

WAS IST MECHATRONIK?

Willy Schweiger

Kurzfassung

Ein mechatronisches System kann formal durch einen *Regelkreis*, dessen Regler durch Software realisiert ist aufgefaßt werden. Der Softwareeinsatz bietet dabei einerseits ein mächtiges Synergiepotential und andererseits die Möglichkeit der Realisierung beliebiger (nichtlinearer nichtholonomer) Steuerfunktionen. Die Regelstrecke, allgemein das technische System kann aus mechanischen, elektrischen und elektronischen Komponenten aufgebaut sein. Der Beitrag versucht ansatzweise auf möglichst formale Weise - unter allen Umständen aber Branchen- und Produktunabhängig - eine *mechatronische Konstruktionsmethodik* zu entwickeln.

1 Einleitung

Das japanische Kunstwort *Mechatronik* wurde 1969 kreiert und sollte integrierte mechanisch-elektronische Systeme charakterisieren. In der vorläufigen IEEE/ASME-Definition von 1996 [1] versteht man darunter: "Mechatronics is the synergetic integration of mechanical engineering with electronic and intelligent computer control in the design and manufacturing of industrial products and processes". Isermann [1] verlangt: "Das mechatronische System soll in Hinblick auf die Funktion dominierend sein. Zusätzlich sollen synergetische Effekte entstehen, die mehr beinhalten als die reine Addition der Disziplinen". Dieser Holismus spiegelt sich auch in der historischen Entwicklung der Disziplinen wider. Zum Maschinenbau als ältester Ingenieurdisziplin in diesem Dreigestirn gesellt sich im 19. Jahrhundert die Elektrotechnik und als jüngster Sproß die Informatik. Die geforderte Synergie folgt dabei im wesentlichen aus der mit den Mitteln der Informatik generierbaren Intelligenz.

Sowohl bei der Entwicklung mechatronischer Produkte als auch bei der Auslegung mechatronischer Prozesse kommt es darauf an, den mechatronischen Synergieeffekt von Anfang an zu berücksichtigen. Es entsteht kein erfolgreiches mechatronisches Produkt, wenn man an eine Maschine bei Fertigstellung schnell noch ein bißchen Software anbringt. Die Forderung nach einer integrierten Entwicklung muß sich damit auch in einer erweiterten Konstruktionsmethodik niederschlagen. Ein Vorschlag einer konstruktionsmethodischen Einbettung wurde auf diesem Symposium 1997 vorgestellt [2]. Im wesentlichen wurde dabei der lösungsneutrale *physikalische Effekt* der klassischen Konstruktionsmethodik durch Hinzufügen von Softwarekomponenten zu einem sogenannten *generalisierten Effekt* erweitert.

Der vorliegende Beitrag will diesen Vorschlag noch einmal aufgreifen, mit dem Ziel, eine sicherere Entwicklung und Auslegung mechatronischer Produkte und Prozesse voranzutreiben.

2 Konstruktionsmethodische Betrachtungen

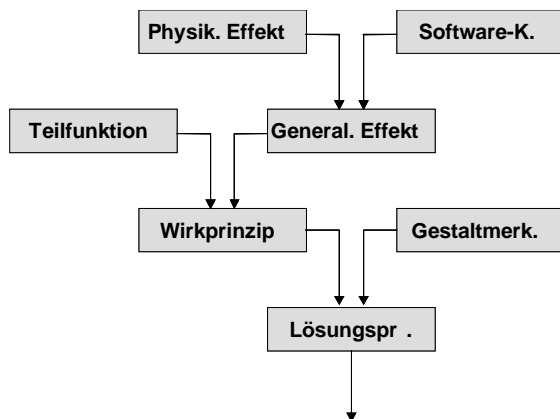


Bild 1 Mechatronische Erweiterung

Bild 1 macht deutlich, daß auch eine *mechatronische Konstruktionsmethodik* selbstverständlich in den frühen Phasen des Konstruktionsprozesses, also bei der Erstellung der Funktionsstruktur eines Produktes schlägt sich der mechatronische Ansatz wesentlich im Wirkprinzip nieder. Dieser Niederschlag resultiert seinerseits aus der Kombination von physikalischem Effekt und Softwarekomponenten. Der Einfluß des generalisierten Effektes auf das Wirkprinzip ist damit in vollem Einklang mit der klassischen Konstruktionsmethodik nach welcher "das Wirkprinzip den *Lösungsgedanken* für eine Funktion auf erster konkreter Stufe darstellt" [3].

Die Anzahl physikalischer Effekte ist *endlich* (vgl. z.B. [4]). Ihre Beschreibung ist Aufgabe der Materialtheorie (z.B. [5,6,7]). In ihr werden die konstitutiven Beziehungen und ihre Einschränkungen (z.B. Festlegung der möglichen Prozeßrichtung durch den Entropiesatz) untersucht. Neben den klassischen konstitutiven Gleichungen (Elastizitätstheorie, Newtonsche Fluide usw.) sind für die Mechatronik vor allem die Multifeldbeschreibungen interessant. Man versteht darunter Materialfunktionale, welche Feldvariable aus der Kontinuumsmechanik, der Elektrodynamik und u.U. der Quantenmechanik miteinander in Verbindung setzen. Ein bekannter Effekt im Rahmen der Multifeldbeschreibung ist die Piezoelastizität. In ihrer linearisierten Form werden dabei elastische Dehnungen und die elektrische Feldstärke zur Bestimmung der mechanischen Spannung superponiert [z.B. [8]]. Dieser Effekt gehört in die Klasse der umkehrbaren Effekte. Dies bedeutet, daß man sowohl Sensoren als auch Aktoren piezoelastisch betreiben kann.

Neben den skizzierten Materialbeschreibungen für physikalische Effekte können zusätzliche physikalische Effekte an Oberflächen, Phasengrenzen, allgemein an singulären Flächen vorhanden sein. Tribologische Effekte im Maschinenbau oder Beschichtungseffekte, z.B. elektrochrome Systeme [9] fallen hierunter, um nur zwei zu nennen.

Anhand der Referenzarchitektur eines mechatronischen Systems gemäß Bild 2 ist erkennbar, daß die Wirkung der Softwarekomponenten auf eine technische Komponente über Sensoren (A/D-Wandler) und Aktoren (D/A-Wandler) erfolgt.

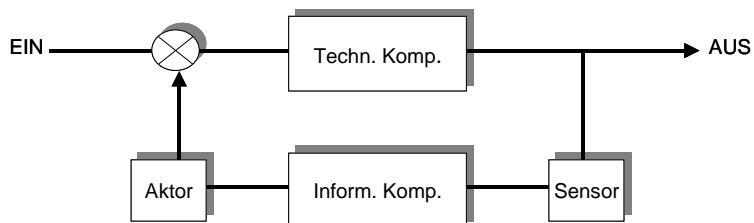


Bild 1 Referenzarchitektur mechatronischer Systeme

Die technische Komponente ihrerseits besteht im allgemeinen aus mechanischen und/oder elektrischen und/oder elektronischen Elementen. Diese Architektur erlaubt eine, in hohem Maße erwünschte *Autonomie* mechatronischer Produkte. Eine wichtige Forderung an die informationstechnische Komponente ist dabei ihre Echtzeitfähigkeit (z.B. Notwendigkeit der schnellen Bildverarbeitung bei autonomen Robotern).

Die Architektur erlaubt eine, in hohem Maße erwünschte *Autonomie* mechatronischer Produkte. Eine wichtige Forderung an die informationstechnische Komponente ist dabei ihre Echtzeitfähigkeit (z.B. Notwendigkeit der schnellen Bildverarbeitung bei autonomen Robotern).

Das aus dem mechatronischen Ansatz zusätzlich resultierende Potential für Synergieeffekte kann man wie folgt belegen. Eine Funktion $f: E \rightarrow A$ heißt berechenbar, wenn es einen Algorithmus gibt, der für jeden Eingabewert $e \in E$ (E Menge der zulässigen Eingabedaten), für den $f(e)$ definiert ist, nach endlichen vielen Schritten anhält und als Ergebnis $f(e)$ liefert (z.B. Informatik Duden). Gemäß der Church'schen Hypothese ist die Klasse der berechenbaren Funktionen - und nur solche interessieren für technische Produkte - gleich der Klasse der Funktionen, die durch Turing-Maschinen berechenbar sind. Andererseits ist die Menge aller möglichen Formulierungen für Algorithmen abzählbar unendlich. Für die Produktentwicklung bedeutet dies, daß eine *grenzenlose* Menge möglicher Software-Komponenten zur Verfügung steht. Diese Möglichkeit begründet das Potential für Synergieeffekte.

Es kann gezeigt werden, daß technische Systeme durch endliche deterministische Automaten beschreibbar sind (z.B. [10]). Dabei können die sogenannten kanonischen Automaten-gleichungen zur Beschreibung der Überführungs- und der Ergebnisfunktion sowohl kontinuierlich als auch diskret gegeben sein. Wegen allfälliger Trägheiten können mit diesem Paradigma auch Sensoren und Aktoren automatentheoretisch repräsentiert werden. Die Zeitkonstanten technischer Komponenten sind i.a. sehr viel größer als jene der Sensoren und Aktoren. Zur Vereinfachung wird man letztere deshalb oft trägheitslos, d.h. als kombinatorische Systeme approximieren.

Da die in der informationsverarbeitenden Komponente von mechatronischen Systemen einzusetzenden Funktionen Turing-berechenbar sein sollen und Turing-Maschinen selbst durch ereignisgesteuerte Automaten repräsentiert werden können (z.B. [11]), kann das Referenzmodell für ein mechatronisches System gemäß Bild 2 als *Superautomat* angesprochen werden. Diese, durch die Automatentheorie erreichte einheitliche Beschreibung für ein mechatronisches System darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, daß mit ihr *nicht* die Existenz einer allgemeinen Modelltheorie impliziert wird. Es existiert keine allgemeingültige formale Vorschrift zur Konstruktion von Übergangs- und Ergebnisfunktionen. Gleichwohl ist die einheitliche Repräsentation eine entscheidende Hilfe zur Entwicklung, Modellbildung und Simulation mechatronischer Systeme ([12]).

Rückgekoppelte Systeme, wie jenes in Bild 2 bilden die Grundlage der Regelungstechnik und sind seit langem bekannt. Den einfachen, rein mechanischen Fliehkraft-Drehzahlregler verwendete bereits James Watt (Patent N1432 vom 28. April 1784). Der entscheidende Unterschied zwischen klassischen und mechatronischen Systemen besteht darin, daß für den Regler bei letzteren informationstechnische Komponenten zum Einsatz kommen, während klassische Regler rein mechanisch und/oder elektrisch arbeiten. Neben der bereits erwähnten Möglichkeit zur Autonomie, lassen sich damit beliebig komplexe Steuerfunktionen sowie adaptive Systeme realisieren. Derartige Möglichkeiten bestehen ohne Einbeziehung der informationstechnischen Komponente nicht. Schließlich sind auch verteilte Systeme im wesentlichen nur mit mechatronischen Mitteln erreichbar.

In der klassischen Konstruktionsmethodik spielt der Wirkbegriff in seinen Ausprägungen Wirkbewegung, Wirkfläche, Wirkgeometrie, Wirkkörper, Wirkort, Wirkprinzip, Wirkstruktur und Wirkungsweise [3] eine herausragende Rolle. Faßt man diese Wirkbegriffe in einem abstrakten *Wirkvektor* zusammen, dann kann ein technisches System durch derartige Vektoren und entsprechende Vektorabbildungen gekennzeichnet werden. Der mechatronische Systemansatz erlaubt nun eine Modifikation dieses Wirkvektors. So können Wirkfläche, Wirkgeometrie, Wirkort, Wirkprinzip und Wirkungsweise erweitert oder verändert werden, wohingegen Wirkbewegung, Wirkkörper und (topologische) Wirkstruktur in vielen Fällen unverändert bleiben. Ein einfaches Beispiel für die Teilfunktion "Welle lagern" zeigt die Modifikationen beim Übergang von einer klassischen Gleitlagerung zu einem aktiven Magnetlager (vgl. Tabelle 1). Gegenüber der klassischen Lagerung weist die mechatronische Lagerung die fol-

genden Synergieeffekte auf: verschleiß-, wartungs- und schmiermittelfreie Lagerung und deutlich höhere zulässige Drehzahlen.

3 Mechatronische Produktstrukturen

Nach der Definition der Encyclopædia Britannica "besteht eine *Maschine* mindestens aus zwei Teilen, welche zwangsläufig miteinander verbunden sind und die dazu dienen, Kräfte und Bewegungen zu übertragen". Die Zwangsläufigkeit wird klassisch durch sogenannte *holonome* Zwangsbedingungen hergestellt. Holonome Zwangsbedingungen beschränken Lagerefreiheitsgrade eines Systems, sie können skleronom (zeitunabhängig) oder rheonom

Komponente des Wirkvektors	Klassisch holonomer Zwang	mechatronisch aktiv magnetisch
Wirkbewegung	Drehung	bleibt erhalten
Wirkfläche	Wellenbund - Lagerschale	Einschub eines magnetischen Feldes
Wirkgeometrie	Zylinderflächen	bleibt erhalten
Wirkkörper	Wellenabsatz, Lager	+ Feld + Spulen
Wirkort	NN	bleibt erhalten
Wirkprinzip	tribologischer Verbund	magnetischer Verbund
Wirkstruktur	NN	bleibt erhalten
Wirkungsweise	tribo. Abtragung der äußeren Belastung	magnetische Abtragung der äußeren Belastung

Tabelle 1 Vergleich des klassischen mit dem mechatronischen Wirkvektor

(zeitabhängig) sein. Sie werden durch algebraische oder integrierbar kinematische Beziehungen beschrieben. Die Lagerung einer Welle durch Gleitlager (vgl. Tabelle 1) ist durch derartige holonome Zwangsbedingungen gegeben. Im Gegensatz dazu wird bei der mechatronischen Lösung durch Aufbau eines magnetischen Feldes zwischen Welle und Lager eine *nichtholonome* Lagerung realisiert. Nichtholonome (skleronome oder rheonome) Zwangsbedingungen schränken nicht nur die Bewegungsfreiheit von Lagegrößen sondern zusätzlich auch jene von Geschwindigkeitsgrößen ein (z.B. [13]). Am Rande sei erwähnt, daß aus Sicht der Mechanik entscheidend dabei ist, daß die mathematische Form nichtholonome Zwangsbedingungen nicht integriert werden kann. Über die im mechatronischen Modell vorhandene informationsverarbeitende Softwarekomponente können beliebig komplexe nichtlineare nichtholonome Zwangsbedingungen realisiert werden, was mit klassischen Mitteln nicht bewerkstelligt werden kann.

4 Was also ist Mechatronik?

Die thematisch gestellte Frage, was denn nun Mechatronik sei, wird direkt durch die Forderungen "Rückkopplung und Synergie" und indirekt durch einen Katalog beantwortet, welcher diejenigen Kriterien aufzeigt, die Folge gewünschter und durch mechatronische Systeme realisierbarer Funktionen sind:

- Synergetische Integration generieren
- die Möglichkeit nichtlineare nichtholonome Zwangsbedingungen erzeugen
- Adaptivität erlauben
- Autonomie ermöglichen
- und auf verschiedene Systeme verteilbar sein.

5 Zusammenfassung

Ein mechatronisches Produkt oder ein mechatronischer Prozeß ist ein geregeltes System, dessen Regler auf Softwarebasis realisiert ist (Rückkopplung). Diese Aussage ist mit der eingangs erwähnten IEEE-Definition synonym. Dabei bildet der maschinenbauliche Teil der technischen Komponente das tragende Fundament. Nur die Mechanik und damit der *Maschinenbau* als ihre Realisierung kann Träger der Bewegung sein. Die *Elektrotechnik* kann im weitesten Sinne als Energielieferant betrachtet werden. Der wesentliche Part der *Informationstechnik* ist die Bereitstellung der für Synergieeffekte erforderlichen Intelligenz.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Isermann R. "Mechatronische Systeme - Grundlagen
Springer, 1999.
- [2] Schweiger W., Schön A. "Digital Mock-up bei der Entwicklung mechatronischer
Produkte. 8. Symposium Fertigungsgerechtes Konstruieren, H. Meerkamm (Hrsg.), S.
98-108, Okt. 1997.
- [3] Pahl G., Beitz W. "Konstruktionslehre, 4. Aufl."
Springer, 1997.
- [4] Koller R., Kastrup N. "Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte"
Springer 1998.
- [5] Flügge S. "Die nichtlinearen Feldtheorien der Mechanik"
Springer, 1965.
- [6] Müller I. "Thermodynamik - Grundlagen der Materialtheorie"
Bertelsmann Universitätsverlag 1973.
- [7] Valanis K. C. "Irreversible Thermodynamics of Continuous Media - Internal Variable
Theory"
CISM-Course 77, Udine Springer, 1971.
- [8] Miu D. K. "Mechatronics - Electromechanics and Contromechanics"
Springer 1993.
- [9] Neumann D. "Bausteine intelligenter Technik von morgen - Funktionswerkstoffe in der
Adaptonik", WBG-Darmstadt, 1995.
- [10] Schweiger W. "Modellbildung und Simulation in Konstrktion und Entwicklung"
Vorlesung an der Universität Eralngen-Nürnberg (unveröffentlichtes Manuskript).
- [11] Kämmerer W. "Einführung in die mathematischen Methoden der Kybernetik"
Akad. Verlag Berlin, 1974.
- [12] Schön A. "Konzept eines Assistenzsystems für die Entwicklung mechatronischer Pro-
dukte", dieses Symposium.
- [13] Schiehlen W., "Technische Dynamik"
Teubner, 1986.

Prof. Dr.-Ing. Willy Schweiger
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Martensstraße 9 - D-91058 Erlangen
Tel: xx49-9131-85-23222
Fax: xx49-9131-85-23223
Email: schweiger@mfk.uni-erlangen.de
URL: <http://www.mfk.uni-erlangen.de>