheidungssituationen bei der Anlagenentwicklung

Szenario	**Explorative W-Fragen**
Eine ähnliche Artikelstruktur aus einem Vorgängerprojekt wird dupliziert und durch Ersetzungen und Neuteile kundenspezifisch weiterentwickelt.	• Anhand welcher Kriterien und in welchem Kontext wird eine Struktur als „ähnlich" eingestuft, um diese als Kopiervorlage auszuwählen? • Wie und in welcher Reihenfolge werden die Komponenten, die kundenspezifisch angepasst werden, durchgegangen? • Unter welchen Bedingungen wird für zu ersetzende Teile wiederum auf bereits vorhandene Teilstrukturen zurückgegriffen? • In welchem Umfang sollen Bestandsstrukturen geändert werden, um zu ersetzende Teile einzupassen und wann wird alles erneuert?
Die kundenspezifische Produktstruktur wird über die Anforderungen und Funktionen neu entwickelt und dabei Wiederholteile eingesetzt.	• Wie müssen Neustrukturen aufgebaut und dokumentiert werden, damit sie ihrerseits für Folgeprojekte gefunden werden können? • Welche Komponenten werden plattformbezogen und welche plattformunabhängig gestaltet, wann lohnt sich eine Baukastenentwicklung? • Auf welche Weise kann bei der Anpassungskonstruktion sichergestellt werden, dass viele Wiederholkomponenten gefunden werden? • In welchem Fall erfolgt der Einsatz von Wiederholkomponenten und modifizierten Wiederholkomponenten und wann die Neukonstruktion?

Fazit: Bei jedem Anlagenprojekt werden Teilstrukturen geändert, nicht alle Bauteile sind vordefinierbar, sondern werden erst im Kundenprojekt ausgeprägt. Damit wird deutlich, Wiederholentscheidungen im Anlagenbau können nicht allein auf Basis vorhandener Artikel getroffen werden, sondern müssen auf ein Gesamtmodell von Anforderungen, Funktionen und Artikeln (das Framework) zurückgreifen.

Forschungsfragen:

- Wie müssen Anforderungen, Funktionen und Artikel zusammenhängen, dass die Gesamtstruktur zur Entscheidungsfindung genutzt werden kann?
- Wie kann eine unikate Teilstruktur soweit quantifiziert werden, dass gleiche oder ähnliche Strukturen, d.h. Wiederholkomponenten gefunden werden?

3 Präzisierte Zielstellung und Vorgehensweise

Auf Basis einer W-Fragen-Analyse wurden in einem ersten Schritt die Entscheidungssituationen (Tabelle 1) aufgenommen. Diese werden im Folgenden in das Framework übertragen. Grundlage dafür sind die Einzelstrukturen (Anforderungen, Funktionen, Artikel; gemäß Abbildung 2) unter spezifischen Vorrangregeln, welche dabei zu klären sind. Danach wird ein Konzeptansatz für die Systemabbildung aufgestellt und unter den o.g. Bedingungen diskutiert: Zum einen unter der Granularität der Teilstrukturen (einzelne Elemente adressierbar), und zum anderen unter der Integration, um die Gesamtstruktur zur Entscheidungsfindung zu generieren. Abschließend werden weitere Entwicklungsschritte abgeleitet.

4 Grundsätzlicher Vorrang der Funktionsstruktur

Bei herkömmlichen Produkten bot, wie in Kap. 2 erläutert, die Artikelstruktur den zentralen Anlaufpunkt zur Teilewiederholung. Durch Baukästen bzw. Variantenstücklisten konnten dort alle Kundenanforderungen direkt auf eine fertigbare Produktstruktur abgebildet werden. Für Anlagen nimmt die Funktionsstruktur diese Rolle ein, wie nachfolgend begründet wird:

Zunächst verhalten sich die durch Unternehmen angebotenen Produktanwendungen (das sind die Funktionen) im Vergleich zu gebauten Produkten am zeitstabilsten, und sind damit für die Wiederholteilauswahl am geeignetsten – und auch für herkömmliche Produkte wird die Funktionsstrukturierung empfohlen (Germani et al.: 2006).

Zwei Aspekte, bei denen die Baustruktur, d.h. artikelbezogene Merkmale dennoch Vorrang haben, bilden wichtige Ausnahmen:

- Randbedingungen: Dazu gehören besondere Beschaffungserfordernisse, wie z.B. bei Langläufern oder bei Teilen von Vorzugslieferanten, aber auch die Kollisionsfreiheit zu anderen Komponenten
- Direktanforderungen: In diesem Fall reichen die Kundenanforderungen bis auf die Artikelebene, es werden z.B. Werkstoffe, Bauräume, das Gesamterscheinungsbild oder Teile von Drittanbietern vorgeschrieben

Mit erneutem Blick auf Abbildung 2 können die Randbedingungen zu den implikativen (also zu prüfenden), und die Direktanforderungen zu den deklarativen (produktformenden) Leitwirkungen gezählt werden. Zugleich kann es keine „Prinzipneutralität“ geben (siehe Nicklas et al.: 2023), d.h. bei jeder Anforderungs- und Funktionsbeschreibung werden bereits Umsetzungsmöglichkeiten vorweggenommen.

Wie verhält es sich mit den Anforderungen? Sie steuern zwar initial, welche Produktfunktionen ausgewählt werden. Allerdings sind keine Funktionen umsetzbar,

die technisch nicht erreicht oder nicht im Portfolio angeboten werden. Damit haben die Funktionen auch gegenüber Anforderungen grundsätzlichen Vorrang.

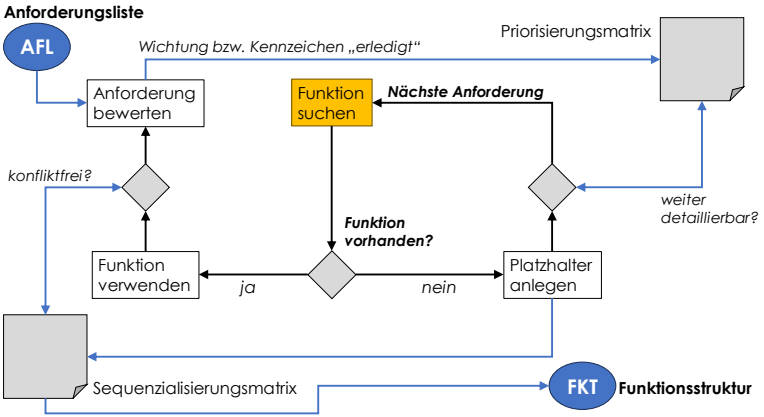

Abbildung 3: Überführen der Kundenanforderungen in die Funktionsstruktur

Daher gilt: Eine Produktentwicklung ist nicht (wie herkömmlich) als Konfiguration von Bauteilen, sondern (für Anlagen) als Konfiguration von Funktionselementen zu begreifen. Die in Tabelle 1 differenzierten Szenarien

- (Neues) Produkt wird umgesetzt und (vorhandene) Bauteile zugeordnet
- (Vorhandenes) Produkt wird (als neues Produkt) kopiert und unpassende Elemente ersetzt

sind insofern keine unterschiedlichen Prozesse, sondern lediglich zwei unterschiedliche Perspektiven *desselben* Entscheidungsvorgangs. – Wie ist das Prozessfeld zwischen Anforderungen, Funktionen und Bauteilen nun zu durchlaufen?

5 Konzeptansatz des Entscheidungsframeworks

5.1 Quantifizierung

Strukturen sind quantifizierbar, wenn sie als Matrix aufgestellt werden. Als Lösungsinstrument wird daher das Prinzip der Design Struktur Matrix (DSM) bzw. Domain Mapping Matrix (DMM) herangezogen (siehe Eppinger & Browning: 2012, 17ff, 129ff sowie Lindemann et al.: 2009). Damit können sowohl die einzelnen Strukturen, als auch Entwicklungsprozesse abgebildet werden (z.B. Tran et al.: 2019).

Zunächst ist die Funktionsstruktur zu synthetisieren, wie Abbildung 3 illustriert. Für die Ableitung der Baustruktur aus den Funktionen ist danach die Reihenfolge, welche Funktionen nacheinander in fertigbare Produktkomponenten (Bauteile und Baugruppen) auszuprägen sind, in einer Sequenzialisierungsmatrix festzulegen.

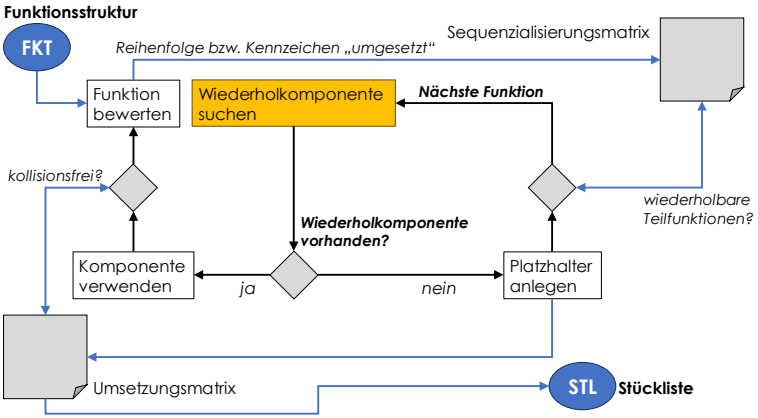

Abbildung 4: Funktionselementeumsetzung (Ableitung der Bau- bzw. Artikelstruktur)

Das Framework wird anschließend für jedes Funktionselement über die Prozedur: Suchen im Funktionsrepräsentationsvorrat (Components Retrieval) – Entscheiden ob eine Komponente wiederholbar ja / nein – Ausprägen des Artikels (Bauteil bzw. Baugruppe) – nächstes Element in Reihenfolge (Iteration Funktionselement n+1) durchlaufen, wie in Abbildung 4 dargestellt.

Während der Ableitungsprozedur von den Funktionen auf die Wiederhol- und Anpassungskomponenten (vorhandene bzw. modifizierbare Bauteile und Baugruppen) sind pro Iterationszyklus fallweise die folgenden Entscheidungspfade denkbar:

- Geeignetes Element / erfüllt Funktion: Durchspielen vorhandener Funktionselementrepräsentationen (sofern mehrere als Suchergebnis zur Auswahl sind) für Entscheidung; Kollisions- und Anforderungskontrolle, wenn positiv dann Wiederholkonstruktion
- Kein geeignetes Strukturelement anhand der Funktion gefunden: Ausdehnen der Suche über das Framework auf ähnliche Funktionen und Anforderungen; Durchspielen erhaltener Ergebnisse und Entscheidung, ob diese trotzdem genommen werden können, d.h. die Anforderungen erfüllt werden
- Wenn auch darüber keine geeignete Komponente gefunden wurde, dann als Platzhalter in der Produktstruktur definieren (Anpassungskonstruktion) und mit der nächsten Strukturebene fortfahren, ob hier ggf. Wiederholteile vorliegen
- Alle Platzhalter, für die auch für nachgeordnete Funktionselemente keine geeigneten Teile gefunden werden können, sind automatisch Neukonstruktion; alle neu erstellten Bauteile sind in das Funktionsschema einzuordnen, sodass sie bei der nächsten Entwicklung wiederholbar sind

Soll eine Baugruppe bzw. ein Bauteil umgesetzt werden (Stücklisteneintrag), erfolgt die Eintragung in einer Umsetzungsmatrix, und hierüber mit den dort bereits eingefügten Teilen die Kollisionsprüfung und Anforderungskontrolle. Sofern keine Konflikte zu anderen, höher priorisierten Teilen auftreten, erfolgt die (als Artikel) bestellfähige Ausprägung der Komponente.

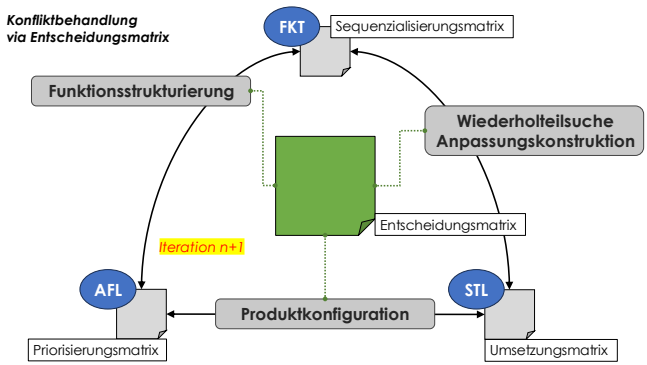

Abbildung 5: Iterations-Konfliktbehandlung mit der Entscheidungsmatrix

Tritt hingegen eine Kollision oder ein Anforderungskonflikt auf, dann muss die niedriger priorisierte Komponente neu ausgeprägt werden (Anpassungskonstruktion), in der darunterliegenden Struktur sind diejenigen Elemente zu ersetzen, an denen der Konflikt aufgetreten ist. Haben zwei Komponenten dieselbe Umsetzungspriorität, erfolgt die Eintragung in der Entscheidungsmatrix, der Vorrang ist dann mit Blick auf die Abbildung 5 zu entscheiden.

In der nachstehenden Tabelle (Tabelle 2) sind die Relationen und dazugehörigen Merkmalsbereiche in das Framework eingegliedert. Je nach dem, an welcher Stelle (Anforderungen, Funktionen oder Artikel) während einer Iteration Informationen benötigt werden, können sie über diese Merkmale recherchiert werden. Fertigstellungskriterium ist, dass *alle* angeforderten Komponenten konfliktfrei als Artikel in der Umsetzungsmatrix eingetragen werden konnten.

Tabelle 2: Relationen und Merkmalsbereiche im Entscheidungsframework

Prozessrichtung „downstream“			
von	nach	Relation	Merkmale (Bsp.)
Anforderung	Funktion	Enthält Systemelement (1:n)	Anforderungspriorität Parameter (z.B. Ausstoßrate)
Funktion	Artikel	Enthält Bauelement (1:n)	Funktionsreihenfolge Schnittstellen
Anforderung	Artikel	Enthält Bauelement (1:n)	Anforderungspriorität Parameter (z.B. Lieferzeiten)

Prozessrichtung „upstream“ von	nach	Relation	Merkmale (Bsp.)
Funktion	Anforderung	Erfüllt Anforderung (1:n)	Technische Konfliktfreiheit Alternativen
Artikel	Funktion	Erfüllt Funktion (1:n)	Funktionsrepräsentationen Funktionsähnlichkeit
Artikel	Anforderung	Erfüllt Anforderung (1:n)	Allgemeine Konfliktfreiheit Änderungsparameter

5.2 Anwendungsbeispiel

In der Vakuumtechnik für Beschichtungslösungen haben zahlreiche Baugruppen für Prozessversorgungsaufgaben (sog. Medienbaugruppen) Wiederholcharakter. Darunter zählen u.a. das Vakuumsystem selbst, aber auch Versorgungssysteme für Wasser, Gase und andere Prozessmedien. Sie sind ihrer Funktion nach vom Beschichtungskonzept unabhängig, müssen aber für die Anwendung im Kundenprojekt parallel zu den prozessspezifischen Teilen angepasst werden.

Angenommen, eine geforderte Wasserversorgung wird nach einer definierten Reihenfolge (Sequenzialisierungsmatrix, ggf. Funktionsstrukturierung) ausgeprägt. Über die Relation zwischen Funktionen und Bauteilen (Funktionsrepräsentation) werden anhand der geforderten Parameter (Priorisierungsmatrix, Anforderungsliste) zwei potentiell geeignete Wasserverteiler im Bestand gefunden und gegen den bereits umgesetzten Stand geprüft (Umsetzungsmatrix, Stückliste).

Dabei stellt sich heraus, dass einer der Wasserverteiler eine Kollision mit einer bereits eingebauten Gestellbaugruppe aufweisen würde. Bei dem zweiten Wasserverteiler tritt diese Kollision nicht auf, jedoch sind hier Teile enthalten, die nicht mehr beschaffbar sind. Es muss nun entschieden werden, entweder einen der Wasserverteiler anzupassen oder alternativ das Gestell.

Hierzu kann das Framework (Entscheidungsmatrix) herangezogen werden, in dem der Entwicklungskontext des Gestells mit dem der Wasserverteiler abgeglichen wird, um eine Entscheidung herbeizuführen, welche Baugruppe geändert wird und das als Ausgangspunkt für Folgeentscheidungen zu dokumentieren.

In dieser Beispielsituation ließe sich auch einfach mit dem Bearbeiter des Gestells abstimmen, was angepasst wird. Im Laufe einer kompletten Anlagenentwicklung tritt aber durch die Vielzahl von Teilen (und Beteiligten) eine Unmenge solcher (und schwierigerer) Situationen auf, die im Gesamtkontext erstmal „geparkt“, aber letztlich gegenübergestellt und aufgelöst werden müssen.

Denkbar ist beispielsweise, dass die Änderbarkeit des Gestells von Teilen abhängig ist, deren genaue Montageschnittstellen noch nicht bekannt sind, oder der Wasserverteiler auch.

Eine strukturierte, quantifizierbare und maschinell anlernbare Gegenüberstellung von Anforderungen, Funktionen und Artikeln kann also bei der Entscheidungsfindung unterstützen. Weiterhin kann über das Framework recherchiert werden, ob ähnliche Konflikte bereits schonmal aufgetreten waren und wie diese gelöst wurden.

6 Bewertungskriterien für die Teilewiederholung

Die Hauptanforderung ist die Maximierung des Wiederholanteils bei der Anlagenentwicklung. Eine spezifische Methodik muss die Prozessschnitte (siehe Abbildung 2) zwischen Anforderungs-, Funktions- und Artikelstruktur als Framework zusammenführen und vor jeder Wiederholentscheidung Suchinstrumente verorten.

Mögliche Gesamtlösungen zur Komponentenwiederholung bei der Anlagenentwicklung bemessen sich an den folgenden Kriterien (vgl. Kollenda: 2016, 246):

- Höherer Wiederholanteil von Artikeln pro Anlagenentwicklung (Kundenprojekt abzüglich Vorstrukturierungsaufwand des Frameworks)
- Niedrigere Durchlaufzeit von Anlagenprojekten bei gleicher technischer Funktionsweise und Beschaffungssituation

7 Zusammenfassung und Ausblick

Jede Entscheidungsfindung zur Auswahl von Wiederholkomponenten beruht auf den zum Zeitpunkt verfügbaren Informationen zu bereits vorhandenen Komponenten und geltenden Leitwirkungen hierzu.

Auswahlentscheidungen zwischen Wiederholteil und Neukonstruktion können nur getroffen werden, wenn mögliche Wiederholteile auch gefunden werden – vor jeder Entscheidung steht damit die Identifizierung. Das heißt, jede Teileauswahl beginnt mit Suchen. Vorhandene Ansätze berücksichtigen, dass reale Produktentwicklungsprozesse iterativen Charakter haben, zeigen aber nicht, wie Suchvorgänge im Gesamtvorgehen zu integrieren sind, bzw. welche Strukturen hierzu ausgewertet werden.

Dieser Beitrag unterbreitet den Vorschlag, ein Entscheidungsframework zur Auswahl von Wiederholkomponenten aufzustellen. Es werden grundlegende Aspekte zu diesem Ansatz diskutiert, die Bedeutung von Suchen betont, sie im Entwicklungsprozess lokalisiert sowie über einen Konzeptansatz (Kap. 5) die Quantifizierbarkeit des Frameworks umrissen. Dadurch können vorhandene Ansätze mit Bezug zum Anlagenbau (Bello: 2016 oder Klein: 2016) ergänzt werden.

Vertiefende Schritte sind im Weiteren die Ableitung und Einordnung von Lösungswerkzeugen in das Entscheidungsframework, wie algorithmische

Suchverfahren oder Verfahrensweisen zur Datenablage, z.B. in PDM- und ERP-Systeme. Zusätzlich empfiehlt sich auch, die Anwenderebene (Akteure) zu beleuchten und die Beschaffungsseite in die Betrachtungen einzubeziehen.

Literaturverzeichnis

Bello, O.O. (2016): *A Framework for Intelligent Support System for Drilling Rigs Selection.* Clausthal-Zellerfeld: Technische Universität Clausthal (Diss.), Papierflieger Verlag GmbH.

Bender, B. & Gericke, K. (Hrsg.) (2021): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre, Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung.* 9. Aufl., Berlin: Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7.

Dambietz, F.M. (2021): *Performance Simulation of Modular Product Architectures by Model-Based Configuration.* Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-662-64233-7.

Eppinger, S.D. & Browning, T.R. (2012): *Design Structure Matrix, Methods and Applications.* Cambridge, Massachusetts: The MIT Press. https://doi.org/10.7551/mitpress/8896.001.0001.

Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (Hrsg.) (2013): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre, Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8., vollst. überarb. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

Gadzo, E., Porcelli, F., Förstner, R. & Paetzold, K. (2022): Requirements Engineering Process for SeRANIS, a Small Satellite Mission. In: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt – Lilienthal-Oberth e.V. (Hrsg.): *71. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2022 in Dresden*, 1–9. Bonn: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt. https://doi.org/10.25967/570212.

Gadzo, E., Mehlstäubl, J., Nicklas, S.J. & Paetzold, K. (2023): Method for the Transfer and Further Development of Document-Based Data and Information in a Model-Based Development Environment Using the Example of a Small Mission Satellite. In: Chakrabarti, A. & Singh, V. (Hrsg.): *ICORD 2023, Design in the Era of Industry 4.0*, Vol. 2, 519–532. Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-0264-4_43.

Germani, M., Mengoni, M. & Raffaeli, R. (2006): Design Structure Matrix Used as Knowledge Capture Method for Product Configuration. In: Marjanovic, D. (Hrsg.): *DS 36, Proceedings of DESIGN 2006, the 9th International Design Conference*, 253–262. Dubrovnik, Croatia: The Design Society.

Haberfellner, R., De Weck, O.L., Fricke, E. & Vössner, S. (2019): *Systems Engineering – Fundamentals and Applications. Systems Engineering – Grundlagen und Anwendung.* Corrected Publication 2021, Cham: Birkhäuser, Springer Nature Switzerland AG. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13431-0.

Huckriede, V., Joachim, B. & Storck, S. (2016): Systems Engineering im Maschinen- und Anlagenbau verstehen, anwenden und beherrschen. In: Schulze, S.-O., Tschirner, C., Kaffenberger, R. & Ackva, S. (Hrsg.): *Tag des Systems Engineering, Herzogenaurach, 25.–27. Oktober 2016*, 151–160. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. https://doi.org/10.3139/9783446451414.015.

Huth, T. & Vietor, T. (2020): Systems Engineering in der Produktentwicklung. Verständnis, Theorie und Praxis aus ingenieurswissenschaftlicher Sicht. In: *Gruppe, Interaktion, Organisation, GIO – Zeitschrift für Angewandte Organisationspsychologie*, 51(1), 125–130, 2366–6218. https://doi.org/10.1007/s11612-020-00505-1.

Klein, P.W. (2014): *Methode zum Engineering von Produktionsanlagen durch Wiederverwendung von Modulen.* Siegen: Universität (Diss.), Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät. https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:467-9097.

Klein, T.P. (2016): *Agiles Engineering im Maschinen- und Anlagenbau.* München: Technische Universität München (Diss.), Fakultät für Maschinenwesen. https://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20160621-1284645-1-0.

Kollenda, K. (2016): Systems Engineering im Anlagenbau – Methoden für den erfolgreichen Umgang mit Komplexität. In: Schulze, S.-O., Tschirner, C., Kaffenberger, R. & Ackva, S. (Hrsg.): *Tag des Systems Engineering, Herzogenaurach, 25.–27. Oktober 2016*, 237–246. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. https://doi.org/10.3139/9783446451414.023.

Krüger, L., Saske, B., Schwoch, S. & Paetzold-Byhain, K. (2023): Structure-based Similarity Searches for Improving Component Repetition in Plant Engineering. In: Krause, D., Paetzold-Byhain, K. & Wartzack, S. (Hrsg.): *DS 125, Proceedings of the 34th Symposium Design for X, DfX*, 195–204. September 2023, Radebeul, Germany: ENmfk, The Design Society. https://doi.org/10.35199/dfx2023.20.

Lindemann, U., Maurer, M. & Braun, T. (2009): *Structural Complexity Management, An Approach for the Field of Product Design.* Berlin: Springer.

Meixner, K., Rinker, F., Waltersdorfer, L., Lüder, A. & Biffl, S. (2023): Organizing Reuse for Production Systems Engineering with Capabilities and Skills, Organisation der Wiederverwendung im Engineering von Produktionsystemen mit Capabilities und Skills. In: *at – Automatisierungstechnik*, 71(2), 116–127. https://doi.org/10.1515/auto-2022-0120.

Nicklas, S.J., Michalides, M., Gadzo, E. & Koch A. (2023): A Multi-Dimensional Analysis of the Current State of Research into Globally Distributed Product Development. In: Krause, D., Paetzold-Byhain, K. & Wartzack, S. (Hrsg.): *DS 125, Proceedings of the 34th Symposium Design for X, DfX*, 183–194. September 2023, Radebeul, Germany: ENmfk, The Design Society. https://doi.org/10.35199/dfx2023.19.

Schnoor, F. & Ahrens, V. (2016): Adaption des Kreismodells im Umfeld des Model Based Systems Engineering. Erschienen als: *Arbeitspapiere der Nordakademie*, Working Paper No. 2016-09. Elmshorn: Nordakademie – Hochschule der Wirtschaft.

Tran, J., Stowe, M., Plattner, M. & Zimmermann, M. (2019): Using the Design Structure Matrix for Space System Design. In: Stowe, H.M., Browning, T.R., Eppinger, S.D., Tran, J. & Montijo, P. (Hrsg.): *DS 97, Proceedings of the 21st International DSM Conference, September 23rd – 25th 2019*, 1–10. Monterey, California: The Design Society.

VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2019): *Richtlinie VDI 2221 Blatt 1, Entwicklung technischer Produkte und Systeme, Modell der Produktentwicklung.* Ausgabe 2019-11, Düsseldorf: VDI-Verlag.

VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2019): *Richtlinie VDI 2221 Blatt 2, Entwicklung technischer Produkte und Systeme, Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse*. Ausgabe 2019-11, Düsseldorf: VDI-Verlag.

Westermann, T. & Dumitrescu, R. (2018): Maturity Model-Based Planning of Cyber-Physical Systems in the Machinery and Plant Engineering Industry. In: Marjanović, D., Štorga, M., Škec, S., Bojčetić, N. & Pavković, N. (Hrsg.): *DS 92, Proceedings of DESIGN 2018, the 15th International Design Conference*, 3041–3052. Dubrovnik, Croatia: The Design Society. https://doi.org/10.21278/idc.2018.0260.

Wilke, D., Humpert, L., Mansheim, J., Anacker, H. & Dumitrescu, R. (2023): Systems Engineering Potentials and Use Cases for the Offer Phase in Special Purpose Machinery. In: Krause, D., Paetzold-Byhain, K. & Wartzack, S. (Hrsg.): *DS 125, Proceedings of the 34th Symposium Design for X, DFX2023*, 225–234. Radebeul: The Design Society. https://doi.org/10.35199/dfx2023.23.

Wynn, D.C. & Eckert, C.M. (2017): Perspectives on Iteration in Design and Development. In: *Research in Engineering Design*, 28 (2), 153–184. https://doi.org/10.1007/s00163-016-0226-3.

Kontakt

Lorenz Krüger, Dipl.-Ing.
VON ARDENNE GmbH
Am Hahnweg 8, 01328 Dresden-Weißig
www.vonardenne.com

Dr.-Ing. Bernhard Saske & Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold-Byhain
Technische Universität Dresden
Professur für Virtuelle Produktentwicklung
George-Bähr-Straße 3c, 01069 Dresden
www.tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/imm/vpe