

## Kapitel 8

# Technisch erzeugte Plasmen

In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen der Plasmatechnik erläutert, dann typische technische Anwendungen wie die Lichttechnik und Zündkerzen als Stand der Technik beschrieben und als Hochfrequenzthematik insbesondere auf die so genannten Mikroplasmen und deren Vorteile in den bekannten technischen Anwendungen eingegangen.

### 8.1 Grundlagen technisch erzeugter Plasmen

Aus dem Alltag sind uns die drei Aggregatzustände fest, flüssig und gasförmig bestens bekannt. Im Universum befindet sich jedoch die meiste Materie (Atome, Moleküle) im vierten Aggregatzustand, dem Plasma. Mehr als 99% der sichtbaren Materie im Universum befindet sich im Plasmazustand.

Ausgehend vom Feststoff wird eine Materie in den nächsten Aggregatzustand durch Energiezufuhr gebracht. Die verbreitetste Energieform ist die Temperatur. Sehr starkes Aufheizen der Gase führt zur thermischen Ionisation. Extrem hoher Druck (wie im Inneren der Sonne) führt zur Druckionisation. Starke Photoneneinstrahlung bewirkt eine Fotoionisation. Aber auch jede elektromagnetische Energie über das gesamte Frequenzspektrum von Gleichstrom bis zur Radioaktivität ist sehr gut geeignet das Energieniveau einer Materie zu heben. Auf diese wird sich im Weiteren beschränkt.

Plasmen entstehen somit in Gasen, denen merklich Energie zugeführt wird. Die dadurch in der Materie verursachten Stoßprozesse zwischen den Elektronen und den Atomen bzw. Molekülen generieren neue Ladungsträger. Die verbleibenden Atome oder Moleküle sind nunmehr positiv geladen und werden als Ion bezeichnet. Gase in denen eine größere Anzahl an Ionen enthalten sind, werden als Plasma bezeichnet.

#### Notwendige Ionisationsenergie

Im Folgenden wird die Energie in der Einheit  $eV$  angegeben.

Es gilt  $1 eV = 0.16 aJ = 0.16 \cdot 10^{-18} J = 0.16 aWs$ .

Die Energie kann zudem in eine Temperatur überführt werden und 1 eV entspricht etwa

11.600 K. Um ein Atom zu ionisieren muss ein freies Elektron die Stossionisation einleiten. Wenn diese freie Elektron über die Energie von mehreren eV verfügt (z.B. 15.8 eV für Argon), so ist es fähig diese Ionisation einzuleiten. Nach dieser erfolgreichen Stossionisation stehen zwei freie Elektronen und ein Ion zur Verfügung. Weitere Ionisierungsenergien einiger Elemente sind in der Tabelle 8.2 wiedergegeben.

Führt man keine weitere Energie zu, so wird ein Elektron nach kurzer Zeit wieder rekombinieren. Plasmen können nur unter kontinuierlicher Energiezufuhr bestehen. Im Plasma gilt für die Dichten der  $n_0$  Neutralteile, der  $n_e$  Elektronen und der  $n_i$  Ionen der Zusammenhang:

$$n_0 > n_e = n_i \quad . \quad (8.1)$$

Wir wollen im Weiteren immer davon ausgehen, dass die kontinuierliche Energiezufuhr immer durch eine technische, elektromagnetische Anregung vollzogen wird.

#### Temperatur in einem Plasma

Es ist aus der Halbleitertechnik bestens bekannt, dass die Beweglichkeit der Elektronen viel größer ist als die der Löcher (Atome im Kristallgitter, denen ein Elektron fehlt). Gleiches gilt auch im Verhältnis zwischen Elektronen und Ionen.

Wird ein Gas von  $T_{min} = 0$  K aus immer weiter erwärmt, so geraten die Moleküle immer mehr in Bewegung. Sie nehmen immer mehr kinetische Energie auf und bewegen sich in allen Richtungen.

Bei einem technischen Plasma findet die Erwärmung durch eine elektromagnetische Anregung statt. Selbstredend erwärmen sich die beweglichen Elektronen in diesem Falle schneller und einfacher als die Ionen. Weiterhin gibt es bei einem technischen Plasma (für Drücke über 100 mbar) immer einen Randbereich. In diesem Randbereich erfahren die Ionen eine gerichtete Bewegung auf die Wand, bedingt durch das ambipolare Feld. Dieses entsteht beim Einschalten, da die Elektronen deutlich schneller die Wand erreichen als die trägen Ionen und die Wand somit negativ aufladen. Die Randschicht eines Plasmas ist aufgrund dieser gerichteten Bewegung nahezu stoßfrei.

In einem Plasma können wir die folgenden vier unterschiedlichen Temperaturen definieren:

Elektronen-, Ionen-, Neutralgas- und Wandtemperatur.

#### Massen in einem Plasma

Insbesondere Elektronen werden in technischen Plasmen durch elektromagnetische Felder beschleunigt. Die Feldstärken sind so hoch, dass man den relativistischen Massezuwachs berücksichtigen muss. Demnach ergibt sich für einen Körper mit der Masse  $m_0$  im Ruhezustand die größere Masse  $m$  bei der Geschwindigkeit  $v$  über

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c_0^2}} \quad . \quad (8.2)$$

Einige Werte eines Elektrons sind in der Tabelle 8.1 abgedruckt.

Für die wichtigsten Gase und sonstigen Elemente, die in technischen Plasmen auftreten, gibt die Tabelle 8.2 die Massen und Ionisierungsenergien an.

Die Luft ist ein sehr wichtiges Prozessgas. Die Hauptbestandteile der Luft sind Stickstoff (in der Form  $N_2$ ) und Sauerstoff (in der Form  $O_2$ ) mit insgesamt 99,03 % des Gesamtvolumens.

Durchlaufende Spannung in V	Elektronengeschwindigkeit in km/s	Elektronenmasse in g
10	$18.8 \cdot 10^2$	$9.11 \cdot 10^{-28}$
$10^3$	$18.7 \cdot 10^3$	$9.12 \cdot 10^{-28}$
$10^5$	$16.5 \cdot 10^4$	$10.9 \cdot 10^{-28}$
$10^6$	$28.3 \cdot 10^5$	$28.8 \cdot 10^{-28}$
$3.1 \cdot 10^6$	$29.7 \cdot 10^5$	$64.3 \cdot 10^{-28}$
$\infty$	Lichtgeschwindigkeit	$\infty$

Tabelle 8.1: Elektronenmasse in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

Element	Elementensymbol	Elementenmasse in g	Ionisierungsenergien in eV
Helium	He	$6.64 \cdot 10^{-24}$	24.6
Neon	Ne	$3.35 \cdot 10^{-23}$	21.6
Argon	Ar	$6.62 \cdot 10^{-23}$	15.8
Krypton	Kr	$1.39 \cdot 10^{-22}$	14.0
Xenon	Xe	$2.18 \cdot 10^{-22}$	12.1
Stickstoff	N	$2.32 \cdot 10^{-23}$	14.5
Sauerstoff	O	$2.66 \cdot 10^{-23}$	13.6
Phosphor	P	$5.11 \cdot 10^{-23}$	10.5
Schwefel	S	$5.32 \cdot 10^{-23}$	10.4
Wasserstoff	H	$1.67 \cdot 10^{-24}$	13.6
Quecksilber	Hg	$3.33 \cdot 10^{-22}$	10.4

Tabelle 8.2: Atommassen von Gasen und anderen wichtigen Elementen für technische Plasmen

### Druckabhängigkeit von Plasmen

Die Ionisationsfähigkeit eines Gases ist extrem druckabhängig. Die mit dem Druck korrelierende Teilchendichte bestimmt wesentlich die Eigenschaften eines Plasmas. Deshalb werden die klassischen technischen Applikationen auch in die beiden Klassen **Niederdruckplasmen** und **Hochdruckplasmen** unterschieden. Typische Teilchendichten für Niederdruckplasmen liegen zwischen  $10^9$  und  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  [21] und für Hochdruckplasmen zwischen  $10^{20}$  und  $10^{22} \text{ cm}^{-3}$ .

Das Bild 8.2 zeigt auf, wie stark die Energie eines Elektrons beim Übergang aus dem Normaldruckbereich (1 bar  $\simeq 10^5$  Pa) in den Hochdruckbereich trotz gleichbleibender elektrischer Anregung abnimmt.

### Debye-Länge

Ein wichtiger Parameter zur Beschreibung eines Plasmas ist die Debye-Länge. Diese beschreibt, dass Potentialstörungen innerhalb eines Plasmas exponentiell abfallen, mit der Debye-Länge  $\lambda_D$  als Abklingkonstante. Nach einer Länge von etwa  $7 \cdot \lambda_D$  ist die Potentialstörung abgeklungen.

Sie lässt sich mit der Boltzmann-Konstanten  $k_B$ , der elektrischen Feldkonstanten  $\epsilon_0$  und

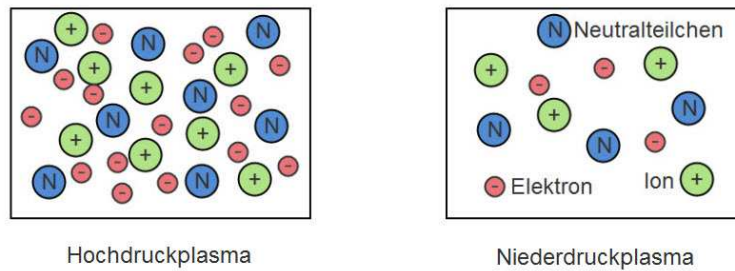


Bild 8.1: Einfaches Modell eines Hoch- und Niederdruckplasmas

der Elementarladung  $e$  als Funktion der Temperatur  $T$  und der Elektronendichte  $n_e$  zu

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T}{n_e e^2}} \quad (8.3)$$

berechnen.

Voraussetzung für diese Gleichungen ist, dass die Elektronendichte gleich der Ionendichte ist. Da sich ein Plasma, dessen Abmessungen wesentlich größer ist als die Debye-Länge, nach außen hin elektrisch neutral verhält, ist diese Voraussetzung gegeben. Diese Quasineutralität kann nur innerhalb einer Kugel mit dem Radius  $\lambda_D$  verletzt werden, [21]. Das Plasma schirmt sich also gegen äußere Störfelder ab.

#### Plasmafrequenz

Ein weiterer wichtiger Parameter der Plasmaphysik ist die Plasmafrequenz  $\omega_P$ . Das Anlegen eines elektrischen Feldes führt zu einer Fluktuation der Ladungsträger. Ist die Frequenz dieses elektrischen Feldes hoch genug, können die Ionen, wegen ihrer relativ großen Massenträgheit, dem Feld nicht mehr folgen und werden als ruhend angenommen. Die Verschiebung der Elektronen führt nun zu einer Ladungstrennung, welche durch die Coulombkraft wieder kompensiert wird und die Elektronen in die entgegengesetzte Richtung beschleunigt werden. Durch die Trägheit der Elektronen werden diese über ihre Gleichgewichtsposition hinaus beschleunigt und erzeugen wiederum starke elektrische Felder. Die Folge ist eine Oszillation (Resonanzeffekt) mit

$$\omega_P = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}}. \quad (8.4)$$

Da in Gleichung (8.4) fast nur Konstanten enthalten sind, lässt sich dieser Ausdruck zu

$$\omega_P = 5.64 \cdot 10^4 \cdot \sqrt{n_e} \quad \text{bzw.} \quad f_p = 8976 \cdot \sqrt{n_e} \quad (8.5)$$

vereinfachen, wobei die Elektronendichte in  $\text{cm}^{-3}$  angegeben wird und die Plasmafrequenz die Einheit Hz besitzt.

Wird das Produkt aus Plasmafrequenz und Debye-Länge gebildet, wie es in [21] gezeigt wird, so ist erkenntlich, dass die Ladungen in einem Plasma nur in einem Bereich verschoben werden, die in der Größenordnung der Debye-Länge liegen.

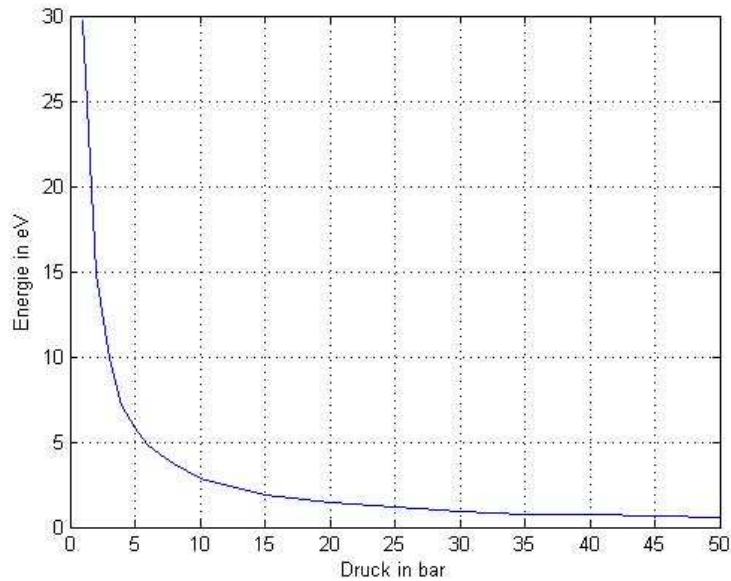


Bild 8.2: Typ. Energie eines freien Elektrons im HF-Feld als Funktion des Drucks bei  $2.45 \text{ GHz}$  und  $E_0 = 10 \text{ MVm}^{-1}$

Diese Plasmafrequenz ist für die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in einem Plasma von großer Bedeutung. Nur elektromagnetische Wellen mit Kreisfrequenzen  $\omega > \omega_P$  können sich in einem Plasma ausbreiten. Unterhalb dieser *cut-off*-Frequenz werden die Wellen vom Plasma reflektiert. Dies hat wiederum zur Folge, dass eine elektromagnetische Welle mit  $\omega > \omega_P$  ihre Energie direkt ins Innere des Plasmas überträgt, während eine Welle mit  $\omega < \omega_P$  die Energie nur auf die Oberfläche des Plasmas überträgt.

Um ein Gefühl für die Größenordnung der Plasmafrequenz zu bekommen, sind in der Tabelle 8.3 ein paar Werte aufgeführt.

$n_e$ in $\text{cm}^{-3}$	$f_P$ in GHz
$1 \cdot 10^9$	0.28
$1 \cdot 10^{10}$	0.89
$1 \cdot 10^{12}$	8.97
$1 \cdot 10^{14}$	89.76

Tabelle 8.3: Plasmafrequenz  $f_P$  für verschiedene Teilchendichten

#### Mittlere freie Weglänge

Die mittlere freie Weglänge (auch als MFP: „Mean Free Path“ bezeichnet), welche sich durch

$$\lambda_{MFP} = \frac{1}{n \sigma_{Streu}} \quad \text{mit} \quad n = n_0 + n_i \quad (8.6)$$

berechnen lässt, gibt an, welche Weglänge von einem Elektron zurückgelegt wird, bevor es im statistischen Mittel mit einem Teilchen zusammenstößt. Der atomare Wirkungsquer-

schnitt  $\sigma_{Streu}$  ist eigentlich schwach temperaturabhängig, wird hier aber der Einfachheit halber als konstant angenommen und berechnet sich mit den Radien der stoßenden Teilchen zu:

$$\sigma_{Streu} = \pi \cdot (r_1^2 + r_2^2) \quad , \quad (8.7)$$

wobei  $r_1$  und  $r_2$  die Radien der stoßenden Spezies (z.B. Argonatom:  $r_{Ar} = 158 pm$  und Elektron:  $r_{e^-} = 2,8 fm$ ) sind.

Für die Berechnungen der mittleren freien Weglänge wird die Teilchendichte  $n$  mit der Zustandsgleichung idealer Gase

$$n = \frac{p}{k_B T} \quad (8.8)$$

bestimmt. Hierfür wird ein ideales Gas bei Raumtemperatur vorausgesetzt. Wird die Gleichung 8.8 in die Gleichung 8.7 eingesetzt, kann der Zusammenhang

$$\lambda_{MFP} = \frac{k_B T}{\sigma_{Streu} \cdot p} \quad (8.9)$$

aufgestellt werden.

Mit dieser Gleichung lässt sich die mittlere Weglänge als Funktion des Drucks berechnen, hier anhand eines Elektrons in reinem Argongas aufgeführt.

$n$ in $cm^{-3}$	$p$ in $pa$	$p$ in $bar$	$\lambda_{MFP}$ in $m$
$2.41 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^2$	0,001	$2.6 \cdot 10^{-3}$
$2.41 \cdot 10^{19}$	$1 \cdot 10^5$	1	$2.6 \cdot 10^{-6}$
$1.21 \cdot 10^{21}$	$5 \cdot 10^6$	50	$5.2 \cdot 10^{-8}$
$4.83 \cdot 10^{21}$	$2 \cdot 10^7$	200	$1.3 \cdot 10^{-8}$

Tabelle 8.4: Mittlere freie Weglänge eines Elektrons in Argon und Argondichte für diverse Drücke

Anhand der Gleichung (8.9) und der Tabelle 8.4 wird deutlich, dass die mittlere freie Weglänge umgekehrt proportional zum Druck ist. Diese Änderung der MFP führt zu dem Problem, dass bei zu hohem Druck nicht genügend Energie vom  $\vec{E}$ -Feld aufgenommen werden kann, bevor die Elektronen im statistischen Mittel wieder mit Neutralteilchen zusammenstoßen. Im Umkehrschluss darf der Druck aber auch nicht zu niedrig sein, sonst finden zu wenige Zusammenstöße statt, um einen effektiven Energieaustausch zu gewährleisten.

Bei Hochdruckplasmen ist die Temperatur allerdings wesentlich höher, als bei Niederdruckplasmen. Dies hat eine größere ungerichtete Driftbewegung der Teilchen zur Folge, die wiederum für eine höhere Energie einzelner Teilchen sorgt, da sich die ungerichtete Drift mit der gerichteten Driftbewegung des  $\vec{E}$ -Feldes konstruktiv, aber auch destruktiv überlagert.

## 8.2 Niederdruckplasmen

Als Niederdruckplasmen sollen Plasmen bezeichnet werden, die in Unterdruckbedingungen mittels elektrischen Gleichfeldern oder Wechselfeldern bis in den mittleren MHz-Bereich aus erzeugt werden.

Typisch für diese Niederdruckplasmen sind:

- Niedrige Teilchendichte der Ladungsträger
- Große mittlere freie Weglänge
- Stoßprozesse sind selten
- Energie von Elektronen und Ionen unterschiedlich
- Geringe mittlere Temperatur (typ. 300 - 2000 K)

Bei Niederdruckplasmen ist die Teilchendichte der Ladungsträger gering, da einerseits die Neutralteilchendichte ebenfalls gering ist und andererseits die Wahrscheinlichkeit für Stossprozesse gering ist.

Somit ist auch der Ionisationsgrad eines Gases mit insgesamt  $n_n$  Teilchen gering:

$$n_e/n_n \approx 10^{-6} - 10^{-2} \quad (\text{somit gilt } n_n \approx n_0).$$

Typische Drücke in Niederdruckanlage liegen unter 1 mbar, die mit einer Vakuumpumpe erzielt werden. Bild 8.3 zeigt eine moderne Anlage für die Einsatzzwecke.



Bild 8.3: Niederdruckplasmaanlage von der Firma Diener electronic

Folgende Anwendungen von Niederdruckplasmen in der Industrie sind bereits Stand der Technik:

**OBERFLÄCHENREINIGUNG:** Die Oberfläche der Bauteile wird durch den Ionenbeschuß physikalisch und, je nach Gasart, auch durch chemische Reaktionen gereinigt. Die Verschmutzung wird in die Gasphase umgesetzt und abgesaugt.

**KUNSTSTOFFAKTIVIERUNG:** Die Kunststoffoberflächen der Bauteile werden beispielsweise mit Sauerstoff oder Luft plasmabehandelt. Es bilden sich Radikalstellen, an denen Lack- oder Klebesysteme gut haften.

**OBERFLÄCHENÄTZUNG:** Die Oberfläche der Bauteile wird mit einem reaktiven Prozessgas angeätzt. Material wird gezielt abgetragen, in die Gasphase umgesetzt und abgesaugt. Die Oberfläche wird vergrößert und ist sehr gut benetzbar. Das Ätzen dient der Vorbehandlung vor dem Bedrucken, Verkleben und Lackieren sowie dem Aufräumen des Materials.

**OBERFLÄCHENBESCHICHTUNG:** Es wird ein Gas (z.B. Hexamethyldisiloxan) in die Plasmakammer eingeleitet. Durch Plasmapolymerisation<sup>1</sup> werden auf der Oberfläche Schichten abgeschieden.

In solche Anlagen nach Bild 8.3 werden verschiedene stufenlos regelbare (oft über Pulsbetrieb) Generatoren mit unterschiedliche Leistungen eingesetzt. Typische technische Spezifikationen sind:

Frequenzen	Leistungsbereiche
40.00 kHz	0-1000 W; 0-1500 W; 0-2500 W
13.56 MHz	0-300 W; 0-600 W; 0-1000 W
2.45 GHz	0-1200 W

Die drei Betriebsfrequenzen haben für die verschiedenen Anwendungen jeweils Vor- und Nachteile.

Bei der 2.45 GHz-Technik handelt es sich hier wie beim Mikrowellenherd um eine Antenne, die in den geschlossenen Raum sendet. Erzeugt wird die HF-Energie ebenfalls durch ein Magnetron.

Die beiden anderen Frequenzbereiche gehören zur Klasse der kapazitiv gekoppelten Plasmen. Bei tiefen Frequenzen unter 10 kHz wird ein Plasma durch die Hochspannung im Bereich der maximalen Spannung zum Glimmen gebracht und erlischt im Bereich des Nulldurchganges der Spannung. Dieses Löschen (durch Rekombination) findet bei 40 kHz nicht mehr statt. Das Plasma bleibt stehen. Bei 40 kHz-Generatoren arbeitet man unterhalb der Plasmafrequenz.

Erhöht man die Frequenz, so stellt man fest, dass die Zündspannung sinkt. Sicherlich liegt zumindestens ein Grund dafür im schnellen Spannungsanstieg der hochfrequenten Energiezufuhr.

Deshalb haben sich Anlage im freien Frequenzband bei 13.56 MHz etabliert. Diese arbeiten oberhalb der Plasmafrequenz. Abhängig von den zwei Zuständen

a) Gas ist nicht ionisiert    und    b) Gas ist ionisiert

gibt es zwei Aufgaben für den notwendigen Generator. Einerseits muss dieser zunächst eine hohe Zündspannung bieten und andererseits muss nach der erfolgten Zündung die Energie ins Plasma transportiert werden. Beides soll jedoch bei der Festfrequenzfrequenz von 13.56 MHz vollzogen werden.

<sup>1</sup>Die Polymerisation ist eine chemische Reaktion, bei der Monomere, meist ungesättigte organische Verbindungen, unter Einfluss von Katalysatoren und unter Auflösung der Mehrfachbindung zu Polymeren (Moleküle mit langen Ketten, bestehend aus miteinander verbundenen Monomeren) reagieren.



Hier muss man die Last (aktiviertes Plasma) als verlustbehaftete Kapazität beschreiben, deren kapazitiver und ohmscher Anteil von einer Vielzahl von Faktoren wie Gasauswahl und Druckeinstellung abhängt. Um dieser Aufgabe gerecht zu werden, werden oftmals die Reflexionswerte ( $S_{11}$ ) des Plasmas gemessen und ein einstellbares Transformationnetzwerk optimal eingestellt. Hier werden über Schrittmotoren verstimmbare Kondensatoren eingesetzt. Bild 8.4 zeigt das zugehörige Netzwerk.

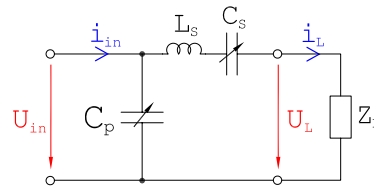


Bild 8.4:  $\Gamma$ -Trafo für Niederdruckplasmaanlagen bei 13.56 MHz

Eine weitere sehr große Anwendung von Niederdruckplasmen sind die Niederdrucklampen.

### 8.2.1 Niederdrucklampen

Eine Vielzahl der Lampen arbeiten unter Niederdruckbedingungen mit einer Plasmaentladung. Dazu gehören die

- \* Neonröhren und die verwandten Kompaktleuchtstofflampen (Energiesparlampen),
- \* Dampfentladungslampen, Natriumdampflampen,
- \* Quarzlampe oder auch Quecksilberdampflampe, Gasentladungsröhren u.v.m..

Im Weiteren soll wegen der großen Bedeutung auf die Kompaktleuchtstofflampe intensiver eingegangen werden.

Kompaktleuchtstofflampen zählen als Leuchtstofflampen zu den Quecksilberdampflampen. Zur Verringerung der Abmessungen ist die Gasentladungsröhre nicht gerade, sondern (mehrfach) u-förmig gebogen oder als Wendel ausgeführt. Eine weitere Verkleinerung und eine höhere Leuchtdichte wird durch einen erhöhten Innendruck erreicht.

Kompaktleuchtstofflampen haben mit ca. 60 lm/W (Lumen/Watt) eine rund vier- bis fünfmal höhere Lichtausbeute als normale Glühlampen mit 12 bis 15 lm/W. Sie benötigen bei gleichem Lichtstrom also 75 % bis 80 % weniger elektrische Leistung. Im Lauf der Lebenszeit nimmt ihre Lichtausbeute jedoch ab.

Zum Betrieb einer Kompaktleuchtstofflampe, wie auch anderer Gasentladungslampen, wird heutzutage meist ein elektronisches Vorschaltgerät (EVG) eingesetzt. Einige elektronische Vorschaltgeräte heizen beim Lampenstart zunächst die Kathoden, indem diese im Stromkreis in Reihe zu einem PTC-Widerstand liegen. Hat sich dieser durch Stromfluss erwärmt, wird er hochohmig und gibt die Entladungsstrecke für das Vorschaltgerät frei, die Lampe zündet. Der Druckaufbau, mithin die Verdampfung des Quecksilbers, geschieht beim Einschalten durch die Vorheizung der Kathoden beziehungsweise durch Heizfäden (direkt geheizte Kathoden) und nachfolgende Eigenerwärmung. Daher erreichen Kompaktleuchtstofflampen nicht sofort ihre volle Leuchtkraft.

Die Gasentladungsstrecke selbst arbeitet an einem Resonanzwandler, das heißt die Netzwechselspannung wird zunächst gleichgerichtet, um anschließend wieder in eine Wechselspannung höherer Frequenz (ca. 45 kHz) verwandelt zu werden. Die Wechselrichtung erfolgt mit zwei Schalttransistoren, die Wechselspannung gelangt dann über eine Ferritkern-Drossel zum Lampenstromkreis.

Die Drossel ist aufgrund der höheren Arbeitsfrequenz sehr klein, verlustärmer und materialsparend gegenüber den 50-Hz-Drosseln älterer konventioneller Vorschaltgeräte (KVG). Darüberhinaus führt die höhere Arbeitsfrequenz zu einer höheren Effizienz der Lampe als bei Leuchtstofflampen mit KVG, da zum einen die Gasentladung selbst effektiver arbeitet und zum anderen die Verluste in der Drossel geringer sind. Außerdem kann das menschliche Auge die Frequenz von 45 kHz nicht als Flimmern wahrnehmen.

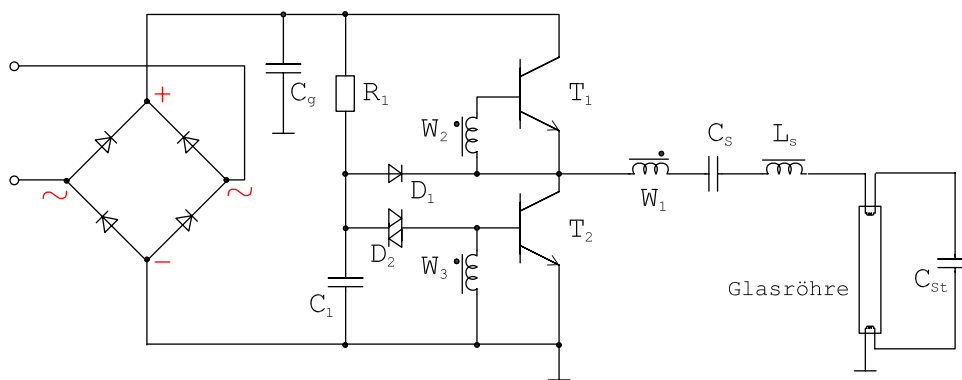


Bild 8.5: Schaltplan eines elektronischen Vorschaltgerätes (EVG) mit der Umschaltfrequenz von 45 kHz

Im Bild 8.5 ist ein Schaltplan eines solchen EVGs dargestellt. Nach dem Anschalten werden über  $R_1$  die Kondensatoren  $C_1$ ,  $C_s$  und  $C_{St}$  geladen. Da  $W_3$  zunächst hochohmig ist, leitet  $T_2$  kurzzeitig später. Der Serienschwingkreis mit den Hauptelementen  $W_1$  und  $C_s$  und dem ungezündeten Plasma in der Glasröhre ist geschlossen. Über die treibende Induktivität  $W_1$  baut sich eine große Spannung über der Glasröhre auf und das Plasma wird gezündet. Fortan ist es in erster Näherung nur noch als ohmscher Widerstand zu sehen. An  $W_3$  bricht die Basisspannung für  $T_2$  zusammen und  $T_2$  sperrt.  $W_3$  gibt die gespeicherte Energie an  $C_1$  ab. Zum gleichen Zeitpunkt konnte sich die Basisspannung hinter  $W_2$  aufbauen und  $T_1$  ist leitend. Der Resonanzkreis erhält aus der positiven Gleichspannung, die direkt aus der Netzspannung gleichgerichtet ist, neue Energie. Das vorlaufende Umschalten mit 45 kHz stammt aus dem Schwingkreis aus  $C_1$  und  $W_3$ .

Man erkennt die sehr enge Verwandtschaft zum Klasse D Verstärker mit zwei Transistoren. Typische Wirkungsgrade dieser Schaltungen liegen bei über 90%. Wichtig in der Schaltungsoptimierung ist, dass  $T_1$  und  $T_2$  niemals gleichzeitig öffnen.

## 8.3 Hochdruckplasmen

Als Hochdruckplasmen sollen Plasmen bezeichnet werden, die in Normal- und Hochdruckbedingungen mittels elektrischen Gleichfeldern oder Wechselfeldern bis in den mittleren MHz-Bereich aus erzeugt werden.

Typisch für diese Hochdruckplasmen sind:

- Hohe Teilchendichte der Ladungsträger
- kleine mittlere freie Weglänge
- Stoßprozesse sind häufig
- Energie von Elektronen und Ionen eher gleich
- Hohe mittlere Temperatur (typ. 5000 K)

Hochdruckplasmen basieren in den technischen Anwendungen auf der Bogenentladung. Tabelle 8.5 stellt die wichtigsten technischen Anwendungen und die zugehörigen Drücke vor,

Tabelle 8.5: Technische Anwendungen für Hochdruckentladungsplasmen

Anwendung	typ. Druck in bar	typ. elektrische Leistung in W
Zündkerze	100	50
Beamerlampe	220	150
Xenonlampe	40	20
Schweißtechnik	1	500-5000
Plasmasprayer/-strahler	1	200-2000
Hochleistungsschalter	1-10	500-2000

Eine typische Bogenentladung ist im Bild 8.6 dargestellt.

Im Weiteren soll am Beispiel der Zündkerze (die hauptsächlich im Auto Einsatz findet) detaillierter auf ein Hochdruckplasma eingegangen werden.

### 8.3.1 Klassische Zündkerze

Die Zündung hat im Otto-Motor folgende Aufgaben und Auswirkungen: 1. Die Zündung des Benzin-Luftgemisches mittels Zündfunke; 2. Die Zündung beeinflusst maßgeblich den Verbrennungsvorgang; 3. Auswirkung auf Verbrauch, Emissionsverhalten und Leistung.

Bevor die Zündung ausgelöst wird, wurde durch die Kompression mittels des Kolben ein Druck von typisch 10 bar aufgebaut. Wenn der Bogen überschlägt und der Zündfunken steht wächst der Druck auf bis zu 100 bar an. Unter dieser Bedingung soll die Bogenentladung aufrechterhalten bleiben. Die gespeicherte Energie in der Zündspule erlaubt eine eine Zündfunkendauer (Brenndauer) von typisch 1.5 ms.

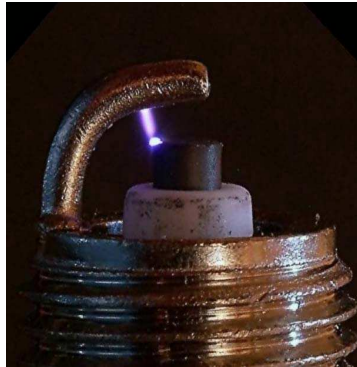


Bild 8.6: Foto einer aktuellen Zündkerze mit Bogenentladungs-Plasma

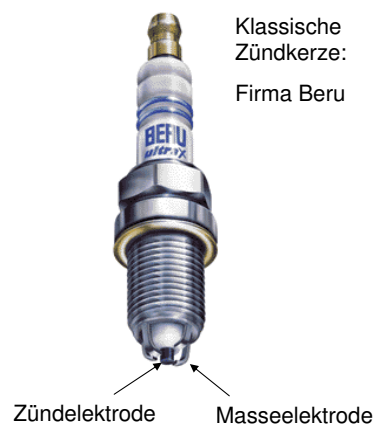


Bild 8.7: Foto einer aktuellen Zündkerze

## 8.4 Mikroplasmen

Als Mikroplasmen sollen Plasmen bezeichnet werden, die in Nieder-, Normal- und Hochdruckbedingungen mittels elektromagnetischen Wechselfeldern im oberen MHz- und im GHz-Bereich aus erzeugt werden.

Typisch für diese Mikroplasmen sind:

- Relativ hohe Teilchendichte der Ladungsträger (nach Druck)
- Relativ kleine mittlere freie Weglänge
- Stoßprozesse sind häufig
- Energie von Elektronen und Ionen unterschiedlich
- Relativ geringe mittlere Temperatur

Mikroplasmen weisen spezielle Spannungstransformatoren auf, die Steuerelektronik hat eine spezielle Regelung. Mikroplasmen werden mit sehr hoher Effizienz für Start und Betrieb über das so genannte Bi-Static-Matching erzeugt. Sie sind nunmehr konkurrenzfähig zu vielen Anwendungen mit Bogenentladung und Niederdruckplasma.

## 8.5 Theorie der dreistufigen Transformation

This concept is based on a three stage transformation network, which is shown in Fig. 8.8. The first and third impedance transformation is realized by a so-called  $\Gamma$ -transformer, [29]. The second transformation stage is realized by an autotransformer. The complete impedance transformation realizes a transformation from the system impedance  $Z_0$  of  $50\ \Omega$  to an output impedance  $Z_{out}$  of approximately  $0.5 \cdot 10^6\ \Omega$ .

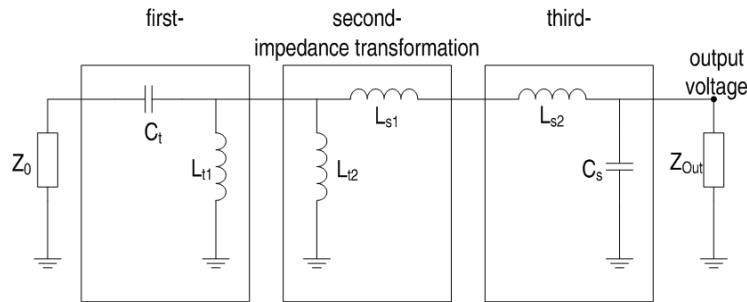


Bild 8.8: Simplified electrical circuit of the three staged impedance transformation used to ignite microplasmas.

A detailed derivation of the required equations for the calculation of the elements of the  $\Gamma$ -transformer is presented in [29]. The inductor of the first  $\Gamma$ -transformer can be described by

$$L_{t1} = R_1 R_2 C_t \quad , \quad (8.10)$$

where  $L_{t1}$  is equal to  $L_{t2}$  in Fig. 8.9 and both inductors represent the shunt circuit of the distributed structure.  $R_1$  is the system impedance of  $50\ \Omega$ ,  $R_2$  the output impedance of the first transformation and  $C_t$  the capacitor between the  $50\ \Omega$  conductor and the shunt inductor. The capacitor  $C_t$  can be calculated with:

$$C_t = \frac{1}{\omega_0} \sqrt{\frac{1/R_1}{R_2 - R_1}} \quad , \quad (8.11)$$

with  $\omega_0$  representing the resonance frequency.

The equation

$$C_s = \frac{1}{\omega_0} \sqrt{(1-t) \cdot t} \frac{1}{R_3} \quad (8.12)$$

delivers shunt capacitance  $C_s$  at the end of the third impedance transformation. Here,

$$t = \frac{R_3}{R_4} \quad (8.13)$$

denotes the ratio between the input impedance of the third transformation  $R_3$  and the output impedance  $R_4$  (corresponding to  $Z_{out}$ ). The serial inductor  $L_{s2}$  is equal to the inductor  $L_{s1}$  and can be calculated with

$$L_{s2} = \frac{1}{\omega_0} \sqrt{(1-t)/t} R_3 \quad . \quad (8.14)$$

Assigning  $L_{s1}$  to  $L_{s2}$  and  $L_{t1}$  to  $L_{t2}$  in (8.10) - (8.14) enables the calculation of all the unknown elements of the three stage transformation network.

Fig. 8.9 shows the distributed circuit for the impedance transformation described by the previously handled equations. The microwave power is fed in the impedance transformer from the left side into the  $50 \Omega$  conductor. The first transformation is realized with the air gap which represents the capacitor  $C_t$  between the conductor and the shunt stub. The stub represents the second part of this first impedance transformation and coevally the first part of the second transformation. The second impedance transformation is completed by the conductor and leads to the third level of the transformation network which is completed by the capacitor from the spike to the ground.

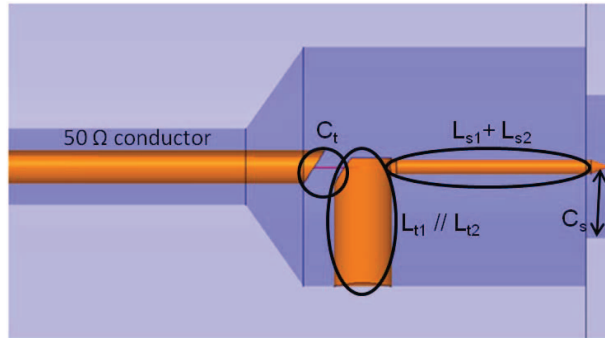


Bild 8.9: Realization of the impedance transformation using distributed elements.

## 8.6 Development Environment for RF Plasma Ignition

A microwave source producing a 2.45 GHz signal is essential for ignition and operation of a microwave plasma. To monitor the matching of the plasma a scalar network analyzer is implemented in the development environment shown in Fig. 8.10.

The in the generator integrated scalar network analyzer allows to perform hot S-parameter measurements. This generator enables the monitoring of the matching of a load, irrespective of the presence of plasma. Sweeping the input signal over frequency enables a good overview of the matching of the microwave plasma at over frequency. Furthermore, the frequency with the best matching is identified and is locked to in the implemented automatic control feature, enabling ideal operational conditions.

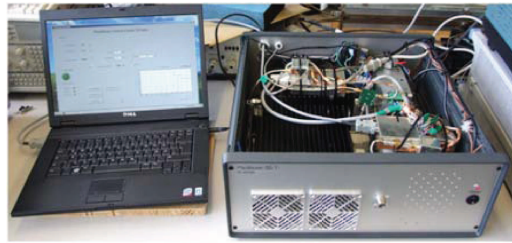


Bild 8.10: Portable development environment to monitor the matching of the impedance network during operation using Matlab.

Ältere Steuergeräte beinhalteten:

- Mikrocontroller
- D/A Wandler erzeugt Steuer-Spannung
- VCO erzeugt HF-Signal
- Dämpfungsglied zur Leistungs-Steuerung
- Verstärker
- Koppler koppelt Teil des Signals für Messung aus
- Detektor misst Leistung

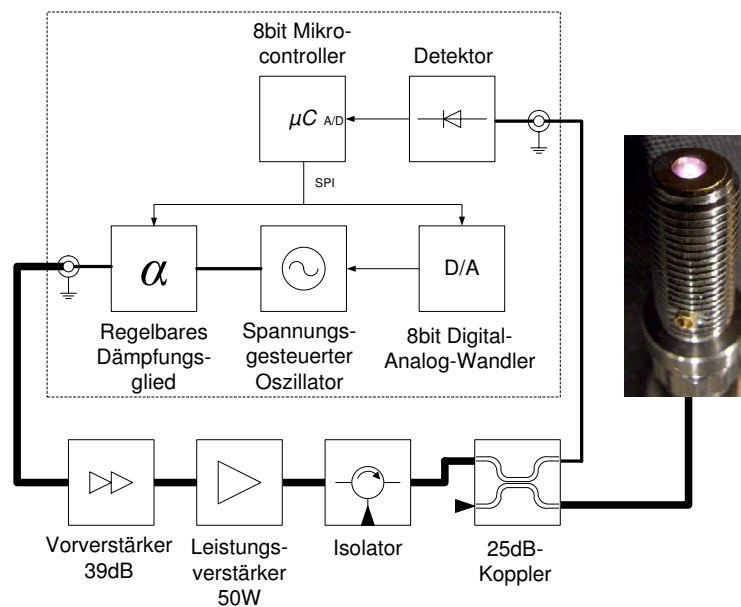


Bild 8.11: Darstellung des Blockschaltbildes des Steuergerätes mittels einem Mikroprozessor

Jüngst wurde die Steuerelektronik auch als analoger Regelkreis aufgebaut. Diese ALL (Amplitude-Locked Loop)-Schaltung wurde in SMD-Technik getestet und als IC-Design umgesetzt.

### 8.6.1 HF-Zündkerze

An der FH Aachen wird seit 2006 intensiv an der Mikroplasma-Zündkerze (die als HF-Zündkerze eingeführt wurde) und der zugehörigen Ansteuerelektronik im Frequenzbereich um 2.45 GHz geforscht.

Von einer Zündkerze mit Mikroplasma erwartet man sich viele Vorteile:

- 1.: Der Einspritzstrahl kann an die Elektrode geführt werden;
- 2.: Die Zünddauer kann variabel eingestellt werden;
- 3.: Es kann kontrolliert werden ob tatsächlich eine Zündung erfolgte;
- 4.: Eine möglichst lebenslange Haltbarkeit;
- 5.: Einen hohen Wirkungsgrad des gesamten Zündsystems.

Bereits 2006 wurden in einer ersten Diplomarbeit recht beachtlich Resultate mit einem neuartigen Transformationsnetzwerk, das sich in der Zündkerze befindet, erzielt, Bild 8.12.

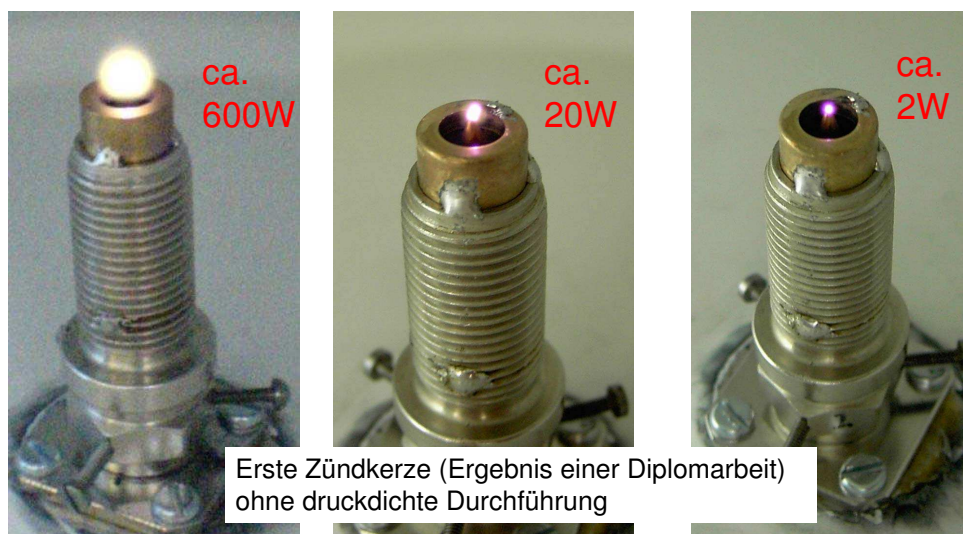


Bild 8.12: Foto der ersten HF-Zündkerze mit verschiedenen Ansteuerleistungen

Der Innenaufbau und die Zunahme der Feldstärke ist sehr gut im Bild 8.13 zu erkennen.

Mittlerweile wurden viele technologische Schritte erzielt, damit aus den ersten Anschauungsbeispielen (s. Bild 8.12 ohne Durchisolation) im Motor einsetzbare Zündkerzen wurden. Diese neuen HF-Zündkerzen haben ihre Funktionalität bereits in ersten Motorläufe bewiesen.



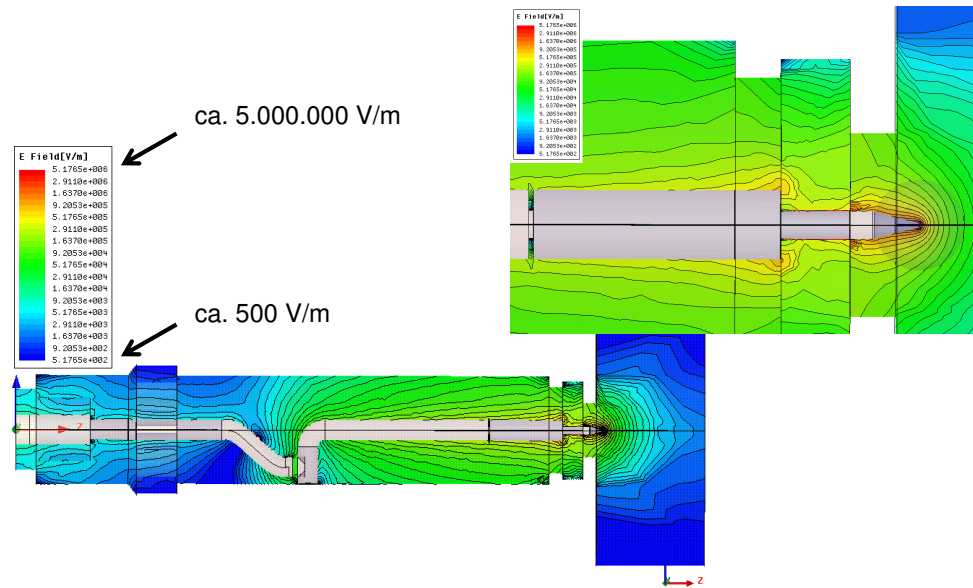


Bild 8.13: Feldsimulation der ersten HF-Zündkerze

### 8.6.2 Lampentechnik

This impedance transformation network can also be applied for lighting devices. Fig. 8.14 shows a single sided beamer lamp with a power handling of 120 W. This novel beamer

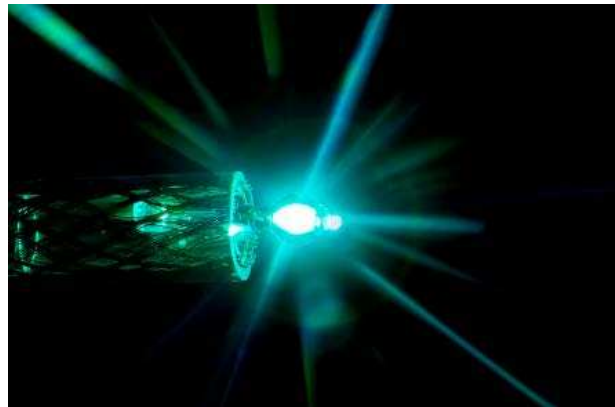


Bild 8.14: Novel 120 W single sided beamer lamp driven by an 2.45 GHz signal.

lamp is filled with argon as ignition gas and mercury as illuminating gas and reaches a pressure of up to approx. 220 bar in operation. Measurements of the lamp revealed a faster start-up, a higher luminous density and a higher percentage of visible light as compared to conventionally driven beamer lamps. Furthermore, the RF driven beamer lamp possesses a hot re-strike capability. Detailed results were presented in [25].

Den inneren Aufbau dieser neuen HF-Beamerlampe zeigt das Bild 8.15.

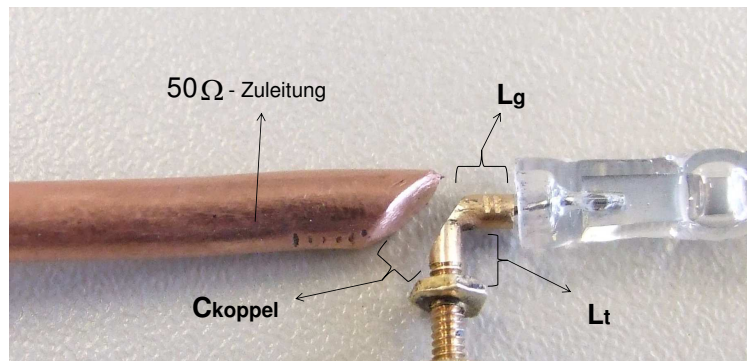


Bild 8.15: Foto der Innenkomponenten der ersten 2006 gefertigten HF-Beamerlampe

In einem nur einjährigen Forschungsprojekt wurde die erste in einer Diplomarbeit entwickelten Lampe optimiert. Die Resultate im Vergleich zu einer Standard-Beamerlampe sind in der Tabelle 8.16 zusammengefasst.

Eigenschaften	Referenzlampe: Philips TOP 120 W / 132 W 1.0	Mikroplasma-Lampe: OSRAM PVIP 120 W / 132 W 1.0 modifiziert
Lichtstrom [lm]	7825	8521
Lampenleistung [W]	132	149
Lampeneffizienz [lm/W]	60,2	57,2
Leuchtdichte [Gcd/m <sup>2</sup> ]	2,59	2,79
Farbwiedergabeindex Ra [%]	62,5	66,8
Anlaufzeit bei Kaltzündung [s]	55	16
Wieder- Zündung nach Betrieb [s]	ca. 120	ca. 0 – 40

Bild 8.16: Resultate der HF-Beamerlampe nach dem Jahr der Entwicklung

Bei der Standard treten am Anfang und am Ende der Bogenentladung die hellsten Leuchtpunkte auf. Auf einem dieser beiden Punkte wird die Beameroptik fokussiert. Folglich wird nur 50 % der Lichtleistung genutzt. Der sehr große Vorteil dieser HF-Beamerlampe ist, dass diese nur einen sehr starken Leuchtpunkt aufweist und somit der Beamer zusätzlich einen merklich verbesserten Wirkungsgrad aufweist.

The last application presented is the new RF driven low pressure discharge lamp. In this case, an electrodeless demonstrator was realized using standards illumination gases (Fig. 8.17). This actual lamp is a quick-starter with a freedom in the design. The target of the following research work is an environmental friendly low pressure discharge lamp with a nearly continuous visible spectrum for consumer applications.



Bild 8.17: First demonstrator of an electrodeless low pressure discharge lamp operating at 2.45 GHz.

### 8.6.3 Plasmastrahler

Es gibt nur von zwei Unternehmen Plasmastrahler, die mit einem 2.45 GHz-Signal betrieben werden. Als erstes brachte das Unternehmen Aurion einen Strahler mit einer Mikrowelleneingangsleistung von rund 10 W an den Markt. Seit kurzen werden vom Spin-Off der FH Aachen (HHF-Technik) verschiedene atmosphärischen Strahler eingeführt, die bis 200 W und darüberhinaus einsetzbar sind.

Einer der ersten Plasmastrahler, die an der FH Aachen entwickelt wurden, zeigt Bild 8.18 bei einer einfallenden Mikrowellenleistung von 100 W.



Bild 8.18: Vielfältig einsetzbarer Plasmastrahler (hier Prozessgas: Luft, 100 W und breite Öffnung)

Die physikalischen Vorteile der 2.45 GHz-Plasmen (Mikrowellenplasmen oder Mikroplasmen) für die Anwender wurden in vielen Veröffentlichungen nachgewiesen. Diese neuen Strahler bieten nunmehr Wissenschaftlern wie auch praktischen Anwendern die Möglichkeit diese Vorteile für eine Vielzahl der möglichen Einsatzgebieten zu nutzen. Eigenschaften der Mikrowellen-Plasmastrahler im Kurzüberblick:

- Atmosphärisches 2.45 GHz-Plasma mit Leistungen bis 200 W
- Einsetzbar für fast alle Gase
- Linien- und Flächenstrahler
- Bestens hand- und robotertauglich (echt, 100 % potentialfrei)
- Aktivierung / Reinigung von diversen Materialien
- Sehr geringer Energiebedarf
- Wartungs- und verschleißfrei
- Kleine und handliche Bauform

Bereits die Bild der HF-Zündkerze zeigten den großen Unterschied zwischen einem Plasma das durch eine Bogenentladung entsteht und einem Plasma das durch einem 2.45 GHz-Signal erzeugt wird deutlich auf. Bei der neusten Strahlergeneration wird die reine Plasmageneration an der Elektrodenspitze genutzt. Das Gas wird durch eine Kanüle geleitet und zu 100 % durch das Plasma gedrückt. Diese Strahler sind im Bild 8.19 dargestellt.



Bild 8.19: HHF-Plasmastrahler der PC-Serie mit Kanüle

Die Tatsache, dass ein Mikroplasma nicht gegen die Masse schlägt, birgt viele Vorteile wie die absolute Potentialfreiheit und wenig Abwärmeverluste. Weiterhin entsteht ein Mikroplasma nicht durch den Elektronenaustritt und -eintritt an den Elektroden sondern nur durch eine kapazitive Ankopplung. Daher werden die Elektroden nicht so stark belastet wie bei einer Bogenentladung. Insbesondere für schwer ionisierbare Prozessgase wie Luft ist der Ionisationsgrad beim Mikroplasmastrahler viel höher als bei einem Strahler, der mit einer Bogenentladung arbeitet, da der Lichtbogen nur einen kleinen Teil des Gases ionisiert. Wissenschaftliche Untersuchungen, die bereits an 10 W-Systemen durchgeführt wurden, zeigen die große Effektivität von Mikroplasmen im technischen Einsatz. Von uns durchgeführte Spektroskopieuntersuchungen zeigen, dass an den Elektroden kein Material ins Plasma austritt. Aufgrund der geringeren inneren Aufheizung sind alle HHF-Plasmastrahler mit wartungsfreien Kupferelektrode ausgestattet.

Zusätzlich erlauben die zwei Gasanschlüsse (Bild 8.20) dem Anwender viele weitere Möglichkeiten.

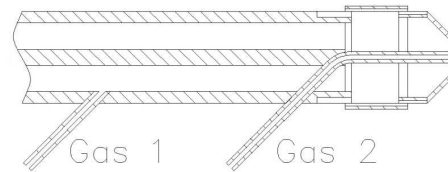


Bild 8.20: Schnittbild des Kopfteils des Plasmastrahlers der PCA-Serie mit Kanüle

#### Kurzdarstellung: Technologische Anwendungen

Plasmen werden zunehmend in allen Industriebereichen wie auch in der Medizin angewendet. Wichtige Anwendungsgebiete für kleine Leistungen (unter 100 W):

- Aktivierung von Kunststoffoberflächen zum Schweißen, Schmelzen, Lackieren, Bedrucken, Beschichten, Kleben u. v. w. Bearbeitungsschritten.
- Reinigung von diversen Metalloberflächen zum Löten, Lackieren, Bedrucken, Beschichten, Kleben, Bonden u. v. w. Bearbeitungsschritten.
- Desinfizierung und Sterilisation in der Medizintechnik von Instrumenten bis hin zu Wunden.
- Altern von Bauteilen.

zusätzliche Anwendungsgebiete für größere Leistungen (>100 W):

- Verlötung von Metallen mit Weich- oder Hartlot.
- Schmelzungen von Oberflächen und Bohrung von Löchern.
- Beschriftungen von diversen Materialien.
- Einbrennung von Lacken.
- Zerschneidung von diversen Materialien.
- Schweissung von diversen Materialien.
- Beschichtung von diversen Materialien.

Die Plasmastrahler weisen bei 200 W Mikrowellenleistung im Plasmastrahl Temperaturen von über 3400°C auf.



# Literaturverzeichnis

- [1] J. Kim and K. Terashima, "2.45 GHz microwave-excited atmospheric pressure air microplasmas based on microstrip technology," *Appl. Phys. Lett.* **86** (2005).
- [2] J. Choi, F. Iza, H. J. Do, J. K. Lee and M. H. Cho, "Microwave-excited atmospheric-pressure microplasmas based on a coaxial transmission line resonator," *Plasma Sources Sci. Technol.*, Vol. 18 025029, NO. 6 (2009).
- [3] K. Linkenheil, H. O. Ruoss, T. Grau, J. Seidel and W. Heinrich, "A novel spark plug for improved ignition in engines with gasoline direct injection (GDI)," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 33, NO. 5, October 2005.
- [4] ADS, Agilent Inc., Westlake Village, CA, USA
- [5] AGILENT TECHNOLOGIES, Schottky Barrier Diode Video Detektor, Application Note 923, 1999
- [6] BÄCHTHOLD, W., Mikrowellentechnik, Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1999
- [7] BÄCHTHOLD, W., Mikrowellenelektronik, Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 2002
- [8] BEST, R., Theorie und Anwendungen des Phase-Locked Loops, 1982
- [9] BLUME, S., Theorie elektromagnetischer Felder, Hüthig, Heidelberg, 1988
- [10] BIANCO, B., CHIABRERA, A., GRANARA, M., RIDELLA, S., Frequency Dependence of Microstrip Parameters, *Alta Frequenza XLIII* (1974), pp. 413-416
- [11] BRONSTEIN, I., SEMENDJAJEW, K., Taschenbuch der Mathematik, Harry Deutsch Verlag, Thun, Frankfurt/Main, 1987
- [12] CAGE, O. Electronic Measurements and Instrumentation, McGraw-Hill, Tokyo, 1971
- [13] CRIPPS, S.C.: RF Power Amplifiers for Wireless Communications, Artech House, Boston, 1. Auflage, 1999
- [14] PETER WRIGHT, JONATHAN LEES, JOHANNES BENEDIKT, PAUL J. TASKER, AND STEVE C. CRIPPS, A Methodology for Realizing High Efficiency Class-J in a Linear and Broadband PA, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-57, Dec. 2009, pp. 3196-3204
- [15] DETLEFSEN, J., SIART, U., Grundlagen der Hochfrequenztechnik, Oldenbourg Verlag, München, 2003
- [16] ENGEN, G.F., HOER, C.A., Thru-Reflect-Line: An Improved Technique for Calibrating the Dual Six Port Automatic Network Analyzer, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-27, Dec. 1979, pp. 987-993
- [17] ERKENS, H., HEUERMANN, H., Blocking Structures for Mixed-Mode-Systems, *European Microwave Conf.*, Amsterdam, Oct. 2004, pp. 297-300

- [18] EUL, H.-J., Methoden zur Kalibrierung von heterodynen und homodynen Netzwerkanalysatoren, Dissertationsschrift, Institut für Hoch- und Höchstfrequenztechnik, Ruhr-Universität Bochum, 1990
- [19] EUL, H.-J., SCHIEK, B., A Generalized Theory and New Calibration Procedures for Network Analyzer Self-Calibration, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-39, Apr. 1991, pp. 724-731
- [20] FERRERO, A., PISANI, U., KERWIN, K.J., A New Implementation of a Multiport Automatic Network Analyzer, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 40, Nov. 1992, pp. 2078-2085
- [21] FRANZ, G., Niederdruckplasmen in Mikrostrukturtechnik, Springer Verlag, 2004, 3. Auflage
- [22] GÄRTNER, U., Ein homodynes Streuparametermessverfahren mit digitaler Phasenmodulation für den Mikrowellenbereich, Dissertationsschrift, Institut für Hoch- und Höchstfrequenztechnik, Ruhr-Universität Bochum, 1986
- [23] GOLDBERG, B.-G., Digital Techniques in Frequency Synthesis, 1998
- [24] GONZALEZ G.: Microwave Transistor Amplifiers, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2. Auflage, 1997
- [25] VON GRONOW, M., HEUERMANN, H., KLING, R., Neue ultrakompakte Leuchtstofflampen mit integriertem HF-Transformator, Licht2010, Wien, Oct. 2010
- [26] GRONAU, G., Rauschparameter- und Streuparameter-Messtechnik, Fortschritte der Hochfrequenztechnik, Band 4, Verlagsbuchhandlung Nellissen-Wolff, Aachen, 1992
- [27] GRONAU, G., Höchstfrequenztechnik, Springer, Berlin, 2001
- [28] HEUERMANN, H., Sichere Verfahren zur Kalibrierung von Netzwerkanalysatoren für koaxiale und planare Leitungssysteme, Dissertationsschrift, Institut für Hochfrequenztechnik, Ruhr-Universität Bochum, 1995, ISBN 3-8265-1495-5
- [29] HEUERMANN, H., Hochfrequenztechnik. Komponenten für High-Speed- und Hochfrequenzschaltungen, Vieweg+Teubner-Verlag, ISBN 978-3-8348-0769-4, 2. Auflage, 2009
- [30] HEUERMANN, H., Calibration of a VNA Without a Thru Connection for Non-Linear and Multi-Port Measurements, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Nov. 2008
- [31] HEUERMANN, H., Verfahren zur Kalibrierung von Netzwerkanalysatoren ohne Durchverbindungen zur Messung von linearen und nichtlinearen elektrischen Parameter, Rohde&Schwarz-Patent DE102007027142.7 und PCT/EP2007/005215 vom 13.06.2007
- [32] HOFFMANN, M.H.W., Hochfrequenztechnik, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1997
- [33] HOPWOOD J., F. IZA, S. COY AND D. B. FENNER, A microfabricated atmospheric-pressure microplasma source operating in air, J. Phys. D: Appl. Phys., 38, 2005
- [34] IBRAHIM, I., HEUERMANN, H., Improvements in the Flicker Noise Reduction Technique for Oscillator Designs, European Microwave Conf., Rom, Oct. 2009
- [35] INFINEON, Halbleiter, Publicis Corporate Publishing, Erlangen, 2004
- [36] ITOH T.; HADDAD G.; HARVEY J.: RF Technologies for Low Power Wireless Communications, Wiley-Interscience, New York, 1. Auflage, 2001
- [37] JANSEN, R.H., KIRSCHNING, M., Arguments and an Accurate Mathematical Model for the Power-Current Formulation of Microstrip Characteristic Impedance, Arch. Elektronik u. Übertragungstechn. 37, 1983
- [38] JANSSEN, R., Streifenleiter und Hohlleiter, Hüthig-Verlag, Heidelberg, 1992



- [39] KARK, K., Antennen und Strahlungsfelder, Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2004
- [40] KAJFEZ, D., GUILLON, P., Dielectric Resonators, Artech House, Dedham, 1986
- [41] KAWASAKI, K., ET. AL. An Octa-Push Oscillator at V-Band, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-58, July 2010
- [42] KUMMER, M., Grundlagen der Mikrowellentechnik, VEB Verlag Technik, Berlin, 1989
- [43] KUROKAWA, Power Waves and the Scattering Matrix, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT, Mar. 1965, pp. 194-202
- [44] MATTHEI, G., YOUNG, L., JONES, E., Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures, McGraw-Hill Verlag, New York, 1980
- [45] MAAS, S. A., Nonlinear Microwave Circuits, IEEE Press, New York, 1996
- [46] MAAS, S. A., Microwave Mixers, Artech House, London, 1993
- [47] MENZEL, E., Homodyne und heterodyne Netzwerkanalysatoren für breitbandige Anwendungen im Hochfrequenzbereich, Dissertationsschrift, Institut für Hochfrequenztechnik, Ruhr-Universität Bochum, 1992
- [48] MILLER, Technique Enhances the Performance of PLL Synthesizers, Microwave & RF, Jan. 1993
- [49] MÖLLER, M., Entwurf und Optimierung monolithisch integrierter Breitbandverstärker in Si-Bipolartechnologie für optische Übertragungssysteme, Dissertationsschrift, Ruhr-Universität Bochum, 1999
- [50] MAXIM, Datenblatt zum MAX4003, 0.1 - 2.5 GHz Leistungsdetektor, 19-2620; Rev 1, 03.2003
- [51] PARISI, S. J., 180° Lumped Element Hybrid, IEEE Microw. Theory Tech. - Sym. Digest, 1989, pp. 1243-1246
- [52] PETERS, N., SCHMITZ, TH., SADEGHFAM, A., HEUERMANN, H. Concept of Balanced Antennas with Load-Invariant Base Impedance Using a Two Element LC-Coupler, Proceedings of the European Microwave Association, 2005
- [53] PHILIPPOW, E., Grundlagen der Elektrotechnik, VEB Verlag Technik, Berlin, 1988
- [54] RAZAVI, B., Design of Analog Integrated Circuits, McGraw-Hill-Verlag, ISBN 0-07-118839-8, 2001
- [55] RAICU, D., Multiterminal Distributed Resistors as Microwave Attenuators, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 42, No. 7, July 1994, pp. 1140-1148
- [56] RHODES, J.D., Theory of Electrical Filters, Wiley Verlag, New York, 1985
- [57] RILEY, COPELAND AND KWASNIEWSKI, Digital PLL Frequency Synthesizers, 1983 Delta-Sigma Modulation in Fractional-N Frequency Synthesis, IEEE Journal of Solid State Circuits, Vol. 28, No. 5, May 1993
- [58] ROHDE, U., NEWKIRK, D., RF/Microwave Circuit Design for Wireless Applications, Wiley Verlag, New York, 2000
- [59] ROHDE, U.L., Digital PLL Frequency Synthesizers: Theorie and Design, Prentice Hall, 1982
- [60] ROHDE, U.L., Microwave and Wireless Synthesizers, Wiley-Interscience, 1997
- [61] ROHDE & SCHWARZ, Applikationssoftware R&S ZVR-K11, (<http://www.rohde-schwarz.com/>)
- [62] ROSENBERGER HOCHFREQUENZTECHNIK, General Catalogue, Tittmoning, 2004

- [63] ROSENBERGER HOCHFREQUENZTECHNIK, Präzise Streuparametermessungen auf planaren Schaltungen, Applikationsschrift TI010, Tittmoning, 1996
- [64] ROSENBERGER HOCHFREQUENZTECHNIK, Streuparametermessungen in koaxialen Leittersystemen, Applikationsschrift TI020, Tittmoning, 1996
- [65] SAAL, R., ENTENMANN, W., Handbuch zum Filterentwurf, Hüthig-Verlag, Heidelberg, 1988
- [66] SADEGHFAM, A., HEUERMANN, H., Novel Balanced Inductor for Compact Differential Systems, European Microwave Conf., Amsterdam, Oct. 2004, pp. 709-712
- [67] SCHIEK, B., Grundlagen der Hochfrequenz-Messtechnik, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1999
- [68] SCHIEK, B., SIWERIS, H.-J., Rauschen in Hochfrequenzschaltungen, Hüthig Verlag, Heidelberg, 1990
- [69] SCHIEL, J.-CH., TATU, S. O., WU, K., BOSISIO R. G., Six-Port Direct Digital Receiver (SPDR) and Standard Direct Receiver (SDR) Results for QPSK Modulation at High Speeds, MTT-S International Microwave Symposium, Philadelphia, 2003, pp. 931-935
- [70] SCHNEIDER, M.V., Microstrip Lines for Microwave Integrated Circuits, Bell Syst. Tech. J. 48, 1969, pp. 1421-1444
- [71] SCHNEIDER, J., Entwicklung eines homodynem Netzwerkanalysators für den Mikrowellenbereich 26,5-40 GHz, Dissertationsschrift, Institut für Hoch- und Höchstfrequenztechnik, Ruhr-Universität Bochum, 1987
- [72] SIMONYI, K., Theoretische Elektrotechnik, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1989
- [73] SINNESBICHLER, F., Hybrid Millimeter-Wave Push-Push Oscillators Using Silicon-Germanium HBTs, IEEE Trans. on Microw. Theory and Tech., Vol. 51, No. 2, Feb. 2003
- [74] SOKAL, N. O., SOKAL, A. D., Class-E - A New Class of High Efficiency Tuned Single-Ended Power Amplifier, IEEE J. Solid State Circuits, SC-10, No. 3, June 1975, pp. 168-176
- [75] SPRINGER, A., MAURER, L., WEIGEL, R., RF System Concepts for Highly Integrated RFICs for W-CDMA Mobile Radio Terminals, IEEE Trans. on Microw. Theory and Tech., Vol. 50, No. 1, Jan. 2002
- [76] STENGEL, B., THOMPSON, B., Neutralized Differential Amplifiers using Mixed-Mode S-Parameters, IEEE MTT-S Digest, 2003
- [77] STOLLE, R., HEUERMANN, H., SCHIEK, B., Auswertemethoden zur Präzisions-Entfernungsmessung mit FMCW-Systemen und deren Anwendung im Mikrowellenbereich, tm - Technisches Messen, Heft 2/95, R. Oldenbourg Verlag, München, Feb. 1995, pp. 66-73
- [78] SERENADE, Ansoft Inc., Paterson, N.J., USA
- [79] SÜSSE, R., Theoretische Grundlagen der Elektrotechnik 1, Teubner Verlag, Wiesbaden, 2005
- [80] SWANSON, D.G., HOEFER, W., Microwave Circuit Modeling Using Electromagnetic Field Simulation, Artech House-Verlag, New-York, 2004
- [81] UNBEHAUEN, H., Regelungstechnik I, Klassische Verfahren zur Analyse und Synthese linearer kontinuierlicher Regelsysteme, überarbeitete und erweiterte Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig / Wiesbaden 1992
- [82] UNBEHAUEN, H., Regelungstechnik II, Zustandsregelungen, digitale und nichtlineare Regelsysteme, 6. durchgesehene Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig / Wiesbaden 1993

- 
- [83] UNGER, H.-G., HARTH, W., Hochfrequenz-Halbleiterelektronik, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1972
  - [84] UNGER, H.-G., SCHULTZ, W., Elektronische Bauelemente und Netzwerke I, Vieweg Verlag, Braunschweig
  - [85] UNGER, H.-G., Elektromagnetische Wellen auf Leitungen, Hüthig Verlag, Heidelberg
  - [86] VAN DER HEIJDEN, M. P., SPIRITO, M., DE VREEDE, L. C. N., VAN STRATEN, F., BURGHARTZ, J. N., A 2 GHz High-Gain Differential InGaP HBT Driver Amplifier Matched for High IP<sub>3</sub>, IEEE MTT-S Digest, 2003
  - [87] VERSPECHT, J., ROOT, D. E., Polyharmonic Distortion Modeling, IEEE microwave magazine, Juni 2006
  - [88] VOGES, E., Hochfrequenztechnik, Hüthig Verlag, Heidelberg, 2003
  - [89] WADELL, B. C., Transmission Line Design Handbook, Artech House, Boston, 1991
  - [90] WHEELER, H. A., Transmission-Line Properties of Parallel Strips Separated by a Dielectric Sheet, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-13, 1965, pp. 112-185
  - [91] WHEELER, H. A., Transmission-Line Properties of a Strip on a Dielectric Sheet on a Plane, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-25, 1977, pp. 631-647
  - [92] WILLIAMS, A. B., *Electronic Filter Design Handbook*, New York, McGraw-Hill
  - [93] WILTRON, Microstrip Measurements with the Wiltron 360 Vector Network Analyzer, Application Note AN360-7, Jan. 1990.
  - [94] ZINKE O., BRUNSWIG H., Lehrbuch der Hochfrequenztechnik, Band 1 + Band 2, Springer Verlag, Berlin, 1993

## Verzeichnis häufig verwendeter Formelzeichen und Kürzel

$A$	Fläche	$\text{Im}\{\}$	Imaginärteiloperator
$[\mathbf{A}]$	A-Kettenmatrix von Zweitorelementen	$i$	komplexer Strom auf $Z_0$ bezogen
$A_{ij}$	Elemente der Matrix $[\mathbf{A}]$	$i, j$	Laufindizes für Matrix- und Vektorelemente, die von $n=1$ bis zur jeweiligen Dimension reichen
$[\mathbf{ABCD}]$	ABCD-Kettenmatrix von Zweitorelementen	$i(t)$	Strom im Zeitbereich
ADC	Analog-Digital-Wandler	$J$	Stromdichte
AGC	schaltbarer Verstärker	$k$	Wellenzahl, Stabilitätszahl (k-Faktor), Koppelfaktor von Resonatoren
$a_i, b_i$	komplexe Wellengrößen (Mono-Mode-Fall)	$L, L'$	Induktivität, Induktivität pro Längeneinheit
$a_i^+, b_i^+$	komplexe Wellengrößen eines Gleichaktmodes	$\ell$	Leitungslänge
$a_i^-, b_i^-$	komplexe Wellengrößen eines Gegentaktmodes	$\lg()$	Logarithmus auf der Basis 10
$B$	Suszeptanz, Blindleitwert	$M$	Wellensumpf (engl. Match)
$[\mathbf{B}]$	inverse Kettenmatrix von Zweitorelementen	$M$	Magnetisierung
$B_{ij}$	Elemente der Matrix $[\mathbf{B}]$	$M_{ij}$	M-Parameter bzw. Mixed-Mode-Parameter
$b_0$	komplexe Generatorwelle	$[\mathbf{M}]$	M-Parametermatrix bzw. Mixed-Mode-Parametermatrix
$C, C'$	Kapazität, Kapazität pro Längeneinheit	MAG	maximal verfügbarer Leistungsgewinn
$c_0$	Lichtgeschwindigkeit	$m$	Masse
DUT	Messobjekt (engl. Device Under Test)	$N$	unbekannter Zweitorstandard
$\det()$	Determinante einer Matrix	$O$	Leerlauf (engl. Open)
$E$	elektrische Feldstärke	$P$	elektrische Leistung
$F$	Rauschzahl	$P_w$	elektrische Wirkleistung
$F(j\omega)$	Allgemeine Funktion im Frequenzbereich	$[\mathbf{P}]$	Propagationsmatrix
$f$	Frequenz	$p$	elektrische Länge
$f_r$	Resonanzfrequenz	$Q$	Güte von Bauteilen und Resonatoren, Blindleistung
$f(t)$	Allgemeine Funktion im Zeitbereich	$Q_0$	unbelastete Güte eines Resonators
$G, G'$	Wirkleitwert, Wirkleitwert pro Längeneinheit, Gewinn	$Q_L$	belastete Güte eines Resonators
$G_{av}$	verfügbarer Gewinn	$R, R'$	Wirkwiderstand, Wirkwiderstand je Längeneinheit
$H$	magnetische Feldstärke	$\text{Re}\{\}$	Realteiloperator
$h$	Plancksche Konstante	$\text{Rg}()$	Rang einer Matrix
$I$	komplexer Strom	$r_x$	Reflexionsparameter von Eintor- und Klemmenelementen
$[\mathbf{I}]$	Einheitsmatrix		

$S$	Kurzschluss (engl. Short)	$Z$	Impedanz, Scheinwiderstand
$S_{ij}$	Streuparameter	$Z_0$	Wellenwiderstand, Bezugsimpedanz (i.d.R. $50 \Omega$ )
$S$	Poynting-Vektor, Leistungsdichte	$Z_E, Z_e$	Eingangswiderstand oder -impedanz
$[S]$	Streuparametermatrix	$Z_{even}, Z_+$	Gleichtaktimpedanz
$[S]^{-1}$	Inverse (Streuparameter-) Matrix	$Z_L$	Wellenwiderstand einer Leitung (i.d.R. $50 \Omega$ )
$[S]^T$	Transponierte (Streu-) Matrix	$Z_{odd}, Z_-$	Gegentaktimpedanz
$[S]^*$	Konjugiert komplexe (S-) Matrix	$[Z]$	Z-Widerstandsmatrix von Zweitorelementen
spur ()	Spur einer Matrix	$z_x$	Impedanzparameter von Eintor- und Klemmenelementen
$T, T$	Zeitintervall, Durchverbindung (engl. Thru bzw. Through), Temperatur	$\alpha, \beta$	Koeffizienten mit wechselner Bedeutung
$T_e$	Effektive Rauschtemperatur	$\alpha$	Dämpfungskonstante oder -belag einer Leitung
$t$	Zeitvariable, Transformationsverhältnis eines Impedanztransformators	$\beta$	Phasenkonstante oder -belag einer Leitung
$U$	komplexe Spannung	$\gamma$	komplexe Ausbreitungs- oder Fortpflanzungskonstante einer Leitung
$u$	komplexe Spannung auf $Z_0$ bezogen, normierte komplexe Spannung	$\gamma \ell$	komplexe elektrische Länge
$u(t)$	Spannung im Zeitbereich	$\Delta()$	Determinante einer Matrix
$\ddot{u}$	Übersetzungsverhältnis der Ströme und Spannungen eines Transformators	$\delta$	Eindringtiefe, Skintiefe
$V$	Volumen	$\delta(\omega)$	Dirac'sche Deltafunktion als Funktion der Frequenz
VNA	vektoriell messender Netzwerkanalysator	$\epsilon$	Dielektrizitätskonstante
$v$	Ausbreitungsgeschwindigkeit	$\epsilon_0, \epsilon_r$	absolute und relative Dielektrizitätskonstante
$v_{gr}$	Gruppengeschwindigkeit	$\eta$	Wirkungsgrad
$v_p$	Leistungsverstärkung	$\kappa$	(spezifische) Leitfähigkeit
$v_{ph}$	Phasengeschwindigkeit	$\lambda$	Wellenlänge
$W_{e,m}$	elektrische bzw. magnetische Feldenergie	$\mu$	Permeabilitätskonstante
$w$	Weite	$\mu_n, \mu_p$	Beweglichkeit von Elektronen bzw. Löchern
$X$	Reaktanz, Blindwiderstand	$\rho$	spezifischer Widerstand, Reflexionswert, Selbstkalibriergröße
$Y$	Admittanz, Scheinleitwert	$\sigma$	spezifische Leitfähigkeit
$[Y]$	Y-Leitwertmatrix von Zweitorelementen	$\tau$	Laufzeitvariable
$y_x$	Admittanzparameter von Eintor- und Klemmenelementen	$\varphi$	Phase
		$\Omega$	Kreisfrequenz, Frequenz, normierte Frequenz
		$\Omega_i$	Feste Kreisfrequenzen
		$\omega$	Kreisfrequenz, Frequenz