

VERGLEICH EINER EXPERIMENTELLEN UND SIMULATIONSBASIERTEN SENSITIVITÄTSANALYSE EINER ADAPTIVEN ÖLWANNE

Y. Li*, S-O. Han*, T. Pfeiffer**

*) Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik, TU Darmstadt

***) Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

Zusammenfassung: Die Wirkungen verschiedener Systemgrößen in einem adaptiven System sind komplex. Diese Größen beeinflussen die Systemleistung in unterschiedlichen Maßen. Für die Untersuchung der Zuverlässigkeit solcher Systeme ist es wichtig, die das Systemverhalten dominierenden und die zum Defekt des Systems wesentlich beitragenden Einflussgrößen zu identifizieren und zu bewerten. Dies kann durch eine Sensitivitätsanalyse erfolgen. In diesem Beitrag werden anhand eines Anwendungsbeispiels, einer aktiv lärmreduzierten PKW-Ölwanne, die experimentellen und simulationsbasierten Methoden der Sensitivitätsbewertung miteinander verglichen.

Stichwörter: Systemzuverlässigkeit, Sensitivitätsanalyse, Ölwanne, aktive Schwingungskontrolle

COMPARISON OF AN EXPERIMENTAL AND NUMERIC SENSITIVITY ANALYSIS OF AN ADAPTIVE OIL PAN

Abstract: The parameters of an adaptive system have complex effects on the system performance. The influence of these effects on the overall performance is different. The system parameters with significant effects on the system failure can be indicated by a sensitivity analysis. This provides important information for the reliability assessment of the system. In this paper, a comparison of an experimental and numeric sensitivity analysis is presented utilizing an actively damped passenger car oil pan.

Keywords: system reliability, sensitivity analysis, oil pan, active vibration control

1. Einleitung

Für technische Anwendungen mit Anforderung an komplexe Funktionalität werden heutzutage meistens aktive Systeme eingesetzt. In der Industrie stieg der Einsatz aktiver Systeme in den vergangenen Jahren kontinuierlich an. Leichtbaustrukturen sind in der Regel dünnwandig und großflächig, dies führt oft zu großer Schallabstrahlung. Für die Reduzierung der Strukturschwingung solcher Strukturen bietet sich ein adaptives System mit flächigen Piezoaktoren und –sensoren als eine Lösung an.

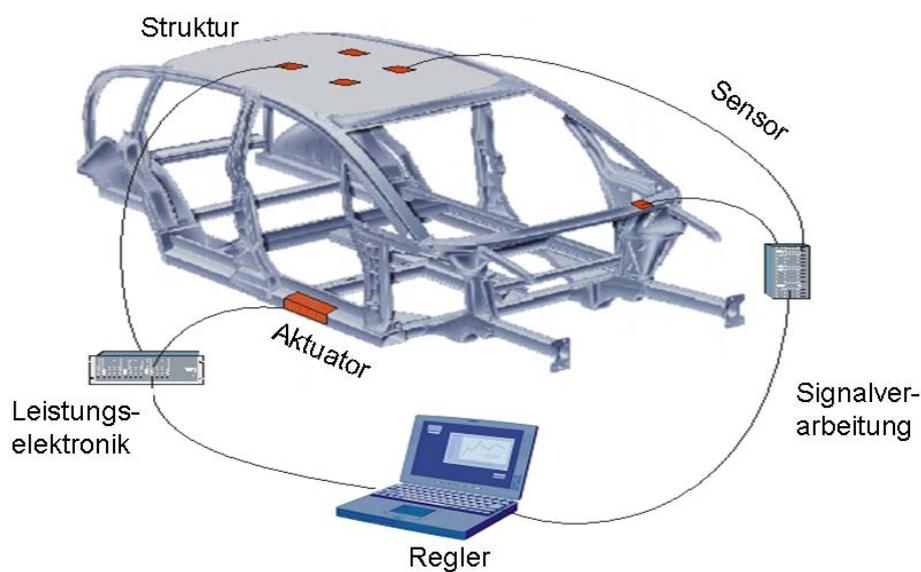


Abb. 1 Prinzipskizze eines adaptiven Systems (nach [1])

Wie Abb.1 zeigt, stellt ein adaptives System eine interdisziplinäre Verknüpfung von Mechanik, Elektronik und Informatik dar. Die strukturintegrierten Aktoren und Sensoren basieren auf multifunktionalen Materialien. Durch Regelungstechnik kann das System sich selbständig an sich verändernde Randbedingungen anpassen. Ein solches System hat in der Regel eine große Anzahl von Systemparametern mit komplexen Wechselwirkungen. Weiterhin ist das Zusammenspiel zwischen dem Ermüdungsverhalten der in diesen Sensoren und Aktoren verwendeten multifunktionalen Materialien und dem Ausfall des gesamten Systems oft unbekannt. Zusätzlich sind die Anforderungen an das Systemverhalten meistens vielschichtig. Dies alles erschwert die Vorhersage über einen Systemausfall. Daher ist es für die Zuverlässigkeitsanalyse 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 dieser Veröffentlichung werden die experimentellen und simulationsbasierten Sensitivitätsanalysen eines Beispielsystems vorgestellt und miteinander verglichen. Als Beispielsystem handelt es sich hier um einen innerhalb des Projekts InMAR [2] entwickelten Demonstrator zur aktiven Reduzierung der Bodenschwingung einer PKW-Ölwanne.

2. Sensitivitätsanalyse

Eine Sensitivitätsanalyse untersucht die Beziehungen zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Systems. Ursprünglich wurde die Sensitivitätsanalyse entwickelt, um Unsicherheiten in den Eingangsgrößen zu behandeln. Durch die Weiterentwicklung dieser Methode können inzwischen auch Unsicherheiten in der Modellstruktur und den Modellparametern untersucht werden. In der Regel wird eine Ausgangsgröße als Zielgröße in der Sensitivitätsanalyse definiert. Die Änderungen der Zielgröße, deren Ursachen meistens auf Änderungen der Eingangsgrößen und Modellparameter zurückzuführen sind, werden in Abhängigkeit von den Eingangsfaktoren analysiert. Dadurch lassen sich die Einflüsse der Eingangsgrößen im Bezug auf bestimmte Ausgangsgrößen oder Systemeigenschaften qualitativ oder quantitativ erkennen. Diese Erkenntnisse können wiederum Grundlage einer Optimierung der Systemauslegung oder einer Zuverlässigkeitsanalyse sein.

Um die Effektivität des Experimentierens und die Qualität der Messergebnisse zu erhöhen, wird für die experimentelle Sensitivitätsanalyse die Methode der statistischen Versuchsplanung und –auswertung [3, 4] verwendet. Für jeden Einflussfaktor werden bestimmte Einstellungsstufen definiert. Nach einem Versuchsplan, bei dem alle Faktoren gleichzeitig verändert werden, wird das Experiment durchgeführt. Sowohl die Haupteffekte auf die Zielgröße jedes einzelnen Faktors als auch die Wechselwirkungen zwischen Faktoren können über Effektwerte quantitativ bewertet werden.

Als Basis für eine simulationsbasierte Sensitivitätsanalyse dient das Finite-Element-Modell des zu untersuchenden Systems. 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. In diesem Prozess interagieren in der Regel verschiedene Programme miteinander. Für die Bewertung der Eingangsparameter bezüglich ihres Einflusses auf die Ausgangsgröße, lassen sich anhand der Informationen der Ein- und Ausgangsgrößen verschiedene Maße der Sensitivität berechnen. Eine einfache

Bewertung der Sensitivität kann über die Berechnung der partiellen Ableitung nach den folgenden Formeln erfolgen:

$$S_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i}, \quad (1)$$

$$S_{ij} = \frac{\partial^2 Y}{\partial X_i \partial X_j}. \quad (2)$$

Hierbei ist Y die Ausgangsgröße. X_i und X_j sind i -ter und j -ter Eingangsparameter. S_i ist der Sensitivitätsindex für den Haupteffekt von X_i . S_{ij} zeigt die Sensitivität der Wechselwirkung zwischen X_i und X_j . Der wesentliche Nachteil dieser Maße liegt darin, dass sie nur innerhalb eines kleinen lokalen Bereiches gültig sind. Für die quantitative globale Sensitivitätsanalyse bietet sich die Sobol-Methode als eine geeignete Bewertungsmethode an. Die Sobol-Methode ermittelt das Sensitivitätsmaß einer Eingangsgröße durch Betrachtung des Anteils an der Varianz der Ausgangsgröße, der durch diese Eingangsgröße verursacht wird. Eine solche Methode wird auch als varianzbasierte Sensitivitätsmethode bezeichnet. Das Sensitivitätsmaß wird wie folgt berechnet:

$$S_i = \frac{V(E(Y/X_i))}{V(Y)}, \quad (3)$$

mit

$$V(Y) = \frac{1}{m-1} \sum_{r=1}^m (y_r - \bar{y})^2, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V(E(Y/X_i)) &= \frac{1}{m-1} \sum_{r=1}^m (y_r^i \cdot y_r^i) - \frac{1}{m-1} \sum_{r=1}^m (y_r^2) \\ &= \frac{1}{m-1} \sum_{r=1}^m (f(x_r^i) \cdot f(x_r^i)) - \frac{1}{m-1} \sum_{r=1}^m (f(x_r)^2). \end{aligned} \quad (5)$$

Hierbei steht V für Varianz, m für die Anzahl der Stichproben und x_r^i und x_r^i sind die Vektoren der Eingangsparameter, bei denen die i -ten Eingangsparameter identisch sind. Wenn der Eingangsparameter X_i den größten Einfluss aller Einflussfaktoren auf die Ausgangsgröße hat, dann geht der Sensitivitätsindex S_i gegen eins. Dagegen ergibt sich für einen Eingangsfaktor, der fast keinen Einfluss auf die Ausgangsgröße hat, für den Sensitivitätsindex ein Wert gegen Null. Mittels einer Varianzdekomposition können auch die gekoppelten Effekte der Einflussparameter

bewertet werden. Eine detaillierte Erläuterung der hier vorgestellten Maße findet man in [5].

3. Das Ölwanensystem

Wie Abb.2 zeigt, wird die Ölwanne mit Stahlfedern am Hauptrahmen aufgehängt. Die Steifigkeiten der Federn sind so gewählt, dass die durch sie verursachten Eigenfrequenzen des Feder-Masse-Systems im sehr niedrigen Frequenzbereich liegen. Im Betrieb wird die Ölwanne an einem Motorblock montiert, um die mechanische Strukturanbindung zu simulieren, wird ein massiver Rahmen auf der Oberseite der Ölwanne angeschraubt. Die Erfassung der Schwingung des Ölwannebodens erfolgt mittels eines Laser-Vibrometers.

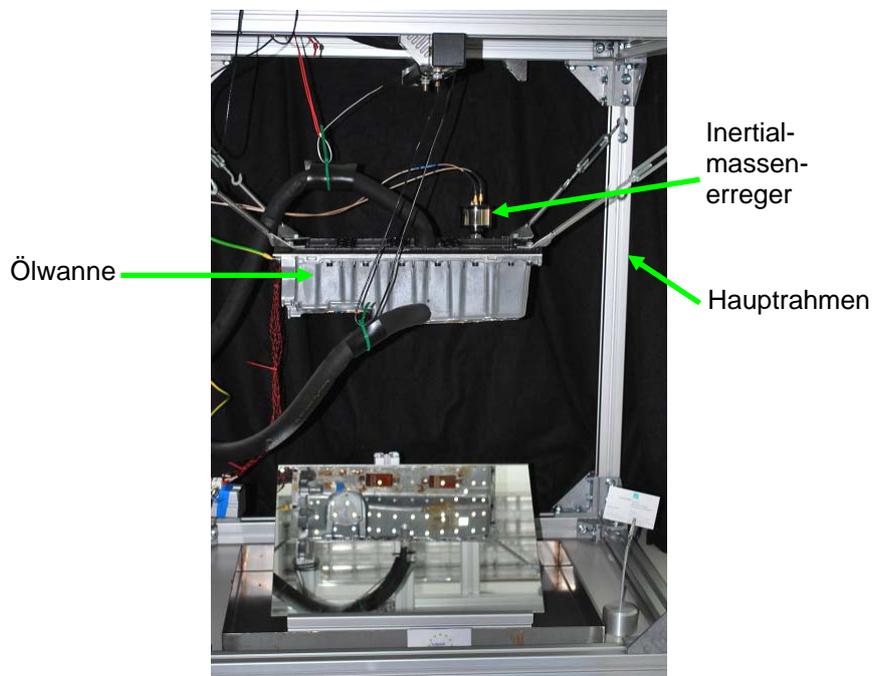


Abb. 2 Demonstrator des Ölwanensystems

Abb.3 zeigt den Ölwanneboden mit den angekoppelten Aktoren und Sensoren. Als Aktoren dienen zwei Piezopatches, die sensorischen Aufgaben übernehmen zwei piezoelektrische Keramiken. Für numerische Untersuchungen wurde ein Finite-Element-Modell für das Ölwanneboden erstellt, welches auch in Abb.3 zu sehen ist. Für die Regelungen werden zwei PPF-Regler eingesetzt. Die Übertragungsfunktion eines PPF-Reglers lautet:

$$H_{PPF} = \frac{K_C \omega_C^2}{s^2 + 2\zeta_C \omega_C s + \omega_C^2} . \quad (6)$$

Zu variieren sind die Reglerparameter:

K_C : Verstärkungsfaktor,

\mathcal{G}_C : Gütefaktor,

ω_C : Eckfrequenz des Reglers.

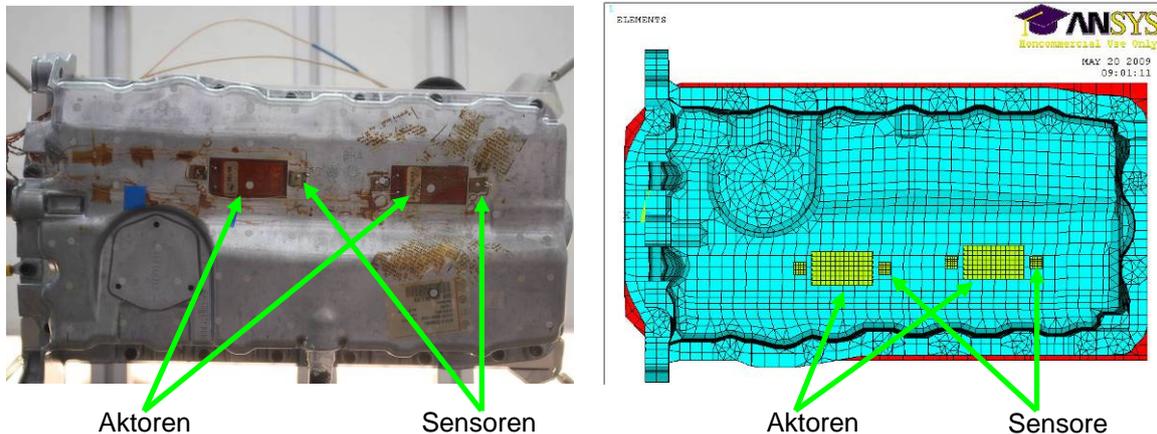


Abb. 3 Ölwanneboden mit Aktoren und Sensoren. Links: Demonstrator. Rechts: FE-Modell.

4. Sensitivitätsanalyse des Ölwannebodensystems

In den Sensitivitätsanalysen des Ölwannebodensystems werden die folgenden Größen als Einflussfaktoren untersucht:

- Anregungsposition des Shakers (P)
- Füllstand bzw. Ölvolumen (V)
- Eckfrequenz des Reglers (ω_C)
- Verstärkungsfaktor des Reglers (K_C)

Die Anregungspositionen liegen alle auf dem massiven Rahmen auf der Oberseite der Ölwanne. Mit einer Reduzierung des Verstärkungsfaktors kann eine Degradation des Aktors simuliert werden.

Die Untersuchungen werden sowohl für das passive als auch für das aktive Ölwannebodensystem durchgeführt. Bei der Untersuchung des passiven Ölwannebodensystems werden die Amplituden der Übertragungsfunktion von Anregungskraft zur Beschleunigung der Ölwannebodenschwingung bei den ersten zwei Eigenfrequenzen als Zielgrößen betrachtet. Für das aktive System wird die Dämpfung der Bodenschwingung bei den ersten beiden Eigenfrequenzen als Zielgröße betrachtet. Für die experimentellen Untersuchungen werden vollfaktorielle Versuchspläne aufgestellt. In diesen Plänen sind für jede Faktorgröße zwei Einstufungen definiert. Die numerische Sensitivitätsanalyse erfolgt durch einen

automatisierten Simulationsprozess, in diesem interagieren verschiedene Programme miteinander. Abb. 4 stellt diesen Simulationsprozess schematisch dar.

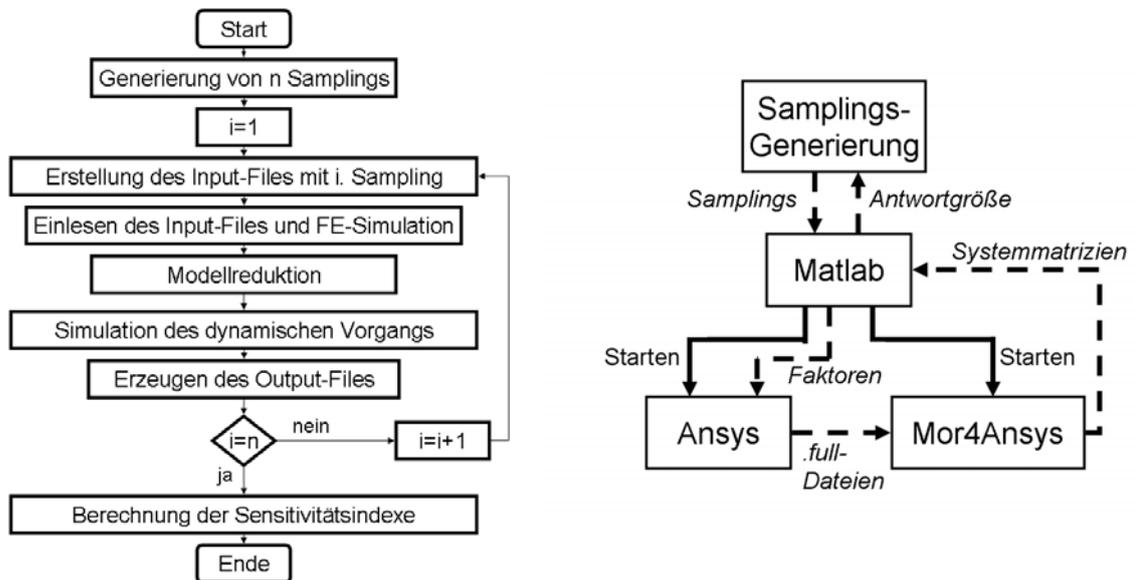


Abb. 4 Schematische Darstellungen des Simulationsprozesses.

5. Ergebnisse

Für das passive Ölwanne system werden bezüglich der Schwingungsamplitude bei der ersten Eigenfrequenz der Ölwannebodenschwingung die Einflüsse von Anregungsposition (P), Füllstand (V) und deren Wechselwirkung (PV) bewertet. Abb. 5 zeigt diese Ergebnisse:

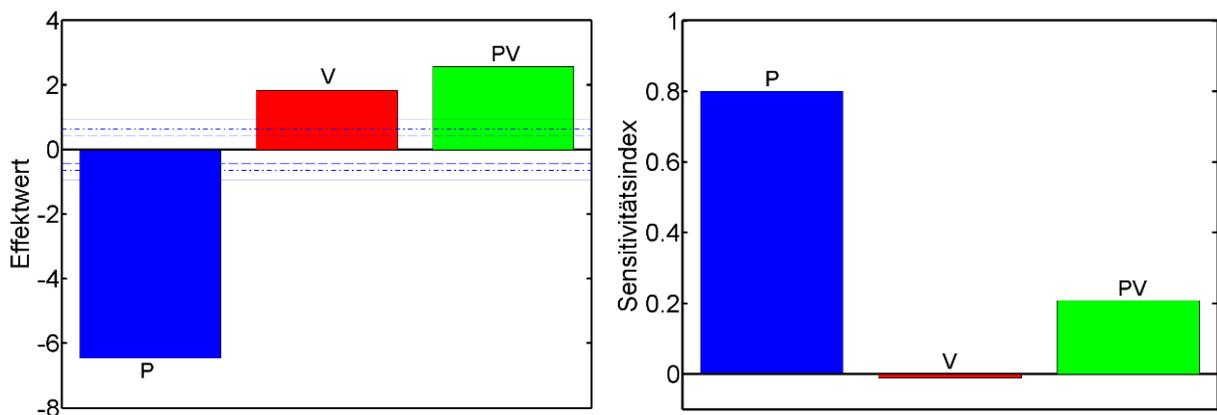


Abb. 5 Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen bei der ersten Eigenfrequenz der Ölwannebodenschwingung. Links: Effektwerte aus der experimentellen Untersuchung. Rechts: Sensitivitätsindizes aus der numerischen Untersuchung.

Das Vorzeichen vom Effektwert aus der experimentellen Untersuchung zeigt die Wirkungsrichtung des Faktoreffekts an. Für den Vergleich dieser beiden Ergebnisse sind die Beträge dieser Werte zu betrachten. Aus den Werten lässt sich schließen, dass durch die beiden Methoden die gleichen dominanten Einflussfaktoren erkannt werden. Die Anregungsposition hat den größten Einfluss auf die Amplitude bei der ersten Eigenfrequenz. Der Wechselwirkungseffekt zwischen Anregungsposition und Füllstand ist viel kleiner als der Haupteffekt der Anregungsposition aber größer als der Haupteffekt vom Füllstand. Der Füllstand spielt in diesem Fall die kleinste Rolle. Für das aktive Ölwanne-System ergeben sich aus der experimentellen und simulationsbasierten Untersuchung im Bezug auf die Dämpfung der Ölwannebodenschwingung bei der ersten Eigenfrequenz die folgenden Ergebnisse:

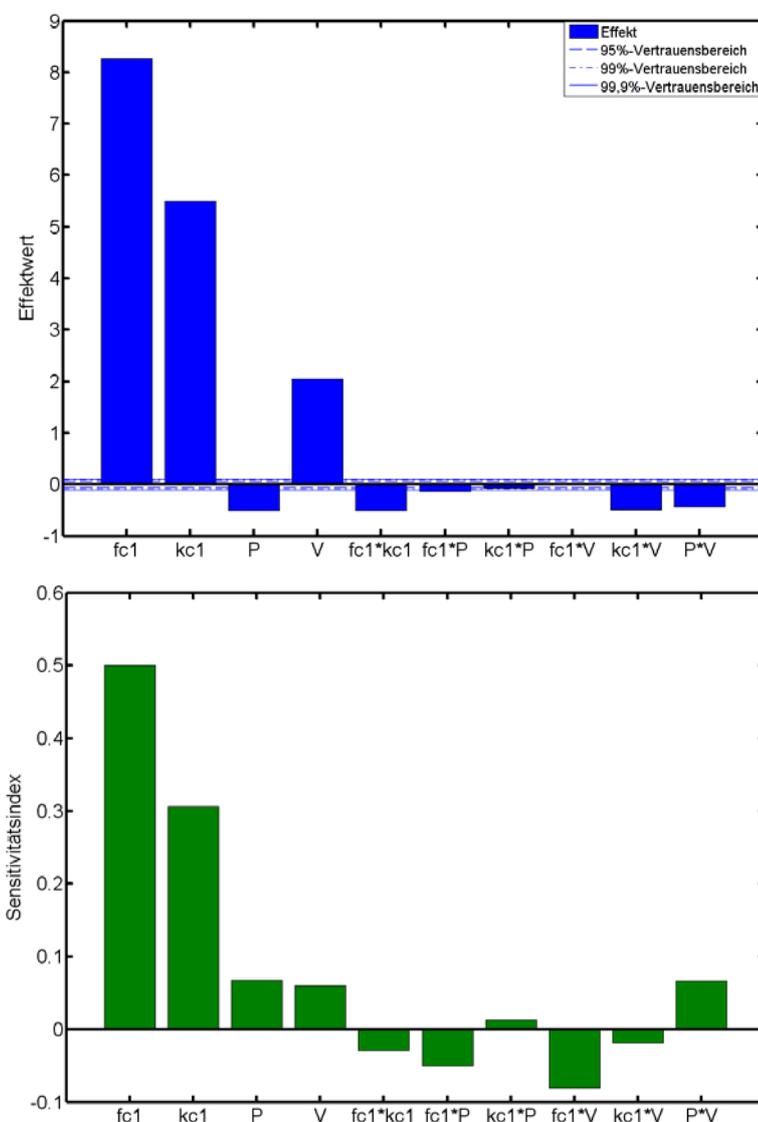


Abb. 6 Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen des aktiven Ölwanne-Systems. fc1-Eckfrequenz des Reglers, kc1-Verstärkungsfaktor des Reglers. Oben: Effektwerte aus der experimentellen Untersuchung. Unten: Sensitivitätsindizes aus der numerischen Untersuchung.

Durch beide Methoden lässt sich die Eckfrequenz des Reglers als den Einflussfaktor mit der größten Dominanz für die Dämpfungswirkung des aktiven Systems erkennen. Der Verstärkungsfaktor des Reglers weist auch in beiden Ergebnissen einen großen Einfluss auf die Leistung des aktiven Systems auf. Die Einflüsse von allen anderen Faktorgrößen sind vergleichsweise viel geringer. Es ist hier auch zu erkennen, dass die Betragsverhältnisse zwischen den dominanten Faktoreffekten aus beiden Ergebnissen ebenfalls qualitativ gut übereinstimmen.

Im Bezug auf das Schwingverhalten bei der zweiten Eigenfrequenz ergeben sich aus den experimentellen und numerischen Untersuchungen sowohl für das passive, wie Abb. 7 zeigt, als auch für das aktive Ölwanne-System keine gut übereinstimmenden Ergebnisse. Dies könnte an einem nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Amplitude und der Anregungsposition oder dem Füllstand liegen. In diesem Fall muss in der experimentellen Untersuchung für jede Faktorgröße eine größere Anzahl an Einstellungsstufen definiert werden.

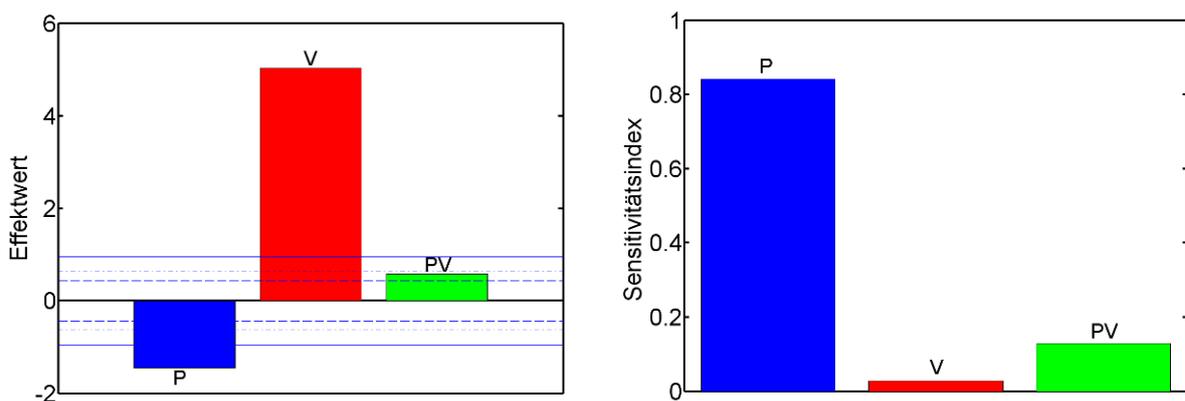


Abb. 7 Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen bei der zweiten Eigenfrequenz der Ölwannebodenschwingung. Links: Effektwerte aus experimenteller Untersuchung. Rechts: Sensitivitätsindizes aus numerischer Untersuchung.

6. Schlussfolgerung

Die Untersuchungen in Rahmen dieser Arbeit haben gezeigt, dass die Methode der Sensitivitätsanalyse eine gute Technik zur Bewertung des Einflusses von toleranzbehafteten Faktorgrößen bereitstellt. Mittels der Methode der statistischen Versuchsplanung wurde eine gut strukturierte und zielorientierte Versuchsdurchführung erreicht. Anschließend lässt sich eine schematische und übersichtliche Auswertung der Messdaten nach der Methode der statistischen Auswertung vornehmen. Sowohl für das passive Ölwanne-System, als auch für das aktive Ölwanne-System mit Regelung, lassen sich im Bezug auf das Schwingverhalten an der ersten Eigenfrequenz, durch simulationsbasierte Analysen

eine mit experimentellen Ergebnissen qualitativ gut übereinstimmenden Sensitivitätsbewertungen erzielen. Mittels der simulationsbasierten Methode können zum einen Arbeitszeit und Kosten für das Experiment gespart werden. Weiterhin ist es möglich im Experiment nicht herstellbare Zustände (z.B. Änderung der Aktor- oder Sensorposition) auf diese Weise zu untersuchen.

Danksagung

Die Autoren danken dem LOEWE-Zentrum AdRIA (Adaptronik - Research - Innovation - Application) gefördert vom Land Hessen für die Finanzierung dieser Arbeit.

Literatur

- [1] LOEWE-Zentrum AdRIA. <http://www.loewe-adria.de> (abgerufen: 26.01.2010)
- [2] EU Projekt „Intelligent Materials for Active Noise Reduction (InMAR)“, <http://www.inmar.info> (abgerufen: 26.01.2010)
- [3] Montgomery, D. C. , *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, Inc. 2005.
- [4] Box, G. E. P. / Draper, N. R. , *Evolutionary Operation*. John Wiley & Sons, New York, 1969.
- [5] Saltelli, A. / Chan, K. / Scott, E.M. , *Sensitivity Analysis*. John Wiley & Sons, LTD, 2000.