

GANZHEITLICHE ENTWURFSMETHODEN FÜR MECHATRONISCHE SYSTEME – DARGESTELLT AM BEISPIEL DES FLEXIBLEN FAHRZEUGS X-MOBILE

Thorsten Koch, Joachim Schmitz, Mauro Zanella

Zusammenfassung

Mechatronische Systeme zeichnen sich durch die Integration von Komponenten aus unterschiedlichen Fachdisziplinen aus. Aus dieser Tatsache resultieren besondere Anforderungen an die Entwurfsmethoden: Die Komplexität muss beherrschbar werden und eine ganzheitliche Betrachtung aller Komponenten ist zwingend erforderlich. Diese Randbedingungen führten am Mechatronik Laboratorium Paderborn (MLaP) zur Ableitung von Entwurfsmechanismen, welche die konventionelle gestalterorientierte Konstruktionssystematik um die mechatronische Komposition in den frühen Phasen erweitern.

Im Rahmen dieses Beitrags werden Aspekte dieser Entwurfsmethodik am Beispiel des flexiblen Fahrzeugs X-mobile dargestellt. Bei diesem Fahrzeug sind verschiedene mechatronische Komponenten zu einem komplexen Gesamtsystem integriert.

1 Einleitung

Das X-mobile ist ein Fahrzeug, bei dem zahlreiche mechatronische Baugruppen kombiniert werden. Dieses Fahrzeug entstand aus einem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsprojekt. Bei diesem Projekt wird ein innerstädtisches Verteilerverkehrsfahrzeug – der Servicezubringer – entwickelt.

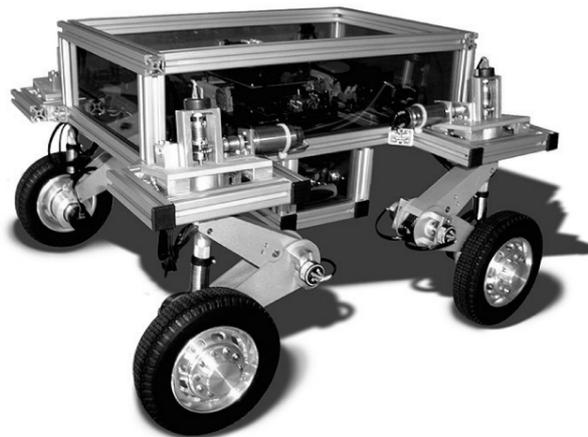


Bild 1: Das mechatronische System „X-mobile“

Die Komplexität von Servicezubringer und X-mobile erforderte während der frühen Phasen des Entwurfs die Umsetzung einer auf mechatronische Systeme zugeschnittenen Methodik, bei der die ganzheitliche Betrachtung der verschiedenen Komponenten das zentrale Kernelement bildet. Erst durch die Integration von konstruktiv-gestalterorientierten Arbeiten und

geeigneten Methoden zur Systemauslegung ist es möglich geworden, geforderte Systemeigenschaften zu erreichen.

2 X-mobile – erste physikalische Realisierung eines innovativen Servicezubringers

Im Rahmen des von der DFG geförderten Forschungsvorhabens soll an einem innovativen, realistischen und komplexen Produkt die Wechselwirkung zwischen konstruktiver und mechatronischer Ausprägung beim Entwurfsvorgang eines hybrid angetriebenen Servicezubringers dargestellt werden. Dabei ergeben sich wesentliche Aussagen zur Entwurfssystematik mechatronischer Produkte und zur Realisierung einer kooperativen Softwareumgebung. Die Entwicklung von Komponenten des Servicezubringers erfolgt in enger Zusammenarbeit des MLaP mit dem DiK (Technische Universität Darmstadt) und dem HNI (Universität Paderborn) [1].

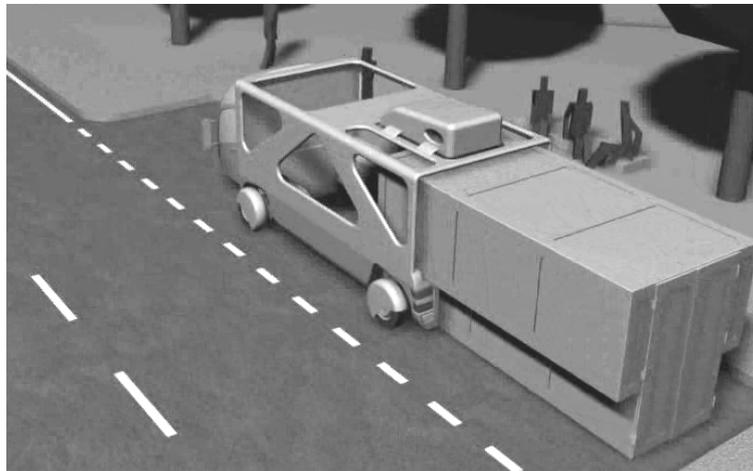


Bild 2: Be- und Entladen von Containern (Quelle: DiK)

Der Servicezubringer ist als Transportgerät geplant, das von Verteilerzentren aus Güter zu den Einzelhändlern in den Innenstädten befördert. Dazu kann das Fahrzeug einen Frachtcontainer aufnehmen. Dass bei dem Servicezubringer zahlreiche mechatronische Systeme eingesetzt werden, verdeutlicht das folgende Fahrzeugkonzept:

- Container zum schnellen Be- und Entladen,
- Serieller Hybridantrieb zur Energieerzeugung; Verbrennungsmotor mit Starter-Generator-Einheit und Batterien zur Energiespeicherung,
- Allrad-Antrieb mit Radnabenmotoren zur optimalen Verteilung der Antriebsmomente,
- unabhängige Vierrad-Lenkung zur Maximierung der Wendigkeit,
- aktive Federung zur Verbesserung der Fahrdynamik und zum Absenken des Containers.

Das X-mobile (siehe Bild 1) ist als erster physikalisch realisierter, funktionaler Prototyp des Verteilerfahrzeugs außerhalb des Rechners zu sehen [4]. Das Fahrzeug stellt außerdem eine Experimentalplattform für neue Hard- und Softwarewerkzeuge (vgl. [2]) dar und dient

gleichzeitig zur Verifizierung von Entwicklungsansätzen und -methoden für mechatronische Systeme.

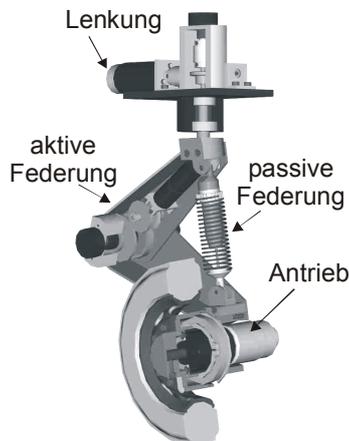


Bild 3: Das integrierte Radmodul des X-mobile

Die unabhängige Allradlenkung, der Direktantrieb der Räder durch Radnabenmotoren und die integrierte aktive Federung ermöglichen ein hohes Maß an konstruktiven Freiheiten bei der Realisierung des Fahrzeugs. Zur Steuerung werden vom Benutzer die Sollwertvorgaben für Fahrtrichtung und Antriebsmoment per PC mit Joystick vorgegeben und über eine Funkstrecke an das X-mobile gesendet. Gleichzeitig werden Messdaten des Fahrzeugs an den PC verschickt. Für diese Verbindung wird ein drahtloses Kommunikationsmodul verwendet.

Die Haupteigenschaften des X-mobile sind:

- aktive Beeinflussung der vitalen Systeme Antrieb, Federung und Lenkung,
- Microcontroller als Echtzeithardware (siehe [2]),
- NiMh-Akkus zur Energieversorgung (1 h maximale Fahrzeit),
- Funkverbindung zur Steuerung,
- 15 Kg Gesamtgewicht bei einer Größe von 50 x 50 x 30 cm (L x B x H).

3 Vorgehensweise während des Entwurfs

Die Tatsache, dass zahlreiche Motoren angesteuert und viele Messsignale ausgewertet werden müssen, verdeutlicht die Komplexität des Gesamtsystems „X-mobile“. Während der frühen Phasen des Entwurfs ist daher eine methodische Vorgehensweise zwingend notwendig, denn bereits in diesem Stadium wurden Konzepte und Funktionen einschließlich der anzuwendenden Wirkprinzipien zur Lösung der geforderten Aufgabe ausgewählt. Fehler, die erst in der Ausarbeitungsphase festgestellt worden wären, hätten sich nachträglich nur noch unter hohem Kosten- und Zeitaufwand oder überhaupt nicht mehr beseitigen lassen.

3.1 Strukturierung zur Handhabung der Komplexität

Bei der Entwicklung von neuartigen Systemen erfolgt im Anschluss an die Definition eines Lastenhefts und die detaillierte Spezifikation die Formulierung der Hauptgebrauchsfunktionen und deren Unterteilung in Subfunktionen. Bei dem Entwurf mechatronischer Systeme werden hierbei, in Anlehnung an die Methoden der aus dem traditionellen Maschinenbau bekannten Konstruktionssystematik, Hauptgebrauchsfunktionen definiert, die sich weiter in untergeordnete Funktionen zerlegen lassen. Zur Erfüllung von Systemfunktionen wird beim Entwurf mechatronischer Systeme häufig auf vorhandene mechatronische Lösungselemente, wie etwa einen Elektromotor mit Leistungselektronik und integrierter Regelung, zurückgegriffen. Allein die Tatsache, dass auf den unteren Ebenen Komponenten aus unterschiedlichen Fachdisziplinen kombiniert eingesetzt werden, verursacht ein enormes Komplexitätsproblem. Wenn zudem unterschiedliche mechatronische Aggregate kombiniert eingesetzt werden, ist eine Strukturierung der Systeme in vertikale (hierarchische) und horizontale (modulare) Baugruppen zwingend erforderlich, denn nur so können Systeme ausgelegt und Wechselwirkungen mit anderen Aggregaten effizient und umfassend analysiert werden.

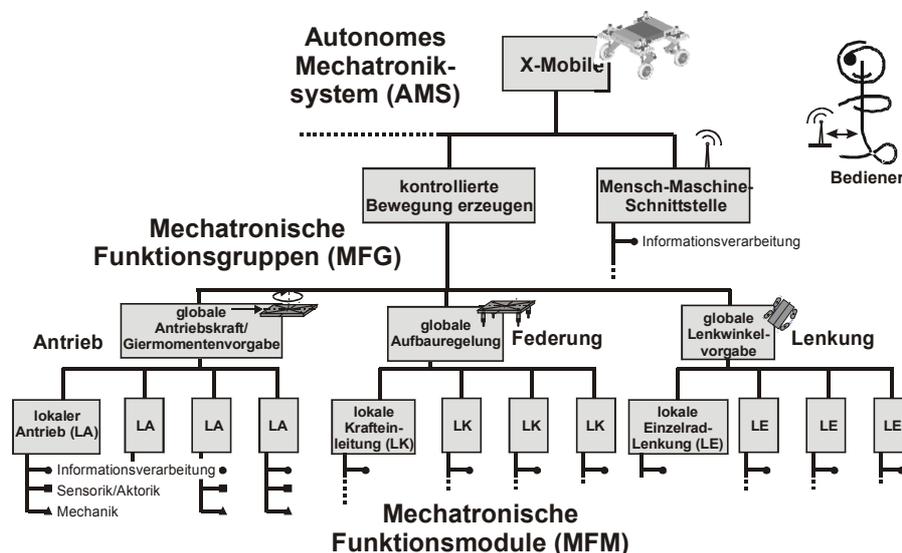


Bild 4: Struktur des X-mobile

Am MLaP hat sich eine Hierarchisierung in vier Ebenen als sehr hilfreich erwiesen [3]:

- Mechatronische Funktionsmodule (MFM, Systeme bestehend aus Mechanik, Aktorik, Sensorik und lokaler Informationsverarbeitung),
- Mechatronische Funktionsgruppen (MFG, Kopplung von MFM),
- Autonomes Mechatroniksystem (AMS, Gesamtsystem zur Realisierung der Hauptgebrauchsfunktion),
- Vernetztes Mechatroniksystem (VMS, Vernetzung mehrerer Fahrzeuge rein auf der Ebene der Informationsverarbeitung).

Zur Auslegung von MFM, MFG, AMS und VMS müssen Modelle aufgebaut und anschließend deren dynamisches Verhalten analysiert und optimiert werden.

3.2 Modellbasierter Entwurf

Beim modellbasierten Entwurf werden für die einzelnen Lösungselemente die Gleichungen zur Beschreibung des kinematischen und des dynamischen Verhaltens manuell oder automatisiert aus der Topologie abgeleitet und, entsprechend der Verkopplung der Lösungselemente untereinander, zu einem mathematischen Gesamtsystem verknüpft. Anhand dieser Gleichungen lassen sich mit Hilfe von Analyseverfahren unterschiedliche Regler- und Steuerungskonzepte für die kontrollierte Beeinflussung des dynamischen Bewegungsverhaltens und letztendlich das Gesamtsystem entwerfen.

Hierzu hat sich ein Modellbildungsprozess mit der Aufteilung der gesamten Funktionen in kinematische, dynamische und mechatronische Funktionen und deren iterativer Auslegung bewährt. Der Einstieg in diese Entwurfsphase bildet die Betrachtung der Kinematik. Zum Erzielen von Trag- und Führungsfunktionen werden Bewegungsfreiheitsgrade gewählt.

Bei der Auslegung der dynamischen Funktionen erfolgt auf der Grundlage der Kinematik die Analyse des Systems mit Hilfe von reduzierten dynamischen Starrkörpermodellen. Diese Phase dient zur Auswahl, Grobdimensionierung und Anordnung der Aggregate (z. B. die Motoren der Lenkung des X-mobile). Dafür werden zunächst – wie etwa bei der Radaufhängung des X-mobile – die vorgesehenen aktiven Komponenten zur Krafterzeugung durch passive Feder-Dämpfer-Elemente ersetzt.

Mit dem Entwurf der mechatronischen Funktionen werden Auslegung und Optimierung des dynamischen Bewegungs- und Systemverhaltens der mechanischen Struktur unter Einbeziehung der aktiven Komponenten und der gleichzeitigen Berücksichtigung der Wechselwirkungen mit der geometrischen Gestalt bezeichnet. Hierbei ist eine ganzheitliche Betrachtungsweise unumgänglich, indem sowohl die konstruktiven Anteile als auch die Informationsverarbeitung in einem Analyse- und Optimierungsprozess ausgelegt werden. Eventuell ergeben sich mit den gewonnenen Analyseergebnissen Änderungen hinsichtlich der Systemstruktur, die eine Anpassung der Teilfunktionen, eine Auswahl anderer Lösungsprinzipien oder eine angepasste Modellierungstiefe erforderlich machen.

4 Integration der Konstruktion in die Systemauslegung

Die geschilderte Vorgehensweise zur Auslegung mechatronischer Systeme zeigt, dass während der frühen Phasen der funktionsorientierte Ansatz mit anschließender Definition der Systemhierarchie für den Einstieg in den rechnergestützten Entwurfsprozess notwendig ist. Bei der Systemauslegung müssen Modelle eines zu entwerfenden mechatronischen Systems sowohl bezüglich des dynamischen Systemverhaltens als auch in Hinsicht auf die geometrische Gestalt fachübergreifend ausgelegt, analysiert und optimiert werden. Der Konstruktion der mechanischen Anteile kommt ein besonderer Stellenwert zu, da bei mechatronischen Systemen die kontrollierte Bewegung von mechanischen Systemen im Vordergrund steht. Für die Umsetzung des ganzheitlichen Entwurfs ergeben sich zahlreiche Anforderungen an die 3D-CAD-Konstruktion, von denen hier einige besonders hervorgehoben werden sollen:

- Gerade die geometrische Grobgestalt muss parametrisch aufgebaut sein, damit Analyseergebnisse leicht einfließen können,
- zur Systemanalyse muss die (teil-) automatisierte Modellreduktion mit der Erhaltung von signifikanten Bauteilparametern und der Systemhierarchie möglich sein,

- die Konstruktion darf erst nach der Analyse des dynamischen Verhaltens aller Komponenten detailliert werden.

Der derzeit in der Praxis angewendete Entwurfsprozess ist allerdings dadurch gekennzeichnet, dass relativ früh detaillierte gestalterorientierte Modelle entworfen werden, wobei die Auslegung des dynamischen Systemverhaltens in die späten Phasen und häufig sogar in die Versuchsphase verlagert wird. So werden Fehler erst spät erkannt und lassen sich nur noch mit erheblichem zeitlichen und finanziellen Aufwand beseitigen.

Diese herkömmliche sequentielle Systementwicklung – zuerst gestalterorientierte Modellierung und spätere Einplanen der Aktorik und der Informationsverarbeitung – führt zu einer erheblichen Verlängerung der Produktentwicklungszeit, was im Gegensatz zur aktuellen Tendenz der Verkürzung von Innovationszyklen steht. Letztlich würde so die Entwicklung innovativer und optimierter Produkte verhindert.

5 Zusammenfassung

Durch die Integration von verschiedenen mechatronischen Komponenten zu komplexen Gesamtsystemen ergeben sich besondere Ansprüche an die Entwurfsphase: Nur durch den funktionsorientierten Ansatz und die Strukturierung mit der Definition von Schnittstellen – das gilt auch für die Reglerstruktur (siehe dazu [3]) – können die einzelnen Systeme für sich im Rechner und anschließend mit Hilfe von HIL-Prüfständen ausgelegt werden. Die Strukturierung ist vor allem bei der Abstimmung der Teilsysteme aufeinander zwingend notwendig.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Lückel, J.; Koch, T.; Schmitz, J.; Gausemeier, J.; Czubyko, R.; Lemke, J.; Anderl, R.; Gräß, R.: Computer-Aided Design of Mechatronic Systems, Exemplified by the Integrated Wheel Suspension of an Innovative Service Vehicle. 1st IFAC Conference on Mechatronic Systems, Darmstadt, 2000.
- [2] Zanella, M.; Koch, T.; Meier-Noe, U.; Scharfeld, F.; Warkentin, A.: Structuring and Distribution of Controller Software in Dependence of System Structure. XIII Congresso Brasileiro de Automática CBA 2000, Florianópolis, Brasilien, 2000.
- [3] Lückel, J.; Hestermeyer, T.; Liu-Henke, X.: Generalization of the Cascade Principle in View of a Structured Form of Mechatronic Systems. International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2001), Como, Italy, 2001.
- [4] Koch, T.; Zanella, M.; Schmitz, J.: X-mobile – erste physikalische Realisierung eines innovativen Stadtzubringerfahrzeugs, VDI-Mechatronik-Tagung Innovative Produktentwicklung, Frankenthal, 2001.

Dipl.-Ing. Thorsten Koch
 Dipl.-Ing. Joachim Schmitz
 M.Sc. Mauro Zanella
 Mechatronik Laboratorium Paderborn
 Universität Paderborn
 Pohlweg 98
 33098 Paderborn
 Tel: 05251 60 5572
 Fax: 05251 60 5579
 Internet: www.mlap.de