

# Physikalisch basiertes virtuelles Prototyping von Mikrosystemen am Beispiel akustischer Wandlerysteme

## Physics-based Virtual Prototyping of Microsystems Exemplified for Acoustic Transducer Systems

Gabriele Schrag, Professur für Mikrosensorik und -aktorik, Technische Universität München, München, Deutschland  
schrag@tum.de

### Kurzfassung

Die große Vielfalt und Komplexität von Sensoren, Aktoren und Wandlern, sowie von den mit ihnen realisierten Mikrosystemen, macht ihre Modellierung und damit ihren Entwurf komplex und herausfordernd. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über Herausforderungen von und Anforderungen an physikalisch basierte Modellierungsumgebungen und zeigt Perspektiven für einen ganzheitlichen Entwurf von Mikrosystemen auf. Die demonstrierten Ansätze (Mixed-level Modellierung, Systemsimulation und Optimierung mittels genetischer Algorithmen) sind auf ein breites Spektrum von Bauelementen anwendbar, werden aber exemplifiziert anhand verschiedener akustischer Wandlerysteme.

### Abstract

The wide and complex variety of sensors, actuators, and transducers, as well as of microsystems realized with them, makes their modeling and thus their design complex and challenging. This article provides an overview of the challenges and requirements of physics-based modeling environments and outlines perspectives for a holistic design of microsystems. The approaches demonstrated (mixed-level modeling, system simulation, and optimization using genetic algorithms) are applicable to a wide range of components, but are exemplified using various acoustic transducer systems.

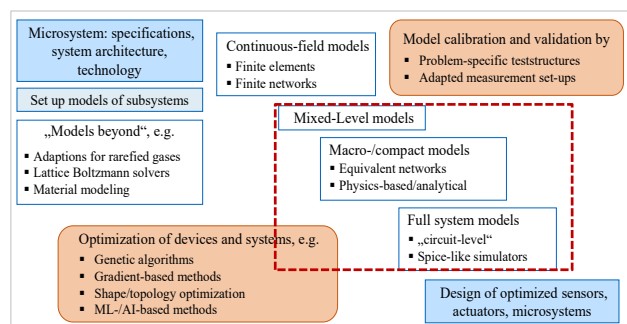
## 1 Virtuelles Prototyping von Mikrosystemen

Die große Vielfalt und Komplexität von Sensoren, Aktoren und Wandlern, sowie von den mit ihnen realisierten Mikrosystemen, macht ihre Modellierung und damit ihren Entwurf komplex und herausfordernd. Insbesondere Aspekte wie die inhärent mit ihrer Wirkweise einhergehenden Kopplungen zwischen verschiedenen Energieformen, die geometrische Komplexität der Mikrostrukturen sowie die Tatsache, dass die Performanz eines Mikrosystems durch alle Teilsysteme (Wandler, Elektronik, Gehäuse, etc.) bestimmt wird, sind hier zu nennen.

Daher werden zuverlässige Entwurfswerkzeuge auf allen Hierarchieebenen des Entwicklungsprozesses benötigt, die modular ineinandergreifen und eine effiziente Simulation erlauben. Idealerweise bleiben dabei physikalische und geometrische Designparameter sowie deren Abhängigkeiten im gesamten Prozess so detailliert wie nötig zugänglich, um den Entwurf solcher Systeme auf Basis einer prädiktiven und physikalisch basierten Modellierung zu ermöglichen. Das Portfolio der über den Designprozess benötigten Tools auf den verschiedenen Hierarchieebenen ist im Überblick in **Bild 1** dargestellt.

Essenziell ist hierbei, dass für alle Designaufgaben adäquate Entwurfswerkzeuge zur Verfügung stehen. Insbesondere sind Methoden notwendig, die die effiziente Modellierung auf Systemebene ermöglichen (siehe roter Rahmen in **Bild 1**) [1].

Im Gegensatz zu elektronischen Systemen, wo standardisierte Entwicklungsplattformen existieren, sind diese aufgrund der Diversität der Wandlerkonzepte bei Mikrosystemen kaum durchgängig vorhanden und oft werden für die jeweiligen Anwendungen gezielt Modelle abgeleitet.



**Bild 1** Hierarchische Modellierungsumgebung für das virtuelle Prototyping von Mikrosystemen.

Einen theoretischen Rahmen gibt in diesem Zusammenhang die auf thermodynamischen Prinzipien und Erhaltungsgleichungen [2,3] beruhende sog. verallgemeinerte Kirchhoffsche Netzwerktheorie [4,5], die eine Systemabstrahierung vom verteilten Modell bis zum Systemmodell erlaubt. Die hiermit abgeleiteten Modelle sind voll kompatibel mit gängigen Systemsimulatoren und bieten daher den natürlichen Link zur Mikroelektronik und in die Systemsimulation. Eine dezidiert physikalisch basierte Ableitung von Teilsystemmodellen, die modular zum Gesamtsystem verbunden werden können, ermöglicht dann die gezielte Optimierung von Mikrosystemen auf physikalischer Basis

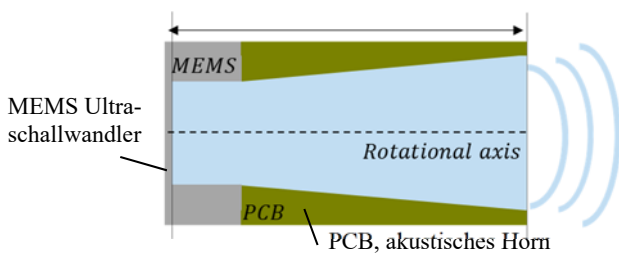
und damit eine zuverlässige Ableitung von Designparametern.

Am Beispiel mehrerer akustischer Wandler Systeme werden verschiedene Ansätze zur Modellierung gezeigt. Im Folgenden wird beispielhaft die Optimierung des Ausgangssignals eines Ultraschallwandlers mittels akustischer Hörner durch physikalische Kompaktmodellierung in Verbindung mit genetischen Algorithmen skizziert; weitere Beispiele (Systemsimulation von kapazitiven Mikrofonen mittels Mixed-level-Modellierung [6] sowie die Optimierung piezoelektrischer Mikrofone mittels genetischer Algorithmen [7]) werden detailliert im Konferenzbeitrag adressiert.

## 2 Beispiel – Maßgeschneiderte Frequenzantwort mit Hilfe akustischer Hörner

### 2.1 Das System - Problembeschreibung

Die Frequenzantwort von akustischen und Ultraschallwandlern ist stark vom umgebenden Medium und vom akustischen Aufbau (z.B. Montage auf einem PCB) abhängig. Dies kann man sich zunutze machen, indem man akustische Hörner an einen Wandler anschließen lässt und die Form so gestaltet, dass dieser als Gesamtsystem ein bestimmtes Spektrum abstrahlt oder sogar einen bestimmte Direktivität aufweist [8].



**Bild 2** Schematische Darstellung einer Anordnung aus Ultraschallwandler und akustischem Horn

**Bild 2** zeigt eine exemplarische Anordnung eines mikroelektromechanischen (MEMS), membranbasierten Ultraschallwandlers in Kombination mit einem akustischen Horn (PCB).

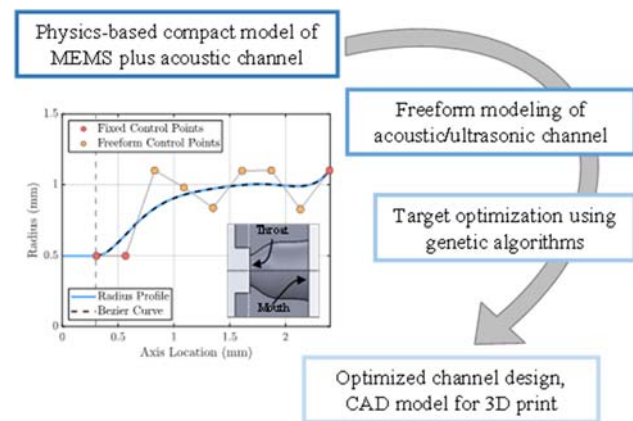
Um das System auf die gewünschte Abstrahlcharakteristik zu trimmen und zu optimieren, sind Modelle nötig, die zum einen effizient genug sind, um Wandler plus Gehäuse und umgebendes Medium gekoppelt zu simulieren, die andererseits aber auch die essentiellen Designparameter (Geometrie, Material) auf Systemebene für eine Optimierung zugänglich hat. Wir verwenden hier Kompaktmodelle für den Wandler wie auch für das akustische Horn, die mittels einer äquivalenten Netzwerkmodellierung oder direkt mittels einer Hardware-Beschreibungssprache (VHDL-AMS, Verilog-A) in einen Standardsystemsimulator implementiert werden können und im folgenden Abschnitt kurz skizziert werden.

### 2.2 Modellierung und Systemoptimierung

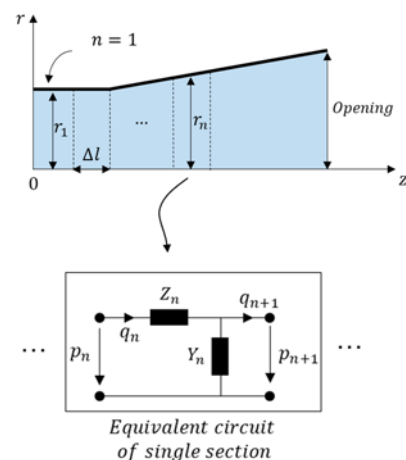
Der prinzipielle Simulationsablauf für die Modellierung und Optimierung des Systems hinsichtlich einer optimierten Horngeometrie für eine gewünschte Abstrahlcharakteristik ist in **Bild 3** dargestellt.

Den Startpunkt stellt ein physikalisch basiertes Kompaktmodell für den elektromechanischen Ultraschallwandler auf Basis einer verallgemeinerten Kirchhoffschen Netzwerkmodellierung dar. Dieses Modell koppelt an eine akustische Transmission-Line-Modell (TLM), das die Ausbreitung der Schallwellen modelliert. Um einen veränderlichen Hornradius in das Modell einbeziehen zu können, wird es in Form eines diskretisierten TLMs verwendet, d.h. es werden mehrere Teilmodelle mit variierenden Querschnittsradien und Längen so aneinandergereiht, das der veränderliche Horndurchmesser emuliert wird (siehe **Bild 4**).

Die zu optimierende Geometrie des akustischen Kanals wird über eine Freiformmodellierung mittels Bezierkurven dargestellt. Durch Anwendung eines genetischen Algorithmus wird die Form des Kanals so optimiert, dass die gewünschte Abstrahlcharakteristik erzielt wird.



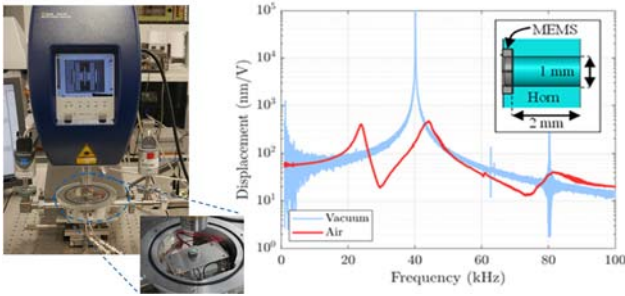
**Bild 3** Ablaufschema für die Modellierung und Optimierung des Systems aus mikromechanischem Ultraschallwandler und akustischem Horn.



**Bild 4** Modellierung des akustischen Horns, mittels eines diskretisierten akustischen Transmissionline-Modells.

### 2.3 Simulations- und Messergebnisse

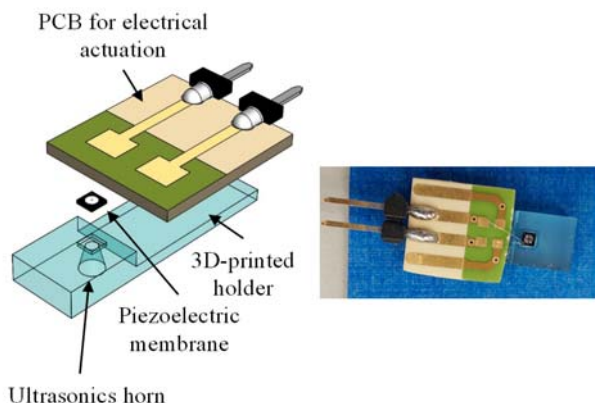
Ausgangspunkt der Untersuchungen war ein Ultraschallwandler mit zylindrischem akustischem Kanal, der mit Hilfe eines Laser-Dopplervibrometers (**Bild 5**, links), das mit einer Vakuumkammer betrieben werden kann, vermessen wurde. In **Bild 6** (rechts) sieht man die Ergebnisse einer Messung im Vakuum (blau), die die mechanische Eigenfrequenz des Wandlers zeigt. Der rot dargestellte Frequenzgang zeigt die Messungen in Luft und die Veränderungen in der Abstrahlcharakteristik, die durch die Umgebungsluft und das akustische Horn verursacht werden.



**Bild 5** Laser-Doppler-Vibrometer MSA-500 (Polytec) mit Vakuumkammer zur Vermessung der Ultraschallwandler und Frequenzgang der Konfiguration mit zylindrischem Horn im Vakuum (blau) und in Luft (rot).

Mit Hilfe des in 2.2. skizzierten physikalisch basierten Systemmodells und des genetischen Algorithmus wurde die Form des akustischen Horns so optimiert, dass die Abstrahlcharakteristik des Systems auf eine Zielfunktion getrimmt werden konnte und nun Resonanzen bei den vorgegebenen Frequenzen 29 kHz und 41 kHz aufweist.

Die so berechnete Form des akustischen Horns wurde mit Hilfe eines 3D-Druckers realisiert, und das System auf einem PCB aufgebaut und vermessen (siehe **Bild 6**). Der optimierte Frequenzgang ist in **Bild 7** zu sehen und zeigt sehr gute Übereinstimmung zwischen vorhergesagter (optimierter) und gemessener Charakteristik.



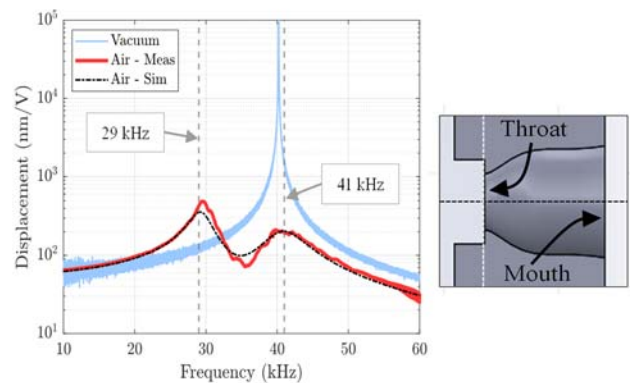
**Bild 6** Schematische Darstellung des Aufbaus aus piezoelektrischem Ultraschallwandler, akustischem Horn und PBC (links) und Realisierung (rechts).

### 3 Zusammenfassung

Die Modellierung mikrotechnologisch gefertigter Sensor- und Aktorsysteme erfordert aufgrund der Diversität und Komplexität der Wandlerprinzipien und Materialsysteme sowie der Komplexität der Bauelementgeometrien eine Entwurfsumgebung, die für alle Abstraktionsebenen Entwurfswerkzeuge bereitstellt, die hierarchisch und modular ineinandergreifen. Da Mikrosysteme mehr als die Summe ihrer Einzelbauteile sind, werden auch Methoden benötigt, die die kompakte, effiziente, aber dennoch akkurate Modellierung auf Systemebene erlauben, wobei alle Effekte, die das Betriebsverhalten beeinflussen, selbstkonsistent und mit allen Rückkopplungen in einem solchen Systemmodell enthalten sein müssen.

Anhand eines Demonstrators aus dem Bereich akustischer Wandler wurde beispielhaft das Potential von, auf physikalischer Modellierung basierendem, virtuellem Prototyping gezeigt. Das Systemmodell, abgeleitet auf Basis der verallgemeinerten Kirchhoffschen Netzwerktheorie, ermöglicht den Zugang zu Designparametern und damit deren effiziente Optimierung auf Systemebene.

Dieses Konzept ist generisch, verallgemeinerbar und daher übertragbar auf andere Mikrosysteme (z.B. [6,7,9]) und bildet daher ein Fundament für den Entwurf derartiger Systeme als Ganzes.



**Bild 7** Frequenzgang des optimierten Systems: Vergleich zwischen Simulation und Messung (links) und die durch Optimierung erhaltene Horngeometrie (rechts).

### 4 Literatur

- [1] T. Bechtold, G. Schrag, L. Feng (eds.), System-Level Modeling of MEMS, Advanced Micro & Nanosystems 10. Wiley-VHC, 2013
- [2] L. Onsager, "Reciprocal Relations in Irreversible Processes", Physical Review, vol. 37, 1931.
- [3] H.B. Callen, Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics, John Wiley & Sons, New York, 1985
- [4] G. Schrag, G. Wachutka, System-Level Modeling of MEMS Using Generalized Kirchhoffian Networks-Basic Principles. In: System-Level Modeling of MEMS, Wiley-VHC, 2013
- [5] A. Lenk, R.G. Ballas, R. Werthschuetzky, G. Pfeifer, Electromechanical Systems in Microtechnology and

Mechatronics: Electrical, Mechanical and Acoustic Networks, their Interactions and Applications (Microtechnology and MEMS), Springer, 2012

- [6] T. Kuenzig, A. Dehe, U. Krumbein, G. Schrag, Virtual design and optimization studies for industrial silicon microphones applying tailored system-level modeling. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 28, 2018
- [7] G. Bosetti, C. Bretthauer, A. Bogner, M. Krenzer, K. Gierl, H. Heiss, G. Schrag, Design Optimization of a Corrugated Piezoelectric MEMS Microphone applying Genetic Algorithms. 2024 25th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE), 2024
- [8] G. Bosetti, S. Hofstetter-Spona, G. Schrag. On the Use of 3D-Printed Ultrasonic Horns to Tune the Frequency Response of Airborne MEMS Transducers, *Transducers Conference*, Kyoto, Japan, 2023
- [9] P. Voigt, Compact modeling of microsystems, in *Selected Topics of Electronics and Micromechatronics* (eds G. Wachutka and D. Schmitt-Landsiedel), Shaker Verlag, Aachen, Germany, 2003