

DOMÄNENÜBERGREIFENDE ENTWURFSWERKZEUGE ZUR MODELLIERUNG UND BERECHNUNG HETEROGENER SYSTEME

EINFÜHRUNG, KONZEPTE, DISKUSSION

Michael Reeßing, Torsten Brix

Zusammenfassung

Seit einigen Jahren sind verstärkt Bestrebungen zu beobachten, die die Effektivierung des Entwurfes komplexer, heterogen zusammengesetzter Produkte durch ein rechnerunterstütztes, phasen- und domänenübergreifendes Entwurfssystem zum Ziel haben. Gegenstand der Forschung ist vor allem die Integration von domänenübergreifenden Modellier- und Berechnungsoperationen zur ganzheitlichen Betrachtung von Konstruktionsobjekten insbesondere in den frühen Phasen der Produktentwicklung unter Ausnutzung moderner CAx-Technologien.

Der Beitrag beginnt mit einem Überblick über die wichtigsten Ansätze bei der Entwicklung und Nutzung softwaretechnischer Werkzeuge, die eine ganzheitliche Sicht unterstützen. Danach werden Ergebnisse laufender Forschungsarbeiten an der TU Ilmenau zur Entwicklung eines domänenübergreifenden Entwurfssystems für Bewegungssysteme vorgestellt, das speziell an die Bedürfnisse bei der Modellierung und Berechnung in frühen Phasen des konstruktiven Entwicklungsprozesses angepasst ist. Als Grundlage für die Modellbildung wird ein constraint-basierter Ansatz verwendet, der in der Lage ist, die Eigenschaften heterogener Modelle zu erfassen und als Ganzes zu behandeln. Für die notwendigen Berechnungen zur Analyse, Simulation, Optimierung kommen fast ausschließlich bekannte Solver zum Einsatz. Neben der Vorstellung denkbarer Softwarekonzepte mit einigen ihrer Vor- und Nachteile wird ein prototypisch implementiertes Entwurfssystem mit seinen Eigenschaften erörtert. Abschließend soll durch allgemeinere Aussagen, Thesen und Fragenstellungen zu Vorgehensweisen, Methodiken und Werkzeugen für einen domänen- und phasenübergreifenden Entwurf eine Diskussion zu dieser Thematik angeregt werden.

1 Einführung

Für die rechnerunterstützte Modellierung und Berechnung heterogener Systeme werden derzeit unterschiedliche Ansätze genutzt, die zum Teil auch schon eine ganzheitliche Betrachtung meist mechatronischer Komponenten und Produkte erlauben. Die verschiedenen Vorgehensweisen unterscheiden sich nicht nur darin, welche Software-Werkzeuge zum Einsatz kommen, sondern auch, ob und wie eine Verknüpfung zwischen den Werkzeugen realisiert ist. Zu den grundlegenden Herangehensweisen gehören:

- die Anwendung allgemeiner und spezieller Simulationssysteme,
- die parallele Nutzung unterschiedlicher Software-Programme,
- der Einsatz von Leit- bzw. Assistenzsystemen sowie
- der Verwendung von integrierten Lösungen.

So können für den Entwurf und insbesondere für die Simulation vor allem in frühen Phasen **allgemeine Simulationssysteme** (z.B. MATLAB, COMSOL, Modelica) zum Einsatz kommen, die sich sehr flexibel an jeweilige Problemstellungen anpassen lassen (Bild 1).

Spezielle Simulationssysteme (z.B. SPICE, ALASKA, DIFFRACT, Working Model) eignen sich als domänenspezifische Werkzeuge nur bedingt für die ganzheitliche Modellierung und Simulation heterogener Systeme, da eine Überführung heterogener Systeme in eine einheitliche, äquivalente Modellbeschreibung meist nur beschränkt möglich ist. Für fachübergreifende Modellbildung und Simulation in der Mechatronik existieren angepasste Werkzeuge wie z.B. CAMEL-View [12], das die wichtige Verbindung zwischen konstruktivem Gestaltentwurf und der Echtzeitsimulation herstellt. Mit der alleinigen Nutzung von Simulationssystemen ist schon eine domänenübergreifende Beschreibung und Simulation heterogener Systeme durchaus möglich. Allerdings ist diese mit signifikanten Problemen und Nachteilen verbunden, die sich u.a. auf die häufig fehlende anschauliche, domänenspezifische Modellrepräsentation und die fehlende Unterstützung beim Übergang von der funktionalen zur geometrisch-stofflichen Beschreibung beziehen.

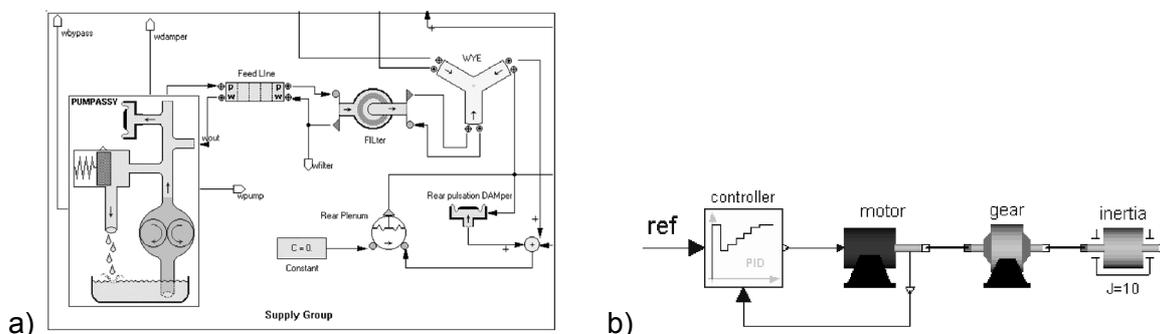


Bild 1: Allgemeine Simulationssysteme

- a) Beispielmodell einer Kraftstoffeinspritzung beschrieben mit ACSL [1]
 b) Modelica-Modell eines einfachen Antriebssystems [2]

Parallele Anwendungen unterschiedlicher Software-Programme berücksichtigen die notwendige Interdisziplinarität heterogener Systeme beim Entwurf, indem der Anwender eine Vielzahl unterschiedlicher, domänenspezifischer Software nutzt, die die Aufgabenbereiche Modellierung, Analyse/Simulation und Bewertung/Optimierung unterstützen. Dies setzt ein hohes Maß an Entwicklungserfahrung und die Beherrschung vieler Software-Produkte voraus. Allerdings sind Redundanzen und Informationsverluste während des Entwicklungsprozesses kaum vermeidbar. Dies führt letztendlich zu einem erheblichen Mehraufwand beim Entwurf. Daher ist es ein Ziel, die vielen unterschiedlichen Programme, die nur einem bestimmten, eng gefassten Zweck im Bereich der Berechnung, Optimierung, Simulation, Darstellung usw. genügen, zusammenzuführen.

Für diese Aufgabe eignen sich **Leit- bzw. Assistenzsysteme** [3]. Sie bieten eine methodische Führung mit sinnvollen Vorgaben zur Verknüpfung von Daten eines Konstruktionsobjektes und nutzen eine einheitliche Datenbasis. Den Kern solcher Systeme bilden meist CAD-Systeme, die für bestimmte Produkte und Produktgruppen mit anderen Softwaresystemen gekoppelt sind.

Viele leistungsfähige Hilfsmittel haben sich mittlerweile um die CAD-Welt herum etabliert, die allerdings häufig erst in den späteren Phasen des Entwicklungsprozesses zum Einsatz kommen. Zu den wichtigsten Entwicklungen der letzten Jahre gehört das Digital Mock-up, das gegenwärtig zum Functional Mock-up weiterentwickelt wird. Bei solchen **integrierten Lösungen**, die meist durch die Integration von Berechnungsmodulen in CAD-Systeme umgesetzt sind, können mittlerweile die Mehrkörpersimulation, die Finite-Elemente-Methode, die Auslegung mechanischer, antriebs- und regelungstechnischer Komponenten sowie Usa-

bility- und Montageuntersuchungen genutzt werden. Bei den Echtzeitanwendungen sind Virtual und Augmented Reality Schlüsseltechnologien des Virtual Engineering. Dabei wird die visuelle Immersion immer mehr durch eine realitätsnahe, akustische Immersion mittels Wellenfeldsynthese in Kombination mit haptischen, visuellen und akustischen Interaktionsmöglichkeiten ergänzt. Dass auch das Sichern, Bereitstellen und Nutzen von Produkt- und Prozesswissen eine immer stärkere Rolle spielt, wird durch häufig zu findende Schlagwörter wie wissensbasierte Modellierung, Knowledge-based Engineering, Produktdatenmanagement, Product Lifecycle Management und Product Lifecycle Engineering unterstrichen [4].

Die aufgeführten Ansätze und Lösungen können als Zwischenschritte aufgefasst werden, um dem Fernziel einer durchgängigen Rechnerunterstützung bei gleichzeitiger Minimierung notwendiger Iterationszyklen im Produktentwicklungsprozess näher zu kommen.

Innovative Trends, wie die Entwicklungen auf dem Gebiet der selbstoptimierender Systeme oder der Einsatz neuartiger, „intelligenter“ Werkstoffe, die eine ganzheitliche und damit domänenübergreifende Betrachtung der Produkteigenschaften zwingend erfordern, setzen neue Maßstäbe auch an die Leistungsfähigkeit zukünftiger Werkzeuge zur rechnerunterstützten Produktentwicklung. Einen wichtigen Beitrag dazu lieferte der Sonderforschungsbereich 241 „Neue integrierte mechanisch-elektronische Systeme für den Maschinenbau (IMES)“ [13], der die Integration elektronischer und mechanischer Komponenten unter Einsatz komplexer Informationsverarbeitung u.a. an Beispielen aus dem Kraftfahrzeugbereich zum Ziel hatte.

Trotz enormer Fortschritte [u. a. 5, 6, 7, 8, 9] sind noch viele Hindernisse auf dem Weg zu einem ganzheitlichen, phasenübergreifenden Entwurf heterogener Produkte zu überwinden. Als immer noch unzureichend wird die Unterstützung der frühen Phasen der Produktentwicklung angesehen. Hier gibt es noch einen erheblichen Nachholbedarf, da zum einen die Kostenauswirkungen konstruktiver Entscheidungen in der Prinzipphase bzw. Konzeptionsphase mit Abstand am höchsten und zum anderen die Einflussmöglichkeiten zur Anpassung von Lösungen groß sind.

2 Ganzheitlicher Entwurf heterogener Bewegungssysteme auf Ebene des technischen Prinzip

Unter dem Gesichtspunkt der ganzheitlichen Behandlung heterogener Systeme sind unterschiedliche Konzepte denkbar. Drei mögliche Varianten, die Gegenstand laufender oder abgeschlossener Forschungstätigkeiten am Fachgebiet Konstruktionstechnik der TU Ilmenau sind, sollen im Folgenden beispielhaft betrachtet und bezüglich ihrer Vor- und Nachteile eingeordnet werden. Dabei erfolgt eine Fokussierung auf das technische Prinzip, das als idealisierte Repräsentation (Nutzung von Sinnbildern und Symbolen) der Systemstruktur die funktionsrelevanten Elemente und Kopplungen beschreibt.

2.1 Integrierte Lösung mit homogener Modellbeschreibung und homogener Simulationsumgebung

Eine Voraussetzung für die ganzheitliche Betrachtung eines technischen Systems ist ein Gesamtmodell, das alle relevanten Aspekte der beteiligten Domänen abbildet. Auf der Ebene des technischen Prinzips bietet sich eine strukturorientierte Modellbildung an. Bei einem ersten Ansatz leitet sich die Modellbeschreibung aus den Vorgaben eines bestimmten Berechnungsverfahrens oder Simulators her. Ein Beispiel hierfür ist das Entwurfssystem MASP (**M**odeling and **A**nalysis of **S**olution **P**rinciples, [11]), das ursprünglich für den Entwurf von Bewegungssystemen ausgelegt war und auf einem geometrischen Constraint-Solver aufbaut. Bauelemente anderer Domänen können in diese Software genau dann integriert werden, wenn ein geometrisches Ersatzmodell formulierbar ist. So werden beispielsweise opti-

sche Systemkomponenten unter Verwendung von Gesetzen der geometrischen Optik abgebildet.

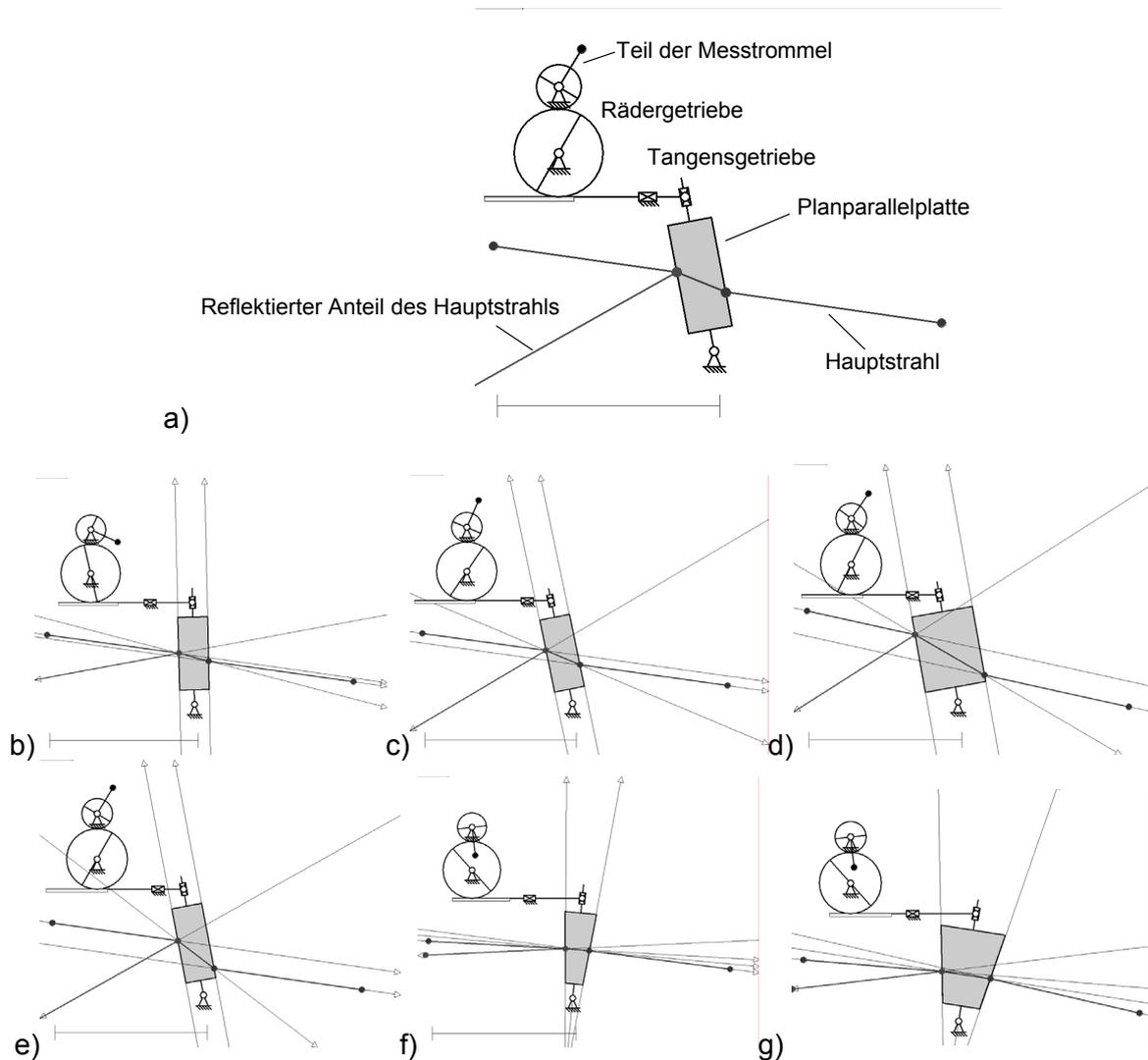


Bild 2: Modifikationsmöglichkeiten an einem mit MASP modellierten Planplattenmikrometer

Die Anzeige geometrischer Subelemente dient der Veranschaulichung geometrischer Eigenschaften.

- a) modelliertes technisches Prinzip eines Planplattenmikrometers
- b) und c) Berechnung verschiedener Stellungen des Planplattenmikrometers durch interaktive Bewegungssimulation mittels Verdrehen des Teiles der Messtrommel;
- d) Änderung des Versatzes führt bei unveränderbarem Verstellgetriebe und konstanter Brechzahl zur Änderung der Dicke der Planparallelplatte;
- e) Änderung des Versatzes führt bei unveränderbarem Verstellgetriebe zur Änderung der Brechzahl der Planparallelplatte, wenn deren Dicke konstant bleiben soll;
- f) Aus der Planparallelplatte wird ein optischer Keil, wenn die optisch wirksamen Flächen der Planparallelplatte nicht parallel sein müssen;
- g) Änderung des Versatzes führt bei unveränderbarem Verstellgetriebe zur Änderung der Dicke des optischen Keils, wenn die Brechzahl konstant bleiben soll.

Die Bildung solcher constraint-basierter Modelle aus geometrischen Grundelementen entspricht nicht der Arbeitsweise des Konstrukteurs und sollte daher nicht zu dessen Aufgabenbereich gehören. Daher erfolgt eine Trennung von Nutzersicht und Berechnungssicht, zwischen denen eine automatische Transformation erfolgt (Bild 3). Die nutzerorientierte Modellrepräsentation stellt eine Reihe von symbolhaft dargestellten Prziplenelementen aus den einzelnen Domänen zur Verfügung, deren Constraint-Beschreibungen für den Nutzer transparent bleiben.

Im Ergebnis entsteht ein interaktives Baukastensystem mit integrierten Simulationsmöglichkeiten, das dank anschaulicher Darstellung einen schnellen und unkomplizierten Entwurf von Prinziplösungen ermöglicht. Die Grenzen eines solchen integrierten Entwurfswerkzeugs werden vom eingesetzten Solver und der Formulierbarkeit entsprechender Ersatzmodelle gesetzt. Eine Ausweitung auf beliebige Domänen ist daher schwierig.

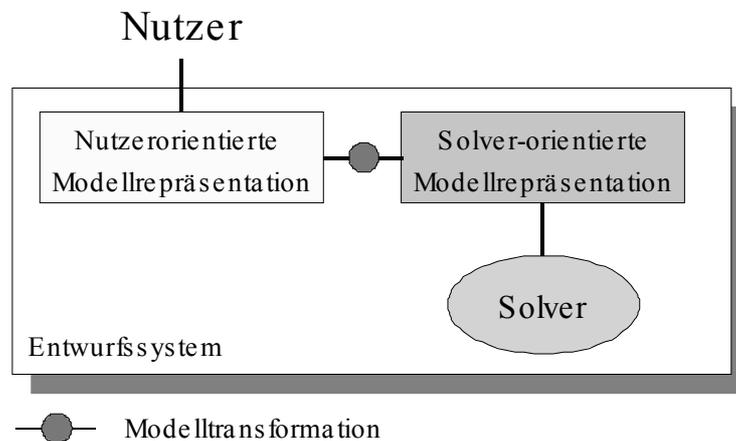


Bild 3: Aufbau eines Entwurfssystems als integrierte, solver-spezifische Lösung

2.2 Plattform mit neutraler Modellbeschreibung und Vereinheitlichung von Berechnungsmodulen

Eine andere, bereits als Prototyp implementierte Architektur eines Entwurfssystems stellt eine Erweiterung von Konzept 1 dar. Bewährte Ideen wie das Baukastensystem aus vordefinierten Lösungselementen und das Abstraktionsniveau der Modellierung (technisches Prinzip) werden übernommen.

Zur Verbesserung der Flexibilität bei der Beschreibung der verschiedenen Domänen erfolgt eine weitere Auftrennung der Modellinformationen in Nutzersicht, Berechnungssicht und neutrale Modellbeschreibung (Bild 4). Die so entstehende Modellrepräsentation beschreibt ein technisches System unabhängig von den Erfordernissen (Datenstrukturen) eines konkreten Berechnungsverfahrens oder Constraint-Solvers. Da die Auswertung des Gesamtmodells mittels eines einzelnen Solvers als schwierig einzustufen ist, werden aufgabenspezifische Berechnungsmodule zur Behandlung von Teilmodellen herangezogen. Zu diesem Zweck existiert eine Konvertierungsschicht, die in den neutralen Modellelementen abgelegte Semantiken, Parameter und Beziehungen interpretiert und eine Transformation zwischen der neutralen Modellbeschreibung und einer solver-spezifischen Repräsentation vornimmt.

Die neutrale Modellbeschreibung stellt gleichzeitig ein Medium zur Synchronisierung des Datenbestandes der Berechnungsmodule dar, so dass nur eine begrenzte Anzahl von Konvertern implementiert werden muss. Ebenfalls von Vorteil ist, dass sowohl der Modellbeschreibungskern als auch die Visualisierungs- und Konvertierungsschichten mittels Plug-Ins erweiterbar sind und somit jederzeit weitere Lösungselemente und Berechnungsverfahren, auch aus zusätzlichen Domänen, in die Software-Plattform eingearbeitet werden können.

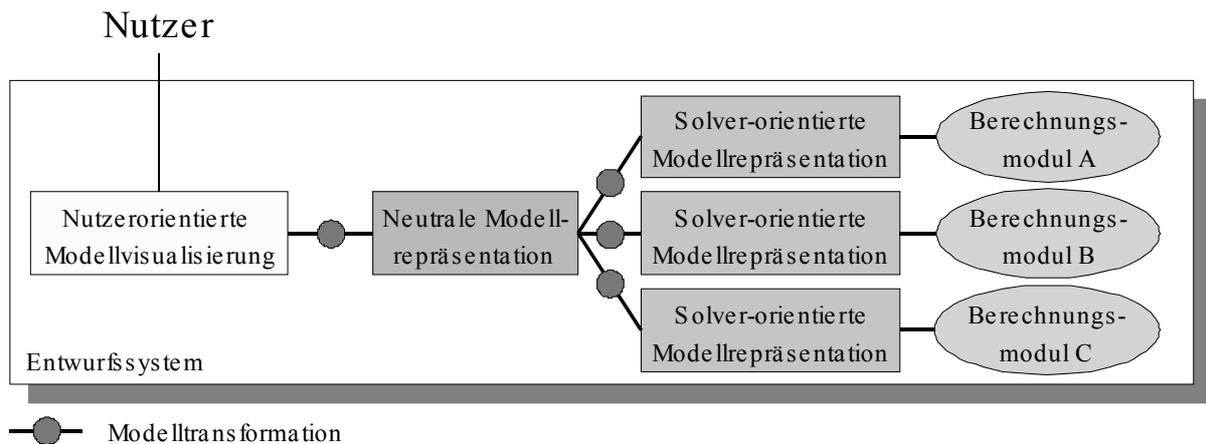


Bild 4: Entwurfssystem als Plattform für Berechnungsmodule

Während die Erweiterung der neutralen Modellbeschreibung kaum Probleme bereitet, ist die Einbindung von Solvern und Berechnungsverfahren an die Bedingung gebunden, dass diese als Programmbibliothek vorliegen, über eine entsprechende Kommunikationsschnittstelle verfügen oder selbst implementiert werden können. Auch die Koordination der Berechnungsmodule bei gleichzeitigem Einsatz bedeutet zusätzlichen Aufwand.

2.3 Zentrale Austausch- und Koordinationsinstanz

Ein weiterer Vorschlag baut Konzept 2 zu einer zentralen Koordinationsinstanz zwischen existierenden Entwurfs- und Simulationswerkzeugen aus. Das Entwurfssystem dient dabei zur Kommunikation mit dem Nutzer und verbirgt die verwendeten Softwarewerkzeuge hinter einer Art Fassade (Bild 5). Ideen gibt es hierzu schon seit langem [z. B. 14, 15], die unter dem Gesichtspunkt der derzeitigen hard- und softwaretechnischen Möglichkeiten und neuer Nutzerbedürfnisse analysiert und angepasst werden müssen.

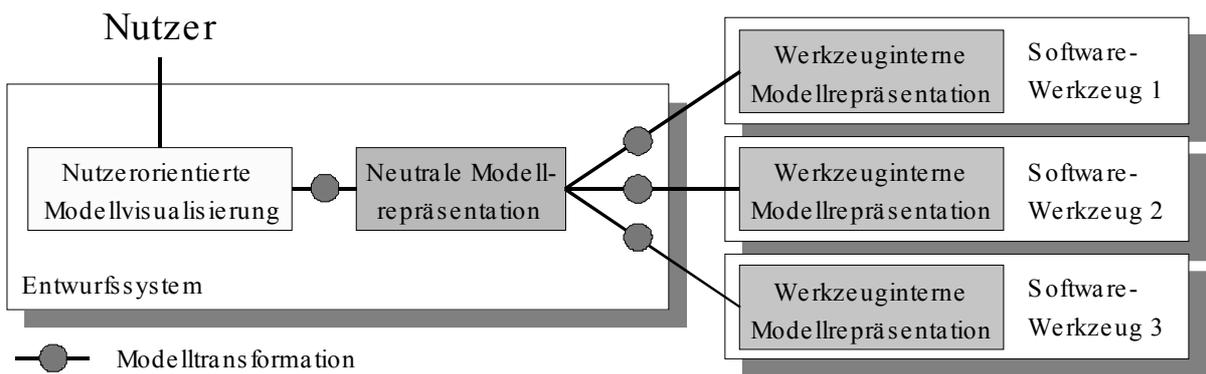


Bild 5: Entwurfssystem als Koordinator existierender Softwarewerkzeuge

Die Synchronisierung der beteiligten Werkzeuge erfolgt unter Verwendung eines Austauschformats, das auf der neutralen Modellrepräsentation aufbaut. Zur Vermeidung von Informationsverlusten ist unbedingt sicherzustellen, dass unbekannte oder für ein Werkzeug irrelevante Teile des Modells bei der Konvertierung nicht entfernt, sondern unverändert weitergereicht werden. Ein geeignetes Hilfsmittel könnte das Document Object Model der XML (eXtensible Markup Language) sein, das eine allgemeingültige Behandlung auch unbekannter Informationen erlaubt.

Als Alternative zu einem neutralen Austauschformat, dessen Modellinformationen von Solvern bzw. deren Konvertierschicht interpretiert werden, sind auch Konzepte denkbar, bei denen die Modellbeschreibung gleichzeitig eine Reihe möglicher Operationen und Verhaltensbeschreibungen enthält. Diese könnten beispielsweise in Form von Algorithmen oder Gleichungen hinterlegt werden. Eine Fortsetzung dieses Gedankens gipfelt in der Überlegung, zusammen mit dem Modell die genutzten Softwarewerkzeuge zu übermitteln. Aus naheliegenden Gründen erscheint diese Idee dennoch eher visionär, so dass derzeit lediglich ein neutrales Austauschformat im Zusammenhang mit „intelligenten“ Konvertierschichten als realisierbar anzunehmen ist.

Der Vorteil eines solchen Ansatzes besteht zweifellos in der Kombination eines zentralen Modells mit den umfangreichen Fähigkeiten bestehender Werkzeuge, ohne sich jedoch in deren Spezifika (Nutzerschnittstellen, Modellbildung usw.) einarbeiten zu müssen. Allerdings erfordert ein solches Entwurfssystem einige schwer zu erfüllende Voraussetzungen seitens der Hersteller der einzubindenden Softwarepakete (Zugriff auf Interna mittels entsprechender Schnittstellen). Auch die Konvertierung relevanter Teilmodelle in und aus den Repräsentationen der Werkzeuge ist kaum vollständig verlustfrei möglich. Weiterhin ist der Aufwand der Implementierung des eigentlichen Entwurfssystems relativ hoch, da jede zur Nutzung vorgesehene Funktionalität der Softwarepakete explizit berücksichtigt werden muss.

2.4 Neutrale Modellbeschreibung

In diesem Abschnitt soll die erwähnte neutrale Modellrepräsentation genauer beleuchtet werden. Ausgangspunkt ist die Erkenntnis, dass die von den integrierten oder gekoppelten Simulationsverfahren verwendeten Datenstrukturen als übergeordnete Beschreibung des technischen Prinzips selten geeignet sind. Dies ist meist auf bestimmte mathematische oder algorithmische Anforderungen der Verfahren zurückzuführen und hat zur Konsequenz, dass nur bestimmte aufgabenspezifische Aspekte bei der Speicherung berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird ein strukturorientiertes Konzept vorgeschlagen, das sich in der prototypischen Implementierung eines Entwurfssystems für heterogene Systeme als tragfähig erwiesen hat.

Den Kern der Repräsentation bilden Modell- bzw. Lösungselemente des o.g. Baukastensystems (Abschnitt 2.1 und 2.2), die durch ihre Semantik, funktionsrelevante Grundbestandteile und Parameter sowie ihre Beziehungen zu anderen Modellelementen beschrieben sind (Bild 6). Das Gesamtmodell ist ein Graph von Lösungselementen. Typische Beispiele für Lösungselemente sind Getriebeglieder, Drehgelenke, optische Spiegel und Linsen, Sensoren, Regler oder Aktoren.

Um die Beschreibung zu vereinheitlichen, existiert für jede Domäne ein Satz aus Grundbestandteilen, der aber grundsätzlich zur Abbildung zusätzlicher Eigenschaften erweitert werden kann, z.B.:

- Kinematik (Skalar, Vektoren, Koordinatensystem, Körper),
- Optik (Grenzflächenbeschreibung, optische Achse, Lichtstrahl).

Lösungselemente parametrisieren solche Grundbestandteile und fassen sie zu logischen Einheiten zusammen, die Bauteilcharakter besitzen und damit eine für den Nutzer plausible Semantik aufweisen (z.B. „Plankonvexe Linse“, aufgebaut aus einer ebenen und einer sphärischen Grenzfläche).

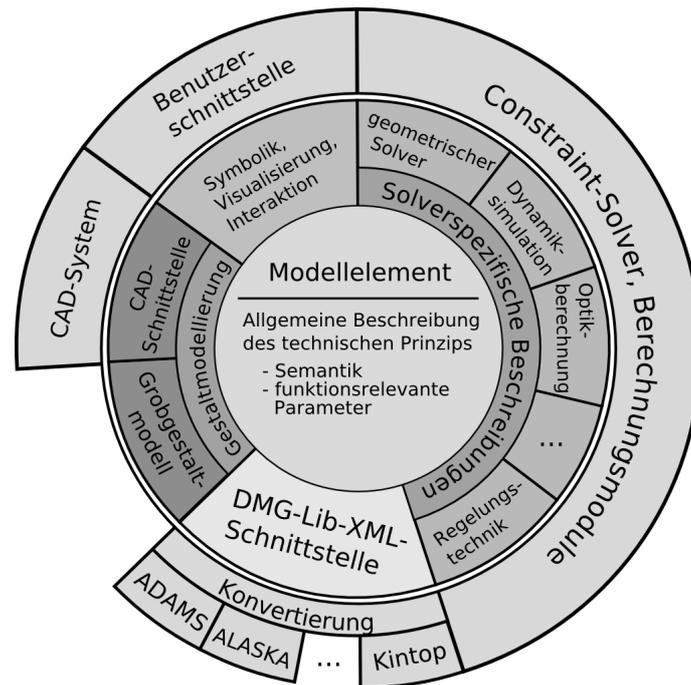


Bild 6: Aufbau eines Lösungselements

Einfache Lösungselemente können wiederum zu komplexen Lösungselementen zusammengesetzt werden, die entweder eine einfache Gruppierung darstellen oder zusätzliche Semantik und Parameter bieten (z.B. Kurvengetriebe mit Rollenhebel; Cooke-Triplet zusammengesetzt aus Linsen besitzt Gesamtbrennweite).

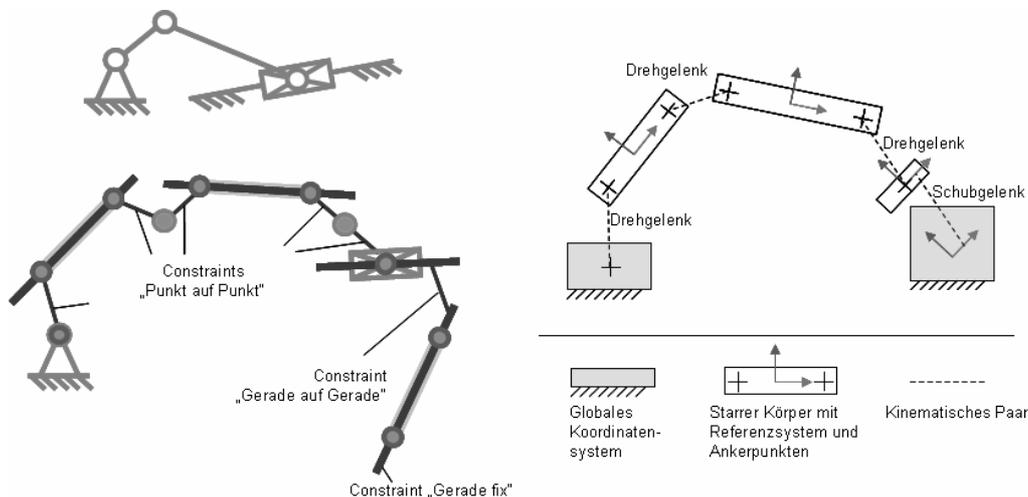


Bild 7: Transformation der abstrakten Modellbeschreibung (links oben) einer Schubkurbel in spezialisierte Darstellungen für geometrische Constraint-Solver (links) und Mehrkörpersimulation (rechts)

Für die Interpretation der so beschriebenen Lösungselemente durch Solver und Berechnungsverfahren werden Erweiterungselemente benötigt, die eine aufgabenbezogene Transformation der allgemeinen Beschreibung des technischen Prinzips in eine solverspezifische Repräsentation vornehmen (Beispiel Bild 7). Diese Erweiterungen stellen eine Art „Plug-Ins“ dar, die zum ursprünglichen Lösungselement weitere Aspekte oder Sichten hinzufügen und eventuell notwendige Parameter ergänzen (z.B. Masseverteilung für Simulation der Dynamik). Auf eine ähnliche Weise werden auch Interaktions- und Visualisierungselemente, pha-

senübergreifende Verknüpfungen (z.B. zu Gestaltbeschreibungen) oder Exporter für externe Formate umgesetzt.

Das Ergebnis ist eine erweiterbare, domänenübergreifende Beschreibung des technischen Prinzips heterogener Systeme, die auch als Basis für simulative Abschätzungen des Systemverhaltens dienen kann.

2.5 Integration von Berechnungsmodulen

Zur Simulation des Gesamtmodells müssen zusätzlich zur Erzeugung solver-spezifischer Beschreibungen der neutralen Modellelemente die beteiligten Berechnungsmodule koordiniert und gesteuert werden.

Für die Koordination ist eine Reihe von Konzepten notwendig, die allen Berechnungsmodulen bekannt sind. Dazu gehören

- ein Zeitkonzept – z.B. zur Definition von Simulationsschritten und Zeitspannen, zur zeitlichen Zuordnung von Ereignissen,
- ein Konsistenzbegriff – das Modell befindet sich in einem gültigen Zustand,
- die Unterscheidung von Topologieänderung, Parameteränderung und Zustandsänderung und
- die Beschreibung von Abhängigkeiten.

Nicht alle Berechnungsmodule erfüllen diese Anforderungen. Daher muss eine vereinheitlichende Schnittstelle geschaffen werden, die mittels solver-spezifischer Adapter allen Berechnungsmodulen vermittelt wird (Bild 8). Beispielsweise besitzt der eingesetzte geometrische Constraint-Solver kein Zeitkonzept, da er jeden Modellzustand innerhalb eines Berechnungsschrittes erreichen kann. Es ist somit Aufgabe des Adapters, geometrische Änderungen auf eine Zeitbasis abzubilden, um Geschwindigkeiten, Beschleunigungen u.ä. darstellen zu können.

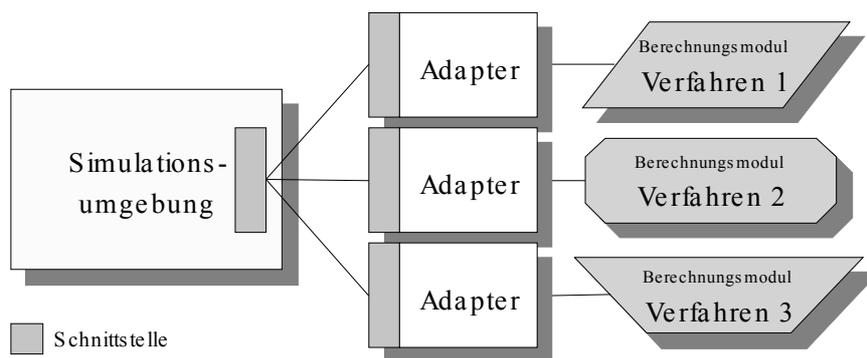


Bild 8: Vereinheitlichung von Berechnungsmodulen

3 Diskussion zum domänen- und phasenübergreifenden Entwurf

Der Entwurf komplexer heterogener Produkte stellt mit Sicherheit sehr hohe Anforderungen an die Entwickler der beteiligten Fachgebiete. Neben fachlicher und sozialer Kompetenz, die die Produktentwickler mitbringen müssen, ist auch der Einsatz zweckmäßiger Hilfsmittel (Vorgehensweisen, Methoden, Werkzeuge) für den Entwurf unabdingbar, um die gedankliche Problemlösung der Entwickler durch eine verbesserte Veranschaulichung, Überprüfung

und Dokumentation des mentalen Modells zu unterstützen, um die Kommunikation zwischen Entwicklern und anderen beteiligten Personen zu erleichtern, um die Entwickler von routinemäßigen Tätigkeiten zu befreien und um die domänenübergreifende Komplexität durch ein zielgerichtetes Vorgehen und eine angepasste Informationsverarbeitung zu beherrschen.

Seit vielen Jahrzehnten wird über ein zielgerichtetes Vorgehen sowie den Einsatz nutzbringender Methoden und Werkzeuge beim domänen- und phasenübergreifenden Entwurf diskutiert. Schon die in den 40er und 50er Jahren des letzten Jahrhunderts publizierten Ansätze zur systematischen Lösungsfindung im Konstruktionsprozess (u.a. Wögerbauer [16], Bischoff/Hansen, Kesselring [18], Matousek), die primär auf den Erfahrungen beim Entwickeln mechanischer, mechanisch-optischer und elektromechanischer Produkte basieren, behandeln das domänen- und phasenübergreifende Entwerfen und stellen deren Bedeutung heraus. Diese Arbeiten lieferten den Ausgangspunkt für neuere Ansätze, die ebenso umfassende, ablauforientierte Strukturierung des gesamten Konstruktionsprozesses beinhalten (u.a. Hansen [17], Hubka, Rodenacker, Ehrlenspiel, Koller [19], Pahl/Beitz, Roth). Diese neueren Ansätze, die insbesondere den Systemgedanken einer ganzheitlichen Betrachtung aufgreifen, berücksichtigten u.a. auch die erste Erfahrungen beim Entwickeln mechatronischer, adaptiver, mikrotechnischer Systeme und beim Einsatz rechnerunterstützter Werkzeuge, die durch die rasanten Entwicklungen auf den Gebieten Elektronik/Rechentchnik, Kybernetik und Softwaretechnik aber auch Werkstoff- und Fertigungstechnik getrieben waren. Aktuelle Veröffentlichungen im Besonderen zum domänenübergreifenden Entwurf mechatronischer Produkte tun sich oft schwer darauf aufzubauen [u. a. 8, 13, 20]. In der Regel schaffen es nur Pahl/Beitz oder die VDI 2221 in die Liste der referenzierten Literatur. Eine tiefergehende Auseinandersetzung mit der umfangreichen konstruktionsmethodischen Literatur wird dadurch vermieden, dass immer das Pauschalargument angeführt wird, dass ein mechatronisches Produkt ein anderes Entwicklungsvorgehen benötigt als es bei der Entwicklung herkömmlicher Maschinenbauerzeugnisse der Fall ist. Steckt hinter Produkten des herkömmlichen Maschinenbaus, wie z.B. einer Dampfturbine, bei deren Entwicklung schon immer Strömungsmechaniker, Werkstoffwissenschaftler und Fertigungstechniker kooperieren müssen, oder eines Mikroskops, das eine Zusammenarbeit von Physikern, Optikfertigern und Konstrukteuren erforderlich macht, das identische Entwicklungsvorgehen? Mit Sicherheit nicht, da für jede Problemklasse Vorgehensweisen, Methoden, Werkzeuge auszuwählen, zusammenzustellen und gegebenenfalls anzupassen sind. In der VDI-Richtlinie 2206 wird ferner für einen neuen Entwicklungsprozess mechatronischer Produkte geworben, da die Komplexität im Vergleich zu mechanischen Systemen durch eine „größere Anzahl von verkoppelten Elementen“ gekennzeichnet ist. Ist die Leibnizsche Rechenmaschine aus dem 17. Jahrhundert, die alle vier Grundrechenarten beherrschte, weniger komplex als ein geregelter Katalysator? Wenn ja, warum? Zudem wird als Besonderheit der Mechatronik aufgeführt, dass die Elemente durch „verschiedene Fachdisziplinen realisiert“ werden müssen. Dies ist aber auch in fast allen Bereichen des klassischen Maschinenbaus so, auch wenn die Betonung nicht immer auf der digitalen Informationsverarbeitung oder der Elektronik liegt.

Der Zwang, sich von der „klassischen“ Konstruktionsmethodik abzugrenzen, führte auch zu einer nichtssagenden Namenswahl für Vorgehensweisen im Konstruktionsprozess (V-Modell, Y-Modell, Spiralmodell, 3-Ebenen-Modell etc.). Allein darin liegt eine gewisse Symbolkraft für den derzeitigen Stand der konstruktionsmethodischen Forschung zur Unterstützung des Entwurfs heterogener Produkte. Ein Grund für diese Entwicklungen liefert auch die klassische Konstruktionsmethodik selbst, da sie zu wenig oder gar keine Hinweise, Hilfestellungen etc. für den mittlerweile unverzichtbaren massiven Rechnereinsatz gibt.

Bei vielen Publikationen, die vergleichende Betrachtungen unterschiedlicher Ansätze für einen domänenübergreifenden Entwurf enthalten, wird in der Regel nur auf einige spezifische Unterschiede des einen oder anderen Ansatzes fokussiert [z. B. 8, 13]. Als charakteristische Merkmale zur Unterscheidung der Vorgehensmodelle wird die verwendete Terminologie, die Abgrenzung bestimmter Arbeitsschritte und -phasen sowie die Verwendung rationeller Hilfs-

mittel zur Lösung von Teilproblemen analysiert. Dieses Vorgehen versperrt oft die Sicht auf das Wesen, auf den Kerngedanken einer Vorgehensweise oder einer Methodik, die immer auch durch spezielle Annahmen und Erfahrungen geprägt sind. Deshalb sollte vielmehr eine Orientierung auf die Herausarbeitung der Gemeinsamkeiten sowie der Vor- und Nachteile bei der Behandlung bestimmter Probleme erfolgen. Letztendlich geht es immer um die an eine Aufgabenstellung und weiteren Randbedingungen angepasste Ausgestaltung des Problemlösungszyklus. Vielleicht können die bisherigen Ansätze auch als Sichten von ein und demselben generellen Vorgehen im Konstruktionsprozess betrachtet werden. Dies zu untersuchen ist sicherlich eine überaus ambitionierte Aufgabe, die allerdings eine unabhängige Analyse und Bewertung der konstruktionsmethodischen Erkenntnisse und Lehrmeinungen voraussetzt.

Zudem wird die zwingende Notwendigkeit der Anpassung entwicklungsmethodischer Ansätze an das konkrete Entwurfsproblem und an die Fähigkeiten und Fertigkeiten des Entwicklers bzw. des Entwicklerteams noch zu wenig diskutiert und führt häufig zu verzerrten Einschätzungen von Entwicklungsansätzen. So hält sich z.B. immer noch hartnäckig die Meinung, dass die Vorgehensweise nach VDI-Richtlinie 2221 ein rein sequentielles Arbeiten von einem aufgeführten Zustand zum nächsten als eine stringente Folge von Arbeitsschritten erzwingt und zudem nur für die Entwicklung im klassischen Maschinenbau geeignet ist. Es stellt aber nur ein Grundgerüst dar, auf dessen Basis eine spezifische, problemangepasste zeitliche und logische Vorgehensweise entwickelt werden muss. Erst die ganzheitliche Analyse der Entwicklungsaufgabe konkretisiert die Vorgehensweise einschließlich der benötigten Methoden und Werkzeuge. Zudem muss während des Entwicklungsprozesses eine Anpassung des Vorgehens an sich ändernde Randbedingungen möglich sein. So kann es nicht die Entwicklungsmethodik für mechatronische Produkte geben, die allen Forderungen an die Produktentwicklung z. B. vom einfachen Digitalwecker bis zur Raumsonde genügt. Die vorhandenen Unzulänglichkeiten liegen oftmals weniger in der Konstruktionsmethodik, sondern sind häufig von arbeitsorganisatorischer und softwaretechnischer Natur. Dies befreit die klassische Konstruktionsmethodik nicht von dem Mangel, dass sie zu wenig Auskunft darüber gibt, wie man das Gesamtvorgehen, die Methoden und Werkzeuge auf bestimmte Anwendungsfälle möglichst optimal zuschneidert. Wären hier aussagekräftige Hinweise vorhanden, dann könnte das Thema „Mechanik versus Mechatronik“ letztlich auch nur als ein solches Anwendungs- bzw. Anpassungsszenario aufgefasst werden.

Gerade beim Einsatz von Software-Werkzeugen zur Unterstützung eines domänenübergreifenden ganzheitlichen Entwurf heterogener Produkte bleiben neben der unzureichenden Integrierbarkeit und den nur in Ansätzen vorhandenen durchgängigen Entwicklungsumgebungen noch viele Fragen offen oder sind noch nicht befriedigend beantwortet. Zu ihnen gehören u. a.:

Produktinformationen

- Welche Informationen über das Produkt braucht der Entwickler wirklich und wann? Wie wird eine Desorientierung des Entwicklers vermieden, die z.B. durch ein Informationsüberangebot oder durch irreführende Informationen entstehen können? Wie lassen sich Informationsverluste bei Konvertierungen vermeiden?

Modellrepräsentation, Visualisierung und Interaktion

- Welche Modellrepräsentationen für einen phasenübergreifenden ganzheitlichen Entwurf sind aus Sicht des Entwicklers zweckmäßig? Was sind die Repräsentationen beim Entwurf heterogener Systeme? Welche davon sind eher solver-spezifische Repräsentationen (z.B. FEM-Modell)? Lassen sich Modellrepräsentation und PDM voneinander klar abgrenzen?

- Welche Modellsichten werden wirklich benötigt? Wie soll die Modellvisualisierung erfolgen?
- Wie soll eine geeignete Parametrisierung des Produktmodells vorgenommen werden? Wie soll der Nutzer darauf Zugriff haben?
- Welche Heuristiken und Regeln können genutzt werden, um Interaktionen des Entwicklers mit der Modellrepräsentationen zu unterstützen (Trennung von Modellrepräsentation, Berechnung und Visualisierung führt unweigerlich zu Mehrdeutigkeiten)? Wie können Eingaben und Manipulationen schneller/einfacher/eindeutig erfolgen?
- Über welche Fähigkeiten und Fertigkeiten muss der Entwickler heterogener Produkte wirklich verfügen? Welche Kenntnisse benötigt der Entwickler über die Arbeitsweise der einem domänenübergreifenden Entwurfssystem zugrunde liegenden Solver (FEM, MKS, Constraint-Solver etc.) wirklich?

Berechnungsmodule (Solver) und Schnittstellen

- Welche Solver sind in welcher Phase der Produktentwicklung notwendig, um Produkteigenschaften zu bestimmen? Wie erfolgt der Zugriff auf die Solver?
- Welche Schnittstellen sind notwendig? Lassen sich neue Ideen für Standards durchsetzen?

Diese und weitere Fragen setzen zu ihrer Beantwortung voraus, dass es gelingt über den immer noch vorhandenen domänenspezifischen Tellerrand hinaus zu schauen und dass ein Loslösen von den Einschränkungen und Unzulänglichkeiten bisheriger Softwaretechniken und den unterschiedlichen mal mehr oder weniger methodischen Vorgehensweisen gelingt. Nur dann lassen sich die allgemeinen und auch problemspezifischen Anforderungen an ein ideales Entwurfssystem zur Unterstützung der Produktentwicklung in seiner ganzen Breite genauer spezifizieren. Hierdurch könnte zumindest die Zielrichtung für weitere Entwicklungen auf diesem Gebiet angegeben werden, unabhängig davon, ob das Ziel in absehbarer Zeit erreicht wird oder nicht.

4 Zusammenfassung

Der Beitrag beschreibt Konzepte sowie eine prototypische Umsetzung eines Systems, das primär zur Effektivierung des domänenübergreifenden Prinzipientwurfs und damit auch der Gestaltfindung beim Konstruieren heterogener Produkte beiträgt. Dabei steht die Integration von Modellier- und Berechnungsoperationen zur ganzheitlichen Systembeschreibung von Konstruktionsobjekten im Vordergrund, die die Nachteile vorhandener Ansätze (z.B. Informationsverluste) vermeidet. Grundlage der Modellbeschreibung bildet ein constraint-basierter Ansatz, der die Eigenschaften heterogener Modelle als Ganzes erfasst. Ausgangspunkt für die Entwicklung solcher und anderer Entwurfswerkzeuge bilden vielfach Überlegungen zum methodischen Vorgehen. Auf diesem Gebiet existiert eine Reihe von Unklarheiten und offenen Fragen, von denen einige angedeutet werden, um zu zeigen, dass auch hier tiefgehende Untersuchungen sinnvoll sind, um sich langfristig dem Ziel des Einsatzes eines problemangepassten, anwenderfreundlichen, rechnerunterstützten, phasen- und domänenübergreifenden Entwurfswerkzeuges zu nähern.

5 Literatur

- [1] ACSL Graphic Modeller User's Guide. Huntsville: AEGIS Simulation, Inc., 2007.
- [2] Modelica and the Modelica Association. <http://www.modelica.org/index.shtml>, 2007.
- [3] G. Pahl and W. Beitz: Konstruktionslehre, Berlin: Springer Verlag, 2003.
- [4] Franke, H.-J.; Gausemeier, J.; Krause, F.-L.: Innovationspotenziale in der Produktentwicklung. Hanser-Verlag, 2006.
- [5] Koch, T.: Integration von Konstruktion und mechatronischer Komposition während des Entwurfs mechatronischer Systeme am Beispiel eines integrierten Radmoduls. Promotion, Universität Paderborn, 2006.
- [6] Hestermeyer, T.: Strukturierte Entwicklung der Informationsverarbeitung für die aktive Federung eines Schienenfahrzeugs. Promotion, Universität Paderborn, 2006.
- [7] Schlaumann, P.: Entwicklung eines neuartigen dreidimensionalen aktiven Federungssystems für ein Schienenfahrzeug. Promotion, Univ. Paderborn, 2006.
- [8] Möhringer, S.: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Habilitation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 156, 2005.
- [9] Shen, Q.: A Method for Composing Virtual Prototypes of Mechatronic Systems in Virtual Environments. Dissertation, Univ. Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, Rechnerintegrierte Produktion, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 193, Dez. 2006.
- [10] Brix, T.; Döring, U.; Reeßing, M.: „Multi-Stage Modeling in the Early Design Phases“. 14th International Conference on Engineering Design – ICED03, Stockholm.
- [11] Brix, T.: Feature- und constraint-basierter Entwurf technischer Prinzipien. Dissertation. TU Ilmenau. Ilmenau: Verlag ISLE, 2001.
- [12] Fa. Ixtronics: CAMEL-View. <http://ixtronics.de/cms/website.php?id=/de/index/produkte/camelview.htm>, 2008
- [13] Isermann, R.; Breuer, B.; Hartnagel, H.-L.: Mechatronische Systeme für den Maschinenbau. Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 2002.
- [14] Seifert, H.; Kruse, D.; Wehmöller, M.: Netzwerkbasierendes Kommunikationskonzept zur integrierten Produktentwicklung. VDI-Z 134, Nr. 10 - Oktober, S. 89-96, 1992.
- [15] Swienczek B., Arnold F., Kilb T. and Janocha A. T., "Maßgeschneiderte CAX-Systeme auf Basis von Komponenten", Tagungsband zum 2. Workshop Konstruktionstechnik: Innovation - Konstruktion - Berechnung, in Kühlungsborn, am 24.-25.09.1998, Aachen, 1998.
- [16] Wögerbauer, H.: Die Technik des Konstruierens. 2.Aufl. München: R. Oldenbourg Verlag, 1943.
- [17] Hansen, F.: Konstruktionswissenschaft – Grundlagen und Methoden, 2. Aufl. Berlin: VEB Verlag Technik, 1974.
- [18] Kesselring, F.: Technische Kompositionslehre. Berlin, Göttingen, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1954.
- [19] Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Berlin: Springer-Verlag, 1998.
- [20] Gausemeier, Jürgen; Frank, Ursula: Domänenübergreifende Spezifikation der Prinzipienlösung selbstoptimierender Systeme unter Berücksichtigung der auf das System wirkenden Einflüsse. In: Mechatronik 2005 - Innovative Produktentwicklung, VDI-Bericht, Band 1892.1, Düsseldorf 2005.

Dipl.-Ing. Torsten Brix
Fachgebiet Konstruktionstechnik
Technische Universität Ilmenau
Max-Planck-Ring 12, D-98693 Ilmenau
Tel: +49-3677-69-1263
Fax: 49-3677-69-1259
Email: torsten.brix@tu-ilmenau.de
URL: <http://www.tu-ilmenau.de/konstruktionstechnik/>

Dipl.-Inf. Michael Reeßing
Fachgebiet Konstruktionstechnik
Technische Universität Ilmenau
Max-Planck-Ring 12, D-98693 Ilmenau
Tel: +49-3677-69-1205
Fax: 49-3677-69-1259
Email: michael.reessing@tu-ilmenau.de
URL: <http://www.tu-ilmenau.de/konstruktionstechnik/>