

## Der Plasma-Lautsprecher als Lehrversuch

– Physikalische Grundlagen, Experimente und didaktischer Einsatz –

**Florian Hubert\*, Philipp Dorsch\*, Patrick K. Kroh\*, Hans-Michael Günther\*,  
Stefan J. Rupitsch<sup>+</sup>**

\*Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, 91052 Erlangen, Deutschland  
<sup>+</sup>Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Mikrosystemtechnik, Professur für Elektrische Messtechnik  
 und Eingebettete Systeme, 79110 Freiburg, Deutschland  
 florian.hubert@fau.de

(Eingegangen: 05.06.2020; Angenommen: 08.06.2021)

### Kurzfassung

In Lehrveranstaltungen lassen sich physikalische Effekte und deren zugrunde liegende Theorie anschaulich anhand von Experimenten verdeutlichen. Besonderes Interesse wird hierbei durch optische, akustische und olfaktorische Sinneswahrnehmungen und vor allem durch die Kombination dieser Reize geweckt. Plasma-Lautsprecher stellen vor diesem Hintergrund ein hervorragendes Anschauungsobjekt für die Physikdidaktik im Fachgebiet „Akustik“ mit hohem motivierendem Potenzial dar.

Im Rahmen dieses Beitrags wird ein einfaches, verständliches und kostengünstiges Schaltungskonzept für einen Plasma-Lautsprecher vorgestellt und der zugrunde liegende Schallentstehungsmechanismus anschaulich erläutert. Anhand der vorgestellten Experimente können die Lernenden die akustischen Eigenschaften des Lautsprechers qualitativ und quantitativ untersuchen. Abschließend wird ein didaktisches Konzept für den Versuch gegeben. Der didaktische Schwerpunkt des Versuchs kann nach Vorwissen der Lernenden an die Zielgruppe angepasst werden.

### Abstract

In lectures, physical effects and their underlying theory can be clearly illustrated by performing experiments. Special interest is aroused by optical, acoustic and olfactory sense perceptions and especially by the combination of these stimuli. Therefore, plasma speakers represent an excellent object of study for physics teaching in the subject "acoustics" with a highly motivating potential.

In this paper, a simple, understandable as well as affordable electric circuit concept for a plasma speaker is presented and the underlying sound generation mechanism is clearly explained. With the proposed experiments, learners can qualitatively and quantitatively examine the acoustic properties of the loudspeaker. Finally, a didactic concept for the experiment is given. The didactic focus of the experiment can be adapted to the target group, based on the learners' prior knowledge.

### 1. Einleitung

Das Gehör ist der differenzierteste Sinn des menschlichen Wahrnehmungsvermögens [1]. Daher erwecken gerade akustische Phänomene erhöhte Aufmerksamkeit in unserem täglichen Leben. Vor diesem Hintergrund ist es leicht ersichtlich, weshalb seit jeher „sprechende Flammen“ die Menschheit faszinieren. Das wohl erste überlieferte Mysterium dieser Art ist der sprechende Dornbusch in der Bibel im zweiten Buch Moses:

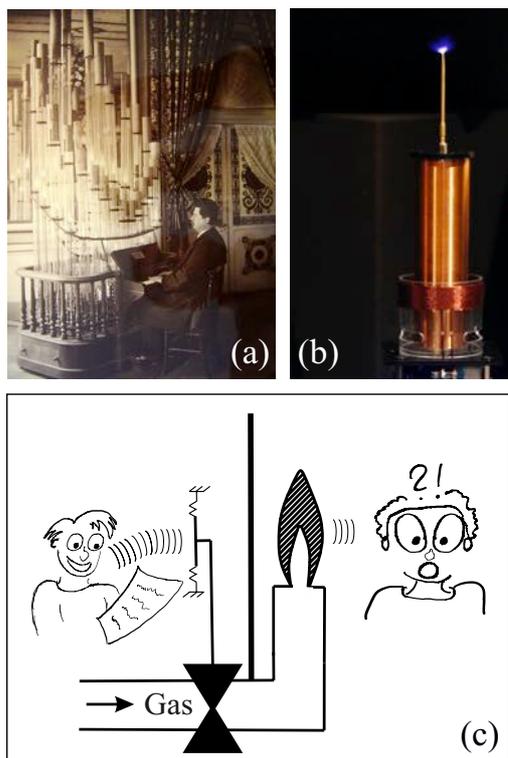
*„Und der Engel des Herrn erschien Ihm in einer feurigen Flamme aus dem Dornbusch. Und er sah, dass der Busch im Feuer brannte und doch nicht verzehrt wurde. [...] Als aber der Herr sah, dass er hinging, um zu sehen, rief Gott ihn aus dem Busch und sprach.“*  
 (Ex 3, 2-5, [2])

Ende des 19. Jahrhunderts konstruierte der Physiker Frédéric Kastner das Pyrophon, ein orgelartiges Instrument, indem er gläserne Röhren mittels Wasserstoffflammen zum Schwingen anregte (Abb. 1a) [3].

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden thermo-akustische Wandler einer breiten Öffentlichkeit bekannt. Auf Jahrmärkten wurde z.B. eine „magische Gasflamme“ (Abb. 1c) eingesetzt, die Antworten auf Fragen der erstaunten Besucher gab. Für die Zuschauer verdeckt sprach eine Person auf eine Membran, die über ein Ventil die Intensität der Gasflamme variierte und somit Hörschall erzeugte [4].

Zu dieser Zeit entwickelte Nikola Tesla den nach ihm benannten Transformator, den er vor allem als Anschauungsobjekt einsetzte. Tesla-Transformatoren sind in der Physikdidaktik Teil vieler beliebter

Schauexperiment; sie werden als anschauliches Beispiel für gekoppelte Schwingkreise, Energieübertragung und Plasmaentladungen eingesetzt [5].



**Abb. 1:** Historischer Überblick der thermoakustischen Schallerzeugung: (a) Pyrophon<sup>1</sup>, (b) Plasma-Lautsprecher, (c) sprechende Gasflamme

Mitte des vergangenen Jahrhunderts entwickelte Siegfried Klein das Prinzip des Tesla-Transformators weiter und ergänzte es um die thermoakustische Wandlung [6]. Derartige Wandler werden als Plasma-Lautsprecher bezeichnet.

Die meisten Plasma-Lautsprecher-Konzepte (Abb. 1b) erzeugen Hochspannung mittels zweier gekoppelter elektrischer Schwingkreise mit gleicher Resonanzfrequenz. Dadurch entsteht ein Lichtbogen zwischen einer Elektrode und dem entfernten Erdpotential. Durch ein geeignetes Schaltungskonzept wird die Amplitude der erregenden elektrischen Spannung moduliert: So kann die lokale Lufterwärmung um das Plasma herum gesteuert werden. Die resultierenden lokalen Schalldruckschwankungen breiten sich in Wellenform in der Umgebung aus und können als Hörschall wahrgenommen werden. Dieses Wandlungsprinzip hat das Potenzial, einen Lautsprecher mit breitem Frequenzgang zu realisieren, da die schwingende Masse des Systems minimal ist und somit theoretisch ein hochdynamisches Systemverhalten erzielt werden kann. Dies bedingt eine hohe Eigenresonanzfrequenz des Lautsprechers, weshalb

Plasma-Lautsprecher als Hochtöner eingesetzt werden. Im Englischen wird daher oft der Begriff „Plasma Tweeter“ verwendet.

Plasma-Lautsprecher ziehen seit ihrer Erfindung das Publikum in ihren Bann. Sie erzeugen, ebenso wie Tesla-Transformatoren, vielfältige Sinneseindrücke, wie z. B. Lichtbögen, Koronaentladungen, olfaktorische Eindrücke (Entstehung von Ozon und Stickstoffdioxiden) etc., und ergänzen sie um die Erzeugung von hörbarem Schall. Nicht nur aus diesen Gründen eignen sich Plasma-Lautsprecher besonders als Demonstratoren für die Physikdidaktik. Insbesondere zeichnet sich der vorgestellte Demonstrator durch folgende Punkte aus:

- Einfacher und schnell vorzubereitender Versuchsaufbau;
- leichte Integrierbarkeit in vorhandene Lehrkonzepte durch variable Versuchsdauer;
- anpassbarer interdisziplinärer Lehrinhalt, z. B. Akustik, Schaltungstechnik, gekoppelte Schwingkreise, Geschichte der Elektrotechnik, und vieles mehr;
- besonderer Anreiz durch:
  - die gleichzeitige Stimulierung verschiedener Sinne und
  - die Möglichkeit der Verwendung von bekannten Musikstücken.

Sucht man in geläufigen Videoportalen nach den Begriffen „Tesla Speaker“, „Plasma Speaker“ oder „Plasma Tweeter“, findet man eine Vielzahl millionenfach betrachteter Beiträge. Leider beschränken sich die meisten Artikel und Videos auf spektakuläre und unterhaltsame Experimente, bieten jedoch keine (oder nur unzureichende) Erklärungen der thermoakustischen Wandlung und des schaltungstechnischen Hintergrunds.

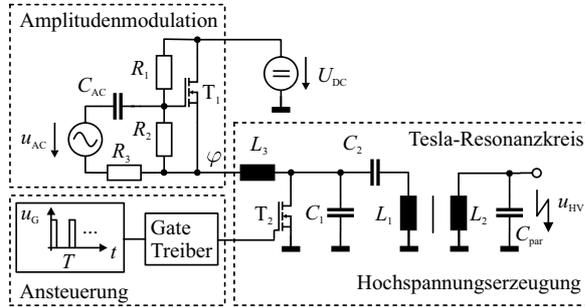
Die aufgezählten Anreize werden in didaktischer Fachliteratur [7-9] unter dem Begriff „Neugiermotivation“ subsumiert und als essenzieller Bestandteil physikalischer Versuche erkannt. Herausforderung für den Lehrenden ist es daher, diese motivierenden Eigenschaften einzusetzen und didaktisch wertvoll aufzubereiten.

Im vorliegenden Beitrag soll ein einfacher Plasma-Lautsprecher-Demonstrator für die Lehre vorgestellt werden. Es werden zunächst die Funktionsprinzipien von elektrischer Schaltung und elektro-akustischer Wandlung erläutert. Anschließend werden die akustischen Eigenschaften des Plasma-Lautsprechers anhand anschaulicher Versuche charakterisiert. Abschließend wird ein didaktisches Konzept für verschiedene Zielgruppen gegeben.

<sup>1</sup> Bildnachweis: Thomas Goller, Wikimedia Commons, lizenziert unter CreativeCommons-Lizenz BY-SA 2.5, ULR: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1121091>

## 2. Elektrische Funktionsweise

Das Funktionsprinzip der elektroakustischen Wandlung des Plasma-Lautsprechers soll anhand des vereinfachten Prinzipschaltbildes in Abb. 2 erläutert werden.



**Abb. 2:** Vereinfachtes Prinzipschaltbild des Plasma-Lautsprecher-Demonstrators

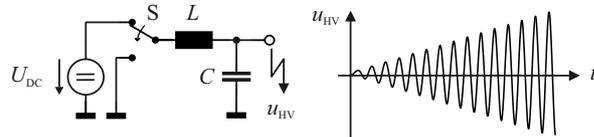
Die Schaltung lässt sich in drei Funktionsblöcke abstrahieren: (i) Hochspannungserzeugung, (ii) Amplitudenmodulation und (iii) Ansteuerung. Im Folgenden werden diese separat analysiert.

### 2.1. Hochspannungserzeugung

Das zugrunde liegende Prinzip der Hochspannungserzeugung basiert auf der harmonischen Anregung eines elektrischen Schwingkreises (siehe Abb. 3) [10, 11]. Gemeinsam mit dem Kondensator  $C$  bildet die Spule  $L$  einen LC-Serienschwingkreis mit der Resonanzfrequenz

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad \{1\}$$

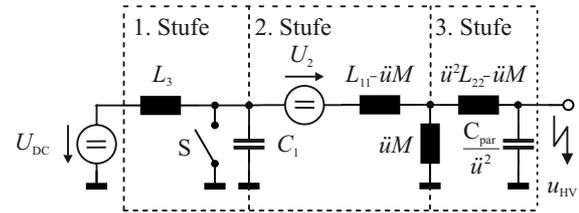
Wird der Schalter  $S$  mit einer Schaltfrequenz  $f_s$  angesteuert, die der Resonanzfrequenz  $f_r$  des Schwingkreises entspricht, so wird dem Schwingkreis periodisch Energie aus der Spannungsquelle  $U_{DC}$  zugeführt. Die Einhüllende der Amplitude der Ausgangsspannung  $u_{HV}$  steigt kontinuierlich an (siehe Abb. 3). Aufgrund der in der Realität vorhandenen ohmschen Verluste im Schwingkreis kann jedoch keine hinreichend hohe Ausgangsspannung erzeugt werden, um eine Plasmaflamme zu zünden.



**Abb. 3:** Harmonisch angeregter LC-Schwingkreis. Wird dieser mit einer Frequenz  $f_s = f_r$  angeregt, steigt die Einhüllende seiner Ausgangsspannung  $u_{HV}$  kontinuierlich an.

Zur Beseitigung dieses Nachteils wird ein sogenannter Tesla-Resonanzkreis verwendet (siehe Abb. 2). Dieser entsteht durch die Erweiterung des harmo-

nisch angeregten LC-Schwingkreises um ein gekoppeltes Spulenpaar ( $L_1, L_2$ ) sowie um die Kapazitäten  $C_2$  und  $C_{par}$ . Die Kapazität  $C_{par}$  entspricht dabei in der Regel der verteilten Kapazität der Sekundärwicklung zum entfernten Masse-Potenzial.



**Abb. 4:** Vereinfachter Tesla-Resonanzkreis des Plasma-Lautsprechers unter der Annahme  $C_1, C_{par} \ll C_2$

Um den Resonanzkreis zu vereinfachen, nehmen wir zunächst an, dass die Kapazität von  $C_2$  in Abb. 2 als ideale Gleichspannungsquelle ( $U_2$ ) approximiert werden kann. Dies ist zulässig, da die Kapazität  $C_2$  deutlich größer ist als die der Kondensatoren  $C_1$  und  $C_{par}$ . Der MOSFET  $T_2$  wird durch einen idealen Schalter  $S$  ersetzt [12]. Das gekoppelte Spulenpaar ( $L_1, L_2$ ) wird durch das T-Ersatzschaltbild eines streubehafteten Übertragers mit den Hauptinduktivitäten  $L_{11}$  und  $L_{22}$ , der Gegeninduktivität  $M$  und dem Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  dargestellt [10]. Die Kapazität  $C_{par}$  wurde bereits auf die Primärseite umgerechnet. So ergibt sich das vereinfachte Ersatzschaltbild des Tesla-Resonanzkreises in Abb. 4.

Wir erkennen nun, dass ein gekoppelter Schwingkreis [13] entstanden ist, der aus drei Stufen besteht (Tab. 1). Damit ein optimaler Energieaustausch zwischen den Schwingkreisen stattfinden kann, müssen die Resonanzfrequenzen der einzelnen Stufen so gewählt werden, dass

$$f_s = f_1 = f_2 = f_3 \quad \{2\}$$

gilt. Hierdurch kann die elektrische Energie zwischen den Resonanzkreisen periodisch hin und her pendeln.

	Frequenzbestimmende Bauelemente		
	Kapazitiv	Induktiv	Resonanzfrequenz <sup>2</sup>
1. Stufe	$C_1$	$L_3$	$f_1 \approx 1/2\pi\sqrt{L_3 C_1}$
2. Stufe	$C_1$	$L_{11}, M$	$f_2 \approx 1/2\pi\sqrt{(L_{11} - M)C_1}$
3. Stufe	$C_{par}$	$L_{22}, M$	$f_3 \approx 1/2\pi\sqrt{(L_{22} + M)C_{par}}$

**Tab. 1:** Übersicht der Schwingkreise des Tesla-Resonanzkreises in Abb. 4

Um die Bedingung aus Gleichung {2} zu erfüllen, empfiehlt es sich, die Gegeninduktivität  $M$  möglichst gering zu wählen. Das heißt, der Koppelfaktor  $k$  ist gemäß

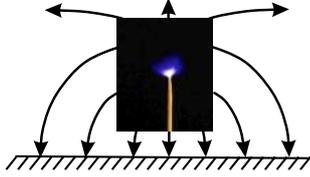
$$M = k\sqrt{L_{11}L_{22}} \quad \{3\}$$

möglichst nahe an null zu wählen. Da jedoch  $k = 0$  mit zwei separaten, elektrisch nicht verbundenen Schwingkreisen gleichzusetzen wäre, ist dies nicht

<sup>2</sup> Gilt nur, falls die Induktivitäten bzw. Kapazitäten in der gleichen Größenordnung liegen, d. h.  $L_{11} \approx L_{22} \approx L_3, C_1 \approx C_{par}$ . Die Re-

sonanzfrequenzen können mit diesen stark vereinfachenden Annahmen direkt aus den Differentialgleichungen von gekoppelten Induktivitäten abgeleitet werden.

umsetzbar; es könnte keine Energie zwischen den Schwingkreisen übertragen werden. Um einen Kompromiss zwischen Energieübertragung und Gleichung {2} zu finden, wählt man in der Praxis den Koppelfaktor in einem Bereich zwischen 0,02 und 0,2 und toleriert somit eine gewisse Frequenzabweichung.



**Abb. 5:** Visualisierung des elektrischen Feldes der parasitären Kapazität  $C_{\text{par}}$

Kommen wir nun zum ursprünglichen Ziel zurück, eine möglichst hohe Ausgangsspannung  $u_{\text{HV}}$  zu erzeugen, die ausreicht, um eine Plasmaflamme zu zünden. Wie bereits in der einfachen Schaltung aus Abb. 3 erkennbar, erreichen wir mit dem Tesla-Resonanzkreis eine Resonanzüberhöhung. Jedoch haben wir zwei zusätzliche Freiheitsgrade hinzugewonnen. Durch die Erweiterung der Schaltung um einen Übertrager können wir durch sein Übersetzungsverhältnis die Ausgangsspannung weiter erhöhen. Dies ist aber lediglich ein positiver Nebeneffekt. Betrachten wir hierzu zunächst kurz den Einfluss der Kapazität  $C_{\text{par}}$  auf die Ausgangsspannung. Gleichung {4} beschreibt allgemein den Zusammenhang zwischen gespeicherter elektrischer Energie  $W_{\text{el}}(C)$  in einem Kondensator und seiner elektrischen Spannung  $u$ :

$$W_{\text{el}}(C) = \frac{1}{2} \cdot C \cdot u^2. \quad \{4\}$$

Wir erkennen, dass bei einer gegebenen Energie, die größtmögliche Spannung im Falle eines infinitesimal kleinen  $C$  anliegt. Wählen wir in unserem Tesla-Resonanzkreis beispielsweise  $C_1 \gg C_{\text{par}}$ , so wird zwar in beiden Kondensatoren aufgrund der gekoppelten Schwingkreise die gleiche Energie gespeichert, gemäß Gleichung {4} muss jedoch eine höhere Spannung an  $C_{\text{par}}$  anliegen. Durch dieses Prinzip kann die Ausgangsspannung  $u_{\text{HV}}$  in entscheidendem Maße hochgesetzt werden. Damit  $C_{\text{par}}$  möglichst klein gehalten wird, nutzen wir die ohnehin vorhandene parasitäre Kapazität der Sekundärspule zum weit entfernten Masse-Potenzial (siehe Abb. 5). Selbstredend müssen bei der Auslegung der Sekundärspule die Bedingungen aus Tabelle 1 sowie Gleichung {3} berücksichtigt werden.

Dank der Kombination aller vorgestellten Effekte erreicht die elektrische Ausgangsspannung des Tesla-Resonanzkreises Werte, die ausreichen, um die Umgebungsluft zu ionisieren und eine Plasmaflamme zu zünden. (Das notwendige elektrische Feld für Feldionisation beträgt ca.  $100 \text{ kVmm}^{-1}$ .)

## 2.2. Ansteuerung

Die Ansteuerung des Transistors  $T_2$  im Tesla-Resonanzkreis erfolgt durch ein sich periodisch wiederholendes Rechtecksignal (Abb. 2,  $T = 1/f_s$ ). Dieses wird durch eine Timer-Schaltung erzeugt (z. B. TLC555) [14]. Da die Ausgangsspannung der Timer-Schaltung in der Regel nicht ausreicht, um  $T_2$  komplett durchzuschalten und damit einen niedrigen Drain-Source-Widerstand zu gewährleisten, wird zusätzlich ein Gate-Treiber (z. B. UCC27322) mit in die Schaltung eingebracht. Durch die hohe Resonanzfrequenz des Tesla-Resonanzkreises und der damit verbundenen Schaltfrequenz  $f_s$  entstehen hohe Schaltverluste in  $T_2$ . Dieser Transistor ist daher ausreichend zu kühlen [12]. Die Schalt- bzw. Resonanzfrequenz der Schaltung ergibt sich gemäß Gleichung {2}, Tab. 1 und der Bauteilwerte in Abb. 12 zu

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_3 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{15 \mu\text{H} \cdot 470 \text{ pF}}} \approx 2 \text{ MHz}. \quad \{5\}$$

## 2.3. Amplitudenmodulation

Zur Erzeugung eines hörbaren Schallereignisses durch die Plasmaflamme muss ein Audiosignal auf die Ausgangsspannung des Tesla-Resonanzkreises aufmoduliert werden (siehe Abb. 2). Hierzu ist der Transistor  $T_1$  in Drain-Schaltung verschaltet [14] und kann das Potenzial  $\phi$  im Tesla-Resonanzkreis in Abhängigkeit von der Signalspannung  $u_{\text{AC}}$  variieren. Die Betriebsspannung (und damit auch die Ausgangsspannung  $u_{\text{HV}}$ ) des Tesla-Resonanzkreises wird somit amplitudenmoduliert. Dank des Kondensators  $C_{\text{AC}}$  kann nur der Wechselanteil des Signals in die Schaltung gelangen. Durch die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  wird der Arbeitspunkt von  $T_1$  eingestellt. Dieser befindet sich im ohmschen Bereich des Ausgangskennlinienfelds des MOSFETs. Bei der Auslegung der Schaltung ist daher für eine hinreichende Wärmeabfuhr von  $T_1$  zu sorgen, da dieser die Differenz zwischen der Betriebsspannung  $U_{\text{DC}}$  und  $\phi$  in Form von thermischer Energie in seinem Drain-Source-Widerstand dissipiert.

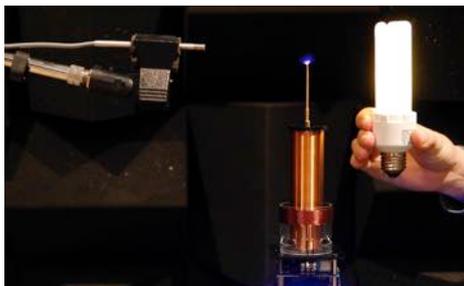
## 3. Schallentstehungsmechanismus

Der Schallentstehungsmechanismus in einem Plasma-Lautsprecher basiert auf dem thermoakustischen Wandlungsprinzip [15]. Um diesen Sachverhalt näher verstehen zu können, betrachten wir zunächst eine fiktive Grenzschicht zwischen der Plasmaflamme und der umgebenden Luft. Bevor ein akustisches Signal aufmoduliert wird, befindet sich das System im thermodynamischen Gleichgewicht. Steigt nun die Ausgangsspannung  $u_{\text{HV}}$  des Tesla-Resonanzkreises aufgrund des Eingangssignals  $u_{\text{AC}}$  an, wird sich die Plasmaflamme kurzzeitig erwärmen; die Beweglichkeit der Atome im Plasma nimmt zu. Die Ionen des Plasmas stoßen mit den Molekülen der umgebenden Luft zusammen und übertragen einen Teil ihres Impulses. Der Druck in der Umgebung der Plasmaflamme nimmt folglich zu. Wird kein elektrisches Signal mehr aufmoduliert, kühlt die Plasmaflamme

wieder etwas ab und das System kehrt in seinen ursprünglichen Zustand zurück. Das Verhalten wird auch anhand des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik deutlich. Dieser besagt, dass die Energie in einem abgeschlossenen System konstant sein muss, d. h. die Änderung der inneren Energie  $\Delta U$  muss gleich der Summe der zugeführten Wärme  $\Delta Q$  und der Volumen-Kompressionsarbeit  $\Delta W$  sein:

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W. \quad \{6\}$$

Machen wir uns die Gleichung anhand eines bekannten Beispiels, des elektrodynamischen Lautsprechers [1], deutlich: Seine Membran schwingt und verrichtet dabei Volumen-Kompressionsarbeit. Wärme wird jedoch nicht erzeugt ( $\Delta Q = 0$ ). Ein Plasma-Lautsprecher hat hingegen keine beweglichen Teile ( $\Delta W = 0$ ); er erzeugt lediglich Wärmeenergie und tauscht diese mit der Umgebung aus. Die dadurch hervorgerufene Änderung der inneren Energie des umgebenden Gases bewirkt eine lokale Änderung des Schalldrucks. Es lässt sich zeigen, dass der erzeugte Schalldruck direkt proportional zur zugeführten elektrischen Energie ist.



**Abb. 6:** Plasma-Lautsprecher im reflexionsarmen Akustikraum. Bringt man eine Kompaktleuchtstofflampe in die Nähe der Plasmaflamme, kann diese zum Leuchten gebracht werden.

Detaillierte theoretische Betrachtungen zum Schallerzeugungsmechanismus sowie zur Schallabstrahlung von thermoakustischen Wandlern würden den Rahmen des vorliegenden Beitrags sprengen, sind aber zu finden in [16].

#### 4. Praktische Implementierung und Experimente mit dem Plasma-Lautsprecher

Abbildung 6 zeigt ein Foto des gemäß Abb. 2 aufgebauten Plasma-Lautsprechers. Deutlich zu erkennen ist die charakteristische Plasmaentladung an der Spitze der Sekundärwicklung. Die enormen Ausmaße der elektrischen Feldstärke in der Nähe der Spitze lassen sich anschaulich mit einer handelsüblichen Kompaktleuchtstofflampe oder einer Glühlampe visualisieren. Bringt man diese in die Nähe der Spitze der Sekundärwicklung, wird das in der Lampe enthaltene Gas durch das hochfrequente Feld zum Leuchten angeregt. Je näher man der Plasmaentladung kommt,

desto stärker nimmt das Leuchten zu. Da durch die Lampe dem Feld jedoch elektrische Energie entzogen wird, reduziert sich die Lautstärke des Plasma-Lautsprechers. Eine Videoaufzeichnung des Versuchs ist auf der Internetpräsenz von PhyDid A zu finden<sup>3</sup>. Der Versuch zeigt, dass Plasma-Lautsprecher sehr starke elektromagnetische Störfelder emittieren. Diese beeinflussen andere elektrische Geräte (z. B. Mobiltelefone, Radiogeräte, etc.) in ihrer Funktion. Während des Betriebs verletzt der Demonstrator Grenzwerte bezüglich Störfeldemissionen [17]. Daher sollte der Versuch nur sehr kurz und im Laborumfeld betrieben werden.

Ein selbstständiger Aufbau des vorgestellten Plasma-Lautsprechers durch die Lernenden im Rahmen eines Praktikums ist zwar aufgrund des vorgestellten einfachen Schaltungskonzepts möglich, jedoch aus Zeitgründen nur bedingt zu empfehlen. Die Auslegung und Fertigung des gekoppelten Spulenpaars im Tesla-Resonanzkreis ist zeitaufwändig und erfordert eine adäquat ausgestattete Werkstatt. Zudem sind heutzutage Bausätze für Plasma-Lautsprecher, die auf dem vorgestellten Schaltungsprinzip basieren, bei geläufigen Versandhändlern kostengünstig beziehbar. Ein detaillierter Schaltplan des vorgestellten Plasma-Lautsprechers ist im Anhang zu finden (Abb. 12 - 14).

Ein wesentlicher Vorteil von Plasma-Lautsprechern gegenüber konventionellen Lautsprechern ist ihr breitbandiges und resonanzfreies Übertragungsverhalten [15]. Daher sollen im Nachfolgenden die akustischen Eigenschaften des Plasma-Lautsprechers anhand von Messungen charakterisiert werden.

##### 4.1. Messaufbau

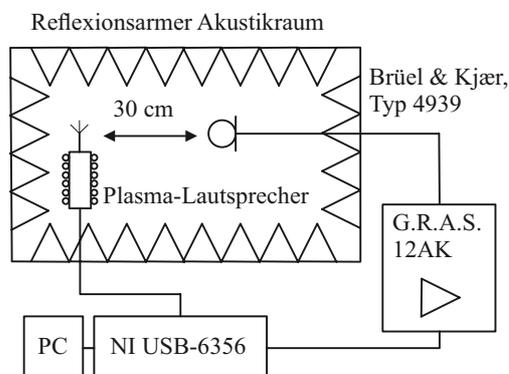
Charakteristische Eigenschaften eines elektroakustischen Wandlers sind sein Frequenzgang sowie seine nichtlinearen Verzerrungen. Um diese Eigenschaften zu bestimmen, wird ein Messaufbau gemäß Abb. 7 in einem reflexionsarmen Akustikraum aufgebaut. Eine Messkarte (NI USB-6356) erzeugt ein Burstsignal variabler Frequenz  $f_{\text{mess}}$  und 100 ms Signaldauer zur Ansteuerung des Plasma-Lautsprechers. Der erzeugte Schalldruck wird in 30 cm Abstand mit einem 1/4-Zoll-Kondensator-Messmikrofon (Brüel & Kjær, Typ 4939) aufgenommen. Der Messabstand wurde so gewählt, dass sich das Mikrofon stets im Fernfeld des Lautsprechers befindet. Das Ausgangssignal des Mikrofons wird um 40 dB verstärkt (G.R.A.S., 12AK) und mit der Messkarte analog-digital umgesetzt. Anschließend wird das Signal im Bereich

$$\left[ \frac{1}{3} f_{\text{mess}}; \frac{3}{2} f_{\text{mess}} \right] \quad \{7\}$$

bandpassgefiltert und der vorliegende Schalldruckpegel berechnet.

<sup>3</sup> URL des Videos: <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid/article/view/1090/1195>; Tonnachweis für das abgespielte Musikstück: Symphony No. 5 (Beethoven) aus: YouTube Audio Library, <https://youtu.be/PbuC5WbodAs>

Um das breitbandige Verhalten des Plasma-Lautsprechers zu zeigen, muss der Messaufbau auch für den Ultraschallbereich geeignet sein. Zur Erfüllung dieser Anforderungen wurde der Aufbau zusätzlich mit Absorberplatten (Basotect® Melaminharzschaumstoff) abgeschirmt. Das Freifeld-Messmikrofon ist für einen Frequenzbereich bis 100 kHz spezifiziert.



**Abb. 7:** Messaufbau zur Bestimmung des Frequenzgangs und des total harmonic distortion (THD) eines Plasma-Lautsprechers

In einem Vorversuch wurden das Grundrauschen der Messumgebung sowie das Grundgeräusch der Plasmaflamme („Zischen“) charakterisiert. Die gemessenen Schalldruckpegel unterlagen lediglich geringfügigen Variationen im untersuchten Frequenzbereich (< 1,5 dB) und sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Gemessener Schalldruckpegel (Referenzwert: 20 μPa)	
Akustikraum	„Zischen“ der Plasmaflamme
38 dB	47 dB

**Tab. 2:** Gemessene Grundgeräuschpegel des Akustikraums und des Plasma-Lautsprechers (ohne Nutzsignal)

### 4.2. Frequenzgang

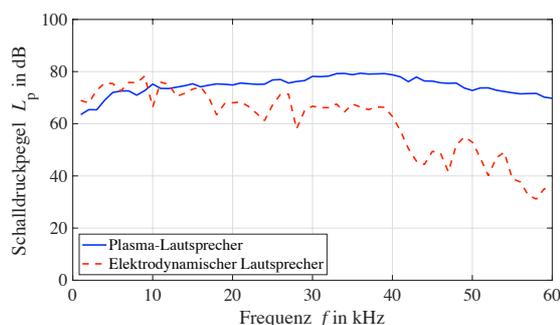
Abbildung 8 zeigt den gemessenen Frequenzgang des Plasma-Lautsprechers und vergleicht diesen mit dem eines handelsüblichen elektrodynamischen Kleinlautsprechers (siehe Abb. 9). Man erkennt einen flachen Frequenzgang des Plasma-Lautsprechers bis weit in den Ultraschallbereich; der Frequenzgang des Kleinlautsprechers fällt dagegen ab ca. 40 kHz aufgrund der Trägheit der mechanisch beweglichen Teile stark ab. Dies zeigt deutlich das Potenzial thermoakustischer Wandler, breitbandige Lautsprecher bis in den Ultraschallbereich hin zu realisieren.

### 4.3. Harmonische Verzerrung

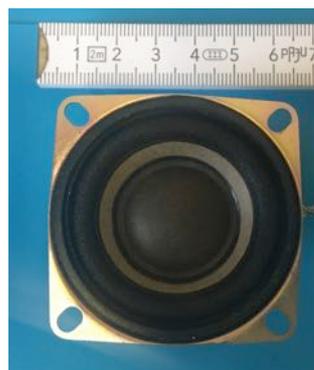
Zur Quantifizierung der Qualität des erzeugten akustischen Signals wurde zusätzlich die harmonische Verzerrung (englisch: total harmonic distortion, THD) des erzeugten akustischen Signals ausgewertet. Der THD beschreibt die nichtlineare Verzerrung eines Signals durch Oberwellen der Anregungsfrequenz an einem Wandler und ist eine wichtige Kenngröße für Lautsprecher [10, 18]. Er berechnet sich gemäß

$$THD = \frac{u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + \dots + u_n^2}{u_1^2} \cdot 100\%, \quad \{8\}$$

wobei  $u_n$  mit  $n \in [2; \infty]$  jeweils den Effektivwert der gemessenen Spannung bei der  $n$ -ten Harmonischen bezeichnet. Für eine praktische Bestimmung wird eine schnelle Fourier-Transformation (FFT) des gemessenen Spannungssignals durchgeführt und die Summe in Gleichung {8} bei  $n = 5$  abgebrochen. Eine Bandpassfilterung gemäß Gleichung {7} wird nicht durchgeführt. Der derart berechnete, frequenzabhängige THD ist in Abb. 10 dargestellt.



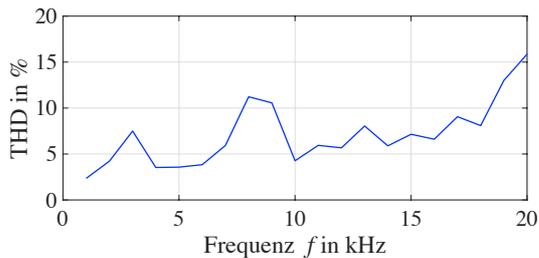
**Abb. 8:** Gemessener Frequenzgang eines Plasma-Lautsprechers (Abb. 6) im Vergleich mit einem konventionellen elektrodynamischen Kleinlautsprecher (Abb. 9)



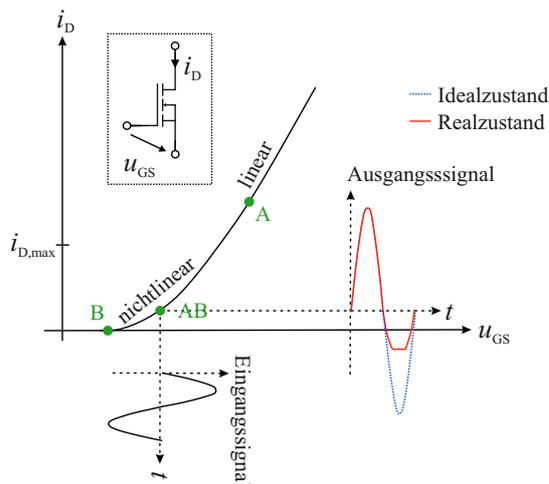
**Abb. 9:** Foto eines handelsüblichen elektrodynamischen Kleinlautsprechers wie er z. B. in Kompakt-Stereoanlagen verbaut wird

Vergleicht man den gemessenen THD des Plasma-Lautsprechers mit dem eines klassischen HiFi-Lautsprechers oder Kopfhörers (typisch 0,1 %), ist dieser verhältnismäßig hoch. Betrachtet man das einfache Schaltungskonzept in Abb. 1, ist dies jedoch wenig verwunderlich. Die Übertragungskennlinie des Transistors wird teilweise auch im nichtlinearen Bereich genutzt (siehe Abb. 11, Arbeitspunkt AB). Um die harmonische Verzerrung weiter zu reduzieren, darf der Transistor ausschließlich im linearen Bereich der Übertragungskennlinie betrieben werden (Arbeitspunkt A). Korrespondierend zu diesen Arbeitspunkten werden Amplitudenmodulationsschaltungen in Verstärkerklassen A, AB und B eingeteilt [8]. Es stellt sich die nichttriviale Frage, warum nicht jede Verstärkerschaltung im Arbeitspunkt A betrieben wird, da an dieser Stelle die geringste harmonische

Verzerrung zu erwarten ist. Die Übertragungskennlinie des verwendeten MOSFETs legt die Lage der Arbeitspunkte (A, AB, B) und damit den jeweils erforderlichen Drainstrom  $i_D$  fest. Ein Labornetzteil muss diesen Strom zunächst treiben können; der erhöhte Drainstrom führt zu größeren Verlusten ( $P_V \sim i_D$ ) im MOSFET. Die maximale zulässige thermische Verlustleistung ist begrenzt und abhängig vom verwendeten MOSFET bzw. dessen Wärmeabfuhr. Es ergibt sich ein maximal zulässiger Stromwert  $i_{D,max}$  (vgl. Abb. 11). Der verwendete, kostengünstige MOSFET erlaubt lediglich einen Betrieb im Arbeitspunkt AB.



**Abb. 10:** Gemessener total harmonic distortion (THD) eines Plasma-Lautsprechers gemäß Abb. 6



**Abb. 11:** Schematische Übertragungskennlinie eines MOSFETs. Durch einen teilweisen Betrieb im nicht-linearen Bereich wird das Ausgangssignal verzerrt.

## 5. Didaktisches Konzept

Plasma-Lautsprecher erlauben bisher einzelne, getrennt voneinander erlernte physikalische Phänomene und Theorien miteinander zu verknüpfen und somit das Transferdenken zu fördern. Der vorliegende Demonstrator und die vorgestellten Versuche wurden von den Autoren für den Einsatz in der universitären Masterausbildung von Studierenden der Technikwissenschaften entwickelt, da die Autoren in diesem Bereich schwerpunktmäßig tätig sind. Zweifelsohne liegen jedoch nicht in jedem Institut bzw. jeder Schule eine derart umfangreiche labortechnische Ausstattung vor. Daher möchten wir in diesem Kapitel ausgewählte Lernpakete und verschiedene Einsatzorte in der Lehre vorstellen.

## 5.1. Lernpakete

Der Plasma-Lautsprecher-Versuch lässt sich auf vielfältige Weise in Vorlesungen oder Übungen des Grundlagen- oder Masterstudiums integrieren. Dies möchten wir am Beispiel des Studiums der Elektrotechnik näher erläutern. Eine Implementierung in andere technische oder naturwissenschaftliche Studiengänge ist in ähnlicher Weise möglich. Eine erfolgreiche Integration und der didaktische Nutzen des vorgestellten Lehrversuchs hängen vom Vorwissen der Studierenden und den Kompetenzen ab, die gemäß der hochschul- und studiengangspezifischen Modulhandbücher zu ermitteln sind. Tabelle 3 fasst einige Lernpakete, die von den Autoren entwickelt wurden, zusammen und verknüpft diese mit den korrespondierenden Lehrbüchern.

### Lernpaket 1

**Kompetenzfeld:** Schwingkreise

**Erforderliches Vorwissen:** Lösen von Differentialgleichungen 2. Ordnung, passive Bauelemente

**Aufgabenstellung:** Bestimmen Sie Zeitverlauf und Resonanzfrequenz eines LC-Schwingkreises.

**Schwerpunkt des Lehrversuchs:** Erzeugung von Hochspannung (als Teslatransformator)

**Kompetenzvermittlung und Transferleistung:** Wie muss ein elektrischer Schwingkreis angeregt werden, um die Schwingungsamplitude zu erhöhen (vgl. Abb. 3), Berechnung des Tesla-Resonanzkreises in Abb. 12 mit einem Schaltungssimulator (z.B. LTspice).

**Literaturhinweise:** [10, 11, 13]

### Lernpaket 2

**Kompetenzfeld:** Gekoppelte Induktivitäten, Transformator-Ersatzschaltbild

**Erforderliches Vorwissen:** Maxwell'sche Feldtheorie, Schwingungslehre

**Aufgabenstellung:** Gegeben ist ein Ferritkern, auf den zwei gegenüberliegende Wicklungen aufgebracht sind. Skizzieren Sie das Feldlinienbild und leiten Sie die Spannungs- und Strombeziehungen zwischen Primär- und Sekundärseite her.

**Schwerpunkt des Lehrversuchs:** Erzeugung von Hochspannung (als Teslatransformator)

**Kompetenzvermittlung und Transferleistung:** Identifikation von Streufluss und Kopplung, Erkennung von Streufeldern, Kennenlernen von technischen Anwendungen der Gegeninduktivität

**Literaturhinweise:** [10, 13]

### Lernpaket 3

**Kompetenzfeld:** Nichtlineare Bauelemente, Verzerrung elektrischer Signale

**Erforderliches Vorwissen:** Komplexe Wechselstromrechnung, Fourier-Reihenentwicklung

**Aufgabenstellung:** Skizzieren Sie die Übertragungskennlinie eines MOSFETs. In welchem Arbeitspunkt des MOSFETs ist

der maximale THD zu erwarten? Welches Zeitsignal ergibt sich dadurch? Berechnen Sie den THD in diesem Arbeitspunkt mittels Fourier-Reihenentwicklung.

**Schwerpunkt des Lehrversuchs:** Modulationsschaltungen

**Kompetenzvermittlung und Transferleistung:** Praxisrelevanz der Fourier-Reihenentwicklung erkennen, tiefergehendes Verständnis von Verstärkerschaltungen fördern.

**Literaturhinweise:** [10, 11, 14]

## Lernpaket 4

**Kompetenzfeld:** Akustische Messtechnik

**Erforderliches Vorwissen:** Funktionsweise elektroakustischer Wandler

**Aufgabenstellung:** Welche unerwünschten Eigenschaften kann ein elektroakustischer Wandler aufweisen? Wie können diese messtechnisch erfasst werden? Welche Anforderungen sind an den Messaufbau zu stellen?

**Schwerpunkt des Lehrversuchs:** Durchführung einer Klirrfaktor- und Frequenzgangmessung

**Kompetenzvermittlung und Transferleistung:** Identifikation von Klirrfaktor und Frequenzgang, selbstständige Entwicklung eines Messaufbaus, Erkennen von unerwünschten externen Störgrößen (Umgebungsgeräusche, Reflexionen, etc.).

**Literaturhinweise:** [1, 18]

**Tab. 3:** Übersicht über die Lernpakete und Kompetenzvermittlung für das Elektrotechnik-Studium

Die vorgeschlagenen Lernpakete können einzeln angewendet werden, aber auch miteinander kombiniert werden.

## 5.2. Einsatzgebiete des Versuchs in der Lehre

### 5.2.1 Technikwissenschaften und Masterstudium Physik

Studierende im Masterstudium verfügen über umfangreiches Grundlagenwissen. Mithilfe des Plasma-Lautsprecher-Versuchs lassen sich Inhalte der Grundlagenlehrveranstaltungen in einer spannenden Art und Weise in Erinnerung rufen und deren Zusammenwirken aufzeigen. So können z.B. der elektrische Schwingkreis, Amplitudenmodulation, Schallentstehungsmechanismen sowie die Charakterisierung von akustischen Signalen wiederholt werden (vgl. Kapitel 5.1).

Der Versuch wird von den Autoren im Rahmen der Vorlesung „Technische Akustik“ eingesetzt: Zunächst wird den Studierenden ein bekanntes Musikstück mithilfe des Plasma-Lautsprechers vorgeführt. Anschließend wird die Funktionsweise beginnend bei der Hochspannungserzeugung mittels gekoppelter Schwingkreise erklärt und auf den Schallentstehungsmechanismus eingegangen. Schließlich wird vom Dozenten die Frage aufgeworfen, wie die Klangqualität des Lautsprechers im Vergleich zu anderen Wandlern bewertet werden kann. Eine reproduzierbare Messung im reflexionsarmen Akustikraum ist im

Rahmen eines Vorlesungsversuchs jedoch nicht nötig. Es reicht hierzu vollkommen aus, den Plasma-Lautsprecher und das Mikrofon im Hörsaal aufzubauen. Sollte eine ungünstige Raumakustik vorliegen, kann notfalls auf einfache Akustikplatten aus dem Baustoffhandel zurückgegriffen werden. Die Lautsprecher werden mithilfe eines Funktionsgenerators mit einem sinusförmigen Ton angesteuert; das Mikrofon wird direkt mit einem konventionellen Digitalspeicheroszilloskop (mit FFT-Funktion) verbunden. So kann man einfach und schnell z.B. die harmonische Verzerrung bestimmen.

### 5.2.2 Grundstudium

Die Schnittpunkte des vorgestellten Demonstrators mit dem Curriculum des Grundstudiums liegen vor allem in der Schwingungslehre. Nach Einführung der mechanischen und elektrischen Schwingkreise kann man zu den gekoppelten Schwingkreisen übergehen. Im Rahmen der Übung oder eines Praktikums kann der Plasma-Lautsprecher (anstelle des Tesla-Transformators) zusammen mit dem gekoppelten Pendel als Versuch mit aufgenommen werden.

### 5.2.3 Sekundarstufe II

Aufgrund der starken Ähnlichkeit zum Tesla-Transformator lässt sich der Plasma-Lautsprecher auch im Physikunterricht der Sekundarstufe II didaktisch wertvoll einsetzen. Die Erklärung der Funktionsweise erfolgt analog der des Tesla-Transformators [5]. Da man bereits auf Grundlagen der Wärmelehre, wie z.B. die brownsche Molekularbewegung, zurückgreifen kann, kann man technikinteressierten Jugendlichen gemäß Kapitel 3 auch den Schallentstehungsmechanismus anschaulich erläutern.

Das Gefährdungspotenzial ist vergleichbar mit dem des bekannten Tesla-Transformators. Die bekannten Lehrversuche des Tesla-Transformators können auch mit dem vorgestellten Plasma-Lautsprecher durchgeführt werden. Die Autoren haben den Versuch vielfach im Rahmen von Schülerinformationstagen (Zielgruppe: Lernende der zehnten Jahrgangsstufe) eingesetzt. Der selbständige Aufbau eines Plasma-Lautsprechers eignet sich für eine schuljahrumfassende Seminararbeit, wie sie in vielen Bundesländern in der elften und zwölften Jahrgangsstufe üblich ist.

## 6. Zusammenfassung

„Sprechende Flammen“ faszinieren seit jeher. Vor diesem Hintergrund stellen Plasma-Lautsprecher ein hervorragendes Anschauungsobjekt für die Lehre dar. Herausfordernd für den Lehrenden ist es, den Lernenden anhand eines einfachen und anschaulichen Versuchs die physikalischen Zusammenhänge nahezubringen. Im Rahmen dieses Beitrags wurde ein einfacher Plasma-Lautsprecher für die Lehre vorgestellt. Seine elektrische und akustische Funktionsweise wurde anhand anschaulicher theoretischer Betrachtungen erläutert. Anschließend wurden mithilfe einfacher Messungen im Akustikraum der THD (total harmonic distortion) sowie der Frequenzgang des

Lautsprechers bestimmt. Man erkennt, dass das Prinzip der thermoakustischen Wandlung besonders für die Erzeugung von hochfrequentem Schall geeignet ist.

Das vorgestellte Versuchskonzept wurde ursprünglich für universitäre Lehrveranstaltungen im Masterstudium der Ingenieurwissenschaften konzipiert, da die Autoren in diesem Gebiet schwerpunktmäßig tätig sind. Der Versuch kann jedoch ohne größere Modifikationen auch im Grundlagenstudium oder im Physikunterricht in der Sekundarstufe II durchgeführt werden.

## 7. Literatur

- [1] Lerch, Reinhard; Sessler, Gerhard; Wolf, Dietrich (2009): Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen, Berlin: Springer.
- [2] Die Bibel. Nach der Übersetzung Dr. Martin Luthers. Bibeltext in der revidierten Fassung von 1984, Stuttgart 1985.
- [3] Kastner, Frédéric (1876): Les flammes chantantes, théorie des vibrations et considérations sur l'électricité, Paris.
- [4] Friesecke, Andreas (2007): Die Audio-Enzyklopädie, Berlin: de Gruyter Saur.
- [5] Homepage der Joachim Herz Stiftung (LEIFiPhysik): URL: <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/transformator-fernerubertragung/ausblick/teslatransformator> (Stand: 10.05.2020)
- [6] Schutzrecht DE 000001095883B (1961-06-29). Klein. Pr.: DE 9510512 1952-05-10.
- [7] Mézes, Christian: Zur Motivation beim Experimentieren im Physikunterricht. Frankfurt a. M.: Goethe-Universität Frankfurt am Main, Dissertation, 2016.
- [8] Millar, R. (2004): The role of practical work in the teaching and learning of science. In: High school science laboratories – role and vision, National Academy of Sciences.
- [9] Mietzel, Gerd (1975): Pädagogische Psychologie, 2. Auflage. Göttingen: Hogrefe.
- [10] Albach, Manfred (2011): Elektrotechnik, München: Pearson.
- [11] Kories, Rolf; Schmidt-Walter, Heinz (2010): Taschenbuch der Elektrotechnik. 9. korrigierte Auflage. Frankfurt a. M.: Harri Deutsch.
- [12] Erickson, Robert W.; Maksimovic, Dragan (2001): Fundamentals of power electronics. 2. Auflage. Dordrecht: Kluwer.
- [13] Guicking, Dieter (2016): Schwingungen, Wiesbaden: Springer.
- [14] Tietze, Ulrich; Schenk, Christoph (1999): Halbleiter-Schaltungstechnik. 11. neu bearbeitete Auflage. Berlin: Springer.
- [15] Daschewski, M.; Boehm, R.; Prager, J.; Kreutzbruck, M.; Harrer, A. (2013): Physics of thermo-acoustic sound generation. In: Journal of Applied Physics 2013, 114.
- [16] Daschewski, Maxim: Thermophony in real gases. Potsdam: Universität Potsdam, Dissertation, 2016.
- [17] Schwab, Adolf J. (1996): Elektromagnetische Verträglichkeit. 4. neubearbeitete Auflage. Berlin: Springer.
- [18] Lerch, Reinhard (2016): Elektrische Messtechnik. 7. aktualisierte Auflage. Berlin: Springer.

Anhang

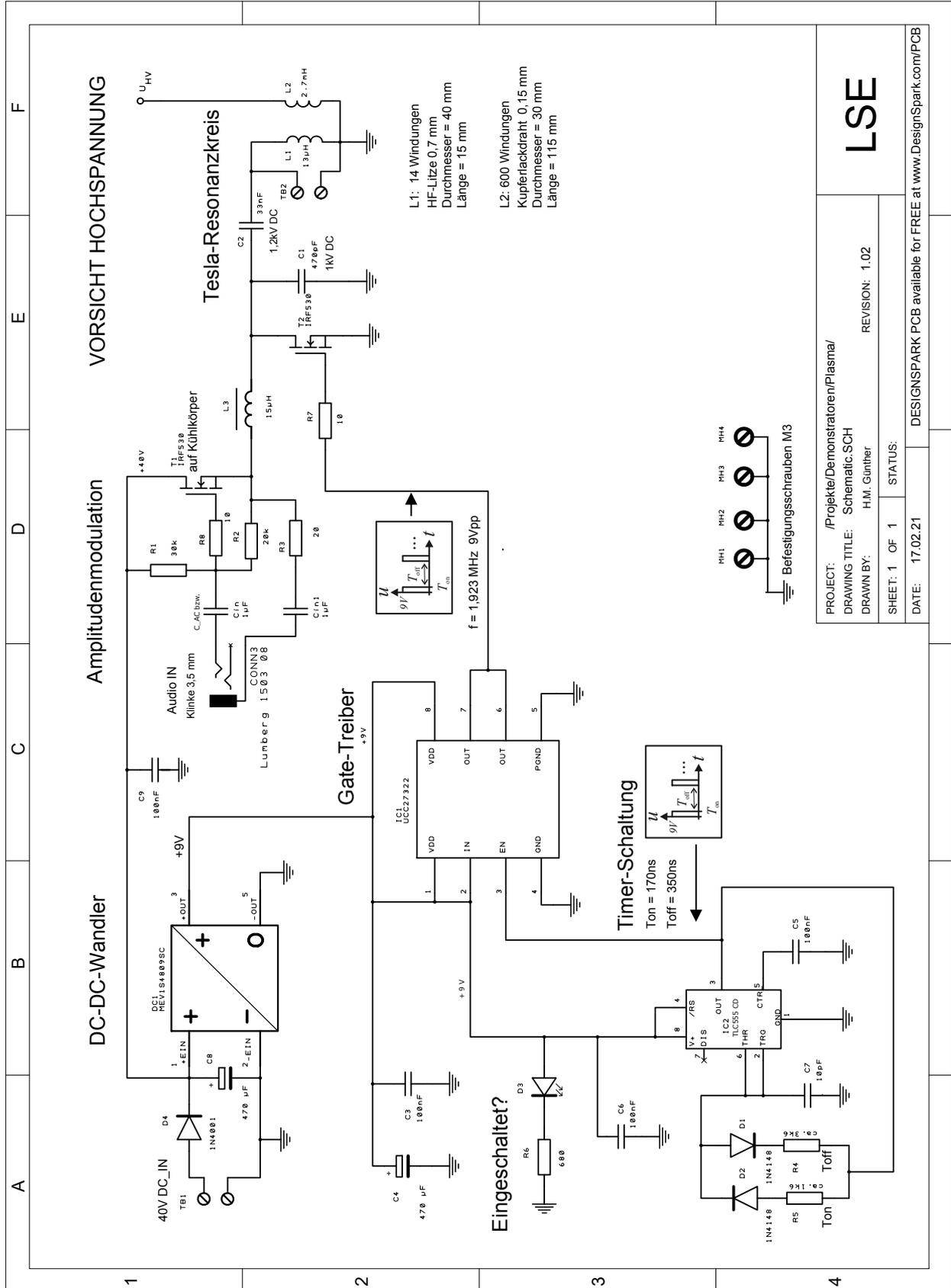
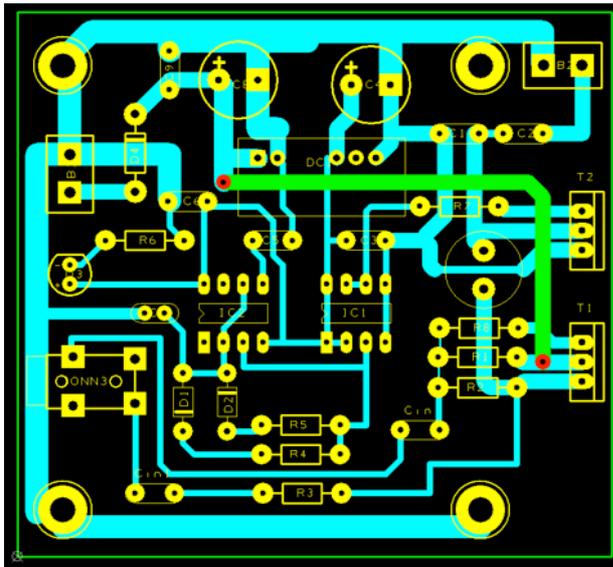
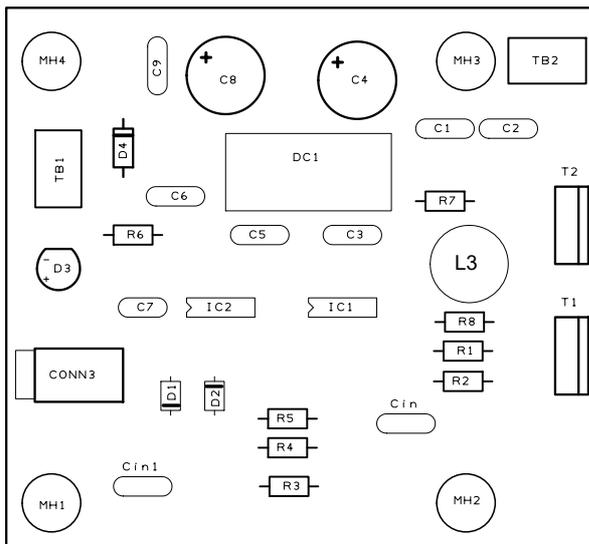


Abb. 12: Vollständiges Schaltbild des Plasma-Lautsprecher-Demonstrators



**Abb. 13:** Vorschlag für ein Leiterplattenlayout des Plasma-Lautsprecher-Demonstrators in Abb. 12



**Abb. 14:** Bestückungsplan für die Leiterplatte gemäß Abb. 13