

Modellierung und Simulation im mechatronischen Produktentwicklungsprozess

Fabio Dohr und Michael Vielhaber
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Universität des Saarlandes

In recent years mechatronics has become a part of almost every technical product and the field is becoming increasingly relevant. Modeling and simulation have proven to be adequate tools to deal with complexity and to improve communication across domains – two of the main issues in mechatronics. However, there is currently no holistic methodology which exploits the potential of using modeling and simulation from the very beginning. In this paper established methodologies will be analyzed and requirements for a model- and simulation-based development process will be derived. Finally, an initial framework that will fulfill these requirements will be presented.

1 Einleitung

Mechatronik vereint Komponenten der klassischen Ingenieursdisziplinen Mechanik, Elektronik/Elektrotechnik und Regelungstechnik sowie Informationstechnik in einem Produkt. Die daraus resultierende Heterogenität führt zu einer deutlich höheren Komplexität als bei klassischen Produkten. Zudem beschränken sich die Entwicklungstätigkeiten nicht nur auf eine Domäne, sodass Kooperation und Kommunikation zwischen Domänen ein elementarer Bestandteil mechatronischer Entwicklungsprozesse sind. Eine getrennte Entwicklung in den einzelnen Domänen ist daher nicht mehr möglich, vielmehr bedarf es einer ganzheitlichen, interdisziplinären Betrachtung [1]. Die Anzahl der in den letzten Jahren zu diesem Thema veröffentlichten Arbeiten zeigt

den großen Bedarf an neuen, mechatronischen Vorgehensweisen. Einen Überblick hierzu gibt [2].

Der Markt für technische – und insbesondere für mechatronische – Erzeugnisse erfährt seit einigen Jahren eine stetige Verkürzung der Produktlebenszyklen sowie ein Ansteigen des Wettbewerbes. Hieraus resultiert für Unternehmen der Zwang, die Entwicklungszeiten und -kosten zu senken, ohne die Qualität zu vernachlässigen. Mechatronische Produkte erhöhen hierbei aufgrund ihrer Komplexität und Heterogenität die Anforderungen zusätzlich, sodass klassische Entwicklungstechniken nicht mehr ausreichend sind. Abbildung 1 verdeutlicht, dass ein modell- und simulationsbasierter Ansatz hier Abhilfe leisten kann.

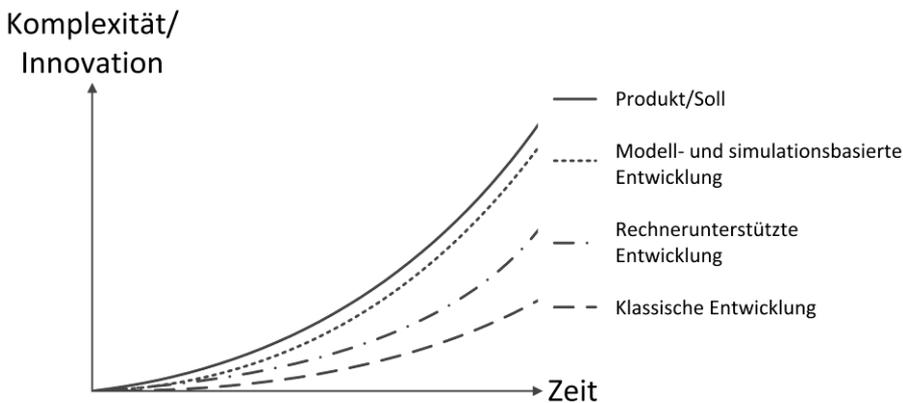


Abbildung 1: Komplexitätsschere (nach [3])

Eine späte Eigenschaftsabsicherung, wie es bisher meist anhand von Prototypen und Test der Fall ist, führt bei mechatronischen Produkten aufgrund der Vielzahl von vernetzten Komponenten zu einem sehr hohen Änderungsaufwand mit entsprechenden Kosten. Dies wird durch einen simulationsbasierten Ansatz vermieden, der die Lernkurve in frühe Phasen vorzieht, sodass Entscheidungen fundierter getroffen werden können. Weiterhin ersetzen Simulationen – zumindest teilweise – physische Prototypen, sodass die ersten physischen Versuchsträger bereits einen wesentlich höheren Reifegrad besitzen. Somit werden bei der Entwicklung Zeit und Kosten eingespart.

Trotz der zahlreichen Vorgehensmodelle existiert derzeit keine Methodik, die den mechatronischen Produktentwicklungsprozess von Beginn an simulationsbasiert betrachtet. Daher werden im Folgenden diesbezügliche Schwachstellen existierender Methoden analysiert, Anforderungen an eine simulati-

onsbasierte Entwicklung erarbeitet und Vorschläge für ein Vorgehen beschrieben.

2 Analyse bestehender Vorgehensmodelle

In diesem Abschnitt werden die beiden Richtlinien VDI 2221 und VDI 2206 bezüglich des Einsatzes von Modellierungs- und Simulationstechniken analysiert. Da diese Richtlinien sich im Bereich der Konstruktionstechnik und der mechatronischen Produktentwicklung – zumindest in Forschung und Lehre – etabliert haben, sollen sie hier als beispielhafte Grundlage dienen, um die heutigen Probleme darzustellen. Es sei jedoch auch auf die Literatur zu den zahlreichen weiteren Vorgehensmodellen verwiesen, z.B. [2] und [4].

2.1 Modellierung und Simulation in der VDI 2221

Die Richtlinie VDI 2221 behandelt allgemeingültige, branchenunabhängige Grundlagen methodischen Entwickelns und Konstruierens [5]. Das grundsätzliche Vorgehen der Richtlinie teilt sich in sieben Arbeitsschritte, welche in Abbildung 3 unten dargestellt sind. Entsprechend dem Alter der Norm – die aktuelle Version entstand 1993 – basiert das generelle Vorgehen auf rein manuellen Methoden. Zwar wird darauf verwiesen, dass die Methodik auch für eine rechnerunterstützte Entwicklung geeignet ist, jedoch beschränkt sich die Richtlinie hierbei auf die Techniken des Digital Mock-Ups (DMU), also die gestalt- bzw. geometrieorientierten Tools, hauptsächlich CAD. Insbesondere bei mechatronischen Systemen rückt aber immer mehr das Digital Functional Mock-Up (FMU) in den Vordergrund, welches auch die funktionale Komponente berücksichtigt. Zudem fehlen konkrete Anweisungen, welche Techniken in welcher Phase eingesetzt werden können. Eine durchgängige, intensive Nutzung von Modellierungs- und Simulationsverfahren ist nicht Teil des Vorgehens.

Die Eigenschaftsabsicherung erfolgt in der Richtlinie vollständig über Versuchs-/Labormuster und physische Prototypen. Zur Einordnung im Prozess wird dabei keine genauere Angabe gemacht, die Prototypenphase wird somit in den Schritt „weitere Realisierung“ verschoben. Die Rückflüsse der hier erlangten Erkenntnisse in vorangegangene Phasen der Entwicklung werden nicht weiter behandelt. Die in Abbildung 2 dargestellte Lernkurve zeigt, dass durch dieses Vorgehen in späten Phasen wieder mit einem erhöhten Aufwand zu rechnen ist, da Fehler erst dort erkannt und entsprechende Änderungen notwendig werden. Verstärkt wird dieses Problem dadurch, dass bereits sehr früh – vor dem ersten Aufwandsmaximum – ein Konzept ausgewählt wird, wodurch die Gefahr einer Fehlentscheidung erhöht wird. Die dargestellte vor-

gezogene Lernkurve zieht das Aufwandsmaximum in frühe Phasen vor, wodurch fundiertere Entscheidungen möglich sind und die Eigenschaftsabsicherung sehr früh erfolgt. Auf diesen Aspekt wird in Kapitel 3 genauer eingegangen.

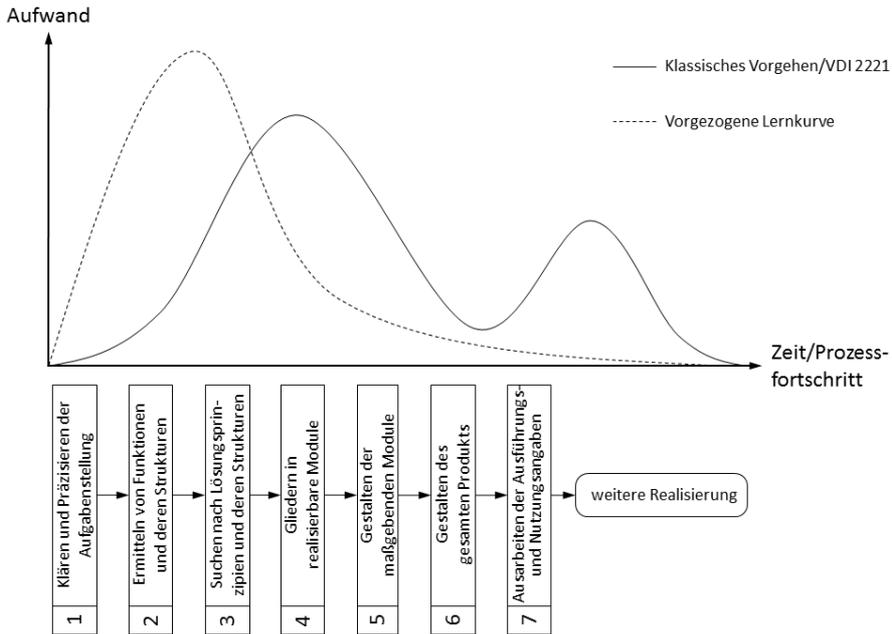


Abbildung 2: Lernkurve in der VDI 2221 (oben nach [6], unten nach [5])

Die Entwicklung mechatronischer Produkte ist geprägt von interdisziplinärer Zusammenarbeit. Dieses Kriterium wird im Vorgehen nach VDI 2221 jedoch nur unzureichend berücksichtigt. Zwar wird auf parallele Entwicklungen eingegangen, jedoch werden diese als hauptsächlich unabhängig betrachtet.

Ein häufiges Vorurteil bezüglich des Vorgehens in der VDI-Richtlinie ist die rein sequentielle Abarbeitung der Arbeitsschritte [7], obwohl der wichtige Aspekt der Iterationen zwischen den Schritten in der Richtlinie ausdrücklich erwähnt wird. Mangelnde Hinweise bezüglich der Adaption des linear dargestellten Vorgehens sind für diese Auffassung besonders bei Anwendern mit geringer Erfahrung verantwortlich [4].

2.2 Modellierung und Simulation in der VDI 2206

Die Richtlinie VDI 2206 gibt einen praxisorientierten Leitfaden für die systematische Entwicklung mechatronischer Produkte [8]. Sie führt die Methoden der einzelnen Domänen in einem Leitfaden zur Entwicklung mechatronischer Systeme zusammen, wobei ein besonderer Fokus auf der Kooperation und Kommunikation der einzelnen Fachdisziplinen liegt, welche als wesentliche Erfolgsfaktoren angesehen werden. Das Vorgehen teilt sich auf in einen Mikrozyklus, einen Makrozyklus sowie wiederkehrende Prozessbausteine. Der Makrozyklus wird durch das V-Modell repräsentiert, welches die drei Hauptphasen Systementwurf, Domänenentwurf und Systemintegration mit nachfolgender Eigenschaftsabsicherung beinhaltet. Dabei sieht die Richtlinie bereits von Beginn an eine begleitende Modellierung und Simulation des Systems vor, da Einigkeit darin besteht, dass Rechnerunterstützung bei der Entwicklung mechatronischer Produkte zwingend erforderlich ist [8, 9, 10]. Jedoch führt das bewusst flexibel gewählte Vorgehen der Richtlinie dazu, dass keine genaueren Angaben bezüglich des Einsatzes von Modellbildungs- und Simulationstechniken in und zwischen den einzelnen Phasen gemacht werden. Insbesondere im Hinblick auf unerfahrenere Benutzer besteht hier ein ähnliches Problem wie bei der Richtlinie VDI 2221.

Trotz des begleitenden Einsatzes von Simulationen sieht die Richtlinie vor, die Eigenschaftsabsicherung hauptsächlich am Ende einer Makrozyklus-Iteration durchzuführen. Direkte Rückflüsse von Informationen und Erkenntnissen aus einzelnen Phasen des Makrozyklus in vorangegangene sind nicht vorgesehen, obwohl gerade hierin ein großer Vorteil von virtuellen Absicherungsmethoden liegt. Weiterhin besteht noch Potential bei den Übergängen zwischen den Phasen, wobei insbesondere die Partitionierung und darauffolgende Einteilung in die Domänen von Interesse ist. Zudem wird Kommunikation und Kooperation der einzelnen Domänen als wesentlicher Faktor in der Richtlinie angesehen. Jedoch erfolgt die domänenspezifische Entwicklung noch unabhängig voneinander, obwohl auch hier Kooperation und Kommunikation erforderlich sind.

2.3 Abgeleitete Fragen

Die am Beispiel der beiden VDI-Richtlinien dargestellte Analyse zeigt, dass derzeit noch einige Potentiale bezüglich des Einsatzes von Modellierungs- und Simulationstechniken bestehen. Hieraus können die folgenden Fragen abgeleitet werden:

- Wie verändern sich Verantwortlichkeiten, Modelle, Simulationen und IT-Tools im Verlaufe des Entwicklungsprozesses? Wie können diese verknüpft werden?
- Können verschiedene Domänensichtweisen in einem Modell integriert werden, welches als Basis einer Gesamtsimulation dient?
- Wer ist für die Erstellung und Anpassung des Modells und wer für die Simulation verantwortlich? Gibt es hierfür eine alleinige Rolle?
- Wie kann Datenkonsistenz und -kompatibilität gewährleistet werden?
- Wie verändert der Einsatz von Modellierung und Simulation den Ablauf des Gesamtprozesses?

Ziel ist es, von einem modell- und simulationsunterstützten Entwicklungsprozess, wie er beispielsweise in der VDI 2206 beschrieben ist, zu einem modell- und simulationsbasierten Prozess zu gelangen. Hierzu werden im folgenden Kapitel Anforderungen an einen Entwicklungsprozess erstellt, die bei der Klärung der beschriebenen Fragen helfen sollen.

3 Anforderungen an ein modell- und simulationsbasiertes Vorgehen

Mechatronische Produkte sind hochintegrierte, komplexe Produkte. Im Hinblick auf Entwicklungskosten und -zeit sowie Produktqualität ist es daher nicht mehr ausreichend, einzelne Aspekte der Produktentwicklung getrennt zu betrachten. Vielmehr muss ein Vorgehensmodell eine integrierte Sichtweise auf alle Aspekte bieten, wie in Abbildung 3 verdeutlicht.

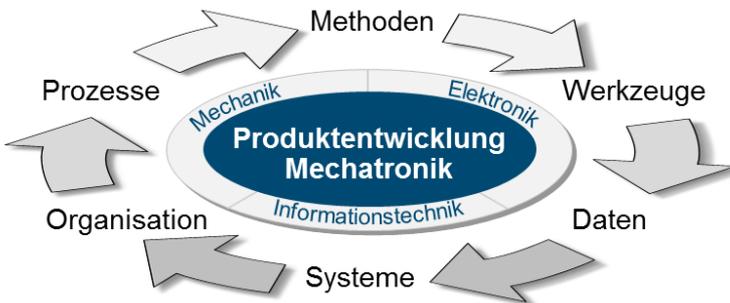


Abbildung 3: Ganzheitliche Betrachtung der Produktentwicklung (nach [11])

Nachfolgend werden die Anforderungen in den einzelnen Phasen des Produktentwicklungsprozesses bezüglich der in Abbildung 3 dargestellten Dimensionen untersucht.

3.1 Frühe Phasen / Systementwurf

Die frühen Phasen sind für den Erfolg eines Produktes ausschlaggebend [12]. Gemäß der Rule of Ten ist der zeitliche und finanzielle Aufwand für Änderungen hier am geringsten, wodurch eine fundierte Konzeptauswahl besonders wichtig ist, um später Fehlerentdeckung vorzubeugen. Insbesondere bei mechatronischen Systemen sollte der Entwicklungsaufwand aufgrund der Vielzahl involvierter Fachdisziplinen und dem damit verbundenen großen Lösungsraum vorgezogen werden, d.h. in den Systementwurf nach [8]. Dieses Vorziehen der Lernkurve, vgl. Abbildung 2, kann nur durch den durchgängigen Einsatz von Modellierung und darauf aufbauender Simulation erreicht werden [13].

Der Systementwurf erfolgt unter Beteiligung von Fachleuten aller involvierten Domänen. Hierbei besteht das Problem, dass jede Domäne ihre eigene Terminologie und Modellierungstechnik entwickelt hat. Besonders im Hinblick auf eine ganzheitliche Betrachtung der Problemstellung entstehen dadurch Kommunikationsprobleme, die den Entwurfsprozess stören können. Während das Problem der Terminologie hauptsächlich durch Schulung von Mitarbeitern zu beheben ist, bedarf es bei den Modellierungstechniken weiterer Maßnahmen. Daher gibt es zahlreiche Bestrebungen, Modellierungssprachen zu entwickeln, die domänenübergreifende Phänomene beschreiben können und verschiedene Domänensichtweisen in einem Modell integrieren. Beispielsweise seien hier Modelica [14], VHDL-AMS [15] und SysML [16] genannt. Auf der Basis dieser ausführbaren Modelle können Simulationen durchgeführt werden, wodurch bereits sehr früh Erkenntnisse über das Systemverhalten erlangt werden, die beim Vergleich und bei der Auswahl von Konzepten als objektive Kriterien dienen. Zwar erhöht sich dadurch der Aufwand in dieser Phase, jedoch führt die fundierte Konzeptauswahl dazu, dass im weiteren Entwicklungsverlauf weniger Konzeptfehler auftreten und damit die Anzahl der Iterationen reduziert werden kann.

Derzeitige Probleme bei den Multidomänensprachen bestehen in ihrer fehlenden Integration. Zahlreiche Arbeiten befassen sich mit den Möglichkeiten und der Weiterentwicklung der Sprachen, jedoch fehlt eine organisatorische sowie methodische Integration in den Produktentwicklungsprozess. Diesem Aspekt muss in einem modell- und simulationsbasierten Prozess besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Darüber hinaus existieren weitere Tools, die den Systementwurf unterstützen können. So ermöglicht beispielsweise die Simulation von Mehrkörpersystemen Machbarkeitsuntersuchungen und liefert grobe Auslegungswerte, wie etwa Beschleunigungen und Kräfte. Auch hierbei bedarf es methodischer Unterstützung, wie und wann solche Tools sinnvoll eingesetzt werden können.

Ist der Systementwurf erfolgt, beginnt in der Regel die Ausarbeitung in den Domänen. Beim Übergang zwischen diesen beiden Phasen bestehen derzeit jedoch noch Probleme. Voraussetzung für die Aufteilung der Entwicklungsaufgaben ist die Partitionierung mechatronischer Systeme. Hierbei stellen die Komplexität und die oftmals nicht einzelnen Domänen zuzuordnenden Komponenten Probleme dar. Arbeiten auf diesem Gebiet existieren bereits und sollten in eine Gesamtmethodik integriert werden. Zudem ist es sinnvoll, bereits erstellte Modelle aus dem Systementwurf auch im weiteren Verlauf der Entwicklung zu nutzen. Hierfür bestehen bereits teilweise Möglichkeiten, z.B. für die Nutzung von Modelica-Modellen in Matlab/Simulink [14]. Ein derartiger Austausch von Modellen bedarf zwangsweise einer Kooperation der Entwicklungsteams und eines Datenmanagementsystems, welches den Entwicklern den Zugriff auf die Modelle erlaubt und deren Konsistenz und Kompatibilität gewährleistet.

3.2 Domänen-Entwurf

Die einzelnen Domänen haben im Laufe der Zeit zahlreiche ausgereifte Softwaretools entwickelt, mit denen sich entwicklungsbegleitend eine virtuelle Eigenschaftsabsicherung durchführen lässt. Beispielhaft seien hier die Finite Elemente Methode in der Mechanik und die Schaltungssimulation in der Elektronik genannt. Bei diesen handelt es sich jedoch meist um Insellösungen, welche in der Regel nicht mit anderen Tools interagieren und somit den Prozessfluss unterbrechen [1]. Daher gibt es zahlreiche Entwicklungen von Konstruktionssystemen, welche die Tools in einem System – üblicherweise in CAD-Systemen – vereinen. Naturgemäß ist die Leistungsfähigkeit solcher Systeme nicht mit der von Einzellösungen vergleichbar, weshalb eine vollständige Substitution auf absehbare Zeit unwahrscheinlich ist. Daher müssen der Datenfluss und die Datenkompatibilität unter den Programmen verbessert werden.

Obwohl die endgültige Ausarbeitung in getrennten Disziplinen erfolgt, darf die Entwicklung nicht getrennt ablaufen. Die Kompatibilität zwischen Funktionen und Modulen eines mechatronischen Produktes muss fortlaufend überwacht werden, um eventuelle Iterationsschleifen möglichst klein zu halten. Daher müssen sowohl die Kommunikation als auch der Datenaustausch zwi-

schen den Fachdisziplinen systematisch gefördert werden. Nur so können Änderungen und Erkenntnisse zeitnah an andere Fachbereiche propagiert werden. Eine auch in dieser Phase weitergeführte Systemmodellierung hilft beim Abgleich von Daten und Schnittstellen.

3.3 Systemintegration und Eigenschaftsabsicherung

Aufgrund des in vorangegangenen Phasen erfolgten durchgängigen simulatorischen Abgleichs der Eigenschaft mit der Spezifikation und dem Abgleich zwischen den Domänen ist bei der Zusammenführung der Komponenten und Module, d.h. bei der Systemintegration nach VDI 2206, der Aufwand deutlich geringer. Hauptsächlich geht es hierbei um Fein- und Abstimmungsarbeiten. Je nach Phase des Entwicklungsprozesses kommen hier verschiedene Hilfsmittel zum Einsatz, z.B. Model-in-the-Loop (MiL), Software-in-the-Loop (SiL) und Hardware-in-the-Loop (HiL). Dadurch ist es möglich, Teile des Systems zu testen, ohne dass der Rest des Systems bereits umgesetzt wurde. Hierfür werden jedoch Modelle des zu entwickelnden Systems selbst sowie der Systemumgebung benötigt, wodurch der Modellierungsaufwand und die Datenmenge stark ansteigen. Werden Modelldaten vom Systementwurf an kontinuierlich gepflegt und erweitert, kann in diesen späteren Phasen darauf zurückgegriffen werden.

3.4 Datenmanagement

Wie bereits in den letzten Kapiteln erwähnt, werden durch einen modell- und simulationsbasierten Entwurf große Mengen an Daten erzeugt, welche zudem unter den Entwicklungsbeteiligten verteilt werden müssen. Deshalb ergeben sich große Potentiale durch den Einsatz eines Datenmanagementsystems, welches für alle Fachdisziplinen gemeinsam zur Verfügung steht. Das Problem der Datenaktualität, -kompatibilität und -konsistenz muss zusätzlich berücksichtigt werden.

4 Ableitung eines Vorgehensmodells

Zahlreiche Vorgehensmodelle basieren auf linearen Vorgehensweisen, wodurch es dem Anwender leicht fällt, Schritte nachzuvollziehen und anzuwenden. Schwierig ist dabei jedoch, Iterationen so zu integrieren, dass auch unerfahrene Anwender diese anwenden (vgl. Kapitel 2.2). Chan und Leung [17] entwickeln beispielsweise eine Vorgehensweise basierend auf dem Spiralmodell, welches Iterationen wesentlich besser integriert, wodurch jedoch die Anschaulichkeit für den Anwender verringert wird. Eine Möglichkeit beide Vorteile – also die Anwendbarkeit und die Iterationen – zu kombinieren,

ist in Abbildung 4 dargestellt, indem ein sequentielles Vorgehen mit einem TOTE-Schema für die Iterationen zwischen den Phasen ergänzt wird. Darauf aufbauend werden in Zukunft die Anforderungen aus Kapitel 3 integriert, um einen modell- und simulationsbasierten Entwurf mechatronischer Systeme zu ermöglichen. Hierbei werden insbesondere der Systementwurf und die damit verknüpfte Systemmodellierung von Interesse sein, um möglichst früh eine abgesicherte Konzeptauswahl zu treffen und hohe Reifegrade vor dem ersten physischen Prototyp zu erzielen. Im Sinne des ganzheitlichen Entwurfes mechatronischer Produkte stehen neben methodischen auch organisatorische Aspekte und Werkzeuge im Mittelpunkt des Vorgehens.

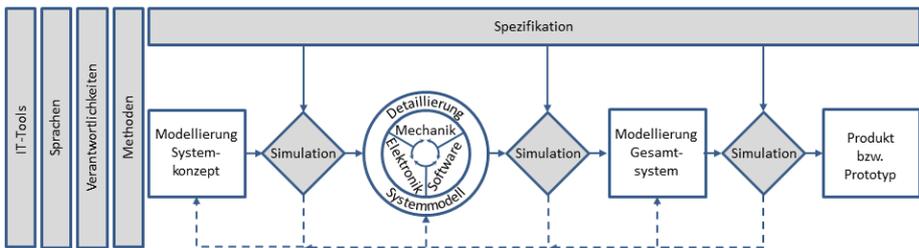


Abbildung 4: Vorgehen beim modell- und simulationsbasierten Entwurf

5 Zusammenfassung

Modellierung und Simulation sind Teil der Entwicklung mechatronischer Produkte. Neben den zahlreichen Insellösungen existieren bereits Software-Werkzeuge, mit denen mechatronische Produkte domänenübergreifend behandelt werden können. Dieser Beitrag zeigt beispielhaft an den Richtlinien VDI 2221 und VDI 2206, welche methodischen Mängel bei der Einbindung von Modellen und Simulation derzeit bestehen. Darauf aufbauend werden Anforderungen für einen modell- und simulationsbasierten Entwurf erarbeitet und daraus ein grober Rahmen für ein Vorgehensmodell entwickelt.

Literatur

- [1] Pahl, G; Beitz, W. et al.: "Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen", Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [2] Gausemeier, J.: „Domänenübergreifende Vorgehensmodelle“, <http://www.transmechatronic.de>, letzter Aufruf: 03.08.2011

-
- [3] Weilkiens, T.: „Zukunftsdisziplin Modellbasiertes Systems Engineering“, in: 8. Paderborner Workshop: Entwurf mechatronischer Systeme, Heinz-Nixdorf-Institut, Paderborn, 2011
- [4] Lindemann, U.: „Methodische Entwicklung technischer Produkte“, Springer Verlag, Berlin, 2007
- [5] VDI Richtlinie 2221, „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993
- [6] Albers, A.; Nowicki, L.: „Integration der Simulation in die Produktentwicklung“, in: Simulation in der Produkt- und Prozessentwicklung, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2003
- [7] Reebing, M.; Brix, T.: „Domänenübergreifende Entwurfswerkzeuge zur Modellierung und Berechnung heterogener Systeme“, in: 19. Symposium „Design for X“, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 2008
- [8] VDI Richtlinie 2206, „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2004
- [9] Isermann, R.: „Mechatronische Systeme“, Springer Verlag, Berlin, 1999
- [10] Ehrlenspiel, K.: „Integrierte Produktentwicklung“, Carl Hanser Verlag, München, 2009
- [11] Vielhaber, M.; Bergsjö, D.; Catic, A.: „Mechatronic Systems Engineering – Theory and Automotive Practice“, in: Proceedings of the 11th International Design Conference DESIGN 2010, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Croatia, 2010
- [12] Krause, F.-L.; Franke, H.-J.; Gausemeier, J.: „Innovationspotenziale in der Produktentwicklung“, Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [13] Commerell, W.; Mammen, H.-T.; Panreck, K.; Haase, J.: „Simulation technischer Systeme – Anforderungen und Perspektiven“, in: Advances in simulation for production and logistics applications, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2008
- [14] <http://www.modelica.org>, letzter Aufruf: 04.08.2011

-
- [15] <http://www.eda.org/analog>, letzter Aufruf: 04.08.2011
- [16] <http://www.sysml.org>, letzter Aufruf: 04.08.2011
- [17] Chan, L. W.; Leung, T. P.: "Spiral Design Model for Consumer Mechatronic Products", in: *Mechatronics*, Volume 6, No. 1, 1996