

Konzept für eine simulationsgetriebene-wissensbasierte Produktentwicklung im Umfeld mechatronischer Produkte

Thilo Breitsprecher, Sebastian Röhner und Sandro Wartzack
*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik;
Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg*

1 Einleitung

Bewegte mechatronische Systeme gelten in vielen Industriebereichen als etablierte technische Lösungen. Beispiele hierfür sind u. a. die Automatisierungstechnik, die Medizintechnik aber auch der Automotive Sektor, bei dem elektrische Verstellrichtungen für Autositze, automatische Klappenantriebe oder mechatronische Bremssysteme zu den bekannten Anwendungen zählen. Für solche Systeme gelten wie auch für das übergeordnete Gesamtsystem Herausforderungen, die auf unterschiedliche Aspekte zurückzuführen sind. Im Laufe der Jahre wurden unterschiedliche Ansätze entwickelt um diesen Herausforderungen zu begegnen. Das Ziel des vorliegenden Beitrags ist es ein Konzept zu beschreiben, das die bisherigen Problematiken dieser Ansätze berücksichtigt und neue Lösungsvorschläge umsetzt.

2 Der Entwicklungsprozess mechatronischer Systeme

Im Bereich der Mechatronik existiert bis dato noch keine einsatzfähige und durchgehende Entwicklungsmethodik, die sich als domänenübergreifend versteht. Die wissenschaftlichen Arbeiten auf diesem Gebiet und die Erfahrungen der industriellen Praxis haben mit der VDI-Richtlinie 2206 und der

darin vorgeschlagenen Vorgehensweise entsprechend dem V-Modell eine sehr allgemeine Vorgehensweise hervorgebracht, die als Rahmenkonzept für die Entwicklung mechatronischer Produkte und Systeme angesehen wird [1], [2]. Dieses Modell wird im Folgenden kurz erläutert, um das Vorgehen innerhalb des zu erarbeitenden Konzeptes konstruktionsmethodisch einzuordnen.

Am Beginn des, aus der Softwaresystementwicklung abgeleiteten, V-Modells (siehe Bild 1) steht die Anforderungsdefinition an das zu entwickelnde Produkt. Sie sind gleichzeitig der Bewertungsmaßstab für die Beurteilung des späteren Produktes.

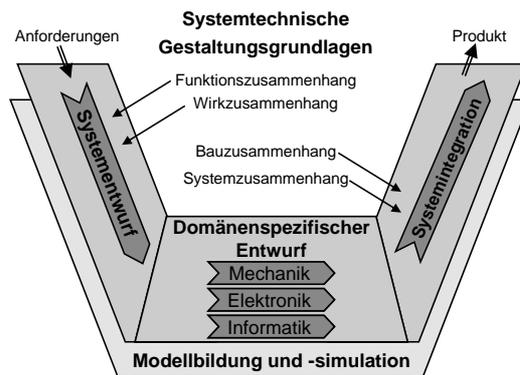


Bild 1: V-Modell zur Entwicklung mechatronischer Systeme nach [3]

Im sich anschließenden Systementwurf erfolgt die Festlegung des domänenübergreifenden Lösungskonzeptes. Es beinhaltet die physikalischen (Mechanik und Elektrotechnik) und logischen (Informatik) Wirkzusammenhänge. Da mechatronische Systeme zu einer hohen Komplexität neigen, erfolgt an dieser Stelle i. A. eine Zerlegung des gesamten Funktionszusammenhangs in wesentliche Teilfunktionen. Nach der Zuordnung von Lösungselementen wird die Funktionserfüllung im Systemzusammenhang geprüft und für den domänenspezifischen Entwurf freigegeben. Die weiterführende Konkretisierung erfolgt in dieser Phase meist getrennt in den einzelnen Fachgebieten. Die Systemintegration führt durch das Zusammensetzen der domänenspezifischen Lösungen schließlich zum fertigen Gesamtsystem. Begleitend zu den genannten Phasen dienen Simulationen von phasenspezifisch gebildeten Systemmodellen der Eigenschaftsabsicherung. Das Durchlaufen des V-Modells wird im Allgemeinen als Makrozyklus bezeichnet, dessen Ergebnis nicht sofort das serienreife Produkt ist. Die ersten Zyklendurchläufe

führen zunächst zu einfachen Prototypen, Labormustern oder Hardware-in-the-loop Funktionsmustern. [2], [3]

Neben dem vorgestellten V-Modell wurden in den letzten Jahren weitere, zum Teil darauf aufbauende Vorgehensmodelle für die Entwicklung mechatronischer Systeme entwickelt. Eine sehr umfangreiche Übersicht kann [4] entnommen werden.

3 Allgemeine Herausforderungen und Stand der Entwicklungen

Im Folgenden wird näher auf die angesprochenen Herausforderungen eingegangen, die sich im Hinblick auf bewegte mechatronische Systeme formulieren lassen. Anschließend werden Lösungsmöglichkeiten aus dem Stand der Technik und der Forschung aufgeführt, mit denen es möglich ist diesen Herausforderungen zu begegnen, sowie Problematiken umrissen, die beim Einsatz dieser Lösungen auftreten können.

3.1 Herausforderungen bei bewegten mechatronischen Systemen

Wie für jeden Produktentwicklungsprozess (PEP) gilt auch bei mechatronischen Systemen, dass eine Verifizierung der vom System zu erfüllenden Funktionen möglichst frühzeitig zu erfolgen hat. Unter anderem verringert dies die Kosten aufgrund von Fehlersuche und –behebung im Sinne der *rule-of-ten*. Die Besonderheit, dass es sich bei mechatronischen Produkten um domänenübergreifende Systeme handelt, ist dabei von grundlegender Bedeutung. [5]

Ein seit mehreren Jahren anhaltender Trend im eingangs angesprochenen Automobilbau bekräftigt die Notwendigkeit einer frühestmöglichen Funktionsabsicherung zusätzlich. Entsprechend dieser Tendenz versuchen die Entwickler energieeffiziente Lösungen durch verstärkte Leichtbaubemühungen zu realisieren. Notwendig machen dies u. a. die fortschreitende Ressourcenverknappung sowie strengere gesetzliche Umweltauflagen [6]. Nicht zuletzt bringt der angesprochene Trend bewegte mechatronische Systeme an ihre Leistungsgrenzen.

Der Vorteil mechatronischer Systeme zieht eine weitere Herausforderung im Entwicklungsprozess nach sich. Ihre große Domänenvielfalt und die daraus resultierende Eigenschaft flexibel auf sich ändernde Randbedingungen zu reagieren, führt aus Sicht des Systementwicklers zu einem erhöhten Informations- und Wissensumfang im PEP. Dies erschwert zusätzlich jedoch

die Reduzierung von informations- bzw. wissensverarbeitenden Tätigkeiten, die nach [5] als nicht-wertschöpfend eingestuft werden.

3.2 Bestehende Lösungsmöglichkeiten aus Technik und Forschung

Wie aus Bild 1 ersichtlich, nimmt die entwicklungsbegleitende Simulation im PEP mechatronischer Systeme einen hohen Stellenwert ein und trägt maßgeblich zur geforderten frühzeitigen Funktionsverifizierung (siehe 3.1) bei. Für die Modellbildung und Simulation mechatronischer Systeme haben sich domänenübergreifende Simulationswerkzeuge etabliert, die in der Lage sind die physikalischen und logischen Eigenschaften eines Systems zu modellieren und zu berechnen. Bekannte Anbieter kommerzieller Programme sind u. a. ITI GmbH (SimulationX[®]), Dassault Systèmes (Dymola[®]) sowie The MathWorks, Inc. (Simscape[®]). [7], [8], [9]

Eine Möglichkeit dem in 3.1 geschilderten erhöhten Informations- und Wissensbedarf zu begegnen sind wissensbasierte Systeme, deren Entwicklung in der Mitte der 80er Jahre begann und seither, mit teils wechselnder Intensität, vorangetrieben wurde. Je nach Anwendungsdomäne sind aus diversen Forschungsarbeiten unterschiedliche Systeme hervorgegangen. Beispiele aus dem Bereich der Mechanik sind die Konstruktionssysteme mfk (siehe [10], [11]) sowie WISKON (siehe [12]). Als Weiterentwicklung können Assistenzsysteme, beispielsweise für die multikriterielle Bewertung von Produktalternativen nach [13] angesehen werden.

Eine Fortführung dieser domänenspezifischen Systeme stellen hybride Entwurfs- und Modellierungsprogramme dar. Sie bieten dem Entwickler eines mechatronischen Systems die Umgebung, die er für eine interdisziplinäre Entwicklung benötigt. Zum Teil erlauben sie bereits eine wissensbasierte und auch ganzheitliche Sicht auf die Entwicklung der meist mechatronischen Komponenten und Produkte. Als Beispiele sind hier u.a. die Forschungssysteme AssMePro [14], ModCoDe/WISENT [15] oder MASP [16] zu nennen. Eine kommerzielle Software für den domänenübergreifenden Entwurf, die Modellbildung und die Berechnung bewegter mechatronischer Produkte wird von der Firma iXtronics GmbH (CAMEL-View[®]) angeboten [17].

3.3 Problematiken der existierenden Ansätze

Die vorgestellten Werkzeuge zeigen bei näherer Betrachtung auch Unzulänglichkeiten die im Folgenden umrissen werden. Es ist zunächst ersichtlich, dass domänenübergreifende Simulationssysteme sehr flexibel für unterschiedliche Problemstellungen während des Entwurfs bewegter

mechatronischer Systeme eingesetzt werden können. Auch die Optimierung eines Systems ist durch die Verwendung interner oder externer Optimierer gängige Praxis. Aus methodischer Sicht mangelt es jedoch an einer Unterstützung bei der anschließenden Überführung optimierter Konzepte in eine stofflich-geometrische Beschreibung, wie in Bild 2 schematisch dargestellt.

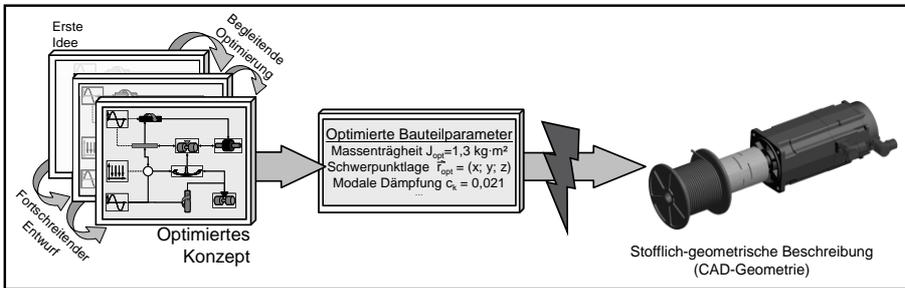


Bild 2: Problematik der mangelnden Unterstützung beim Übergang vom optimierten Konzept zur stofflich-geometrischen Beschreibung

Die Problematik dabei ist, dass bei einer Optimierung Ausprägungen von Parametern ermittelt werden, bei denen es sich nur in seltenen Fällen um „explizite“ Geometrie Größen wie etwa eine maximale Längenausdehnung handelt. Vielmehr erfolgt die Bestimmung „impliziter“ Größen bspw. von zulässigen Massenträgheiten, Dämpfungskonstanten oder Schwerpunktslagen. Diese Parameter können für die Ausarbeitung der CAD-Geometrie nicht direkt herangezogen werden, haben aber dennoch enormen Einfluss auf die späteren Geometrieausprägungen. Gerade das Erstellen der CAD-Geometrien ist aber ein wichtiger Schritt, da die mechanischen Komponenten die Hauptfunktionen eines bewegten mechatronischen Systems erbringen und die Software bzw. die integrierten Schaltkreise die Nebenfunktion erfüllen [14].

Die domänenspezifischen Ansätze ([10], [11], [12]) sind aufgrund ihrer Konzeptionierung nicht für den Entwurf mechatronischer Systeme gedacht. Sie bilden aber eine wichtige Grundlage für die domänenübergreifenden Werkzeuge, die im Folgenden betrachtet werden. Die Modellrepräsentationen der verschiedenen Ansätze ermöglichen prinzipiell den Entwurf hybrider Systeme. Der Entwurf basiert auf Bondgraphen und Blockschaltbildern [14], [15]. In [16] wird eine geometrische constraint-basierte Beschreibungsform des jeweiligen heterogenen Systems angewandt. Diese „Beschreibungssprachen“ ziehen jedoch erhebliche Nachteile mit sich. Nach [18] eignen sich Bondgraphen und Blockdiagramme nicht für die Darstellung und Simulation komplexerer Systeme, bspw. mehrdimensionaler Mechaniken. Auch Digital-

elektronik und Softwarefunktionen lassen sich nicht ohne weiteres mit diesen Beschreibungsformen untersuchen. Die geometrische constraint-basierte Entwurfsbeschreibung verlangt, dass für Elemente aus anderen Domänen entsprechende geometrische Ersatzmodelle existieren [16]. Da dies jedoch nicht für beliebig viele Domänen möglich ist, stößt auch diese Vorgehensweise schnell an ihre Grenzen. In den genannten Arbeiten wurden für einen wissensbasierten Entwurf auch sogenannte Effektbibliotheken implementiert. Zur Verknüpfung der Effekte mit der Entwurfsumgebung wurde für jeden Effekt ebenfalls die spezifischen Darstellungsformen gewählt, was die bereits beschriebenen Nachteile nach sich zieht.

Eine weitere Problematik sind die eingesetzten Methoden zur „Befüllung“ der Wissensbasen in den oben genannten wissensbasierten Systemen (siehe 3.2). Für diese sog. Wissensakquise wird das Wissen bisher aus unterschiedlichen Quellen erhoben. Bei Textquellen (Bücher, Tabellen, Internet) gestaltet sich die Akquise noch relativ problemlos, da das Wissen bereits explizit, d. h. strukturiert und prinzipiell rechnerverarbeitbar vorliegt. Bei personen gebundenem Wissen ist dies schwieriger, da der Großteil des menschlichen Wissens implizit vorliegt. Dieses ist nur schwer formalisier- und damit rechnerverarbeitbar und kann meist nur situationsbedingt abgerufen werden. Die Erhebung dieses Wissens erfolgt meist in Befragungen oder Beobachtung eines Experten durch den sog. Wissensingenieur, der das gesammelte implizite Wissen strukturieren und in eine rechnerverarbeitbare Form überführen muss. Hier kann es z. B. aufgrund von Missverständnissen zu einer inkonsistenten Akquise kommen. Da dieses Vorgehen einen Wissensingenieur sowie einen oder mehrere Wissensträger erfordert, die zusätzlich zur Weitergabe ihres Wissens bereit sein müssen, ist es als sehr zeit- und kostenintensiv anzusehen und für eine notwendige regelmäßige Pflege des Wissens ungeeignet. Infolge der Alterung des Wissens und infolge von Anpassungsschwierigkeiten auf sich ändernde bzw. sich weiterentwickelnde Randbedingungen und Technologien stoßen die wissensbasierten Systeme bisher somit an ihre Grenzen. [13], [20]

4 Formulierung des Konzeptes

Die folgenden Absätze dienen der Beschreibung des Lösungskonzeptes für die oben genannten Problematiken. Im Mittelpunkt stehen eine frühe Funktionsverifizierung und Systemoptimierung sowie wissensbasierte Anwendungen während der Überführung eines optimierten Konzeptes in eine stofflich-geometrische Beschreibung und während der weiteren Ausarbeitung.

4.1 Frühe Funktionsverifizierung und Systemoptimierung

Entsprechend des V-Modells (siehe Bild 1) folgt nach der Anforderungsdefinition der Systementwurf. Als Entwurfsumgebung bieten sich die in 3.2 aufgeführten Softwarewerkzeuge der physikalischen Systemsimulation mit ihren domänenübergreifenden Modellbibliotheken an. Parallel zum fortschreitenden Entwurf sorgen Simulationen für die notwendige frühe Funktionsabsicherung. Unter Berücksichtigung der Anforderungen können zusätzlich einzelne Parameterausprägungen optimiert werden. Die Parameterausprägungen sind während einer Optimierung in hohem Maße von den in 3.1 angesprochenen Leistungsgrenzen determiniert, die sich bspw. in maximal zulässigen Beschleunigungen, vorgegebenen Arbeitsfrequenzen oder einzuhaltenden Verfahrenzeiten eines Elementes widerspiegeln. Es ist zu erwähnen, dass eine noch effizientere Funktionsabsicherung und Optimierung durch die Anbindung an gängige FE – Simulationssysteme erreicht wird.

Ein weiteres Ziel ist es den Entwickler in der Entwurfsphase stärker durch wissensbasierte Anwendungen zu unterstützen. Dies kann in Form von kontextsensitiv bereitgestellten Informationen sowie Element-, Lösungs- oder Effektbibliotheken geschehen. Für mechanische Konstruktionen wurde dies bereits umgesetzt [19]. Eine Sammlung an Effekten muss dabei in die gewählte Entwurfsumgebung integriert sein oder entsprechende Schnittstellen vorsehen um den Entwickler effizient zu unterstützen. Bild 3 fasst die vorgesehenen Konzeptinhalte in den frühen Phasen des PEP zusammen.

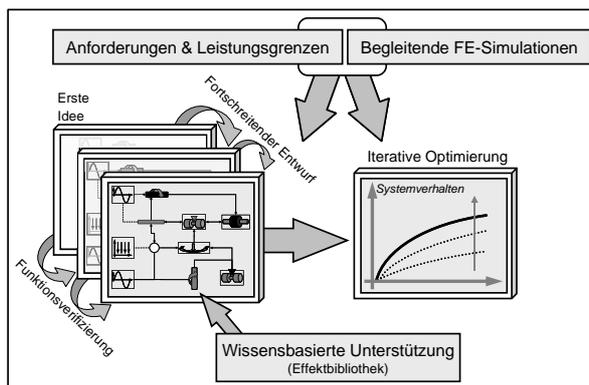


Bild 3: Konzeptinhalte in den frühen Phasen des PEP

4.2 Überführen des Entwurfs in ein realisierbares Systemmodell

Die Überführung des optimierten Entwurfes in eine stofflich-geometrische und realisierbare Systembeschreibung kann entsprechend 3.3 als noch unzureichend gelöst angesehen werden. Erst bei der Ausgestaltung der Komponenten im CAD-System kommen Restriktionen bezüglich verschiedener Aspekte wie bspw. Fertigbarkeit, Montierbarkeit, Standardisierung, Recycling o. ä. zum tragen. Auch sind diverse Elemente in einem Systemsimulationsmodell nur „implizit“ vertreten und müssen im CAD-System „explizit“ erstellt werden. Zur Verdeutlichung wird auf das beispielhaft betrachtete Systemsimulationsmodell in Bild 4 verwiesen. Es zeigt eine Seilrolle, die über eine Kupplung mit dem antreibenden Motor verbunden ist. Das System wird als optimiert angesehen (siehe 4.1). Zwischen den Elementen Motor, Kupplung und Seilrolle bestehen physikalische Verbindungen, die durch sog. Konnektoren repräsentiert werden. Diese Verbindungslinien (implizit) entsprechen im CAD-Modell verschiedenen Standardbaugruppen (explizit) wie z.B. Wellenlagerungen oder Welle-Nabe-Verbindungen.

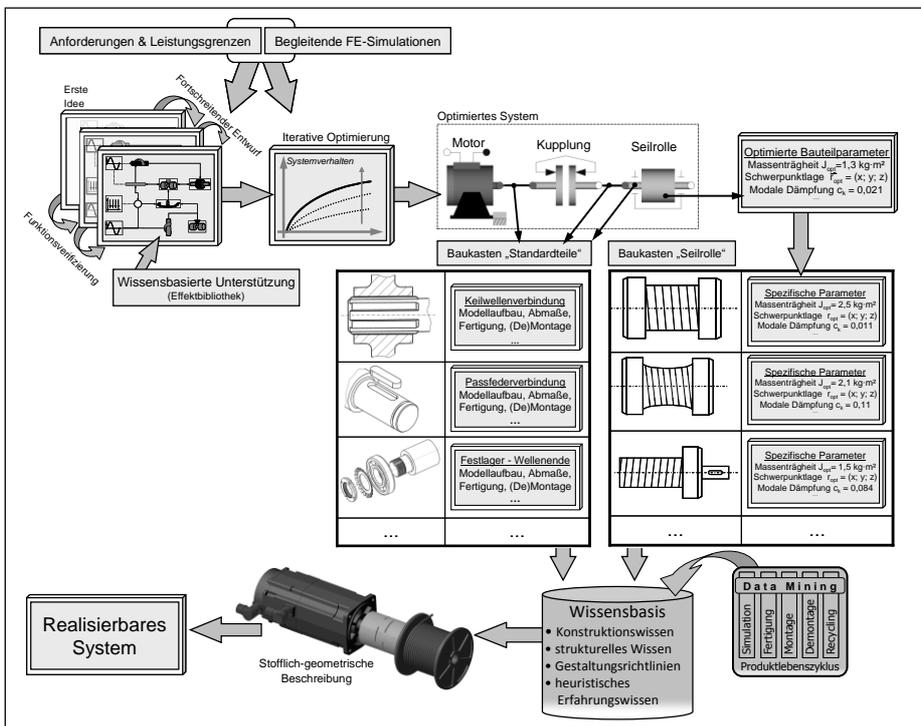


Bild 4: Schematische Konzeptzusammenfassung mit einfachem Beispiel

Das Ausarbeiten bzw. Einfügen dieser Standardbaugruppen kann im hier vorliegenden Kontext als eine Art Routinetätigkeit angesehen werden, denn ein wichtiger Teil der kreativen Arbeit wurde bereits im Entwurf des mechatronischen Systems erbracht. Als Lösung wird eine Baukastenbibliothek mit Standardbauteilen angedacht, die entsprechend der Konnektoren des Simulationsmodells im System auftreten. Das notwendige Wissen für die Baukastenbibliothek ist in einer Wissensbasis hinterlegt. Im Falle einer Welle-Nabe-Verbindung wäre dies u. a. Konstruktionswissen (z.B. für die Auslegung), strukturelles Wissen (z. B. CAD-Modellaufbau), administratives Wissen (bzgl. Lieferanten, Verfügbarkeit) oder auch heuristisches Erfahrungswissen.

Neben den Standardbauteilen müssen aber auch spezielle Elemente in eine stofflich-geometrische Darstellung überführt werden, die einen hohen Einfluss auf die Hauptfunktion des Systems haben. Auf diesen lag der Fokus in der vorhergehenden Optimierungsphase. Im Bild 4 wäre dies beispielsweise die Seilrolle, für die die Optimierung ein Set an optimierten Parametern ergeben hat. Anhand dieser Parameter kann jedoch keine Geometrie erstellt werden. Eine Lösungsmöglichkeit bietet der Einsatz eines Baukastens und entsprechend hinterlegtes Wissen. Die optimierten Bauteilparameter im Bild 4 dienen als Eingangswerte für die Wissensbasis und initialisieren aufgrund der dort hinterlegten Regeln die Integration des Elementes, das mit seinen spezifischen Parametern möglichst nahe am ermittelten Optimum liegt.

Mit der dargestellten Baukastenmethodik ist die wissensbasierte Unterstützung des Entwicklers noch nicht abgeschlossen. Für das Auskonstruieren der verbleibenden Geometrie wird dem Entwickler ein weiteres Werkzeug in die Hand gegeben. Im Mittelpunkt steht die „Nutzbarmachung“ neuer Fertigungsprozesse, wie bspw. das generative Verfahren Laserstrahlsintern oder das Remote – Laserstrahlschweißen, für den Konstrukteur. Nutzbarmachung bedeutet, dass die erweiterten Konstruktionsmöglichkeiten, die sich aufgrund der höheren Geometrieflexibilität neuer Fertigungsverfahren ergeben können, dem Konstrukteur in geeigneter Form zur Verfügung stehen (z. B. Gestaltungsrichtlinien). Eine entsprechende wissensbasierte Rechnerunterstützung wird ermöglicht die automatische Kontrolle der Realisierbarkeit (Fertigung, De-/Montage, etc.) erzeugter Geometrien. Somit erhält der Konstrukteur ein Hilfsmittel, das die Werkstoffausnutzung effizienter gestalten kann und somit eine wichtige Forderung des anhaltenden Leichtbautrends berücksichtigt. Das gesamte System liegt letztendlich mit seinen Parameterausprägungen nahe an einem Optimum und ist gleichzeitig realisierbar.

4.3 Automatische Akquisition von benötigtem Wissen

Die Initialisierung der entsprechend 4.2 geforderten Wissensbasis erfolgt über die Implementierung von bestehendem und domänenspezifischem Wissen. Die bisherigen Problematiken zur notwendigen Akquise wurden bereits in 3.3 umrissen.

Potential diesen Problematiken zu begegnen, bieten die Methoden des Data Mining, mit denen eine automatische Wissensakquisition realisierbar ist. Diese Methoden sind in der Lage infolge einer Datenanalyse Informationen und Wissen aus Datenbeständen zu extrahieren. Data Mining bedient sich hierbei Methoden aus den Disziplinen der Statistik, des maschinellen Lernens sowie der Künstlichen Intelligenz. Die zu analysierenden Datenbestände stammen u. a. aus unterschiedlichen Quellen. Denkbar sind Simulationen von Bauteilen und Baugruppen unter Last, sowie von Fertigungsprozessen wie dem Um- oder Urformen. Auch Daten aus realen Experimenten können verwendet werden. Die hierfür notwendigen Simulationsmodelle und experimentellen Aufbauten werden von Fertigungsspezialisten und Fachleuten unter Benutzung ihres Wissens, das aus theoretischem Fachwissen und heuristischem Erfahrungswissen besteht, erstellt. Die aus den Simulationen und Experimenten gewonnenen Ergebnisse resultieren daher aus diesen Erfahrungen und stellen somit das Expertenwissen implizit dar. Data Mining Methoden umfassen prädiktive und beschreibende Analysen und sind in der Lage aus Informationen und explizites Wissen u. a. in Form von „wenn-dann-Regeln“ und analytischen Gleichungen zu akquirieren. Durch eine geeignete Bereitstellung, beispielsweise in einem Assistenz- oder Expertensystem, kann der Konstrukteur auf diese Aspekte zugreifen. [21]

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Idee eines Konzeptes vorgestellt, das einen starken Fokus auf die simulationsgetriebene-wissensbasierte Entwicklung bewegter mechatronischer Systeme legt. Ausgehend von den Herausforderungen im PEP dieser Produkte, wurden bisherige Lösungsansätze vorgestellt und deren Problematiken umrissen. Das neue Konzept setzt auf eine stärkere Unterstützung bei der Überführung des Entwurfs in die stofflich-geometrische Beschreibung und sieht dafür den Einsatz einer Baukastenmethodik kombiniert mit umfangreichen Wissensbasen vor.

Ein weiterer Aspekt des Konzeptes zielt auf die Unterstützung nicht-routinemäßiger Tätigkeiten ab, wie bspw. die Überprüfung von Elementen hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die

Integration von Gestaltungsrichtlinien neuartiger Fertigungsverfahren, zur Stärkung der konstruktiven Freiheit des Entwicklers.

Um das Konzept in seiner jetzigen Form weiter voranzubringen, werden sowohl mittel- als auch langfristig wichtige Meilensteine gesehen. Zur späteren Bewertung der erreichten Ziele sind Anforderungen bezüglich wichtiger Aspekte unumgänglich. Ein solcher Aspekt ist bspw. ein geeigneter Demonstrator für die exemplarische Anwendung des Konzeptes. Auch die Fragen nach dem Aufbau von Produktmodellen, Schnittstellen sowie eines geeigneten wissensbasierten Systems sind noch unzureichend beantwortet.

Danksagung

Dieser Beitrag ist im Rahmen des SFB Transregio 73 „Umformtechnische Herstellung von komplexen Funktionsbauteilen mit Nebenformelementen aus Feinblechen – Blechmassivumformung“ entstanden, der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird.

Literatur

- [1] Vajna, S; et al: "CAx für Ingenieure – Eine praxisbezogene Einführung", Springer-Verlag, Berlin, 2009.
- [2] VDI-Richtlinie 2206: "Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme", 2004.
- [3] Czichos, H.: „Mechatronik – Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme“, Vieweg und Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008.
- [4] Gausemeier, J.: „Domänenübergreifende Vorgehensmodelle“, Online-dokument, letzter Aufruf: 26.07.2010
- [5] Pahl, G; Beitz, W. et al.: "Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen", Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [6] Imam, O.; Naughton, P.: „Leichtbau von Automobilkarosserie und –interieur“, Lightweight Design, 3 (2009), S. 32–36.
- [7] Fa. ITI GmbH, Onlineauftritt zu SimulationX: <http://www.iti.de/simulationx/systemsimulation.html>, letzter Aufruf: 26.7.2010

-
- [8] Fa. Dassault Systèmes, Onlineauftritt zu Dymola: <http://www.3ds.com/products/catia/portfolio/dymola>, letzter Aufruf: 26.7.2010
- [9] The MathWorks, Inc., Onlineauftritt zu Simscape: <http://www.mathworks.com/products/simscape/>, letzter Aufruf: 26.07.2010
- [10] Finkenwirth, K.: „Fertigungsgerecht Konstruieren mit CAD – Konzept eines Konstruktionssystems zur Informationsverarbeitung mit CAD-Systemen“, Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 1990.
- [11] Krause, D.: „Rechnergestütztes Konzipieren und Entwerfen mit Integration von Analysen, insbesondere Berechnungen“, Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 1992.
- [12] Eulenbach, D.: „Das Konstruktionssystem WISKON“, VDI Verlag, Reihe 20 Nr. 32, Düsseldorf, 1990.
- [13] Wartzack, S.: „Predictive Engineering – Assistenzsystem zur multi-kriteriellen Analyse alternativer Produktkonzepte“, Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2000.
- [14] Schön, A.: „Konzept und Architektur eines Assistenzsystems für die mechatronische Produktentwicklung“, Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2000.
- [15] Bludau, C; Welp. E.G.: „Wissensbasierte Entwicklung mechatronischer Produkte“, 12. Symposium „Design for X“, Neukirchen, 11. und 12. Oktober 2001.
- [16] Reeßing, M.; Brix, T.: „Domänenübergreifende Entwurfswerkzeuge zur Modellierung und Berechnung heterogener Systeme“, 19. Symposium „Design for X“, Neukirchen, 09. und 10. Oktober 2008.
- [17] iXtronics GmbH, Onlineauftritt zu CAMEL-View: <http://www.ixtronics.de> letzter Aufruf: 26.07.2010
- [18] Pelz, G.: „Modellierung und Simulation mechatronischer Systeme“, Hüthig Verlag, Heidelberg, 2001.
- [19] Storath, E.: „Kontextsensitive Wissensbereitstellung in der Konstruktion“, Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 1996.

-
- [20] Spur, G.; Krause, F.-L.: „Das virtuelle Produkt – Management der CAD-Technik“, Hanser Verlag, München, Wien, 1997.
- [21] Tan, P.-N.; Stienbach, M; Kumar, V.: „Introduction to Data Mining“, Pearson Edition, Boston (USA), 2006.