

MULTIKRITERIELLE BEWERTUNG VON BAUSTRUKTURVARIANTEN

Robert Adunka
Sandro Wartzack

Kurzfassung

Die breite Palette zahlreicher *Design for X* (DFX) – Aspekte (z.B. fertigungsgerecht, umweltgerecht) führt einerseits dazu, daß die unterschiedlichsten Anforderungen aus den der Konstruktion nachgeschalteten Bereichen in der Prozeßkette betrachtet werden können. Andererseits ist es sehr schwierig, wenn Ergebnisse aus Untersuchungen bezüglich verschiedener Gerechtheiten vorliegen, diese gegeneinander zu gewichten und damit alternative Konzepte zu bewerten. Der vorliegende Bericht beschreibt ein Verfahren, mit dem es möglich ist, eine *multikriterielle Bewertung* von Konstruktionen auf der Basis von wissensbasierten, rechnerunterstützten Untersuchungen durchzuführen.

1 Einleitung

Die Bewertung von alternativen Konzepten, Entwürfen, wie auch von detaillierten Konstruktionen ist eine Aufgabenstellung, die durch das Bestreben, Produkte und die damit verbundenen Prozesse zu optimieren, immer stärker an Gewicht gewinnt. Je früher dabei der Zeitpunkt ist, zu dem eine Bewertung von Produktalternativen vorgenommen wird, desto geringer ist einerseits der Aufwand für die Erstellung der Alternativen, andererseits ist die Aussagekraft bei einer Bewertung mit zunehmender Produktdefinition immer genauer. Eine sehr gute Ausgangsbasis bietet der Vergleich von Baustrukturvarianten. Da mit der Bestimmung der Baustruktur als Festlegung des großen Rahmens (Konzept, Produktstruktur) durch die Gliederung des Produktes in Fertigungsbaugruppen und Fertigungseinzelteile [1] die Weichen für die weiteren Fertigungsverfahren, Montagetechniken und mechanische Eigenschaften eines Produktes gestellt werden [2], bietet es sich an, *Baustrukturvarianten* zu bewerten. Die Baustrukturvarianten repräsentieren bereits die Charakteristika des gewählten Produktes und der damit verbundenen Prozesse, so daß die Aussagekraft einer Bewertung zu diesem frühen Zeitpunkt bereits sehr hoch ist.

Entsprechend dieser Vorgehensweise werden im Teilprojekt A1 "Optimieren der Prozeßkette durch Auswählen der bestgeeigneten Baustruktur und fertigungsgerechte Gestaltung der Bauteile" des Sonderforschungsbereichs 396 "Robuste, verkürzte Prozeßketten für flächige Leichtbauteile" Baustrukturvarianten einer KFZ-Tür wissensbasiert hinsichtlich verschiedener Kriterien (mechanische Eigenschaften, Fertigungsgerechtigkeit, Kosten, Recycling) untersucht. Eine wirkliche Unterstützung des Konstrukteurs ist jedoch nur gegeben, wenn geeignete Methoden und evtl. auch Werkzeuge bereitgestellt werden, die die Ergebnisse der multikriteriellen Analysen bewerten und damit dem Konstrukteur eine Produktalternative empfehlen.

Zwar existieren zahlreiche Bewertungsmethoden, wie z.B. Technisch-wirtschaftliche Bewertung, Argumentenbilanz, Kosten-Nutzen-Analyse, jedoch wird dadurch das eigentliche Kernproblem der multikriteriellen Analyse, die Wechselwirkung konkurrierender, teilweise

auch widersprüchlicher Aspekte nicht oder nur sehr eingeschränkt unterstützt (vgl. Bild 1). Erfolgversprechend erschien die Meta-Methodologie nach [3], mit der die einzelnen Aspekte differenziert hinsichtlich ihrer Wechselwirkungen untersucht werden. Erste Untersuchungen, die sich mit diesem Bewertungsverfahren beschäftigten, zeigten, daß die Ergebnisse dieser Methodik nur sehr eingeschränkt nutzbar sind [4].

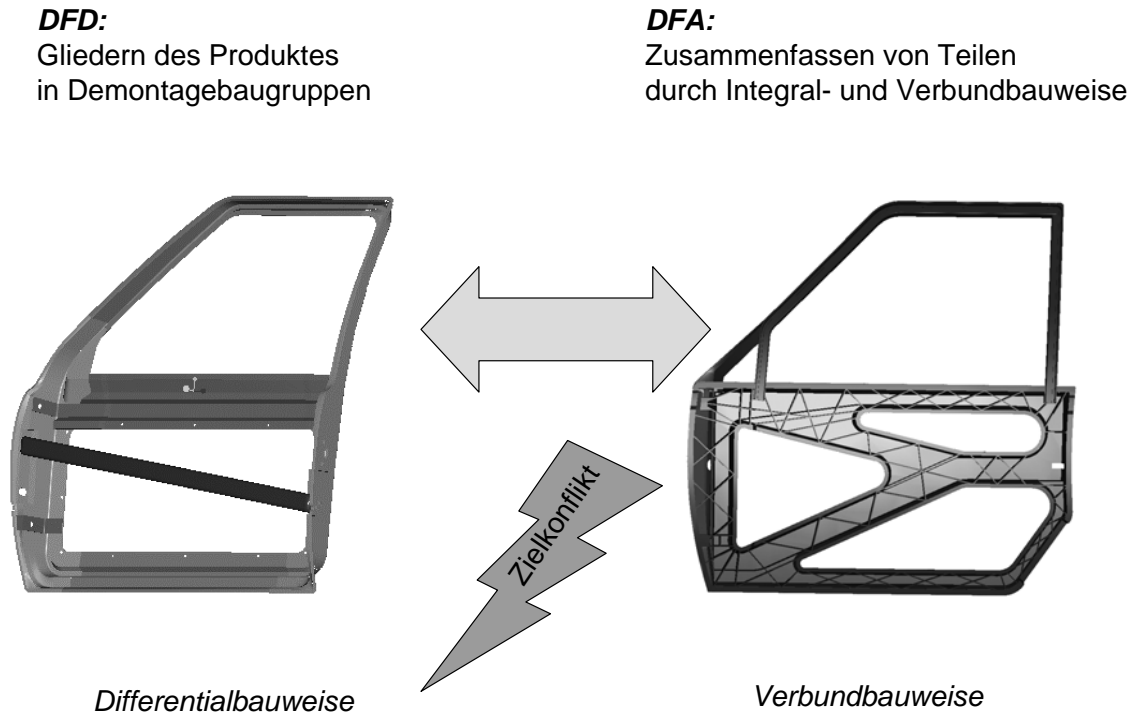


Bild 1: Zielkonflikt konkurrierender Gestaltungsrichtlinien

Eine Bewertungsmethode, die eine Bewertung nach unterschiedlichen Kriteriengruppen unter Berücksichtigung ihrer Wechselwirkung unterstützt, ist durch die anforderungsorientierte gewichtete Bewertung mittels scharfer Zahlen nach *A. Breiing* [5] gegeben. Im Folgenden soll neben einer Kurzdarstellung des Verfahrens (Kapitel 2), ihre Anwendung im SFB 396 beschrieben werden (Kapitel 3), mit dem Ziel, eine Integration in den Analyseverbund des Assistenzsystems anzustreben (Kapitel 4).

2 Die anforderungsorientierte gewichtete Bewertung mittels scharfer Zahlen nach *A. Breiing*

Die anforderungsorientierte gewichtete Bewertung mittels scharfer Zahlen bedient sich absolut konsistenter Entscheidungsmatrizen zur Ermittlung der Gewichtungsfaktoren und einiger Maßzahlen. Im Gegensatz zur der ähnlich aufgebauten, objektivierten gewichteten Bewertung mittels unscharfer Zahlen und Mengen nach *R. Knosala* verzichtet Breiing auf den Mehraufwand der unscharfen Zahlen und ordnet qualitativ erfaßbare Kriterien mittels Werteskalen oder linguistisch konsistenter Entscheidungsmatrizen scharfe Zahlen zu. Dadurch eignet sich das Verfahren sowohl für die Bewertung einfacher Konstruktionen, wie auch für komplexe technische Systeme. Die Bewertung verkompliziert sich bei komplexeren Systemen nicht, noch steigt der Bewertungsaufwand übermäßig.

Die Kriterien für eine Bewertung werden normalerweise nach technischen, wirtschaftlichen und psychologischen Gesichtspunkten untergliedert. In [5] werden DFX-Kriterien als

Kriterienfamilien diesen Kriteriengruppen untergeordnet. Im Rahmen des SFB 396 ist die Einteilung nach diesen Kriteriengruppen eher von untergeordneter Rolle, so daß die DFX-Kriterien auf die Ebene der Kriteriengruppen angehoben wurden (Bild 2). Diese Einteilung entspricht mehr der Begriffswelt des Konstrukteurs und den Organisationseinheiten eines Betriebs. Somit ist es einfach, den richtigen Experten für die jeweils betrachtete Kriteriengruppe zu finden und zuzuordnen. Rechnergestützte Analysetools greifen meist nur eine der Gerechtheiten auf und könnten nach dieser Einteilung der Kriterien der entsprechenden Gruppe unterstellt werden.

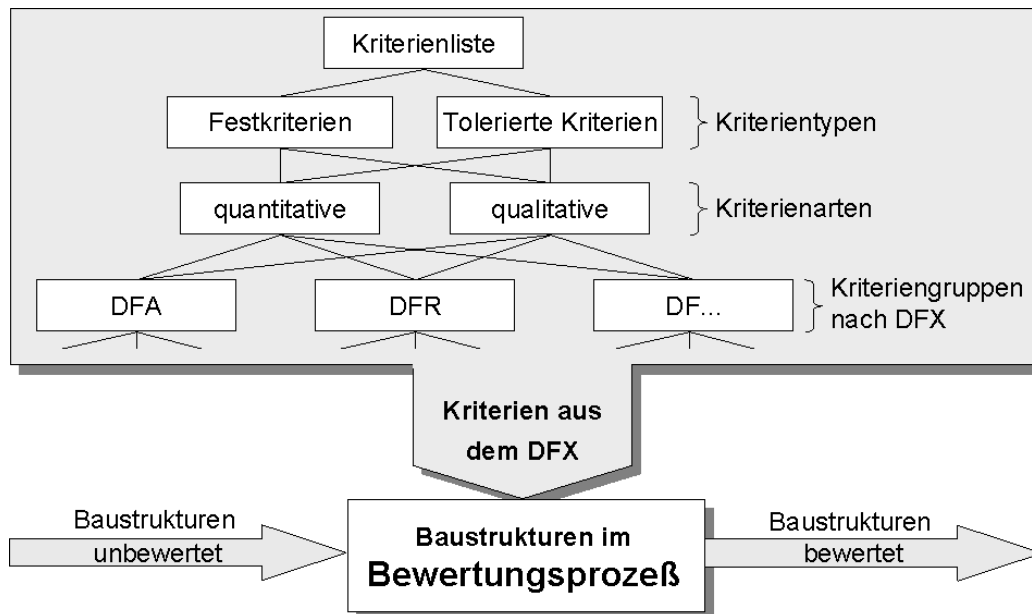


Bild 2: Baustrukturbewertung nach DFX-Kriterien

Für die Bewertung der Baustrukturvarianten werden die Kriteriengruppen mit Hilfe einer konsistenten Entscheidungsmatrix gegeneinander gewichtet. Daraus läßt sich das Gruppengewicht ermittelt. Die Kriterien innerhalb einer DF-Gruppe werden nach dem gleichen Verfahren gewichtet.

Für jedes Kriterium werden die Maßzahlen einer Baustrukturvariante über Wertfunktionen oder über einen paarweisen Vergleich mittels konsistenter Entscheidungsmatrizen gefunden. Über Multiplikation der Maßzahl mit dem normierten Kriteriengewicht ergibt sich somit die Wertungszahl einer Variante für dieses Kriterium. Aus der Summation der Wertungszahlen einer Gruppe und deren anschließende Normierung erhält man die normierte Gruppenwertigkeit. Diese normierte Gruppenwertigkeit multipliziert mit dem Gruppengewichtungsfaktor bildet die Gruppenwertungszahl. Durch die Summation der normierten Gruppenwertungszahlen läßt sich die Gesamtwertigkeit errechnen und weiterhin kann durch Normierung die normierte Gesamtwertigkeit bestimmt werden, aus der sich die Rangfolge der Baustrukturvarianten ableiten läßt (vgl. Bild 3).

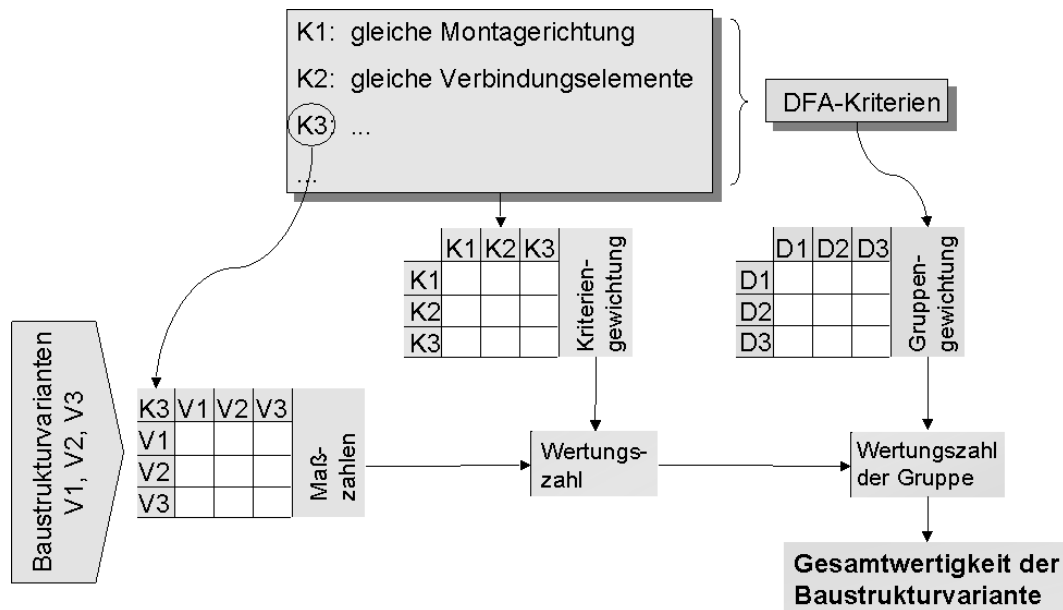


Bild 3: Vorgehen bei der Bastrukturbewertung

3 Adaption und Einsatz des Bewertungsverfahrens im SFB 396

Die Bewertung der Bastrukturvarianten flächiger Leichtbauteile soll im SFB 396 unter verschiedenen Aspekten erfolgen, wie z.B. die bei Leichtbaukonstruktionen besonders wichtigen Steifigkeitsgesichtspunkte, dem Aufwand für die erforderlichen Prozesse, der Recyclingfähigkeit, der Austauschbarkeit von Einzelteilen und der Herstellkosten.

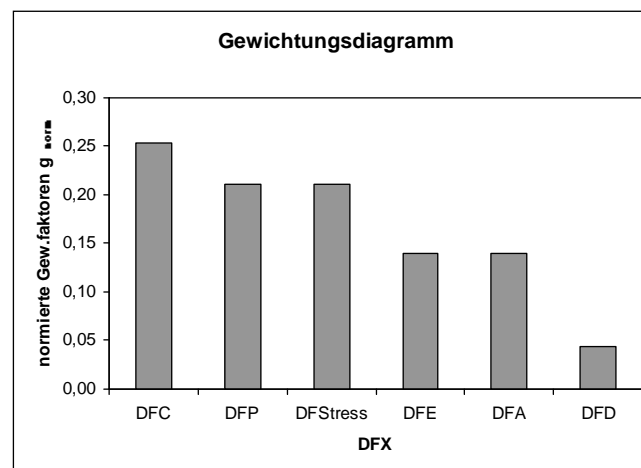


Bild 4: Gewichtungsfaktoren der Kriteriengruppen

Gemäß der Einteilung des *Design for X* lassen sich diese Anforderungen in die entsprechenden Kriteriengruppen *Kostengerechtigkeit* (DFC), *Fertigungs-gerechtigkeit* (DFP), *Beanspruchungs-gerechtigkeit* (DFStress), *Umweltgerechtheit* (DFE), sowie *De- und Montage-gerechtigkeit* (DFD und DFA) zuordnen. Durch eine erste Gewichtung dieser Kriteriengruppen mittels konsistenter Entscheidungsmatrixen (vgl. Kap. 2) läßt sich ein übergeordneter Gruppen-gewichtungsfaktor ermitteln. Die Ergebnisse dieser Gruppengewichtung sind in Bild 4 in graphischer Form dargestellt.

Bevor nun der Gewichtungsfaktor der einzelnen Kriterien ermittelt und mit dem Gruppengewichtsfaktor multipliziert werden kann, muß in einem nächsten Schritt die gegenseitige Beeinflussung der Kriterien untersucht und aufgelöst werden. Hierzu wurden in einer Relationenprüfmatrix die 90 Kriterien paarweise gegenübergestellt und analysiert, ob sie sich unterstützend, indifferent, gegenläufig oder widersprüchlich verhalten. Ein Ausschnitt dieser Matrix, mit der 4050 Wechselwirkungen untersucht wurden, ist in Bild 5 abgebildet.

			DFA	Führungsflächen, Einführhilfen vorsehen	gleichzeitige Fügen vermeiden	Montage durch Verstiften erleichtern	gute Zugänglichkeit vorsehen	Sichern ohne Zusatzelement gewährleisten	lagestabile VB-elemente verwenden	verklemmgefährdete VB's vermeiden	rollfähige VB's verwenden	geometrische Erkennungsmerkmale verwenden	Greifhilfen /-flächen vorsehen	Formstabile Fügeteile verwenden	gleiche Vb-elemente verwenden	Anzahl der Vb-elemente reduzieren	Produkt in BG strukturieren	Anzahl gleicher Teile verringern	gleiche Fugerichtungen anstreben	Einstellmöglichkeiten an Fügeteilen vorsehen
DFA	Führungsflächen, Einführhilfen vorsehen	M3																		
	gleichzeitige Fügen vermeiden	M4																		
	Montage durch Verstiften erleichtern	M8																		
	gute Zugänglichkeit vorsehen	M10e																		
	Sichern ohne Zusatzelement gewährleisten	M10f																		
	lagestabile VB-elemente verwenden	M11a																		
	verklemmgefährdete VB's vermeiden	M11b																		
	rollfähige VB's verwenden	M11c																		
	geometrische Erkennungsmerkmale verwenden	M11d																		
	Greifhilfen /-flächen vorsehen	M11f																		
	Formstabile Fügeteile verwenden	M11h																		
	gleiche Vb-elemente verwenden	M12a																		
	Anzahl der Vb-elemente reduzieren	M12b																		

Bild 5: Relationenprüfmatrix

Die gegenläufigen und widersprüchlichen Kriterienkombinationen wurden gegeneinander gewichtet und das geringer gewichtete Kriterium gestrichen. Hierdurch konnte die ursprünglich hohe Anzahl deutlich reduziert werden.

Die sich anschließende Bestimmung des Kriteriengewicht läßt sich mit der Aufstellung konsistenter Entscheidungsmatrizen auf zwei Arten durchführen. Einerseits kann diese Ermittlung der Gewichtungsfaktoren durch direkte Gegenüberstellung aller Kriterien erfolgen. Hierbei ergeben sich Schwierigkeiten, wenn der Bewerter Kriterien unterschiedlicher Bereiche (oder sogar Disziplinen) gewichten muß. Erleichtert wird dies durch die bereits o.a. dargestellte Eingliederung in DFX-Gruppen, Gewichtung der Gruppen und anschließender Gewichtung innerhalb jeder Gruppe gegeneinander. Auf diese Weise kann der jeweilige Experte jedes Bereiches (z.B. Gußexperte zur Gewichtung der Kriterien bzgl. Gußgerechtigkeit) eine möglichst exakte Gewichtung vornehmen. In Bild 6 ist hierzu exemplarisch die Entscheidungsmatrix (Gewichtungsmatrix) für die Spritzgießgerechtigkeit dargestellt.

DF Spritzgiessen / DF Spritzgiessen	Masse eingegossener Teile gering halten	Schraubstellen (Augen) an Wände anbinden	Hinterschnidungen vermeiden	Querzüge des Werkzeuges vermeiden	Massenanhäufung vermeiden	Konstante Wanddicken vorsehen	Rippen an ebenen Bauteilen gegen Verzug vorsehen	Ausreichende Wanddicke bei umgossenen Metallteilen	Schwindung bei unterschiedlichen Materialien beachten	geeignete Übergänge an Rippen	Summe	normierte Summe
Masse eingegossener Teile gering halten	0	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1,6	0,04
Schraubstellen (Augen) an Wände anbinden	0,7	0	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	3,2	0,07
Hinterschnidungen vermeiden	0,9	0,8	0	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	6,2	0,14
Querzüge des Werkzeuges vermeiden	0,9	0,8	0,5	0	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	6,2	0,14
Massenanhäufung vermeiden	0,9	0,8	0,5	0,5	0	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	6,2	0,14
Konstante Wanddicken vorsehen	0,8	0,6	0,3	0,3	0,3	0	0,5	0,5	0,5	0,5	4,4	0,10
Rippen an ebenen Bauteilen gegen Verzug vorsehen	0,8	0,6	0,3	0,3	0,3	0,5	0	0,5	0,5	0,5	4,4	0,10
Ausreichende Wanddicke bei umgossenen Metallteilen	0,8	0,6	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0	0,5	0,5	4,4	0,10
Schwindung bei unterschiedlichen Materialien beachten	0,8	0,6	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0	0,5	4,4	0,10
geeignete Übergänge an Rippen	0,8	0,6	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,8	0	4,7	0,10
											45,3	1,0

Bild 6: Entscheidungsmatrix – Spritzgiessen

Das endgültige Kriteriengewicht ergibt sich sodann aus der Multiplikation der Gruppengewichts mit dem normierten Summe der einzelnen Kriterien. Werden allerdings Kriterien des Bereiches *Fertigungsgerechtigkeit* betrachtet, ist es nötig, entsprechend der eingesetzten Fertigungsverfahren eine weitere Gegenüberstellung vorzunehmen. Im dargestellten Beispiel sind die Spritzgußkriterien zur Bewertung der Verbundbauweise maßgeblich. Der Kriteriengewichtungsfaktor des Kriteriums „*Hinterschnidungen vermeiden*“ errechnet sich beispielsweise folgendermaßen:

$$g_{\text{Hinterschnidungen}} = \text{normierte Summe}_{\text{Hinterschnidungen}} \times g_{\text{DFP}} \times g_{\text{DF Druckgiessen}} \quad (1)$$

zu: $g_{\text{Hinterschnidungen}} = 0,14 \times 0,21 \times 0,6 = 0,018$

Nach derartiger Bestimmung der Kriteriengewichtungsfaktoren kann dann für jede Variante der Wert zu jedem Kriterium teilweise rechnerunterstützt bestimmt werden und durch die Abbildung des Wertes auf die Wertfunktion (vgl. Kap. 2) die Maßzahl bestimmt werden. Bild 7 verdeutlicht diesen Vorgang am Beispiel der Berechnung der Türdurchsenkung bei aufgebrachtter Vertikallast.

Im dargestellten Beispiel liefert die FEM-Analyse für den untersuchten Prüfbedingungen einen bestimmten Wert W als Maß für die maximale Verschiebung in vertikaler Richtung. Die Wertfunktion, die für das Kriterium „*maximale Durchsenkung = x mm*“ ist eine lineare Straffungsfunktion, die verwendet wird, wenn ein hoher Wert schlechter als ein niedriger zu bewerten ist und die Werteverteilung linear angenommen wird. Der Verlauf der Wertfunktion ist dabei in der dargestellten Weise gewählt, da mit steigender Durchsenkung (Verschiebung in vertikaler Richtung) der Benutzer z.B. den Eindruck gewinnt, daß die Tür „zu weich“ ist und ab einem bestimmten Grenzwert W_{max} die Tür nicht mehr schließt. Werte oberhalb von

W_{\max} führen dazu, daß die entsprechende Baustrukturvariante aus der Bewertung gestrichen wird (K.O.-Kriterium).

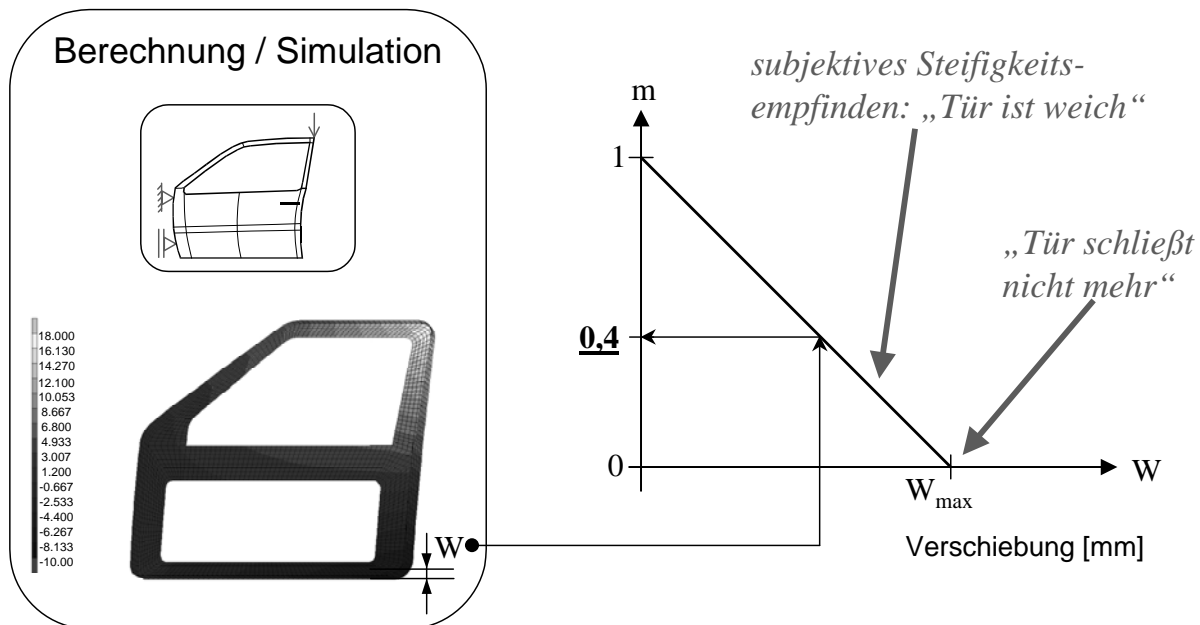


Bild 7: Bestimmung der Maßzahlen am Beispiel der berechneten Türdurchsenkung

Die Maßzahlen m_{ij} werden in einem nächsten Schritt mit den jeweiligen Kriteriengewichtungsfaktor g_i multipliziert und ergeben für jedes Kriterium und jede Variante die Wertungszahl w_{ij} (2):

$$w_{ij} = m_{ij} \times g_i \quad (\text{für Kriterium } i \text{ und Variante } j) \quad (2)$$

Nach Addition der Wertungszahl w_{ij} für jede Variante erhält man eine Wertigkeit s_j , aus der die letztendliche Rangfolge der Baustrukturvarianten abgeleitet werden kann.

4 Einbindung in das Assistenzsystem

Im Rahmen der Forschungsarbeiten des Teilprojektes A1 im SFB 396 wird ein Assistenzsystem entwickelt, mit dem der Konstrukteur Baustrukturvarianten hinsichtlich verschiedener Kriterien wissensbasiert untersuchen können. Dazu wird die Produktbeschreibung mit Hilfe des im Assistenzsystem integrierten Synthesetools um weitere, nicht geometrische Produktdaten ergänzt. Diese vervollständigte Produktbeschreibung wird sodann an das ebenso integrierte Analysetool übergeben und wissensbasierten Analysen unterzogen [6]. Das Analyseergebnis wird wie in Bild 6 links unten dargestellt auf einer Intranet-Seite dem Konstrukteur dargestellt.

In Hinblick auf eine rechnerunterstützte Bewertung wäre folgendes Szenario denkbar (Bild 8): Die Daten aus dem Analyseergebnis könnten in einem weiteren Schritt, soweit sie *deterministisch erfaßbar* sind, direkt an ein Bewertungstool übergeben werden, in dem sie – gemäß der jeweiligen Kriterien – auf die entsprechende Wertfunktion abgebildet werden.

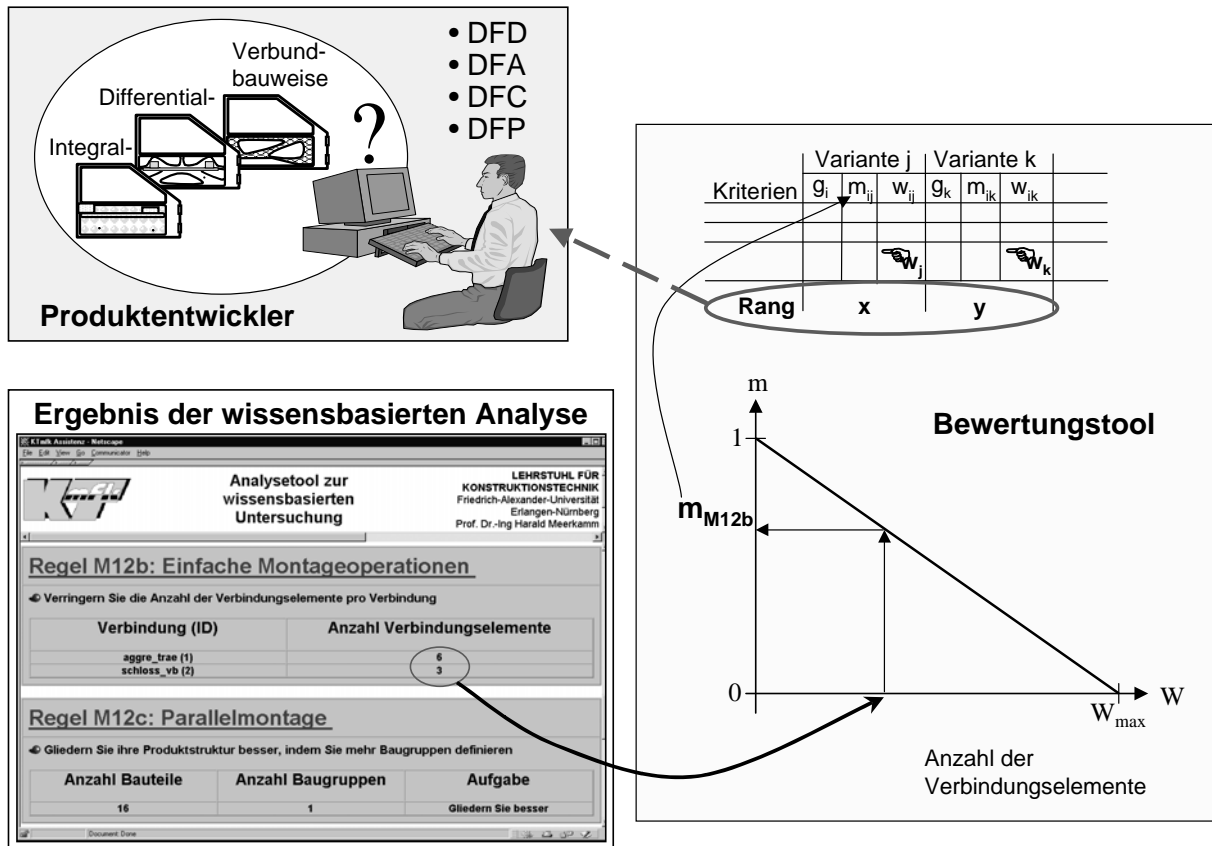


Bild 8: Szenario: Einbindung eines Bewertungstools ins Assistenzsystem des SFB 396

Sicherlich sind nicht alle Kriterien auf diesem Weg bewertbar. Das Bewertungstool könnte allerdings derart gestaltet werden, daß die Werte der probabilistischen (beobachtbaren und schätzbaren) und linguistischen (qualitativ erfaßbaren, rangmäßig beurteilbaren) Kriterien vom Bewerter direkt in das Bewertungssystem eingegeben werden und damit die komplexen Berechnungsvorgänge deutlich erleichtert werden. Zusammen mit den vom Assistenzsystem analysierten, deterministischen bestimmbaren Werten können die übrigen Werte durch Wertfunktionen, die bereits im System definiert sind, zu Maßzahlen bestimmt und mit dem ebenso vorher eingebrachten Kriteriengewichtungsfaktoren die Wertigkeiten jeder Baustrukturvariante errechnet werden.

5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht wurde ein Verfahren zur multikriteriellen Bewertung unterschiedlicher technischer Systemen dargestellt. Es wurde gezeigt, wie dieses Verfahren adaptiert und angewendet werden kann, um eine multikriterielle Bewertung im Sinne des DFX für verschiedene Baustrukturvarianten durchzuführen. Dabei wird insbesondere auf die Bewertung der Fertigungsgerechtigkeit eingegangen, bei der jede Baustrukturvariante in Hinblick auf unterschiedliche Fertigungsprozesse bewertet werden muß. Im letzten Abschnitt wurde vorgestellt, wie eine teilautomatisierte Bewertung auf Basis eines Bewertungstools und dem Assistenzsystem des SFB 396 erfolgen könnte.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Meerkamm, H.; Storath, E.: Design for X - the Interference between Product and Process - a Potential for Engineering Network. In: Workshop Proceedings, First European Workshop on Global Engineering Networking, J.Gausemeier (Hrsg.), HNI-Verlagsschriftenreihe Band 13, 1996, S.29-41.
- [2] Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung. Springer – Verlag, 1993
- [3] Watson, B.; Radcliffe, D.; Dale, P.: A Meta-Methodology for the Application of DFX-Guidelines. In: G.O. Huang: Design for X, S.441-462, Chapman&Hall, 1996
- [4] Wartzack, S.: Multikriterielle Bewertung – Einsatz der Meta-Methodologie von Watson, Radcliffe, Dale im Sonderforschungsbereich 396. In: Fertigungsgerechtes Konstruieren, Beiträge zum 8. Symposium, Schnaittach, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg - Erlangen, H. Meerkamm (Hrsg.), 1997
- [5] Breiing, A.; Knosala, R.: Bewerten technischer Systeme. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1997
- [6] Meerkamm, H.; Wartzack, S.: Verkürzung der Produktentwicklungszeiten durch Integration von Fertigungswissen in den Konstruktionsprozeß. In: Prozeßketten für die virtuelle Produktentwicklung in verteilter Umgebung, VDI-Bericht 1435, Düsseldorf, 1998 (erscheint in Kürze)

Dipl.-Ing. Robert Adunka
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm
Universität Erlangen-Nürnberg
Martensstr.9
D-91058 Erlangen
Tel: +49 9131 / 852 - 7987
Fax: +49 9131 / 852 -.7988
Internet: adunka@mfk.uni-erlangen.de

Dipl.-Ing. Sandro Wartzack
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm
Universität Erlangen-Nürnberg
Martensstr.9
D-91058 Erlangen
Tel: +49 9131 / 852 – 7290
Fax: +49 9131 / 852 -.7988
Internet: wartzack@mfk.uni-erlangen.de