

## SYSTEMATISCHER RECHNERUNTERSTÜTZTER ENTWURF SELBSTOPTIMIERENDER SYSTEME<sup>1</sup>

*Matthias Gehrke, Daniel Steffen*

### Zusammenfassung

Basierend auf dem Entwicklungsprozess mechatronischer Produkte wird eine Methode vorgestellt, die die Spezifikation einer prinzipiellen Lösung automatisiert unterstützt. Dazu wurde eine Syntax zur Beschreibung von Funktionsstrukturen definiert. Darauf aufbauend wurden Lösungsmuster spezifiziert und mit Funktionen verknüpft. Schließlich wurde ein Algorithmus entwickelt, der auf Basis der Funktionsstruktur mögliche Lösungen ermittelt, wobei auch Abhängigkeiten und Nebeneffekte berücksichtigt werden. Das Resultat ist eine Wirkstruktur dessen Elemente in der Lage sind alle geforderten Funktionen zu erfüllen.

### 1 Einleitung

Die meisten Erzeugnisse des Maschinenbaus beruhen schon heute auf dem engen Zusammenwirken von Mechanik, Elektronik, Regelungstechnik und Softwaretechnik, was durch den Begriff Mechatronik zum Ausdruck kommt. Ziel der Mechatronik ist es, das Verhalten eines technischen Systems zu verbessern, indem sowohl mit Hilfe von Sensoren Informationen über die Umgebung, als auch über das System selbst erfasst und für optimale Reaktionen des Systems verarbeitet werden. Vor dem Hintergrund der rasanten Entwicklung der Informationstechnik zeichnen sich weitere Möglichkeiten ab, die weit über die Mechatronik hinausgehen – Systeme mit inhärenter Teilintelligenz. Dafür verwenden wir den Begriff Selbstoptimierung. Selbstoptimierende Systeme passen sich autonom an sich ändernde Umweltbedingungen an. Das Paradigma der Selbstoptimierung eröffnet für den Maschinenbau und artverwandte Branchen faszinierende Perspektiven.

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ an der Universität Paderborn wurde untersucht, welche besonderen Aspekte während des Systementwurfs (Konzipierung) selbstoptimierender Systeme zu berücksichtigen sind. Hierzu wurde der Entwicklungsprozess für selbstoptimierende Systeme eingehend untersucht. Ausgangspunkt dabei war die VDI-Richtlinie 2206 für die Entwicklung mechatronischer Produkte [13]. Nach umfangreicher Untersuchung wurden einige, neue Prozessschritte ergänzt [14]. Hierzu zählen beispielsweise die Umfeldanalyse oder das Aufstellen eines Zielsystems oder Anwendungsszenarien. Zur Beschreibung der Ergebnisse diese Prozessschritte werden verschiedene Arten von Modellen benötigt. Die Gesamtheit dieser Modelle (Partialmodelle) beschreibt dann die Prinziplösung eines selbstoptimierenden Produktes. Identifiziert wurden die Partialmodelle *Anforderungen*, *Umfeld*, *Zielsystem*, *Funktionen*, *Wirkstruktur*, *Anwendungsszenarien*, *Verhalten* und *Gestalt* (siehe Abbildung 1). Wie auch die Prozessschritte selbst haben auch die Modelle Einfluss aufeinander. Einige bauen aufeinander auf, andere werden im ständigen Wechselspiel erstellt. Eine dieser Beziehungen besteht zwischen den Funktionen und der Wirkstruktur und soll im Weiteren genauer beschrieben werden.

---

<sup>1</sup> Diese Arbeit wurde entwickelt im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ an der Universität Paderborn. Das Projekt wird gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft.

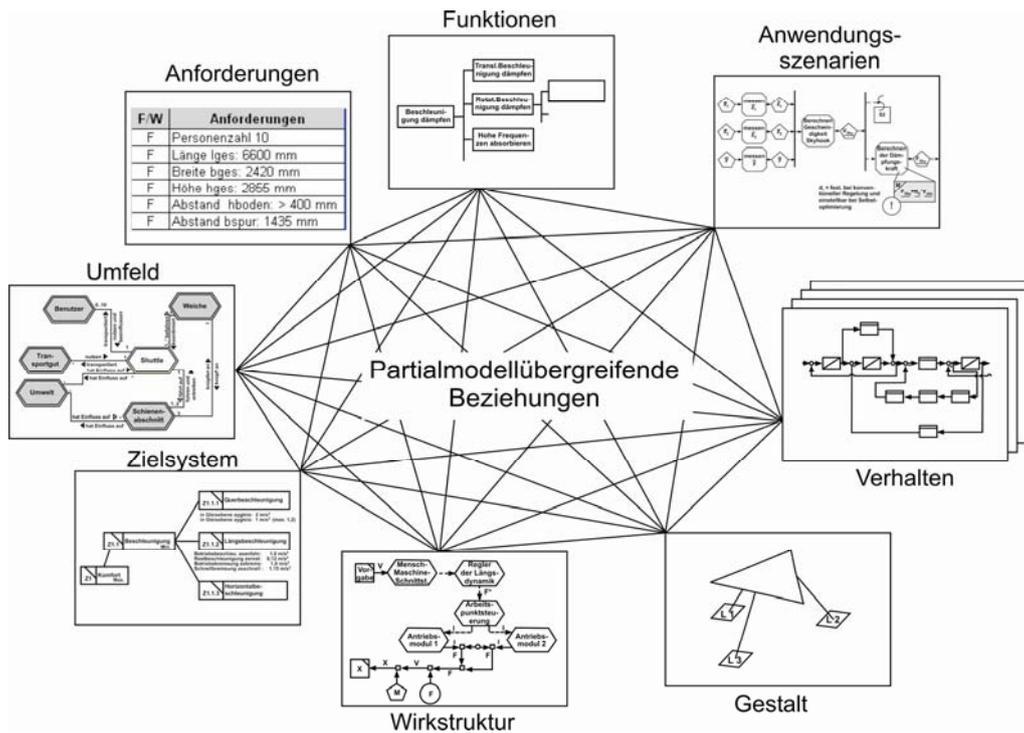


Bild 1: Partialmodelle zur Beschreibung der Prinziplösung

Das etablierte Vorgehen in der Entwicklungsmethodik für die frühen Phasen des Systementwurfs ist der funktionale Entwurf. Er beginnt mit der lösungsneutralen Beschreibung der gewünschten Produktfunktionalität mit Hilfe von Funktionen. Nach der Erstellung der Funktionsstruktur wird für jede Funktion eine entsprechende Lösung gesucht, wobei eine Lösung sowohl ein bewährtes Lösungselement als auch ein Wirkprinzip sein kann. Die Kombination dieser Lösungen, die im Folgenden als Systemelemente bezeichnet werden, ergibt dann die Wirkstruktur.

Die Erfahrungen im Rahmen des SFB 614 haben gezeigt, dass bereits bei der Erstellung der Funktionsstruktur gedanklich Systemelemente gewählt werden, die die Funktionen realisieren sollen. Diese Auswahl der Systemelemente, die vorrangig auf der Erfahrung des Ingenieurs beruht, führt dazu, dass unbekannte, möglicherweise bessere Systemelemente unberücksichtigt bleiben. Darüber hinaus werden mögliche Abhängigkeiten der Systemelemente untereinander nur unzureichend bedacht, was während der Entwicklung dann zu erheblichen Kosten führen kann. Hilfreich wären hier eine Methode und eine entsprechende Rechnerunterstützung die diese genannten Probleme behebt.

Im Rahmen des SFB wurde dieses Problem aufgegriffen. Ausgehend von der bekannten Vorgehensweise nach [10] und [13] für den funktionalen Entwurf mechatronischer Systeme wurde ein entsprechendes Konzept für den Übergang zwischen Funktions- und Wirkstruktur entwickelt und durch ein Softwarewerkzeug unterstützt.

## 2 Verwandte Arbeiten

Für die Ausarbeitung mechatronischer Produkte existieren eine Reihe von Methoden und Softwarewerkzeuge (z.B.: CAx, etc), um den Ingenieur bei seiner Arbeit zu unterstützen. Für den Systementwurf steht eine solche Menge an Methoden und Werkzeugen jedoch nicht zur Verfügung. Insbesondere hier ist aber eine entsprechende Unterstützung notwendig. Nach [10] liegt das Hauptproblem während des Systementwurfs darin zu entscheiden, welche Lösungselemente zu verwenden sind und welchen Einfluss diese Lösungselemente aufeinander

der haben. Der entscheidende Schritt ist die Reduktion aller möglichen Kombinationen von Lösungselementen zu einer praktikablen und funktionsfähigen Lösung. In den letzten Jahren haben sich einige Ansätze und Projekte mit dem beschriebenen Problem beschäftigt.

Benz [1] beispielsweise entwickelte ein Softwarewerkzeug zur Modellierung und Optimierung von Funktionsstrukturen. Eine automatische Suche nach Lösungen ist jedoch nicht vorhanden.

Im Projekt iViP [6] wurde ein Funktionseditor entwickelt mit dessen Hilfe sich Funktionsstrukturen modellieren lassen. Die Funktionen können dabei mit Attributen und Werten belegt werden über die sie dann mit anderen Funktionen verknüpft werden. Eine automatische Suche nach Lösungen auf Basis der Funktionen im Rahmen der Konzipierung liegt nicht im Fokus.

Der Ansatz von Puri [11] orientiert sich an der natürlichsprachlichen Beschreibung von Funktionen. Es wurden Thesauri sowohl für Umsätze (z.B.: Signal) als auch für Operationen (z.B.: Ändern) entwickelt. Eine Suche nach möglichen Lösungen ist auch hier nicht vorhanden.

Huber [5] beschreibt in seinem Ansatz mehrere Arten von Funktionsstrukturen und definiert verschiedene Übergänge zwischen ihnen. So gibt es z.B. eine abstrakte Funktionsstruktur und eine spezielle Funktionsstruktur und einen auf Regeln basierten Übergang zwischen ihnen. Des Weiteren beschreibt er in seinem Ansatz die Möglichkeit der Verbesserung von Funktionsstrukturen. So lässt sich beispielsweise eine unvollständige Funktionsstruktur mit Hilfe von Regeln automatisch ergänzen. Auch eine Lösungssuche ist vorhanden. Diese beschränkt sich jedoch auf gestaltbehaftete Elemente und wird in der Arbeit nur am Rande betrachtet.

### 3 Anwendungsbeispiel

Das Beispiel, welches wir zum besseren Verständnis in diesem Papier verwenden, stammt aus dem Railcab – Projekt<sup>2</sup> der Universität Paderborn. In diesem Projekt wird ein neuartiges autonomes Shuttle entwickelt, das Teil eines innovativen Schienenverkehrssystems auf Basis von kleinen, miteinander vernetzten Einheiten ist. Das Shuttle besteht aus den Kernmodulen Antriebsmodul, zwei Feder-/Neige-Modulen (F/N-Modul) und dem Spurführungsmodul.

Im folgenden wird das F/N-Modul des Shuttles als konkretes Anwendungsbeispiel verwendet. Die Hauptfunktion dieses F/N-Moduls ist die Dämpfung aller Anregungen aus der Strecke um den Passagier so komfortabel wie möglich zu befördern. Als Prüfstand ist das F/N-Modul in Abbildung 2 zu sehen.

Das F/N-Modul besteht insgesamt aus 2 Luftfedern und 3 Hydraulikzylindern. Dadurch wird es möglich 3 Freiheitsgrade zu aktuierten (2 translatorische und 1 rotatorischen). Durch die Kombination von zwei solchen F/N-Modulen wird die Aktuierung von 5 Freiheitsgraden erreicht. Lediglich der sechste Freiheitsgrad muss durch zusätzliche Längszylinder ergänzt werden.

---

<sup>2</sup> <http://www.railcab.de>

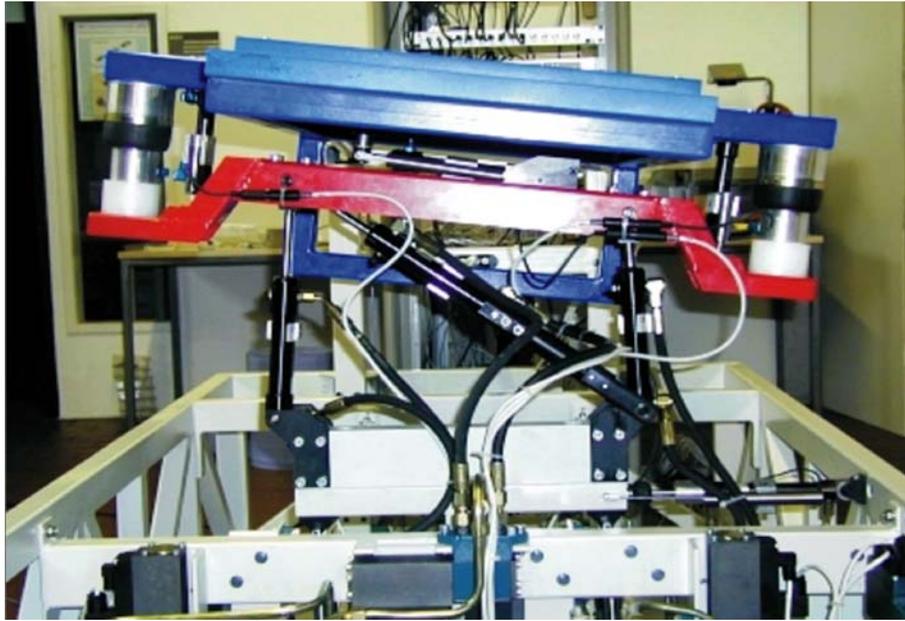


Bild 2: Prüfstand des Feder-/Neige-Moduls

Im weiteren Verlauf dieses Papiers konzentrieren wir uns auf die Konstruktion eines solchen F/N-Moduls. Die zu beantwortende Frage ist, „Ist es möglich mit Hilfe einer Methode und einer entsprechenden Rechnerunterstützung automatisch zu einem solchen F/N-Modul zu gelangen“.

## 4 Lösungssuche

### 4.1 Funktionsstruktur

Der funktionale Entwurf beginnt mit der Spezifizierung der Hauptfunktion des neuen Systems auf Basis der Anforderungen. Diese Hauptfunktion wird dann in handhabbare Teilfunktionen zerlegt, für die sich Lösungen finden lassen. Im Anschluss daran wird dann eine initiale Funktionsstruktur erstellt, bei der die definierten Teilfunktionen mit Hilfe von Stoff-, Energie- und Informationsflüssen miteinander verknüpft werden.

#### 4.1.1 Spezifikation der Funktionen

Jede Funktion der Funktionsstruktur wird eindeutig durch die Angabe eines Substantivs und eines Verbs spezifiziert. Zu diesem Zweck wurde eine entsprechende Klassifizierung entwickelt die jedem Verb eine Hierarchie von Substantiven zuordnet (siehe Abbildung 3). Die Hierarchie basiert auf den Arbeiten von [9, S.86] und erweitert diese um weitere Größen. Die Hierarchie der Substantive lässt sich für jedes Verb individuell anpassen. Dies war jedoch während der Arbeiten im SFB 614 nicht zwingend notwendig, weshalb für alle Verben die gleiche Hierarchie verwendet wurde.

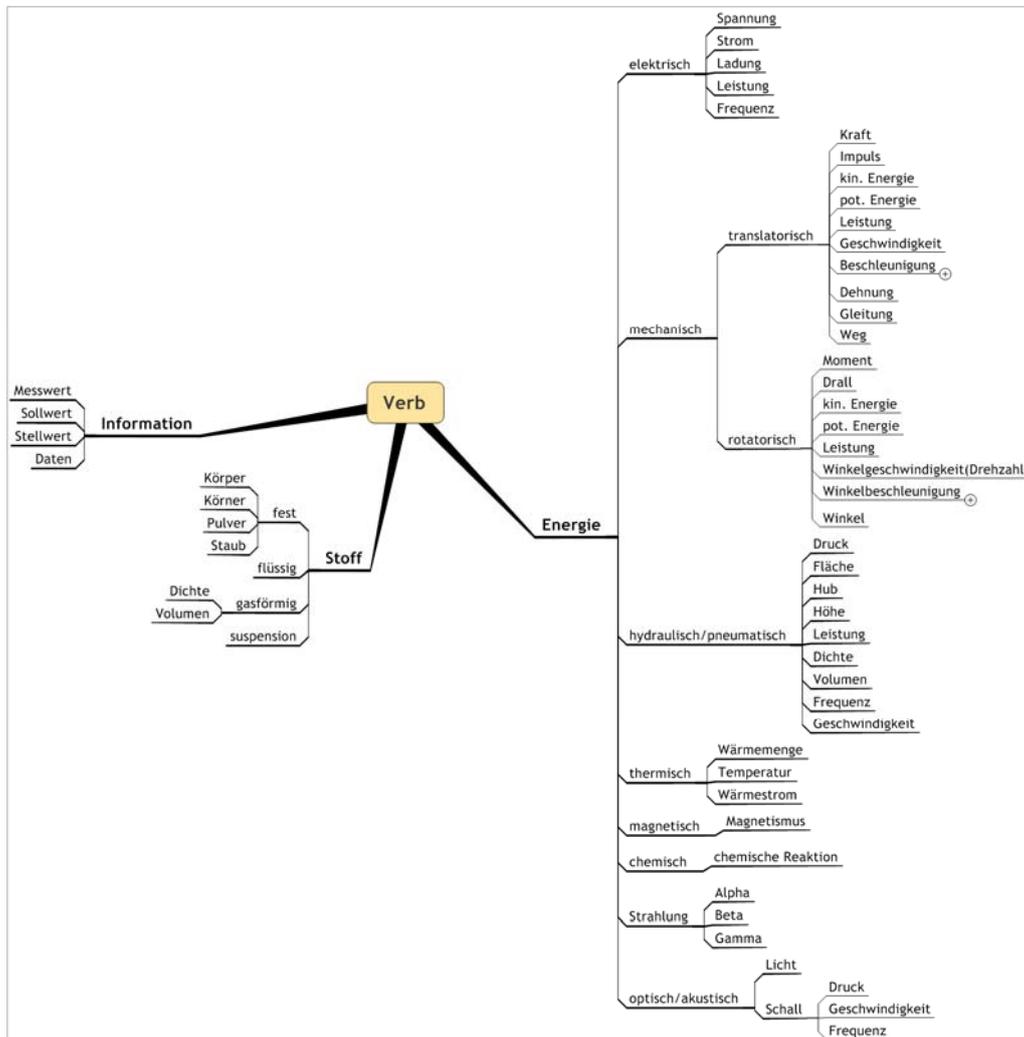


Bild 3: Substantiv-Verb Zuweisung

Die Anzahl der möglichen Verben basiert auf den von [2] definierten technischen Verben und wurde auf diese beschränkt. Dadurch soll erreicht werden, dass für den gleichen Sachverhalt auch möglichst die gleichen Verben verwendet werden.

#### 4.1.2 Syntax der Funktionsstruktur

Die Syntax zur graphischen Beschreibung der Funktionsstruktur, die im Rahmen des SFB 614 erstellt wurde, basiert auf den Arbeiten von [10], [3] und [12]. Jede Funktion der Funktionsstruktur wird durch ein Rechteck beschrieben. In der Mitte des Rechtecks steht die Substantiv-Verb Kombination. Verbunden werden die Funktionen über Ports. In der Abbildung 4 wird die Funktionsstruktur des Feder-/Neige-Moduls gezeigt.

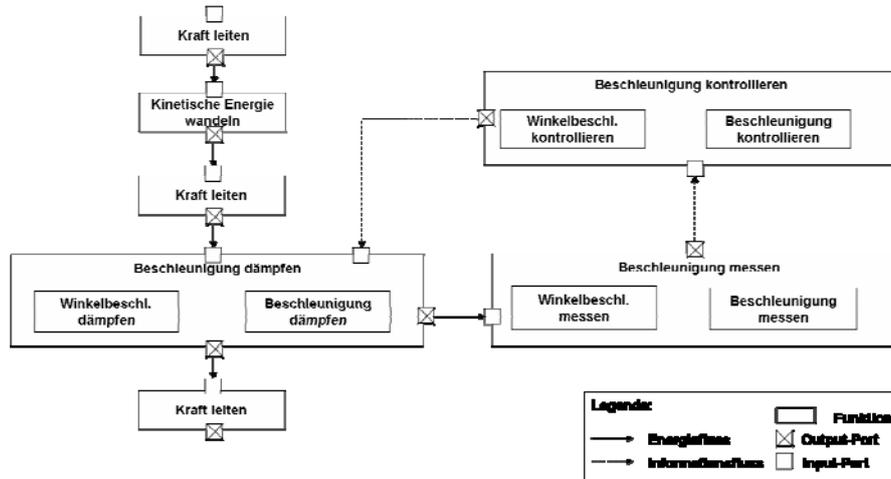


Bild 4: Funktionsstruktur des Feder- / Neige-Moduls

Basierend auf dieser Funktionsstruktur müssen nun Systemelemente gesucht werden. D.h. es müssen einzelne Systemelemente oder eine Kombination von Systemelementen ermittelt werden die die jeweiligen Funktionen erfüllen können. Zu diesem Zweck wurde ein entsprechendes Konzept entwickelt, welches im Folgenden vorgestellt wird.

## 4.2 Lösungsmuster

### 4.2.1 Konzept

Das Konzept zur Beschreibung von Lösungen basiert auf der Idee der Entwurfsmuster aus dem Bereich der Softwaretechnik [4]. Entwurfsmuster beschreiben Lösungen die sich zur Erfüllung einer ganz bestimmten Aufgabe besonders gut eignen. Übertragen auf die Domäne der Mechatronik bedeutet dies, dass Lösungen aus einem oder mehreren Systemelementen bestehen können. Solche bewährten Lösungen werden im Folgenden als Lösungsmuster bezeichnet.

### 4.2.2 Syntax der Wirkstruktur

Ähnlich wie bei den Funktionen werden Systemelemente durch Stoff-, Energie- und Informationsflüsse miteinander verbunden. Die dadurch entstehende Struktur wird Wirkstruktur genannt. Die Syntax der Systemelemente basiert auf den Arbeiten von [7]. Ein Systemelement wird als Sechseck dargestellt und durch Ports mit anderen Systemelementen verbunden. Innerhalb des Sechsecks steht der Name des Systemelements. Abbildung 5 zeigt die Wirkstruktur des Lösungsmusters „Zylindereinheit“.

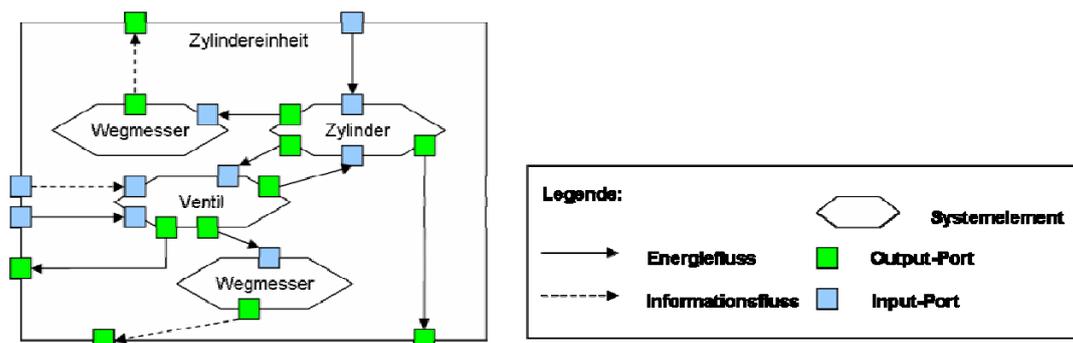


Bild 5: Lösungsmuster "Zylindereinheit"

### 4.3 Lösungsmusterdatenbank

Um auf ein breites Spektrum von Lösungsmuster zugreifen zu können wurde im Rahmen des SFB 614 eine Datenbank von Lösungsmustern angelegt. Die Lösungsmuster innerhalb der Datenbank wurden einzelnen Funktionen zugeordnet. Die Zuordnung zu den Funktionen erfolgte dabei innerhalb des Hierarchiebaumes (siehe Abbildung 6), indem die Lösungsmuster an den Enden des Baumes als Blätter gehängt wurden.

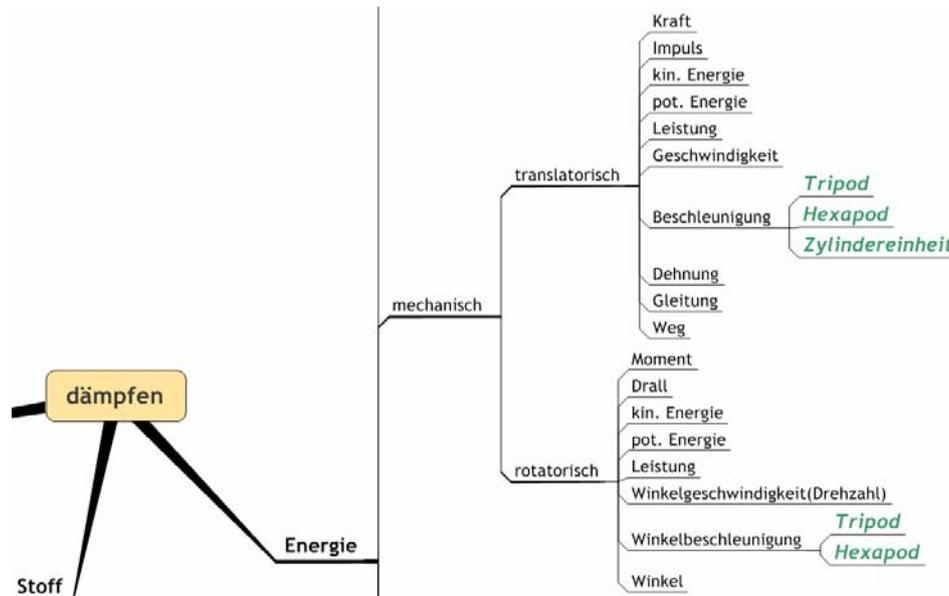


Bild 6: Zuweisung von Lösungsmustern

Dieses Vorgehen ermöglicht es, einen entsprechend effizienten Suchalgorithmus zu entwickeln, der gemäß der Funktionsspezifikation alle in Frage kommenden Lösungsmuster ermittelt. Wird beispielsweise ein Lösungsmuster zu der Funktion „Beschleunigung dämpfen“ gesucht, braucht der Algorithmus nur den Verzweigungen bis zu den Blättern zu folgen. Nach Abschluss der Suche werden die gefundenen Lösungsmuster dem Ingenieur zur Auswahl präsentiert. Das ausgewählte Lösungsmuster wird dann in die Wirkstruktur integriert. Dies geschieht von Hand, da eine automatische Verbindung mit den in der Wirkstruktur bereits vorhandenen Systemelementen sehr viel physikalisches Verständnis erfordert.

### 4.4 Abhängigkeiten

Das beschriebene Vorgehen besitzt den Vorteil, dass hier auf das Wissen des Systems zurückgegriffen werden kann um mögliche Lösungsmuster zu ermitteln. In den Lösungsmustern existieren zusätzliche Abhängigkeiten, da sie ihrerseits von anderen Funktionen oder Lösungsmustern abhängen. Beispielsweise benötigt das Lösungsmuster „Zylindereinheit“ die Funktion „Energie bereitstellen“ für die Stromversorgung der Wegmesser. Dies hat zur Folge, dass die Funktionsstruktur aufgrund der Auswahl eines Lösungsmusters erweitert werden muss. Für diese neue Funktion(en) müssen nun ihrerseits wieder Lösungsmuster ermittelt werden. Dies führt zum ständigen Wechsel zwischen der Funktions- und Wirkstruktur. Nachdem die Suche für alle spezifizierten Funktionen durchgeführt wurde, ist Stück für Stück die Wirkstruktur entstanden.

Deshalb werden in den Lösungsmustern nicht nur die Systemelemente gespeichert, sondern auch etwaige benötigte Funktionen bzw. Lösungsmuster.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Papier wird beschrieben, wie man ausgehend von einer Funktionsstruktur systematisch und gezielt zu einer Wirkstruktur kommt. Die Elemente der so entstehenden Wirkstruktur sind in der Lage alle geforderten Funktionen zu erfüllen. Durch diesen Ansatz kann sich der Ingenieur den Informationen eines entsprechenden Softwarewerkzeuges bedienen, was zu einer Vergrößerung des Lösungsraumes und damit zu potentiell besseren Lösungen führt. Des Weiteren werden Randbedingungen, die die Auswahl von Systemelementen mit sich bringt, automatisch beachtet.

Der Ansatz hat noch einiges Verbesserungspotential, dem sich in naher Zukunft angenommen werden soll. Die Auswahl von Systemelementen ist nicht immer eindeutig. Wird beispielsweise das Systemelement „Regler“ ausgewählt, so muss dieser Regler später auf einem entsprechenden Steuergerät ausgeführt werden. Diese Abhängigkeit muss in der Wirkstruktur berücksichtigt und soll in Form eines Sichtenkonzeptes umgesetzt werden.

Des Weiteren soll es möglich sein für die Funktionen zusätzliche Attribute zu vergeben, die ihrerseits wieder Auswirkung auf die Suche haben können. Beispielsweise könnte für die Funktion „Kinetische Energie wandeln“ das Attribut max. Kraft mit dem Wert 500Nm angegeben werden. Dies hätte zur Folge, dass bestimmte Systemelemente nicht mehr in Frage kommen, obwohl sie prinzipiell die Funktion erfüllen. Der Lösungsraum wird systematisch verkleinert.

Schließlich soll es möglich sein nicht nur irgendeine, funktionierende Wirkstruktur zu ermitteln, sondern nach Möglichkeit die Beste. Zu diesem Zweck sollen die Lösungsmuster zueinander in Beziehung gesetzt werden. Es soll ein Wert spezifiziert werden, der die Verträglichkeit der Systemelemente zueinander beschreibt. Je höher die Wertigkeit umso verträglicher/besser die Kombination. Auf diese Weise können jetzt diejenigen Systemelemente gewählt werden deren Verträglichkeiten am höchsten sind, was zu einer optimalen Wirkstruktur führt. Dieser Ansatz basiert auf den Arbeiten von [8] und soll entsprechend erweitert und in den Algorithmus zur Suche nach Wirkprinzipien integriert werden.

## 6 Literatur

- [1] Benz, T.: Funktionsmodellieren als Basis zur Lösungsfindung in CAD-Systemen. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1990
- [2] Birkhofer, H.: Analyse und Synthese der Funktionen technischer Produkte. Dissertation, TU Braunschweig, 1980
- [3] Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. 2. Auflage, HANSER-Verlag, 2003, ISBN 3-446-22119-0
- [4] Gamma, E., Helm, R., Johnson, R., Vlissides, J.: Design Patterns – Elements of Reusable Object-Oriented Software. Addison-Wesley, ISBN 0-201-63361-2, 1994
- [5] Huber, R.: Wissensbasierte Funktionsmodellierung als Grundlage zur Gestaltsfindung in Konstruktionssystemen. Dissertation, Universität Karlsruhe, Shaker Verlag, 1993
- [6] iViP: Abschlussbericht zum Projekt iViP – integrierte Virtuelle Produktentstehung. PFT Schriftenreihe, Forschungszentrum Karlsruhe, Carl Hanser Verlag, München, 2002
- [7] Kallmeyer, F.: Eine Methode zur Modellierung prinzipieller Lösungen mechatronischer Systeme. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagschriftenreihe Band 42, 1998

- [8] Köckerling, M.: Methodische Entwicklung und Optimierung der Wirkstruktur mechatronischer Systeme, Dissertation, Paderborn, 2003
- [9] Kuttig, D.: Rechnerunterstützte Funktions- und Wirkstrukturverarbeitung beim Konzipieren. Dissertation, TU Berlin, 1993
- [10] Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Springer Verlag, 2003
- [11] Puri, W.: Semantische Funktionsmodellierung als Basis für effizientes Product Life Cycle Management. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2003
- [12] SysML – System Modelling Language. <http://www.sysml.org>, Spezifikation Version 0.8, 2003
- [13] VDI-Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“. Beuth-Verlag, Düsseldorf, 2003
- [14] Gausemeier, J.; Frank, U.; Redenius, A.; Steffen, D.: Development of Self-Optimizing Systems. MechRob 2004 (IEEE), Mechatronics & Robotics 2004, September, 2004

Dipl.-Wirt-Inform. Matthias Gehrke  
Fachgebiet Softwaretechnik  
Universität Paderborn  
Warburger Str. 100, D-33098 Paderborn  
Tel: +49-5251-60-3311  
Fax: +49-5251-60-3530  
Email: [mgehrke@uni-paderborn.de](mailto:mgehrke@uni-paderborn.de)  
URL: <http://www.uni-paderborn.de>

Dipl.-Wirt.-Ing. Daniel Steffen  
Heinz-Nixdorf Institut  
Universität Paderborn  
Fürstenallee 11, D-33102 Paderborn  
Tel: +49-5251-60-6261  
Fax: +49-5251-60-6268  
Email: [daniel.steffen@hni.upb.de](mailto:daniel.steffen@hni.upb.de)  
URL: <http://www.uni-paderborn.de>

