

# SIMPACK News

3. Jahrgang / 2. Ausgabe

## Fahrkomfortoptimierung des ICE 3<sup>®</sup> mit SIMPACK

Herausfordernde Beschleunigungslimits waren zwischen den Entwicklungsfirmen Siemens und ADtranz und der Deutschen Bahn AG vereinbart worden, um einen guten Fahrkomfort des zukünftigen Hochgeschwindigkeitszugs ICE3 zu garantieren. Es war von vornherein klar, daß der Bau von Prototypen für jeden Fahrzeugtyp ausgeschlossen war. Deshalb wurde eine Zusammenarbeit zwischen Siemens, ADtranz und IABG vereinbart, um mit Hilfe numerischer Simulationen von kombinierten FEM- und MKS-Modellen eine Optimierung des dynamischen Verhaltens zu erreichen.

*Dr. Hubert Troidl, IABG*

Zwei Fahrzeuge wurden für einen ersten Analyseschritt ausgewählt: der Mittelwagen 2. Klasse, ein Großraumwagen, und der Trafowagen 2. Klasse, der wegen des schweren Trafos, der im Unterflurbereich am Wagenkasten befestigt ist, als besonders kritisch angesehen wurde. In einem zweiten Schritt sollte dann jeder der acht verschiedenen Wagen des ICE3<sup>®</sup>-Zuges simuliert und optimiert werden.



### Wagenkastenmodellierung

Die einzelnen Wagen wurden, was den Wagenkastenrohbau angeht, der aus Aluminium-Hohlkammerprofilen aufgebaut ist, im Detail modelliert. Der Innenausbau, wie Sitze, Fußboden und Gepäckablagen, wurden dagegen erheblich gröber modelliert. Baugruppen, die nicht wesentlich zur Steifigkeit des Gesamtsystems beitragen, wurden lediglich bezüglich Masse und Massenträgheitsmoment berücksichtigt. Schwere Massen, die wie der 8,5-t-Trafo im Unterflurbereich am Wagenkasten befestigt sind, wurden zunächst als starre Volumina approximiert, später aber zur Verbesserung der Zuverlässigkeit der Analyseer-

gebnisse auch elastisch modelliert. Eines der verwendeten FE-Modelle ist auf der übernächsten Seite zu sehen. Dieses und entsprechende Modelle anderer ICE3<sup>®</sup>-Wagen haben etwa 400.000 Freiheitsgrade. Pro/ENGINEER, MEDINA und I-DEAS wurden zur Überarbeitung der CAD-Daten verwendet, die von ADtranz zur Verfügung gestellt worden waren. MEDINA, MSC/PATRAN und I-DEAS wurden für das Pre- und Postprocessing eingesetzt.

Die Schalenmodellierung wurde mit Hilfe eines Vergleichs der dynamischen Eigenschaften eines repräsentativen Abschnitts des Wagenkastenrohbaus überprüft, der

zuerst schalenmodelliert, und dann auch noch mit allen Details als 3D-Volumenmodell abgebildet wurde. Eigenfrequenzen und Schwingungsformen wurden für beide Modellierungsvarianten berechnet. Die deformierten Strukturen, sowie auch Dehnungsenergien wurden verglichen, um Bereiche zu finden, in denen die Schalenmodellierung verbessert und Wanddicken oder Materialkennwerte upgedatet werden mußten.

Alle Analyseschritte wurden mit MSC/NASTRAN durchgeführt und konzentrierten sich auf die fundamentalen Schwingungsformen im Frequenzbereich bis 30 Hz.

Selbst für den eher weniger kritischen Mittelwagen wurde eine Eigenfrequenz gefunden, die weit unterhalb des angestrebten Grenzwertes von 11 Hz lag - die Frequenz der „Dachquerschwingung“, bei 7,3 Hz für das ursprünglich Design. Die Schwingungsform ist durch eine seitliche Verschiebung des Dachbereichs und die gegenphasige Durchbiegung der Langträger gekennzeichnet. Zur Einbeziehung der Wagenkastendynamik in das Mehrkörpermodell in SIMPACK mußte das FE-Modell etwa um den Faktor 500 in seiner

und reduzierte Modell eines ICE3®-Endwagens einander gegenübergestellt. In Tabelle 1 ist ein Beispiel gegeben, das es erlaubt, den Verlust an Genauigkeit durch die Reduktion einzuschätzen. Diese Tabelle enthält Frequenzen für das volle und das reduzierte Modell, die jeweilige Frequenzabweichung und den MAC-Wert. Dieser MAC-Wert ist das Ergebnis eines vereinfachten Orthogonalitätstests. Ein Wert von 1,0 entspricht identischen Schwingungsformen, während ein Wert von 0,0

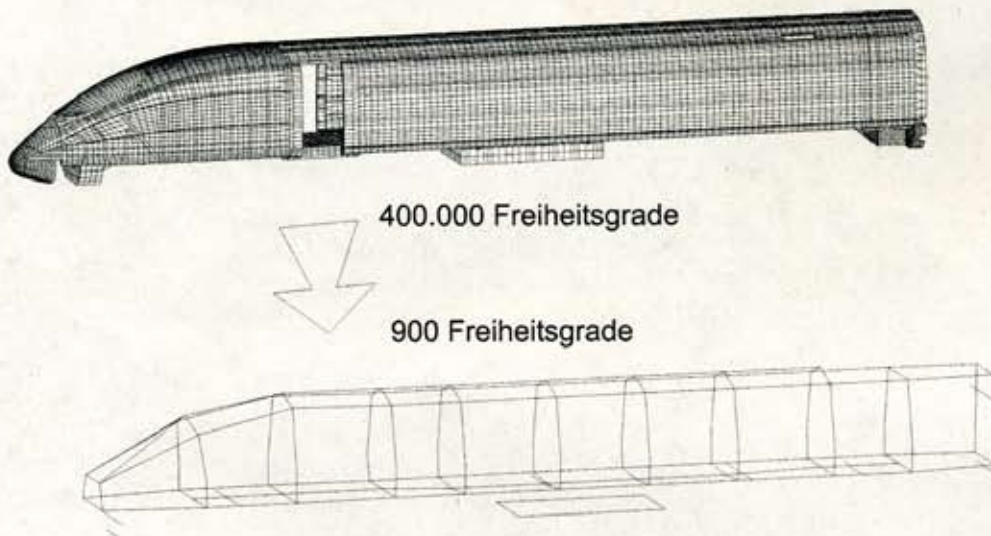
die Reduktion bezüglich der Eigenschwungsformen kaum ein Fehler entsteht, während der Frequenzfehler mit zunehmender Frequenz schnell ansteigt. Eine dynamische Kondensation, wie der Craig-Bampton Algorithmus, würde wesentlich bessere Ergebnisse liefern. Dieses Reduktionsverfahren wird jedoch derzeit noch nicht unterstützt.

**Simulation in SIMPACK**

Das Drehgestell wurde auf der Basis von Daten, die von der Firma Siemens SGP Verkehrstechnik zur Verfügung gestellt wurden, in SIMPACK als ein nichtlineares Mehrkörpersystem modelliert. Die hydraulischen Dämpfer, wie die Schlingerdämpfer, wurden zunächst als abschnittsweise linear modelliert. Diese Modellierung erwies sich als nicht genau genug, weil die Dachquerschwingung nicht ausreichend angeregt werden konnte. Deshalb wurden für die Simulation später gemessene Kennlinien verwendet.

Zur Überprüfung der Auswirkungen der niedrigen Eigenfrequenzen auf den Fahrkomfort wurden Beschleunigungsantworten für verschiedene Komfortmeßpunkte (Fahrgast-Sitzpositionen) berechnet. Dazu wurden Fahrten auf verschiedenen Abschnitten des Schienennetzes der Deutschen Bahn AG bei Geschwindigkeiten bis 330 km/h mit SIMPACK simuliert.

Die Simulationen zeigten, daß die Beschleunigungsantworten für alle Komfortmeßpunkte deutlich über den vorgegebenen Zielwerten lagen.



Größe reduziert werden. Dafür wurde der GUYAN-Algorithmus verwendet, der in MSC/NASTRAN implementiert ist. Im obigen Bild sind das volle

für völlig verschiedene oder orthogonale Schwingungsformen steht. Die in der Tabelle 1 gegebenen MAC-Werte zeigen, daß durch

Frequenz Volles Modell [Hz]	Frequenz Red. Modell [Hz]	Frequenz-Abw. [%]	MAC-Wert
7.31	7.34	0.40	1.00
11.89	12.17	2.30	1.00
13.29	13.59	2.21	0.98
14.04	14.45	2.83	0.99
15.12	15.60	3.17	0.96
15.48	15.95	3.04	0.97
16.51	17.24	4.42	0.99
17.34	18.53	6.86	0.99

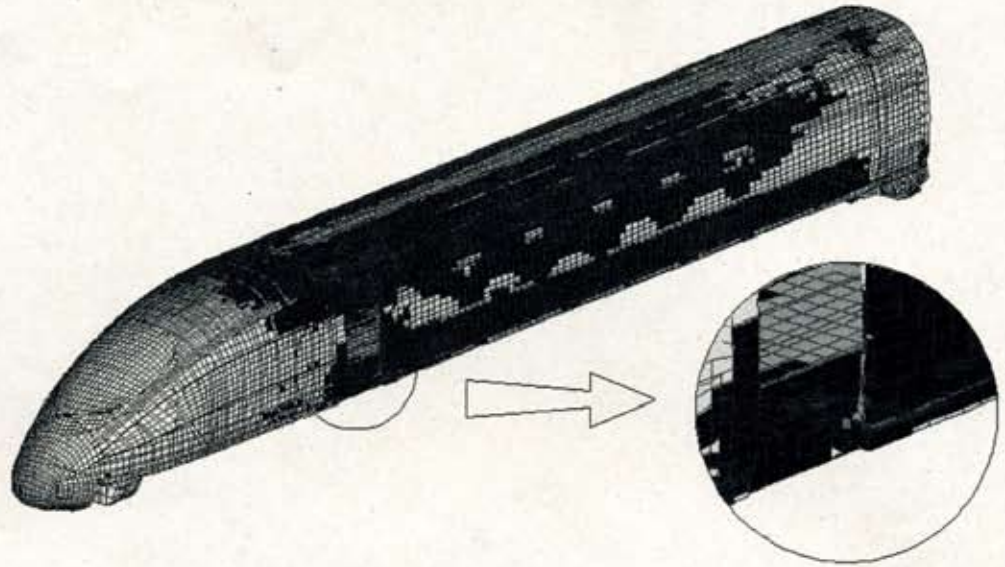
Tabelle 1: Eigenwerte des Vollmodells und des reduzierten Modells

### Optimierung des Wagenkastens

Bereits ein genaues Hinsehen bei der Animation der Eigenschwingungsformen im FE-Programm brachte an den Tag, daß Dreiecksträger mit gekrümmten Begrenzungslinien Schwachstellen darstellen. Die Aufgabe, solche Schwachstellen aufzufinden, wird unterstützt durch Dehnungsenergieverteilungen, die für alle Schwingungsformen berechnet wurden. Ein typisches Beispiel für eine solche Verteilung ist in nebenstehendem Bild gegeben. Hier wurde speziell der Einfluß des 1/3-Einstiegs beim Endwagen des ICE3<sup>®</sup> untersucht.

Die identifizierten Bereiche wurden versteift und die Schwingungsformen neu berechnet. Diese Prozedur wurde solange wiederholt, bis die Frequenzen ausreichend hoch waren. Alle Versteifungsmaßnahmen wurden mit den Experten auf beiden Seiten diskutiert, und Sensitivitätsanalysen wurden gemacht, um die Wirkung jeder einzelnen Maßnahme zu quantifizieren.

Mehr als 50% der Aluminium-Hohlkammerprofile wurden schließlich versteift durch eine Änderung der Profilhöhe, den Einbau zusätzlicher Profil diagonalen, die Begradigung gekrümmter Begrenzungslinien oder einfach durch eine Veränderung der Wanddicke. Der Optimierungserfolg war beachtlich. Die Frequenz der Dachquerschwingung konnte um 50% erhöht werden. Das Fahrzeug wurde zudem noch mit einem Dachgarten zur Aufnahme der Stromaufnehmer und anderer Geräte ausgerüstet. Zusammen mit den Aussteifungen durch den Innenausbau konnte somit die Frequenz dieser Schwingungsform nochmals deutlich auf fast 13 Hz erhöht werden. Nach einem Redesign der Wagenenden, das mit einer starken Gewichtserhöhung verbunden war,

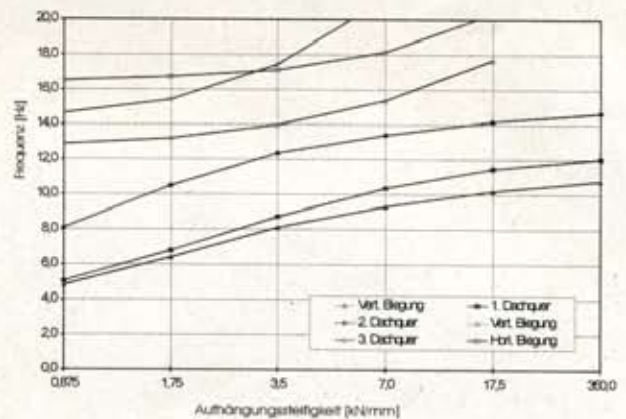


fiel die Frequenz der vertikalen Biegeschwingung von 13,2 Hz auf 11,6 Hz.

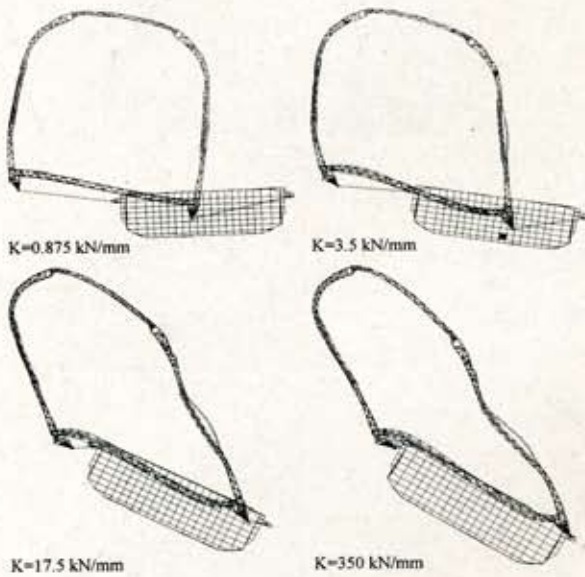
### Einfluß schwerer Einzelmassen

Eine wesentliche Unsicherheit war der Einfluß schwerer Massen wie des 8,5-t-Trafos auf das dynamische Verhalten des Fahrzeugs. Es bestand eine gewisse Hoffnung, daß der Fahrkomfort durch eine elastische Aufhängung solcher schwerer Massen verbessert werden könnte. Deshalb wurde der Einfluß der Koppelsteifigkeit auf die Eigenfrequenzen des Wagenkastens ausführlich untersucht. Das Ergebnis dieser Parameterstudie ist im Bild dargestellt. Darin sind die Eigenfrequenzen der globalen Grundschwingungsformen in Abhängigkeit der Federsteifigkeit der Befestigungselemente des Trafos geplottet. Danach fallen die Frequenzen bei einer Reduzierung der Koppelsteifigkeit beträchtlich ab. Zum Beispiel fällt die Frequenz der Dachquerschwingung von 10,8 Hz für starre Anbindung auf 4,7 Hz für eine relativ weiche, aber aus statischer Sicht gerade noch akzeptable Anbindung. Die SIMPACK-Simulation zeigte, daß die Beschleunigungsantworten auf dem Boden des Wagenkastens klar von der Federsteifigkeit der Trafolager abhän-

gen. Sie fallen gleichmäßig ab, wenn die Anbindungssteifigkeit reduziert wird. Der Trafo kann daher weitgehend entkoppelt werden. Die begrenzende Größe ist die Trafobewegung selbst. Der Effekt der unterschiedlichen Anbindungssteifigkeit ist nochmals auf der nächsten Seite verdeutlicht. Die deformierte Geometrie des Wagenkastens ist

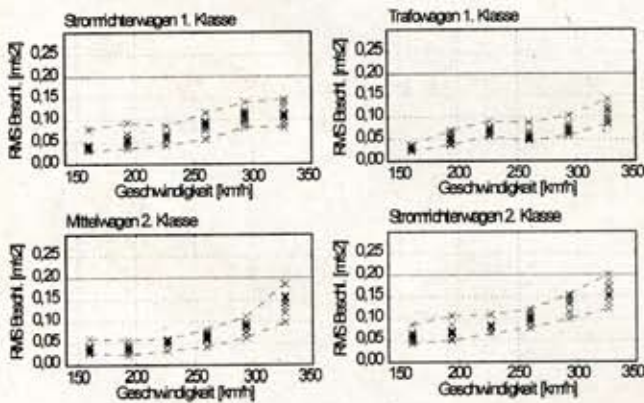


hier für vier verschiedene Werte der Anbindungssteifigkeit des Trafos geplottet. Der niedrigste Wert ist verbunden mit einer großen Auslenkung des Trafos, aber mit einer sehr kleinen Deformation des Wagenkastens. Mit zunehmender Steifigkeit der Koppellemente steigt die Deformation des Wagenkastens bis hin zu einer sehr starken Deformation für den Fall einer starren Anbindung.



Bei weicher Aufhängung des Trafos steigt gleichzeitig die Frequenz einer zweiten Dachquer-Schwingungsform, derjenigen mit gleichphasiger Bewegung von Trafo und Dach, die bei starrer Anbindung mit der oben dargestellten Form zusammenfällt. Weil für höhere Frequenzen die Anregung aus der Gleislage abnimmt, und zudem auch noch höhere Frequenzen weniger stark in die Fahrkomfortkennziffern eingehen als niedrigere (Abfall des Filters etwa ab 12 Hz), ist tendenziell auch der Fahrkomfortkennwert günstiger. Anders als in diesem Fall wurde für verschiedene andere Fahrzeuge ein Optimum gefunden. Für sehr weiche Ankopplung stiegen dann die Fahrkomfortkennwert wieder deutlich an (Stromrichterwagen, Endwagen).

vier verschiedenen Fahrzeuge, Stromrichterwagen der 1. Klasse, Trafoswagen der 1. Klasse, Mittelwagen der 2. Klasse und Stromrichterwagen der 2. Klasse sind im Bild links dargestellt. Die Kreuze markieren über 500m-Abschnitte gemittelte RMS-Werte. Diese Werte, jeweils elf pro Geschwindigkeit, entsprechend der gesamten Länge des Streckenabschnitts von 5500m, streuen teilweise erheblich. Jedoch liegen selbst die Maximalwerte deutlich unter dem Zielwert  $0,2 \text{ m/s}^2$ , was einen ausgezeichneten Fahrkomfort dieser Fahrzeuge erwarten läßt.

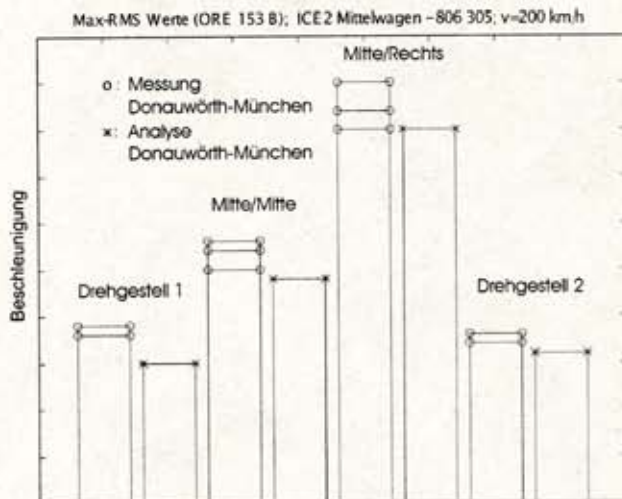


**Verifikation der Simulationsergebnisse**

Während der Optimierungsphase stand immer wieder die Frage nach der Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse im Vordergrund. Drei schon existierende Fahrzeuge wurden deshalb in einem Verifikationsschritt zur Überprüfung der Zuverlässigkeit des gesamten Simulationsverfahrens analysiert. Absicht war nicht nur, die Zuverlässigkeit des Verfahrens ganz allgemein zu zeigen, sondern auch ein Gefühl für einen typischen Fehler zu bekommen. Bereits existierende FE-Modelle der Mittelwagen von ICE1 und ICE2, sowie des ICE2-Endwagens, waren die Basis für die Simulationen in diesem Verifikationsschritt. Im Bild links sind RMS-Werte aus Simulation und Erprobungsfahrt für einen ICE2-Mittelwagen auf der Strecke Donauwörth-Augsburg für vier Komfortmeßpunkte im Wagenkasten für die Fahrgeschwindigkeit 200 km/h aufgetragen. Berücksichtigt wurden drei verschiedene Testfahrten bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen. Die Ergebnisse stimmen gut überein. Die maximale Abweichung ist kleiner als 15%.

**Maßnahmen am Drehgestell**

Vier Maßnahmen mit Potential für eine Reduzierung der Kräfte, die in den Wagenkasten eingeleitet werden, wurden identifiziert: individuelle Abstimmung der Primärsteifigkeiten, individuelle Abstimmung der Steifigkeiten der Wankstützen, Einsatz symmetrischer Schlingerdämpfer und eine Reduzierung der Schlingerdämpferkräfte. Speziell die Erregung der vertikalen Biegeschwingung konnte durch die Verwendung symmetrischer Schlingerdämpfer deutlich reduziert werden. Durch eine Reduzierung der Schlingerdämpferkräfte um 40 % konnte auch die Anregung der Dachquer-schwingung erheblich verringert werden.



**Die optimierte Variante**

RMS-Werte für Vertikalbeschleunigung wurden für insgesamt sechs Fahrgeschwindigkeiten im Geschwindigkeitsbereich 160 km/h bis 330 km/h berechnet. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen für die

Ein weiteres Beispiel im Bild unten gegebenen. Gegenübergestellt sind hier Analyseergebnisse und Streckenfahrversuche mit dem ICE2-Steuerwagen auf der Strecke Göt-

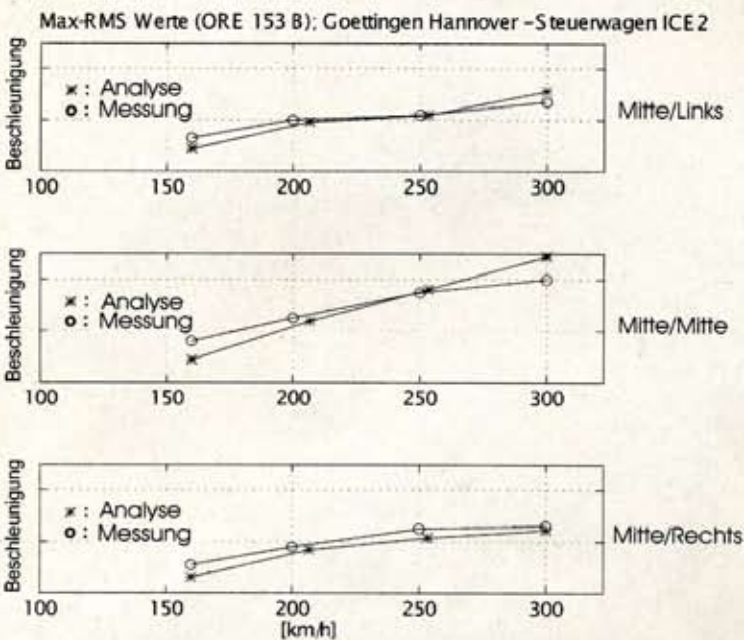
tingen und Eigenschwingungsformen mit den entsprechenden Größen aus der Simulation zu vergleichen. Ein weiterer Verifikationsschritt soll nach den ersten Streckenfahrversu-

Verfahrensschritte negativ beeinflusst bzw. limitiert:

- Die FE-Modellierung erfolgt mit Schalenelementen in den Mittelflächen der Profile. Der Profilverlauf kann wegen einer Limitierung bei der Elementgröße nicht genau nachgebildet, sondern nur angenähert werden.
- Das statische Reduktionsverfahren nach GUYAN führt zu relativ großen Frequenzabweichungen schon für Frequenzen unter 20 Hz. Die Größe der Fehler ist abhängig von der Wahl der A-Set-Punkte in MSC/NASTRAN. Die Verwendung eines einfacheren Verfahrens, wie dem Craig-Bampton-Verfahren (dynamische Kondensation) ist derzeit noch nicht möglich.
- Schwierig ist generell auch die Entscheidung, welche Komponenten im FE-Modell und welche im MKS-Modell berücksichtigt werden müssen. Dies gilt insbesondere für sehr schwere Komponenten, wie den Trafo oder den Stromrichter. Sie beeinflussen die Schwingungsformen so stark, daß sie zur Berechnung der Schwingungsformen im FE-Modell berücksichtigt werden müssen. Andererseits lassen sich die nichtlinearen Eigenschaften (Steifigkeit, Dämpfung) der Koppelemente nur im MKS-Modell beschreiben.

Wenngleich statische Moden nun in FEMBS direkt berücksichtigt werden können, liegen für ihren Einsatz zur Berücksichtigung des Einflusses schwerer Massen auf die Eigenschwingungsformen im Schienenfahrzeugbereich noch keine Erfahrungen vor.

Dieser Artikel ist eine verkürzte Fassung der Veröffentlichung H. Troidl, G. Kammerhofer: **Simulation und Optimierung des Fahrkomforts von Hochgeschwindigkeitszügen am Beispiel ICE3**, VDI-Tagung Würzburg, 24., 25. Sep. 1998



tingen-Hannover bei Geschwindigkeiten zwischen 160 km/h und 300 km/h für die Wagenkasten-Komfortmeßpunkte „Mitte“, „Mitte Rechts“ und „Mitte Links“. Entsprechend diesen Ergebnissen werden die Fahrkomfortwerte bei Benutzung von SIMPACK für niedrige Fahrgeschwindigkeiten eher unterschätzt. Für hohe Fahrgeschwindigkeiten werden die Fahrkomfortwerte mit dem derzeitigen SIMPACK-Modell dagegen eher überschätzt. Diese Tendenz wurde bei den Analysen zum ICE1-Mittelwagen bestätigt. Zur weiteren Überprüfung der Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse ist vorgesehen, möglichst frühzeitig Wagenkastenrohbauteile, dann aber auch ausgebaute Fahrzeuge, modalanalytisch zu untersuchen und die gemessenen Eigenfre-

quenzen und Eigenschwingungsformen mit den entsprechenden Größen aus der Simulation zu vergleichen. Ein weiterer Verifikationsschritt soll nach den ersten Streckenfahrversu-

**Zusammenfassung und Ausblick**

Der Erfolg der Optimierung war überzeugend. Die Fahrkomfortkennwerte, die zunächst zum Teil um mehr als 50 % über den Zielwerten lagen, konnten deutlich reduziert werden. Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse der Simulationsrechnungen wurde indirekt über die Nachrechnung von Fahrten existierender ICE1- und ICE2-Fahrzeuge nachgewiesen. Die Genauigkeit der Simulationsergebnisse ist danach recht hoch. Sie wird aber durch folgende