

# Einsatz numerischer Verfahren bei der Berechnung der nichtlinearen Eigenschaften von elektrodynamischen Lautsprechern

M.Rausch, M.Kaltenbacher, L.Kreitmeier\*, G.Krump\*, H.Landes, R.Lerch, R.Simkovic

Lehrstuhl für Sensorik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Deutschland

\* Harman Audio Electronic Systems GmbH, Straubing, Deutschland

## 1 Einleitung

Elektrodynamische Lautsprecher zeigen bei hohen Aussteuerungen ein stark nichtlineares Verhalten, das vor allem aufgrund der nichtlinearen Steifigkeit der Membranaufhängung sowie örtlicher Magnetfeldinhomogenitäten verursacht wird. Im Großsignalbetrieb können somit Klirrfaktoren von 10% leicht überschritten werden, wodurch der bei hoher Leistung aufgenommene Frequenzgang stark vom Kleinsignalfrequenzgang abweicht. Die komplexen Einflüsse der verschiedenen nichtlinearen Effekte müssen somit bereits während der Entwicklung des Lautsprechers berücksichtigt werden und erschweren rein empirisch-experimentelle Untersuchungen. Zur Reduzierung des Entwicklungsaufwandes von elektrodynamischen Lautsprechern müssen somit moderne Computertools eingesetzt werden, die die an der Wandlung bzw. Abstrahlung beteiligten Felder samt aller Nichtlinearitäten erfassen können.

Ziel des vorliegenden Artikels ist es, das von den Autoren zur Computermodellierung der nichtlinearen Eigenschaften von elektrodynamischen Lautsprechern entwickelte numerische Berechnungsverfahren kurz vorzustellen und mit Hilfe entsprechender gemessener Daten zu verifizieren. Die Anwendbarkeit dieses Verfahrens bezüglich der computerunterstützten Entwicklung von elektrodynamischen Lautsprechern soll anhand der Untersuchung des Einflusses der verschiedenen nichtlinearen Effekte auf die Klirrfaktoren belegt werden.

## 2 Großsignalmodell eines elektrodynamischen Lautsprechers

In dem vorliegenden Artikel werden die an der Wandlung bzw. Abstrahlung beteiligten Felder samt ihren Kopplungen durch Anwendung einer Finiten-Elemente-Methode (FEM) simuliert. Die theoretischen Grundlagen der physikalischen Gleichungen und der Finiten-Elemente-Formulierung wurden bereits in [1,2] beschrieben und werden an dieser Stelle nicht mehr wiederholt. Das in das Finite-Elemente- / Rand-Elemente- Simulationsprogramm *CAPA* implementierte Berechnungsverfahren wurde mittlerweile um die im folgenden beschriebenen numerischen Werkzeuge erweitert, welche zur Modellierung des Großsignalverhaltens eines elektrodynamischen Lautsprechers benötigt werden.

### 2.1 Modellierung der spannungsgespeisten Schwingspule mittels einer *Moving Material* - Methode

Für die Simulationen des Kleinsignalverhaltens, bei dem die Schwingspule sich näherungsweise in einem Homogenfeld bewegt, kann die sehr effiziente sog. *Motional EMF-Term* Methode angewendet werden [1]. Zur Modellierung der magnetischen Nichtlinearitäten, die vorwiegend durch örtliche Magnetfeldinhomogenitäten bei großen Auslenkungen entstehen, ist die Voraussetzung für die Anwendung dieser Formulierung nicht mehr gegeben. Hier erweist sich eine neu entwickelte sog. *Moving Material*-Methode als sehr leistungsfähig, bei welcher die Materialdaten der Spule nach jedem Zeitschritt neu bestimmt werden. Hierdurch bleibt das magnetische Finite-Elemente-Gitter während der transienten Berechnung unverändert.

### 2.2 Modellierung der mechanischen Nichtlinearitäten

Neben der o.g. Spulenmodellierung, die für die Berücksichtigung der magnetischen Nichtlinearitäten des Lautsprechers benötigt wird, werden die mechanischen Nichtlinearitäten infolge großer Verschiebungen und nichtlinearer Materialeigenschaften modelliert. Dabei werden Geometrieänderungen, Terme höherer Ordnung in den mechanischen Spannungs-Dehnungen und Dehnungen sowie nichtlineare mechanische Spannungs-Dehnungs-Beziehungen der Materialien berücksichtigt. Als Iterationsverfahren wird ein Newton-Raphson-Verfahren mit Liniensuche angewendet.

Im weiteren mussten die beiden Berechnungsverfahren für die magnetischen und mechanischen Nichtlinearitäten gekoppelt werden.

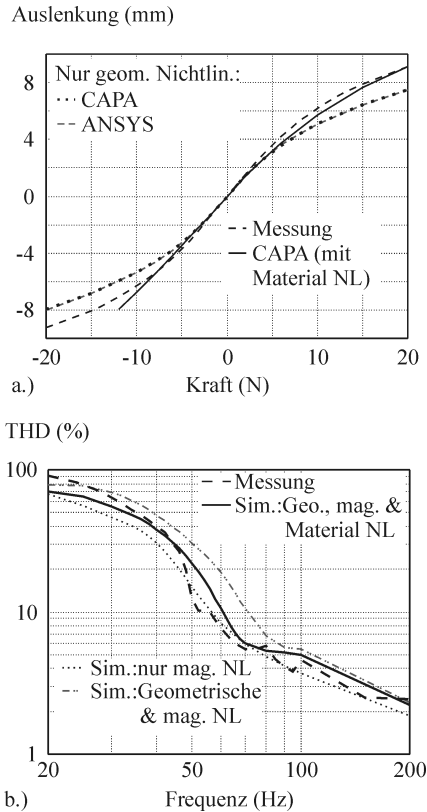
### 2.3 Finite-Elemente-Modell

Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Klirrfaktoren des Schalldruckpegels im Nahfeld des Lautsprechers sehr gut mit denen der Membranbeschleunigungen korrelieren. Aufgrund dieser ausgezeichneten Übereinstimmung kann ein vereinfachtes 2D - rotationssymmetrisches Finite-Elemente-Modell ohne akustische Elemente angewendet werden, wobei der Einfluss der umgebenden Luft durch sog. Feder-Elemente berücksichtigt wird. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine sehr effiziente Berechnung der nichtlinearen Eigenschaften eines elektrodynamischen Lautsprechers. Im weiteren zeigten Sensitivitäts-simulationen, dass die mechanischen Nichtlinearitäten, d.h. die geometrische Nichtlinearität infolge großer Verschiebungen und die Materialnichtlinearität aufgrund einer nichtlinearen mechanischen Spannungs-Dehnungs-Beziehung, im wesentlichen nur bei der Zentrierung berücksichtigt werden müssen. Zur weiteren Reduzierung der Rechenzeit werden daher die Membran und die Sicke mit linearen mechanischen finiten Elementen diskretisiert. Weiterhin wird das Magnetsystem und die umgebende Luft mit reinen magnetischen finiten Elementen und die Schwingspule mit sog. magnetomechanischen Spulenelementen basierend auf einer *Moving Material*-Formulierung modelliert.

## 3 Verifizierung der Algorithmen

In dieser Arbeit wird das oben genannte Simulationsverfahren eingesetzt, um die nichtlinearen Eigenschaften von elektrodynamischen Lautsprechern zu berechnen. Zur Verifizierung der Algorithmen werden die gemessenen Kraft-Weg-Kennlinien sowie die gemessenen nichtlinearen Verzerrungen der Spulenströme und der Membranbeschleunigungen herangezogen. Die Computersimulationen zeigen über einen großen Frequenz- bzw. Auslenkungsbereich sehr gute Übereinstimmungen mit den gemessenen Werten bezüglich der Materialdaten (siehe Abb. 1). Der Frequenzgang des Klirrfaktors weist im tieffrequenten Bereich Abweichungen auf, die aufgrund von Modellvereinfachungen in der Simulation auf eine zu geringe Steifigkeitszunahme bei sehr großen Auslenkungen zurückzuführen ist (siehe Abb. 1 b.)). Im weiteren zeigt der Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Messung, dass ein Computermodell mit reiner geometrischer Nichtlinearität ein zu steifes Verhalten liefert. Für eine bessere Übereinstimmung muss somit das Finite-Elemente-Modell um

die Modellierung einer nichtlinearen Materialeigenschaft für die Zentrierung erweitert werden.



**Abbildung 1:** Vergleich von Computersimulation und Messung für das Großsignalverhalten eines elektrodynamischen Lautsprechers: a) Kraft-Weg-Kennlinie des Lautsprechers b) Total Harmonic Distortion THD der Membranbeschleunigung bei einer Eingangsleistung von 32 W

Tabelle 1 zeigt die benötigten Computerressourcen für eine transiente Berechnung mit 600 Zeitschritten auf einer SGI, Octane mit 195 MHz. Durch Verwendung des modifizierten Modells ohne akustische Elemente reduziert sich die Anzahl der Unbekannten auf 56000 bzw. der Speicherbedarf auf 80 MB.

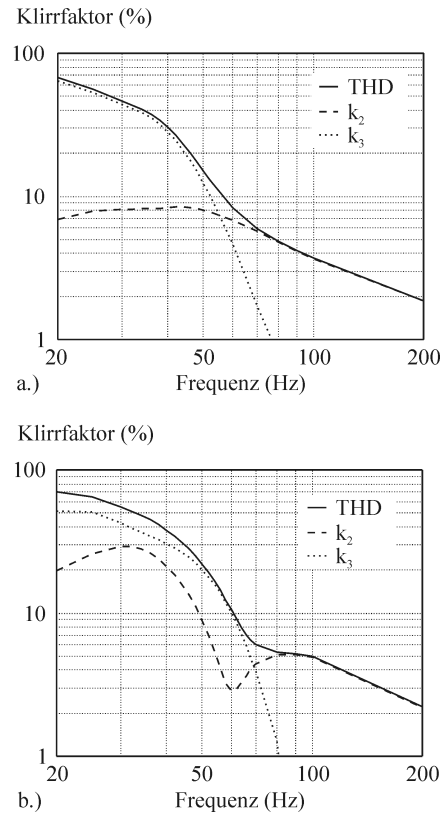
<b>Mag. Nichtlin.:</b>	
Rechenzeit	14 min
<b>Mag.+Geom. Nichtlin.:</b>	
Iterationen/Zeitschritt	3 – 4
Rechenzeit	7 h
<b>Alle Nichtlin.:</b>	
Iterationen/Zeitschritt	6 – 10
Rechenzeit	16 h

**Tabelle 1:** Vergleich der Computerressourcen für die Modellierungen der verschiedenen Nichtlinearitäten

## 4 Untersuchung der nichtlinearen Eigenschaften

Die Effizienz der computerunterstützten Entwicklung von elektrodynamischen Lautsprechern soll anhand einer Untersuchung der Klirrfaktoren unter Beweis gestellt werden (siehe Abb. 2). Simulationen als auch Messungen zeigen, dass bei Frequenzen unterhalb von 60 Hz der Klirrfaktor  $k_3$ , bei höheren Frequenzen

jedoch der Klirrfaktor  $k_2$  dominiert. Ein großer Vorteil der Computermodellierung besteht in der Möglichkeit der getrennten Untersuchung der Nichtlinearitäten für die verschiedenen Komponenten des Lautsprechers. Somit können die komplexen Einflüsse der unterschiedlichen nichtlinearen Effekte auf das Lautsprecherverhalten sehr gut extrahiert und erforscht werden. Abb.2 zeigt, dass bei dem hier betrachteten Lautsprecher der Klirrfaktor  $k_3$  infolge der magnetischen Nichtlinearitäten dominiert. Die mechanischen Nichtlinearitäten verursachen hingegen einen drastischen Anstieg des Klirrfaktors  $k_2$  bei tiefen Frequenzen.



**Abbildung 2:** Untersuchung der nichtlinearen Eigenschaften eines elektrodynamischen Lautsprechers anhand des Frequenzgangs der Klirrfaktoren der Membranbeschleunigung bei einer Eingangsleistung von 32 W: a) Modellierung der magnetischen Nichtlinearitäten b) Modellierung aller Nichtlinearitäten

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dieser Arbeit ist es erstmalig gelungen, ein Computermodell basierend auf einer Finiten-Elemente-Methode zu entwickeln, welches die präzise und effiziente Simulation der nichtlinearen Eigenschaften von elektrodynamischen Lautsprechern ermöglicht. Im weiteren können die komplexen Einflüsse der verschiedenen nichtlinearen Effekte auf das Lautsprecherverhalten in der Simulation sehr gut extrahiert und erforscht werden.

Im Zuge weiterer Forschungsarbeiten sollen die Algorithmen bezüglich der Rechenzeit optimiert und das CAD-System zu einem vollständigen CAE-Arbeitsplatz für das computerunterstützte Design von elektrodynamischen Lautsprechern ausgebaut werden.

### Literatur

- [1] Rausch M., Lerch R., Kaltenbacher M., Landes H., Krump G., Kreitmeier L. *Optimization of Electrodynamic Loudspeaker-Design Parameters by using a Numerical Calculation Scheme*, Acta Acustica, Vol.85, Nr. 3, pp. 412-419, 1999
- [2] Kaltenbacher M., Rausch M., Landes H., Lerch R. *Numerical Modelling of electrodynamic loudspeakers*, COMPEL, Vol.18, Nr. 3, pp. 504-514, 1999