

Simulationsbasierte und experimentelle Sensitivitätsanalysen eines adaptiven Systems

Ying Li¹, Soong-Oh Han¹, Thomas Pfeiffer²

¹ Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik TU Darmstadt, 64289 Darmstadt, E-Mail: li@szm.tu-darmstadt.de, han@szm.tu-darmstadt.de

² Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, 64289 Darmstadt, E-Mail: thomas.pfeiffer@lbf.fraunhofer.de

Einleitung

Leichtbaustrukturen sind in der Regel dünnwandig und großflächig, dies führt oft zu großer Schallabstrahlung. Für die Reduzierung der Strukturschwingung bietet sich ein adaptives System mit flächigem Piezoaktor und –sensor als eine Lösung an. Ein solches System hat in der Regel eine große Anzahl von Systemparametern, die Wechselwirkungen dieser Größen sind komplex. Das Zusammenspiel zwischen Systemleistung und Degradation der Sensoren und Aktoren ist oft unbekannt. Die Anforderungen an das Systemverhalten sind meistens vielschichtig. Dies alles erschwert die Vorhersage über einen Systemausfall. Daher ist es für die Auslegung solcher adaptiven Systeme wichtig, aus der großen Anzahl von Systemparametern die das Systemverhalten dominierenden und zum Defekt des Systems wesentlich beitragenden Größen zu identifizieren und zu bewerten. Dies kann durch eine Sensitivitätsanalyse erfolgen.

In diesem Beitrag werden die experimentellen und simulationsbasierten Sensitivitätsanalysen eines Beispielsystems vorgestellt und miteinander verglichen. Als Beispielsystem handelt es sich hier um einen innerhalb des Projekts InMAR [1] entwickelten Demonstrator zur aktiven Reduzierung der Bodenschwingung einer PKW-Ölwanne.

Sensitivitätsanalyse

Eine Sensitivitätsanalyse untersucht die Beziehungen zwischen Eingangs- und Ausgangsinformationen eines technischen Systems. In der Regel wird eine Ausgangsgröße als Zielgröße in der Sensitivitätsanalyse definiert. Die Änderungen der Zielgröße werden in Abhängigkeit von den Änderungen der Eingangsgrößen und Modellparameter analysiert. Diese Erkenntnisse können wiederum Grundlage einer Optimierung der Systemauslegung oder einer Unsicherheitsuntersuchung der Modellparameter sein.

Die experimentelle Sensitivitätsanalyse erfolgt meistens nach der Methode der statistischen Versuchsplanung und –auswertung [2]. Als Maß des Einflusses jedes Faktors werden die Effektwerte für den Haupteffekt und die Wechselwirkung berechnet. Die Simulationsbasierte Sensitivitätsanalyse basiert auf einem automatisierten Simulationsprozess, in dem verschiedene Programme miteinander interagieren. Die Einflussfaktoren werden als Eingangsparameter des Modells definiert. Innerhalb ihrer Einzugsbereiche werden sie anhand bestimmter Verteilungsfunktionen variiert. Für jede Einstellung der Eingangsparameter wird die Simulation durchgeführt und die

Zielgröße als Ausgangsgröße ermittelt. Für die quantitative Bewertung der Eingangsparameter lassen sich verschiedene Maße der Sensitivität berechnen. Einer davon ist der Sensitivitätsindex nach der Sobol-Methode. Die Sobol-Methode ermittelt das Sensitivitätsmaß einer Eingangsgröße durch Betrachtung des Anteils an der Varianz der Ausgangsgröße, der durch diese Eingangsgröße verursacht wird. Die folgenden Formeln stellen die Grundlage dieser Berechnung dar:

$$S_i = \frac{V(E(Y/X_i))}{V(Y)} \quad [1] \quad (1)$$

$$V(Y) = \frac{1}{m-1} \sum_{r=1}^m (y_r - \bar{y})^2 \quad [1] \quad (2)$$

$$V(E(Y/X_i)) = \frac{1}{m-1} \sum_{r=1}^m (y_r^i \cdot y_r^i) - \frac{1}{m-1} \sum_{r=1}^m (y_r^i)^2 \quad [1] \quad (3)$$

Hierbei steht S für den Sensitivitätsindex, V für Varianz, m für die Anzahl der Stichproben und y für die Ausgangsgröße. Für eine Eingangsgröße mit großem Einfluss auf die Ausgangsgröße ergibt sich ein Sensitivitätsindex gegen eins. Eine detaillierte Erläuterung der hier vorgestellten Maße findet man in [3].

Ölwannensystem

Auf dem Boden einer PKW-Ölwanne wurden Piezoaktoren und –sensoren aufgeklebt. Ein Finite-Element-Modell des Ölwannensystems wurde für die numerischen Untersuchungen erstellt. Diese sind in Abbildung 1 zu sehen.

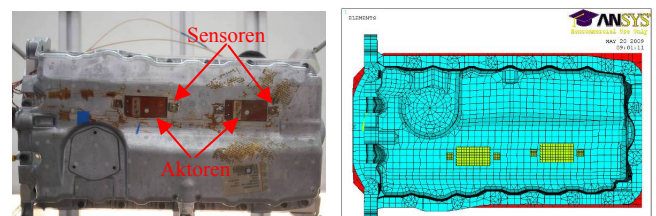


Abbildung 1: Ölwannenboden mit Aktoren und Sensoren. Links: Demonstrator. Rechts: FE-Modell.

Für die Regelungen werden zwei analoge PPF-Regler eingesetzt. Als Reglerparameter sind der Verstärkungsfaktor (K_c), der Gütefaktor (ν_c) und die Eckfrequenz (ω_c) einstellbar. Abbildung 3 zeigt die gemessene Übertragungsfunktion der Schwingung des Ölwannensystems. Bei den Untersuchungen werden die Amplituden bei den ersten beiden Eigenfrequenzen als Zielgrößen betrachtet.

Untersuchung nach einzelnen Einflussgrößen

Für das passive Ölwanne-System ohne Regelung werden die Einflüsse von Anregungsposition und Füllstand untersucht. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse der experimentellen und numerischen Untersuchungen über die Anregungsposition.

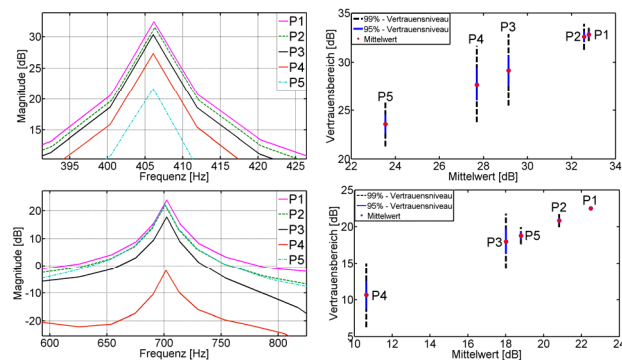


Abbildung 2: Einflüsse der Anregungsposition. Oben: Amplitude bei der ersten Eigenfrequenz. Unten: Amplitude bei der zweiten Eigenfrequenz. Links: numerische Untersuchung. Rechts: experimentelle Untersuchung.

Es ist zu erkennen, dass durch simulationsbasierte und experimentelle Methoden die gleiche Reihenfolge der Anregungspositionen nach der Höhe der Amplitude ermittelt wurde. Bei den mittleren Anregungspositionen (P3, P4) entstehen größere Messwertstreuungen als bei den Anregungspositionen am Rand (P1, P5). Im Bezug auf die Einflüsse des Füllstands auf die Amplitude wurden die folgenden Übertragungsfunktionen ermittelt:

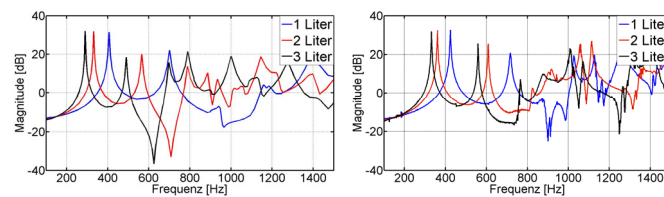


Abbildung 3: Einflüsse des Füllstands. Links: Ergebnis aus der numerischen Untersuchung. Rechts: Ergebnis aus der experimentellen Untersuchung.

Hier ist zu erkennen, dass sich mit zunehmendem Füllstand die Eigenfrequenzen der Schwingung des Ölwannebodens nach links verschieben. Die Änderungen der Amplituden bei den ersten beiden Eigenfrequenzen infolge der Änderungen des Füllstands sind sehr gering (Bei der ersten Eigenfrequenz kleiner als 1 dB und bei der zweiten Eigenfrequenz kleiner als 4 dB).

Sensitivitätsbewertung

In den Sensitivitätsanalysen des Ölwanne-Systems werden die Anregungsposition (P), der Füllstand (V), die Eckfrequenz sowie der Verstärkungsfaktor des Reglers als Einflussfaktoren untersucht. Als Zielgröße wird für das passive System die Amplitude, und für das aktive System die Dämpfung der Schwingung des Ölwannebodens bei der ersten Eigenfrequenz betrachtet. Die experimentellen Sensitivitätsuntersuchungen werden nach vollfaktoriellen Versuchsplänen durchgeführt. Die simulationsbasierten Sensitivitätsanalysen erfolgen durch einen automatisierten Simulationsprozess, Abbildung 4 zeigt schematisch die Datenflüsse in diesem Prozess.

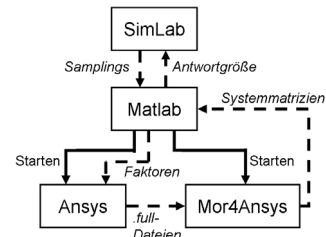


Abbildung 4: Datenflüsse im Simulationsprozess

Durch die Sensitivitätsbewertungen des passiven Ölwanne-Systems werden für die Haupteffekte von Anregungsposition und Füllstand, sowie deren Wechselwirkung (PV) die folgenden Ergebnisse ermittelt:

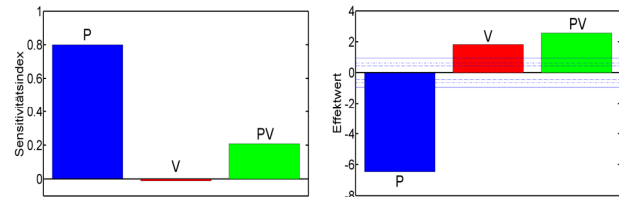


Abbildung 5: Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen des passiven Ölwanne-Systems. Links: Sensitivitätsindizes aus der numerischen Untersuchung. Rechts: Effektwerte aus der experimentellen Untersuchung.

Durch die beiden Methoden wird hier die Anregungsposition als der Faktor mit dem größten Einfluss auf die Amplitude bei der ersten Eigenfrequenz erkannt. Der Füllstand hat in diesem Fall den kleinsten Einfluss. In Abbildung 6 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen des aktiven Ölwanne-Systems zu sehen. Sowohl durch die experimentelle als auch durch die simulationsbasierte Methode wird die Eckfrequenz des Reglers als die Faktorgröße mit dem größten Einfluss auf die Dämpfungswirkung des Aktiven Systems identifiziert. Die Wechselwirkungen spielen hier allgemein kleine Rolle.

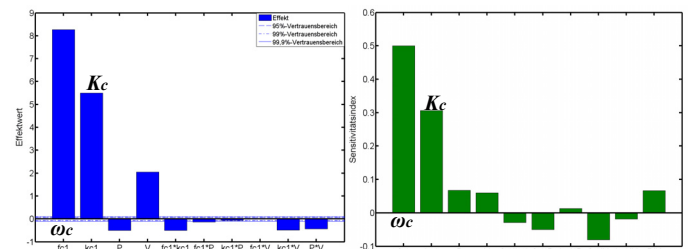


Abbildung 6: Links: Effektwerte aus der experimentellen Untersuchung. Rechts: Sensitivitätsindizes aus der numerischen Analyse.

Danksagung

Die Autoren danken dem Loewe-Zentrum AdRIA gefördert vom Land Hessen für die Förderung dieser Arbeit.

Literatur

- [1] EU Projekt InMAR, <http://www.inmar.info>
- [2] Montgomery, D. C. : Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons, Inc. 2005.
- [3] Saltelli, A. / Chan, K. / Scott, E.M. : Sensitivity Analysis. John Wiley & Sons, LTD, 2000.