

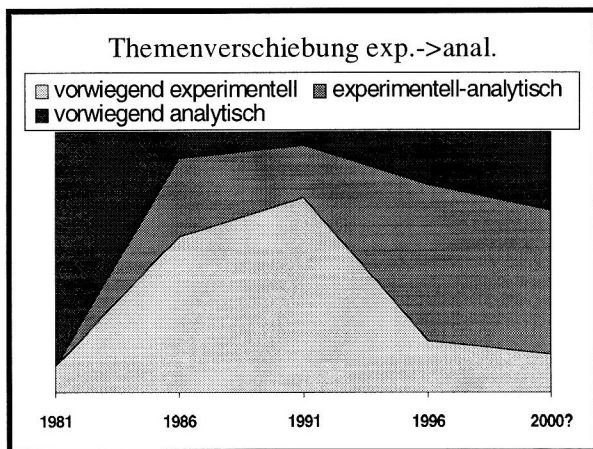
Wege eines Abtrünnigen oder Zurück zu den analytischen Verfahren

T. Vasel

Der typische Absolvent eines Studiums in der Fachrichtung Angewandte Mechanik der Otto-von-Guericke-Universität wird sich höchstwahrscheinlich um eine Arbeit in einer Berechnungsabteilung bemühen. Vor allem die Finite Elemente Methode bildet seit etlichen Jahren einen deutlichen Forschungs- und auch Ausbildungsschwerpunkt.

Der Autor dagegen beschäftigte sich bereits während seines Studiums in Magdeburg vor allem mit experimentellen Methoden, wie sie am Lehrstuhl für Experimentelle Mechanik im Mittelpunkt stehen. In den vergangenen Jahren, während der Tätigkeit für die Firma LMS GmbH, verschob sich der ursprüngliche Arbeitsschwerpunkt aber zunehmend. Inhalt der folgenden Abhandlung ist ein Versuch, die Art und die Ursachen dieses Wandels aufzuzeigen, das insbesondere deshalb, weil sich hier nach Ansicht des Autors ein typischer Trend in den Entwicklungs- und Versuchsabteilungen großer Unternehmen in Deutschland und weltweit zeigt.

Der Versuch, den Anteil verschiedener Themengebiete an der eigenen Arbeitszeit einmal grafisch darzustellen, könnte in etwa den dargestellten Verlauf ergeben.



1991, mit Beginn der Tätigkeit für die Firma LMS, verschob sich das Tätigkeitsgebiet zunächst deutlich in Richtung reiner Meßdatenauswertung, verglichen mit der vorherigen, doch stärker theoretisch gefärbten Arbeit am Lehrstuhl Experimentelle Mechanik der TU Magdeburg. Interessant ist der Zeitraum ab etwa 1993. Analytische und experimentell-analytische Verfahren werden zunehmend von den vorhandenen und den Neukunden eingesetzt und müssen betreut werden. Anhand der zu bearbeitenden Aufgabenstellungen und angesichts der aktuellen Forschungsarbeiten zur Implementierung neuer Verfahren in anwendbare Rechenprogramme läßt sich abschätzen, daß der Trend hin zu mehr analytischen Verfahren sich noch weiter fortsetzen,

aber die experimentellen Methoden nicht vollständig verdrängen wird. Vielmehr wird der zukünftige Schwerpunkt in der Verknüpfung von experimentellen und analytischen Methoden gesehen.

Die verwendete Einteilung der Verfahren soll erläutert werden:

Vorwiegend experimentell:

Meßdateninterpretation, also z.B. Ausdruck von Meßkurven, statistische Datenanalyse, Datenmanipulationen, Transformationen (z.B. Fouriertransformation), Animation und Datenvisualisierung (z.B. flächige Darstellung von Schallfeldern), aber auch Verfahren zur Gewinnung mathematischer Modelle, z.B. Modalanalyse, Schock-Analyse u.a.

Vorwiegend analytisch:

Z.B. Berechnung von Schallfeldern auf der Basis von berechneten oder gemessenen Oberflächenschwingungen, Lebensdauerberechnungen, FE-Modell-basierte Empfindlichkeitsuntersuchungen oder Variantenrechnungen u.a.

Experimentell-analytisch:

Verknüpfung Verwertung von Meßdaten mit analytischen Modellen, z.B. meßdatenbasierte Empfindlichkeitsuntersuchungen und Modifikationsrechnungen, Verknüpfung, Vergleich und Abgleich von experimentellen und FE-basierten Schwingungsmodellen, Transformation von gemessenen Schallfeldern u.a..

Der aufgezeigte Trend hat zwei Ursachen:

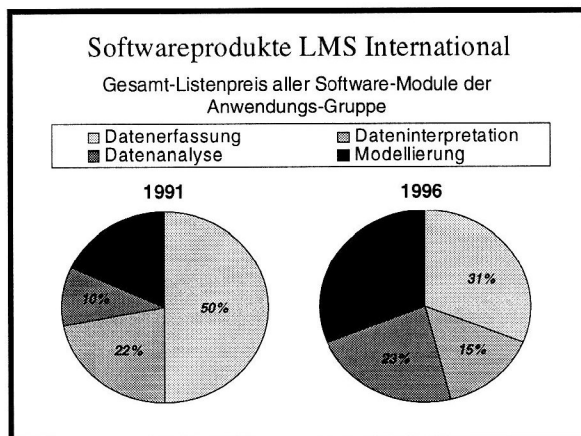
1. Die Einsicht, daß eine zeitgemäße Produktentwicklung nur dann möglich ist, wenn bereits in der Entwurfsphase eine weitgehende Einbeziehung des Versuches realisiert wird, wenn gegenseitige Einflußnahme von Berechnung und Versuch ermöglicht wird und wenn die Leistungsfähigkeit beider Abteilungen zusammengeführt wird.

2. Die Verfügbarkeit derartiger Verfahren als kommerzielle Produkte mit zunehmender Einfachheit der Anwendung und verbesserter Leistungsfähigkeit. Dazu kommt die Verfügbarkeit eines Erfahrungspotentials bei der Anwendung dieser Verfahren seitens der Forschung, rechnerischen Implementierung und Anwendung, das häufig in zentralen Forschungsprojekten zusammengeführt wird.

Die Firma Leuven Measurements and Systems beschäftigt sich als Softwarehaus und Systemintegrator und seit kurzem auch als Hardware-Hersteller mit der rechnergestützten Meßdatenanalyse und durch das Tochterunternehmen NIT auch mit der rein analytischen Beschreibung von vibro-akustischen Eigenschaften dynamischer Systeme. Der Schwerpunkt liegt auf der Implementierung von Verfahren in Form von Rechenprogrammen, aber es werden auch Forschungen zu neuen Methoden durchgeführt. Das geschieht zum einen durch enge Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen, zum anderen aber auch in einer Reihe durch die EG gestützter zentraler Forschungsprojekte, in denen auch die Anwender dieser Technologien mitwirken.

Durch die Struktur der Firma als weltweiter Systemlieferant können Trends in einer Reihe wichtiger Industriebereiche relativ gut abgeschätzt werden.

Einen Schwerpunkt bilden dabei vor allem der Automobilbau und seine Zulieferer (weltweit zählen alle wichtigen Hersteller zu den Kunden), aber auch in der Luft- und Raumfahrt nimmt LMS auf dem Gebiet Vibroakustik eine Schlüsselstellung ein.



Typisch für die Verschiebung der Aktivitäten von LMS in den letzten Jahren ist die Verfügbarkeit von Software für die einzelnen Anwendungsgruppen. Es zeigt sich hier eine deutliche Verschiebung von der reinen Datenerfassung hin zur anspruchsvollen Datenanalyse und Kopplung mit analytischen Modellen, wobei dieser Trend lediglich eine überproportionale Steigerung dieser analytisch orientierten Software-Module bedeutet. Auch die reine Datenerfassung und Dateninterpretation ist durch eine Reihe neuer Verfahren erweitert worden, die teilweise erst durch die Anwendung komplizierter mathematischer Verfahren möglich wurden.

Daß verfügbare Software kein Selbstzweck ist, dürfte ebenfalls klar sein. Eine Untersuchung der beim Kunden eingesetzten Software zeigt denselben Trend: Ausbau der Möglichkeiten der Datenerfassung, aber überproportionale Steigerung der Anwendung von anspruchsvollen analytisch orientierten Verfahren.

Eine klare Zuordnung eines Verfahrens zu den experimentellen oder analytischen Methoden ist in den meisten Fällen nicht möglich. Das würde aber auch gerade dem Sinn der gegenwärtigen Entwicklung widersprechen: der zunehmenden Verschmelzung beider Gebiete. Dieses Übergangsgebiet, in dem Meßdaten einen Teilaspekt eines anspruchsvollen mathematischen Modells bilden, wollen wir hier mit „Modellierung“ beschreiben.

Welche Verfahren stehen für die „Modellierung“ zur Verfügung?

Interessant ist ein Überblick über die derzeit bekannten und mehr oder weniger praktisch einsetzbaren Verfahren zur „Modellierung“ vibroakustischer Phänomene.

Ein solcher Überblick soll im folgenden versucht werden. Ebenfalls wird versucht, darzustellen, wie der gegenwärtige Stand bei der Implementierung der einzelnen Methoden ist, in welche Richtungen an ihrem Ausbau gearbeitet wird und welche Fortschritte bei der Umsetzung in den nächsten Jahren zu erwarten sind.

Definition der Aufgabenstellung „Hybride Modellierung“:

Versuchen wir eine Definition über die einzelnen Teilgebiete, die dieser Aufgabenstellung zugeordnet werden sollten:

- Response Synthesis & Contribution Analysis
- Response Analysis
- Load / Force Evaluation
- Sensitivity Analysis
- Interactive Model Modification & Substructuring
- Interactive Optimization

Sehen wir uns die Teilgebiete im Einzelnen an:

Response Synthesis & Contribution Analysis

= Berechnung von Systemantworten aufgrund vorgegebener Anregung sowie Quantifizierung der Anteile einzelner Übertragungswege bzw. einzelner dynamischer Eigenschaften an der Systemantwort

Was ist an Software verfügbar?:

- „Forced Response Calculation“
Basiert auf modalen vibro-akustischen Modellen, die experimentell (vibro-akustische Modalanalyse) oder analytisch gewonnen werden
Anwendung im unteren Frequenzbereich
- „Transfer Path Analysis“ & „Road Noise Analysis“
Basiert auf gemessenen vibro-akustischen Übertragungsfrequenzgängen und gemessenen oder berechneten Anregungen
Ermöglicht Variantenrechnungen: Ausklammern einzelner Übertragungspfade
Anwendung im mittleren Frequenzbereich
- „Statistical Energy Analysis“
Basiert auf gemessenen vibro-akustischen Übertragungsfrequenzgängen und gemessenen oder berechneten Anregungen
Anwendung im hohen Frequenzbereich

Es fällt hier ein Trend hin zu mehr globalen Betrachtungen, dafür aber zu höheren Frequenzbereichen auf. Die seit langem verfügbaren modal basierten Methoden versagen bei solchen hohen Frequenzen und mußten durch Verfahren wie z.B. die Statistische Energieanalyse ergänzt werden. Möglich wurde diese Entwicklung z.B. durch neue Meßverfahren, die die erforderlichen Daten bereitstellen. Ursache dieses Trends sind veränderte Anforderungen der Kunden und ihrer Konsumenten: z.B. Kraftfahrzeuge sind heute hinsichtlich ihres Fahrverhaltens und ihrer Fahrleistungen derart ausgereift, daß zunehmend komfortrelevante Dinge Bedeutung gewinnen. Akustische Besonderheiten können heute über den Kauf eines PKW entscheiden; die Beeinflussung der akustischen Eigenschaften ist zu einem Schwerpunkt der Produktentwicklung geworden.

Load / Force Calculation

= Rückrechnung auf Systemanregungen und innere Kräfte an Koppelstellen zwischen Subsystemen.

Was ist an Software verfügbar?:

- „Matrix Toolbox“
 - Werkzeugkasten zur freien Programmierung von Matrix-Operationen
 - Wird von einer Reihe anderer Module benutzt (Transfer Path Analysis, ...)

Zunehmende Fertigungstiefe eines Produktes ist ein allgemeiner Trend. Dutzende Zulieferer entwickeln ihre Teilprodukte, basierend auf den Angaben des Finalproduzenten. Das Bereitstellen von Daten über die Belastungen von Teilkomponenten in der Gesamtstruktur wird immer mehr zu einem Zwang.

Sensitivity Analysis

= Beurteilung der Effektivität von Systemmodifikationen zum Erreichen eines gewünschten dynamischen Verhaltens.

- Was ist an Software verfügbar?:

„Sensitivity“

- Verfügbar auf der Basis des modalen Modells, damit anwendbar im unteren Frequenzbereich
- Realisiert als „proportionale“ Analyse (Änderungen der Massen- oder Steifigkeitsparameter von Meßpunkten bzw. von FE-Elementen)
- Physikalische Empfindlichkeitsanalyse (wie in FE-Paketen) z.Zt. in der Implementierungsphase

Ebenfalls in der Implementierungsphase: Sensitivität des Übertragungsverhaltens gegenüber Modifikationen, also Erweiterung auf Anwendung im mittleren Frequenzbereich= Rückrechnung von Systemanregungen und von inneren Kräften an Koppelstellen zwischen Subsystemen.

Modal basierte Empfindlichkeitsbetrachtungen (wo lohnt sich eine Modifikation, um einen gewünschten Effekt zu erzielen) sind ein altbekanntes Verfahren. Wiederum in Richtung höherer Frequenzbereiche bewegen sich Verfahren, die solche Betrachtungen auf der Basis von Systemkennfunktionen, die experimentell bereitgestellt werden können, durchführen.

Interactive Model Modifikation & Substructuring

= Berechnung der dynamischen Eigenschaften und der Systemantwort des modifizierten Systems

Was ist an Software verfügbar?:

- „Modal Modification Prediction“
 - Berechnung des modifizierten modalen Modells (modale und physikalische Modifikationen)
 - Anwendbar im unteren Frequenzbereich
- „Modal Based Substructuring“
 - Verknüpfung modaler Modelle (experimentell oder analytisch gewonnen)
 - Anwendbar im unteren Frequenzbereich
- „FRF Based Substructuring“
 - Verknüpfung von Substrukturen mittels ihrer Übertragungsfunktionen (experimentell oder analytisch gewonnen)
 - Anwendbar im mittleren und hohen Frequenzbereich

Modifikationsrechnungen dienen sowohl der Überprüfung von mittels Empfindlichkeitsanalyse gefundenen optimierten Strukturen als auch der Simulation von zusammengebauten Strukturen auf der Basis ihrer Teilkomponenten. Besonders diese Substrukturkopplung zeigt in eindrucksvoller Weise die Möglichkeiten hybrider Modelle:

Komponenten, für die verifizierte Rechenmodelle vorliegen oder für die z.B. Aussagen über im Inneren auftretende Spannungen benötigt werden, werden als FE-Modell eingebracht. Baugruppen, die sich einer FE-Modellierung nur schwer erschließen (z.B. wegen unklarer Randbedingungen) lassen sich relativ leicht experimentell erfassen. Substrukturkopplung ist ein direkter Weg, die Vorzüge beider Verfahren zu vereinen und mit niedrigem Aufwand zu einem Gesamtmodell mit ansonsten nicht erreichbarer Qualität zu kommen.

Interactive Optimization

= Inverses Problem von Modifikation & Substructuring:

Mit welchen Modifikationen kann ein gewünschtes dynamisches Verhalten bzw. eine gewünschte Systemantwort erreicht werden?

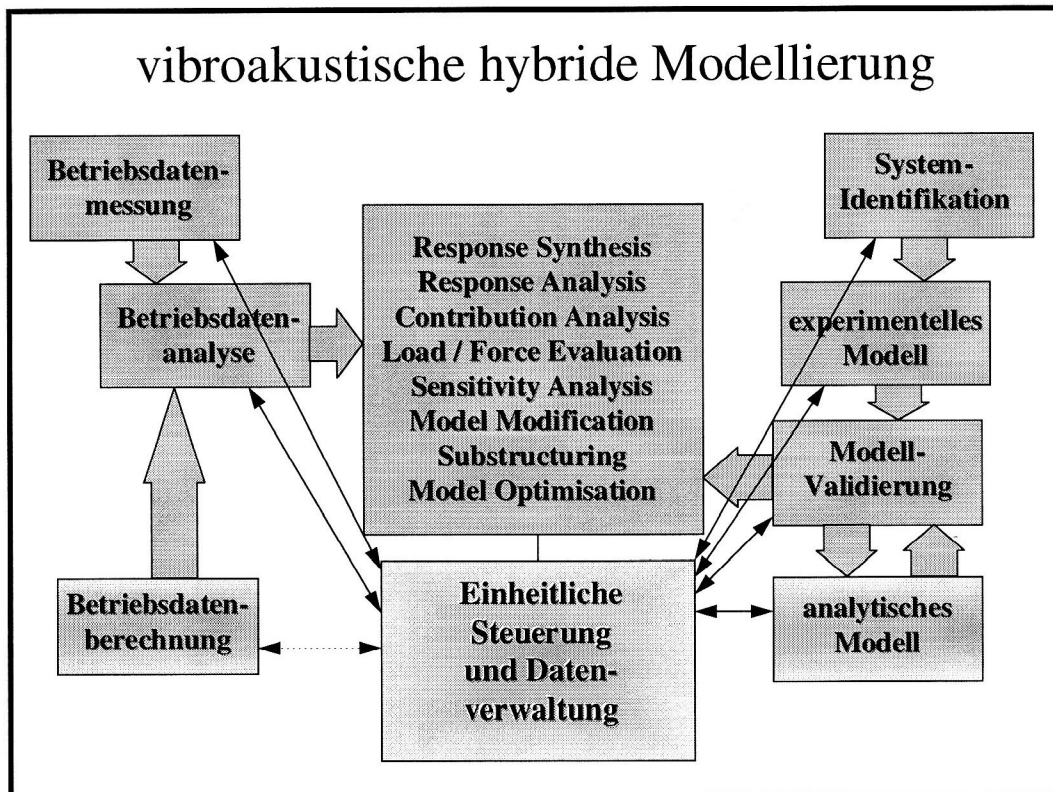
Was ist an Software verfügbar?:

- „FE Model Update“
 - Optimierung eines FE-Modells unter Verwendung experimenteller Daten
 - Optimierte Parameter: Steifigkeit und Masse von FE-Elementen (Element-Gruppen)
 - Zielparameter: Eigenfrequenzen und (indirekt) Eigenformen (= modale Größen; damit anwendbar im unteren Frequenzbereich)

Momentan in der Implementierungsphase befinden sich die Erweiterungen:

- Optimierung konstruktiver Größen (Wandstärken, ...)
- Optimierung auf Basis der Übertragungsfunktionen (damit Erweiterung auf mittleren Frequenzbereich möglich)

Das sogenannte „Model update“ bedeutet keineswegs immer nur eine „Nachbesserung“ des FE-Modells mittels Meßdaten. Vielmehr können für von vornherein bekannte Problemzonen auf relativ einfachem Wege Parameter bereitgestellt werden, die das FE-Modell zum Ausgangspunkt umfassender Variantenrechnungen machen. Denkbar ist aber auch, auf diese Weise konstruktive Vorschläge zu entwickeln, um einem System eine gewünschte Eigenschaft zuzuweisen.



Lagebeurteilung „Hybride Modellierung“

Momentaner Stand

- Eine Vielzahl der benötigten Werkzeuge ist als Software verfügbar
- Teilweise existiert eine gemeinsame Anwendungsoberfläche und Datenbasis, teilweise ist Wechsel der Software und Datenaustausch erforderlich
- Gut ausgebaut sind Verfahren zur Modellierung im unteren Frequenzbereich

Aktuelle Arbeiten

- Erweiterung der Verfahren für den mittleren und hohen Frequenzbereich
- Verbesserung der Einheitlichkeit der Software und der Datenschnittstellen
- Entwicklung und Test neuer Verfahren
- Erweiterung der Möglichkeiten des direkten Zugriffs auf Daten existierender Programmpakete

Zukunft

- Schaffung einer einheitlichen Oberfläche zur:
 - Steuerung aller benötigter Softwaremodule
 - Interaktiven Generierung und automatischen Abarbeitung komplexer Optimierungsprozeduren

Neben der Entwicklung neuer und der Perfektionierung bekannter Verfahren besteht zur Zeit besonders Bedarf an der Verbesserung der Handhabbarkeit der existierenden Möglichkeiten.

Bestehende Software-Produkte müssen weiter vereinheitlicht werden. Ihre Kombinationsfähigkeit muß verbessert und eine einheitliches Konzept für die Steuerung aller verfügbarer Komponenten muß entwickelt werden.

Arbeiten dazu sind im Gange, und es besteht zunehmender Bedarf.

Bereits jetzt ist in vielen Firmen zu erkennen: Berechnung und Versuch reden miteinander, tauschen Informationen aus und gehen gemeinsam an die Entwicklung ihres Produktes. Noch sind dabei allerdings viele subjektive und objektive Hürden zu überwinden. Zumindest letztere werden mit der immer besseren Gestaltung von Handwerkszeugen zur hybriden Modellierung immer weniger werden, zum Nutzen aller Seiten.

Anschrift: Dr.-Ing. Thomas Vasel, LMS Leuven Measurements & Systems GmbH, Mollenbachstraße 33-35,
71229 Leonberg