

Konzept und Prototyp eines Ionenwindlautsprechers *(Concept and prototype of an ion wind speaker)*

S. Merchel, L. Creutzburg, A. Schwock, T. Fleck und M.E. Altinsoy

Technische Universität Dresden, Lehrstuhl für Akustik und Haptik,

Email: sebastian.merchel@tu-dresden.de

Abstract

Dieser Beitrag beschreibt Experimente mit einem Lautsprecherprototypen ohne bewegte Bauteile. Das Antriebsprinzip beruht auf der Modulation eines Ionenwindes. Dieser Wind wird durch eine hohe Spannung erzeugt, welche zwischen einer scharfkantigen und einer abgerundeten Elektrode anliegt. An der kantigen Elektrode entsteht dabei eine hohe Feldstärke und es kommt zu Entladung durch Ionisation der Luft. Die Spannung muss dabei möglichst groß aber unter der Durchschlagspannung der Luft liegen damit keine Funkenüberschläge auftreten. Die ionisierten Luftmoleküle werden anschließend im elektrischen Feld beschleunigt, kollidieren mit anderen Molekülen und erzeugen so einen Luftstrom. Dieser kann durch eine Wechselfrequenz moduliert und zur Schallabstrahlung genutzt werden. Dazu wurden verschiedene Elektrodenanordnungen untersucht. Das Ergebnis des Projektes ist ein funktionsfähiger Prototyp über welchen ein Audiosignal wiedergegeben werden kann.

1. Plasma- vs. Ionenwindlautsprecher

Verschiedene Ansätze existieren um einen Lautsprecher ohne konventionelle Membran zu implementieren. Prinzipieller Vorteil aller Systeme ist die extrem geringe zu beschleunigende Masse und das damit einhergehende gute Impulsverhalten. Im Gegensatz zu Schallwandlern mit Membranen existiert so gut wie keine Massenträgheit. Eigenschwingungen einer Kalotte, die Verzerrungen hervorrufen, werden ebenfalls vermieden. Als prinzipieller Nachteil ist die hohe elektrische Spannung und bei Erzeugung eines Plasmas auch die hohen Temperaturen zu nennen. Des Weiteren entstehen durch die starke Ionisierung Stickoxide die zusammen mit dem Luftsauerstoff Ozon bilden können.

Zunächst soll ein Überblick über die verschiedenen Methoden gegeben werden.

Die wohl bekannteste Methode ist der *Plasmahochtöner* (plasma tweeter, plasma arc) bei dem es zu Glimmentladung (glow discharge) kommt. Dabei wird eine Plasmaflamme zwischen zwei Elektroden erzeugt. Eine hohe Spannung im niederen kV-Bereich ist notwendig. Durch Modulation des Plasmas ändert sich die Größe der Flamme und die Temperatur der Luft in der unmittelbaren Umgebung. Die Luft dehnt sich dadurch aus und zieht sich zusammen so dass es zur Schallabstrahlung kommt. Erste Schallwandler dieses Typs auf Basis von Kohlebogenlampen zur Straßenbeleuchtung (singing arc) gehen auf Simon und Duddell Ende des 19. Jahrhunderts zurück [1,2]. Zahlreiche Patente wurden seitdem angemeldet [3]. Einige Messgeräte (Ionophone [4])

und Audioprodukte entstanden ab den 50er Jahren, wovon die meisten heute nicht mehr erhältlich sind (z.B. DuKane Ionovac, Magnat MP, Hill Plasmatronic, ... [5]). Die wenigen aktuell verfügbaren kommerziellen „Ionenlautsprecher“ beruhen auf dem Prinzip des Plasmahochtöners (z.B. Corona Plasma Tweeter, Acapella ION TW 1S) [6,7]. Manchmal wird diese Art des Schallwandlers auch Teslahochtöner genannt, da eine Tesla-Resonanzspule zur Erzeugung der Hochspannung zum Einsatz kommen kann [8]. Viele Hobby-Projekte beruhen auf dem Prinzip des Plasmahochtöners und zahlreiche Demonstrationen können im Internet gefunden werden.

Eine grundsätzlich andere Methode beruht auf der Idee Ionen zu erzeugen, welche anschließend in einem elektrischen Feld beschleunigt werden und mit anderen Partikeln kollidieren. So entsteht ein *Ionenwind* (ion wind, corona wind). Das Phänomen ist seit langem bekannt und wird als Antrieb für sogenannte Lifter [9] oder als Ionentriebwerk in der Raumfahrt [10] genutzt. Durch Modulation der Feldstärke und damit des Ionenwinds lässt sich eine Schallwelle erzeugen. Diese Idee ist erstmalig in den Arbeiten von Tombs et al. [11,12] und Shirley [13] aus den 50er Jahren zu finden. Sie experimentierten mit verschiedenen Anordnungen bestehend aus spitzen Elektroden und koaxialen Ringen. Ein erster Lautsprecherprototyp mit einem Elektrodengitter wird vorgestellt. In den 80er Jahren präsentiert Nelson Pass einen großflächigen Ionenwindlautsprecher: das Ion Cloud Panel [14]. Zur Vermeidung von Ozonbildung schlägt Pass die Verwendung von Argongas vor. Bondar und

Fourriere produzieren kurze Zeit später einen Kopfhörer mit Ionenantrieb unter dem Namen Plasmasonic Headphone [15,16]. Einige weitere Patente existieren in denen hauptsächlich verschiedene Elektrodenanordnungen beschrieben werden. Nur wenige aktuelle Projekte beschäftigen sich mit dem Prinzip des Ionenwind-lautsprechers [3,17,18].

Der in dem vorliegenden Beitrag verwendete Ansatz beruht auf dem Prinzip des modulierten Ionenwinds. Dazu muss zunächst ein Ionenwind erzeugt werden, der mit der abstrahlenden Frequenz seine Richtung ändert. Eine Schwierigkeit dabei ist die hohe Spannung, mit welcher zur Erzeugung des Ionenwinds gearbeitet werden soll. Ein wesentlicher Teil des Projektes ist daher die Erzeugung der Hochspannung und die Modulation dieses Signals. Desweiteren werden verschiedene Elektrodenanordnungen und Funktionsprinzipien diskutiert.

2. Ionenerzeugung

Voraussetzung für die Funktion des Lautsprechers ist das Vorhandensein eines Gases mit elektrisch geladenen Teilchen (Ionen). Dieses wird Plasma genannt. Da der Begriff bereits für den „Plasmahochtöner“ eingeführt wurde, wird er im Folgenden vermieden. Grundsätzlich können Ionen auf viele verschiedene Weisen erzeugt werden. Die Möglichkeiten reichen von radioaktiver Strahlung über chemische Verfahren bis zu elektrischen Verfahren. Die Nutzung verschiedener Ionisationsmethoden erscheint vielversprechend.

In dieser Arbeit wird eine hohe elektrische Feldstärke erzeugt indem an eine spitze Elektrode eine hohe Spannung angelegt wird. Die resultierende hohe Feldstärke in der Nähe der Spitze führt zu einer Ionisation der Luft (Feldionisation). Ebenso können Elektronen aus der Elektrode gelöst und im elektrischen Feld beschleunigt werden (Feldemission). Durch Stoßionisation entstehen dann weitere Ionen. Eine solche Elektrodenspitze mit einem Metallring als Gegenelektrode ist im linken Teil von Abbildung 1 dargestellt. Es kann an der Spitze zu einem Leuchten kommen, weshalb man auch von Koronaentladung spricht. Streamer bei zu hohen Feldstärken sind zu vermeiden, da durch einen Überschlag impulsartiger Schall entsteht (Erwärmung und Ausdehnung der Luft, siehe oben).

3. Elektrodenanordnungen

Um zu verhindern, dass die hohe Spannung zur Erzeugung des Ionenwinds selbst geschaltet werden muss, wird zunächst die Ionenerzeugung und Ionenauslenkung getrennt vorgesehen. Hinter der in Abbildung 1 dargestellten Spitze-Ring-Apparatur wird eine kondensatorähnliche Anordnung angebracht. Das Konzept sieht vor, dass einige Ionen aufgrund der Trägheit durch den Ring hindurchfliegen und die Kondensatoranordnung durchqueren. An diese Kondensatorplatten wird jetzt eine Wechselspannung angelegt. Diese soll die Ionen ablenken und dadurch senkrecht zur ursprünglichen Ionenwindrichtung eine Schallwelle erzeugen. Damit sich diese ausbreiten kann, werden die Platten als Gitter implementiert.

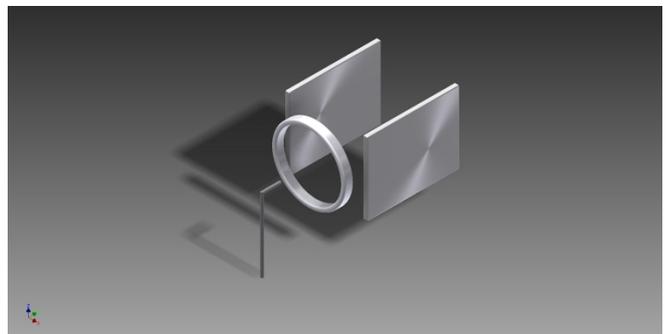


Abbildung 1: Elektrodenanordnung mit Spitze und Ring zur Ionenerzeugung und zwei Platten zur seitlichen Auslenkung (Modulation) des Ionenwinds.

Versuche an einem Prototyp ergaben, dass die Ionenanzahl hinter der runden Gegenelektrode sehr gering ist da die Ionen durch die Anordnung selbst „abgesaugt“ werden. Des Weiteren ist für eine deutliche Schwingung der restlichen Ionen ebenfalls eine hohe Spannung zwischen den beiden Platten von Nöten.

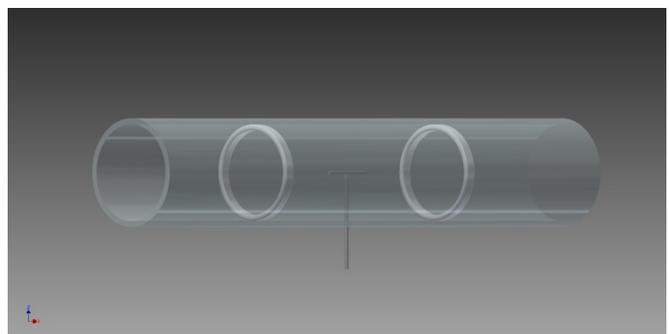


Abbildung 2: Elektrodenanordnung mit mittiger Doppelspitze und zwei Ringen zur Ionenerzeugung und gegenphasigen Auslenkung des Ionenwinds.

Ein alternatives Konzept sieht eine Elektrode mit einer Doppelspitze vor, an der Hochspannung anliegt, und zwei Gegenelektroden, welche abwechselnd auf Masse geschaltet werden. Um einem akustischen Kurzschluss vorzubeugen und die Abstrahlung der Anordnung zu verbessern wird diese Anordnung in einem Rohr platziert. Dieser Aufbau ist in Abbildung 2 dargestellt. Das binäre pulsweitenmodulierte Umschalten der Anordnung entspricht der Funktionsweise eines Digitalverstärkers und setzt hohe Schaltfrequenzen sowie einen Rekonstruktionsfilter (Tiefpass) hinter der Anordnung voraus. Das Konzept soll in diesem Artikel nicht weiter beschrieben werden.

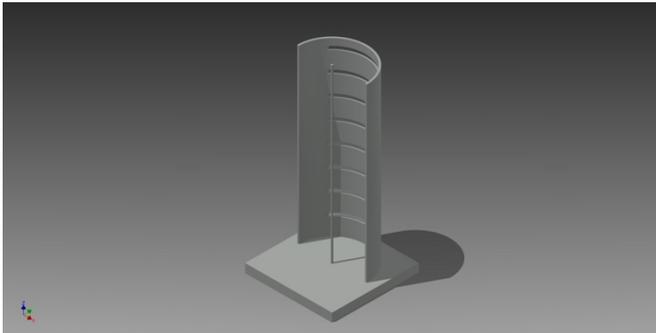


Abbildung 3: Elektrodenanordnung mit dünnem Draht und halbrunder Gegenelektrode.

Es wird eine weitere Anordnung untersucht, welche aus einer halbrunden Elektrode mit einem dünnen Kupferdraht in der Mitte besteht. Dies resultiert in einem deutlich homogeneren Feldverlauf verglichen mit den bisherigen spitzen Elektrodenanordnungen. Die Spannung kann dadurch erhöht werden ohne dass störende Teilentladungen entstehen. Ein Nachteil dieser Anordnung ist, dass in dem Bereich zwischen Anode und Kathode die Luft nur schwer strömen kann. Aus diesem Grund wurden Schlitze in das halbrunde Rohr gesägt. Dies sollte es der Luft ermöglichen besser durch das Kupferblech zu strömen und damit die akustische Abstrahlung verbessern.

4. Signalerzeugung

Als nächstes wird für die Anordnung ein Hochspannungssignal benötigt, welches durch einen 6 kV Transformator mit einer Einweggleichrichtung erzeugt wird und mit einer Röhre moduliert wird.

4.1. Hochspannungsteil

Für die Erzeugung des Hochspannungssignals wird, aufgrund der benötigten Spannungsfestigkeit, eine Röhre verwendet. Diese steuert, in Abhängigkeit ihrer Gitterspannung, den durch sie fließenden Strom. Die Röhre bestimmt somit den durch die Anordnung fließenden Strom. Mit einem Widerstand parallel zur Elektrodenanordnung kann so eine Hochspannung erzeugt werden.

Zunächst wird eine GP5 Ballast-Triode verbaut, die ursprünglich in Röhren-Farbfernsehern Verwendung fand. Dort hatte sie die Aufgabe die hohe Spannung der Bildröhre zu stabilisieren. Die von der Bildröhre nicht abgeführte Leistung floss über die Ballast-Triode. Die Anwendung zeigt jedoch, dass diese Triode nicht schnell genug schalten kann.

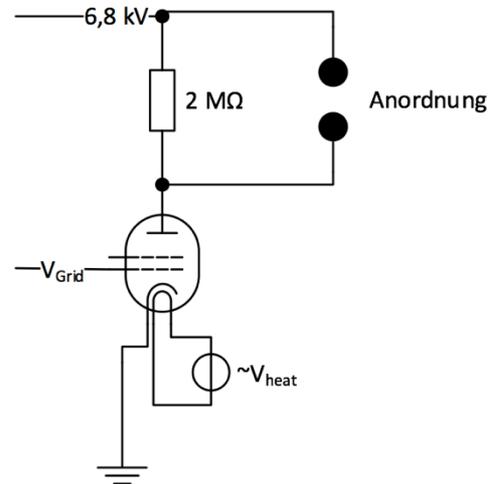


Abbildung 4: Schaltplan Hochspannungsteil.

Sie wird daher im weiteren Verlauf durch eine schnellere Röhre (6e15p-Tetrode) ersetzt.

Die Netzspannung ist zu Testzwecken mit einem Stelltrafo regelbar. Der Transformator kann so eine mittels Gleichrichtung erzeugte Gleichspannung von bis zu 9 kV erzeugen. Aufgrund eines in der Sättigung auftretenden Brummens, wird mit einer Spannung von 6,8 kV gearbeitet. Mit einem ausreichend großen Kondensator wird diese Spannung geglättet. Eine Messung mit dem Hochspannungstastkopf ergab eine Restwelligkeit von ca. 400 V, was bei 6,8 kV ein recht gutes Ergebnis ist.

Der Widerstand parallel zur Anordnung wurde für die maximal mögliche Spannung von 9 kV und einen maximalen Strom von 4,5 mA ausgelegt, sodass eine Nennbelastbarkeit von 40,5 W bei einem Widerstand von 2 MΩ resultiert.

Wichtig ist bei diesen Spannungen alle Geräte zu erden. Auch Geräte, deren Spannungen nicht mit der Hochspannung in Kontakt kommen, können durch fehlende Erdung auf ein so hohes Potential angehoben werden, dass es zu Überschlügen im Niederspannungsteil des Systems oder sogar innerhalb des Gerätes kommen kann. Dies ist besonders gefährlich, da der Nutzer hier nicht mit so hohen Spannungen rechnet.

Die Verwendung einer Röhre für die Modulation der Hochspannung erfordert eine weitere Beschaltung. Die 6e15p benötigt zwei

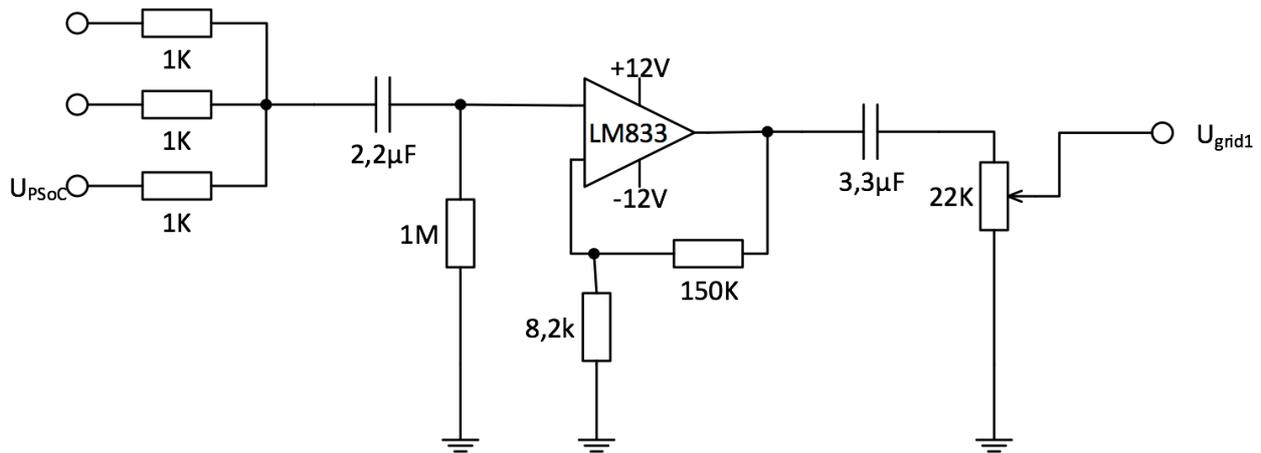


Abbildung 5: Schaltplan Niederspannungsteil.

Gitterspannungen, eine positive Schirmgitterspannung und eine vollständig negative Spannung am Signalgitter sowie eine Heizspannung von 6,3 V AC. Diese Spannungen und Signale werden im Niederspannungsteil erzeugt.

Als Signalquelle wird ein PSoC verwendet. Dieser verfügt über einen IDAC, also einen Digital-Analog-Wandler, der einen Strom von maximal 612 μA Quantisiert durch 8 Bit liefert. Das entspricht einer Auflösung von 2,4 $\mu\text{A}/\text{Bit}$. Dieser wird über einen Referenzwiderstand von 6,8 k Ω geleitet, um eine Auflösung von 16,3 mV/Bit zu erreichen. Die maximale Spannung beträgt dann 4,16 V, was ausreichend weit unter der maximal möglichen Spannung von 5 V ist. Diese darf selbstverständlich nicht belastet werden, da jeder entnommene Strom die Spannung ändern würde. Die Impedanz wird durch einen OPV gewandelt. Es wird mit einer Tabelle in der Software eine Sinusspannung generiert. Für Tests ist es sinnvoll einen Frequenzsweep zu nutzen, da dieser sich signifikant von den bisher noch ungedämpften Störgeräuschen der Spulen und Laborgeräte unterscheidet.

Das so erzeugte Spannungssignal muss, um die Röhre des Hochspannungsteils schalten zu können, noch verstärkt werden. Der verwendete Audioverstärker kann bis maximal +12 V/-12 V verstärken (Abbildung 5 Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.). Die Signalgitterspannung für die Röhre muss negativ sein, weshalb ein einstellbarer negativer Offset für die Wahl des Arbeitspunktes benötigt wird. Dafür wurde ein DC-DC Wandler verwendet, um die positive Versorgungsspannung von 12 V galvanisch zu trennen und eine Verwendung als negative Versorgungsspannung und Offset zu ermöglichen. Für die Wahl des optimalen

Arbeitspunktes wird die Kennlinie der Röhre gemessen (Abbildung 6). Das Signal wird so eingestellt, dass die obere Spannungsspitze bei -1,5 V liegt, die untere wird auf -5,5 V eingestellt. Damit liegt der Arbeitspunkt bei -3,5 V.

Die Einspeisung des Signals kann neben dem PSoC auch über ein herkömmliches Stereosignal erfolgen. Die beiden Kanäle werden hier überlagert und das Monosignal weiterverarbeitet. Dies erleichtert das Messen und ermöglicht außerdem komfortabel das Einspeisen von Musik.

5. Ergebnisse

Die Anordnung strahlt einen hörbaren Ton ab. Allerdings ist der Schalldruckpegel des abgestrahlten Signals sehr gering ist. Eine erste Messung des Frequenzganges des Systems liefert einen maximalen SNR von 30 dB bei 7 kHz (Abbildung 7).

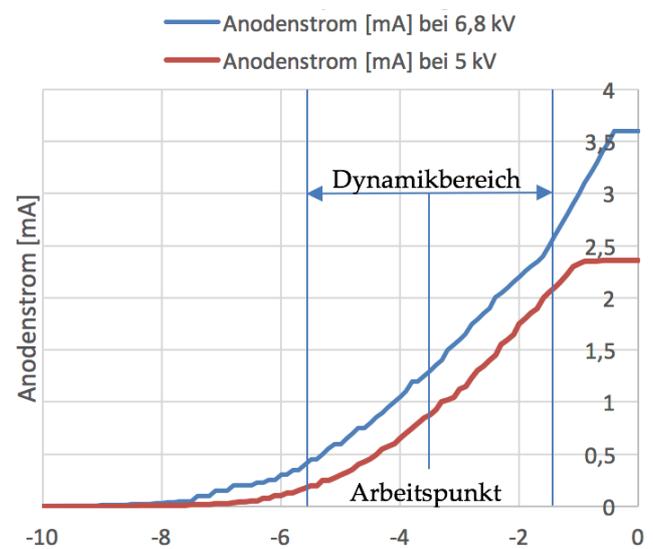


Abbildung 6: Kennlinie der Röhre: Anodenstrom in Abhängigkeit der Gitterspannung.

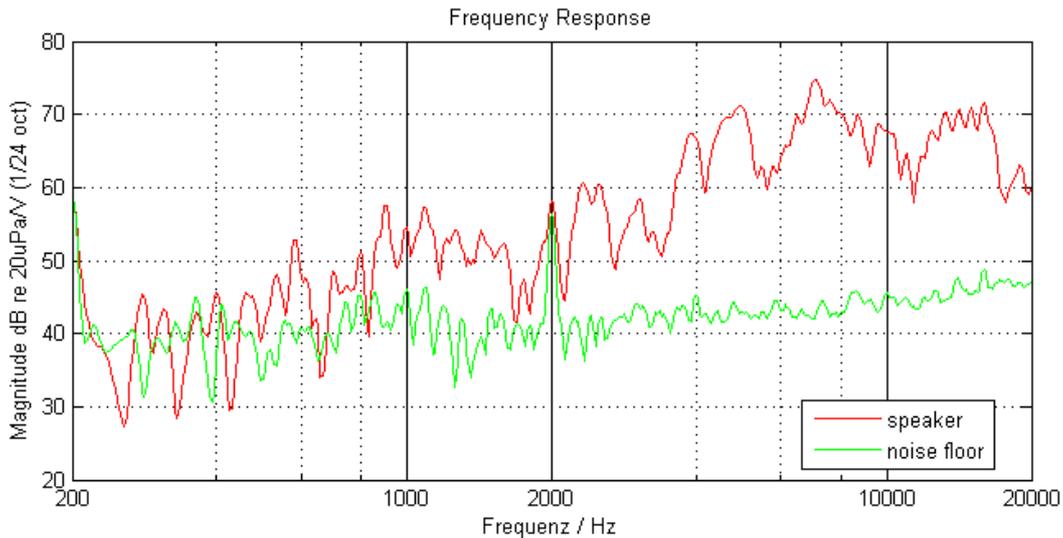


Abbildung 7: Frequenzgang für die Elektrodenanordnung aus Abbildung 3. Ein hörbares aber sehr leises Signal wird breitbandig oberhalb von 2 kHz erzeugt.

Die Ursache dafür ist, dass der Leistungswiderstand parallel zur Anordnung den Strom durch die Röhre auf 3,6 mA begrenzt. Dadurch wird die Röhre in die Sättigung gezwungen. Das senkt den maximalen Aussteuerungsbereich deutlich auf 4 V Spitze-Spitze. Optimal wäre ein maximaler Strom von 10 mA durch die Röhre, um diese voll auszusteuern. Mit etwas Sicherheitsspielraum bedeutet dies einen Strom von 9 mA durch den Widerstand. Der Leistungswiderstand ist also bei einer Spannung von 6,8 kV durch einen 750 kΩ Widerstand mit 62 W zu ersetzen. Wichtig ist hier, dass auch die Spannungsfestigkeit gegeben sein muss. Um flexibler die Auswirkungen des Widerstandes auf die Anordnung untersuchen zu können sollte ein Widerstand für Spannungen bis 10 kV mit 1,1 MΩ und 91 W gebaut werden. Damit wäre es möglich die Anordnung mit verschiedenen Widerstandswerten und Spannungen zu testen. Um die Röhre mit dem neuen Widerstand voll aussteuern zu können muss auch der Vorverstärker angepasst werden. Abschließend lässt sich sagen, dass der aktuelle Aufbau einen geringen Wirkungsgrad hat.

6. Ausblick

Für eine Verbesserung des Ionenwindlautsprechers ist der wichtigste Schritt eine Erhöhung des Schalldruckpegels. Dazu sollte der Arbeitsbereich angepasst werden. Um den Dynamikbereich der Röhre zu vergrößern muss der Leistungswiderstand parallel zu Abstrahlungsanordnung wesentlich verkleinert werden. Durch den resultierenden höheren Strom durch die Röhre, geht diese nicht in die Sättigung und kann bis zu einer Gitterspannung nahe 0 V genutzt werden. Dies würde im Idealfall

eine Erhöhung des Dynamikbereiches um 1,5 V Spitze-Spitze bedeuten und damit eine Vergrößerung um bis zu 37,5 %.

Der Einfluss der Elektrodenanordnung auf das Abstrahlverhalten ist ein offener Punkt mit vielen Freiheitsgraden. Eine Option ist die Anordnung mehrerer Elektroden nebeneinander. Ein weiterer interessanter Ansatz ist die getrennte Abstrahlung beider Halbwellen durch zwei gegenüberstehende Anordnungen. Dazu muss das verstärkte Audiosignal in zwei Halbwellen getrennt werden, die jeweils eine Röhre schalten.

7. Fazit

Das Erzeugen von Schall mit Hilfe von Ionenwind ist ein sehr interessantes Konzept. Die geringe Masseträgheit und das Vermeiden von Membranresonanzen stellen wünschenswerte Eigenschaften dar. Auf Grund der hohen Spannungen und der sehr geringen Effizienz ist das Verfahren nach bisherigen Untersuchungen für den Lautsprecherbau zurzeit nicht relevant. Der Aufbau ist durch die hohen Spannungen vergleichsweise gefährlich. Es besteht jedoch großes Optimierungspotential. Die Verwendung von alternativen Methoden zur Erzeugung von Ionen bei gleichzeitiger Neutralisation der Ladungsträger nach der Auslenkungseinheit könnte größere Fortschritte bringen.

8. Danksagung

Herzlichen Dank an Jun.-Prof. Dr.-Ing. Peter Birkholz für spannende und kreative Gespräche aus denen der Ansatz entstand das Lifter-Konzept auf Schallwandler zu übertragen.

9. Literatur

- [1] „Some Experiments on the Direct-Current Arc“, Nature, Vol. 63, No. 1625, 1900
- [2] “Music in Electric Arcs - An English Physicist, with Shunt Circuit and Keyboard, Made Them Play Tunes“, New York Times, April 28, 1901
- [3] Air Speaker Webseite, <http://airspeaker.co.uk> (Zugriff: 31.08.2016)
- [4] Plasmaweeter Webseite, <http://www.plasmaweeter.de> (Zugriff: 31.08.2016)
- [5] „The STL Ionophone sound source, STL-QPSR, Vol. 6, No. 2, 1965
- [6] Acapella Webseite, “ION TW 1S” http://www.acapella.de/de/hornlautsprecher/ionic_tweeter.php (Zugriff: 31.08.2016)
- [7] Lansch Audio Webseite, “Corona Plasmahochtöner” <http://www.lansch-audio.com/deutsch/lautsprecher/corona/> (Zugriff: 31.08.2016)
- [8] “Plasmahochtöner”, Wikipedia, <http://de.wikipedia.org/wiki/Plasmahochtöner> (Zugriff: 31.08.2016)
- [9] “Lifter (Fluggerät)”, Wikipedia, <http://de.wikipedia.org/wiki/Lifter> (Zugriff: 31.08.2016)
- [10] Leitenberger, B. “Elektrische Antriebe in der Raumfahrt” <http://www.bernd-leitenberger.de/elektrische-antriebe.shtml> (Zugriff: 31.08.2016)
- [11] Tombs, D. “Corona Wind Loud-speaker”, Nature, Vol. 176, No. 4489, 1955
- [12] Tombs, D., Chatterton, E.J., Galpin, K. “Applications of Corona Effects” Electronics, Vol. 30, 1957
- [13] Shirley, G. “The Corona Wind Loudspeaker”, Journal of the Audio Engineering Society, Vol. 5, No. 1, 1957
- [14] “The Ionic Man”, Stereophile, 1980, Vol. 6, No.1
- [15] Bondar, H. „Ionic electro-acoustic transducer“, European Patent, EP 0065911, 1982
- [16] Fourriere, J.-C. „Electroacoustic Transducer“, European Patent, EP 0370846, 1990
- [17] “Ion wind loudspeaker experiments” <https://hackaday.io/project/7875-ion-wind-loudspeaker-experiments> (Zugriff: 01.03.2016)
- [18] “Electrified-Fluid-Mechanics” <http://tmms.co.jp/EFD/> (Zugriff: 01.09.2016)