

Modellreduktionsverfahren bei der Regelung von aktiven Systemen zur Minderung der Schallabstrahlung

Torsten Doll, Kai Wolf

Technische Universität Darmstadt, Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik (SzM),
64289 Darmstadt, Deutschland, Email: doll@szm.tu-darmstadt.de, wolf@szm.tu-darmstadt.de

Einleitung

In der heutigen Zeit erreichen viele technische Systeme einen so hohen Optimierungsgrad, dass nachträgliche konstruktive Veränderungen zur Verbesserung der akustischen Eigenschaften meist nur noch schwer oder gar nicht mehr vorgenommen werden können. Das ist unter anderem darin begründet, dass klassische passive Maßnahmen zur Minderung von Schallabstrahlung oftmals mit einer Zunahme an Volumen und Gewicht der betroffenen Bauteile einhergehen, was aber für viele Leichtbau-Anwendungen nicht tolerabel ist. Alternativ werden intelligente oder adaptronische Systeme für ein immer breiteres Anwendungsfeld interessant, was vor allem durch die rasante Entwicklung der Rechentechnik, der Mikroprozessortechnik und durch die fortschreitende Miniaturisierung der elektronischen Komponenten bedingt ist. Solche Systeme sind durch den Einsatz multifunktionaler Werkstoffe und aktiver Regelungssysteme gekennzeichnet mit dem Ziel, Geräusche zu verringern (Active Noise Control) oder zu verändern (Sound Design). Die Adaptronik birgt somit ein großes Potenzial für viele neue technologische Entwicklungen in der Maschinenakustik.

Bei der aktiven Minderung der Schallabstrahlung von schwingenden flächigen Bauteilen kommt eine Technik zum Einsatz, die als Active Structural Acoustic Control (ASAC) bezeichnet wird. Dabei werden piezokeramische Aktoren und Sensoren verteilt auf eine schallemittierende Oberfläche aufgebracht. Mit einer geeigneten Regelstrategie und einer Echtzeit-Datenverarbeitung können die Strukturschwingungen reduziert und die Schallabstrahlung somit deutlich verringert werden. Modellreduktionsverfahren stellen dabei ein wichtiges Glied in der Entwicklungskette aktiver Systeme dar. Exakte Modelle der realen Struktur bilden die Grundlage für die Reglerentwicklung und für den Entwurf des aktiven Systems. Mit speziellen Reduktionsverfahren können komplexe Modelle auf ein Minimum an Freiheitsgraden reduziert werden. Die reduzierten Modelle eignen sich dann sowohl für den Test der Echtzeit-Regelung, als auch für die Modellierung des Sekundärpfades eines adaptiven Reglers zum Einsatz am realen System.

Verfahren der Modellreduktion

Modelle von komplexen Strukturen werden im Allgemeinen mit der Hilfe von Finite-Elemente- (FE-) oder Mehrkörpersimulationsprogrammen erstellt. Dabei können sehr hohe Anzahlen von Freiheitsgraden berücksichtigt werden, wodurch eine genaue Beschreibung der strukturemechanischen Eigenschaften ermöglicht wird. Für andere Anwendungen sind Modelle mit einer sehr hohen Anzahl an Freiheitsgraden allerdings ungeeignet [1]. Beim Entwurf von

modellbasierten Regelungen muss darauf geachtet werden, dass diese *echtzeitfähig* sind. Wird zusätzlich noch ein adaptiver Regelungsansatz gewählt, soll außerdem der Großteil der Rechenleistung der Aktualisierung der Reglerparameter zur Verfügung stehen und nicht auf die Ermittlung der Eingangsgrößen verwendet werden [2]. Allerdings gehen Modellreduktionen immer mit einem Genauigkeitsverlust einher, den es zu minimieren gilt. Es muss daher immer abgewägt werden, welches Reduktionsverfahren sich bei welcher Anwendung am besten eignet.

Im Folgenden wird eine Methode vorgestellt, mit der große FE-Modelle auf ein Minimum an Freiheitsgraden reduziert werden können. Das dynamische Verhalten der Teststruktur wird dabei auch mit dem reduzierten Modell sehr genau wiedergegeben.

Krylov-Unterraummethoden

Mit dem Reduktionsverfahren von mor4Ansys [3] können Modelle reduziert werden, die mit der FE Software Ansys erstellt wurden. Dabei wird der Arnoldi-Algorithmus angewandt, welcher zu der Klasse der Krylov-Unterraummethoden gehört und vor allem zur Ordnungsreduktion großer Modelle geeignet ist. Der Algorithmus bringt dabei die Momente m_i des reduzierten Modells in Übereinstimmung mit dem Original, die als die negativen Koeffizienten der Taylor-Reihe der Übertragungsfunktion $G(s)$ um einen Entwicklungspunkt s_0 definiert sind:

$$G(s) = -m_0 - m_1(s - s_0) - m_2(s - s_0)^2 - \dots \quad (1)$$

Mit diesem Verfahren lassen sich mit relativ geringem Rechenaufwand numerisch robuste Modelle erzeugen, wobei schwach steuerbare Anteile aus dem Modell entfernt werden. Schwach beobachtbare Anteile hingegen bleiben erhalten, wodurch gewährleistet wird, dass die Wahl der Ausgänge des Modells keinen Einfluss auf den Reduktionsprozess ausübt.

Balancierte Reduktion

Die Verfahren der balancierten Reduktion sind in der Regelungstechnik weit verbreitet. Sie können für kleinere bis mittlere Modelle verwendet werden und liefern dann eine sehr gute Annäherung an das Original. Das Ausgangsmodell wird dabei in das balancierte Koordinatensystem transformiert. Für die Beurteilung der Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit der balancierten Zustände (lineare zeitinvariante endlich-dimensionale Systeme) werden die Hankel'schen Singulärwerte verwendet, die die Energie dieser Zustände wiedergeben. Die Reduktion wird dann durch Verwendung

einer additiven oder multiplikativen Fehlerschranke durchgeführt:

$$\text{additiv: } \|G - G_{red}\|_{\infty}, \text{ multiplikativ: } \left\| \frac{G - G_{red}}{G} \right\|_{\infty} \quad (2)$$

In (2) ist G die Übertragungsfunktion des Ausgangsmodells, G_{red} die Übertragungsfunktion des reduzierten Modells und $\|\cdot\|_{\infty}$ die so genannte H- unendlich- Norm. Je nach Wahl der Fehlerschranke wird damit hinsichtlich der absoluten oder der relativen Abweichung vom Ausgangsmodell minimiert.

Die Vorgehensweise bei der Anwendung der diskutierten Verfahren soll folgend am Beispiel des Rahmens einer aktiven Fassade (abgeschlossenes Forschungsprojekt der TU Darmstadt [4]) gezeigt werden.

Anwendung des Verfahrens auf den Rahmen einer aktiven Fassade

Eine Kombination beider vorgestellter Reduktionsverfahren lässt Ergebnisse mit einem sehr geringen Fehler bei gleichzeitigem hohen Reduktionsgrad erwarten [5]. Als Referenz dient dabei ein detailliertes Finite-Elemente Modell eines Rahmens einer aktiven Fassade. Zunächst wird das Verfahren von mor4Ansys auf das FE Modell angewandt. Mit dem Verfahren der balancierten Reduktion wird dann eine weitere Reduktion des Modells durchgeführt.

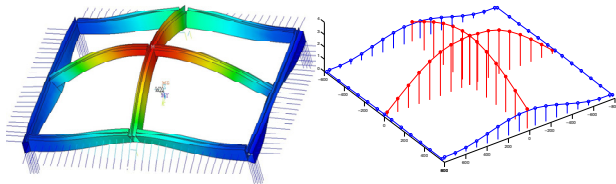


Abbildung 1: Schwingform des Rahmens bei 165 Hz; links: Finite-Elemente Modell (~13.000 Freiheitsgrade); rechts: reduziertes Modell (100 Freiheitsgrade)

In Abbildung 1 ist die erste Schwingform des Rahmens bei 165 Hz dargestellt. Das FE Modell (links) besteht aus ca. 2.200 Knoten und enthält über 13.000 Freiheitsgrade. Das mit mor4Ansys reduzierte Modell (rechts) besteht nur noch aus 100 Freiheitsgraden. Es ist auch zu erkennen, dass die gewählten Ausgänge des Modells die Schwingform sehr gut wiedergeben. Das vorgestellte Verfahren eignet sich somit für die Erstellung von exakten Modellen geringer Komplexität.

Das wird auch in Abbildung 2 deutlich. Es ist die Schwinggeschwindigkeit in dB in der Nähe eines der Aufhängepunkte der Fassade dargestellt. Als Referenz ist das Ansys Modell mit ca. 13.000 FG schwarz aufgetragen. Das mit mor4Ansys auf 20 FG reduzierte Modell gibt den Verlauf bis zur 4. Eigenfrequenz (ca. 650 Hz) sehr exakt wieder. Der rot dargestellte Verlauf wurde nach einer weiteren Reduzierung des Modells mittels balancierter Reduktion erzeugt. Das Modell beinhaltet nach der zweiten Ordnungsreduktion nur noch vier Freiheitsgrade.

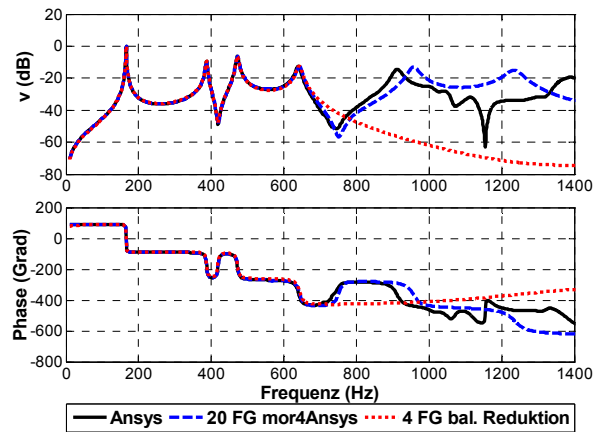


Abbildung 2: Bode-Diagramm; Vergleich zwischen Ansys-Modell (schwarz), 20 Freiheitsgrade-Modell mit mor4Ansys (blau), 4 Freiheitsgrade-Modell mit balancierter Reduktion (rot)

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde die prinzipielle Vorgehensweise bei Entwurf aktiver Systeme zur Minderung von Schallemissionen dargestellt. Die Bedeutung exakter Modelle bei der Simulation adaptiver Strukturen wurde hervorgehoben und es wurde auf die Probleme eingegangen, die große Modelle bei der Reglerentwicklung mit sich bringen. Es wurden zwei Verfahren zur Modellreduktion vorgestellt und anhand des Beispiels des Rahmens einer aktiven Fassade wurde gezeigt, dass bei einer Kombination der beiden Verfahren ein maximaler Reduktionsgrad bei gleichzeitigem minimalem Fehler erreicht werden kann. Die Anzahl der Freiheitsgrade wurde dabei von über 13.000 auf vier reduziert. Außerdem wurde nachgewiesen, dass das dynamische Verhalten der Teststruktur mit dem reduzierten Modell im Vergleich mit dem Ansys-Modell sehr genau wiedergegeben werden konnte.

Das Beispiel macht das enorme Potenzial von speziellen Kombinationen von Modellreduktionstechniken deutlich. Aktuelle Arbeiten in Darmstadt untersuchen die Einsatzmöglichkeiten der Verfahren bei der online Identifikation und der Modellierung des Sekundärpfades bei adaptiven Regelungen.

Literatur

- [1] Qu, Zu-Qing: Model Order Reduction Techniques, Springer, London (2004)
- [2] Leo, Donald J.: Engineering analysis of smart material systems, Wiley, Hoboken, N.J. (2007)
- [3] E.B. Rudnyi, J. Lienemann, A. Greiner and J.G. Korvink: mor4ansys: Generating Compact Models Directly From ANSYS Models, Nanotech 2004 Vol.2 (2004), 279 - 282
- [4] Th. Bein, J. Bös, L. Kurtze, T.Doll: Noise Insulation applying Active Elements onto Facades, Forum Acusticum, Budapest (2005)
- [5] B. Lohmann, B. Salimbahrami: Ordnungsreduktion mittels Krylov-Unterraummethoden, Automatisierungstechnik 52 (2004), 30-38