

## MECHATRONISCHER LEICHTBAU

Willy Schweiger

### Kurzfassung

Mechatronischer Leichtbau erlaubt die Unterschreitung von Grenzwerten des konventionellen Leichtbaus. Der hierzu erforderliche instrumentelle Aufwand (Sensoren, Aktoren, Regler) steigt aber rasch an. Darüber hinaus ist der Produktentwickler mit einer Reihe zusätzlicher Schwierigkeiten bei der Auslegung derartiger Strukturen konfrontiert. Bei entsprechend hohen Stückzahlen oder bei besonders schwierigen Kampagnen (z.B. in der Raumfahrt) verfügt mechatronischer Leichtbau sicher überein erhebliches Zukunftspotential.

### 1 Einleitung

Würde man ein Optimierungsproblem mit der Zielfunktion *Gewichtsreduktion einer elastischen Struktur* lösen, dann würde ein entsprechender Algorithmus die zur Variation freigegebenen geometrischen Design-Parameter sukzessive zu Null machen. Eine derartige Struktur würde beliebig große Deformationen erleiden und nicht mehr tragfähig sein. Um dies zu verhindern werden entsprechende Nebenbedingungen oder Restriktionen – meist in Form von Ungleichungen – definiert, welche das Optimierungsproblem auf ein restringiertes Problem einschränken. Man wird z.B. verlangen, daß bestimmte Verschiebungen nicht überschritten werden dürfen oder dynamische Vorgänge den angestrebten Einsatz einer Struktur nicht vereiteln.

Diese Restriktionen bestimmen damit die natürlichen Grenzen von strukturinhärenten Leichtbaustrategien. Weitere Gewichtsreduktionen sind dann weder mit formgebenden Maßnahmen noch durch Wahl anderer Materialien möglich.

Die Strategie des *mechatronischen Leichtbaus* besteht nun darin, zur weiteren Gewichtsreduktion eine bestimmte Überschreitung der genannten Restriktionen in Grenzen zuzulassen. Das dadurch entstehende Fehlverhalten der Struktur (z.B. zu große Schwingungsausschläge, zu geringe Positioniergenauigkeit in einer bestimmten Zeit, usw.) muß dann durch geeignete Eingriffe annulliert werden. Geeignete Eingriffe basieren dabei auf der Messung des raumzeitlichen Verhaltens der Struktur (Sensorik) und einer rechnerunterstützten Verarbeitung dieser Meßdaten, um daraus die erforderlichen Eingriffe zu generieren (Aktorik). Mechatronischer Leichtbau ist also durch den Übergang eines einfachen Eingabe/Ausgabe-Systems mit gewichtsoptimierter Struktur zu einem geregelten System mit Möglichkeiten zu weiterer Gewichtsreduktion gekennzeichnet. In der Thematik des IUTAM-(International Union of Theoretical and Applied Mechanics)-Symposiums 2000 heißt es dazu: "Synergistic integration of smart materials, structures, sensors, actuators and control electronics has redefined the concept of structures from a conventional passive elastic system to an active structronic systems with inherent self sensing, diagnosis and control capabilities". Synonym für mechatronischen Leichtbau findet man auch die Bezeichnungen *weicher Maschinenbau*, *smart structures*, *structronic systems* u.ä.

## 2 Zwei Beispiele zur Motivation

### 2.1 Bestückautomaten

Zur Bestückung von Leiterplatten mit elektronischen Komponenten werden sogenannte Bestückautomaten eingesetzt. Bild 1 zeigt den sogenannten Kopf einer derartigen Maschine. Der Kopf verfügt über drei translatorische Freiheitsgrade, während die kardanische Aufhängung der zu bestückenden Leiterplatte zwei weitere rotatorische Freiheitsgrade beiträgt. Über diese fünf programmgesteuerten Freiheitsgrade werden die elektronischen Bauelemente aufgenommen und auf der Leiterplatte entsprechend platziert. Grobe Anhaltswerte für solche Maschinen sind: Bestückleistung ca. 50.000 Bauelemente pro Stunde bei einer Positioniergenauigkeit von etwa 50  $\mu\text{m}$ . Wunsch ist es, diese Bestückleistung zu verdreifachen, bei gleichzeitiger Verbesserung der Positioniergenauigkeit auf 10  $\mu\text{m}$ .



Bild 1: Bestückautomat (Quelle FAPS)

Zur Bewältigung der bei diesen hohen Taktfrequenzen auftretenden Beschleunigungen des Bestückkopfes müssen die bewegten Massen entsprechend gering sein. Andererseits verlangt die hohe Positioniergenauigkeit eine möglichst steife Konstruktion, welche aber in den meisten Fällen nur durch Hinzunahme von gewichtserhöhenden Versteifungen erreichbar ist. Beide Forderungen stehen also zueinander im Widerspruch.

Mechatronischer Leichtbau erlaubt nun die gewünschte Massenreduktion, die nicht zuletzt auch aus der Sicht der Antriebe notwendig ist, und nimmt dabei auch nicht vermeidbare Steifigkeitsverluste in Kauf. Die korrekte Funktion der Maschine wird dadurch gewährleistet, daß die Positionen des Bestückkopfes (und eventuell zeitliche Ableitungen davon) gemessen werden und mit diesen Meßwerten entsprechende Steuersignale für den Bestückkopf berechnet werden. Da die gesamte Anordnung eine hochelastische Struktur mit niedrigen Eigenfrequenzen ist, ist ein sogenanntes *Beobachtermodell* der Kopfes und der kardanischen Leiterplattenaufhängung erforderlich. Bei einem derartigen Beobachtermodell handelt es sich im einfachsten Fall um ein mechanisches Modell der elastischen Bestückstruktur.

Im Zuge der Anwendung einer mechatronischen Leichtbaustrategie folgt aber sofort die Forderung nach einer *Echtzeitfähigkeit* des Beobachters. Ohne diese ist an die genannte Steigerung der Leistungsdaten einer solchen Maschine nicht zu denken. Weiter ist zur Erreichung der Positioniergenauigkeit ein möglichst detailliert modellierter Beobachter notwendig, der seinerseits zu großen numerischen Modellen führt. *Modellreduktion* ist damit unumgänglich.

## 2.2 Raumfahrstrukturen

Extremer Leichtbau ist in der Raumfahrttechnik eine *conditio sine qua non*. Bei vielen Strukturkomponenten treten dabei zum Teil erhebliche Abmessungen auf. „Die geringe inhärente Strukturdämpfung kann in Verbindung mit der fehlenden Dämpfung eines Umgebungsmediums Probleme verursachen, wenn hohe Positioniergenauigkeiten für Antennen u.ä. erforderlich sind. Dies erfordert geeignete Maßnahmen zur Schwingungsunterdrückung [3]“. Bild 2 zeigt ein Labormodell einer derartigen Antennenstruktur in Form eines Gittermastes.

Bei dieser Struktur werden unerwünschte dynamische Zustände während der Positionierung der Antennen durch semi-aktive Reibelemente an den Gitterknoten (Meroform-Knoten) reduziert. Auch hier muß durch geeignete Modellreduktion für ein handhabbares Simulationsmodell gesorgt werden.

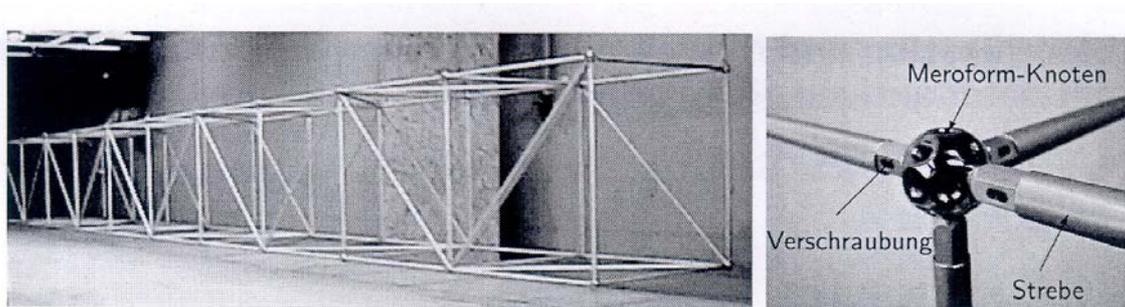


Bild 2: Experimentelle Gittermaststruktur

## 3 Grenzen des mechatronischen Leichtbaus

Mechatronischer Leichtbau kann nicht beliebig weit getrieben werden. Zum einen benötigen elastische Strukturen eine minimale Tragfähigkeit (ein Stanniolstreifen kann nicht mehr auf Biegung belastet werden), zum anderen steigt der Aufwand für Sensorik und Aktorik unsinnig hoch an. Der Bereich jenseits konventioneller Strukturen ist also begrenzt.

Ein aus der Literatur bekanntes, noch übersichtliches Beispiel ist der mechatronische Kragträger nach Bild 3 [2].

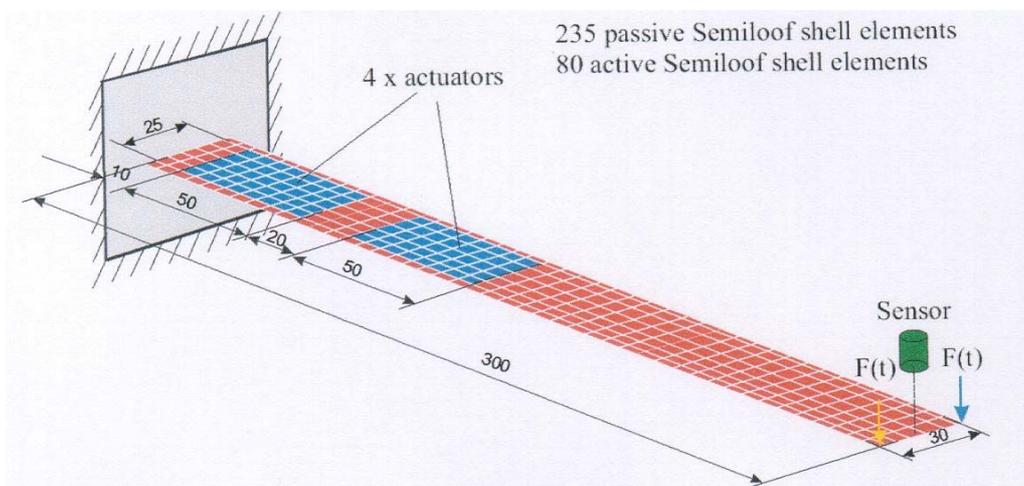


Bild 3: Aktiv geregelter Biegebalken

Die Regelung dieser einfachen Struktur erfolgt struktureseitig über ein Finite-Elemente-Schalenmodell und kontrollseitig über einen Simulink-Controller entsprechend Bild 4 [2].

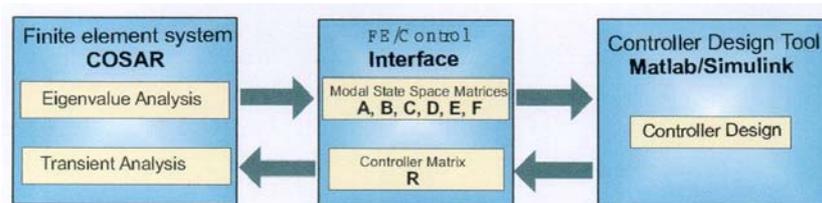


Bild 4: FE-Modell und Regelung

Bereits diese sehr einfache Struktur läßt erahnen, welcher Preis für mechatronischen Leichtbau zu zahlen ist. Die daraus resultierenden Probleme für den Produktentwickler werden im folgenden Abschnitt skizziert.

## 4 Probleme für den Produktentwickler

### 4.1 Definition einer reduzierten Tragfähigkeit

Will man zum Zwecke einer weiteren Gewichtsreduktion eine mechatronische Lösung einsetzen, erhebt sich die Frage nach einer geeigneten zulässigen Reduktion der Tragfähigkeit durch Verminderung des Materialeinsatzes. Ein möglicher Ansatz wäre die Zulassung größerer Deformationen, jedoch unter Beibehaltung nach wie vor stabiler Systemzustände. Es wird sicher zu fordern sein, daß die unregelmäßige Struktur gerade noch nicht kollabiert (z.B. infolge Beulens), auch wenn dabei unerwünscht hohe Deformationen auftreten.

Für den Produktentwickler ergeben sich daraus drei neue Anforderungen:

- a) Festlegung einer sinnvollen Tragfähigkeit, also die Angabe zulässiger Deformationen jenseits der konventionellen Dimensionierung,
- b) Ständige Überwachung der Systemstabilität als Grenze einer mechatronischen Strukturauslegung
- c) Erstellung entsprechender datenreduzierter Strukturmodelle (vgl. Abschnitt 5) zur Sicherstellung ihrer Echtzeitfähigkeit.

### 4.2 Aktor-Sensor-Platzierung

Eine korrekte räumliche Platzierung der Sensor- und Aktorkomponenten in einer mechatronischen Leichtbaustruktur stellt eine erhebliche Anforderung an die Entwicklung dar. Nur eine richtige Platzierung garantiert die Steuer- und Beobachtbarkeit (dies sind bestimmte Anforderungen an die Systemmatrizen, z.B. [1]) des zu regelnden Systems. Diese Fragestellung steht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Modellreduktion. Letztere bedarf sogenannter Dominanzmaße, welche angeben, welche Eigenformen einer Struktur dominant sind und daher als Ordnungsparameter (im Sinne des Haken'schen Versklavungsprinzips, [4]) anzusehen sind.

Im oben gezeigten Beispiel eines aktiv geregelten Biegebalkens werden der Sensor an der Stelle der größten vertikalen Verschiebung und die Aktoren im Bereich der größten Balkenkrümmung installiert. Es ist leicht einzusehen, daß für reale Ingenieurstrukturen eine derartige Auswahl erheblich schwieriger sein wird. Eine sorgfältige Strukturanalyse (Modalanalyse)

liefert hierfür die erforderlichen Hinweise. Der Produktentwickler muß dabei sehr wahrscheinlich durch einen Strukturmechaniker unterstützt werden.

## 5 Modellreduktion

Es wurde bereits mehrfach auf den Zwang zur Modellreduktion hingewiesen. Um möglichst nahe an Grenzwerte heranzukommen, wird man versuchen, die Strukturen in einem ersten Schritt so genau wie möglich zu modellieren. Dies bedeutet aber allemal die Erstellung eines entsprechenden Finite-Elemente-Modells. Dabei werden aber schnell Modelle mit einer hohen Anzahl  $N$  von Freiheitsgraden entstehen und damit die Lösung entsprechend großer Gleichungssysteme notwendig. Eine gezielte, „möglichst starke“ Reduktion der Anzahl der Freiheitsgrade von  $N$  auf  $M$  mit  $M \ll N$  ist daher in jedem Falle geboten. Glücklicherweise zeigt sich bei vielen Aufgabenstellungen, daß derartige Reduktionen teilweise tatsächlich eine drastische Verringerung der Freiheitsgrade erreichen.

Eine Reihe von Verfahren (modale Basis, Lanczos Basis, Karhunen-Loève Basis, näheres z.B. [5]) beruht auf der sogenannten projektionsbasierten Modellreduktion. Die entscheidende Strategie zur Ordnungsreduktion ist dabei die *Projektion des Zustandsraumes auf Unterräume niedrigerer Dimensionalität*. An dieser Stelle soll nur die modale Reduktion für den Fall linearer zeitinvarianter Systeme skizziert werden. Es handelt sich dabei um das Litz'sche Verfahren (das weitere siehe [1]).

Vorgelegt sei eine lineare zeitinvariante Zustandsgleichung

$$\dot{\bar{x}} = A\bar{x} + B\bar{u} \quad (1)$$

mit konstanten Matrizen  $A$  (Systemmatrix vom Typ  $(N,N)$ ) und  $B$  (Steuermatrix vom Typ  $(N,P)$  mit  $P < N$ ). Die Zahl  $N$  wird als Ordnung des Systems bezeichnet (= Dimension des Zustandsraums). „Der Grundgedanke der modalen Ordnungsreduktion ist: Man behält von den sämtlichen Eigenwerten des Originals nur die dominanten, d.h. jene für das Zeitverhalten maßgebenden, bei und baut aus ihnen das reduzierte Modell auf.“ Ausgangspunkt ist eine Transformation von (1) auf Diagonalform. Dazu wird eine modale Transformation

$$\bar{x} = V\bar{z} \quad (2)$$

mit einer zeitunabhängigen sogenannten Modalmatrix  $V$  eingeführt. Setzt man dies in (1) ein, so ergibt sich (Jordan'sche Normalform)

$$\dot{\bar{z}} = V^{-1}AV\bar{z} + V^{-1}B\bar{u} = \Lambda\bar{z} + \hat{B}\bar{u} \quad (3)$$

Satz: Ein Eigenwert und ein Eigenvektor einer Quadratmatrix  $A$  sind ein Skalar  $\lambda$  und ein Vektor  $v$ , derart daß die Gleichung

$$(\lambda E - A)v = 0 \quad (4)$$

erfüllt ist. Mit den Eigenwerten als Komponenten einer *Diagonalmatrix*  $\Lambda$  und der Matrix  $V$  mit den entsprechenden Eigenvektoren als Spalten gilt

$$V\Lambda = AV$$

Ist  $V$  regulär, so ergibt sich die Eigenwertzerlegung zu

$$A = V\Lambda V^{-1} \text{ bzw. } \Lambda = V^{-1}AV = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n) \quad (5)$$

Mithilfe eines geeigneten Kriteriums ermittelt man die dominanten Eigenwerte. Gl. (3) kann dann in zwei Gleichungen aufspalten werden

$$\dot{\vec{z}}_1 = \Lambda_1 \vec{z}_1 + \hat{B}_1 \vec{u} \text{ für den dominanten Anteil} \quad (6.1)$$

$$\dot{\vec{z}}_2 = \Lambda_2 \vec{z}_2 + \hat{B}_2 \vec{u} \text{ für den nichtdominanten Anteil} \quad (6.2)$$

Die Ordnungsreduktion besteht nun einfach darin, den nichtdominanten Teil (6.2) wegzulassen. Das reduzierte Modell wird dann durch die verbleibende Differentialgleichung (6.1) repräsentiert. Da  $M < N$  ist, ist tatsächlich eine Ordnungsreduktion vorhanden.

Kriterien zu Ermittlung der *dominanten Eigenwerte* sind entweder der spektrale Vergleich „Eigenwertspektrum versus Anregungsspektrum“ oder die sogenannten Litz'schen Dominanzmaße ([1]). Bei letzteren handelt es sich um Bewertungen der Systemantworten infolge Anregung durch Sprungfunktionen. Der Vorteil des Litz'schen Verfahrens besteht in einer Aussage über den verbleibenden nichtdominanten Rest. Dazu werden die „nichtdominanten Modalkoordinaten durch Linearkombinationen der dominanten Modalkoordinaten approximiert“.

## 6 Literatur

- [1] Föllinger O.: Regelungstechnik. Hüthig 1990.
- [2] Gabbert U., Trajkov T., Köppe H.: Modelling, Control and Simulation of piezoelectric smart Structures using Finite Element Method and optimal LQ Control. Facta Universitatis, Vol. 3, No. 12, 2002.
- [3] Gaul L., Albrecht H., Wirtzinger J.: Identifikation und Modellreduktion einer Gittermaststruktur mit semi-aktiven Reibverbindungen.  
<http://www.mecha.uni-stuttgart.de/Mitarbeiter/Wirtzinger/papers/beitragVDI02.pdf>
- [4] Haken, H.: Advanced Synergetics. Springer Verlag, 1983.
- [5] Meyer M.: Reduktionsmethoden zur Simulation des aeroelastischen Verhaltens von Windkraftanlagen. Diss. TU-Braunschweig, 2002.

Prof. Dr.-Ing. Willy Schweiger  
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik  
FAU Erlangen-Nürnberg  
Martensstraße 9, D-91058 Erlangen  
Tel: +49-9131-85-23221  
Fax: +49-9131-85-23223  
Email: [schweiger@mfk.uni-erlangen.de](mailto:schweiger@mfk.uni-erlangen.de)  
URL: <http://www.mfk.uni-erlangen.de>