

PHYSIKALISCHE EFFEKTE, DIE FUNKTIONSGRÖßENMATRIX VON ROTH UND MECHATRONISCHE SYSTEME

Willy Schweiger, Jinghong Zhu

Zusammenfassung

Eine gegenüber der bestehenden Literatur nochmalige Beleuchtung des Begriffes "physikalischer Effekt" zeigt, daß gerade in Hinblick auf die Entwicklung mechatronischer Produkte die bestehenden Darstellungen noch nicht ausreichen.

Die F-Matrix von Roth bildet aufgrund ihrer physikalischen Basis eine hervorragende Ausgangssituation für entsprechende mechatronische Erweiterungen.

1 Einleitung

Für das Vorgehen in der Konstruktionslehre ist von entscheidender Bedeutung, ob es überhaupt ein physikalisches Geschehen gibt, welches die in der Aufgabenstellung gewünschte, anfangs rein formal ausgedrückte Beziehung in technischen Gebilden herstellt. Zunächst ist es dabei gleichgültig, ob dies "Geschehen" schon den Forderungen eines "Gesetzes", eines "Satzes" entspricht oder als "Effekt" formuliert wurde. In den folgenden Ausführungen wird daher immer nur vom "Effekt" gesprochen, ungeachtet dessen, ob ein Übergang zu einem allgemeingültigen Gesetz oder einem Satz möglich ist. - Das schreibt Karlheinz Roth über physikalische Effekte im ersten Band seiner Konstruktionslehre [1]. Nicht zuletzt und gerade in Hinblick auf die Entwicklung mechatronischer Systeme sei dennoch ein nochmaliges Aufgreifen dessen, was unter einem physikalischen Effekt verstanden werden soll, gestattet. Als Ausgangspunkt dienen die fundamentalen Beziehungen, durch welche jede Feldtheorie beschrieben wird. Dies gilt natürlich auch für die beiden allumfassenden Feldtheorien der Ingenieurwissenschaften: Mechanik einschließlich Thermodynamik und Elektrodynamik. Zusammen mit der Informatik sind es diese beiden Theorien, welche in einer engen Kopplung die systematischen Grundlagen für mechatronische Systeme bilden. Aus diesen Betrachtungen lassen sich Wünsche für eine Erweiterung der klassischen Konstruktionsmethodik im Falle der Entwicklung mechatronischer Systeme ableiten.

2 Die klassische Konstruktionsmethodik als Ausgangspunkt

Auf dem 8. Symposium wurde eine Erweiterung der klassischen Konstruktionsmethodik im Falle der Entwicklung mechatronischer Systeme vorgeschlagen [2]. Kernpunkt war dabei die Ergänzung des lösungsneutralen physikalischen Effektes durch Software im weitesten Sinne (Code, Chip, ASIC, FPGA etc.) zu einem sogenannten verallgemeinerten Effekt. Dabei erweist sich die frühe Einbindung der Informatik in den Konstruktionsprozeß sowie deren Position in diesem entscheidend.

Auf dem 11. Symposium wurde gezeigt [3], daß mithilfe der Informatik eine unendliche Mannigfaltigkeit von darstellbaren Funktionen möglich ist (die Menge der berechenbaren

Funktionen ist abzählbar unendlich und berechenbare Funktionen sind durch Turing-Maschinen darstellbar). Zusammen mit physikalischen Effekten entsteht dabei ein hohes synergetisches Potential. Synergismus kann bei der Entwicklung mechatronischer Systeme mit Recht gefordert werden.

Damit kann zunächst festgestellt werden, daß a) zur Entwicklung mechatronischer Produkte lediglich eine Erweiterung der klassischen Konstruktionsmethodik erforderlich ist und daß b) Synergiepotentiale durch physikalische Effekte *zusammen* mit der Informatik vorhanden sind. Bei der domänenübergreifenden Entwicklung mechatronischer Produkte wäre eine Klassifizierung physikalischer Effekte daher von hohem Interesse. Die Grundlagen eines derartigen Kataloges müssen aber zwangsläufig aus den physikalischen Gegebenheiten folgen, bzw. mit diesen kompatibel sein. Der folgende Abschnitt skizziert diese Gegebenheiten und zeigt auf, daß es im wesentlichen die Materialtheorie ist, welche als Ausgangspunkt für eine Klassifizierung physikalischer Effekte in Frage kommt.

3 Erinnerung an die Grundlagen der Feldtheorie

Jede Feldtheorie basiert auf drei fundamentalen Aussagen. Anhand der beiden Feldtheorien der Ingenieurwissenschaften, der Mechanik und der Elektrodynamik soll dieser Sachverhalt rekapituliert werden. Diese drei Aussagen betreffen die Kinematik, die Kinetik und die Konstitution (3K-Theorie). Diese drei Aussagen sind notwendig und hinreichend zur, wenigstens formalen Lösung der entsprechenden Feldgleichungen.

3.1 Kinematik

Die *Kinematik* beschreibt die raum-zeitliche Veränderung von Konfigurationen von Kontinua aufgrund äußerer Einwirkungen. Dazu bedient sie sich i.a. differential-geometrischer Methoden. Kennzeichnende Größen sind Verschiebungen, Geschwindigkeiten und die von diesen Feldern abgeleiteten Größen wie Deformationen, Wirbelfelder usw. Dabei unterscheiden sich Festkörper und Fluide durch die Existenz bzw. Nichtexistenz einer sogenannten Referenzkonfiguration. Daraus resultieren unterschiedlich mathematische Beschreibungsweisen, welche hier jedoch nicht weiter vertieft werden sollen. Die Ursachen einer derartigen Konfigurationsänderung sind dabei im Rahmen der Kinematik ebensowenig von Bedeutung wie der stoffliche Aufbau des jeweiligen Kontinuums. Maßgebend sind ausschließlich sinnvolle Beschreibungen der jeweiligen Konfigurationsmetriken.

3.2 Kinetik

Die *Kinetik* (Bilanzgleichungen, Erhaltungssätze) stellt den Zusammenhang zwischen den äußeren Einwirkungen auf einen Körper und den in seinem Innern hervorgerufenen Gegenreaktionen her. Diese Gegenreaktionen werden durch gedachte Schnitte freigelegt und stehen damit für eine Bilanzierung zur Verfügung. Es handelt sich im Falle von Festkörpern um die Navier-Lamé-Gleichungen, für fluide Kontinua um die Navier-Stokes-Gleichungen und im Falle der Elektrodynamik um die Maxwell-Gleichungen. Diese Gleichungen müssen als *Axiome* in die jeweilige Feldtheorie eingeführt werden. Falls mechanische und elektrodynamische Phänomene simultan auftreten existieren zwischen beiden Theorien entsprechende Kopplungen (Lorentz-Kräfte und Joule'sche Wärme). In beiden Theorien spielt der Begriff der Leistung eine entscheidende Rolle. Auf diese Tatsache wird in Abschnitt 4 kurz eingegangen.

3.3 Konstitution

Letztendlich ist jeder real ablaufende, konfigurationsändernde Vorgang von den, in diesem Vorgang involvierten Materialien abhängig. Die *Konstitution* ist für diese Materialbeschreibung verantwortlich. Damit kann die Konstitution oder Materialtheorie als Ursprung zur Beschreibung physikalischer Effekte betrachtet werden. Es sei jedoch besonders betont, daß nur die simultane Erfassung *aller* Beziehungen (Kinematik, Kinetik und Konstitution) zur Beschreibung realer Prozesse notwendig aber auch hinreichend sind. Erst durch diese Integration entstehen technisch verwertbare Effekte (vgl. Einleitung). Unter diesem Aspekt könnte man *physikalische Effekte* auch als zulässige, unter dem Diktat des Entropiesatzes ablaufende *thermodynamische Prozesse* bezeichnen. Es wird daher folgende Definition vorgeschlagen:

Ein (physikalischer) Effekt zur Realisierung einer Funktion beschreibt einen Ablauf oder Prozeß, mit der unabdingbaren Forderung, daß er die fundamentalen Gesetzmäßigkeiten (3K) einer spezifischen Domäne als Nebenbedingungen erfüllt.

Um der im Kontext mechatronischer Systeme notwendigerweise domänenübergreifenden Betrachtungsweise gerecht zu werden, sollen hier mechanisch-elektrische physikalische Effekte gemeinsam betrachtet werden, da es gerade diese Effekte sind, welche synergieträftig sind. Die folgende Tabelle [4] zeigt einen Ausschnitt aus den verschiedenen Kopplungsarten multifunktionaler Werkstoffe. Die Materialtheorie hat die Aufgabe, für diese Werkstoffe geeignete konstitutive Gleichungen zum Zwecke der Simulation bereitzustellen. Am Beispiel eines elektro-viskosen Fluides sei dies hier skizziert.

Wirkung Auslöse- phänomen	Thermisch	Optisch	Mechanisch	Feucht	Chemisch	Elektrisch
Wärme	Unterkühlte Schmelzen	Thermochrome Elemente	Bimetall Memory- Elemente			
Licht	Solarzellen	Photochrome Elemente	Photokon- traktion			Aktive Photoarrays
Mechanik			Rheopexe Fluide Thixotrope Fluide Magnetische Fluide			
Feuchte	Hydrochrome Elemente			Goretex		
Chemische Reaktion	Chemochrome Elemente	Insulin-Depot			Hefen Katalysatoren	
Magnetfeld			Magnetovis- kose Fluide			Wiegand- draht
Röntgen- strahlen	Speicher- leuchtstoffe					
Elektrische Energie	Kaltleiter	Aktive Displays	Elektroviz- kose Fluide			Heißleiter Varistor

Tabelle 1: Ausgewählte multifunktionale Materialien (Quelle: Siemens AG) nach [4]

In einer gekoppelten mechanisch-elektrodynamischen Materialbeschreibung werden die Größen: Spannungstensor σ , Wärmestromdichtevektor q , innere Energie u , Polarisation P , Magnetisierung M , Strom der freien Ladungen J und die Dichte der freien Ladungen Q an einer Stelle x eines Kontinuums zur Zeit t von den Werten der Dichte ρ , der Verschiebung v , der Temperatur T , der elektrischen und magnetischen Feldstärke E und H in diesem Punkt abhängen, *aber auch ein wenig von den Werten dieser letztgenannten Felder in der Umgebung von x und deren Vergangenheit. Dann müssen diese Werte durch Gradienten und Zeitableitungen dieser Felder berücksichtigt werden [5, 6]. Damit ergibt sich folgende Materialgleichung für dielektrische, magnetisierbare, einfache wärmeleitende Flüssigkeiten (aus [5] modifiziert):*

$$(1) \quad C \in (\sigma, q, u, P, M, J, Q); C = \Psi(\rho, v, \partial_t v, \nabla v, T, \partial_t T, \nabla T, E, \partial_t E, \nabla E, H, \partial_t H, \nabla H)$$

Die konstitutiven Gleichungen koppeln die sogenannten beobachtbaren Variablen (verallgemeinerte Kräfte, field intensities) Dichte, Verschiebung, Temperatur, E- und H-Feld und ihren zeitlichen Ableitungen und Gradienten mit den (in den Erhaltungssätzen auftretenden), durch sie im Körper hervorgerufenen Wirkungen (verallgemeinerte Flüsse, flux densities); kurz: Verallgemeinerte Kräfte bewirken verallgemeinerte Flüsse.

Mit den in der Materialtheorie bekannten Forderungen [5] lautet z.B. die Materialgleichung für den Spannungstensor in einem (nicht-Newtonschen) elektroviskosen Fluid als Spezialfall von (1)

$$(2) \quad \sigma = -p + 2\mu(T, E) \partial_t \epsilon$$

Hierin sind p der hydrostatische Druck, $\partial_t \epsilon$ der Tensor der Deformationsgeschwindigkeiten und μ die von der Temperatur und vor allem von der elektrischen Feldstärke abhängigen Viskosität des Fluides. Dieses Beispiel zeigt deutlich, die starke Kopplung zwischen mechanischen und elektrischen Eigenschaften multifunktionaler Werkstoffe. Im mechatronischen Kontext müssen derartige Kopplungen in jedem Falle beachtet werden. Eine möglichst vollständige Zusammenstellung derartiger Effekte ähnlich zu Tabelle 1 wäre aus der Sicht der Entwicklung mechatronischer Systeme sehr erwünscht.

4 Die Funktionsgrößenmatrix von ROTH

Sowohl bei Roth [1] als auch bei Koller/Kastrup [7] findet man systematische Ansätze zur Unterstützung der konstruktiven Arbeit des Produktentwicklers. Bei Koller/Kastrup ist es ein umfangreicher *Prinzipienkatalog*, bei Roth die sogenannte *Funktionsgrößenmatrix*. In beiden Fällen liegt aber eine Mischung kinematischer, kinetischer und konstitutiver Phänomene vor. Die durch den Aufbau der Feldtheorie geforderte Zuordnung ist nicht vorhanden. Dies soll expressis verbis in keiner Weise das Verdienst dieser Forscher zur Erarbeitung der vorgelegten Systematik schmälern.

Besticht der Koller/Kastrupsche Prinzipienkatalog durch seine Fülle - es sind insgesamt 359 sogenannter Effekte in [7] aufgelistet - liegt der Reiz der Rothschen Funktionsgrößenmatrix (im weiteren mit F-Matrix abgekürzt) in der Verwendung des in der gesamten Physik fundamentalen Begriffs der Leistung (vgl. Duden: Effekt = Wirkung, Erfolg, *Leistung*). Zwei Aspekte der F-Matrix fallen auf: a) es existiert eine, von den Verfassern genannte *Clausius-Duhem-Grenze*, welche den Bereich der irreversiblen Prozesse leer läßt und b) Materialbeziehungen tauchen überhaupt nicht auf (lineare Wärmeausdehnung ist ebenso wenig zu finden wie z.B. elektroviskose Fluide). Die F-Matrix bildet dennoch die Grundlage der sogenannten Bondgraphen, welche nichts anderes als Leistungsflüsse in Systemen

darstellen (näheres in [8]) und somit sowohl in mechanischen als auch in elektrodynamischen Systemen zur Modellbildung eingesetzt werden können.

Eine Erweiterung der F-Matrix um eine konstitutive Komponente würde eine räumliche Struktur erfordern. Ein ähnlicher Vorschlag wurde in [9] vorgestellt. Dort wurde gezeigt, daß eine räumliche Anordnung notwendig, aber auch hinreichend ist. Die Begründung ist einfach, sie folgt direkt aus den drei tragenden Säulen Kinematik, Kinetik und Konstitution. Eine Clausius-Duhem-Grenze ist ebenfalls nicht zwingend. In zulässigen Materialbeschreibung wird der Einhaltung des Entropiesatzes (Imperativ des 2. Hauptsatzes) bereits Rechnung getragen.

5 Referenzen

- [1] Roth K., Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Bd. 1, Konstruktionslehre, 2. Aufl., Springer 1994.
- [2] Schweiger, W.; Schön, A.: Digital Mock-up bei der Entwicklung mechatronischer Produkte. 8. Symposium "Fertigungsgerechtes Konstruieren", (Ed. Meerkamm), Schnaittach, Oktober 1997.
- [3] Schweiger, W.: Was ist Mechatronik? In: H. Meerkamm (Hrsg.): Design for X - Beiträge zum 11. Symposium, Schnaittach, 12./13. Oktober 2000.
- [4] Neumann D., Bausteine intelligenter Technik von Morgen - Funktionswerkstoffe in der Adaptronik, WBG-Darmstadt, 1995.
- [5] Müller I., Thermodynamik - Grundlagen der Materialtheorie, Bertelsmann Universitätsverlag, 1973.
- [6] Müller I., Zur Thermodynamik irreversibler Prozesse, Chem. Ing. Technik, (72), S. 194 - 202, 2000.
- [7] Koller R., Kastrup N., Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte, 2. Aufl., Springer 1998.
- [8] Schön A., Konzept und Architektur eines Assistenzsystems für die mechatronische Produktentwicklung, Diss. Universität Erlangen-Nürnberg, 2000.
- [9] Schweiger W.; Löffel, Ch.: Computational Methods in Design - An ordering Scheme. Proc. ICED 97, Tampere, Vol. 3, pp 91-96, 1997.

Prof. Dr.-Ing. Willy Schweiger
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Prof. Dr.-Ing. Harald Meerkamm
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Martensstraße 9, D-91058 Erlangen
Fon: xx-49-9131-85-23222
Fax: xx-49-9131-85-23223
Email: schweiger@mfk.uni-erlangen.de
URL: <http://www.mfk.uni-erlangen.de>

Dr.-Ing. Jinghong Zhu
Anschrift wie vor
Fon: xx-49-9131-85-23224
Fax: xx-49-9131-85-23223
Email: zhu@mfk.uni-erlangen.de
URL: <http://www.mfk.uni-erlangen.de>