

VISUALISIERUNG VON DFX-ANFORDERUNGEN IN DER PRODUKTENTWICKLUNG AUF BASIS IHRER WECHSELWIRKUNGEN – METHODE UND ANWENDUNGEN

Stefan Bauer

Zusammenfassung

Erfolgreich neue Produkte zu entwickeln bedeutet vor allem, innerhalb komplexer Strukturen wechselwirkender Anforderungen aus den verschiedensten DfX-Teilgebieten strategisch richtige Entscheidungen zu treffen. Sowohl geeignete Ansätze zur Nutzung vorhandener Synergien als auch Entscheidungen über notwendige Kompromisse oder Variantenbildungen im Produktentwicklungsprozess müssen letztendlich aus den wechselseitigen Beziehungen der verschiedenen Anforderungen abgeleitet werden. Trotz des zentralen Einflusses der Wechselwirkungen auf Entscheidungsaufgaben in der Produktentwicklung sind zu ihrer Handhabung derzeit noch keine befriedigenden methodischen Ansätze verfügbar.

In dem Beitrag soll daher ein neues Verfahren vorgestellt werden, welches auf der Basis von Analogien aus der Mechanik die komplexen Strukturen wechselwirkender Anforderungen in Entscheidungsaufgaben graphisch sichtbar macht. Durch diese Art von Veranschaulichung ist ein wichtiger Schritt hin zu einem vertieften Verständnis komplexer Entscheidungsaufgaben mit wechselwirkenden Anforderungen gegeben, welcher als Grundlage für verschiedenste Anwendungen im Produktentwicklungsprozess vorstellbar ist.

Neben dem zugrundeliegenden Konzept und bereits entwickelten Lösungsansätzen sollen in dem Beitrag auch praktische Anwendungsmöglichkeiten einer derartigen Visualisierung von Entscheidungsaufgaben in der Produktentwicklung (z. B. Wahl von Strategien und Ableitung von Gewichtungsfaktoren) diskutiert werden.

1 Visualisierung von Wechselwirkungen in der Produktentwicklung

1.1 Motivation

Ziel ist es, das komplexe Geflecht wechselwirkender Anforderungen in Entscheidungsaufgaben in der Produktentwicklung derart graphisch aufzuarbeiten, dass auf dieser Basis grundlegende Entscheidungen (z. B. Gewichtung der Anforderungen) intuitiver, sicherer und fehlerunanfälliger getroffen werden können.

1.2 Konzept

Die Aufgabe bei der Visualisierung der Wechselwirkungen aller Kriterien besteht grundsätzlich darin, ihre Gesamtstruktur aufzudecken und graphisch in einer Ebene darzustellen. Hierfür soll ein neues Verfahren über Analogien aus der Mechanik beschrrieben werden [1].

In diesem Ansatz werden die Kriterien als punktförmige Elemente (**Kriterienpunkte**) beschrieben und zunächst in einer Ebene (**Visualisierungsebene**) nach einem bestimmten Schema zu einer **Initialstruktur** verteilt (Bild 1). Der Abstand zwischen den Kriterienpunkten K_i und K_j beträgt dabei d_{ij} .

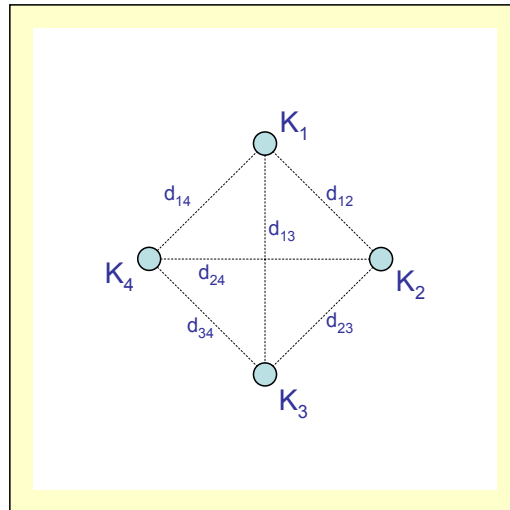


Bild 1: Initialstruktur der Kriterienpunkte

Die Wechselwirkungen zwischen den Kriterien werden als **Kräfte** zwischen den entsprechenden Kriterienpunkten in der Visualisierungsebene modelliert. Bei komplementären Kriterien K_i und K_j soll eine anziehende Kraft F_{ij} zwischen den repräsentierenden Kriterienpunkten in der Visualisierungsebene wirken, während konkurrierende Kriterien entsprechend eine Abstoßung bewirken müssen. Die Kraft F_{ij} zwischen den Kriterienpunkten K_i und K_j errechnet sich nach (1):

$$F_{ij} = C \cdot \frac{w_{ij}}{d_{ij}^2} \quad (1)$$

Die in (1) enthaltenen Größen sind in Tabelle 1 erklärt.

Tabelle 1: Größen zur Berechnung der Kraft zwischen zweier Kriterienpunkte

	Definitionsbereich	Bedeutung
C	$C \in]0; \infty[$	Allgemeine Konstante zur Skalierung der Beträge der Kräfte
w_{ij}	z. B. $w_{ij} \in \{-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5\}$	Maß für die spezifische Wechselwirkung zwischen Kriterium K_i und K_j ; muss für alle Kriterien paarweise in einer Wechselwirkungsmatrix (vgl. Bild 2) eingetragen werden
d_{ij}	$d_{ij} \in]0; \infty[$	Abstand zwischen den Kriterienpunkten K_i und K_j in der Visualisierungsebene

Mithilfe der Wechselwirkungsmatrix (vgl. Bild 2) wird von dem Anwender des zu entwickelnden Gewichtungsverfahrens das Expertenwissen über die gegenseitige Beeinflussung der Kriterien eingebracht.

	K_1	K_2	K_3	K_4
K_1	/	w_{12}	w_{13}	w_{14}
K_2	w_{12}	/	w_{23}	w_{24}
K_3	w_{13}	w_{23}	/	w_{34}
K_4	w_{14}	w_{24}	w_{34}	/

Bild 2: Wechselwirkungsmatrix

Komplementäre (konkurrierende) Kriterien K_i und K_j erhalten eine positive (negative) Wechselwirkungskonstante w_{ij} . Wie (1) zeigt, führt dies somit in der Visualisierungsebene zu einer anziehenden (abstoßenden) Kraft F_{ij} zwischen den betreffenden Kriterienpunkten.

Bild 3 zeigt schematisch die aus Bild 1 bekannte Initialstruktur mit möglichen wirkenden Kräften zwischen den Kriterienpunkten. Die in Bild 3 eingezeichneten Kräfte wurden zum Zwecke der Illustration frei gewählt. In der praktischen Anwendung ergeben sich die Kräfte nach (1) aus den vorher festzulegenden Wechselwirkungskonstanten (Bild 2) und den Initialdistanzen zwischen den Kriterienpunkten in der Visualisierungsebene.

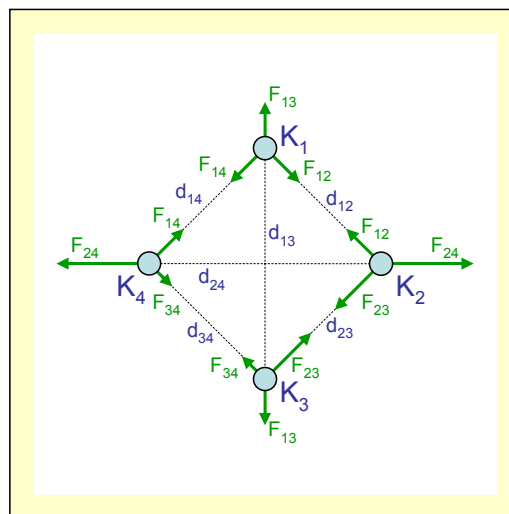


Bild 3: Kräfte zwischen Kriterienpunkten in der Visualisierungsebene

Ziel ist es nun, eine Struktur mit denjenigen Abständen d_{ij} zu finden, bei denen sich alle Kräfte aufheben und das Gesamtsystem somit im Gleichgewicht steht (Gleichgewichtsstruktur) (Bild 4).

In der Gleichgewichtsstruktur ist eine Konglomeration komplementärer Kriterienpunkte zu erwarten, während konkurrierende Kriterienpunkte größere Distanzen zueinander aufweisen werden. Insgesamt wird sich vor allem aufgrund der zugrundeliegenden Gleichgewichtsbedingung eine ausgewogene Verteilung der Kriterienpunkte einstellen, in der alle wechselseitigen Einflüsse der verschiedenen Kriterien in ihrem ganzheitlichen Zusammenwirken berücksichtigt sind. Dadurch ergibt sich eine gute Darstellung der zugrundeliegenden Entscheidungsaufgabe, die als Grundlage für eine Reihe weiterer Anwendungen vorstellbar ist. Diese Gleichgewichtsstruktur soll im Folgenden als „**Kriterienkarte**“ bezeichnet werden.

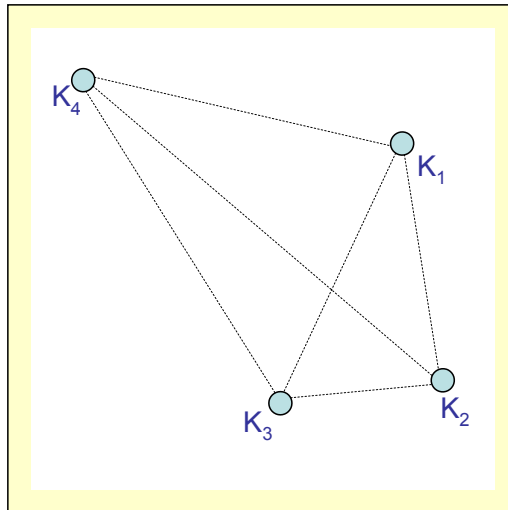


Bild 4: Kriterienkarte mit vier Kriterienpunkten

1.3 Lösung und Realisierung

1.3.1 Vorüberlegungen zur Lösung

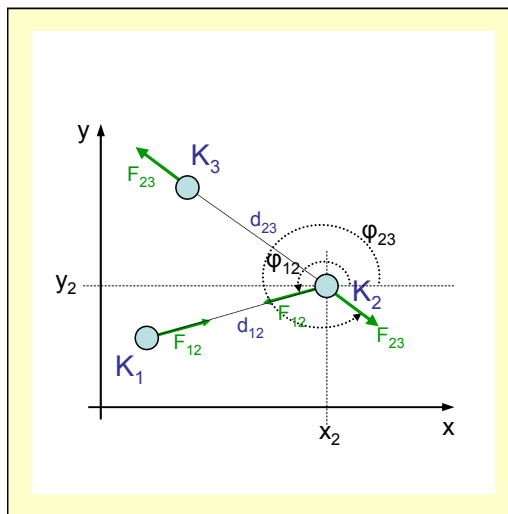


Bild 5: Geometrische Größen zur Formulierung des Gleichungssystems

Ausgangspunkt der Lösung ist die Forderung, dass die Summe aller in (1) erklärten Kräfte F_{ij} für jeden Kriterienpunkt Null ergeben muss. Die für eine Formulierung dieser Gleichgewichtsbedingungen notwendigen Größen (F_{ij} , d_{ij} , φ_{ij}) sind in Bild 5 dargestellt.

Es sollen m Kriterienpunkte gegeben sein. Dadurch ergeben sich für den k -ten Kriterienpunkt mit (1) bei einer allgemeinen Skalierungskonstante $C=1$ folgende zwei vorläufige Gleichgewichtsbedingungen:

Kräftegleichgewicht in in x-Richtung (2a):

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^m \left(\frac{w_{kj}}{d_{kj}^2} \cos(\varphi_{kj}) \right) = 0 \quad (2a)$$

Kräftegleichgewicht in y-Richtung (3a):

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^m \left(\frac{w_{kj}}{d_{kj}^2} \sin(\varphi_{kj}) \right) = 0 \quad (3a)$$

Unter Berücksichtigung der zusätzlich geltenden Gleichungen (4-6)

$$d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (4)$$

$$\cos(\varphi_{kj}) = \frac{x_j - x_i}{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (5)$$

$$\sin(\varphi_{kj}) = \frac{y_j - y_i}{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (6)$$

können (2a) und (3a) folgendermaßen umgeformt werden (2, 3):

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^m \left(w_{kj} \frac{x_j - x_k}{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^m \left(w_{kj} \frac{y_j - y_k}{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}} \right) = 0 \quad (3)$$

Für m Kriterienpunkte gibt es $2m$ Gleichungen (jeweils Gleichgewichtsbedingung in x- und y-Richtung). Für jedes Element sind die x- und y-Position zu bestimmen. Somit ergeben sich für m Elemente $2m$ Unbekannte, womit die grundsätzliche Lösbarkeit des Problems erwiesen ist. Die gesuchten Distanzen ergeben sich nach (4) aus den ermittelten Positionen.

Das sich ergebende nichtlineare Gleichungssystem ist nicht analytisch lösbar. Gesucht ist demzufolge ein numerischer Algorithmus zur Lösung der Aufgabe. Die noch festzulegende Initialstruktur (vgl. Bild 1) gibt dabei die Startwerte vor.

1.3.2 Festlegen der Initialstruktur

Eine qualitative Lage der einzelnen Kriterienpunkte zueinander in der Initialstruktur kann bei genauer Analyse direkt aus der Konstellation der Wechselwirkungsmatrix erkannt werden. Maßgeblichen Einfluss auf die Ausprägung der Initialstruktur haben hierbei die positiven Relationen.

Bei fünf Kriterien sind vier grundsätzliche Matrixkonstellationen zu unterscheiden. In Bild 6 ist beispielsweise die Konstellation „Ringbedingung“ dargestellt: „Sind (bei Einhaltung gewisser Mindestbedingungen für die Lösbarkeit) in der Matrix nach Sortierung die Felder 1 – 5 komplett mit positiven Relationen belegt, so ergibt die graphische Darstellung ein m-Eck (bei fünf Kriterien ein Fünfeck).“

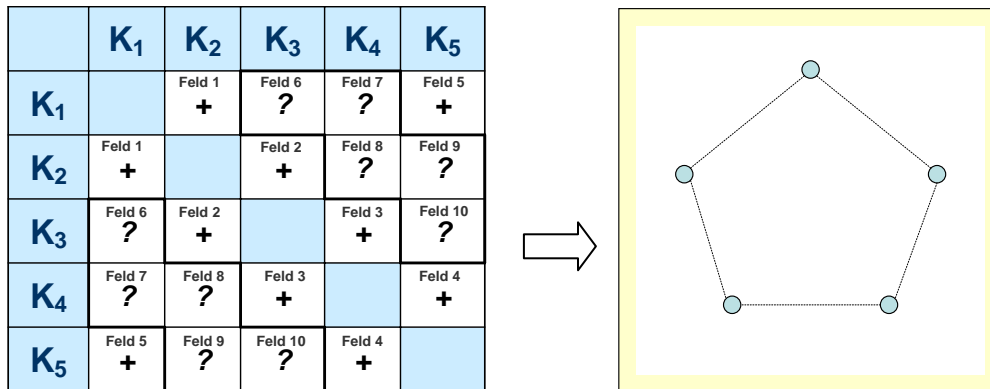


Bild 6: Matrixkonstellation „Ringbedingung“

Ähnliche Bedingungen lassen sich für andere Anordnungen, z. B. Linie oder Stern, formulieren.

1.3.3 Lösung des Gleichungssystems

Ausgehend von der Initialstruktur ist nun durch die numerische Lösung der Gleichungen (2) und (3) die Gleichgewichtsstruktur zu ermitteln. Hierfür war es notwendig, einen eigenen Algorithmus zu entwickeln. Dieser verschiebt die Kriterienpunkte sukzessive in Richtung der jeweils wirkenden resultierenden Kraft, bis der Fehler bei der Auswertung der Gleichgewichtsbedingungen hinreichend klein ist.

Um die Plausibilität des entwickelten Algorithmus zu untersuchen wurde ein bestimmtes Anordnungsszenario vorgegeben (Bild 7), um auf dessen Basis die dafür nötigen Belegungen innerhalb der Relationenmatrix zu ermitteln. Diese werden wiederum dem Algorithmus vorgegeben und die gefundene relative Positionierung mit der Ausgangskonfiguration verglichen.

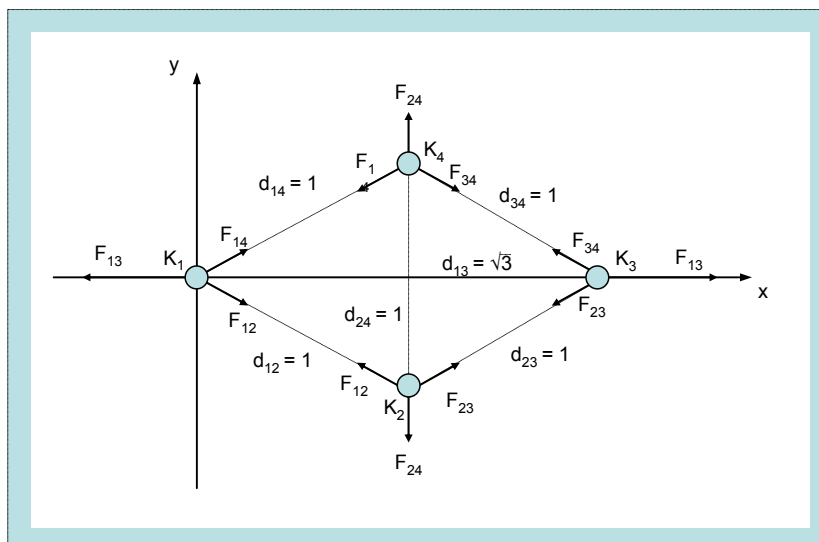


Bild 7: Struktur zur Überprüfung der Plausibilität

Nach Ermittlung der zu dieser Gleichgewichtsstruktur korrespondierenden Wechselwirkungen ($w_{12}=1$, $w_{13}\approx-5$, $w_{14}=1$, $w_{23}=1$, $w_{24}=1$) wird nun das Ergebnis des Algorithmus berechnet und dargestellt (Bild 8).

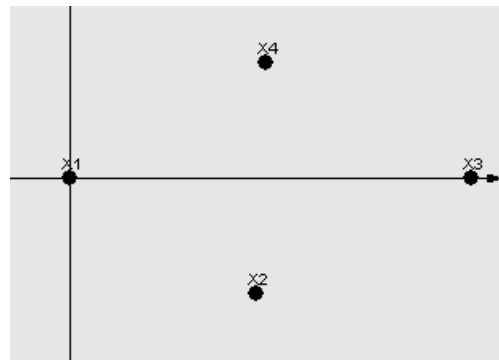


Bild 8: Ergebnis der Plausibilitätsprüfung

Die erwartete und die berechnete Struktur weisen eine deutliche Übereinstimmung auf. Die Verhältnisse von Höhe zu Breite der rautenförmigen Anordnung unterscheiden sich in den beiden Bildern erst in der vierten Nachkommastelle. Von der Plausibilität des entwickelten Algorithmus kann daher ausgegangen werden.

2 Anwendungsmöglichkeiten in der Produktentwicklung

2.1 Prüfung der gestellten Entscheidungsaufgabe und Identifikation von Potentialen zum Einsatz von Innovationstechniken

Für widerspruchsfreie, sinnvoll erfüllbare Entscheidungsaufgaben lassen sich stets ausgewogene Visualisierungen mit dem erläuterten Verfahren ermitteln. Sind die Gleichgewichtsbedingungen nicht erfüllbar oder ergibt sich eine stark einseitige Kriterienkarte (vgl. Beispiel in Bild 9), so ist die gestellte Entwicklungsaufgabe und insbesondere die getroffenen Annahmen grundsätzlich zu überdenken.

In diesem Fall sollte zunächst untersucht werden, ob der vorliegende Widerspruch in dem Entwicklungsproblem durch eine gezielte Innovation aufgelöst werden kann. Dazu sei insbesondere auf die vierzig innovativen Grundprinzipien nach Altschuller [2] hingewiesen.

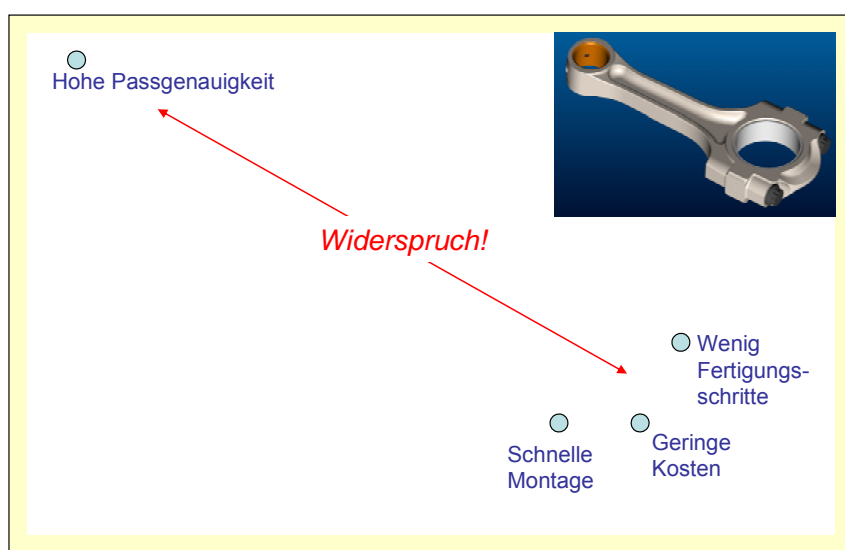


Bild 9: Einseitige, verzerrte Kriterienkarte am Beispiel eines Pleuels (Bildnachweis TU Graz)

In einigen Fällen ist es möglich, durch eine innovative Idee die Grundstruktur der Wechselwirkungen zwischen den Anforderungen entscheidend zu verändern. Im dargestellten Beispiel ist dies möglich, indem man die aufwändigen spanenden Prozesse der Passflächenbearbeitung einfach durch die Erzeugung eines künstlichen Bruchs des Pleuels ersetzt. Die sich zufällig einstellende Mikrostruktur im Bereich der Bruchfläche führt zu einer sehr hohen Passgenauigkeit bei nur einem einfachen Fertigungsschritt. Maßgeblich für diese Idee war die Inspiration durch das innovative Grundprinzip „Schädliches durch Nützliches ersetzen“. [2]

Lässt sich der Widerspruch nicht auflösen, ist zumindest im Falle einer nicht erzeugbaren Kriterienkarte eine Umdefinition der Entscheidungsaufgabe unumgänglich. Die sich widersprechenden Kriterien sind in diesem Falle (wie auch von Breiing [3] gefordert) gegeneinander aufzuwägen und das Unwichtigere zu streichen. In diesem Zusammenhang muss auch darüber nachgedacht werden, die Gesamtheit aller an das Produkt gestellten Anforderungen durch die Konstruktion mehrerer Varianten zu erfüllen.

2.2 Festlegung von Produktstrategien und Gewichtung von Bewertungskriterien

Auf Basis einer Kriterienkarte ist es weiterhin möglich, die Festlegung der Gewichtungen (als Grundlage für multikriterielle Bewertungsverfahren) für die Kriterien einfach mit der Wahl eines Punktes (Strategiepunkt S) durchzuführen (Bild 10). Die Entfernung eines Kriterienpunktes von dem Strategiepunkt ist dabei das Maß für die dem entsprechenden Kriterium zugeordnete Bedeutung.

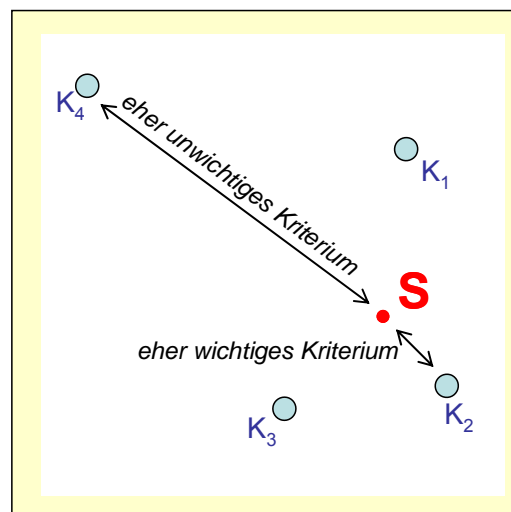


Bild 10: Wahl des Strategiepunktes

Zielkonflikten kann bei diesem Vorgehen nicht mehr ausgewichen werden: Bewegt man den Strategiepunkt auf ein Kriterium zu, so vergrößert sich automatisch die Entfernung zu allen konkurrierenden Kriterien. Somit entsteht implizit der Zwang, bei der Wahl der Strategie Zielkonflikten mit geeigneten Kompromissen zu begegnen.

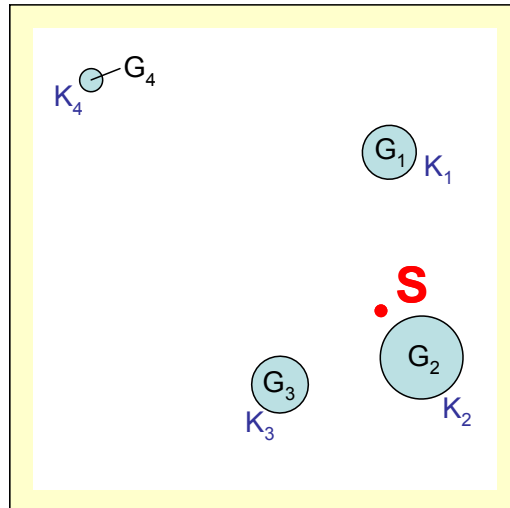


Bild 11: Gewichtung von Bewertungskriterien

Die Gewichtungszahlen G_i der Kriterien werden als Massen der entsprechenden Kriterienpunkte K_i in der Kriterienkarte modelliert (Bild 11). Dabei soll die Lage des Schwerpunktes des Massensystems mit dem Strategiepunkt zusammenfallen. Dieses Vorgehen beseitigt die Gefahr der doppelten Gewichtung komplementärer Elemente: Liegt in einem Bereich aufgrund der Wahl komplementärer Elemente eine Anhäufung von Kriterien vor, so schlägt sich dies bei der Ableitung der Gewichtungen nach dem Schwerpunktsverfahren in einer Verteilung des Gesamtgewichtes in dem lokalen Bereich auf die dort enthaltenen Kriterien nieder. Zwei prinzipiell als wichtig erachtete, aber stark komplementäre Elemente würden demnach für sich schwächer gewichtet werden, da das dem betrachteten Aspekt zugedachte Gewicht in der Summe der Gewichte beider Kriterien (korrekt) berücksichtigt ist.

Weiterhin muss die Gewichtungszahl eines Kriteriums nach einer festzulegenden Verteilung mit dem Abstand des entsprechenden Kriterienpunktes von dem Strategiepunkt abnehmen.

Bei einer entsprechenden Kriterienwahl (strategische Kriterien) kann eine Visualisierung der Entscheidungsaufgabe auf Basis der Kriterienwechselwirkung auch als Grundlage für die Aufstellung eines Produktprogramms bzw. für die Festlegung einer Produktstrategie dienen. Dies gelingt dann, wenn die verschiedenen Bereiche in der Kriterienkarte bestimmten Marktsegmenten zugeordnet werden können. Bild 12 zeigt dies anhand eines fiktiven Beispiels „Schließenheit Fahrzeugtür“. Die beiden Varianten, welche in verschiedenen Bereichen in der Kriterienkarte plazierte wurden, zielen offensichtlich auf sehr unterschiedliche Marktbereiche ab (Kleinwagen- und Mittelklasse vs. Oberklasse). Ein abgerundetes Produktprogramm eines Unternehmens lässt sich durch eine ausgewogene und gleichmäßige Besetzung der Kriterienkarte mit Strategiepunkten erreichen.

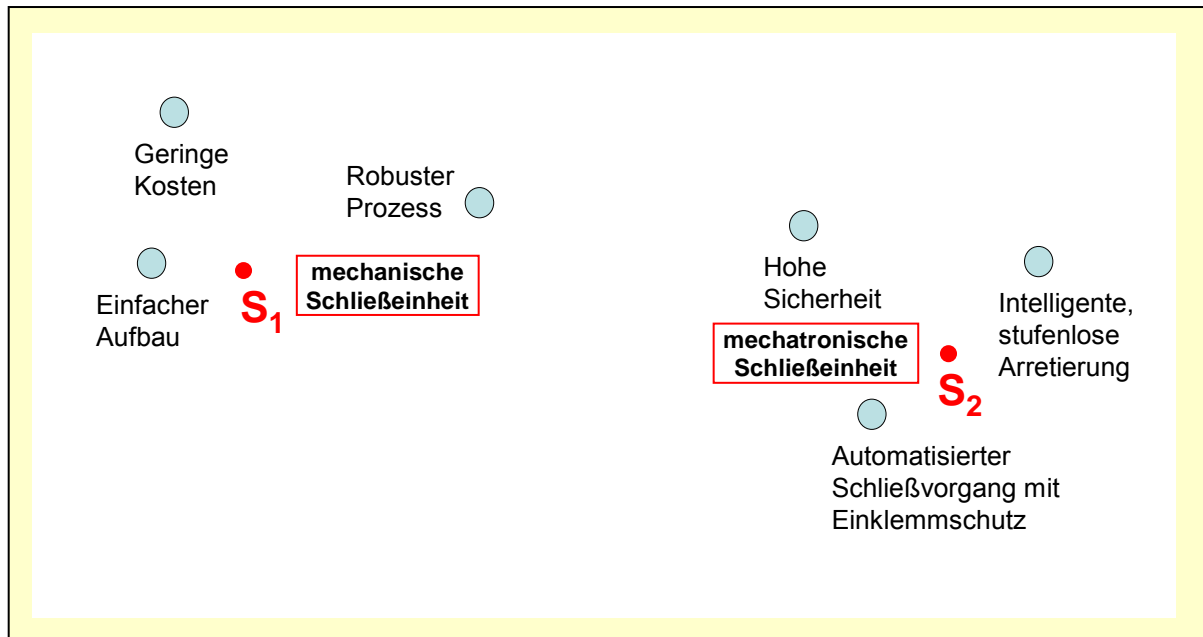


Bild 12: Ableitung von Varianten

3 Literatur

- [1] Bauer, S.: DESIGN FOR X – Ansätze zur Definition und Strukturierung in DESIGN FOR X, Beiträge zum 14. Symposium, H. Meerkamm (Hrsg.), Neukirchen, S. 1-8, 2003
- [2] Altschuller, G. S: Erfinden – Wege zur Lösung technischer Probleme. Verlag Planung und Innovation, Cottbus, 1998
- [3] Breiing, A.; Knosala R.: Bewerten technischer Systeme, Springer-Verlag, Berlin, 1997

Dipl.-Ing. Stefan Bauer
 Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
 FAU Erlangen-Nürnberg
 Martensstraße 9, D-91058 Erlangen
 Tel: +49-9131-85-27987
 Fax: +49-9131-85-27988
 Email: bauer@mfk.uni-erlangen.de
 URL: <http://www.mfk.uni-erlangen.de>