

## **SYSTEMATISCHE RECHNERUNTERSTÜTZTE VERTRÄGLICHKEITSUNTERSUCHUNGEN IN DER KONZEPTPHASE MECHATRONISCHER SYSTEME**

*Matthias Köckerling, Jürgen Gausemeier*

### **Zusammenfassung**

Mechatronische Systeme besitzen ein enormes Erfolgspotential: durch das gemeinsame Wirken verschiedener Disziplinen sind Funktionen oft einfacher, flexibler und kostengünstiger zu realisieren. Über Elektronik und Software vernetzte Sensorik und Aktorik ersetzt beispielsweise bei Systemen des Sammelbegriffs „X-by-Wire“ die mechanische Verbindung zwischen Fahrer und Fahrzeug.

In der Konzeptphase der Entwicklung mechatronischer Systeme werden die entscheidenden Weichen für ein erfolgreiches Produkt gestellt. Hier werden Teillösungen aus verschiedenen Disziplinen zu einer gemeinsamen Wirkstruktur verknüpft. Die Herausforderung besteht darin, aus alternativen Lösungen für die Teilfunktionen diejenigen zu identifizieren, die zu einer optimalen Gesamtlösung führen. Bei mechatronischen Systemen kommt zusätzlich die Herausforderung der Partitionierung hinzu, die Zuordnung der Realisierung einer Funktion zu einer bestimmten Domäne.

Dieser Beitrag stellt eine Methode zur rechnerunterstützten Verträglichkeitsanalyse vor. Diese basiert auf dem morphologischen Kasten, der dazu erweitert wird und darüber hinaus ein systematisches Ausschöpfen der Möglichkeiten der Funktionsintegration/-trennung ermöglicht. Das wird erreicht über eine detaillierte Bewertung der funktionsbestimmenden Merkmale und Eigenschaften. So können nützliche Eigenschaften domänenübergreifend gezielt eingesetzt sowie schädliche weitgehend eliminiert werden.

### **1 Einleitung**

In der Entwicklungsmethodik für maschinenbauliche Systeme ist es gängige Praxis, eine komplexe Gesamtaufgabe in Teilprobleme und technische Teilfunktionen zu zerlegen. Ziel dieser Dekomposition ist eine Reduzierung der Komplexität. Den Teilfunktionen werden anschließend jeweils mehrere mögliche Wirkprinzipien<sup>1</sup> oder Lösungselemente<sup>2</sup> zugeordnet. Als methodisches Hilfsmittel wird dazu vielfach der morphologische Kasten [1] eingesetzt (Bild 1). Pro Teilfunktion werden üblicherweise mehrere Lösungsalternativen eingetragen. Die klassische Vorgehensweise ist, die pro Teilfunktion gewählten Lösungen im morphologischen Kasten mittels einer Linie zu verbinden und dadurch schrittweise eine Wirkstruktur aufzubauen.

---

<sup>1</sup> Ein Wirkprinzip bezeichnet den Zusammenhang vom physikalischen Effekt sowie geometrischen und stofflichen Merkmalen (Wirkgeometrie, Wirkbewegung und Werkstoff). Es lässt das Prinzip der Lösung zur Erfüllung einer Teilfunktion erkennen.

<sup>2</sup> Ein Lösungselement ist eine realisierte und bewährte Lösung zur Erfüllung einer Funktion. Dabei handelt es sich im allgemeinen um ein Modul/eine Baugruppe, das/die auf einem Wirkprinzip beruht. Die rechnerinterne Repräsentation eines Lösungselementes besteht aus unterschiedlichen Aspekten wie Verhalten und Gestalt.

Die Vorteile des morphologischen Kastens sind:

- Systematisches Erfassen aller denkbaren Kombinationen von Teillösungen und dadurch ein breites Lösungsspektrum.
- Ein Verlassen der „eingefahrenen“ Denkschienen wird ermöglicht.
- Das Problem wird mehrdimensional klassifiziert.
- Die Methode ist einfach und anwendbar auf alle Problemtypen.

Teilfunktionen	Lösungsalternativen			
System fortbewegen	Rad	Luftkissen	Elektromagnet	...
Horizontale Kräfte aufnehmen	Längs-Lenker	Luftfeder	Tragstruktur	...
Vertikale Kräfte aufnehmen	Neige-Zylinder	Luftfeder	Tragstruktur	...
Energie in Kraft + Weg wandeln (antreiben)	Linearmotor Wechselfeld	Dieselaggregat	Brennstoffzelle	...
Kraft übertragen (vom Antrieb zur Schiene)	Hydraul. Hydrostat. Kraftübertragung	Elektromagnetische Kraftübertragung	Mechan. Kraftübertragung	...
Kinet. Energie umwandeln (abbremsen)	Linearmotor Wechselfeld	Trommelbremse	Scheibenbremse	...
System führen	Reibschluss	Formschluss	GPS-Empfänger (Holux GM 200)	...
Fahrtzustand bestimmen	Inkrementalgeber (in Radnabe)	Kennzeichnung einer Lösungskombination	Regler Steuerschieber	...
usw...	...		...	...

Bild 1: Beispiel morphologischer Kasten (Entwicklung eines Schienenfahrzeugs im Projekt *Neue Bahntechnik* Paderborn)

Verträglichkeitsprüfungen (bzgl. Energie-, Stoff-, und Signalflüssen sowie Geometrie, Fertigung, Montage,...) zwischen einzelnen Systemelementen erfolgen heute überwiegend durch Erfahrungswissen der Entwickler. Teils werden auch Verträglichkeitsbewertungen durchgeführt, die sich aber überwiegend auf die Domäne Mechanik beschränken [2-6]. Als Nachteile des morphologischen Kastens sind zu nennen:

- Die Komplexität der möglichen Lösungen ist hoch. Die Vielzahl denkbarer Kombinationen von Teillösungen muss manuell auf ein sinnvolles Maß beschränkt werden.
- Es gibt wenig rechnerunterstützte Auswertungsmöglichkeiten der Verträglichkeitsanalyse.
- Es erfolgt selten eine systematische Berücksichtigung der Energie-, Stoff-, und Signalflüsse sowie der Merkmale und Eigenschaften der Lösungen, die zu Verträglichkeit/ Unverträglichkeit führen.
- Der nützliche oder auch schädliche Einfluss dieser Merkmale und Eigenschaften auf die Erfüllung der betreffenden Teilfunktion wird nicht systematisch behandelt.
- Dementsprechend werden die Merkmale und Eigenschaften einzelner Teillösungen auch nicht dahingehend betrachtet, ob sie zur Erfüllung anderer Teilfunktionen einen Beitrag leisten könnten (z.B. Funktionen, die ursprünglich einer anderen Domäne zugeteilt wurden).

- Die in den meisten Produkten vorliegende polyhierarchische Vernetzung [7] zwischen Teilfunktionen und Teillösungen (eine Funktion kann nur durch das Zusammenspiel mehrerer Lösungen erfüllt werden bzw. eine Lösung erfüllt mehrere Funktionen) kann im morphologischen Kasten schlecht dargestellt werden (s. Verbindungslinien in Bild 1).
- Das führt dazu, dass die Potentiale der funktionalen und räumlichen Integration [8] nicht systematisch ausgeschöpft werden.
- Es besteht die Gefahr, dass sub-optimale Lösungen entstehen, indem pro Teilfunktion die beste Lösung gewählt wird und diese verknüpft werden.
- Die Methode erfordert je nach Aufgabenkomplexität großen Zeitaufwand.

Insbesondere bei mechatronischen Systemen ist zudem ein systematisches Vorgehen zwingend erforderlich. Denn es besteht ein hohes Potenzial an Funktionsintegration durch die beteiligten Domänen, das nur durch strukturiertes Vorgehen zugänglich wird.

## 2 Systematische rechnerunterstützte Verträglichkeitsanalyse

Im Folgenden wird an einem Beispiel das Vorgehen bei der Verträglichkeitsanalyse während des Aufbaus der Wirkstruktur erläutert.

### 2.1 Einordnung der Verträglichkeitsanalyse in die Entwicklungsmethodik

Die Vorgehensweise kann zu den allgemein einsetzbaren Methoden gezählt werden und gliedert sich in die Phase Konzipieren des Produktentwicklungsprozesses nach Pahl/Beitz [5] wie in Bild 2 wiedergegeben ein:

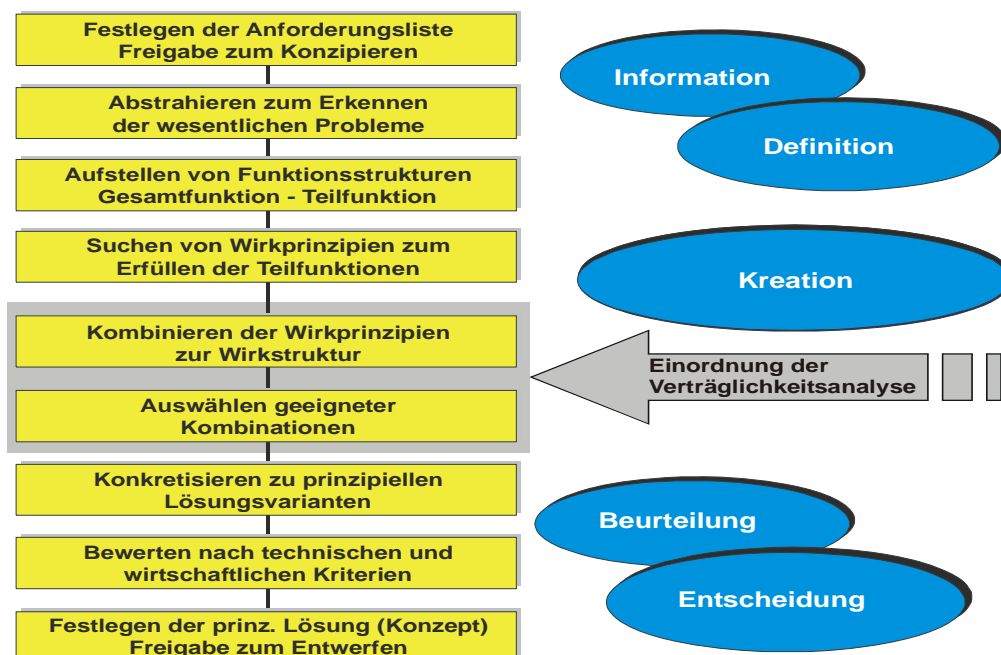


Bild 2: Einordnung der Verträglichkeitsanalyse in die Konzipierung des Entwicklungsprozesses nach Pahl/Beitz [5]

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Durchdringung des Maschinenbaus mit Informationstechnik, was durch den Begriff Mechatronik zum Ausdruck kommt, stellt sich die Frage nach der Einordnung in Vorgehenspläne der Mechatronik. Der neueste Vorgehensplan für die Entwicklung mechatronischer Systeme wird in der VDI-Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ vorgeschlagen (Bild 3). Die Verträglichkeitsanalyse kann zum einen in der Phase des Systementwurfs eingesetzt werden beim Aufbau der prinzipiellen Wirkstruktur. Sie eignet sich aber auch zum Eliminieren von Unverträglichkeiten zwischen den domänenspezifischen Entwürfen bzw. dem Finden der optimalen Gesamtlösung in der Phase der Systemintegration.

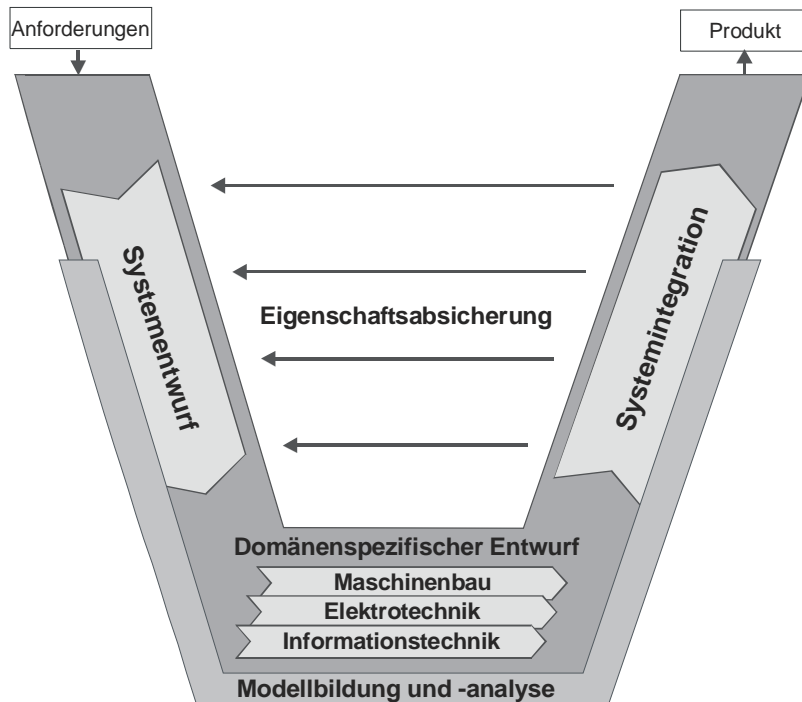


Bild 3: Das V-Modell als Makrozyklus beschreibt das generische Vorgehen beim Entwurf mechatronischer Systeme, das fallweise auszuprägen ist (VDI-Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ [8]).

## 2.2 Schritte der Verträglichkeitsanalyse

In diesem Beitrag wird davon ausgegangen, dass die Funktionsstruktur des zu entwickelnden Produkts vorliegt und die Energie-, Stoff- und Signalflüsse erfasst sind. Nun gliedert sich die Verträglichkeitsanalyse in folgende Schritte (vgl. Bild 4):

### (1) Zeilenweises Auflisten der Funktionen/Subfunktionen

In diesem Schritt werden die Hauptfunktionen zeilenweise aufgelistet. Alternativ besteht die Möglichkeit, die Funktionen hierarchisch aufzutragen unter Berücksichtigung der Subfunktionen.

### (2) Spaltenweises Auflisten der Lösungsalternativen für die Funktionen (domänenübergreifend)

Es bietet sich eine Reduzierung der Lösungsvarianten pro Teilfunktion auf eine Anzahl von max. 3 bis 4 an, da das Lösungsfeld durch die Gesetze der Kombinatorik leicht „explodieren“ kann [4].

### **(3) Auflisten der Eingangs- und Ausgangstypen (Energie, Stoff, Signal) für jede Teillösung**

In Schritt 3 werden die Eingangs- und Ausgangstypen der Lösungsalternativen beschrieben. Ein Linearmotor z.B. hat als Eingangsgröße elektrische Energie und als Ausgangsgröße kinetische Energie (Antriebskraft/Weg). Zudem hat der Linearmotor auch noch ein Eingangssignal, das bestimmt, wann die Antriebskraft wirken soll.

### **(4) Auflisten der funktionsbestimmenden Merkmale/Eigenschaften pro Teillösung**

In der Domäne Mechanik sind wesentliche Merkmale z.B. die Konstruktionsgrößen nach [7], in der Domäne Regelungstechnik sind es Reglerparameter o.ä.. Schritt 4 kann in verschiedenen Detaillierungsgraden erfolgen, z.B. kann eine Lösung der Domäne Mechanik bis auf die Ebene der Wirkflächen aufgespalten werden, falls dies für eine Verträglichkeitsanalyse erforderlich ist. In sehr frühen Entwicklungsphasen sind naturgemäß überwiegend qualitativ ausgeprägte Merkmale bekannt, die aber zunehmend spezifiziert und mit Werten belegt werden.

### **(5) Gewichtung der Merkmale/Eigenschaften pro Teillösung**

### **(6) Bewertung des Erfüllungsbeitrags der Merkmale/Eigenschaften für die Teilfunktionen**

In Schritt 6 wird der Erfüllungsbeitrag Merkmale/Eigenschaften für die Teilfunktionen bewertet. Das Bewertungsschema geht von 1 (schädlich) bis 5 (notwendig) [vgl. 13]. Es besteht Einigkeit darüber, dass ein technisches Produkt über seine wesentlichen Merkmale bzw. Eigenschaften sowie seine Wirkflächen definiert wird [2,7,9-12]. Daher gibt die Bewertung des Einflusses der Merkmale bzw. Eigenschaften auf die Funktionserfüllung entscheidende Hinweise. Der Entwickler selbst entscheidet aber nach wie vor, für welche Lösungen/Funktionen eine detaillierte Bewertung sinnvoll ist. Die Lösungsvarianten, die zur Erfüllung einer Teilfunktion offensichtlich keinen Beitrag leisten, werden mit der Bewertung „3“ belegt und nicht detaillierter betrachtet.

### **(7) Optimierung der Ausnutzung nützlicher/Eliminierung schädlicher Merkmale/Eigenschaften durch Funktionsintegration/-trennung**

Ziel dieses Schrittes ist ein optimales Nutzen der zur Verfügung stehenden Eigenschaften und eine möglichst weitgehende Eliminierung der parasitären Eigenschaften. Hat eine Teillösung für mehrere Teilfunktionen die Bewertung „5“ erhalten, so ist dies ein erster Hinweis, dass das Bauteil u.U. mehrere Funktionen erfüllen kann [7,15]. Die für eine Funktionsintegration zu berücksichtigende räumliche Anordnung der Bauteile sowie zeitliche und logische Aspekte sollen in Zukunft in diese Methode integriert werden.

### **(8) Kennzeichnen der gegenseitigen Beeinflussung der Funktionen durch ein Kreuz**

In Schritt 8 wird die gegenseitige Beeinflussung der Teilfunktionen mittels eines Kreuzes in der Zuordnungsmatrix links neben den Funktionen markiert.

### **(9) Zeilenweises Auflisten der Lösungsalternativen analog zu den Schritten 2 bis 5 (Aufbau der Verträglichkeitsmatrix)**

In diesem Schritt wird die eigentliche Verträglichkeitsmatrix aufgebaut, indem die Spalten aus den Schritten 2 bis 5 identisch zeilenweise aufgetragen werden.

### **(10) Kompatibilitätsprüfung der Ein- und Ausgänge der Teillösungen**

In diesem Schritt werden nur Lösungskombinationen bewertet, die Funktionen erfüllen, welche gemäß Schritt 8 Einfluss aufeinander ausüben. Denn wenn zwischen zwei Funktionen ein Energie-, Stoff- oder Signalfluss oder eine Kombination daraus besteht, so gilt dies prinzipiell auch für die zugeordneten Lösungen. Die Bewertung kann zwischen „5“ (grundsätzlich verträglich) und „1“ (grundsätzlich unverträglich) liegen (s. Bewertungsschema in Bild 4). Alle anderen Lösungskombinationen werden mit einer „3“ (unabhängig voneinander) bewertet. Falls die Eingangs- und Ausgangsgrößen der Teillösungen gemäß Schritt 10 nicht kompatibel sind, ist eine detailliertere Bewertung der Verträglichkeit dieser Kombination nicht erforderlich. Die Kombination kann verworfen werden, falls es nicht mit einfachen Mitteln gelingt, die Unverträglichkeit aufzuheben. Im Beispiel in Bild 5 benötigt der Inkrementalgeber eine Drehbewegung als Eingangsgröße, das Luftkissen liefert aber nur die Translationsbewegung des Fahrzeugs. Die Kompatibilitätsprüfung der Eingangs- und Ausgangsgrößen ist ein KO-Kriterium für die Verträglichkeit.

### **(11) Verträglichkeitsbewertung anhand funktionsbestimmender Merkmale/Eigenschaften**

Für alle kompatiblen Kombinationen aus Schritt 10 werden nun die funktionsbestimmenden Merkmale/Eigenschaften der Teillösungen auf gegenseitige Verträglichkeit geprüft. Für die Domäne Mechanik können z.B. die Konstruktionsgrößen nach [7] verwendet werden. Für die Domäne Regelungstechnik können Kriterien wie Reglerparameter o.ä. verwendet werden. Das Bewertungsschema geht auch hiervon 1 (grundsätzlich unverträglich) bis 5 (grundsätzlich verträglich). Lösungskombinationen, die nicht direkt über Energie-, Stoff- oder Signalflüsse vernetzt sind, werden zunächst nicht betrachtet und mit einer „3“ (unabhängig voneinander) bewertet. Parallel können grundsätzlich verträgliche Lösungspaare (z.B. aufgrund bestimmter Erfahrungen innerhalb eines Unternehmens) in einer Datenbank abgelegt und später durch „fallbasiertes Schließen“ in die Bewertung integriert werden und dadurch den Bewertungsaufwand reduzieren helfen. Entscheidend für diesen Schritt ist das Finden der relevanten Kriterien für jede Teillösung. Denn mit steigender Zahl der Merkmale/Eigenschaften steigt der Bewertungsaufwand an.

Die Verträglichkeit hinsichtlich der Kinematik bewegter Systeme kann teils schon in sehr frühen Phasen erforderlich sein. Dazu sind aber exakte Ausprägungen der geometrischen Größen erforderlich, sodass selbst für eine Prinziplösung schon detaillierte Untersuchungen erforderlich sein können.

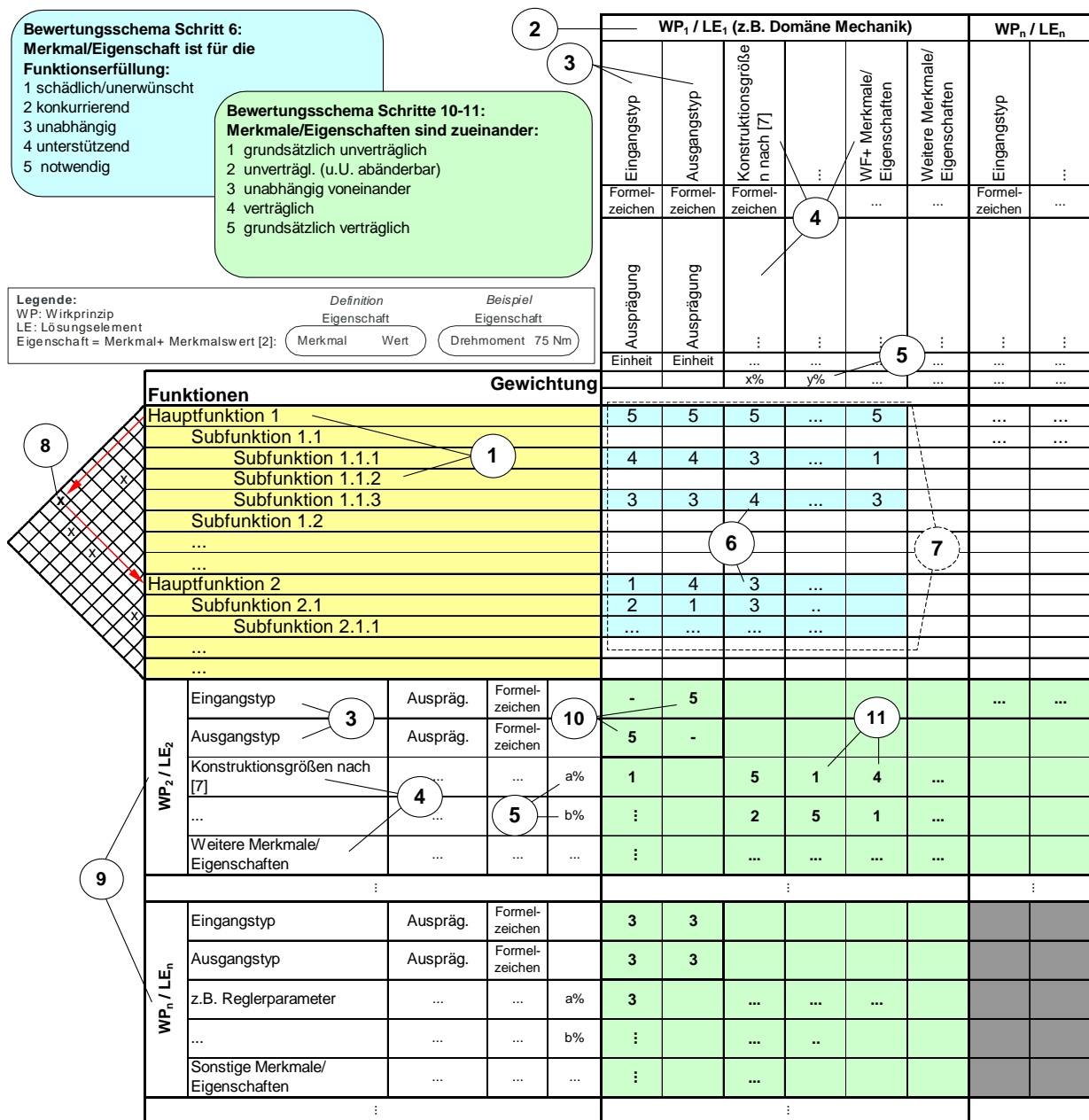


Bild 4: Verträglichkeitsmatrix für mechatronische Systeme. Die eingekreisten Zahlen beschreiben die einzelnen Schritte der Verträglichkeitsanalyse.

### 2.3 Werkzeug zur Verträglichkeitsuntersuchung

Die Verträglichkeitsmatrix wird anschließend mit dem Software-Werkzeug „Consistency-Checker“ ausgewertet. Bild 5 zeigt einen Auszug der Matrix sowie der berechneten Lösungsvorschläge am Beispiel „Schienenfahrzeug“. Die Zahlenwerte in den Spalten 1 und 2 des Fensters "clustering" drücken aus, in wieviel Prozent der insgesamt gebildeten Teillösungsbündel die entsprechende Teillösung vorkommt. Für Teillösung 1 z.B. bedeutet dies, dass die Funktion "System führen" eindeutig mittels Reibschluss erfüllt werden kann und gleichzeitig hochverträglich ist mit den anderen vorgeschlagenen Teillösungen.

**Consistency Matrix and Valuation**

function	solution	1A	1B	1C
	4B Luftfeder	3	3	3
	4C Tragstruktur	3	3	3
Energie in Kraft	5A Linearmotor Wechselfeld	5	2	2
	5B Diesellaggregat	3	3	3
	5C Brennstoffzelle	3	3	3
Kraft übertrager	6A Hydraul. Hydrostat. Kraftüb	4	1	1
	6B Elektromagnetische Kraftüb	4	4	5
	6C Mechan. Kraftübertragung	5	1	2
Kinet. Energie u.	7A Linearmotor Wechselfeld	5	2	2
	7B Trommelbremse	5	1	1
	7C Scheibenbremse	5	1	1
System führen	8A Reibschluss	4	2	2
	8B Formschluss	5	4	4
	8C GPS-Empfänger (Holux GM	3	3	3
Fahrtzustand be	9A Inkrementalgeber (in Radn	5	1	1
	9B Messpotentiometer in Luftf	5	2	2
	9C P-Regler Steuerschieber	3	3	3

**Clustering**

functions	partial solutions	1	2
System fortbewegen	1 A Rad	86	100
	1 B Luftkissen	7	0
	1 C Elektromagnet	7	0
System tragen	2 A Rad	86	100
	2 B Luftkissen	7	0
	2 C Elektromagnet	7	0
Horizontale Kräfte aufnehmen	3 A Längs-Lenker	21	100
	3 B Luftfeder	16	0
	3 C Tragstruktur	69	0
Vertikale Kräfte aufnehmen	4 A Neige-Zylinder	22	100
	4 B Luftfeder	26	0
	4 C Tragstruktur	52	0
Energie in Kraft + Weg wandeln	5 A Linearmotor Wechselfeld	45	46
	5 B Diesellaggregat	41	54
	5 C Brennstoffzelle	14	0
Kraft übertragen (vom Antrieb zur	6 A Hydraul. Hydrostat. Kraftübertragung	7	0
	6 B Elektromagnetische Kraftübertragung	66	46
	6 C Mechan. Kraftübertragung (Antriebswelle)	28	54
Kinet. Energie umwandeln (abbre	7 A Linearmotor Wechselfeld	62	8
	7 B Trommelbremse	24	31
	7 C Scheibenbremse	14	62
System führen	8 A Reibschluss	0	54
	8 B Formschluss	100	0
	8 C GPS-Empfänger (Holux GM 200)	0	46
Fahrtzustand bestimmen	9 A Inkrementalgeber (in Radnabe)	30	46

**Relations**

How consistent is solution A (row) with solution B (column)?

Display mode select:  Color  Show description

Input mode:  Manuell  Step by step

In Col  In Row

Bild 5: Screen-Shot des Software-Werkzeugs „Consistency-Checker“: Hinteres Fenster: importierte Verträglichkeitsmatrix im Bewertungsmodus. Vorderes kleines Fenster: Ergebnis der Clusteranalyse, zwei mögliche Gesamtlösungen.

Der Algorithmus ermittelt entlang des Lösungsstammbaums (Bild 6) Ketten von verträglichen Teillösungen, wobei für jede Teilfunktion eine Lösung ausgewählt wird. Dieselbe Lösung kann aber auch zur Erfüllung weiterer Funktionen dienen. Sobald eine Teillösung mit einer anderen in der Kette unverträglich ist, wird die gesamte Kette verworfen [2].

Auf diese Weise wird der Lösungsraum effektiv eingeschränkt und die verträglichsten Gesamtlösungen ermittelt. Der Algorithmus kann alternativ auch invertiert werden und die unverträglichsten Kombinationen von Teillösungen ermitteln. Dieses Verfahren unterscheidet sich vom ersten dadurch, dass nicht sofort die Ideallösung angestrebt wird, sondern sich dieser schrittweise genähert wird, indem nach und nach die „schlechteren“ Lösungen aussortiert werden.

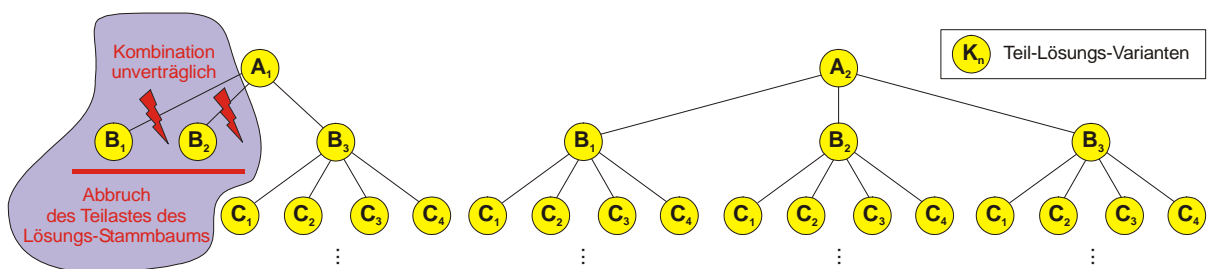


Bild 6: Der Algorithmus schränkt wirksam den Lösungsraum ein, indem Ketten von Teillösungen, die unverträgliche Kombinationen enthalten, sofort verworfen werden [nach 2].



## 2.4 Vorteile der Verträglichkeitsanalyse

Das vorgestellte Verfahren wurde am Beispiel der Entwicklung eines Schienenfahrzeugs im Projekt *Neue Bahntechnik Paderborn* erprobt. Es ergeben sich folgende Vorteile:

- Systematische paarweise Bewertung der Verträglichkeit wird vom Algorithmus auf alle möglichen Kombinationen übertragen. Dadurch ist eine Verträglichkeitsanalyse über viele Stufen hinweg möglich, die der Mensch im Gehirn nicht mehr nachvollziehen kann [2].
- Teils können Unverträglichkeit oder störende Effekte zwischen zwei Systemelementen durch ein zusätzliches Lösungselement (z.B. eine automatische Steuerung) aufgehoben werden. In diesem Fall tritt eine neue Subfunktion hinzu, die sich in der Matrix in Bild 5 als neue Zeile hinzufügen und in die Bewertung integrieren lässt.
- Der hierarchische Ansatz der Verträglichkeitsanalyse berücksichtigt:
  - Physikalische Effekte/Wirkprinzipien/Lösungselemente.
  - Merkmale und Eigenschaften physikalischer Effekte/ Wirkprinzipien/ Lösungselemente.
  - Die Wirkflächen/Wirkräume [2,7,9] der Wirkprinzipien/Lösungselemente incl. ihrer Merkmale und Eigenschaften.
- Das beschriebene Bewertungsverfahren kann auch ohne Berücksichtigung der Merkmale und Eigenschaften durchgeführt werden. In diesem Fall werden nur die Teillösungen miteinander verglichen, und es ist mit wesentlich weniger Aufwand eine Grobausage zur Verträglichkeit möglich.
- Die vorgestellte Vorgehensweise kann in der Konzeptphase eingesetzt werden, aber auch fortlaufend den Entwicklungsprozess begleiten. Mit zunehmender Kenntnis über die Ausprägung der Parameter des Produkts kann von Zeit zu Zeit ein Verträglichkeits-abgleich geführt werden. Der Kern, die Matrix, stellt sozusagen ein gemeinsames Zentrum dar, in der die Verträglichkeitsinformationen der verschiedenen Domänen zu-sammengeführt werden.

Der Aufwand zur Bewertung soll so gering wie möglich gehalten werden durch:

- Eine Grobbewertung anhand des Energie-, Stoff- oder Signalfusses im ersten Schritt.
- Unterstützung durch eine Datenbank, die feststehende Bewertungen mittels „fallbasier-tem Schließen“ speichert und zur Verfügung stellt.

Das vorgestellte Verfahren stellt einen neuen Ansatz dar, die Komplexität beim Aufbau der Wirkstruktur mechatronischer Systeme zu bewältigen. Eine grundsätzliche Problematik bei der Bewertung in den frühen Phasen der Produktentwicklung stellt sich auch bei diesem Ansatz: der Umgang mit unbekanntem Ausprägungen von Merkmalen in dieser Phase. Oft entscheidet die genaue Ausprägung eines Merkmals über Verträglichkeit/Unverträglichkeit, sodass eine Bewertung bei Unkenntnis der Ausprägung dem Entwickler nicht weiterhilft. Eine Kollision zweier Bauteile z.B. kann nicht beurteilt werden, wenn die genauen Abmessungen nicht bekannt sind. In diesem Fall muss die Verträglichkeitsprüfung in einer späteren Phase durchgeführt werden.

### 3 Literatur

- [1] Zwicky, F.: Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild; Droemer-Knaur-Verlag, 1971
- [2] Birkhofer, H.: Analyse und Synthese der Funktionen technischer Produkte; VDI-Verlag Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 1 Nr. 70, 1980
- [3] Claussen, U.: Konstruieren mit Rechnern, Springer-Verlag, 1971
- [4] Hansen, F.: Konstruktionswissenschaft – Grundlagen und Methoden; Carl Hanser Verlag, 1974
- [5] Pahl G., Beitz W.: Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen. Springer-Verlag, Berlin 1997
- [6] Meerkamm, H.: Script Vorlesung Konstruktionstechnik, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen-Nürnberg, 2001
- [7] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Band 1-3; Springer Verlag, 1994
- [8] VDI-Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, VDI-Verlag, liegt Ende 2002 als Gründruck vor.
- [9] Albers, A.: Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme, Fachaufsatz in Konstruktion, 7/8-2002
- [10] Andreasen, M.M., Hein, L.: Integrated product development, Springer-Verlag, 1987
- [11] Hubka, V.: Theorie der Maschinensysteme; Springer-Verlag, 1973
- [12] Hubka, V.: Theorie der Konstruktionsprozesse; Springer-Verlag, 1976
- [13] Adunka, R. Wartzack, S., Meerkamm, H.: Computer aided multi-criteria evaluation of construction structure variants; International workshop on multicriteria evaluation, Neukirchen, 9/2000
- [14] Gausemeier, J.; Ebbesmeyer, P.; Kallmeyer, F.: Produktinnovation. Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen; Carl Hanser Verlag, München, 2001
- [15] Kallenbach, E.; Saffert, E.; Schäffel, C.; Birli, O.: Zur Gestaltung integrierter mechatronischer Produkte. Tagung Mechatronik im Maschinen- und Fahrzeugbau, Moers, 1997
- [16] Müller, J.: Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften - Systematik, Heuristik, Kreativität; Springer-Verlag, 1990

Dipl.-Ing. M. Köckerling  
Prof. Dr.-Ing. J. Gausemeier  
Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn  
Fürstenallee 11, 33102 Paderborn  
Tel: 0049-5251-606267  
Fax: 0049-5251-606268  
Email: [gausemeier@hni.uni-paderborn.de](mailto:gausemeier@hni.uni-paderborn.de)  
[koeck@hni.uni-paderborn.de](mailto:koeck@hni.uni-paderborn.de)  
URL: <http://www@hni.uni-paderborn.de>