



Schwarzer, BMW Group, 22.11.2013

MODEL UPDATING MIT OPTISLANG.

**ERMITTLUNG TRANSVERSAL ISOTROPER MATERIALEIGENSCHAFTEN VON
IN HARZMATRIX EINGEBETTETEN KUPFERWICKLUNGEN IN E-MASCHINEN
DURCH MODEL UPDATING.**

**BMW
GROUP**



AGENDA.



1. Kupferwicklungen in elektrischen Maschinen.
2. Experimentelle Modalanalyse von Kupferwicklungen.
3. Modellierungsansätze für Kupferwicklungen.
4. Automatisches „Model Updating“ zur Identifikation von Ersatzmaterialeigenschaften.

KUPFERWICKLUNGEN IN ELEKTRISCHEN MASCHINEN.

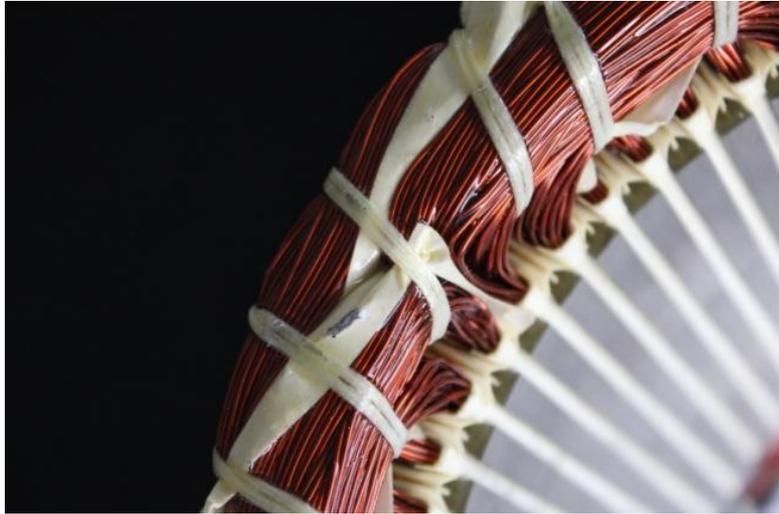


Abb. 1: Detailansicht eines exemplarischen Wickelkopfs in E-Maschinen.

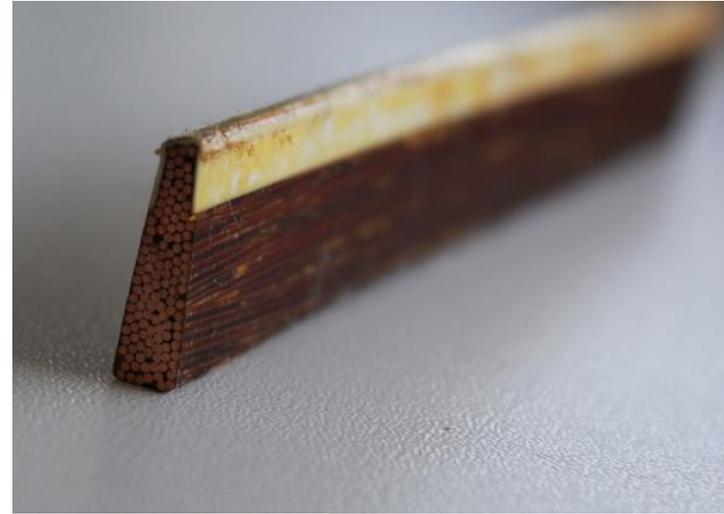


Abb. 2: Detailansicht der Kupferwicklungen aus einer E-Maschinenstatornut.

Wesentliche Funktionen der Kupferwicklungen:

- Leiten des zum Antrieb der Maschine notwendigen **elektrischen Stroms**.
- **Abtransport** der durch Ohmsche Verluste entstehenden **Wärme**.
- Gewährleistung der **mechanischen Festigkeit** über die Lebensdauer der Maschine.
- **Elektrische Isolation** der Drähte untereinander und zwischen Drähten und Struktur.

STRUKTUR DER KUPFERWICKLUNGEN.

Kupferdrähte:

- Der Drahtkern besteht aus elektrisch hochleitfähigem Kupfer.
- Elektrische Isolation der Drähte mittels dünner Kunststofflackschicht.



Abb. 3: Bündel aus Kupferdrähten im angelieferten Zustand.

Imprägniermaterial:

- Verwendung eines Polyesterimids zur elektrischen Isolation.
- Kunststoff → Frequenz-/Temperaturabhängige Materialeigenschaften.

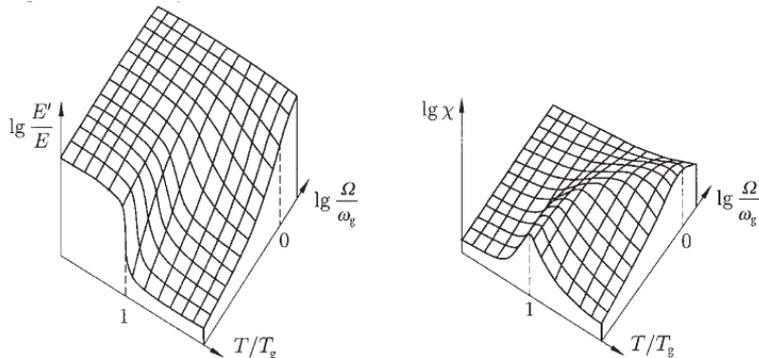


Abb. 5: Exemplarische Darstellung der Abhängigkeit des E-Moduls (links und der Dämpfung (rechts) von Temperatur und Frequenz der Belastung [VDI 3830 Blatt 2].



Abb. 4: Darstellung des Imprägnierungsprozesses.

EXPERIMENTELLE MODALANALYSE.

Versuchsaufbau:



Abb. 6: Kupferwicklungsprobe aus einer Statornut entnommen (konischer Querschnitt, Tiefe 3,6 bis 5,3 mm).

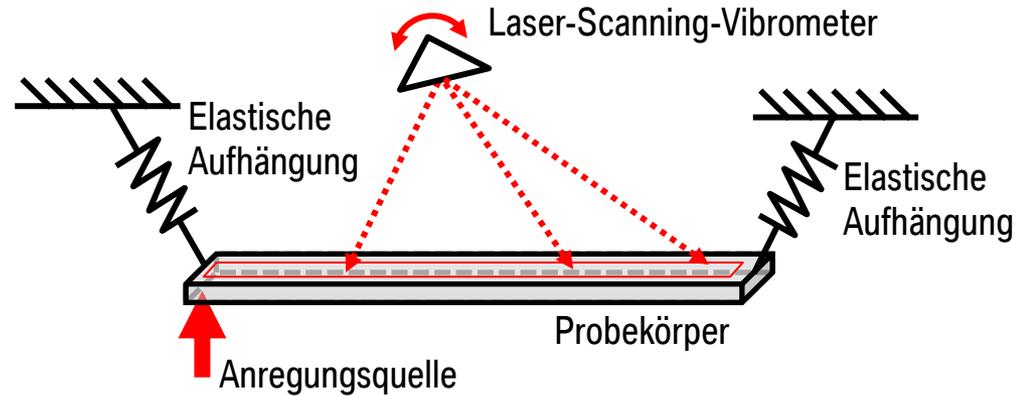
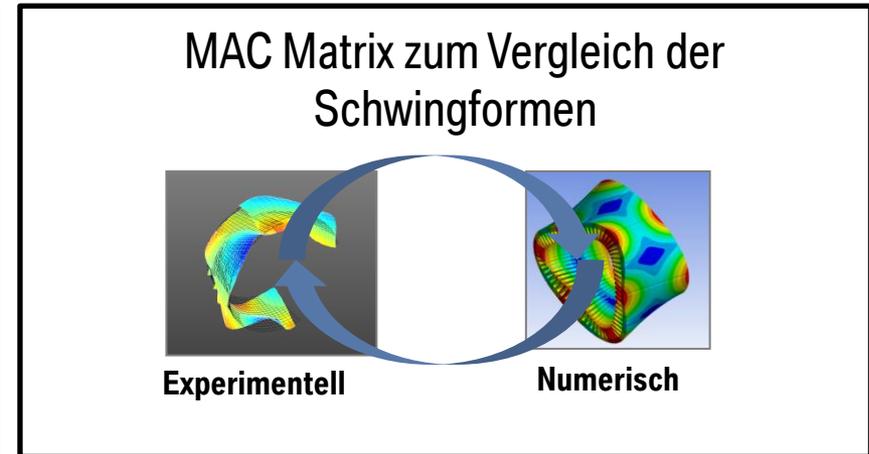
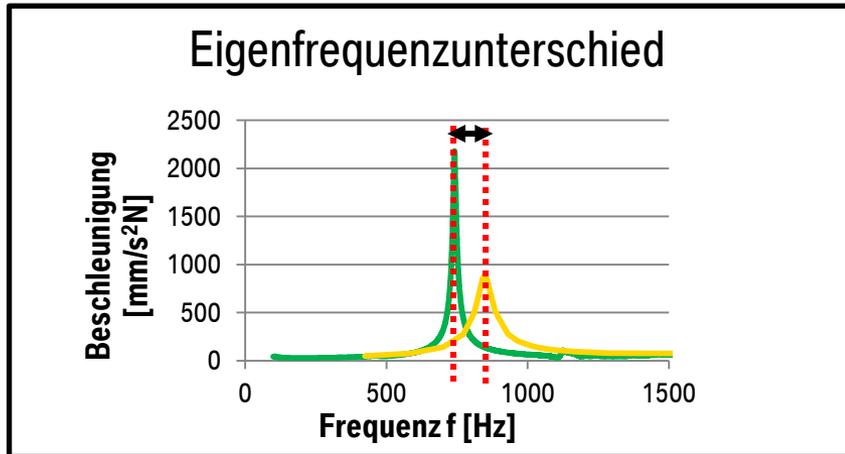


Abb. 7: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur experimentellen Modalanalyse.

Ergebnisse:

	1. Mode	2. Mode	3. Mode	4. Mode
Modale Schwingform				
Eigenfrequenz	745 Hz	1977 Hz	3481 Hz	5055 Hz

VERGLEICHBARKEIT VON NUMERISCHER UND EXPERIMENTELLER MODALANALYSE.



$$f = a \sum_{i=1}^{nmodes} \left[\frac{|f_i^{\text{exp}} - f_i^{\text{num}}|}{f_i^{\text{exp}}} \right] + b \sum_{i=1}^{nmodes} \left[\text{MAC}(\phi_i^{\text{exp}}, \phi_i^{\text{num}}) - 1 \right]$$

[D. Ribeiro; Finite element model updating of a bowstring-arch railway bridge based on experimental modal parameters; Engineering Structures, Nr. 40, S. 413-435; 2012]

$$f = \sum_{i=1}^{nmodes} \text{MAC}(\phi_i^{\text{exp}}, \phi_i^{\text{num}}) \left(1 - \frac{|f_i^{\text{exp}} - f_i^{\text{num}}|}{f_i^{\text{exp}}} \right)$$

DETAILLIERTES MODELL FÜR KUPFERWICKLUNGEN.

Materialdaten:

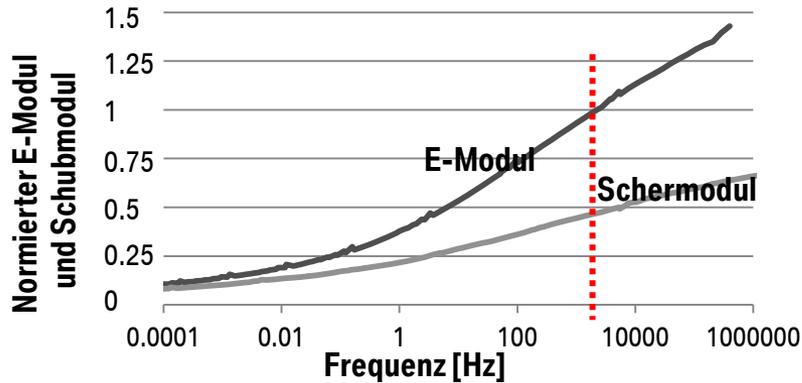


Abb. 8: Frequenzabhängige Materialparameter für das Imprägnierharz bei 20°C.

Simulationsmodell:

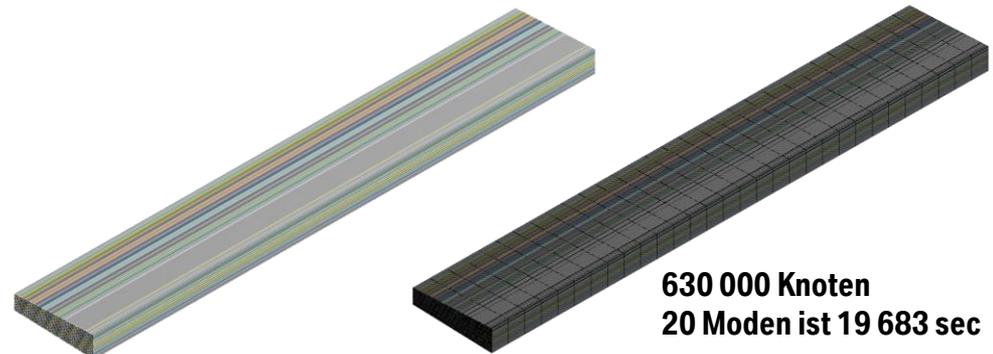
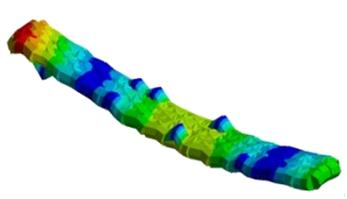
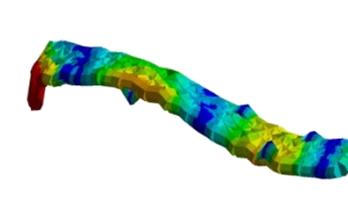
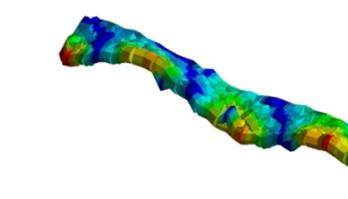
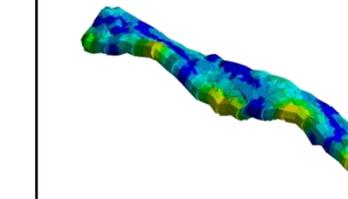
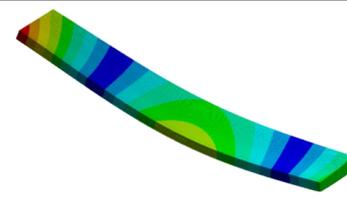
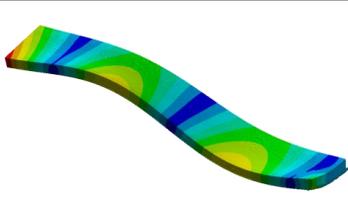
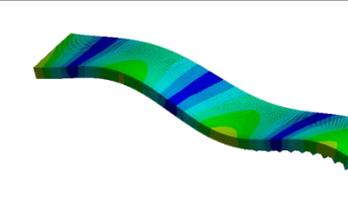
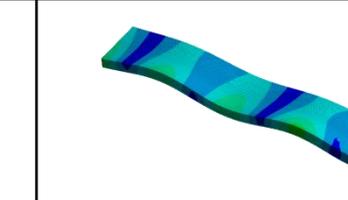


Abb. 9: Modellansicht des Probekörpers aus ANSYS.

Ergebnisse:

	1. Mode	2. Mode	3. Mode	4. Mode
Modale Schwingform				
Eigenfrequenz	780 Hz	1827 Hz	2935 Hz	4404 Hz

BEWERTUNG DES DETAILLIERTEN MODELLS.

	1. Mode	2. Mode	3. Mode	4. Mode
Messung	Modale Schwingform 			
	Eigenfrequenz 745 Hz	1977 Hz	3481 Hz	5055 Hz
Simulation	Modale Schwingform 			
	Eigenfrequenz 780 Hz	1827 Hz	2935 Hz	4404 Hz
Vergleich	MAC 0,612	0,709	0,630	0,433
	EF-Error 4,70 %	-7,59 %	-15,7 %	-12,9 %

ERSATZMODELL NACH CHAMIS.

Materialdaten:

Transversal isotrope Ersatzmaterialdaten für Faserverbundmaterialien können mit den Formeln von Chamis auf Basis der Materialdaten der Grundwerkstoffe berechnet werden.

$$E_{11} = V^f E_{11}^f + V^m E^m$$

$$E_{22} = \frac{E^m}{1 - \sqrt{V^f} (1 - E^m / E_{22}^f)}$$

$$\nu_{12} = V^f \nu_{12}^f + V^m \nu^m$$

$$G_{12} = \frac{G^m}{1 - \sqrt{V^f} (1 - G^m / G_{12}^f)}$$

$$G_{23} = \frac{G^m}{1 - \sqrt{V^f} (1 - G^m / G_{23}^f)}$$

Abb. 10: Formeln von Chamis für transversal isotrope Materialdaten.

Simulationsmodell:

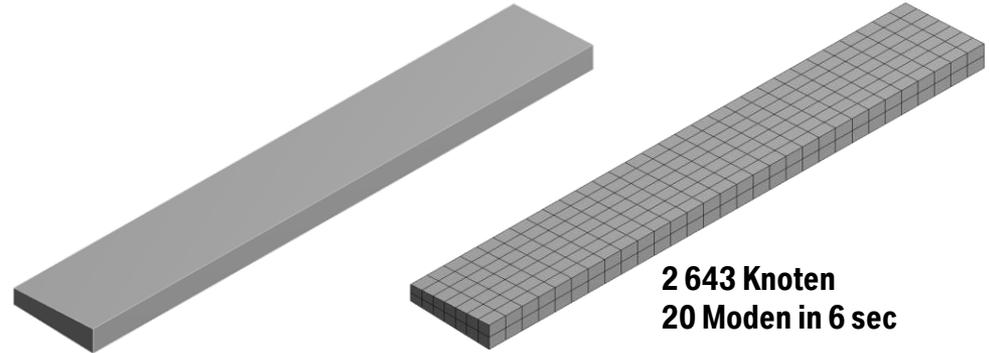
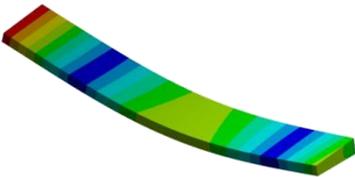
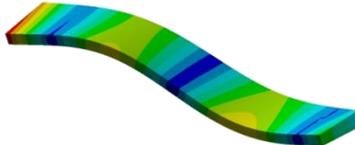
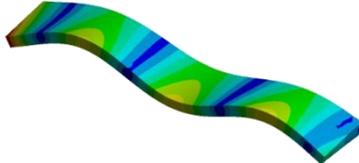
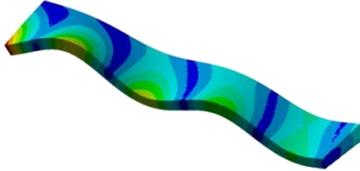
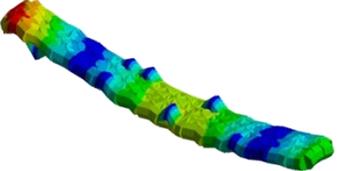
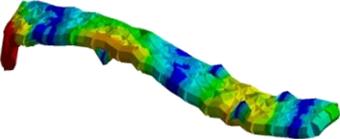
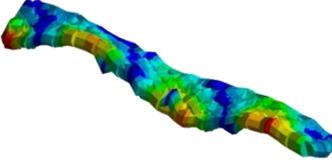
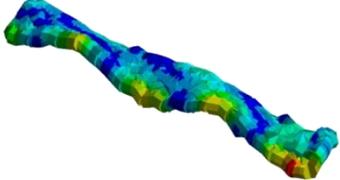
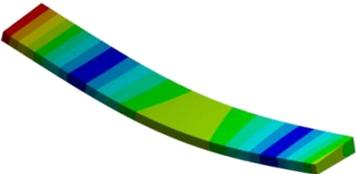
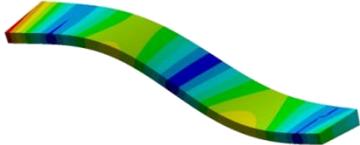
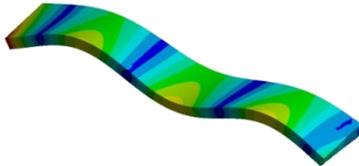
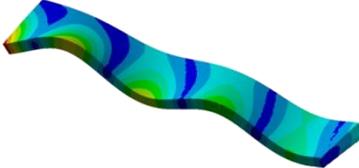


Abb. 11: Ansicht des transversal isotropen Ersatzmodells aus ANSYS.

Ergebnisse:

	1. Mode	2. Mode	3. Mode	4. Mode
Modale Schwingform				
Eigenfrequenz	837 Hz	2240 Hz	4133 Hz	5873 Hz

BEWERTUNG DES ERSATZMODELL NACH CHAMIS.

	1. Mode	2. Mode	3. Mode	4. Mode
Messung	Modale Schwingform 			
	Eigenfrequenz 745 Hz	1977 Hz	3481 Hz	5055 Hz
Simulation	Modale Schwingform 			
	Eigenfrequenz 837 Hz	2240 Hz	4133 Hz	5873 Hz
Vergleich	MAC 0,941	0,554	0,679	0,281
	EF-Error 12,3 %	13,3 %	18,7 %	16,2 %

MODEL UPDATING PROZESS.

Prozessschaubild:

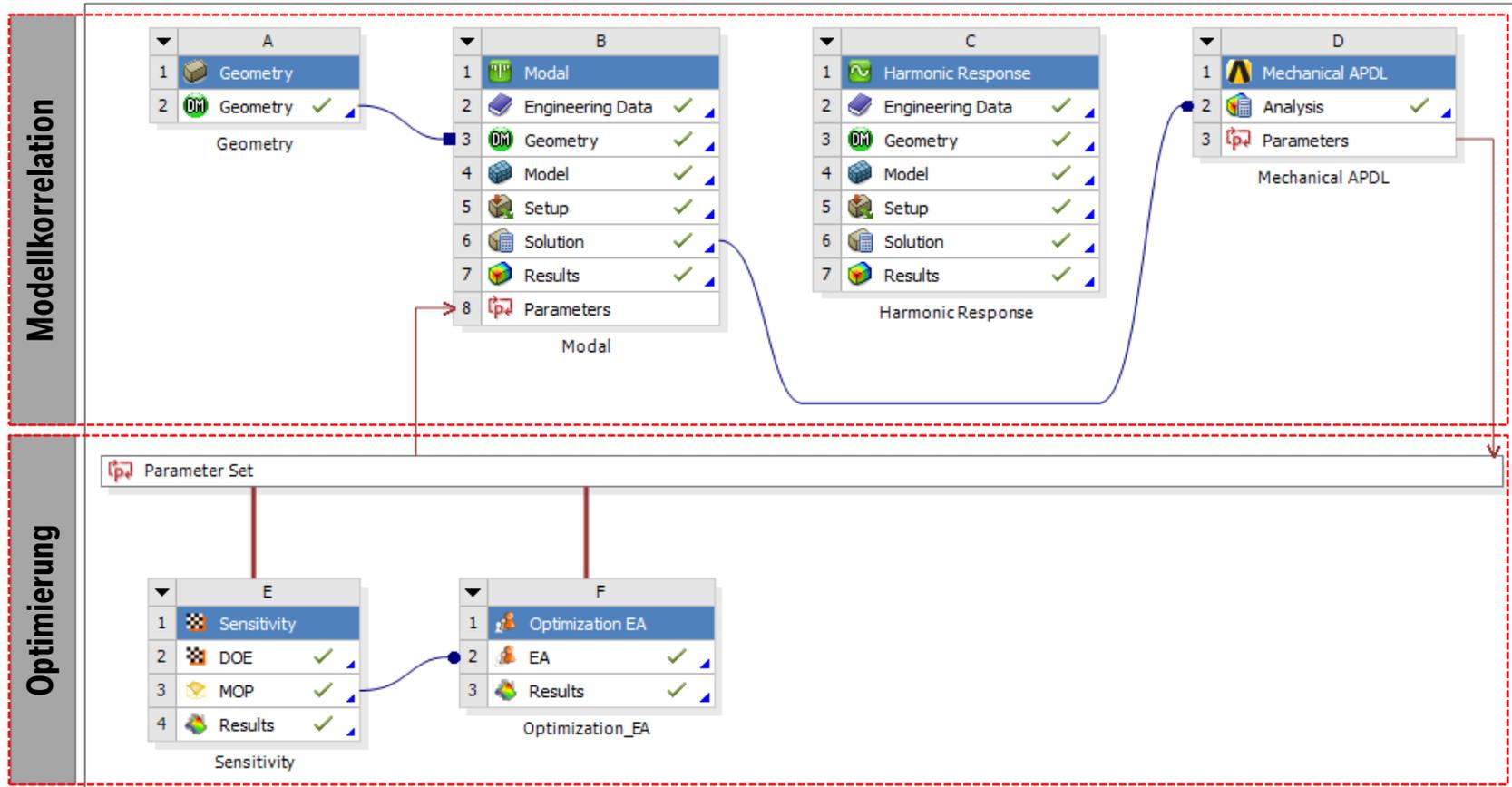


Abb. 12: Exemplarischer Screenshot der ANSYS WB Oberfläche für den dargestellten „Model Updating“ Prozess.

MATERIALEIGENSCHAFTEN VIA MODEL UPDATING.

Materialdaten:

Zwei von fünf Materialparametern wurden in einer Sensitivitätsanalyse als signifikant identifiziert und werden in einem „Evolutionary Algorithm“ hinsichtlich der Zielfunktion optimiert.

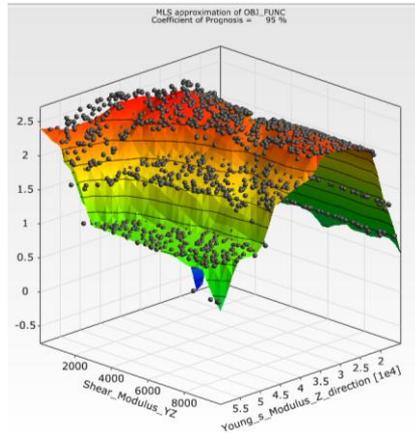


Abb. 13: Antwortfläche für die Eingangsmaterialparameter E_z und G_{xy}

Simulationsmodell:

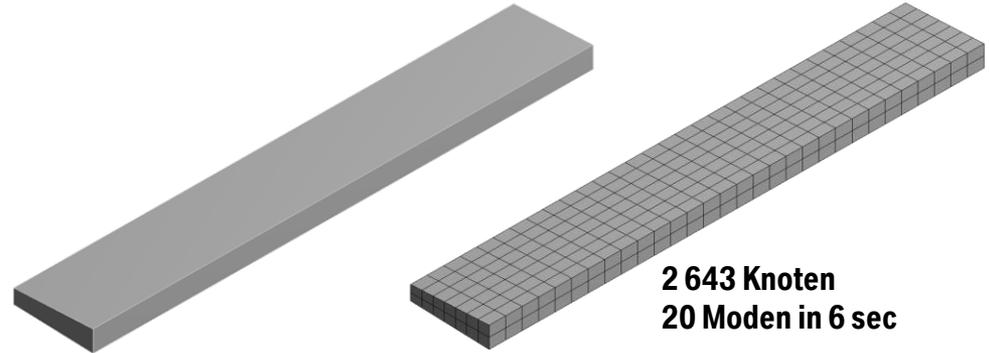
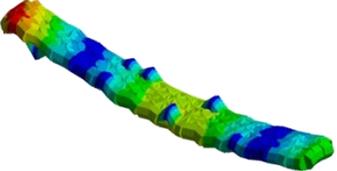
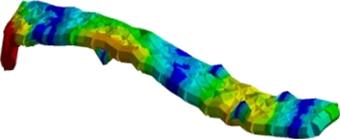
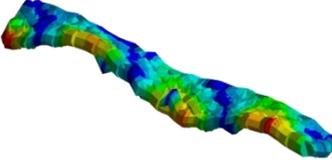
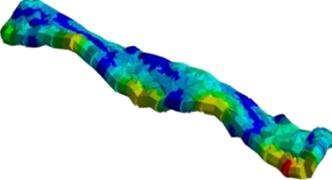
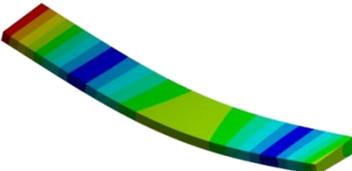
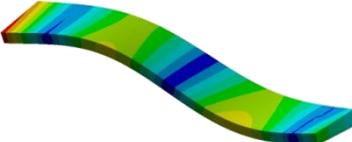
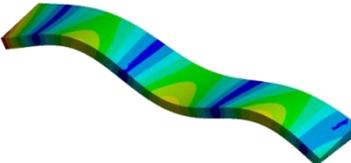
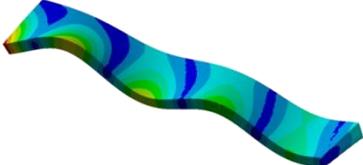


Abb. 14: Ansicht des transversal isotropen Ersatzmodells aus ANSYS.

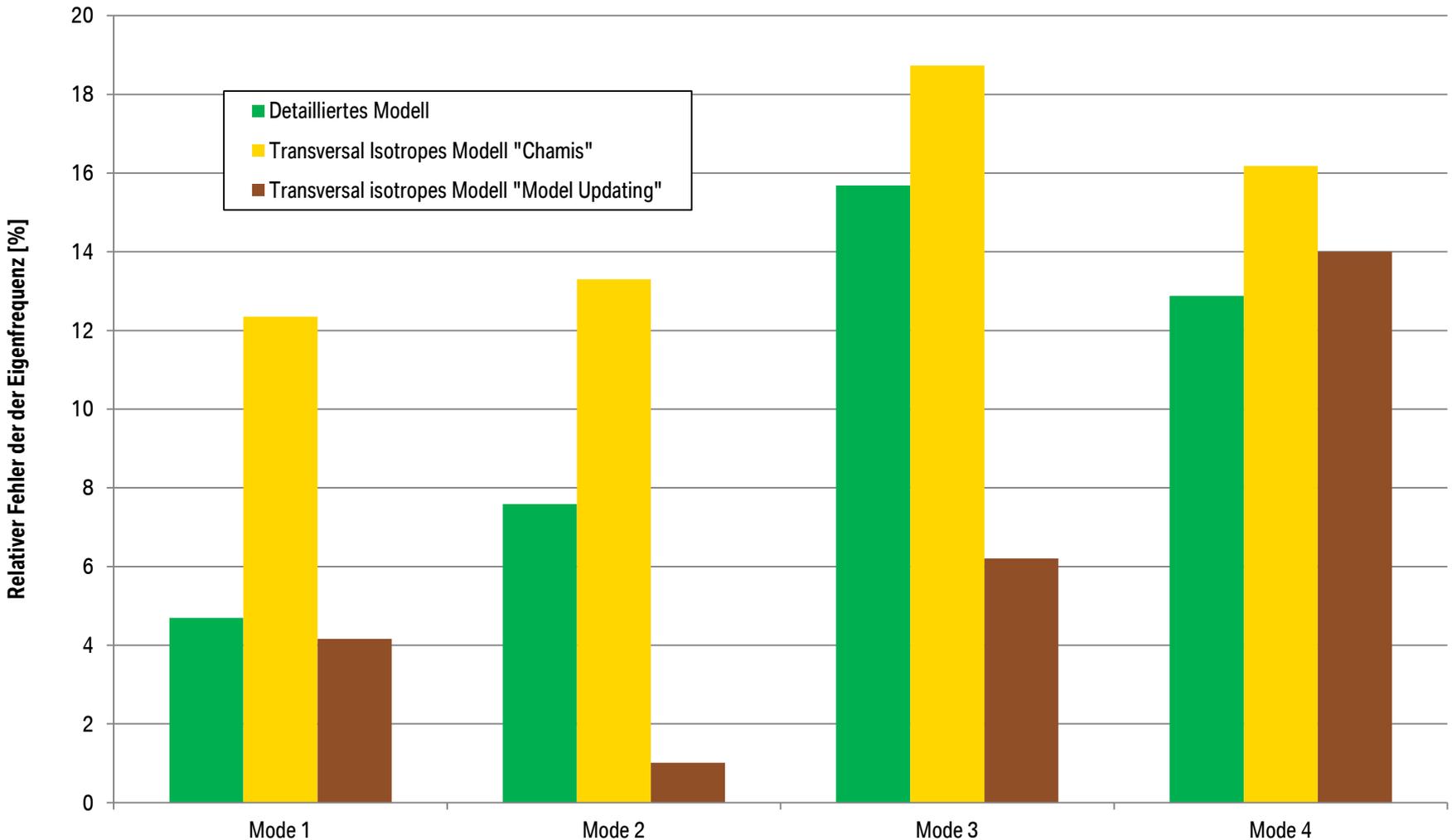
Ergebnisse:

	1. Mode	2. Mode	3. Mode	4. Mode
Modale Schwingform				
Eigenfrequenz	774 Hz	1957 Hz	3697 Hz	5763 Hz

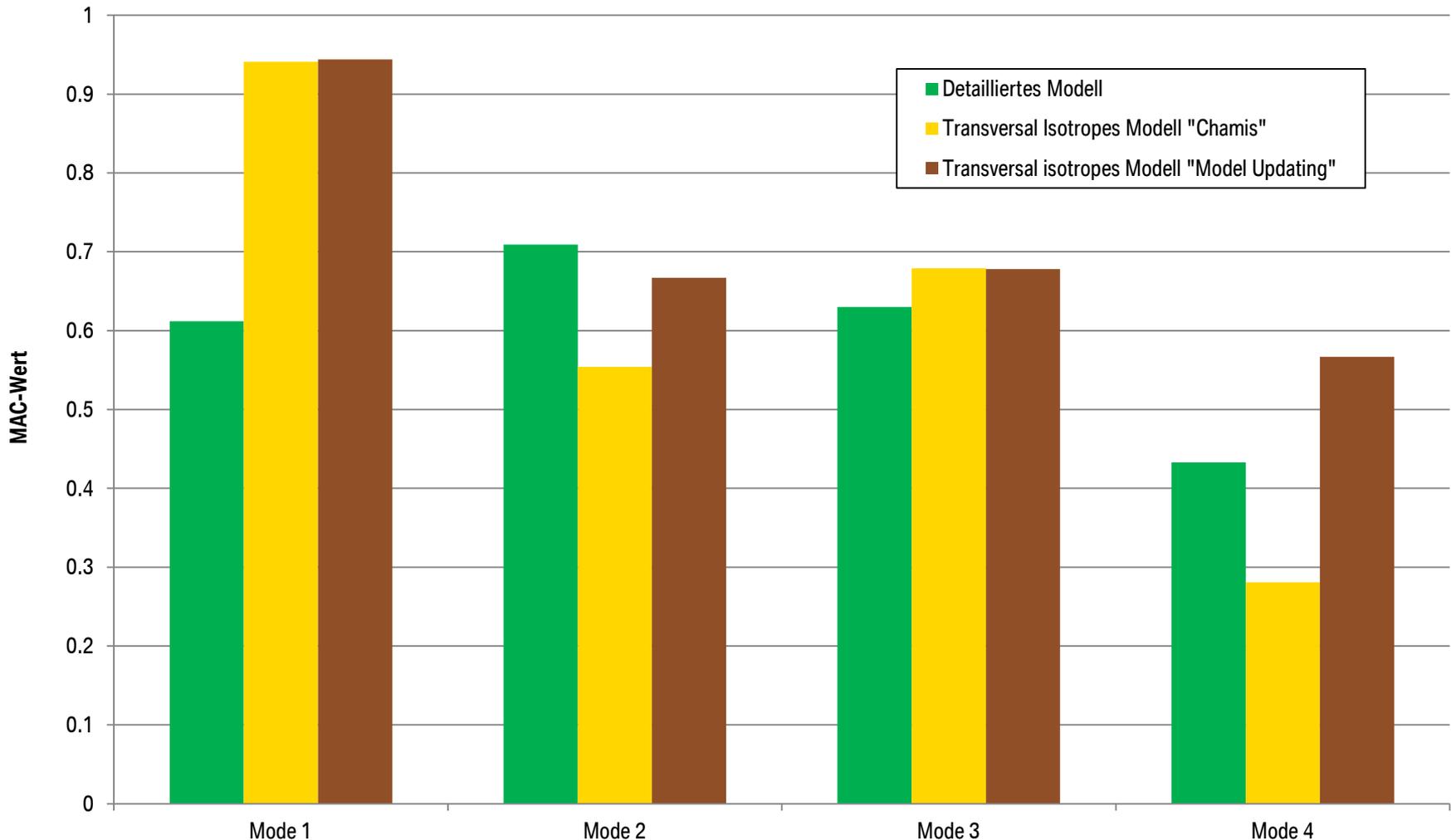
BEWERTUNG DES OPTIMIERTEN MODELLS.

	1. Mode	2. Mode	3. Mode	4. Mode
Messung	Modale Schwingform 			
	Eigenfrequenz 745 Hz	1977 Hz	3481 Hz	5055 Hz
Simulation	Modale Schwingform 			
	Eigenfrequenz 774 Hz	1957 Hz	3697 Hz	5763 Hz
Vergleich	MAC 0,944	0,677	0,678	0,567
	EF-Error 4,16 %	-1,01 %	6,21 %	14,0 %

VERGLEICH DES REALATIVEN FEHLERS DER NUMERISCH BESTIMMTEN EIGENFREQUENZEN.



VERGLEICH DER MAC-WERTE DER NUMERISCH BESTIMMTEN MODEN IN REFERENZ ZUR MESSUNG.



FAZIT UND AUSBLICK.

	Voraussetzungen	Genauigkeit	Rechenaufwand
Detailliertes Modell	Materialdaten der Einzelkomponenten	+	--
Ersatzmodell Chamis	Materialdaten der Einzelkomponenten	+	+
Model Updating	Ergebnisse der Experimentelle Modalanalyse	++	+

- Model Updating Prozess ist **automatisierbar** und liefert plausible Ergebnisse.
- Durch Verwendung des reduzierten Simulationsmodell kann **Berechnungsaufwand um Faktor 3000 gesenkt** werden.
- Numerische Modalanalyse liefert wesentlich mehr Moden als die experimentelle Modalanalyse (siehe Abb.15) → Sinnvolle Wahl des Anregungspunkts.
- Die Quantifizierung von nicht-signifikanten Materialparametern (z.B. E-Modul in Gegenfaserrichtung) via „Model Updating“ ist nicht eindeutig möglich.

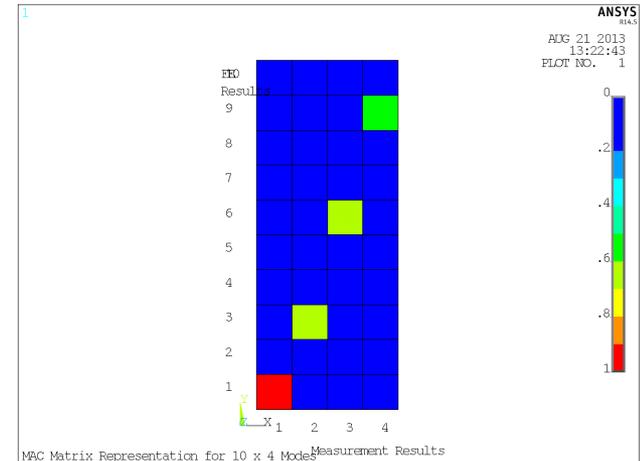


Abb. 15: Darstellung der MAC-Matrix für das „optimierte Simulationsmodell“

BACKUP: VERGLEICH DER NUMERISCH BESTIMMTEN EIGENFREQUENZEN.

