

Model Updating mit Betriebsschwinganalysen

Dr.-Ing. **J. Guggenberger**, Müller-BBM GmbH, Planegg;
Ir. **E. Dascotte**, Dynamic Design Solution, Leuven, Belgien

Kurzfassung

Model Updating ist eine etablierte Methode für die Validierung und Anpassung von Simulationsmodellen in der Strukturdynamik. In der klassischen Methode werden Daten aus einer experimentellen Modalanalyse (EMA) mit Simulationsergebnissen korreliert. Vorteilhaft ist, dass sich damit Unsicherheiten auf die Strukturparameter weitgehend unabhängig von den dynamischen Kräften beschränken. Die mit EMA erzeugten Referenzdaten sind besser reproduzierbar und von besserer Qualität als Betriebsschwingdaten.

Wenn eine experimentelle Modalanalyse in der betrachteten Konfiguration aufgrund der Randbedingungen nicht sinnvoll durchführbar ist, oder wenn sich im Betriebsfall das strukturdynamische Verhalten ändert (z.B. aufgrund von Temperaturabhängigkeit, lastabhängige Nichtlinearität, Auflagerbedingungen), müssen Daten aus Betriebsschwinganalysen für die Korrelation herangezogen werden. Ein Modell, das unmittelbar auf Betriebsschwingungsdaten angepasst wird, stellt auch die Validierung unter Betriebslasten sicher.

Verschiedene Möglichkeiten zur Korrelation und zum Model Updating anhand von gemessenen Betriebsschwingdaten (OMA, ODS, ODS-FRF) werden vorgestellt und bezüglich ihrer Unsicherheiten und Effizienz anhand eines Anwendungsbeispiels diskutiert.

Abstract

Model Updating for validation and tuning of simulation in structural dynamics simulation is a long established method. The classic approach consists in correlating modal analysis data, because the uncertainties are restricted to structural parameters independent of operational loads. The produced reference data (natural frequencies and mode shapes) is quite stable and of acceptable quality.

However it is often desirable to correlate and update models using operational data, if it is not possible to perform a modal analysis or if the structural behaviour changes significantly under operational load. A such updated model would automatically guarantee the validity to operational conditions.

The paper shows the correlation of different types of ODS-data and discusses its suitability for model updating.

1. Einführung

Model Updating als Hilfsmittel zur Validierung von FE-Modellen hat sich als Standard-Werkzeug in der Strukturodynamik etabliert. Das klassische Verfahren zielt auf eine Fehlerminimierung zwischen den Ergebnissen einer Modalanalyse aus Simulation (FEM) und Experiment (EMA). Als Nebenbedingung bzw. als weiteres Residuum wird die Korrelation von Modenpaaren eingeführt, um sicherzustellen, dass nur die Fehlerdifferenzen von Eigenfrequenzen gepaarter Modenformen verwendet werden.

Die Methode wurde weiterentwickelt, um Daten aus Betriebsmessungen als Zielfunktionen (Residuen) verwenden zu können.

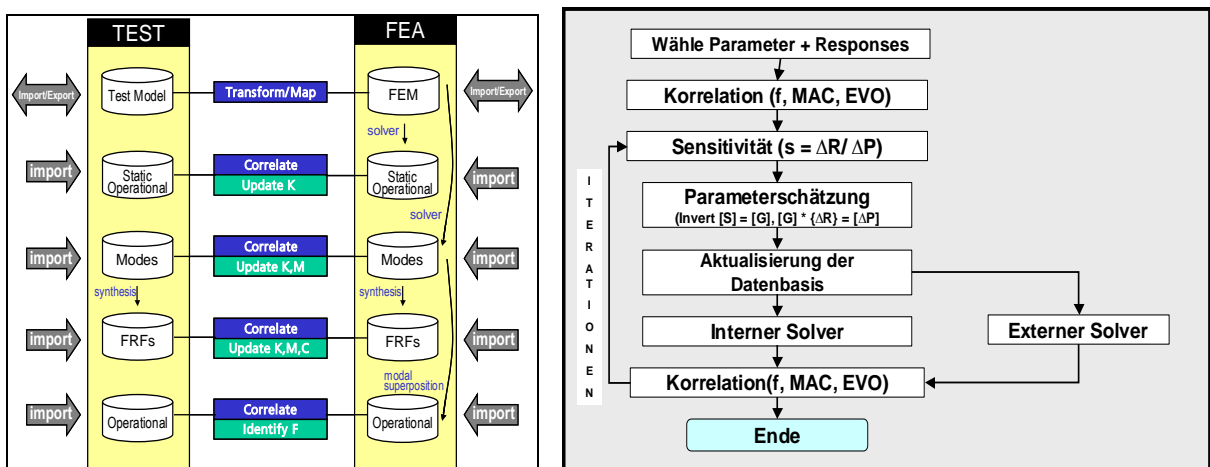


Bild 1: Korrelationsstufen zwischen Messung und FEM, Ablaufschema Model Updating

2. Anwendung von Updating Methoden

2.1 Grundzüge der klassischen Anwendung

Prinzipiell können verschiedenste experimentelle Daten mit Berechnungsergebnissen verglichen werden (vgl. Bild 1, links). Zunächst wurden Updating-Verfahren auf der Grundlage von Modaldaten entwickelt.

- Eine experimentelle Modalanalyse zur Strukturidentifikation ist relativ einfach durchführbar und kostengünstig.
- Die sich daraus ergebenden Struktureigenfrequenzen haben eine geringe Streuung.
- Die Darstellung der Eigenschwingformen vermittelt eine globale Übersicht über das dynamische Strukturverhalten.

Als Grundlage für ein Updating werden die Mess- und Rechenergebnisse in Stufen korreliert:

- Geometrische Korrelation: Zuordnung der Freiheitsgrade des Testmodells mit den Freiheitsgraden des FE-Modells
- Globale Korrelation: Berechnung des Modal Assurance Criterium (MAC) zur Quantifizierung der Korrelation der Schwingformen.
- Zuordnung der Schwingformen anhand der globalen Korrelation (MAC), visuelle Überprüfung der Korrelation.
- Lokale Korrelation: die Amplituden der Schwingformen werden freiheitsgradbezogen korreliert. Alternativ werden Übertragungsfunktionen (FRF) korreliert. Lokale Parameterabweichungen können identifiziert werden.

Auf der Grundlage der Korrelation erfolgt die Wahl der Residuen und FE-Parameter, die im Model Updating abgepasst stufenweise angepasst werden (Bild 1 rechts):

- Globale Residuen, in der Regel werden die Abweichung der Eigenfrequenzen gepaarter Schwingformen vorgegeben.
- Unsichere Parameter, die angepasst werden sollen, werden global gewählt, in weiteren Verfeinerungsschritten können die Parameter auch lokal ausgewählt werden.
- Sensitivitätsanalyse: Bestimmung des Gradienten als linearisierte Funktion zwischen Residuum und Parameter. Für globale und lokale Element-Parameter werden die Sensitivitäten mit geschlossenen Ausdrücken ermittelt. Eine rechenintensive Ermittlung des Gradienten durch Parametervariation kann dadurch vermieden werden.
- Parameterschätzung: die erforderlichen Parameteränderungen werden anhand der Sensitivitätsmatrix aus einer Schätzung ermittelt.
- Lösen des Gleichungssystems, Korrelation der Zielfunktionen, Konvergenztest, ggf. Abbruch, Wiederholung des Iterationsschritts.

2.2 Updating mit OMA Daten

Die „Operational Modal Analysis“ (OMA) wird vorzugsweise im Bauwesen eingesetzt, da große Strukturen schwer künstlich anzuregen sind. Vorausgesetzt wird eine breitbandige Anregungen, so dass sich durch Mittelung der Antwortspektren Eigenfrequenzen leicht anhand der spektralen Spitzen ermittelt werden können. Auf der Basis stochastischer Modelle bzw. mit „Deconvolution“ wird der Anteil der Anregung aus den Antwortspektren virtuell abgeschätzt und von der reinen Strukturantwort getrennt. Die Pseudo-FRF werden in eine Form gebracht werden, die herkömmlichen EMA-FRF mit Phasensprung an Resonanzspitzen entsprechen. Darauf können wiederum klassische Curve-Fit Algorithmen angewendet werden, um die Moden zu identifizieren.

Bild 2 zeigt gemittelte Spektrum einer Brückenmessung mit Hintergrundrauschen als Anregung. Die identifizierten Moden wurden verwendet, um das FE-Modell zu kalibrieren und danach die Schwingungsdämpfer zu justieren (Bild 2 rechts).

Die Methode wird zunehmend für andere mechanische Strukturen u.a. auch im Fahrzeugbau eingesetzt [5]. Für gute Ergebnisse sollte die Anregung über den gemittelten Zeitraum möglichst breitbandig und inkoherent sein. Bei typischen Anwendungen im Automobilbau wird die Anregung jedoch durch das deterministische Signal in den Motor- oder Drehzahlordnungen „gestört“. Ist das Drehzahlsignal maßgebend, so können die Pseudo-FRF auch aus einem Ordnungsspektrum gewonnen werden.

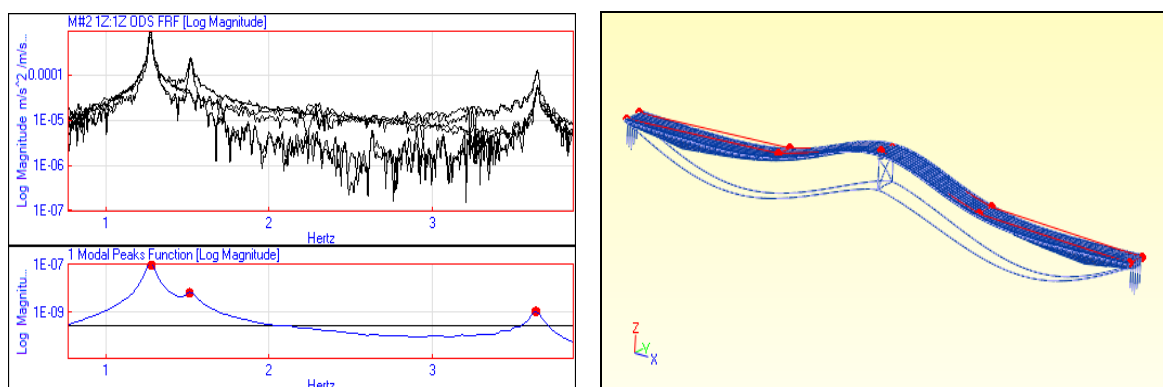


Bild 2: OMA an einer Fußgängerbrücke, links: Antwortspektrum mit Umweltrauschen, Modal-peaks-funktion; rechts: Korrelation von OMA-Shapes (rot) mit den Moden des FE-Modells (blau).

2.3 Updating mit Betriebsschwingformen

Sind die Strukturparameter und das Modell zu einem ausreichenden Grad korreliert, werden im nächsten Schritt Betriebsschwingformen (ODS) korreliert. Die Amplitudenresiduen an den Freiheitsgraden können wiederum dazu verwendet werden, das Lastmodell anzupassen. Vorab werden die Randbedingungen des Lastmodells definiert (Angriffspunkte, Orientierung) sowie Zwangsbedingungen eingeführt, z.B. quadratische Zunahme im Frequenzbereich, Phasenlagen zwischen den einzelnen Kräften etc. [3].

Bei genauer Kenntnis der einwirkenden dynamischen Kräfte bzw. Verschiebungsrandbedingungen können die Betriebsschwingformen korreliert werden. Verglichen mit der Schwingformkorrelation von Eigenschwingformen können neben dem „Displacement Assurance Kriterium“ (DAC), das dem MAC entspricht, auch die Skalierung und die Phasenlage zwischen den Vektoren der Betriebsschwingformen aus Messung und Berechnung als globale Korrelationskriterien ausgewertet werden (Displacement Scale

Factor, DSF). Entsprechend können sie als Residuen für Model Updating verwendet werden. Die Sensitivitäten der Residuen können dabei für viele Parameter geschlossen angegeben werden, allgemein können die Sensitivitäten auch über Parametervariation bestimmt werden. Zur Bestimmung der Sensitivitätsmatrix wird analog zum Model Updating auf der Basis von statischen Verschiebungsfiguren [4] die Pseudo-Last Methode verwendet. Die Bewegungsgleichung wird nach den Parametern partiell abgeleitet. Bei parameterunabhängiger Last verschwindet der Kraftvektor und der Term der Ableitungen der Schwingformen steht im Gleichgewicht mit dem Term der Ableitungen der Systemmatrizen (Pseudo-dynamische Last, Gl. 1.).

$$\left(\mathbf{K} + i\omega\mathbf{C} - \omega^2\mathbf{M}\right) \frac{\partial(\mathbf{u})}{\partial(P)} = - \frac{\partial\left(\mathbf{K} + i\omega\mathbf{C} - \omega^2\mathbf{M}\right)}{\partial(P)} \mathbf{u} \quad (1)$$

mit $\mathbf{K} \mathbf{C} \mathbf{M}$... Systemmatrizen; ω ... Kreisfrequenz; \mathbf{u} ... Betriebsschwingformen.

Die Gleichung 1 wird mit der aktuellen modalen Basis in den Modalraum transformiert. Vorab werden die modalen Koordinaten der Betriebsschwingformen variiert und daraus die Sensitivität von DAC und DSF zu den modalen Beteiligungsfaktoren berechnet. Aus der Verknüpfung der beiden Teilrechnungen wird die Sensitivität der Residuen bezüglich der Parameter ermittelt.

3. Testbeispiel

Die einzelnen Möglichkeiten sollen anhand eines Testbeispiels verdeutlicht werden. Bild 3 zeigt einen Versuchsmotor, der auf einem federgelagerten „Maschinenfundament“ montiert ist. Die Grundplatte ist wiederum auf Elastomerelementen gelagert. Betrachtet werden die 12 Starrkörpermoden des Systems. Das System wurde in folgenden Schritten untersucht:

- i) Experimentelle Modalanalyse (Hammeranregung) – Updating Steifigkeit / Dämpfung
- ii) Operational Modal Analysis (OMA) – Updating Steifigkeit / Dämpfung
- iii). Korrelation der BSA-Formen, Updating Lastmodell
- iv) Korrelation der BSA-Formen, Updating Steifigkeit / Dämpfung

i) EMA – Updating

Die Starrkörpermoden wurden mit einem Hammer an einem Eck des Blockes in den drei Raumrichtungen nacheinander angeregt und identifiziert. Das sensitivitätsbasierte Updating liefert die Federsteifigkeiten der Spiralfedern und des Elastomers. Die Abweichungen der Eigenfrequenzen liegt bei $< 1 \%$, (vgl. Tabelle 1). Die MAC-Matrizen sind in Bild 4 dargestellt.

Die Federsteifigkeiten wurden zunächst global entsprechend der formulierten Federtypen, dann lokal für jede Feder individuell angepasst. Als Dämpfungsparameter wurden den Federn viskose Dämpfer parallelgeschaltet. Darüber hinaus erhielten die komplexen Federkonstanten einen Verlustfaktor. Zunächst wurden die Dämpfungsparameter so eingestellt, dass die modalen Dämpfungswerte aus der Messung angenähert werden konnten. In einem weiteren Verfeinerungsschritt wurde das „Cross Signature Scale Factor“-Spektrum (CSF) als Zielfunktion verwendet. Darin spiegeln sich die mittleren auf 100% normierten Amplitudenverhältnisse der Einzelspektren zwischen Messung und Berechnung wieder. In Bild 5 sind die Übertragungsspektren korreliert.

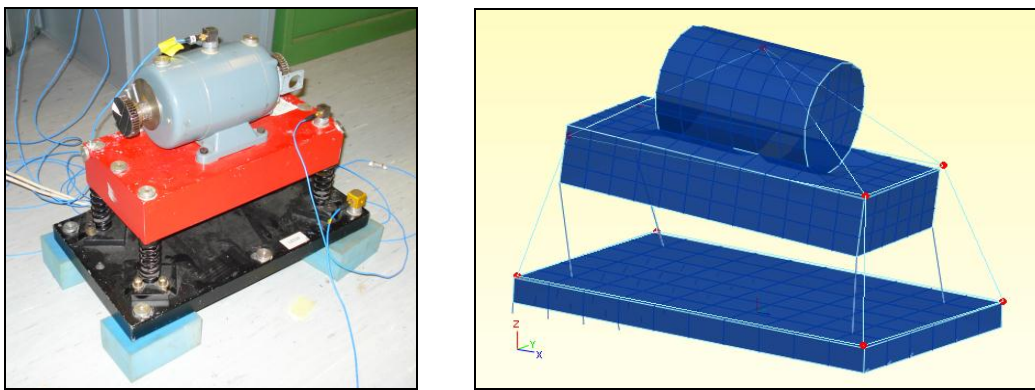


Bild 3: Links: Gelagerter Versuchsmotor; rechts: Vereinfachtes FE-Modell (blau) überlagert mit dem Testnetz (rot), Korrelation der 8. Eigenschwingform (20 Hz)

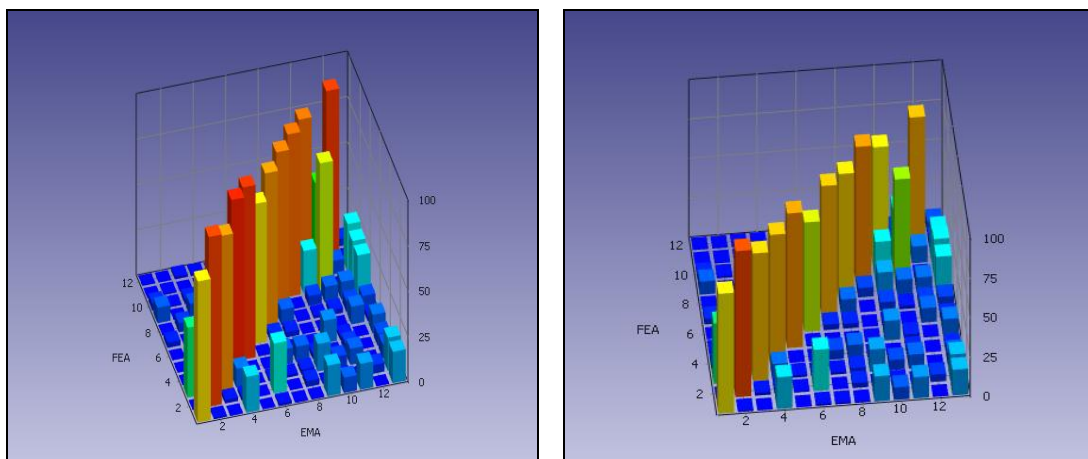


Bild 4: MAC-Matrix (links: reale Moden, rechts: komplexe Moden)

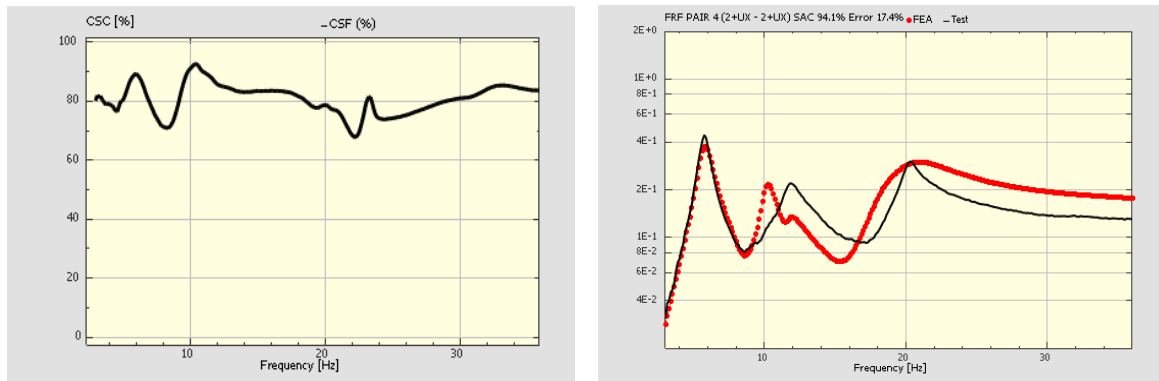


Bild 5: FRF-Korrelation: links: Cross Signature Scale Factor (CSF),
rechts: gemessene (durchgezogen) und berechnete (gepunktet) Akzeleranzfunktion

Tabelle 1: Korrelation der Eigenschwingformen

Mode	EMA Hz	FEA reell			FEA, komplex		
		Hz	Diff. %	MAC %	Hz	Diff. %	MAC %
1	4.6	4.6	0.5	76	4.7	1.3	77.1
2	5.7	5.8	1.0	92.7	5.8	0.9	91.7
3	9.2	9.3	1.3	80.8	9.3	1.4	81.6
4	10.2	10.1	-0.2	82.2	10.3	1.6	88
5	10.8	11.0	1.1	85.4	11.0	1.2	87.1
6	11.7	11.6	-0.4	69.3	11.5	-1.4	43.4
7	18.6	18.8	1.2	82	18.8	1.1	85.3
8	20.2	20.2	0.0	79.2	20.4	1.4	73.5
9	22.0	22.1	0.6	86.1	22.4	1.8	74.1
10	22.9	22.8	-0.2	75.4	22.8	-0.5	66.4
11	31.0	31.3	1.0	82.9	31.5	1.5	57

ii) Updating mit OMA-Daten

Für die OMA wurde eine Ordnungsanalyse eines Hochlaufs bis 2100 min^{-1} verwendet, bei dem alle 12 Starrkörperresonanzen bis 32 Hz durchfahren wurden. Aus den Ordnungs-APS wurden die ODS-FRF über die Phaseninformation aus den Ordnungs-CPS berechnet (Bild 6 links). Die Spektren wurden zweimal integriert und quadriert. Bei der „Deconvolution“ wird nach inverser FFT ein Ast der Korrelationsfunktionen zu Null gesetzt und wieder in den Frequenzbereich transformiert (Bild 6 rechts). Aus der OMA konnten 8 der 12 Starrkörpermoden bestimmt werden. Die nicht identifizierten Moden sind nicht von maßgebendem Interesse, da sie resonant nicht angeregt werden.

Analog zu den EMA-Daten wurden ebenfalls anhand der modalen Zielgrößen die Steifigkeits- und Dämpfungsparameter der Federelemente ermittelt. Die identifizierten Moden konnten im wesentlichen mit MAC-Werten zwischen 60 % – 80 % mit Abweichungen der Resonanzfrequenzen $< 1,3 \%$ zugeordnet werden (Bild 7).

Zur Bestimmung der Dämpfungsparameter wurden im ersten Schritt wiederum die aus der OMA ermittelten modalen Dämpfungen als Orientierung verwendet.

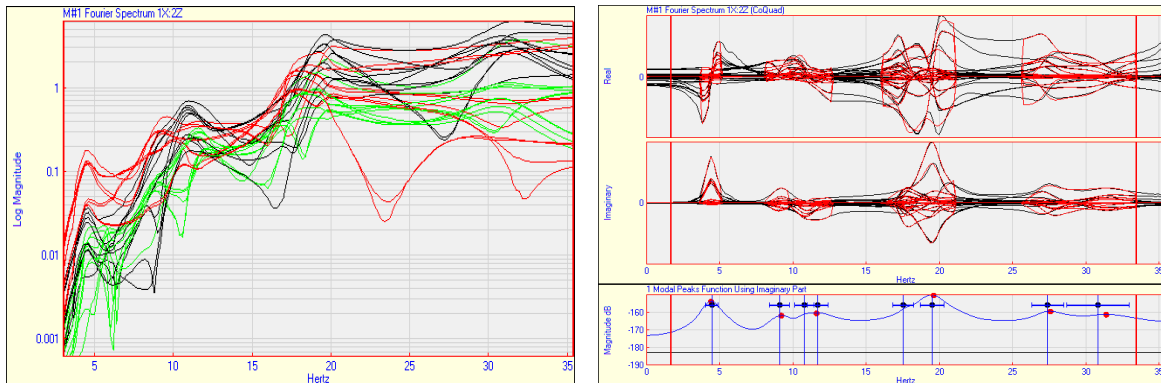


Bild 6: links: Ordnungs-APS der Beschleunigungen 1. Ordnung ; rechts: Verarbeitete ODS-FRF nach Deconvolution, Realteil mit Fit-funktion (oben), Imaginärteil mit Fit-funktion (Mitte), Modal Peaks function (unten)

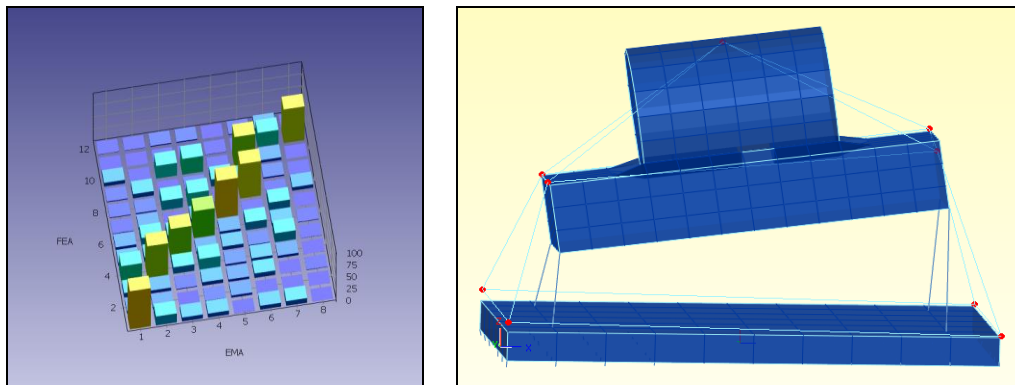


Bild 7: links: MAC-Matrix der OMA, rechts: Korrelation der 6. OMA-Schwingform

iii) Updating der Unwuchtkräfte

Um die Unwuchtkräfte zu identifizieren, wurde eine DOF-Maske an den Lagerpunkten definiert (Lager 1: x, y, z; Lager 2: y, z). Als Zwangsbedingungen wurden vorgegeben: drehzahlabhängig quadratische Funktion der Kraftamplitude, gleiche Amplitude und 90° Phase zwischen y und z Richtung pro Lager.

In einem Iterationsprozess wurden die Kraftamplituden und die Phasen der Lagerkräfte bestimmt. Als Zielgrößen dienten die gemessenen Ordnungs-ODS-FRF an den 9 Triax-Messpunkten. Bild 8 zeigt das Amplitudenspektrum und den Phasengang der Unwuchtkraft an Lager 1.

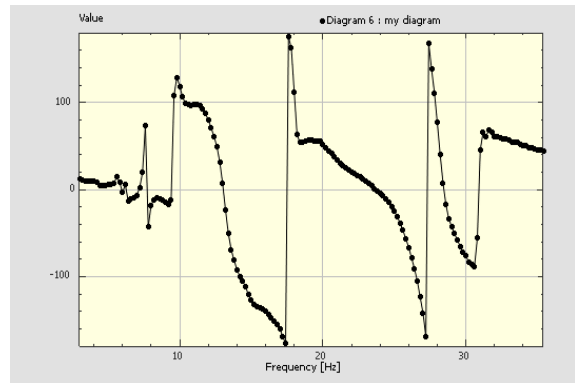
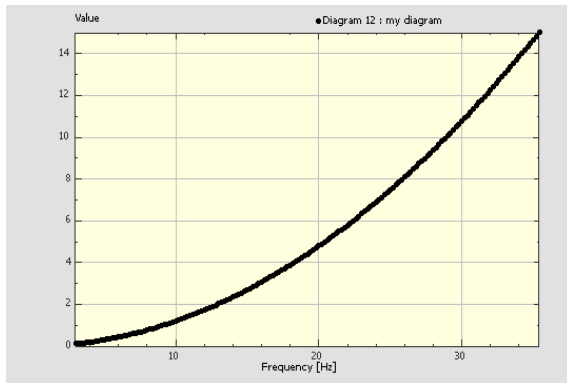


Bild 8: links: Kraftamplitude an Lager 2 in N, rechts: Phasengang in Relation zu den Ordnungs-ODS-FRF

iv) Updating mit ODS-Schwingformen und ODS-FRF

Für den Test wurden die verwendeten Steifigkeits- und Dämpfungsparameter wieder auf die Ausgangswerte zurückgesetzt und nicht die Werte aus der OMA weiterverwendet. Im Drehzahlbereich wurden 163 Schwingformen aus den Ordnungsspektren berechnet.

Bild 10 rechts zeigt die DAC-Matrix der Schwingformen. Im Drehzahlbereich wurde eine Korrelation im Mittel von 75 % erzeugt. Die Skalierungsfaktoren liegen im wesentlichen zwischen 0,6 bis 0,8. Die Sensitivitäten können vergleichsweise schnell berechnet werden. Es ergab sich eine gute Konvergenz in der Iteration.

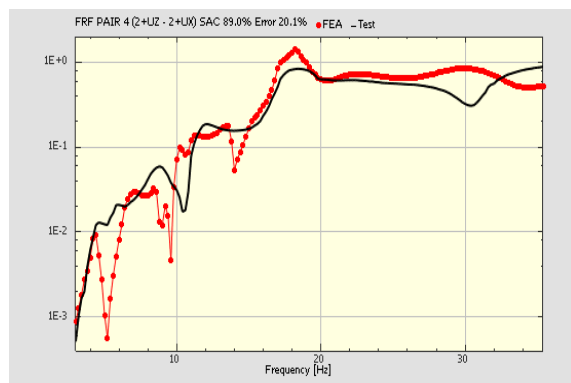
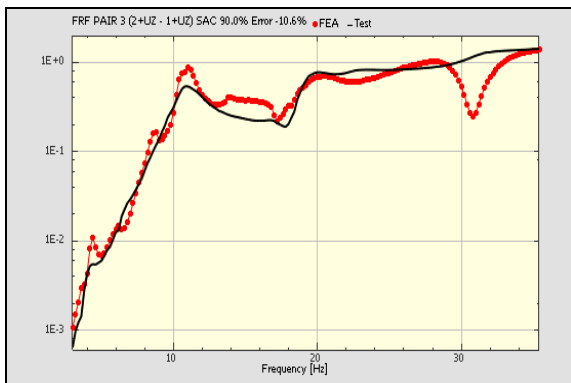


Bild 9 Überlagerung von gemessenen (durchgezogen) mit berechneten (gepunktet) Ordnungsspektren.

Im letzten Schritt ist es weiterhin möglich, die Ordnungsspektren direkt zu korrelieren und die Residuen zu berechnen. Für die üblichen FE-Parameter lassen sich auch hier wiederum geschlossene Ausdrücke für Sensitivitäten ableiten [2],[6]. Zur Verfeinerung der Ergebnisse wurden als Parameter nur die Dämpfungseigenschaften der Federn verwendet. Die

Berechnung der Sensitivitäten ist gegenüber den ODS-Sensitivitäten mit einem höheren Rechenaufwand verbunden. Die Konvergenz ist in der Regel weniger gut als bei Verwendung von Residuen der Schwingformkorrelation. Die Verbesserungen fielen eher gering aus.

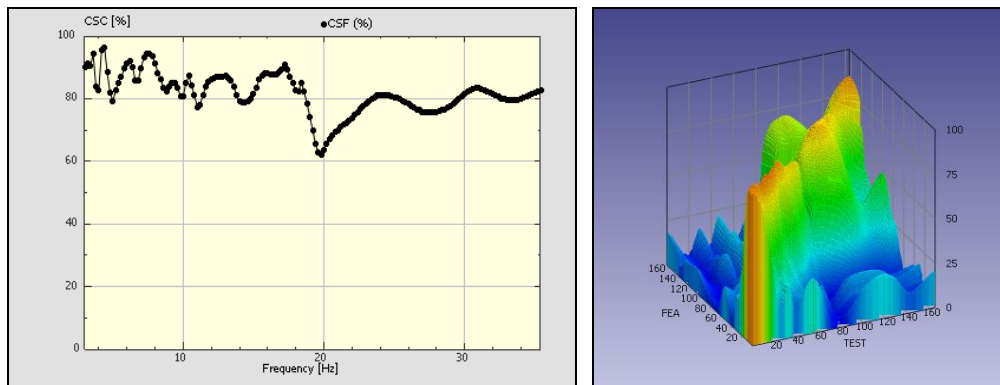


Bild 10 Cross Signature Scale Factor (CSF) der Ordnungs-ODS-FRF (links) und Displacement Assurance Criterion (DAC) von 163 korrelierten Betriebsschwingformen (rechts)

Die Korrelation der Ordnungsspektren ist exemplarisch in Bild 9 dargestellt. Bild 10 links zeigt das CSF-Spektrum der zugeordneten Ordnungsspektren.

4. Zusammenfassung

Die Systemidentifikation mit Betriebsschwingdaten gewinnt auf messtechnischer Seite zunehmend an Bedeutung. Die identifizierten Parameter beziehen sich auf die Randbedingungen im Betriebsfall und nicht auf Laborbedingungen. Die klassischen Updating Verfahren können auf Betriebsschwinganalysen analog angewendet werden. Der Nachteil gegenüber der experimentellen Modalanalyse besteht in erster Linie darin, dass die einwirkenden Kräfte in der Regel nicht unmittelbar oder nur mit verringerter Genauigkeit indirekt gemessen werden können.

Die Residuen sollten daher entsprechend dem Grad der Unsicherheit gewählt werden:

1. EMA: Wenn möglich, sollte eine experimentelle Modalanalyse vorgenommen werden. Daraus lässt sich das Strukturmodell grundsätzlich überprüfen. Die weiteren Messungen können darauf aufbauend geplant werden.
2. OMA: Durch eine OMA können die Unsicherheiten weitgehend ausgeblendet werden, die aus den Anregekräften rühren. Anhand der Ergebnisse kann überprüft werden, inwieweit sich die Struktur unter Betriebslast linear verhält.

3. Updating des Lastmodells: die Qualität der Bestimmung des Lastmodells hängt von der erzielten Korrelation aus EMA und OMA ab.
4. Updating mit Betriebsschwingungen: auf der Basis von messtechnisch ermittelten Betriebsschwingformen können die Strukturparameter angepasst werden. Da die Sensitivitäten gegenüber den einwirkenden Kräften um eine Ordnung höher sind als gegenüber Strukturparametern, muss das Lastmodell ausreichend genau sein, da sich die Fehler ansonsten in den Strukturparametern niederschlagen.

Um die erforderlichen Routinen in einem Model Updating Prozess implementieren zu können, muss eine dafür geeignete CAE-Umgebung zur Verfügung stehen. Die speziell für Model Updating und Optimierung konzipierte Software FEMtools vereinigt die erforderlichen grundlegenden Eigenschaften:

- Einfach zu bedienende Benutzeroberfläche für Standardaufgaben
- Flexibler Zugriff auf die Datenbasis und auf die grundlegenden Algorithmen.
- Bidirektionale Datenschnittstellen zu einschlägiger Test- und Simulationssoftware.

Literatur

- [1] Dynamic Design Solutions N.V. (DDS), FEMtools Version 3.4.0, 2009
- [2] E. Dascotte, J. Strobbe, "Updating Finite Element Models using FRF Correlation Functions", Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference (IMAC), February 1999, Kissimmee, Florida.
- [3] E. Dascotte, E.; Strobbe, J. "Identification of Gas Flow Pressure Forces in a Cavity using an Inverse Method", Proceedings of the 23rd International Seminar on Modal Analysis (ISMA), September 16-18, 1998, Leuven, Belgium.
- [4] E. Dascotte, E.; Schönrock, A., "Validation and Updating of an Aeroengine Finite Element Model based on Static Stiffness Testing". Presented at the 2nd MSC Aerospace Conference, June 7-11, 1999, Long Beach, CA, USA.
- [5] Brincker, R., Anderson, P., Moller, N., "Output-Only modal testing of a car body subject to engine excitation", Proc. Of the 18th international modal analysis conference San Antonio, Texas fev. 7 – 10, 2000.
- [6] Guggenberger, J. "Model Updating using operational data" , in "Simulation for Innovative Design", Eds. Seibert K.W. and Jirka, M., Proceedings of the 4th European Automotive Simulation Conference EASC 2009 München, 6. bis 7. Juli 2009, Seiten 349 – 358, 2009.