

3.2 Entwicklung und Strukturplanung individualisierter Produkte

U. Lindemann, M. Maurer

3.2.1 Einleitung

Natürgemäß können individualisierte Produkte nur in einem begrenzten Umfang auftragsunabhängig (vor-)entwickelt werden. Der Kunde mit seinen individuellen Anforderungen bestimmt zu einem großen Teil selbst die funktionale und gestalterische Ausprägung des Produktes, woraus sich ein weitaus größeres Produktspektrum als bei variantenreichen Serienprodukten ergibt. Das alleinige Angebot von Produktvarianten stellt dabei noch keine Individualisierung dar. Kunden sind hier nur auf die Auswahl und Konfiguration aus vollständig vorentwickelten Modulen eines bereits definierten Variantenprogramms beschränkt (Blackenfelt 2001). Das Spektrum individualisierter Produkte resultiert aus der Vielzahl möglicher Produktausprägungen, die aus den Freiheitsgraden folgen, die dem Kunden für die individuelle Gestaltung des Produktes gegeben werden. Individualisierte Produkte können zwar Module eines Variantenbaukastens enthalten, weisen aber als wichtigstes Unterscheidungsmerkmal dazu auch komplett individuelle Komponenten auf (Lindemann u. Pulm 2001).

Bei individualisierten Produkten ist es daher nicht ausreichend, nur ein einzelnes Produkt oder eine begrenzte Anzahl an Produktvarianten zu entwickeln. Vielmehr muss das gesamte Spektrum, in dem mögliche, individuelle Produktausprägungen definiert werden können, betrachtet werden (Lindemann et al. 2003). Für die Entwicklung eines solchen Produktspektrums ergibt sich nun folgendes Hauptproblem: Zum Teil sind die individuellen Komponenten des Produktes bzw. deren konkrete Ausprägungen noch nicht bekannt. Die entsprechenden Bauteile können folglich nicht komplett entwickelt werden. Zwar gibt es, ähnlich variantenreichen Serienprodukten, einzelne Produktbereiche, deren individuelle Ausprägungen auch schon vor dem einzelnen Kundenauftrag vorgedacht werden können. Noch unbekannte individuelle Kundenanforderungen können aber nur begrenzt im Vorfeld in die Entwicklung mit eingeplant werden. Hier ist es unmöglich, alle denkbaren (und noch undenkbaren) individuellen Ausprägungen des Produktes zu betrachten und die Auswirkungen von individuellen Änderungen bereits vorher abzuschätzen. Nur einzelne dieser Ausprä-

gungen bereits zu entwickeln ist ebenfalls nicht sinnvoll, da man nicht weiß, ob sie jemals abgefragt und gebraucht werden. Es wäre nicht sinnvoll, diese individuellen Produktkomponenten quasi auf Vorrat zu planen und bereits vollständig zu entwickeln, weil notwendige, spezifische Kundeninformationen erst beim individuellen Auftrag vorliegen. Dies würde zudem nur wieder zum Ansatz variantenreicher Serienprodukte mit vor-konstruierten Modulen führen, der in der Unternehmenspraxis heute an seine Grenzen gelangt – sowohl hinsichtlich der Beherrschung der Komplexität als auch der Wirtschaftlichkeit (Riitahuhta 2001; Schuh 2001). Die individuellen Ausprägungen der individualisierbaren Komponenten eines Produktes werden daher erst während der Kundeninteraktion identifiziert und festgelegt. Die finale Gestaltung des individualisierten Produktes erfolgt in der Produktadaptionphase und wird nach kundenspezifischen Vorgaben vorgenommen (Lindemann et al. 2003). Die vorangestellten Überlegungen bedeuten nun aber keinesfalls, dass bei individualisierten Produkten auf eine kundenunabhängige Produktentwicklung verzichtet werden kann. Im Gegenteil, es ist sogar ein erhöhter konzeptioneller Entwicklungsaufwand nötig, um ein Produkt zu generieren, das später an eine Vielzahl möglicher individueller Kundenwünsche angepasst werden kann. Der Schwerpunkt der Entwicklungstätigkeit liegt dabei aber nicht auf der Konstruktion und Integration einzelner Produktelemente, sondern auf der Planung und Optimierung einer adaptionsfähigen Produktstruktur. Dieser auftragsunabhängige Entwicklungsprozess, der Teil der Vorbereitung der Produktindividualisierung ist, wird in der Folge als Strukturplanung bezeichnet (Lindemann u. Pulm 2001).

Innerhalb der Strukturplanung werden die grundsätzlichen Produktanforderungen geklärt und die wesentlichen Produktfunktionen bestimmt. Ebenso werden die Hauptkomponenten des Produktes als Elemente der Produktstruktur definiert. Hierbei werden auch die jeweiligen Freiheitsgrade der Produktkomponenten für eine spätere Individualisierung festgelegt. Von dieser Festlegung ist zum einen abhängig, ob die einzelnen Komponenten auskonstruiert (z. B. bei unveränderlichen Produktbereichen) oder nur grob in ihren wesentlichen strukturellen Eigenschaften konzipiert werden. Zum anderen erfolgt auf Basis der zu erwartenden Produktänderungen eine Optimierung der Produktstruktur. Dazu werden die Elemente und ihre Wechselwirkungen betrachtet und dahingehend optimiert, dass individuelle Produktänderungen möglichst geringe Auswirkungen auf andere Produktbereiche haben und Produktadaptionen aufwandsarm durchgeführt werden können. Ergebnis der Strukturplanung ist eine Produktstruktur, die alle wesentlichen Produktelemente und deren Verknüpfungen im Sinne einer Produktarchitektur enthält und die verhältnismäßig robust gegenüber späteren, durch individuelle Kundenwünsche hervorgerufenen

Änderungen ist. Die Möglichkeiten der Umsetzung von Individualisierungswünschen im Produkt, die benötigte Entwicklungszeit und entstehende Adaptionkosten können wesentlich besser abgeschätzt werden, weil die Auswirkungen einzelner Adaptionen auf das Gesamtprodukt transparent werden. Zugleich wird der Aufwand einer kundeninduzierten Produktadaption zwar nicht grundsätzlich vermieden, jedoch durch vorgelagerte Strukturauslegung und -optimierung deutlich eingegrenzt. Die ausgeprägte Strukturplanung bei individualisierten Produkten kann zugleich als ein wesentlicher Unterschied zur Entwicklung von Kleinserien oder Sondermaschinen angesehen werden, bei denen derartig intensive strukturelle Überlegungen in der Regel nicht angestellt werden. Die Strukturoptimierung ist ein Grund dafür, dass eine Produktindividualisierung überhaupt mit verringertem Aufwand gegenüber einer Sonderkonstruktion vollzogen werden kann. Bei der *Strukturplanung* kann teilweise auf etablierte Methoden, zum Beispiel aus der variantengerechten Produktgestaltung, zurückgegriffen werden. Bezüglich der *Strukturoptimierung* sind aber auch neue Strategien und Methoden erforderlich, die im vorliegenden Kapitel zur Strukturplanung individualisierter Produkte betrachtet werden sollen.

3.2.2 Bekannte Ansätze der Strukturplanung und neue Anforderungen

Für die Gestaltung variantenreicher Serienprodukte haben sich Strategien und Methoden etabliert, die zum Teil auch für die Gestaltung individualisierter Produkte zweckmäßig erscheinen. So wird auch bei variantenreichen Serienprodukten der Aufbau geeigneter Produktstrukturen zur Reduzierung unternehmensinterner Varianten angestrebt (Firchau 2003). Bekannte und gebräuchliche Ansätze sind hierbei:

- die Modulbauweise mit der Definition möglichst einheitlicher Schnittstellen sowie
- Baureihen,
- Baukästen und
- Produktplattformen als Gestaltungskonzepte (Kohlhase 1997, Erixon 1998, Andreasen et al. 2001).

Modularisierung erfolgt durch Bildung von funktionalen und logischen Einheiten, die als solche komplett austauschbar sind. Die Modularisierung ist Ausgangsbasis für andere Strategien wie Baukasten- und Plattformbauweise. Die Definition von Schnittstellen ist dabei Voraussetzung für die Bildung und den Austausch von Modulen. Durch Vereinheitlichung

von Schnittstellen kann zudem die Anzahl der verwendeten, unterschiedlichen Schnittstellenelemente reduziert werden. Bei *Baureihen* erfolgt die Variantenbildung durch Skalierung bzw. Größenstufung bei ansonsten gleicher Funktion, gleicher konstruktiver Ausführung und gleichen Schnittstellen. Bei *Baukästen* erfolgt die Variantenbildung durch Kombination von Bausteinen unterschiedlicher Funktion und Gestalt mit einheitlichen Schnittstellen. Bei der *Plattformbauweise* erfolgt die Variantenbildung durch Aufsetzen von variablen Modulen, so genannten „Hüten“, auf einer vereinheitlichten Trägerstruktur.

Hinsichtlich der strukturellen Gestaltung zielen die aus dem Variantenmanagement bekannten Ansätze auf eine funktionale Zerlegung und damit auf eine verbesserte Konfigurierbarkeit des Produktes ab. Weiterhin wird eine klare Trennung von unveränderlichen und variablen Produktbereichen verfolgt. Eine Differenzierung des Produktes erfolgt mit Hilfe der variablen Produktbereiche. Ebenso sollen Wechselwirkungen zwischen Produkt-elementen, z. B. bei Änderungen, durch die Modulbausweise eingrenzt werden. Allen Strategien ist das Ziel gemeinsam, die unternehmensinterne Variantenvielfalt und die daraus resultierende Komplexität zu begrenzen und externe Variantenvielfalt zu ermöglichen. Die vorgestellten Strategien der Gestaltung variantenreicher Serienprodukte sind damit grundsätzlich auch für die Gestaltung individualisierter Produkte geeignet, jedoch können sie nicht undifferenziert übernommen werden, wie folgendes Beispiel zur Modularisierung demonstrieren soll:

Bei variantenreichen Produkten kann aufgrund des vor Markteinführung definierten Variantenprogramms und einer entsprechend bekannten Variantenstruktur genau festgelegt werden, welche einzelnen Produktbestandteile variabel gestaltet sein müssen. Die Einbindung der veränderlichen Komponenten in die Produktstruktur ist bekannt und Auswirkungen der Variantenbildung auf weitere Produktbereiche können durch Modularisierung minimiert werden. Die Individualisierung eines Produktes verursacht dagegen häufig einen größeren Aufwand als die bloße Konfiguration von vordefinierten Modulen eines. Dieser Sachverhalt wird verständlich, betrachtet man das Entfernen bzw. Austauschen eines Moduls als Spezialfall der Individualisierung. In der Regel können bei individualisierten Produkten Module aber nicht systematisch vor der Markteinführung definiert und abgegrenzt werden. Die später durch individuelle Anforderungen erforderlichen Änderungen an Baugruppen oder -teilen sind noch nicht bekannt. Ein entscheidender Unterschied liegt zudem in der weitaus größeren Zahl der möglichen individuellen Produktausprägungen. Zwar muss auch bei individualisierten Produkten Modularisierung als grundsätzliches Gestaltungsprinzip angestrebt werden, um eine individuelle Produktadaption durch Anpassung oder Ersetzen von Modulen zu ermöglichen und Folge-

änderungen zu begrenzen. Jedoch ist es unmöglich alle Elemente, die grundsätzlich individualisiert werden können, modular zu gestalten. Bereits bei verhältnismäßig einfachen Produkten mit geringer Elementzahl und -verknüpfung sind unzählige Individualisierungsmöglichkeiten denkbar, insbesondere da sich diese nicht nur auf den bereitgestellten Lösungsraum eines Unternehmens beschränken, sondern aus dem Anforderungsraum aller potenziellen Kunden resultieren. Deshalb müsste ein sehr hoher Modularisierungsgrad angestrebt werden, damit die betroffenen Produkt-elemente adaptiert werden können. Dieses Vorgehen wäre einerseits mit einem sehr hohen Entwicklungsaufwand verbunden, andererseits führen derart stark einschränkende Rahmenbedingungen zu suboptimalen Produkten. Denn jede Produktausprägung müsste neben ihrer eigentlichen Funktionserfüllung auch noch die Schnittstellenforderungen in den einzelnen beteiligten Elementen erfüllen, die jedoch selbst keinen Mehrwert für die Produktfunktion besitzen.

Die Modularisierung auf Baugruppenebene ist daher als alleinige Strategie nicht ausreichend. Funktionale und logische Module müssen auch auf einer übergeordneten Ebene, der Produktstruktur, gebildet werden. Hier werden die individualisierbaren Produktbereiche festgelegt und deren strukturelle Zusammenhänge (z. B. baulicher oder funktionaler Art) betrachtet und optimiert.

3.2.3 Planung der Produktstruktur individualisierter Produkte

Wesentlicher Inhalt der Strukturplanung ist die Festlegung der individualisierbaren Produktelemente und die Gestaltung der sich aus der Summe der Elemente ergebenden Struktur. In der Strukturplanung wird demzufolge nicht das gesamte, individualisierbare Produkt entwickelt, sondern es werden nur die strukturellen Zusammenhänge der Produktelemente festgelegt. Einzelne, unveränderliche Elemente werden aber auch auskonstruiert. Mit der Festlegung der unveränderlichen und der individualisierbaren Produktelemente wird zugleich das mögliche Produktspektrum definiert, das die Summe aller denkbaren, individuellen Produktausprägungen darstellt. Die Produktstrukturplanung ist ein iterativer Analyse- und Optimierungsprozess. Hier wird versucht, Bereiche der Produktstruktur so auszulegen, dass bestimmte Individualisierungsoptionen ermöglicht werden, z. B. wenn der Markt das unbedingt fordert. Gleichzeitig werden Bereiche identifiziert, in denen eine Produktindividualisierung aus struktureller Sicht noch möglich ist, auch wenn hierfür noch keine konkreten Anhaltspunkte, z. B. aus Marktbefragungen, vorliegen.

Zunächst werden die einzelnen funktionalen und gestalterischen Elemente des Produktes definiert. Für die einzelnen Elemente wird dabei festgelegt, welcher Grad an Individualisierung jeweils zweckmäßig ist. Dazu muss auf der einen Seite abgeschätzt werden, welche Individualisierungsoptionen für den Kunden relevant sind und auf der anderen Seite, welcher Individualisierungsgrad aus Sicht der Gesamtstruktur noch sinnvoll hinsichtlich der Änderungsauswirkungen bewältigt werden kann. In Abbildung 3-2 sind schematisch verschiedene Bereiche der Produktstruktur dargestellt, die sich in ihrem jeweiligen Grad der Individualisierung unterscheiden.

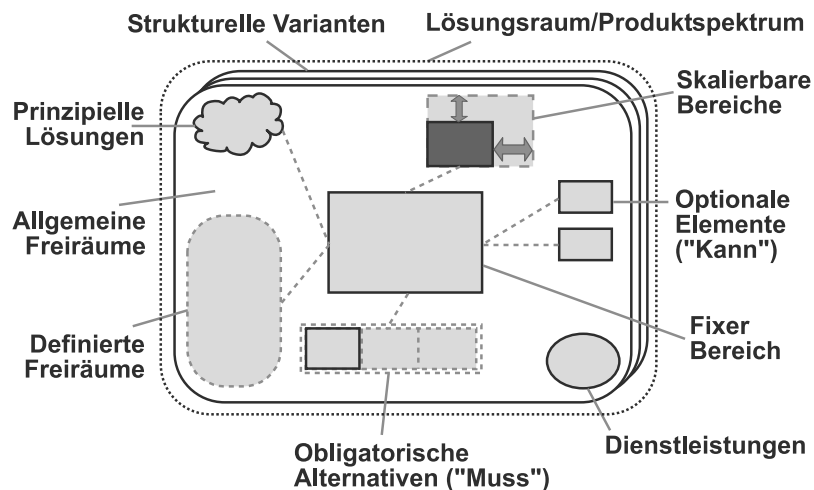


Abb. 3-2. Modell der Produktstruktur mit verschiedenen Individualisierungsgraden

Als *fixer Bereich* wird hierbei der unveränderliche Kern der Produktstruktur bezeichnet. Dieser schließt die Grundfunktion und -struktur des Produktes ein. Änderungen bei Elementen des fixen Bereiches hätten weit reichende strukturelle und gestalterische Änderungen im Gesamtprodukt zur Folge, die im Rahmen eines individuellen Kundenauftrages nicht sinnvoll bewältigt werden können. Änderungen des fixen Bereiches müssen daher über längere Zeiträume oder im Rahmen einer erneuten Strukturplanung vollzogen werden.

Neben dem fixen Bereich sind in der Produktstruktur auch *variable Bereiche* vorgesehen, in denen der Kunde Freiheitsgrade für eine individuelle Produkthanpassung findet: Mit Hilfe *obligatorischer oder optionaler Alternativen* kann eine individuelle Anpassung des Produktes durch Auswahl und Konfiguration wie bei variantenreichen Serienprodukten erfolgen. Ob-

ligatorische Alternativen bezeichnen dabei Strukturelemente, die für die Produktfunktion unerlässlich sind und die in einer bestimmten Ausprägung gewählt werden müssen (z. B. ein Antrieb). Optionale Alternativen sind Strukturelemente, die den fixen Produktbereich um vordefinierte Wahlmöglichkeiten ergänzen (z. B. Zubehör). Über *skalierbare Bereiche* kann eine weitergehende individuelle Produktanpassung erreicht werden. Es handelt sich um Strukturelemente, die kundenspezifisch innerhalb vordefinierter Grenzen und nach festgelegten Regeln angepasst werden können (z. B. Leistungsparameter oder geometrische Abmessungen). Die Anpassung erfolgt in einem kontinuierlichen Wertebereich. *Prinzipielle Lösungen* sind Elemente der Produktstruktur, deren individuelle Anpassung auf Basis eines vordefinierten Wirk- oder Gestaltungsprinzips erfolgt (z. B. Schalter, Abdeckungen oder Blenden, aber auch Funktionselemente). Die konkrete Ausgestaltung des Lösungsprinzips erfolgt kundenindividuell. Im Unterschied zu skalierbaren Bereichen existiert keine mathematisch beschreibbare Regel, nach der die gestalterische Produktanpassung erfolgt. Vordefinierte Lösungsprinzipien tragen zu einer wesentlichen Aufwandsreduktion bei der Adaption bei.

Schließlich können in der Produktstruktur Bereiche für eine hochgradige individuelle Produktanpassung vorgesehen werden. Dabei kann zwischen *definierten und allgemeinen Freiräumen* unterschieden werden. Ein definierter Freiraum kann individuell frei gestaltet werden. Die Gestaltungsmöglichkeit an sich ist jedoch vorgeplant und vorgesehen (z. B. die Gehäuseform). Definierte Freiräume sollten in der Produktstrukturplanung bereits frühzeitig berücksichtigt werden. Dem Entwickler ist dabei zwar nicht oder nur vage bekannt, was der Kunde später genau wünscht, aber es ist bereits im Vorfeld klar, dass Individualisierungswünsche in diesen Produktbereichen häufig auftreten werden. Die Produktstruktur muss deshalb bereits frühzeitig auf mögliche Änderungen in diesen Bereichen ausgelegt werden. Allgemeine Freiräume sind dagegen alle Produktbereiche, in denen individuelle Änderungen noch möglich sind, diese Änderungen wurden aber nicht vorgeplant. Allgemeine Freiräume werden daher nicht, wie die anderen Bereiche der Produktstruktur, gezielt in ihrer möglichen Bandbreite festgelegt. Sie können aber durch Analyse der Produktstruktur identifiziert oder auf Basis der Produktstrukturoptimierung gezielt erzeugt werden. Jegliche ungeplante Produktanpassung (z. B. Zusatzfunktionen oder andere strukturelle oder gestalterische Änderungen) kann innerhalb solcher allgemeinen Freiräume umgesetzt werden. Liegt ein solcher neuer Kundenwunsch vor, muss mit den Methoden der Strukturanalyse überprüft werden, ob die entsprechenden Freiräume vorhanden sind. Die Möglichkeiten einer Individualisierung können so im Bedarfsfall konkret abgeschätzt werden.

Dienstleistungen sind ein guter Ansatz, die beschriebenen Individualisierungsmöglichkeiten des Sachproduktes um ein immaterielles Leistungsangebot zu ergänzen. Sie werden hier aber nicht weiter betrachtet.

Insgesamt können von einer Produktstruktur *strukturelle Varianten* existieren, mit denen unterschiedliche Produktspektren, z. B. verschiedene Modellreihen oder Produkttypen, begründet werden. Die strukturellen Varianten zeichnen sich durch verschiedene fixe und variable Bereiche aus, wobei Überschneidungen möglich sind.

Das folgende Beispiel soll den Zusammenhang von Individualisierungsbereichen und Strukturplanung verdeutlichen: Im Rahmen der Strukturanalyse wurde ein Gehäuse als ein wenig vernetztes Produktelement identifiziert. Da bei individuellen Änderungen am Gehäuse in der Folge geringe Auswirkungen auf das Gesamtprodukt zu erwarten sind, wird dieses Element als definierter Freiraum bestimmt. Kunden können damit eine individuelle Gestaltung des Gehäuses vornehmen, sofern bestimmte Restriktionen z. B. hinsichtlich Material-, Sicherheits- oder Fertigungsanforderungen nicht verletzt werden. Ebenfalls ist beispielsweise durch Marktuntersuchungen bekannt, dass für ein Bedienungsfeld in jedem Fall individuelle Anpassungsmöglichkeiten vorgesehen werden müssen. Die Produktstruktur muss im Bereich des Bedienungsfeldes dann so ausgelegt werden, dass individuelle Änderungen leicht möglich sind, z. B. durch eine gezielte Modularisierung. Das Bedienungsfeld kann hier als obligatorische Alternative oder sogar als definierter Freiraum angelegt werden.

Zusammenfassend ist die Betrachtung der Elemente der Produktstruktur ein wesentlicher Aspekt der Strukturplanung: Um den Aufwand bei der späteren Produktindividualisierung so weit wie möglich zu minimieren, ist grundsätzliches Wissen über die Schwerpunkte der Individualisierungswünsche erforderlich, auf deren Basis gezielt die entsprechenden Bereiche der Produktstruktur identifiziert und optimiert werden können. Mit welchen Methoden diese Analyse und Optimierung unterstützt werden kann, wird in den nächsten beiden Abschnitten beschrieben.

3.2.4 Methoden zur Strukturanalyse

Bei der Strukturplanung eines individualisierten Produkts kann man entweder von einem bereits existierenden, bisher aber nicht individualisierbar gestalteten Produkt oder von einer zu detaillierenden Produktidee ausgehen (Lindemann u. Pulm 2001). Ausgangsbasis für die Planung der Produktstruktur sind die zu erwartenden Änderungen bei einem vorliegenden Individualisierungswunsch. Hier ist zu untersuchen, welche weiteren Produktelemente neben dem direkt von der Individualisierung betroffenen E-

lement noch angepasst werden müssen (Lindemann et al. 2003). Die Kenntnis der erforderlichen Anpassungen und der betroffenen Elemente erlaubt eine Abschätzung des bei der Individualisierung entstehenden Aufwandes und eine Optimierung der Produktstruktur.

Die Auswirkungen von Änderungen an Produktelementen auf andere Elemente lassen sich mit Hilfe eines semantischen Netzes darstellen (Kusiak 1999; Lindemann et al. 2005). Hier wird jeweils der Einfluss eines Elementes auf ein anderes betrachtet. Die Semantik entspricht der Aussage „Element 1 hat Auswirkung auf Element 2“. Die Netzstruktur ergibt sich aus der Vielzahl von Verknüpfungen zwischen den Elementen. Während funktionale und bauliche Zusammenhänge bei der Entwicklung z. B. mit Hilfe von Funktionsstrukturen und Baustrukturen gut dokumentiert werden, sind Auswirkungen von Änderungen an Produktelementen („Änderungsstrukturen“) meist nur implizit bekannt. Die Änderungsauswirkungen spielen, wie bereits beschrieben, für die Adaption individualisierter Produkte eine große Rolle, um unnötige Iterationsschleifen durch ungeplante Änderungsauswirkungen zu vermeiden. Die Analyse der bekannten baulichen und funktionalen Strukturen hilft beim Aufbau eines semantischen Netzes der Änderungsauswirkungen, sie muss aber durch eine systematische Erfassung weiterer, möglicher Änderungsauswirkungen ergänzt werden.

Allerdings entsteht bei genauer Betrachtung von Wechselwirkungen oft der Eindruck, dass gerade in komplexeren Produkten „alles mit allem“ zusammenhängt. Dies ist durch eine undifferenzierte Betrachtung von direkten und indirekten Abhängigkeiten zu erklären. Eine indirekte Abhängigkeit besteht dann, wenn Element A einen Einfluss auf B ausübt und B auf C. Hier übt dann Element A indirekt auch einen Einfluss auf C aus. Bei der Erfassung der Änderungsauswirkungen werden grundsätzlich nur die direkten Abhängigkeiten betrachtet. Bei Unklarheit über die Abhängigkeit zwischen zwei Elementen kann es hilfreich sein, gedanklich in eine Ebene mit stärkerem Detaillierungsgrad zu wechseln. Können auf einer detaillierten Ebene Abhängigkeiten ermittelt werden, ergibt sich die Existenz der Relation auf abstrakterer Ebene automatisch. In diesem Sinne kann es bei der Strukturplanung eines bis dato noch nicht existierenden Produktes nützlich sein, eine Produktstruktur auf Basis einer beispielhaften Produktausprägung zu entwerfen und diese Struktur gegebenenfalls wieder zu abstrahieren. Allerdings muss hier darauf geachtet werden, jeweils nur Elemente der gleichen hierarchischen Ebene zu betrachten. Werden verschiedene Relationsarten (semantische und hierarchische) vermischt, ergeben sich häufig Inkonsistenzen bei den Ergebnissen der nachfolgend beschriebenen Analyseverfahren.

Einflussmatrizen und -graphen

Die Erfassung der Relationen und die anschließende Analyse des semantischen Netzes können durch Methoden unterstützt werden. Eine bekannte Methode, die auf dem Aufbau semantischer Netze beruht, ist zum Beispiel die Einflussanalyse (Gausemeier et al. 1996; Lindemann et al. 2005) bzw. die Design Structure Matrix im englischen Sprachraum (Steward 1981; Browning 2001). Bei dieser Methode werden die zu betrachtenden Elemente eines Produktes zeilen- und spaltenweise in einer Einflussmatrix aufgetragen. Anschließend wird ein vorhandener Einfluss eines Elementes auf ein anderes im entsprechenden Schnittpunkt der Elemente in der Matrix markiert (Abbildung 3-3 links).

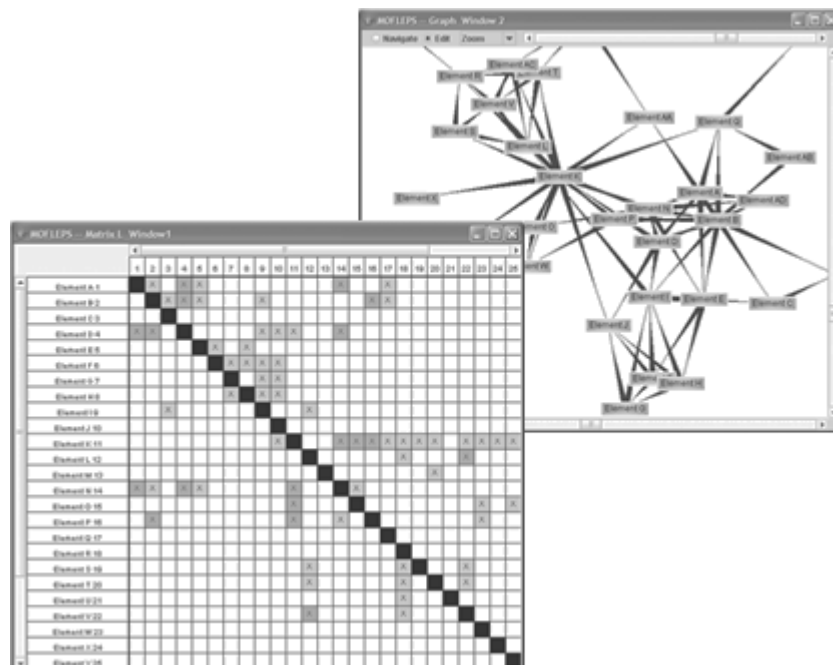


Abb. 3-3. Gegenüberstellung der Matrix- und der Grafendarstellung (Quelle: Mofleps¹)

Sind alle Relationen in der Matrix abgebildet, kann z. B. relativ einfach auf aktive Elemente oder passive Elemente in der Produktstruktur geschlossen

¹ Mofleps (MOdelling Of FLExible Product Structures) ist ein am Lehrstuhl für Produktentwicklung, TU München, entwickeltes Rechnerwerkzeug zur Visualisierung, Analyse und Optimierung komplexer Strukturen

werden. *Aktive Elemente* haben einen starken Einfluss auf viele andere Elemente, werden aber kaum durch andere Elemente beeinflusst. *Passive Elemente* sind dagegen stark durch andere Elemente beeinflusst, wirken selbst aber nur einen geringen Einfluss aus. Beide Elementarten haben wegen ihres starken Einflusses bzw. ihrer starken Beeinflussbarkeit nur wenige Freiheitsgrade in der Gestaltung. So sind weder stark aktive noch passive Elemente für individuelle Produktanpassungen gut geeignet.

Zwar kann mit der Einflussmatrix der generelle Einfluss eines Elementes auf ein anderes gut abgebildet werden, für die Analyse und Optimierung der Struktur komplexer, individualisierter Produkte ist die Darstellungsform der Matrix aber nicht in jedem Fall geeignet. Übergreifende Strukturzusammenhänge können gerade in größeren oder komplexen Produktstrukturen mit der Matrix nicht sinnvoll visualisiert werden (Lindemann et al. 2005). Die Matrix stellt die einzelnen Elemente und ihre Relationen dar, die Sicht auf das Gesamtsystem geht aber etwas verloren. Um strukturelle Analysen des Gesamtsystems zu unterstützen, kann auf Ansätze und Operationen der Grafentheorie zurückgegriffen werden (Maurer et al. 2004). Die Grafentheorie stellt mathematische Methoden bereit, mit denen komplexe Strukturen, die durch verknüpfte Elemente hervorgerufen werden, analysiert werden können. Als Graf wird ein Gebilde aus Knoten, die durch Kanten verbunden sein können, bezeichnet. Mit Hilfe dieser Grafen können auch Elemente und Relationen eines Systems dargestellt werden. Prinzipiell enthält die Grafendarstellung dieselbe Information wie die markierten Schnittpunkte der Matrix. Die Grafendarstellung bietet allerdings andere Möglichkeiten zur Darstellung und Interpretation von Wechselwirkungen. So ermöglichen beispielsweise selbstordnende Grafen die Darstellung von Elementabstoßung und -anziehung. Abstoßung und Anziehung werden durch mangelnde oder vorhandene gegenseitige Verknüpfungen hervorgerufen. Elemente, die viele gemeinsame Verknüpfungen aufweisen, ziehen sich dabei an, Elemente mit wenigen Verknüpfungen werden abgestoßen (Abbildung 3-3, rechts). Damit werden Elemente mit starken Wechselwirkungen und daher zentraler Bedeutung in derartigen Grafendarstellungen mittig angeordnet. Elemente mit geringem Einfluss auf andere Elemente werden dagegen eher am Rand der Darstellung platziert. Wie in Abbildung 3-3 leicht ersichtlich wird, lassen sich in der Grafendarstellung die zentralen und die eher isolierten Strukturelemente eines Produktes einfacher als in der Matrixdarstellung ermitteln. Die isolierten Strukturelemente mit wenigen Verknüpfungen sind prinzipiell besser für eine Individualisierung geeignet.

Praktische Erfahrungen zum Einsatz von Einflussmatrizen und -graphen haben gezeigt, dass die Aufbereitung einer Produktstruktur ab einer Zahl von 10 Elementen in Matrixform ausgesprochen schwierig visuell erfasst

und analysiert werden kann (Browning 2001). Hingegen konnten hinsichtlich des generellen Verständnisses der Struktur bei Grafenanordnungen auch mit mehr als 50 Elementen noch sehr gute Erfahrungen gemacht werden. Bei Untersuchungen von Produktstrukturen mit bis zu 500 Elementen und über 3000 dazwischen liegenden Relationen konnten mit der Grafendarstellung immer noch allgemeine Charakterisierungen der Struktur erfolgen. Da die Grafendarstellung durch die Selbstordnenden Grafen zudem dynamisch ist, werden strukturelle Änderungen unmittelbar ersichtlich. So können z. B. ehemals zentrale Elemente durch Entfernen von Relationen in den Randbereich gelangen.

Bestimmte strukturelle Besonderheiten sind dagegen nur in Matrixform sinnvoll visualisierbar (Browning 2001). Von Bedeutung für die Strukturplanung sind dabei

- Kreisschlüsse,
- Hierarchien,
- Cluster oder
- Brücken.

Bei *Kreisschlüssen* setzt sich der Einfluss eines Elementes auf andere Elemente und schließlich wieder auf sich selbst fort. *Hierarchien* sind Ordnungen von Elementen, wobei übergeordnete Elemente Einfluss auf alle untergeordneten Elemente ausüben. *Cluster* sind Elementgruppen, bei denen vorrangig Relationen innerhalb der Gruppe auftreten, aber kaum Relationen nach außen wirken. Als *Brücken* werden Elemente bezeichnet, die eine einzige Verbindung zwischen zwei Subgraphen, z. B. Clustern, herstellen. Werden z. B. Cluster oder Hierarchien identifiziert, so kann die Änderungsabhängigkeit innerhalb von diesen Produktbereichen oder zwischen einzelnen Elementen leicht bestimmt werden. Eine Abschätzung von zu erwartenden Wechselwirkungen bei zukünftigen Adaptionen wird möglich. Der Grad der Vernetzung zwischen Produktbereichen sowie die Zahl und der Umfang von Kreisschlüssen sagen zudem etwas über die Reichweite von Produktänderungen aus. Änderungsauswirkungen können signifikant eingeschränkt werden, wenn z. B. Kreisschlüsse oder Hierarchien identifiziert und durch konstruktive Maßnahmen beseitigt werden. Die genannten strukturellen Besonderheiten sind in Abbildung 3-4 dargestellt.

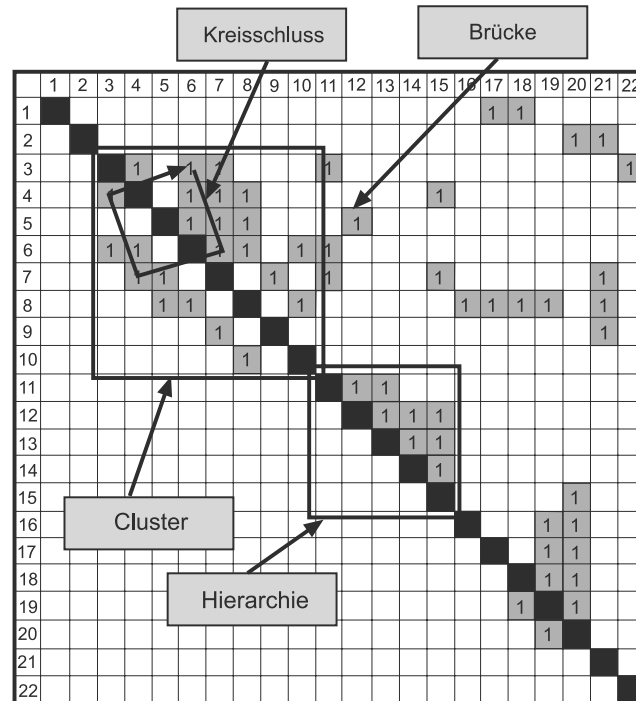


Abb. 3-4. Einflussmatrix als Hilfsmittel der Strukturanalyse

Allerdings können diese strukturellen Besonderheiten in der Regel nicht mehr durch „genaues Hinschauen“ erkannt werden. Gerade bei komplexeren Produkten kann die Einflussmatrix nicht mehr so einfach überschaut werden und eine „händische“ Analyse vorgenommen werden. Hierzu bietet sich die Nutzung von Sortieralgorithmen an, die Zeilen und Spalten solange umsortieren, bis eine entsprechende Interpretation der Matrix erfolgen kann.

3.2.5 Vorgehensweise bei der Strukturplanung

Für die Strukturplanung individualisierter Produkte ergeben sich mit Hilfe der Einflussmatrizen und -graphen verschiedene Möglichkeiten, die in Abbildung 3-5 zusammengefasst sind.

Zunächst werden Elemente der Produktstruktur und deren Wechselwirkungen mit Hilfe der oben beschriebenen Methode Einflussanalyse erfasst. Ergebnis ist die Darstellung der Produktstruktur in einer Einflussmatrix, die ebenso in eine Grafendarstellung übertragen werden kann. Im Folgenden können drei Zielrichtungen der Strukturplanung unterschieden werden:

- Analytische Überprüfung von Bereichen der Produktstruktur hinsichtlich Adaptionaufwand, z. B. bei vorliegenden Kundenwünschen
- Analytische Suche nach potenziellen Individualisierungsbereichen bei existierenden Produktstrukturen
- Synthese bzw. Anpassung von Strukturen, um gezielt Individualisierungsbereiche zu erzeugen.

Links in Abbildung 3-5 ist das Vorgehen zur *Analyse von Produktstrukturen hinsichtlich bereits bekannter Individualisierungswünsche* dargestellt. Dabei wird ermittelt, mit welchem Aufwand zu rechnen ist, wenn eine konkrete Individualisierungsmaßnahme an einem Produktelement durchgeführt werden soll (Maurer et al. 2004). Für diese Analyse eignet sich die Grafendarstellung besonders gut, da hier nur die relevanten Bereiche der Produktstruktur, das heißt betroffene Elemente und die unmittelbaren Wechselwirkungen, über Filter angezeigt werden können. Ergebnis der Analyse können konkrete Ansatzpunkte sein, um den Adaptionaufwand bei einem vorliegenden Individualisierungswunsch zu bewerten und durch Strukturanpassung zu verringern. Der mittlere Pfad in Abbildung 3-5 zeigt das Vorgehen zur *Identifikation von so genannten signifikanten Strukturbereichen*, das heißt Strukturbereiche mit geringer Vernetzung und folglich relativ geringen Änderungsauswirkungen. Diese Bereiche sind potenziell für eine spätere Individualisierung gut geeignet. Genauso können auch hochgradig vernetzte Produktbereiche gezielt von der Individualisierung ausgenommen werden. Im zweiten dargestellten Fall hilft also die Strukturanalyse dabei, konkrete Hinweise für mögliche Individualisierungsangebote zu geben (Lindemann et al. 2005; Yu et al. 2003). Für diese Analyse eignen sich Grafen- oder Matrizendarstellung gleichermaßen. Bei den beiden bisher aufgezeigten Fällen handelt es sich um eine reine Ermittlung bereits vorhandener struktureller Möglichkeiten. Als dritte Möglichkeit kann daher die *Synthese für die Individualisierung geeigneter Strukturen* angesehen werden (rechts in Abbildung 3-5). Die Produktstrukturplanung dient in diesem Fall der Entwicklung einer optimierten Produktstruktur, die für spätere Individualisierungsmaßnahmen besser geeignet ist als die ursprünglich betrachtete Struktur. Bei der Optimierung werden die oben beschriebenen strukturellen Besonderheiten näher betrachtet und z. B. Cluster gezielt erzeugt oder Kreisschlüsse entfernt. Diese Optimierung, auf die im folgenden Abschnitt näher eingegangen wird, findet allerdings zunächst nur auf struktureller Ebene statt, weshalb die abgeleiteten Strukturadaptionen vom Entwickler auf Realisierbarkeit zu überprüfen sind. In zwei nachfolgenden Beispielen sollen jedoch zunächst die beiden, oben beschriebenen Analyseverfahren (links und Mitte Abbildung 3-5) behandelt werden.

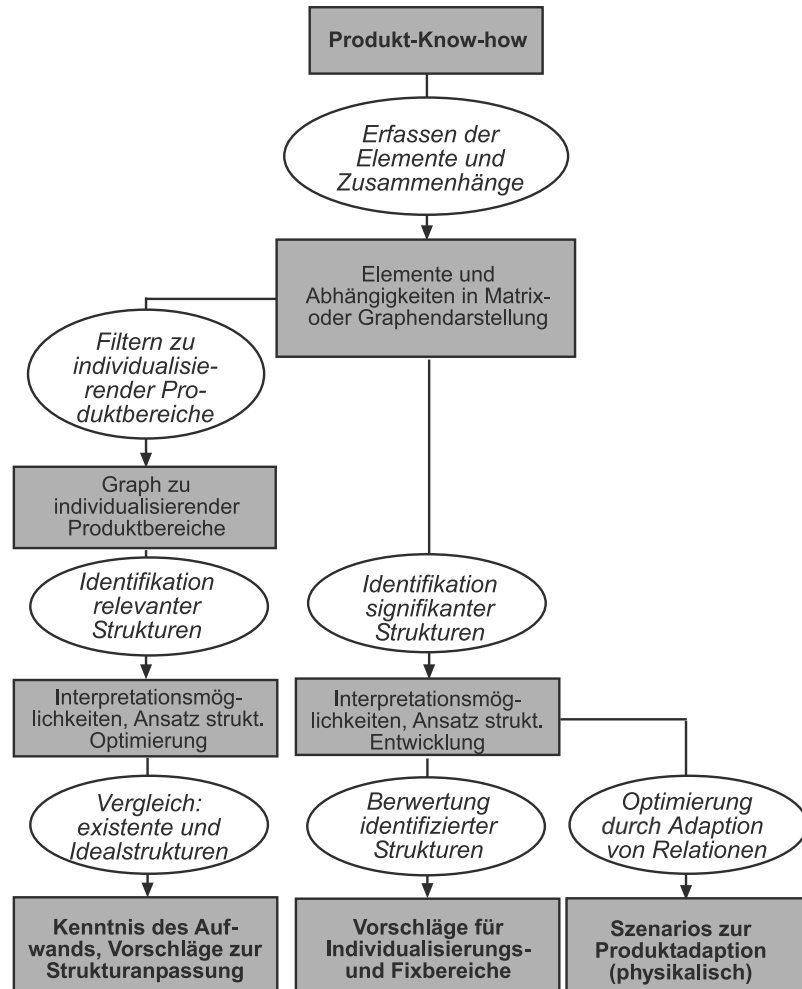


Abb. 3-5. Möglichkeiten der Produktstrukturanalyse

Beispiel für die Strukturanalyse

Am Beispiel eines handelsüblichen Kugelschreibers soll aufgezeigt werden, inwiefern durch eine Analyse der Produktstruktur prognostizierte Individualisierungswünsche auf Realisierbarkeit überprüft werden können. Abbildung 3-6 zeigt die grundlegenden Elemente des Kugelschreibers und die dazwischen ermittelten Änderungsabhängigkeiten in Matrix- und Graphform.

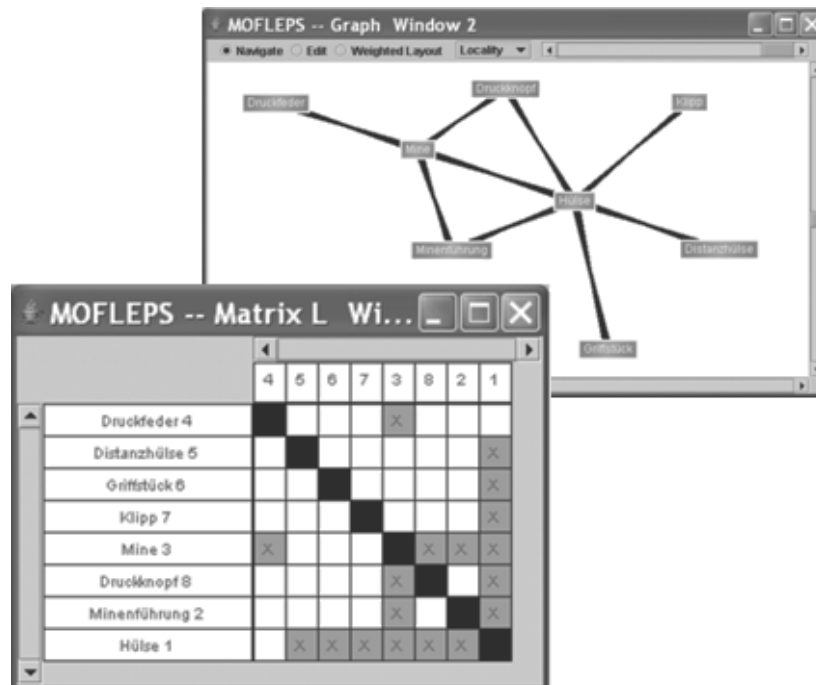


Abb. 3-6. Kugelschreiber – Beispielhafte Produktstruktur mit Änderungsauswirkungen (Quelle: Mofleps)

Die betrachteten Elemente des Kugelschreibers sind die Bauteile

- Druckfeder,
- Druckknopf,
- Minenführung,
- Mine,
- Hülse,
- Klapp,
- Griffstück und
- Distanzhülse.

Wie im vorangehenden Kapitel erläutert, wird hier nur eine einzige hierarchische Ebene betrachtet (Druckfeder, Druckknopf, Minenführung, aber nicht der Verstellmechanismus, der aus diesen Elementen besteht). Durch Marktforschung wurde herausgefunden, dass die Schwerpunkte der späteren Individualisierung des Kugelschreibers bei den Bauteilen Griffstück, Druckknopf und Hülse liegen. Die Struktur muss dahingehend analysiert werden, ob Adaptionen an diesen Elementen mit vertretbarem Aufwand möglich sind und wenn nicht, welche Änderungen aus struktureller Sicht

für die Optimierung vorzunehmen sind. Aus der Grafendarstellung ist leicht zu erkennen, dass das Element „Griffstück“ allein mit dem Element „Hülse“ verknüpft ist und sich folglich bei einer Änderung des Griffstücks nur direkte Folgen auf die Hülse ergeben. Das Griffstück scheint daher aufgrund der leicht überschaubaren Änderungsauswirkungen gut für die Individualisierung geeignet, vorausgesetzt notwendige parallele Adaptionen der Hülse können beherrscht werden. Komplizierter erscheint bereits eine mögliche Individualisierung des Elements „Druckknopf“, da Änderungsauswirkungen sowohl auf die „Hülse“ als auch auf die „Mine“ bestehen. Der Druckknopf stellt mit diesen zwei Relationen zwar noch kein zentrales Element der Produktstruktur dar, jedoch wären im Bedarfsfall die möglichen Änderungsauswirkungen detaillierter zu betrachten. Klar ersichtlich ist hingegen aus der Grafendarstellung, dass eine Adaption des Elements „Hülse“ sehr weit reichende Änderungen im gesamten Produkt nach sich ziehen wird, stellt das Element doch das zentrale Verbindungselement der Struktur dar. Als eine mögliche Maßnahme zur Optimierung der Produktstruktur bietet sich z. B. die bauliche Unterteilung der Hülse an, womit die Häufung der Änderungsabhängigkeiten an einem Element verringert werden kann. Ob eine konstruktive Umsetzung letztlich unter Berücksichtigung weiterer Randbedingungen möglich ist, kann aus der Strukturbetrachtung nicht geschlossen werden, jedoch erhält der Entwickler wertvolle Anregungen zur Optimierung.

In einem weiteren Beispiel, einer größeren Industriemaschine, liegt bereits eine modellierte Produktstruktur vor, jedoch sind keine Informationen über mögliche Individualisierungstendenzen zukünftiger Kunden verfügbar (vgl. Abbildung 3-7). Alle Bereiche, die sich für eine spätere Individualisierung tendenziell eignen bzw. nicht eignen, sollen erst durch Strukturanalyse identifiziert werden. Der linke Teil von Abbildung 3-7 zeigt den ungeordneten Zustand der Matrix, die 25 Elemente umfasst. In dieser Abbildung ist keine charakteristische Struktur erkennbar und die Vielzahl an Elementen macht eine manuelle Suche nach Strukturmerkmalen nur für Experten möglich. Der rechte Teil von Abbildung 3-7 zeigt die Anordnung der Matrix nach Durchlaufen eines Algorithmus zur Identifizierung von Clustern und Hierarchien. Dabei wurden noch keine strukturellen Änderungen vorgenommen. Die Elemente werden lediglich durch Verschieben in der Matrix neu sortiert. Es werden jeweils eine Spalte sowie die hierzu korrespondierende Zeile verschoben. Hierdurch wird an den bestehenden semantischen Relationen zwischen den Elementen nichts verändert. Jedoch können übergreifende Strukturzusammenhänge durch die Verschiebung später besser aufgezeigt werden. In der rechten Matrix von Abbildung 3-7 wird nun ersichtlich, dass in der Produktstruktur drei strukturelle Module existieren, die sich jeweils in einem Element überlappen (durch Umrän-

dungen hervorgehoben). Wesentliche Eigenschaft von Clustern ist hierbei, dass die Verknüpfungszahl der Elemente innerhalb der Cluster deutlich größer ist als zwischen den Clustern. Somit ist die Schlussfolgerung möglich, dass sich Änderungen aufgrund von individuellen Kundenwünschen jeweils intensiv auf die Elemente des gleichen Clusters auswirken, jedoch nur geringe Auswirkungen auf Elemente der anderen Cluster haben. Bei einem vorliegenden Kundenwunsch wären somit hauptsächlich die Auswirkungen auf Elemente des gleichen Clusters näher zu betrachten, was die Analyse der Umsetzbarkeit des Kundenwunsches bereits deutlich erleichtert.

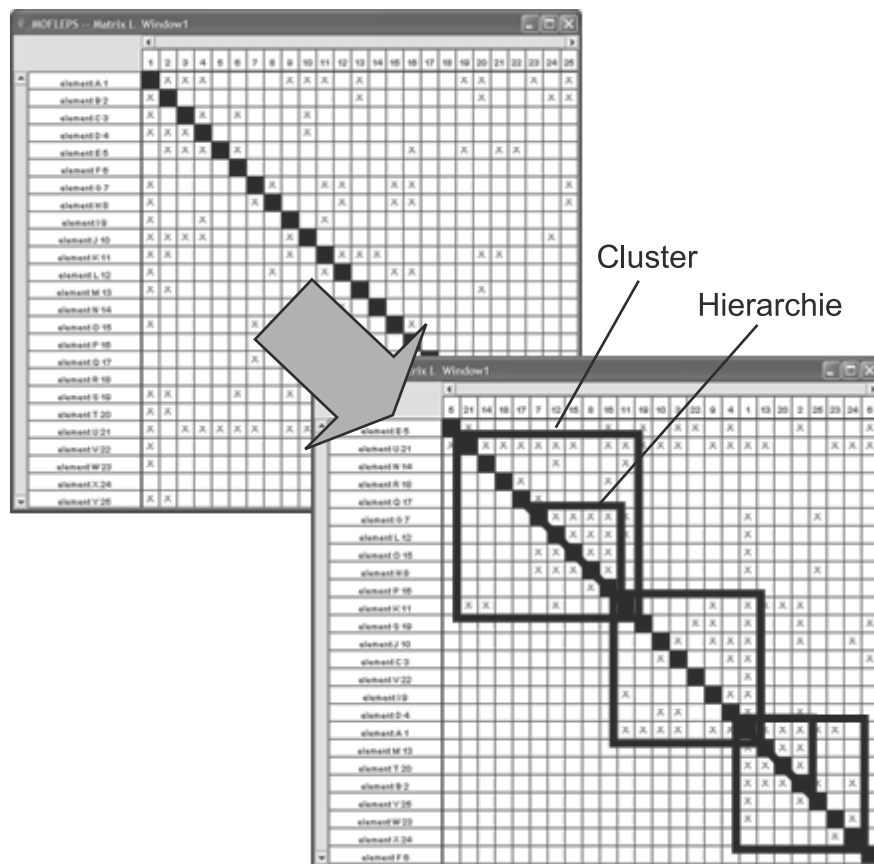


Abb. 3-7. Produktstruktur mit identifizierten Strukturelementen (Quelle: Mofleps)

Innerhalb zweier der drei Cluster konnten weiterhin Hierarchien von Änderungsauswirkungen ermittelt werden (eingerahmte dreieckige Bereiche im oberen und unteren Cluster). Diese gestatten eine weitere Einteil-

lung der Individualisierungseignung der Elemente innerhalb der betreffenden Cluster. Elemente, die am Anfang einer derartigen Hierarchie angesiedelt sind, die also über die Relationen Änderungsfolgen auf nach gelagerte Elemente weiterreichen, eignen sich kaum für Individualisierungsmaßnahmen, da eine Vielzahl an folgenden Adaptionsmaßnahmen für die Realisierung erforderlich wären. Dagegen verfügen Elemente der untersten Hierarchieebene nur über wenige Änderungsauswirkungen, so dass Adaptionen an diesen Elementen leichter beherrschbar sind.

Mit den Beispielen Kugelschreiber und Industriemaschine wurden zwei grundsätzliche Zielrichtungen der Strukturplanung demonstriert. Zum einen ermöglicht die Strukturanalyse die Überprüfung von Produktbereichen bei vorliegenden Individualisierungswünschen. Zum anderen kann mit Hilfe der strukturanalytischen Methoden auch nach prinzipiell vorhandenen Individualisierungsbereichen gesucht werden. Neben der Analyse vorhandener Produktstrukturen hinsichtlich ihrer Eignung für Adaptionsmaßnahmen ist für die Gestaltung individualisierbarer Produkte die Synthese optimierter Strukturen von entscheidender Bedeutung. Die Strukturoptimierung wird im folgenden Abschnitt behandelt.

3.2.6 Methoden zur Strukturoptimierung

Ziel der Optimierung ist es, eine existierende Produktstruktur durch geschicktes Hinzufügen oder Entfernen möglichst weniger Elemente oder Relationen auf gewünschte Individualisierungsoptionen einzustellen (Lindemann et al. 2005). So kann z. B. durch das Hinzufügen einer Relation eine Hierarchiestruktur vervollständigt werden. Durch das Entfernen einer Relation können zwei Teilgraphen im Produktspektrum voneinander entkoppelt werden. Daraus ergeben sich unter Umständen zwei getrennte Cluster oder Hierarchien und damit eine aus Individualisierungsgesichtspunkten günstigere Struktur. Durch Reduktion von Kreisschlüssen in der Produktstruktur können Änderungsauswirkungen deutlich eingeschränkt und die Komplexität bei künftigen Elementadaptionen verringert werden. Solche Optimierungsansätze aus struktureller Sicht stehen nicht immer im Einklang mit weiteren Forderungen an das Produkt. So kann eine Verknüpfung zwischen zwei Elementen (z. B. Rahmen und Motorblock) strukturell hinderlich, jedoch physikalisch unvermeidbar sein. Mit der vorgestellten Strukturbetrachtung werden daher nur potenzielle Optimierungsszenarios entworfen, die vom Produktentwickler hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit bewertet werden müssen. Diese strukturellen Optionen erweitern allerdings den Anforderungsraum der Konstruktion.

Beispiel für die Strukturoptimierung

Am Beispiel der bereits beschriebenen Industriemaschine soll das praktische Vorgehen bei der Strukturoptimierung erläutert werden. Abbildung 3-8 zeigt im oberen Teil die sortierte Matrix aus dem oben behandelten Beispiel. Mit Hilfe der Strukturanalyse wurden drei Cluster identifiziert (in Abbildung 3-8 durch Rahmen hervorgehoben). Nun erfolgte eine Optimierung der vorhandenen Struktur. Grafentheoretisch wurden hierbei eine Reduzierung der Gesamtzahl von Kreisschlüssen und insbesondere eine Verringerung der Kreisschlusslänge angestrebt. Dabei zeigte sich, dass durch Entfernen von insgesamt vier Relationen eine deutlich optimierte Produktstruktur erzeugt werden kann, die in der unteren Matrix dargestellt ist (Abbildung 3-8).

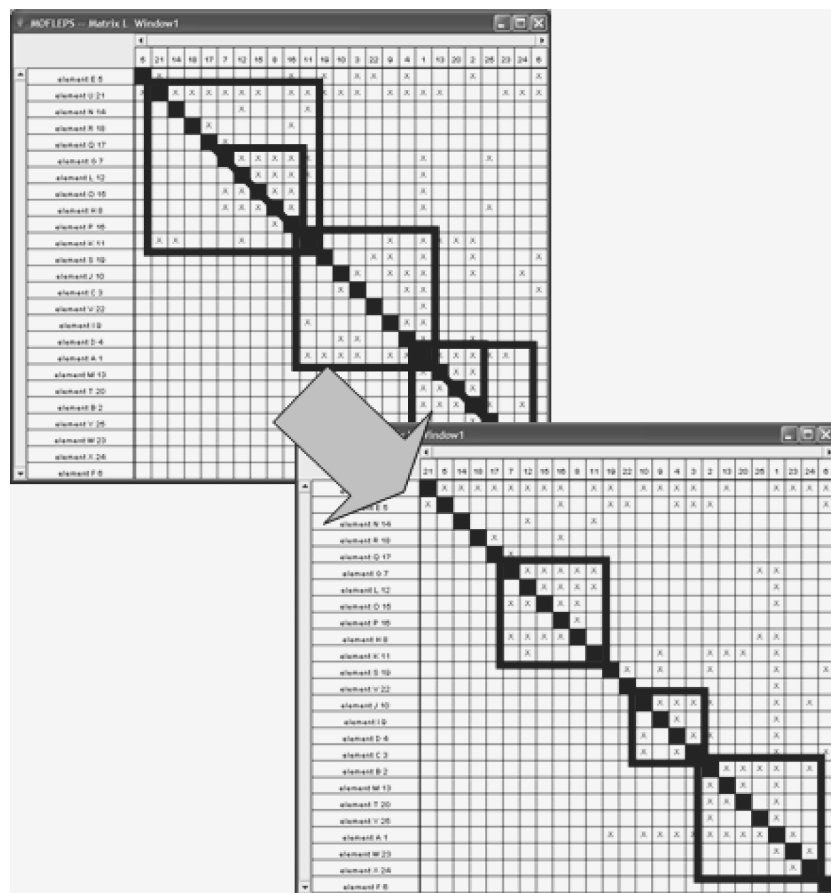


Abb. 3-8. Optimierung einer Produktstruktur durch Adaption von Relationen

Wie leicht ersichtlich wird, sind die Clustergrößen in der optimierten Struktur deutlich geschrumpft und der interne Vernetzungsgrad der Cluster ist gestiegen. Auch die Anzahl der Kreisschlüsse wurde wesentlich reduziert. Die durchgeführten Änderungen in der Struktur (im beispielhaften Fall das Entfernen von Relationen zwischen Elementen) müssen in jedem Fall vom Entwickler hinsichtlich weiterer Randbedingungen (z. B. der konstruktiven Ausführung) überprüft werden. Die strukturelle Optimierung zeigt damit lediglich Möglichkeiten auf und erfordert eine nähere konstruktive Betrachtung der spezifischen Produktbereiche.

3.2.7 Zusammenfassung

Wie eingangs dargestellt wurde, können etablierte Strategien des Variantenmanagements nur begrenzt für die Handhabung individualisierter Produkte herangezogen werden. Insbesondere für den Aufbau und die Anpassung geeigneter Produktstrukturen sind aufgrund geänderter Randbedingungen neue Hilfsmittel für die Produktentwicklung erforderlich. Durch eine ausgeprägte Strukturplanung kann der Adaptionaufwand beim Großteil der Individualisierungsmaßnahmen gegenüber einer nicht optimierten Produktstruktur deutlich minimiert werden. Der präsentierte Ansatz zur Planung individualisierter Produkte nutzt vorhandene Bau- und Funktionsstrukturen, um auf eine Struktur der Änderungsabhängigkeiten zu schließen, die üblicherweise nur implizit bekannt ist. Im vorangegangenen Kapitel wurden Methoden der Darstellung, Analyse und Optimierung solcher Produktstrukturen aufgezeigt. Mögliche Interpretationen von Analyseergebnissen dienen zur Ableitung von Handlungsanweisungen für die Gestaltung einer adäquaten Produktstruktur individualisierter Produkte. Diese ist dann im jeweiligen Fall an Hand der tatsächlich vorhandenen strukturellen Randbedingungen zu überprüfen und gestalterisch umzusetzen.

3.2.8 Literatur

- Andreasen, M. M.; McAlloone, T.; Mortensen, N. H.: Multi-product development – platforms and modularisation. Lyngby: DTU 2001.
- Blackenfelt, M.: Managing complexity by product modularisation. Stockholm: KTH 2001.
- Browning, T. R.: Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems – A Review and New Directions. IEEE Transactions on Engineering Management 48 (2001) 3, pp. 292-306.

- Erixon, G.: Modular Function Deployment – a method for product modularisation. Stockholm: KTH 1998.
- Firchau, N.: Variantenoptimierende Produktgestaltung. Göttingen: Cuvillier 2003. Zugl. Braunschweig: TU, Diss. 2003.
- Gausemeier, J.; Fink, A.; Schlacke, O.: Szenario-Management – Planen und Führen mit Szenarien. München: Hanser 1996.
- Kohlhase, N.: Strukturieren und Beurteilen von Baukastensystemen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1997. Zugl. Darmstadt: TU, Diss. 1997.
- Kusiak, A.: Engineering design – products, processes and systems. San Diego: Academic Press 1999.
- Kusiak, A.: Computational intelligence in design and manufacturing. New York: John Wiley & Sons 2000.
- Lindemann, U.; Pulm, U.: Enhanced product structuring and evaluation of product properties for mass customization. In: Tseng, M. M. (ed.): The customer centric enterprise, advances in mass customization and personalization, World congress on mass customization and personalization, Hong Kong, 01.-02.10.2001, Hong Kong: HKUST 2001, (CD-Rom).
- Lindemann, U.; Pulm, U.; Maurer, M.: Early evaluation of product properties for individualized products. In: Reichwald, R.; Piller, F.; Tseng, M. M. (eds.): Leading mass customization and personalization from an emerging business to a mainstream business model, World congress on mass customization and personalization, München, 06.-08.10.2003, München: TU 2003, (CD-Rom).
- Lindemann, U.; Maurer, M.; Kreimeyer, M.: Intelligent strategies for structuring products. In: Clarkson, J.; Huhtala, M. (Eds.): Engineering Design - Theory and practice. Cambridge, UK: Engineering Design Centre 2005.
- Maurer, M.; Lindemann, U.: Identification of Structural Characteristics in Product Spectra. In: Negoita, M. G.; Howlett, R. J.; Jain, L. C. (eds.): Knowledge based intelligent information and engineering system, International Conference, KES 2004, Wellington, 20.-25.09.2004. Berlin: Springer 2004, pp. 1157-1163.
- Maurer, M.; Pulm, U.; Lindemann, U.: Utilization of graf constellations for the development of customizable product spectra. In: Fourth International ICSC Symposium on Engineering of Intelligent Systems EIS 2004, Madeira, 29.02.-02.03.2004. Madeira: ICSC Interdisciplinary Research 2004.
- Rich, E.: Artificial intelligence. Singapore: McGraw-Hill 1985.
- Riitahuhta, A.; Pulkkinen, A.: Design for configuration. Berlin: Springer 2001.
- Schuh, G.; Schwenk, U.: Produktkomplexität managen. München: Hanser 2001.
- Steward, D. V.: The design structure system: a method for managing the design of complex systems. IEEE Transactions on Engineering Management 28 (1981), pp. 71-74.
- Yu, T. L.; Yassine, A.; Goldberg, D. E.: A genetic algorithm for developing modular product architectures. In: IlliGAL report 2003024 (2003).

Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in
Entwicklung und Produktion

Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh, M.F. (Hrsg.)

2006, XIV, 256 S., Hardcover

ISBN: 978-3-540-25506-2