

# Numerische Analyse und Computeroptimierung von elektrodynamischen Lautsprechern

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

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

\* Harman/Becker Automotive Systems GmbH, Straubing, Deutschland

## 1 Einleitung

Die Lautsprecherentwicklung fand bisher auf weitgehend empirisch-experimentellem Wege statt, bei der die Verbesserungsvorschläge der Entwicklungsingenieure direkt in entsprechende Prototypen umgesetzt und anschließend experimentell untersucht werden. Insbesondere der enorme Zeitaufwand bei der Herstellung der Prototypen hat bei dieser Entwicklungsmethodik viele Optimierungen eingeschränkt. Zur potentiellen Stärkung ihrer Wettbewerbsfähigkeit setzen Industrieunternehmen daher heute vor allem auf den Einsatz von modernen Simulationswerkzeugen. Hierzu zählen die bereits etablierten Computermodelle basierend auf elektromechanischen Analogien, die mit konzentrierten Elementen in einem elektrischen Ersatzschaltbild arbeiten. Hauptnachteil dieses Verfahrens ist jedoch, dass die Eingangsparameter der Modelle zuerst empirisch mit Hilfe von Messungen an Prototypen bestimmt werden müssen. Ziel dieser Arbeit ist es, die Anwendbarkeit eines neuen numerischen Verfahrens für die computerunterstützte Entwicklung von elektrodynamischen Lautsprechern unter Beweis zu stellen.

## 2 Finite-Elemente-Modelle des elektrodynamischen Lautsprechers

Die partiellen Differentialgleichungen, welche das magnetische, mechanische und akustische Feld samt deren Kopplungen beschreiben, werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit Hilfe einer Finite-Elemente-Methode (FEM) gelöst [1]. Ein großer Vorteil dieser Methode im Vergleich zu den Computermodellen basierend auf diskreten Ersatzschaltbildern ist, dass als Eingabeparameter nur die Wandlergeometrie sowie die in der Regel bekannten Materialdaten der einzelnen Bauteile benötigt werden. Zur Bestimmung der Eingabedaten werden somit keine Messungen an Prototypen benötigt, wodurch die Entwicklungszeit drastisch reduziert wird.

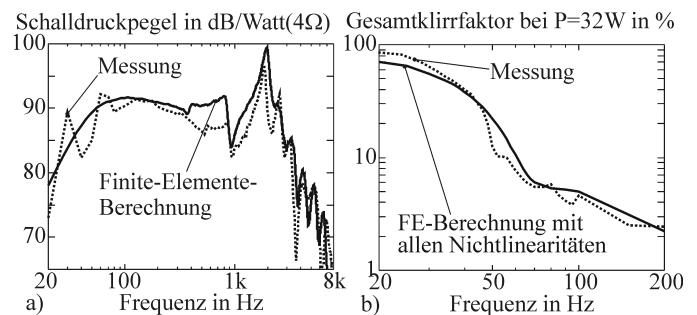
Das in das Finite-Elemente-Boundary-Elemente-Simulationsprogramm *CAPA* implementierte Berechnungsverfahren erlaubt die Modellierung des Klein- als auch des Großsignalverhaltens eines elektrodynamischen Lautsprechers. Für die Simulationen des Kleinsignalverhaltens, bei dem die Schwingspule sich näherungsweise in einem Homogenfeld bewegt, kann die sehr effiziente sog. *Motional EMF-Term* Methode angewendet werden [1]. Zur Modellierung der magnetischen Nichtlinearitäten bei großen Eingangsleistungen, die bei tiefen Frequenzen vorwiegend durch örtliche Magnetfeldinhomogenitäten infolge der großen Auslenkungen entstehen, wird die sog. *Moving Material Methode* angewendet [2]. Im weiteren werden die mechanischen Nichtlinearitäten infolge großer Verformungen und nichtlinearer Materialeigenschaften berücksichtigt.

## 3 Verifizierung der Computermodelle

Um die Gültigkeit der entwickelten Computermodelle für die numerische Berechnung von elektrodynamischen Lautsprechern nachzuweisen, werden die errechneten Klein- und Großsignalergebnisse mit entsprechenden gemessenen Daten verglichen. Zunächst wurden die nichtlinearen Kraft-Weg-Kennlinien der Membranaufhängungen durch einen Vergleich mit der Messung verifiziert [2]. In einem zweiten Verifizierungsschritt wurden die gemessenen und simulierten Frequenzgänge der axialen Schalldruckpegel in 1 m Entfernung verglichen (Abb.1a), wobei ei-

ne gute Übereinstimmung über den gesamten betrachteten Frequenzbereich erzielt werden konnte. Besonders hervorzuheben sind zwei physikalische Effekte, die sowohl in der Messung als auch in der Simulation beobachtet werden können:

- zum einen der schmalbandige Schalldruckeinbruch bei etwa 900 Hz und
- zum anderen die Resonanzspitzen im Frequenzbereich über 1500 Hz.



**Abbildung 1:** Vergleich von Computersimulation und Messung: a) Axialer Kleinsignal-Schalldruckverlauf in 1 m Entfernung bei Spannungseinprägung, b) Gesamtklirrfaktor der Membranbeschleunigung bei einer Eingangsleistung von 32 W

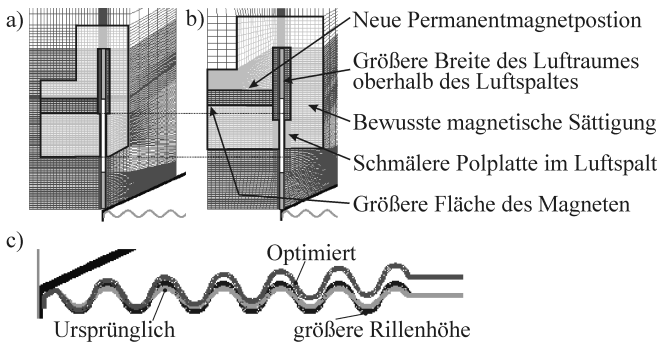
In einem letzten Vergleich wurde der berechnete Frequenzgang des Gesamtklirrfaktors der Membranbeschleunigung bei einer Eingangsleistung von 32 W mit dem entsprechenden gemessenen Verlauf verglichen, wobei eine gute Übereinstimmung über einen großen Frequenz- bzw. Auslenkungsbereich feststellbar ist (Abb.1b). Aufgrund der in [2] gezeigten guten Korrelation der gemessenen Klirrfaktoren des Schalldruckpegels im Nahfeld mit denen der Membranbeschleunigungen ermöglicht dieser Vergleich somit eine Bewertung des entwickelten Computermodells hinsichtlich der Berechnung der nichtlinearen Eigenschaften eines elektrodynamischen Lautsprechers.

## 4 Einsatz der Computermodellierung bei der Lautsprecheroptimierung - am Beispiel der harmonischen Verzerrungen

Um die praktische Anwendbarkeit des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Simulationsverfahrens für die industrielle, computerunterstützte Entwicklung von elektrodynamischen Lautsprechern unter Beweis zu stellen, wird in diesem Abschnitt auf die numerische Analyse der verschiedenen Entstehungsmechanismen der harmonischen Verzerrungen sowie auf die Computeroptimierung hinsichtlich einer Reduzierung der harmonischen Klirrfaktoren eingegangen.

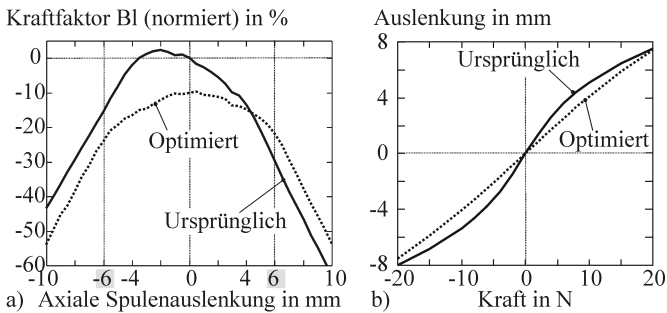
Zunächst wurden die magnetischen Nichtlinearitäten untersucht, wobei sämtliche mechanische Nichtlinearitäten in der Simulation unberücksichtigt blieben. Diese Möglichkeit der getrennten Untersuchung der Nichtlinearitäten für die verschiedenen Komponenten des Lautsprechers ermöglicht somit eine klare Aussage über den Einfluss von verschiedenen Design-Parameteränderungen auf die unterschiedlichen Nichtlinearitäten. Sensitivitätssimulationen hierzu zeigten, dass die Position des Permanentmagneten einen signifikanten Einfluss auf die Symmetrie des statischen Magnetfeldes im Luftspalt hat, welche somit in der

Optimierung des Systems genutzt werden kann (Abb.2a und 2b). Weiterhin darf das transiente Magnetfeld der bestromten Schwingspule bei großen Eingangsleistungen in der Regel nicht vernachlässigt werden. Um den Einfluss des transienten Spulenfeldes auf die Magnetfeldsymmetrie zu reduzieren, muss der Magnettopf bewusst in die magnetische Sättigung getrieben und die Breite des Luftraumes oberhalb des Luftspaltes vergrößert werden (Abb.2a und 2b).



**Abbildung 2:** Finite-Elemente-Modelle: a) Ursprünglicher Magnettopf, b) Optimierter Magnettopf, c) Ursprüngliche und optimierte Zentrierung

Diese Designveränderungen führen somit zu einer Verbesserung der Symmetrie des Kraftfaktorverlaufes (Abb.3a), die wiederum eine signifikante Reduzierung der geradzahigen Klirrfaktoren zur Folge hat. Weiterhin ergaben die Simulationen, dass eine große quantitative Veränderung des Kraftfaktors bei großen Spulenauslenkungen einen beträchtlichen Anstieg der ungeradzahigen Harmonischen bewirkt. Um den Bereich mit einem annähernd auslenkungsunabhängigen Kraftfaktor zu vergrößern, wird die Polplatte verschmälert (Abb.2b und 3a). Da diese Modifizierung auf Kosten des Wirkungsgrades geht, muss die wirksame Fläche des Permanentmagneten vergrößert werden, um einen annähernd gleichen Kleinsignal-Kraftfaktor zu erhalten.

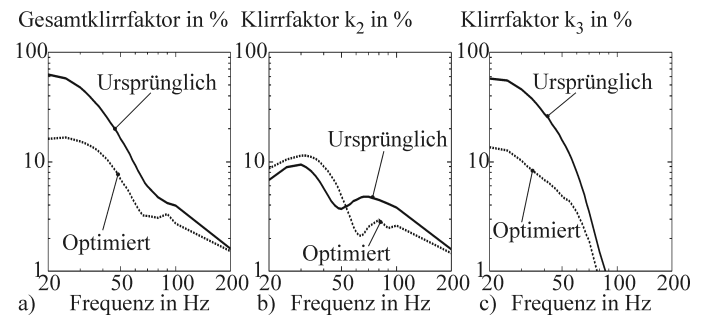


**Abbildung 3:** Vergleich des ursprünglichen und optimierten Lautsprechers: a) Berechneter Kraftfaktorverlauf (jeweils normiert auf den ursprünglichen Kleinsignalwert), b) Berechnete Kraft-Weg-Kennlinie

Nach der obigen Analyse der magnetischen Nichtlinearitäten infolge örtlicher Magnetfeldinhomogenitäten sollen im folgenden die mechanischen Verzerrungen aufgrund der nichtlinearen Steifigkeit der Zentrierung, die vorwiegend diese Nichtlinearitäten bestimmt [2], untersucht werden. Analog zu den obigen Untersuchungen ergaben diese Sensitivitätssimulationen, dass eine Linearitätsverbesserung der Kraft-Weg-Kennlinie in eine Reduzierung der ungeradzahigen Harmonischen resultiert sowie eine Symmetrieverbesserung eine Reduzierung der geradzahigen Verzerrungen bewirkt. Weiterhin zeigten die numerischen Berechnungen, dass eine Zentrierung mit einer größeren Rillenhöhe (Abb.2c) bei sonst gleichen Abmessungen und Materialeigenschaften eine signifikante Linearitätsverbesserung der Kraft-Weg-Kennlinie und folglich der kubischen Klirrfaktoren

bewirkt. Abschließend konnte ein Optimum hinsichtlich der Symmetrie der Kraft-Weg-Kennlinie durch eine zusätzliche Verschiebung der einzelnen Mittelpunkte der Rillen erreicht werden, so dass eine leicht nach außen ansteigende Zentrierung entsteht (Abb. 2c und 3b).

Durch Verwendung der oben beschriebenen optimierten Zentrierung und des optimierten Magnettopfes konnte insbesondere der kubische Klirrfaktor drastisch reduziert werden (Abb.4). Zum Beispiel beträgt die Verbesserung bei einer Frequenz von 20 Hz bei einer Eingangsleistung von 16 W  $-75\%$ . Diese signifikante Reduzierung der ungeradzahigen Harmonischen ist in Übereinstimmung mit den Ergebnissen in [3], wonach diese Verzerrungen besonders störend wirken. Eine wichtige Randbedingung der Optimierung ist, dass zusätzlich ein akzeptables Kleinsignalverhalten des Lautsprechers eingehalten werden muss. Abschließende Kontrollsimulationen ergaben eine vertretbare Reduzierung des Wirkungsgrades um  $-0,5$  dB.



**Abbildung 4:** Vergleich des ursprünglichen und optimierten Lautsprechers anhand der berechneten Klirrfaktoren bei einer elektrischen Eingangsleistung von 16 W: a) Gesamtklirrfaktor, b) Quadratischer Klirrfaktor, c) Kubischer Klirrfaktor

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der vorliegenden Arbeit ist es erstmalig gelungen, ein numerisches Verfahren basierend auf einer Finite-Elemente-Methode zu entwickeln, welches die hochgenaue und effiziente Berechnung der bei der Abstrahlung von elektrodynamischen Lautsprechern beteiligten, gekoppelten Felder ermöglicht. Weiterhin umfasst dieses Verfahren sowohl die Simulation des dynamischen Kleinsignalverhaltens als auch des dynamischen Großsignalverhaltens mit Berücksichtigung aller Nichtlinearitäten. Der Einsatz der Computermodellierung bei der Lautsprecheroptimierung wurde am Beispiel der harmonischen Verzerrungen gezeigt.

Um dieses Simulationsverfahren effizienter in der computerunterstützten Entwicklung in einem Industrieunternehmen integrieren zu können, wird das Software-System zu einem vollständigen CAE-Arbeitsplatz mit einer problemangepassten, benutzerfreundlichen Benutzeroberfläche für die Modellerstellung (Pre-Processing) und der Ergebnisaufbereitung (Post-Processing) ausgebaut.

## 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] Rausch M., Kaltenbacher M., Kreitmeier L., Krump G., Landes H., Lerch R., Simkovic R. *Einsatz numerischer Verfahren bei der Berechnung der nichtlinearen Eigenschaften von elektrodynamischen Lautsprechern*, Fortschritte der Akustik DAGA00, Oldenburg, 710-711, 2000.
- [3] Krump G. *Zur Wahrnehmbarkeit von tieffrequenten Verzerrungen*, Fortschritte der Akustik DAGA00, Oldenburg, 486-488, 2000.