

## **ENTWURF VON MODULAREN PRODUKTARCHITEKTUREN UNTER BETRACHTUNG UNTERSCHIEDLICHER UNTERNEHMENS SICHTEN**

*Christoph Blee, Henry Jonas, Dieter Krause*

### **Zusammenfassung**

Für ein erfolgreiches Bestehen im Wettbewerb sind Unternehmen zunehmend gefordert, Produkte modular zu strukturieren. Um unter den jeweiligen Randbedingungen eine optimale modulare Produktarchitektur zu entwickeln, müssen verschiedene Unternehmenssichten differenziert betrachtet werden. Es wurden daher die Hauptsichten Produktstrategie, Einkauf, Montage und After Sales definiert. Im Beitrag wird eine Methode vorgestellt, die eine Entwicklung modularer Produktarchitekturen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Unternehmenssichten ermöglicht. Das Vorgehen wird am Beispiel einer Flugzeug-Galley verifiziert.

### **1 Einleitung**

Steigende Anforderungen der Kunden nach immer individuelleren Produkten zwingen die Hersteller ein zunehmend variantenreiches Produktprogramm anzubieten. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an Wartungsfreundlichkeit, Recyclingfähigkeit und die Möglichkeit zu einer späteren Erweiterung der Produkte durch den Kunden. Außerdem ist eine gute Montierbarkeit der Produkte erforderlich, um einerseits die Produktionskosten zu senken und andererseits die Lieferzeiten zu verkürzen. Zusätzlich werden Zulieferer verstärkt in die Entwicklung und Produktion eingebunden. Eine vielfach angewendete Strategie, um diesen vielfältigen Anforderungen gerecht zu werden, ist die modulare Strukturierung der Produkte.

Bei der Entwicklung modularer Produktstrukturen können allerdings nicht immer alle auftretenden Konflikte zwischen den aus verschiedenen Unternehmensbereichen stammenden Anforderungen gelöst werden. Wenn bestimmte Anforderungen nicht gleichzeitig umsetzbar sind, muss bei der Entwicklung der Produktstruktur ein Kompromiss getroffen werden, der die Entwicklungsziele bestmöglich im Produkt umsetzt. Der vorliegende Beitrag beschreibt daher eine Methode zur Modularisierung, welche die unterschiedlichen Unternehmenssichten differenziert betrachtet und damit eine strukturierte Abwägung der sichtspezifischen Zielsetzungen ermöglicht.

### **2 Stand der Methoden zur Modularisierung**

Unter den Methoden zur Entwicklung von modularen Produktstrukturen haben insbesondere die Ansätze von Pimpler/Eppinger [1] und Erixon [2] besondere Bedeutung erlangt. Pimpler/Eppinger gliedern ihr Vorgehen in drei Schritte:

1. Zerlegung des Produktkonzepts in seine Elemente. Diese Elemente repräsentieren auf funktionaler oder physischer Ebene die Produktfunktionen.
2. Dokumentation der Verbindungen zwischen den Elementen: Identifizierung der Verbindungen zwischen den Elementen.

3. Matrixbasierte Clusterung der Elemente zu Modulblöcken mit Hilfe eines Vertauschungsalgorithmuses.

Kern der Methode ist eine relationale Matrix der Komponenten, die sogenannte Design Structure Matrix (s. Bild 1). Die Modulbildung erfolgt durch die Clusterung der Komponenten mit Hilfe eines Algorithmuses. Dazu werden alle identifizierten Elemente des Produkts relational in die Zeilen und Spalten einer Matrix geschrieben. In den Feldern der Matrix werden die Schnittstellen zwischen den Elementen eingetragen. Dabei wird zwischen den vier verschiedenen Schnittstellentypen „Räumlich“, „Energie“, „Information“ und „Material“ unterschieden. Die Wertigkeit einer Schnittstelle wird in einer Skala von 2 bis -2 bewertet. 2 bedeutet dabei „notwendig für die Funktion“ und -2 bedeutet „muss verhindert werden, um die Funktion zu ermöglichen“. Es werden dabei nur die diskreten Werte 2, 1, 0, -1, oder -2 benutzt. Somit hat jedes Feld in der Matrix vier Zahleneinträge für die Bewertung jeder Schnittstelle. Die Clusterung erfolgt für jede Schnittstellensicht einzeln. Dabei wird ein Vertauschungsalgorithmus benutzt, der die positiven Werte näher an die Diagonale rückt. Die dadurch entstehende Blockstruktur der Matrix ermöglicht es nun, Module zu identifizieren. Anschließend wird aus den vier separaten Sichten eine abschließende Struktur durch Abwägen zwischen den jeweils gebildeten Produktarchitekturen abgeleitet. Die identifizierten Module können auch zur gezielten Team- oder Organisationsbildung herangezogen werden.

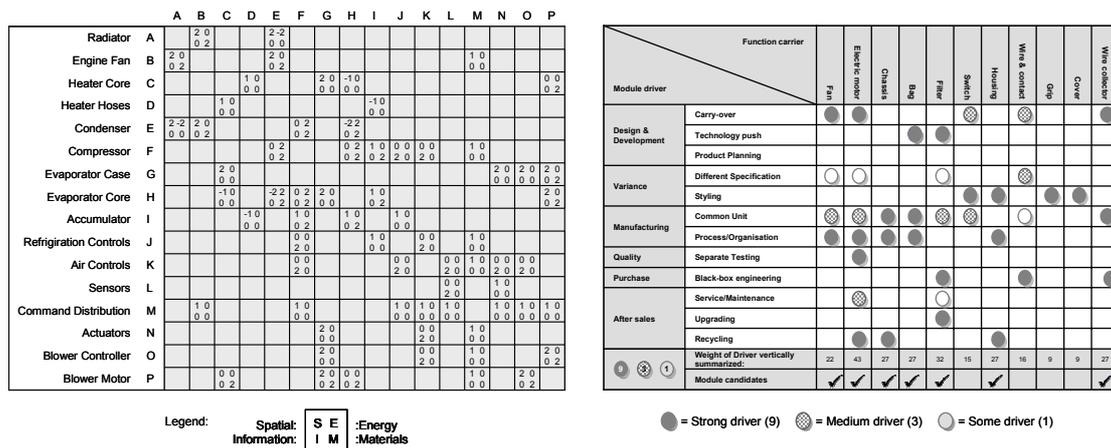


Bild 1: Design Structure Matrix nach [1] und Module Indication Matrix nach [2]

Während im Vorgehen nach Pimmler/Eppinger ausschließlich eine technisch-funktionale Betrachtung erfolgt, berücksichtigt die von Erixon entwickelte Methode „Modular Function Deployment“ insbesondere produktstrategische Aspekte. Kern der Methode ist die Module Indication Matrix (s. Bild 1), in der den Funktionsträgern des Produkts die sogenannten Modultreiber gegenübergestellt werden. Modultreiber sind Aspekte aus verschiedenen Phasen des Produktlebenszykluses, die Gründe für die Modularisierung darstellen. Erixon hat zwölf unterschiedliche Treiber aus den Bereichen Konstruktion und Entwicklung (Übernahmeteil, Technische Änderung, Geplante Designänderungen), Varianz (Technische Spezifikation, Styling), Produktion (Gleichteil, Prozess/Organisation), Qualität (Separates Testen), Einkauf (Black-Box-Engineering) und After-Sales (Service/Wartung, Upgrading, Recycling) definiert.

In der Module Indication Matrix werden die Funktionsträger hinsichtlich der Modultreiber mit einer Relevanz von 0, 1, 3 oder 9 bewertet. Diejenigen Komponenten mit einer hohen Bewertungszahl sind Kandidaten für eine Modulbildung, d.h. können selbst ein Modul bilden oder die Basis für eines sein. Zusätzlich lassen sich Komponenten mit einem ähnlichen Modultreiberprofil identifizieren und es kann überprüft werden, ob ein Zusammenfassen dieser ähnlich bewerteten Komponenten sinnvoll ist.

Auf den Methoden nach Pimpler/Eppinger und Erixon bauen wiederum verschiedene Ansätze auf, die entweder eine Erweiterung der bestehenden Methoden anstreben ([3]) oder eine Kombination der Methoden fokussieren, um die technisch-funktionale Sicht nach Pimpler/Eppinger mit den produktstrategischen Aspekten nach Erixon zu vereinen ([4], [5], [6], [7], [8]). Weitere eigenständige Ansätze ([9], [10], [11], [12]) werden an dieser Stelle nicht betrachtet.

### 3 Bedarf zur Entwicklung einer erweiterten Methode

Für die Entwicklung modularer Produktstrukturen muss eine Vielzahl von Anforderungen aus verschiedenen Unternehmensbereichen berücksichtigt werden. Problematisch ist hierbei, dass sich unter Berücksichtigung der verschiedenen Sichten unterschiedliche Modularisierungen ergeben können, die teilweise parallel in einem Produkt vorliegen, teilweise aber auch zu Konflikten führen. In [13] wurden bereits die vier Sichten Produktstrategie, Einkauf, Montage und After-Sales definiert (s. Bild 2).

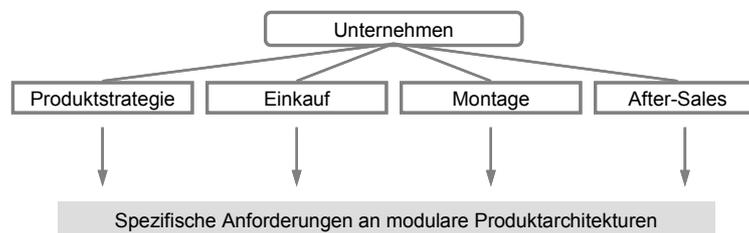


Bild 2: Differenzierte Betrachtung der vier Unternehmenssichten nach [13]

Aufgrund der Konflikte zwischen den verschiedenen Sichten stellt die endgültige Produktstruktur in vielen Fällen einen Kompromiss dar. Die zu entwickelnde Methode muss daher eine übergreifende Betrachtung der Unternehmenssichten unterstützen, die eine gezielte Abwägung von Kompromissen ermöglicht und diese nachvollziehbar darstellt.

Des Weiteren wird in bekannten Methoden davon ausgegangen, dass die Komponenten eines Produkts unabänderlich sind. Konstruktive Änderungen, welche die Entwicklung einer modularen Produktstruktur unterstützen können, werden nicht betrachtet. Die zu entwickelnde Methode muss es dem Anwender daher ermöglichen, sein Produktwissen sowie konstruktive Ideen gezielt in die Modularisierung einzubringen.

## 4 Entwicklung einer erweiterten Modularisierungsmethode

Im Folgenden wird die Entwicklung der Methode zur Modularisierung unter Berücksichtigung der verschiedenen Unternehmenssichten dargestellt. In der Methode werden vier Modularisierungsvorschläge entwickelt, in denen jeweils eine der vier Sichten abgebildet wird. Anhand dieser spezifischen Modularisierungsvorschläge werden Konzepte für eine Gesamtmodularisierung abgeleitet. Abschließend wird ein Gesamtkonzept ausgewählt.

### 4.1 Definition des Produkts

Ausgang für die Anwendung der Methode sind die Funktionsträger bzw. Komponenten des Produkts. Es kann sich dabei sowohl um ein existierendes Produkt als auch um die Beschreibung eines neuen Produktes handeln. In den meisten Fällen wird es jedoch zumindest ein Vorgänger- oder Vergleichsprodukt geben, auf dessen Basis eine vorläufige Baustruktur aufgestellt werden kann. Die Abbildung der Baustruktur des Produktes erfolgt im am Institut PKT entwickelten Module Interface Graph (MIG) [13]. Im MIG werden die ungefähren Bauräume der Komponenten und ihre Lage im Produkt eingezeichnet und mit den strukturellen



Frage „Gibt es unterschiedliche Arten von Tests?“ ergeben, könnten beispielsweise „Test Elektrik“ oder „Test Hydraulik“ sein.

Die spezifizierten Modultreiber fließen im folgenden Schritt zusammen mit den Komponenten des Produkts in die Bewertungstabelle ein (s. Bild 5). In der Tabelle wird die Bewertung der Abhängigkeit der Komponenten von den konkretisierten Modultreibern mit 0 (=kein Einfluss), 1 (=schwacher Einfluss) und 2 (=starker Einfluss) vorgenommen. Zur besseren Übersichtlichkeit wird eine 0 nicht in die Tabelle eingetragen.

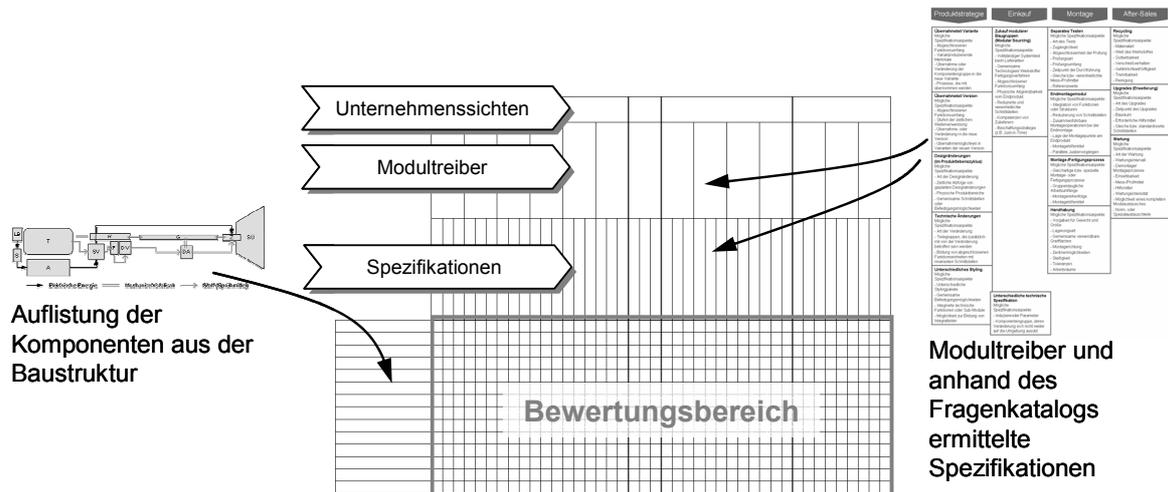


Bild 5: Bewertungstabelle zur Modularisierung

### 4.3 Konzeption der speziellen Modularisierungen

Auf Basis der Bewertung der Komponenten erfolgt im Anschluss die Erstellung unabhängiger, sichtspezifischer Modularisierungen durch Zusammenfassen von Komponenten im Bewertungsbereich der Modularisierungstabelle. Ein Beispiel zur Modulbildung ist in Bild 6 dargestellt.

	Spezifikation 1	Spezifikation 2	Spezifikation 3
Komponente 1		2	1
Komponente 2		2	
Komponente 3			1
Komponente 4		2	
Komponente 5	2		
Komponente 6	1		
Komponente 7			
Komponente 8	1	2	
Komponente 9			
Komponente 10	1		
Komponente 11		2	

Bild 6: Modulbildung in der Modularisierungstabelle

Da eine Modulbildung nicht immer konfliktfrei möglich ist, muss bei auftretenden Konflikten die Bewertung herangezogen werden. Falls der Konflikt bestehen bleibt, kann geprüft werden, ob eine konstruktive Änderung der Komponente möglich ist. Auf diesem Weg werden vier Modularisierungen zu den definierten Unternehmenssichten erstellt, die nicht notwendigerweise alle Komponenten des Produkts enthalten müssen.

Nach Definition der vier speziellen Modularisierungen werden diese jeweils im Module Interface Graph umgesetzt und visualisiert. Module werden im MIG abgebildet, indem die zugehörigen Komponenten mit einer gestrichelten Linie umrandet werden. An dieser Stelle kann der Anwender wiederum sein Produktwissen verwenden und mögliche konstruktive Änderungen einbringen. Um den Anwender hierbei zu unterstützen, wurde aus den Quellen [17], [18] und [19] ein Katalog mit Gestaltungsrichtlinien zusammengestellt (s. Bild 7).

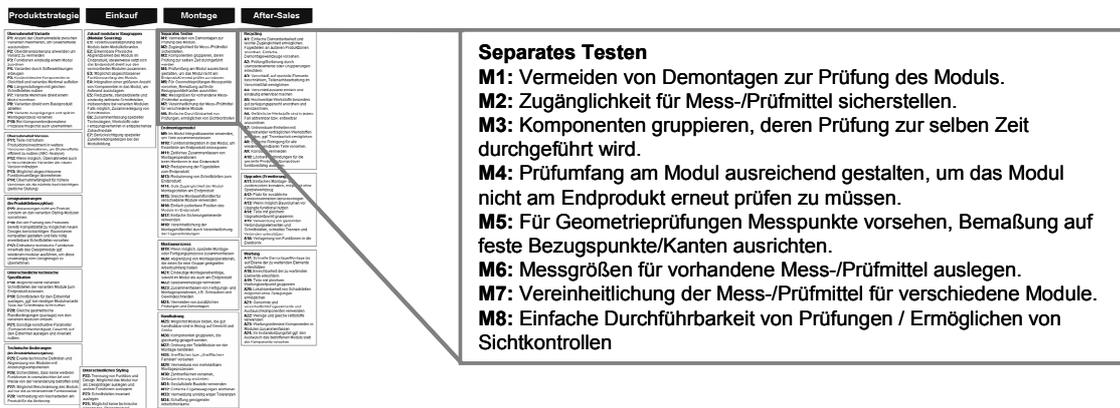


Bild 7: Gestaltungsrichtlinien am Beispiel des Modultreibers *Separates Testen*

#### 4.4 Integration der speziellen Modularisierungen zu Gesamtkonzepten

Zur Bildung von alternativen Gesamtkonzepten müssen die vier speziellen MIG zusammengeführt werden. Es wird daher untersucht, welche Module identisch definiert wurden und ob Komponenten widersprüchlich eingesetzt wurden. Im Falle von Komponenten, die in unterschiedlichen Sichten zu verschiedenen Modulen zugeordnet wurden, müssen diese für die Bildung eines Gesamtkonzepts eindeutig einem Modul zugewiesen werden. Bei starken Konflikten müssen die Komponenten eventuell aufgeteilt werden oder es ist zu untersuchen, ob der Konflikt durch eine alternative konstruktive Lösung überwunden werden kann. Im Extremfall sollte der Ablauf mit den neu definierten Komponenten erneut begonnen werden.

Falls eingangs eine Basiskomponente definiert wurde, kann diese abschließend feiner detailliert und ggf. einem Modul zugeordnet oder auch zerlegt und verschiedenen Modulen zugeordnet werden.

#### 4.5 Auswahl des Gesamtkonzepts

Der letzte Schritt der Methode ist die Auswahl eines Gesamtkonzepts in einer Nutzwertanalyse. Als Kriterien für die Bewertung werden die für die Modularisierung definierten Modultreiber verwendet.

### 5 Verifikation der Methode am Beispiel Flugzeug-Galley

Zur Verifikation wird die Methode auf eine Centre-Galley (Bordküche) eines Kurzstrecken-Passagierflugzeugs angewendet. In Bild 8 werden die Komponenten einer entsprechenden Galley dargestellt.

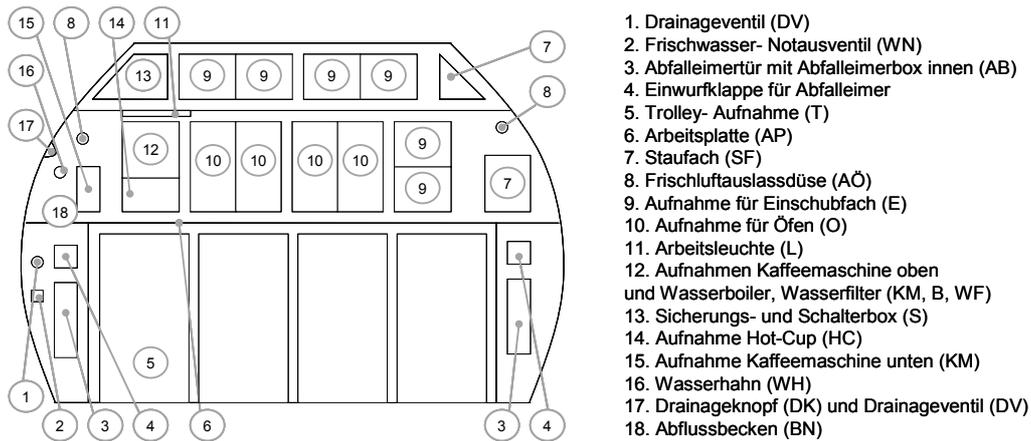


Bild 8: Komponenten einer Centre-Galley

Entsprechend dem zuvor erläuterten Vorgehen wird zu Beginn der Methode die Baustruktur der Galley im MIG dargestellt und die Spezifikation der Modultreiber erstellt. Als Spezifikation der jeweiligen Modultreiber ergeben sich *Varianter Bereich Kaffeemaschinen/Boiler/Hot-Cup*, *Varianter Bereich Öfen/Einschubfächer/Staufächer* (Übernahmeteil Variante), *Elektrik*, *Rohrleitungen und Sandwichpaneele* (Modular Sourcing), *Wassersystem*, *Elektrik und Zu-/Abluft* (Separates Testen), *Handhabung* (Splitlinemodule), *Paneele/Verbundwerkstoffe*, *Metall/Rohrleitungen und Elektrik* (Recycling) sowie *Wasserfilter* (Wartung). In Bild 9 ist die ausgefüllte Modularisierungstabelle dargestellt, in der die Komponenten der Galley den spezifizierten Modultreibern gegenübergestellt werden.

Sicht	Produktstrategie	Einkauf		Montage		After-Sales	
		Übernahmeteil Variante	Modular Sourcing	Separates Testen	Handhabung	Recycling	Wartung
Spezifikation	Bereich Kaffeemasch. Bereich Öfen	Elektrik Rohrleitungen Sandwichpaneele	Wassersystem Elektrik Zu-/Abluft Splitlinemodule	Paneele/Verbundwerkst. Metall/Rohrleitungen Elektrik Wasserfilter			
Trolleyaufnahme 1..7			2		2		
Aufnahme Einschubfach 1..6	1		2		2		
Abfalleimer 1			2		2		
Abfalleimer 2			2		2		
Staufach 1			2		2		
Staufach 2	2		2		2		
Befestigung oben links			1				
Befestigung oben rechts			1				
Befestigungen unten			1				
Ausblasöffnung L			1		2		2
Ausblasöffnung R			1		2		2
Sicherungs- und Schalterbox		2			2		2
Wasser-Notaus		2		2			2
Wasserfilter		2		2			2
Ofenaufnahme 1..4	2	1	1	2	2	1	2
Wasserhahn			2				2
Aufn. Kaffeemaschine unten	2	1	1	2	2	1	2
Aufn. Kaffeemaschine oben	2	1	1	2	2	1	2
Boiler		1	1	2	2	1	2
Hot-Cup	2		1	2	2	1	2
Entlüftungsventil			2				2
Arbeitslicht			2				2
Arbeitsplatte			2				2
Drainageventil			2				2
Drainageventilknopf			1				2
Becken			2				2
Abfluss 1..3	2		2				2

Bild 9: Modularisierungstabelle einer Galley

Da im vorliegenden Beispiel einer Flugzeug-Galley keine Überschneidungen zwischen verschiedenen Modulen auftreten, kann die Modulbildung durch einfaches Zusammenfassen der Komponenten erfolgen. In der Modularisierungstabelle wurden mögliche Module bereits durch Umrahmungen zusammengefasst.

Im Folgenden werden die Modularisierungskonzepte aus den vier Sichten jeweils in einem MIG abgebildet. Da in den entwickelten Konzepten weitestgehend die gleichen Module gebildet werden, kann die Ableitung eines Gesamtkonzepts erfolgen, ohne dass mehrere Alternativen gebildet werden müssen. Die Durchführung einer Nutzwertanalyse zur Konzeptauswahl entfällt somit in diesem Fall. In Bild 10 ist das Gesamtkonzept für die Modularisierung der Galley dargestellt.

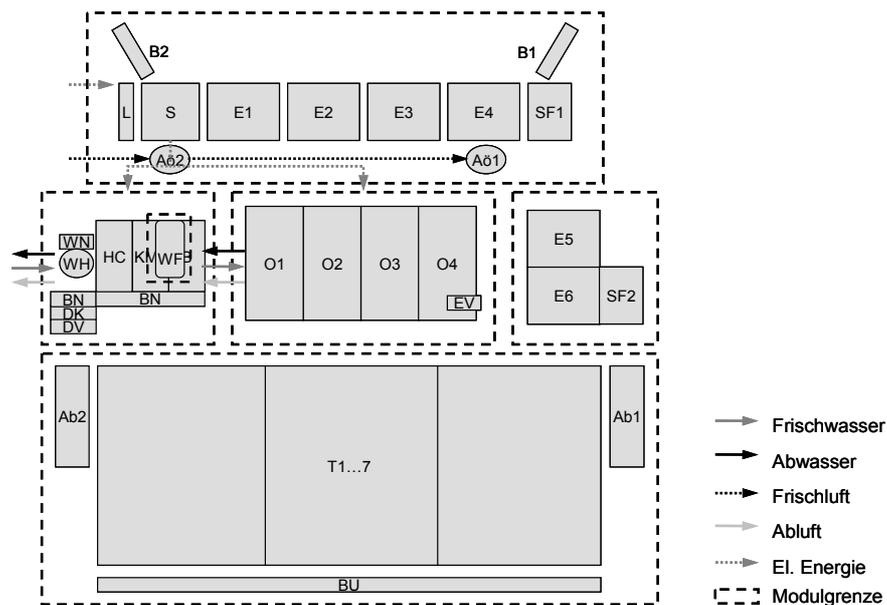


Bild 10: Gesamtkonzept einer modularisierten Galley

Die Galley wird in fünf Module unterteilt, von denen die drei Mittleren variant sind. Diese Konfiguration erlaubt aus produktstrategischer Sicht eine Plattformbauweise, bei der der obere und untere Teil der Galley die standardisierte Produktplattform bilden und die mittleren Module als sogenannte Hutmodule individuell vom Kunden bestimmt werden können. Entsprechend können im linken Modul individuell Kaffeemaschinen, Boiler und Hot-Cups verbaut werden, während im mittleren Modul die Anzahl der Öfen variiert werden kann und im rechten Modul eine unterschiedliche Anzahl an Einschubfächern möglich ist. In Bild 11 sind die Möglichkeiten eines entsprechenden Plattformkonzepts visualisiert.

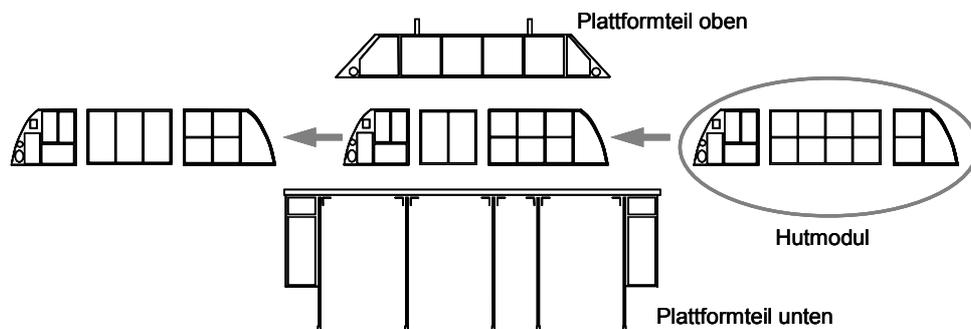


Bild 11: Plattformbauweise einer Galley

Aus Sicht des Einkaufs sowie der Montage ergibt sich aus dem entwickelten Konzept die Möglichkeit vorgetestete und vormontierte Module einzukaufen und in der Endmontagelinie zu einer Galley zu montieren. Dies wird insbesondere durch die weitgehende Zusammenfassung der Medien- und Leistungsschnittstellen innerhalb der Module ermöglicht. Damit muss in der Endlinie nur eine geringe Anzahl an Schnittstellen montiert und geprüft werden.

Die Wartung der Galley wird durch die entwickelte Modularisierung ebenfalls unterstützt, da der regelmäßig auszutauschende Wasserfilter als demontierbares Untermodul ausgeführt wurde.

## 6 Ausblick

Kern der vorgestellten Methode ist ein differenziertes Vorgehen zur Modularisierung anhand der Unternehmenssichten Produktstrategie, Einkauf, Montage und After-Sales. Dies ermöglicht die gezielte Betrachtung der Konflikte zwischen den verschiedenen Sichten, führt allerdings zur Ableitung mehrerer Gesamtkonzepte. Die damit erforderliche Konzeptsauswahl erfolgt derzeit mit Hilfe einer Nutzwertanalyse. Aufgrund der Komplexität der Auswirkungen der Produktstruktur auf die genannten Bereiche, erscheint die in der Nutzwertanalyse vorgenommene qualitative Bewertung allerdings als nicht hinreichend. Ziel ist es daher, das beschriebene Vorgehen durch Kennzahlen zu erweitern, die eine eingehendere, quantitative Bewertung der Modularisierungskonzepte ermöglichen.

## 7 Literatur

- [1] Pimpler, T.U., Eppinger, S.D., Integration Analysis of Product Decompositions, Proceedings of the 6th Design Theory and Methodology Conference, New York 1994
- [2] Erixon, G., Modular function deployment: A method for product modularisation, Royal Institute of Technology, Stockholm 1998
- [3] Stake, R.B., On conceptual development of modular products, Royal Institute of Technology, Stockholm 2000
- [4] Blackenfelt, M., On the development of modular mechatronic products, Royal Institute of Technology, Stockholm 1999
- [5] Koeppen, B., Modularisierung komplexer Produkte anhand technischer und betriebswirtschaftlicher Komponentenkopplungen, Shaker Verlag, Aachen 2007
- [6] Kopenhagen, F., Systematische Ableitung modularer Produktarchitekturen, Shaker Verlag, Aachen 2004
- [7] Lanner, P., Malmqvist, J., An approach towards considering technical and economic aspects in product architecture design, 2nd WDK Workshop on Product Structuring, Delft University of Technology, The Netherlands 1996
- [8] Lange, M.W., Managing the Integration of Technical Solutions in a Modularized Product Concept, in 2<sup>nd</sup> International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, pp. 521-528, Compiegne 1998
- [9] Göpfert, J., Modulare Produktentwicklung – Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation, Gabler Verlag, Wiesbaden 1998
- [10] Kusiak, A., Huang, C.-C., Development of modular products, in IEEE Transactions on components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A, Vol. 19, No. 4, pp. 523-538, 1996

- [11] Martin, M. V., Ishii, K., Design for Variety: A Methodology for Developing Product platform Architectures, in ASME Design Engineering Technical Conferences, Baltimore 2000
- [12] Gu, P., Sosale, S., Product Modularization for Life Cycle Engineering, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 15, pp. 387-401, 1999
- [13] Blees, C., Krause, D., On the development of modular product structures: A differentiated approach, 10<sup>th</sup> International Design Conference, Dubrovnik – Croatia, pp. 301-309, 2008
- [14] Ulrich, K.T., Eppinger, S.D., Product Design and Development, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York 2004
- [15] Wildemann, H., Komplexitätsmanagement in Vertrieb, Beschaffung, Produkt, Entwicklung und Produktion, 5. Auflage, TCW, München 2004
- [16] Bullinger, H. J., Systematische Montageplanung, Hanser Verlag, München [u.a.] 1986
- [17] Andreasen, M.M. [u.a.], Design for Assembly, 2<sup>nd</sup> Edition, Springer, Berlin [u.a.] 1988
- [18] Kipp, T., Krause, D., Design for Variety – Efficient Support for Design Engineers, 10<sup>th</sup> International Design Conference, Dubrovnik - Croatia, pp. 425-433, 2008
- [19] Pahl G. Beitz W.: Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen. Springer-Verlag, Berlin 1997

Dipl.-Ing. Christoph Blees  
Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik  
Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause  
Technische Universität Hamburg-Harburg  
Denickestraße 17, D-21073 Hamburg  
Tel.: +49-40-42878-3231  
Fax: +49-40-42878-2296  
E-Mail: christoph.blees@tu-harburg.de  
URL: <http://www.tuhh.de/pkt>