

# Bestimmung von Netzwerkparametern piezomagnetischer Zweischicht-Biegeelemente mit Kombinerter Simulation

Uwe Marschner, Eric Starke

Technische Universität Dresden, Institut für Halbleiter- und Mikrosystemtechnik, 01062 Dresden,  
E-Mail: Uwe.Marschner@tu-dresden.de

## Einleitung

Zweischicht-Elemente mit einer piezomagnetisch aktiven und einer magnetisch inaktiven Schicht finden Anwendung als Biegeaktoren oder Biegesensoren. Im Gegensatz zu Volumenwandlern erreichen Zweischicht-Elemente deutlich größere Auslenkungen, die zur mechanischen Schwingungserzeugung, akustischen Schallerzeugung oder zur Energieumwandlung aus mechanischen Schwingungen genutzt wird [1]. Das dynamische Verhalten solcher schwingungsfähigen Anordnungen mit schwach nichtlinearen Eigenschaften kann mit einem Netzwerkmodell schnell und zuverlässig vorausberechnet werden [2].

Bei homogener Magnetfeldverteilung und Konzentration des Magnetfeldes in der magnetischen Schicht können die Netzwerkparameter analytisch angegeben werden. Sind diese Annahmen nicht erfüllt, so können diese Netzwerkparameter mit kombinierter Simulation unter Zuhilfenahme eines Finite-Elemente- (FE-)Simulators effizient bestimmt werden. Bei der direkten Bestimmung des Parameters eines einzelnen Netzwerkelementes folgen die Netzwerkkoordinaten des Elementes direkt aus den Ergebnissen der FE-Analysen oder sind durch einfache Rechnungen bestimmbar. Für energiespeichernde Elemente genügen alternativ auch eine Netzwerkkoordinate und die zugehörige Energie. Im Beitrag wird diese Anwendung der Methodik der kombinierten Simulation vorgestellt.

## Netzwerkmodell

Ausgehend von der Biegetheorie von Zweischicht-Elementen kann ein umkehrbares finites Netzwerkmodell für den piezomagnetischen Wandler mit dünner magnetischer

Schicht aufgestellt werden [3]. Dieser Wandler beschreibt kleine Änderungen der magnetischen und rotatorischen mechanischen Koordinaten Drehmoment  $M$  und Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$  um den Arbeitspunkt. Die Biegenachgiebigkeit  $n_R$  des Unimorphs wird durch den Einfluss des Magnetfeldes im Arbeitspunkt um die transformierte Reluktanz  $Y^2/R_{m,m}$  der magnetischen Schicht erhöht. Als magnetische Flusskoordinate dient die magnetische Flussrate  $I_m$ , d.h. die zeitliche Ableitung des Magnetflusses  $\Phi$ . In Verbindung mit der magnetischen Spannung  $V_m$  ergibt sich ein magnetisches Leistungskordinatensystem. Magnetische Reluktanzen sind dann mit dem Kapazitätssymbol dargestellt. Der magnetomechanische Wandler kann direkt mit Modellen elektromagnetischer Wandler, beispielsweise einer Flachspule oder einer Zylinderspule [4], und einem translatorisch-rotatorischen Wandler gekoppelt werden. Abb. 1 zeigt die Kopplung des piezomagnetischen Unimorphs mit einer Planarspule. Die magnetomotorische Kraft der Spulenwindungen teilt sich hier in die magnetische Spannung im Gebiet oberhalb der Windungen  $V_{m,Air,a}$  und die magnetische Spannung unterhalb der Windungen  $V_{m,Air,b}$  auf, wie in Abb. 2 verdeutlicht. In erster Näherung ist diese bei dünner Schicht gleich der magn. Spannung  $V_{m,m}$  über der Schicht.

Bei einem Zweischichtaufbau der Breite  $w$  und Länge  $l$  mit dünner magnetischer Schicht der Dicke  $h_1$ , dem Elastizitätsmodul  $E_1$  und der Permeabilität  $\mu_{33}$  und einem Träger mit der Dicke  $h_2$  und dem Elastizitätsmodul  $E_2$  kann der analytische magnetomechanischen Wandlerfaktor

$$\frac{1}{Y_r} = \frac{E_2 h_2 E_1^B h_1 w}{2} \frac{(h_1 + h_2)}{E_1^B h_1 + E_2 h_2} \frac{d_{33}}{l} \frac{\mu_{33}^S}{\mu_{33}^r} \frac{A}{Nm} \quad (1)$$

angegeben werden. Die piezomagnetische Konstante  $d_{33}$  ist bei gleich gerichteten magnetischen und mechanischen Grö-

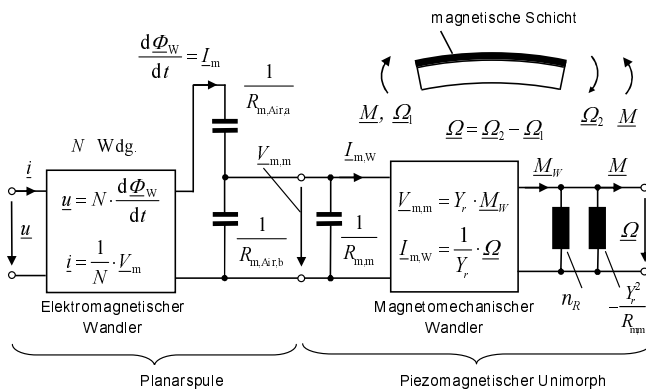


Abbildung 1: Netzwerkmodell des elektromechanischen Zweischicht-Biegers mit Planarspule und dünner magnetischer Schicht, bestehend aus dem elektromagnetischen Wandler, dem magnetischen Netzwerk, dem magnetomechanischen Wandler und der rotatorischen Nachgiebigkeit

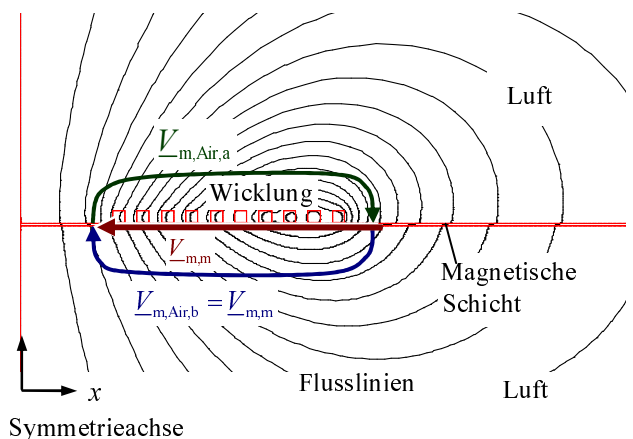


Abbildung 2: Schnittdarstellung der Planarspule auf der magnetischen Schicht mit FE-simulierten Magnetflusslinien

ßen wirksam. Bei homogener Magnetfeldverteilung beträgt die Reluktanz der magnetischen Schicht  $R_{m,m} = l/(A\mu_{33}^s)$ . Diese Rechenvorschrift gilt ebenso wie Gln. (1) nicht bei inhomogener Verteilung des Magnetfeldes. Der Einfluss inhomogener Magnetfeldverteilungen in der magnetischen Schicht und der Einfluss von anisotropem piezomagnetischen Materialverhalten auf den Wandlerfaktor können mit einem Finite-Elemente-Modell (FE) simuliert werden, wie nachfolgend gezeigt wird.

### Bestimmung von Netzwerkparametern mit Kombiniertes Simulation

Bei inhomogener Magnetfeldverteilung in der magnetischen Schicht ist der Zusammenhang zwischen der magnetischen Spannung  $V_{m,m}$  über entlang der Schicht und der Flussrate  $I_{m,m}$  in der Schicht zu bestimmen. Durch beidseitiges Klemmen des Biegers ( $Q_1=0, Q_2=0$ ) wird sichergestellt, dass die Flussrate in den magnetomechanischen Wandler gleich Null ist. Eine Transformation der magnetischen Netzwerkelemente in die elektrische Ebene, wie in Abb. 3 gezeigt, führt zu drei Teilinduktivitäten, der verbleibende magnetische Leerlauf zu einem elektrischen Kurzschluss des elektrischen Wandlereingangs. Die Teilinduktivitäten, die der Luft bzw. unmagnetischen Schichten oberhalb und unterhalb der magnetischen Schicht zugeordnet sind, ergeben in einer verbleibenden Parallelschaltung die Induktivität der Luftspule  $L_0$ , wenn die rel. Permeabilität der magnetischen Schicht gleich Eins gesetzt wird. Die unbekannte Induktivität  $L_x$  kann für niedrige Betriebsfrequenzen aus FE-Simulation der statischen magnetischen Feldenergie und nachfolgender Berechnung der Gesamtinduktivität des Aufbaus  $L$  mit

$$L_x = \frac{4L_0(L - L_0)}{2L_0 - L} \Rightarrow R_{m,m} = \frac{N^2}{L_x} \quad H \Rightarrow \frac{A}{Wb} \quad (2)$$

berechnet werden. Die Rücktransformation in die magnetische Ebene ergibt die wirksame Reluktanz der magnetischen Schicht. Den Einfluss der Magnetfeldverteilung auf die wirksame Reluktanz bei gleicher Geometrie runder Anordnungen zeigt Abb. 4 [5].

Das Magnetfeld ist in Windungsnähe und damit in maximaler Entfernung von der neutralen Schicht konzentriert. Der Wandlerfaktor  $Y_r = n_R \cdot R_m \cdot I_m / Q_W = n_R \cdot R_m \cdot \Phi_m / Q_W$  erfordert zu seiner Bestimmung entweder das FE-simulierte Biegemoment oder den Neigungswinkel und die Flussrate in den Wandler  $I_{m,w}$ . Sie kann mit Hilfe des Flussratenteilers analysiert werden, wenn wie in Abb. 5 die Biegenachgiebigkeiten in die magnetische Ebene transformiert werden.

### Literatur

[1] Starke, E.; Marschner, U.; Pfeifer, G.; Fischer, W.-J.: Simulation-Based Optimization of a Piezoelectric Sound Generator by Combining a Finite-Element and a Network Model. Conf. on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems SMASIS (2011)

[2] Lenk, A., Ballas, R.G., Werthschützky, R., Pfeifer, G.: Electromechanical Systems in Microtechnology and Mechatronics, Springer, (2010).

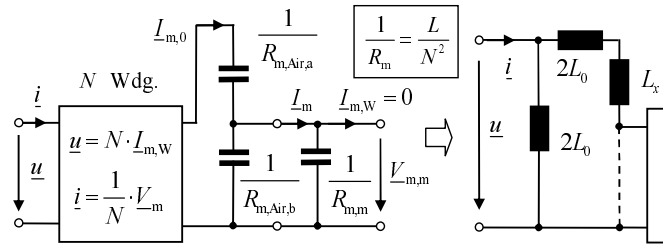


Abbildung 3: Transformation der magnetischen Netzwerkelemente in die elektrische Ebene

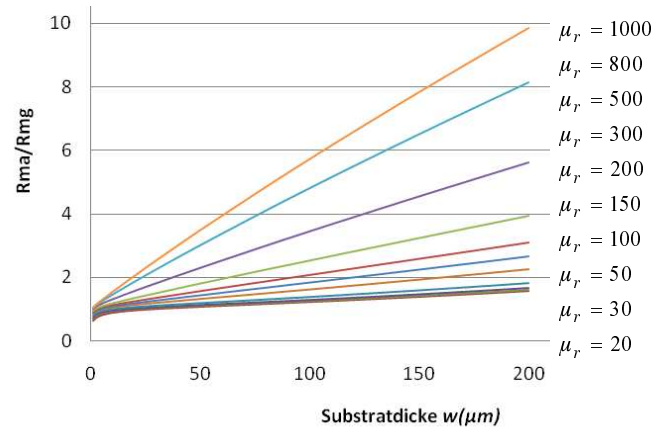


Abbildung 4: Verhältnis der Reluktanzen bei homogener Feldverteilung zu inhomogener Feldverteilung bei gleicher Schichtgeometrie

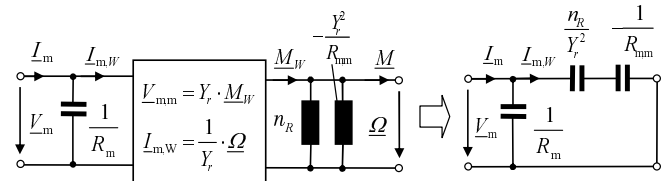


Abbildung 5: Elimination des magnetomechanischen Wandlers zur Bestimmung des Wandlerfaktors Y

[3] Werthschützky, R. und Pfeifer, G.: Die Netzwerktheorie als leistungsfähige Entwurfsmethode für elektromechanische Systeme der Mikrotechnik und Mechatronik, 38. DAGA, Darmstadt, 19.-22. März 2012.

[3] Starke, E.: Kombiniertes Simulation - eine weitere Methode zur Optimierung elektromechanischer Systeme, Dissertation, TUDpress Verlag der Wissenschaften, Dresden, (2010).

[4] Marschner, U.; Datta, S.; Starke, E.; Pfeifer, G.; Fischer, W.-J. & Flatau, A.: Magnetostrictive unimorph transducer network model, SPIE Conf. 7647 Smart Structures and Materials (2010), 764-774

[5] Marschner, U.; Starke, E.; Pfeifer, G.; Fischer, W.-J. & Flatau, A. B.: Electromagnetic Network Models of Planar Coils on a Thin or Thick Magnetic Layer, IEEE Transactions on Magnetics (2010), 46, 2365 -2368

[5] Feng, Y.: Untersuchung des Näherungsgrades eines elektromagnetischen Netzwerkmodells für kreisrunde Planarspulen auf magnetischem Substrat, Diplomarbeit, Institut für Halbleiter- und Mikrosystemtechnik, Technische Universität Dresden, 2012