

# Resonante kapazitive Ultraschallwandler mit leitenden und isolierenden Stegen

Stephan Leschka  
 Institut für Akustik und Sprachkommunikation, TU Dresden

Email: Stephan.Leschka@ias.etu-dresden.de

## Einleitung

Resonante kapazitive Ultraschallwandler wurden für ein Frequenzgebiet um 100 kHz aufgebaut. Ein Netzwerkmodell mit verteilten Parametern, welches das inhomogene elektrische Feld im Wandlerrückvolumen bereits berücksichtigt, ermöglicht die Berechnung des Schalldrucks auf der Wandlerhauptachse in Abhängigkeit von der Wandlergeometrie, den Werkstoffparametern und den elektrischen Speisebedingungen. Der theoretisch berechnete Schalldruck im Resonanzbetrieb stimmt bei Wandlern mit Isolierstegen mit den Messergebnissen gut überein. Wandler mit leitenden Stegen erzeugen bereits bei kleinen Speisespannungen einen höheren als den berechneten Schalldruck. Die dazu notwendige Schwingungsenergie stammt aus Bereichen außerhalb des geschlossenen Wandlerrückvolumens.

## Aufbau des Wandlers

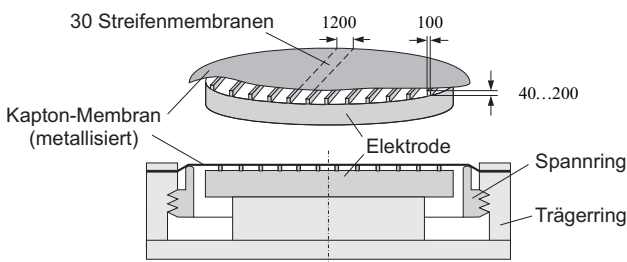


Bild 1: Aufbau eines Multistreifen-Membranwandlers

In Bild 1 ist die Wandleranordnung dargestellt. Eine gespannte und oberseitig metallisierte Kaptonmembran wird auf der steifen, leitenden und ebenen Gegenelektrode aufgelegt. Auf deren Oberseite befinden sich parallele und äquidistante Stege mit rechteckförmigem Querschnitt. Sie dienen zur Auflage der Membran, die aus einer  $7 \mu\text{m}$  dicken, oberseitig metallisierten Kaptonfolie besteht. Zwei benachbarte Stege mit der darüber gespannten Membran bilden eine in Bild 2 dargestellte Streifenmembran [1]. Jede von ihnen besitzt abgesehen von den Randbereichen des Wandlers einen konphas schwingenden Nachbarn, weshalb der Volumenfluss in den vor der Streifenmembran befindlichen virtuellen Kanal gespeist wird. Daraus resultiert deren akustische Belastung mit der Schallkennimpedanz  $\rho c$ . Die Resonanzfrequenz jeder Streifenmembran ist durch den Stegabstand  $l$ , die Membranspannung  $T_M$ , deren Flächenmasse und die Höhe des Luftspaltes  $a_L$  bestimmt. Da die Membran in Tiefenrichtung des Bildes ebenfalls konphas schwingt, ist die Betrachtung des Querschnittes einer Streifenmembran repräsentativ für den gesamten Multistreifen-Membranwandler.

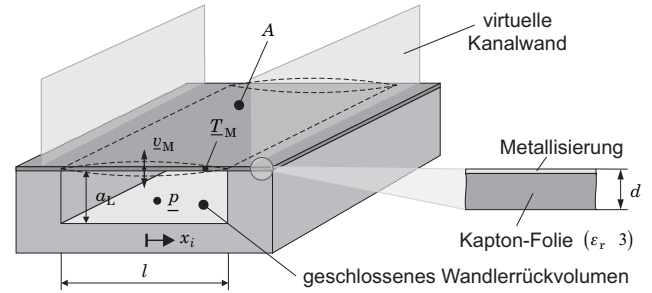


Bild 2: Streifenmembran (Ausschnitt)

## Netzwerkmodell einer Streifenmembran

In Bild 3 ist das Netzwerkmodell einer Streifenmembran dargestellt, dessen Herleitung bereits in [2] ausführlich diskutiert wurde. Die waagrecht liegende Kette von Nachgiebigkeiten in der Bildmitte beschreibt das quasistatische Verhalten der gespannten Membran. Die zu jedem Systempunkt gehörige Membranmasse ergänzt diesen Schaltungsteil zu einem Wellenleiter, der die Streifenmembran mindestens bis einschließlich der ersten Resonanz richtig abbildet. Die akustische Ebene befindet sich im oberen Bildteil. Die ausgangsseitige Parallelschaltung der gyratorischen Flächenwandler resultiert aus der vorausgesetzten Ortsunabhängigkeit des Schalldrucks. Jedes Flächenstück  $\Delta A$  setzt die lokale Oberflächenschnelle  $v_i$  in den Volumenfluss  $q_i$  um.

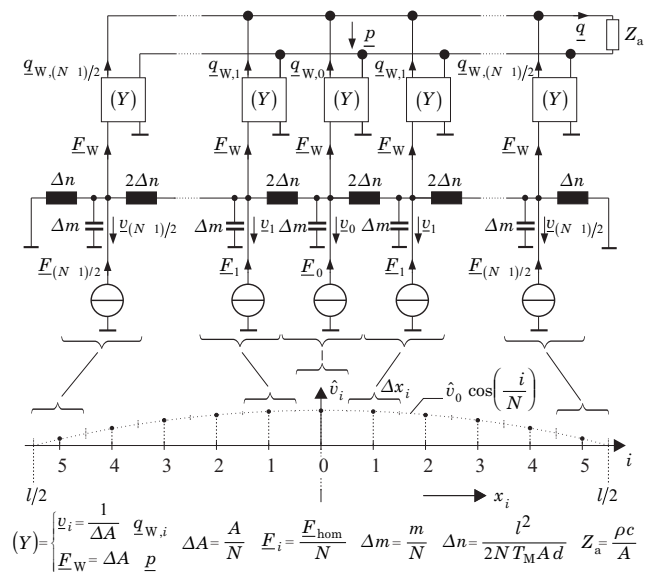


Bild 3: oben: Netzwerkmodell einer Streifenmembran bei homogenem elektrischen Feld; unten: Schnelle am  $i$ -ten Schaltungsknoten

Die elektrische Feldkraft wird durch die im unteren Bildteil dargestellten Kraftquellen  $\underline{E}_i$  eingespeist. Um die begrenzte Energie des antreibenden elektrischen Feldes optimal zur Schallerzeugung auszunutzen, wählt man den Resonanzbetrieb.

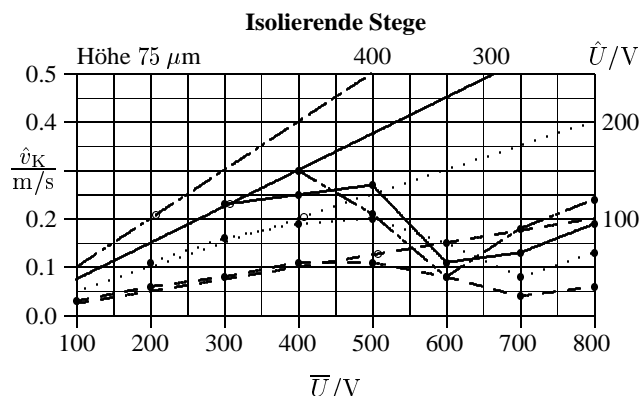
### Membranschnelle im Resonanzbetrieb

Bei der Einspeisung einer harmonischen und homogenen elektrischen Kraft von 1 N in das Netzwerkmodell wird in der Mitte jeder Streifenmembran eine Schnelle  $\hat{v}_0$  von  $3.8 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  erzeugt. Die Fläche  $A$  wird ohne Beschränkung der Allgemeinheit mit  $1 \text{ m}^2$  angesetzt, da man jeder Streifenmembran eine beliebige Tiefe zuordnen kann. Die Streifenmembran schwingt in ihrer cosinusförmigen Eigenmode, die im unteren Teil von Bild 3 dargestellt ist. Diese Schwingungsform behält sie auch bei einer inhomogenen Kraftverteilung bei.

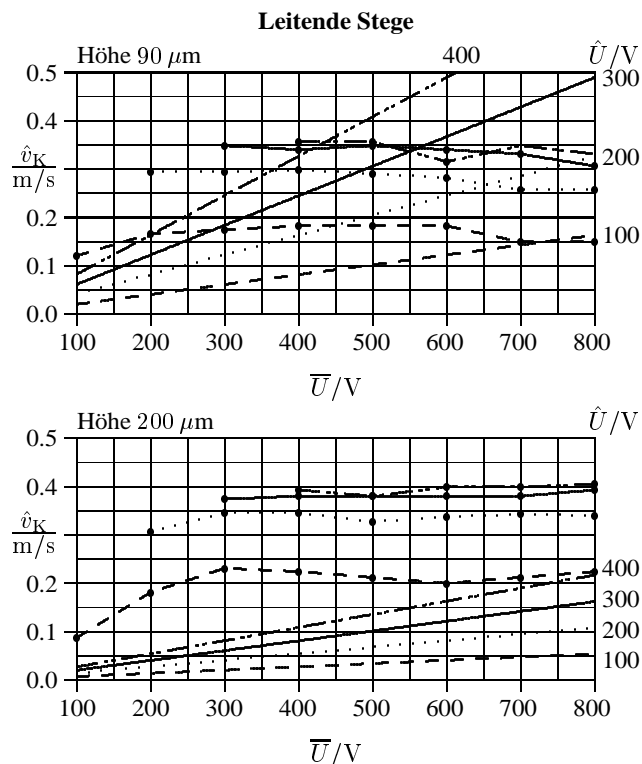
Für Streifenelektroden mit leitenden und isolierenden Stegen stellt man die berechnete der gemessenen Oberflächenschnelle des zum Wandler äquivalenten Kolbenstrahlers gegenüber. Sie ist proportional zum maximalen Schalldruck, der sich in Abhängigkeit von der Frequenz und dem Wandlerdurchmesser auf der Wandlerhauptachse einstellt. In die mit dem Netzwerkmodell berechneten Theoriekurven sind außerdem die bereits in [2] diskutierten Kompressionsverluste im Wandlerrückvolumen eingeflossen. Sie erhöhen die akustische Belastung und wachsen mit sinkender Steghöhe.

Eine *Streifenelektrode mit Isolierstegen* aus Lötstopplack besitzt ein nahezu homogenes elektrisches Feld im Wandlerrückvolumen. Die berechnete und die gemessene Oberflächenschnelle stimmen gut überein. Sie sind in Bild 4 dargestellt. Die durch kleine Kreise markierte Überschreitung der Durchbruchfeldstärke im Eckenfeld zwischen Membran und Gegenelektrode begrenzt dieses Wandlerprinzip. Die Feldstärke im homogenen Teil des Wandlerrückvolumens erreicht auf Grund dieses Effektes nicht die bei der Steghöhe erwartete Durchbruchfeldstärke, da das eingeschlossene Luftvolumen frühzeitig durch die Wirkung des Eckenfeldes ionisiert wird.

Das inhomogene elektrische Feld im Rückvolumen einer *Streifenelektrode mit leitenden Stegen* aus Messing verursacht hohe Kräfte in der Nähe der Stege. Die resultierende inhomogene Kraftverteilung  $\underline{E}_i(x_i)$  wurde in das Netzwerkmodell einbezogen. Dabei steigt die Membranschnelle nur gering über ihren Wert bei homogenem elektrischen Feld an (Faktor  $\approx 1.5$  bei  $a_L = 200 \mu\text{m}$ ). Wie die Ergebnisse in Bild 5 zeigen, ist aber der gemessene Schalldruck im Gebiet geringer Kompressionsverluste im Wandlerrückvolumen nahezu unabhängig von



**Bild 4:** Schnelle des äquivalenten Kolbenstrahlers aus Theorie (Gerade mit Parameter  $\hat{U}$ ) und Mikrofonmessung (●)



**Bild 5:** Schnelle des äquivalenten Kolbenstrahlers aus Theorie (Gerade mit Parameter  $\hat{U}$ ) und Mikrofonmessung (●)

der Steghöhe. Dieser Effekt ist unter Beachtung des homogenen und inhomogenen elektrischen Feldanteils im Wandlerrückvolumen nicht erklärbar. Die Durchschlagfeldstärke in der Ecke zwischen Stegen und Membran wird hier schon bei Spannungen um 20 V überschritten. Daher ist von einer frühzeitigen Ionisation des Wandlerrückvolumens auszugehen.

### Zusammenfassung

Der Schalldruck von Multistreifen-Membranwandlern mit isolierenden Stegen ist durch das erreichbare homogene elektrische Feld im Wandlerrückvolumen bestimmt. Dieses wird begrenzt, wenn die erhöhte Feldstärke zwischen Stegen und Membran die Durchbruchfeldstärke überschreitet. Der bereits bei kleinen Spannungen festzustellende hohe Schalldruck von Wandlern mit leitenden Stegen ist selbst unter Einbeziehung des inhomogenen elektrischen Feldes im Wandlerrückvolumen theoretisch nicht nachvollziehbar. Zur Erklärung dieses Effektes verbleiben die bisher nicht betrachteten Zonen zwischen den Stegoberflächen und der Membran, wo ebenfalls Schwingungsenergie in den Wandler eingetragen werden könnte. Bei minimierten Kompressionsverlusten und konstanten elektrischen Speisebedingungen liefern Wandler mit leitenden Stegen einen größeren Schalldruck als ihr Äquivalent mit isolierenden Stegen.

### Literatur

- [1] Lenk, A.; Pfeifer, G.; Werthschützky, R.: Elektromechanische Systeme. Springer Verlag 2001
- [2] Leschka, S.; Pfeifer, G.: Resonanter kapazitiver Wandler - Dimensionierung mit Netzwerkmethoden. Fortschritte der Akustik; DAGA 2001; Hamburg