

- ¹ F. J. COMES and F. SPEIER, Z. Naturforsch. **26a**, 1998 [1971].
² E. W. McDANIEL, V. ČERMÁK, A. DALGARNO, E. E. FERGUSON, and L. FRIEDMAN, Ion Molecule Reactions, Wiley, Interscience, New York 1970.
³ G. B. HASTED, in: Advances in Atomic and Molecular Physics, Vol. IV, Ed. D. R. BATES and I. ESTERMAN, Academic Press, New York 1968.
⁴ G. GIOMOUSIS and D. P. STEVENSON, J. Chem. Phys. **29**, 294 [1958].
⁵ D. RAPP and W. E. FRANCIS, J. Chem. Phys. **37**, 2631 [1962].
⁶ M. J. HAUGH and K. D. BAYES, Phys. Rev. A **2**, 1778 [1970].
⁷ J. F. PAULSON, R. L. MOSHER, and F. DALE, J. Chem. Phys. **44**, 3025 [1966].
⁸ R. JOHNSON, H. L. BROWN, and M. A. BIONDI, J. Chem. Phys. **52**, 5080 [1970].
⁹ L. FRIEDMAN, Ann. Rev. Phys. Chem. **19**, 273 [1969]; Adv. Chem. Ser. **58**, 332 [1966].
¹⁰ R. C. DUNBAR, J. Chem. Phys. **47**, 5445 [1967].

Einige Bemerkungen über die Erzeugung von elektromagnetischen Wanderwellen und stehenden Wellen zur induktiven Plasmabeschleunigung

A. MEERT

Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V.
 Institut für Energiewandlung und Elektrische Antriebe, Stuttgart

(Z. Naturforsch. **27 a**, 776—780 [1972]; eingegangen am 12. Februar 1972)

Some Comments on the Generation of Travelling and Standing Electromagnetic Waves for Inductive Plasma Acceleration

Some comments are made for the generation of e.m. travelling and standing waves used for inductive plasma acceleration. Resulting from a simple mathematical formulation the different features lead to a non-conventional method for travelling wave generation, which is compared with the basic method — i. e. the standing wave generation — with regard to Ohmic losses and magnetic energy density.

1. Einleitung

Seit vielen Jahren werden Untersuchungen ange stellt, ein Plasma mittels elektromagnetischer Felder induktiv zu beschleunigen. Das Ziel dieser Unter suchungen ist, neuartige elektrodenlose Beschleuni ger für hohe Ausströmungsgeschwindigkeiten zu ent wickeln und damit eine Reihe von neuen Anwen dungsmöglichkeiten zu eröffnen.

Die Beschleunigung von Plasmen mit Wander wellenanlagen wird in der Literatur ausführlich be handelt (s. z. B. ¹⁻³). Systeme mit stehenden Wel len zur Plasmabeschleunigung werden im hiesigen Institut untersucht (z. B. ^{4, 5}).

Auf die Beschleunigung von Plasmen selbst — mittels Wanderwellen oder stehenden Wellen — wird hier daher nicht eingegangen, sondern es wer den hier im wesentlichen technisch-physikalische Un terscheidungsmerkmale bei der praktischen Erzeu gung von Wanderwellen und stehenden Wellen er läutert.

Die bereits angewandten Methoden zur Erzeu gung von Wanderwellen mit Phasengeschwindig keiten von einigen 100 km/sec und Wellenlängen im dm-Bereich bestehen darin, daß man entweder eine Laufzeitkette benutzt (z. B. ⁶) oder ein Spulensystem,

wobei jede einzelne Spule mit einer zu den benach barten Spulen zeitlich phasenverschobenen Strom versorgung versehen wird (z. B. ⁷).

Bei Anwendung einer Laufzeitkette muß das Netz werk mit einem Abschlußwiderstand abgeschlossen werden. Die nicht an das Plasma abgegebene Energie muß durch diesen Widerstand absorbiert wer den, um Reflexionen zu vermeiden.

Bei den gepulsten Anlagen wird praktisch die gesamte eingespeiste Energie im Abschlußwiderstand der Kette verbraucht. Der Wirkungsgrad ist somit sehr schlecht. Da sich die energetischen Vorgänge je doch in sehr kurzen Zeiten (μ sec-Bereich) abspie len, sind die erzielten Leistungen so groß, daß im mer noch genug Leistung für die Plasmaexperimente übrig bleibt. Bei kontinuierlich arbeitenden Anlagen spielt der Wirkungsgrad jedoch eine wesentliche Rolle, da die kontinuierlich zur Verfügung stehende Leistung aus praktischen Gründen um Zehnerpoten zen kleiner ist als die beim Pulsbetrieb auftreten den Leistungen.

Eine wesentliche Verbesserung dieses Wirkungs grades kann durch eine Rückkopplung erzielt wer den, deren technische Realisierung sich als schwierig und aufwendig erweist (Jülicher Arbeiten, z. B. ⁸).



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

This work has been digitized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition "no derivative works"). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

Bei Anwendung einer linearen Anordnung von Spulen mit Mehrphasen-Systemen zur Stromversorgung jeder einzelnen Spule entfallen diese Nachteile. Dafür ist ein großer elektronischer Aufwand erforderlich, um die Phasenwinkel zwischen den einzelnen Sendern konstant zu halten.

Bei Beschleunigern mit stehenden Wellen treten derartige Schwierigkeiten nicht auf, und der technische Aufwand zur Erzeugung der stehenden Welle ist infolge des einfacheren Aufbaues geringer.

2. Überlegungen zu Unterscheidungsmerkmalen

Die allgemeinste mathematische Formulierung einer stehenden Welle lautet:

$$\mathbf{B}_{\text{st}}(\mathbf{r}, t) = T(t) \cdot \mathbf{R}(\mathbf{r}). \quad (1)$$

Diese Definition einer stehenden Welle ist in Übereinstimmung mit der in der Literatur gebrauchten Bezeichnung für eine Lösung einer total-hyperbolischen Differentialgleichung⁹.

Das Ortsvektorfeld $\mathbf{R}(\mathbf{r})$ unterliegt der multiplikativen Einwirkung einer zeitabhängigen Skalarfunktion $T(t)$.

Das Feld $\mathbf{R}(\mathbf{r})$ wird durch die Geometrie des Spulensystems vorgegeben, während die Funktion $T(t)$ auch noch von der Energiequelle mitbestimmt wird (beispielsweise gedämpfte Sinusfunktion bei Benutzung einer Kondensatorbatterie).

Eine stehende Welle erhält man im einfachsten Fall, indem man eine Spule oder Schleife an eine Stromquelle anschließt. Durch geeignete Überlagerung mehrerer stehender Wellen kann man auch fortschreitende Wellen erzeugen. Im folgenden Fall soll daher eine stehende Welle der Form Gl. (1) als mathematisches Element aufgefaßt werden, das durch entsprechende Superposition mehrerer solcher Elemente wiederum neue Wellenfunktionen zu bilden ermöglicht. Insbesondere lassen sich auch fortschreitende Wellen (z. B. Wanderwellen) durch ein solches Vorgehen bilden. Im folgenden wird dieses Erzeugungsprinzip für Wanderwellen als „statische Erzeugung“ bezeichnet.

Auch die sich in einem Leitersystem fortpflanzende Wanderwelle kann (im eingeschwungenen Zustand) letztlich als Superpositionseffekt einzelner stehender Wellen aufgefaßt werden. Jedes Element des Leiters ist dan formal als Schleife mit eingebauter Quelle darstellbar. In Wirklichkeit findet in dem Leitersystem jedoch eine gerichtete Wellen-

ausbreitung mit der Geschwindigkeit $v = 1/\sqrt{l c}$ (l Induktivität und c Kapazität pro Längeneinheit) statt. Diese Art der Wanderwellenerzeugung soll als „dynamische Erzeugung“ bezeichnet werden.

Man kann also die Erzeugung von Wanderwellen nach zwei prinzipiellen Unterscheidungsmerkmalen einteilen:

a) Bei der *dynamischen Erzeugung* der Wanderwelle (verzerrungsfreie Leitung bzw. Kettenleiter) ist die Wellengeschwindigkeit eine apparative Konstante (l und c), unabhängig von der benutzten Frequenz. Die Wellenlänge ist umgekehrt proportional der Frequenz. Durch 100% Reflexion läßt sich auch eine stehende Welle erreichen.

b) Bei der *statischen Erzeugung* der Wanderwelle (z. B. mit einzelnen Sendern und Spulen) ist die Wellenausbreitung ein resultierender Effekt, hervorgerufen durch die Superposition einzelner stehender Wellenkomponenten. Hier ist die Wellenlänge eine apparative Konstante, und die Wellengeschwindigkeit ist jetzt proportional der angewandten Frequenz.

Bei der dynamischen Erzeugung ist der realisierbare Bereich der Phasengeschwindigkeit technisch bedingt nach unten begrenzt. Die Realisierung von einigen hundert km/sec erfordert bereits die Entwicklung geeigneter Kondensatoren für den Kettenleiter. Diese Schranke entfällt bei der statischen Erzeugung, da sich die Phasengeschwindigkeit hier durch Herabsetzen der Generatorfrequenz verringern läßt. Hierbei wird insbesondere an die Realisierung des Geschwindigkeitsbereiches für die Wiedereintrittssimulation gedacht.

Diese Überlegungen gelten auch im Hinblick auf sinusförmige stehende Wellen. Für die Erzeugung von stehenden Wellen hat die statische Methode gegenüber der dynamischen Methode – welche eine 100-proz. Reflexion erfordert – noch einen wesentlichen Vorteil: Bei Übergang von sinusförmigen stehenden Wellen auf andere stehende beliebige Wellenfunktionen einschließlich der nichtperiodischen, so, wie sie sich beispielsweise aus Optimierungsrechnungen ergeben, vergrößert sich der technische Aufwand nicht, während die dynamische Methode (mit Reflexion) praktisch undurchführbar ist.

Nachfolgend wird daher nur die statische Erzeugung von stehenden Wellen und Wanderwellen behandelt.

3. Quantitative Beschreibung

Zur Vereinfachung werden hier nur lineare, rotationssymmetrische Spulensysteme betrachtet, so daß der Vektor \mathbf{R} [Gl. (1)] keine azimutale Feldkomponente hat. Der Einfachheit halber wird nur die axiale Feldkomponente zur weiteren Beschreibung benutzt.

Wählt man

$$T(t) = \sin(\omega t + \varphi_t), \quad (2)$$

$$R(\mathbf{r}) \mathbf{l}_z = B_0 \sin(kz + \varphi_z) \mathbf{l}_z \quad (3)$$

mit φ_t und φ_z beliebig, so erhält man eine stehende Welle

$$B_{si} = B_0 \sin(kz + \varphi_{zi}) \sin(\omega t + \varphi_{ti}) \quad (4)$$

(i ist ein Index, welcher für die Superposition benutzt wird). In der in unserem Institut aufgebauten Anordnung wird der örtliche Sinusverlauf durch variable Windungsentfernung entlang eines zylindrischen Spulenkörpers erzeugt. Die dieses Feld erzeugende Spule wird im folgenden kurz „Sinusspule“ genannt (Abb. 1).

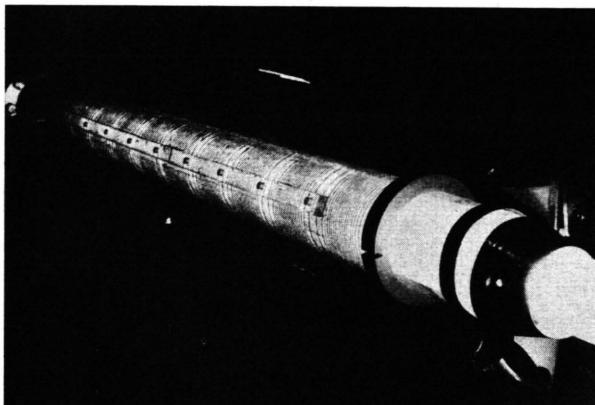


Abb. 1.

Die hinlaufende Wanderwelle

$$B_{HW} = B_0 \sin(\omega t - kz + \varphi_{HW}) \quad (5)$$

bzw. die rücklaufende Wanderwelle

$$B_{RW} = B_0 \sin(\omega t + kz + \varphi_{RW}) \quad (6)$$

folgt durch geeignete Superposition von zwei stehenden Wellen der Form (4). Formal ist also

$$B_W = \sum_i B_{si}. \quad (7)$$

Diese Formel gibt gleichermaßen die prinzipielle Methode zur praktischen Erzeugung der Wander-

welle an. Beispielsweise folgt für B_{HW} mit $\varphi_{HW} = 0$

$$\begin{aligned} B_{HW} &= B_0 \sin(\omega t - kz) = B_{s1} + B_{s2} \\ &= B_0 \sin \omega t \sin(kz + \frac{1}{2}\pi) + B_0 \sin(\omega t - \frac{1}{2}\pi) \sin kz \end{aligned} \quad (8)$$

mit

$$\varphi_{t1} = 0, \quad \varphi_{t2} = -\frac{1}{2}\pi, \quad \varphi_{z1} = \frac{1}{2}\pi, \quad \varphi_{z2} = 0.$$

Aus dieser Darstellung (8) ist ersichtlich, daß man mit 2 „Sinusspulen“, die räumlich um $\lambda/4$ verschoben sind und deren Stromquellen eine zeitliche Phasenverschiebung von 90° haben, eine Wanderwelle ohne die in der Einleitung erwähnten Schwierigkeiten erzeugen kann. Die Einfachheit dieser Methode liegt darin, daß jede einzelne Spule von vornherein bereits ein örtlich sinusförmiges Feld liefert.

In ¹⁰ wird davon ausgegangen, daß die stehende Welle mit der Amplitude B_0 sich aus zwei entgegengesetzt laufenden Wellen mit den Amplituden $B_0/2$ ergibt. Hieraus wird der Schluß gezogen, daß die Stromstärke des stehenden Wellen-Systems vergleichsweise verdoppelt werden müßte, um die gleiche Leistungsdichte wie bei einem mit reiner Wanderwelle arbeitenden System zu erzielen. Folglich wären unter diesen Voraussetzungen auch die ohmschen Verluste des stehenden Wellen-Systems viermal so groß wie beim Wanderwellensystem.

Aus Gl. (8) entnimmt man, daß der Aufwand zur Erzeugung einer Wanderwelle größer ist als zur Erzeugung einer stehenden Welle. Die Wanderwelle erfordert prinzipiell mehrere zeitphasenverschobene Stromquellen und ortphasenverschobene Spulen; der Materialaufwand beträgt 2 phasenverschobene Sinusspulen, ansonsten (bei Verwendung von Einzelschleifen oder normalen Solenoiden) vergrößert sich der Aufwand erheblich (s. Einleitung).

Die stehende Welle [Gl. (1)] ergibt sich technisch sofort durch Anschluß einer Spule mit der Stromquelle. Ist die Spule eine Sinusspule, so ergibt sich eine stehende Welle der Form (4) ohne zusätzliche Maßnahmen.

Um den Erzeugungsaufwand in beiden Fällen zu vergleichen, muß man von einer gleichen Amplitude B_0 (bzw. magnetischen Energiedichte) für die stehende Welle (4) und die Wanderwelle (5) ausgehen. Aus Gl. (8) folgt dann, daß bei gleicher Stromstärke der Amplitude I_0 die ohmschen Verluste zur Erzeugung der Wanderwellen doppelt so groß sind wie die für die stehende Welle (abgesehen von zusätzlichen Verlusten bei der Wanderwelle, bedingt durch den Mehraufwand für die erforder-

liche Zeitphasenverschiebung), wenn man nur eine Sinusspule mit dem Widerstand R_0 für die stehende Welle benutzt.

Da für die Wanderwelle zwei Sinusspulen (Widerstand $2 R_0$) benötigt werden, sollte man zur Erzeugung der stehenden Welle vergleichsweise vom gleichen „Spulenaufwand“, also auch 2 Sinusspulen ausgehen, jedoch ohne Ortsphasenverschiebung. Die erzeugte Amplitudenfeldstärke ist dann $2 B_0$, und man kommt mit der Hälfte der Stromstärke $I_0/2$ aus, um die gleiche Amplitude B_0 der stehenden Welle zu erzeugen. Das bedeutet, daß die ohmschen Verluste bei der Wanderwelle viermal größer sind als bei der stehenden Welle, ausgehend vom gleichen Spulenaufwand.

Strebt man in beiden Fällen die gleiche Leistungsdichte der hinlaufenden Wanderwellenkomponenten an, so erzielt man dies unter der Annahme gleichen Spulenaufwands folgendermaßen:

- Für die Erzeugung der Wanderwelle mit der Amplitude B_0 überlagert man beide Systeme von stehenden Wellen (2 Sinusspulen) wie beschrieben bei einer Stromamplitude I_0 .
- Für die Erzeugung der stehenden Welle mit der Amplitude $2 B_0 = 2 |B_{s1}|$ überlagert man beide Systeme von stehenden Wellen mit $B_{s1} = B_{s2}$, also ohne zusätzlichen Aufwand für die Zeitphasenverschiebung und ohne Ortsphasenverschiebung bei gleicher Stromamplitude I_0 . (Eine stehende Welle mit der Amplitude $2 B_0$ hat bekanntlich einen hinlaufenden Wanderwellenanteil der Amplitude B_0 .)

Dieser Vergleich, der sich nur auf die hinlaufenden Wanderwellenkomponenten bezieht, zeigt nunmehr für beide Systeme (wenn man von gleichen Voraussetzungen hinsichtlich Spulenaufwand ausgeht und zusätzliche Verluste, bedingt durch Mehraufwand für Phasenverschiebungen, unberücksichtigt läßt) eine Gleichheit der ohmschen Verluste.

4. Technische Gesichtspunkte zur statischen Erzeugung von Wanderwellen

Die 90° -Zeitphasenverschiebung zur Erzeugung der Wanderwelle gemäß Formel (8) erfordert im Prinzip zwei Quellen. Es wird nun gezeigt, daß man unter Umständen mit nur einer Quelle auskommt.

Abbildung 2 zeigt ein Ersatzschaltbild der elektrischen Schaltung der beiden Sinusspulen, jede mit der Induktivität L und dem Widerstand R_L .

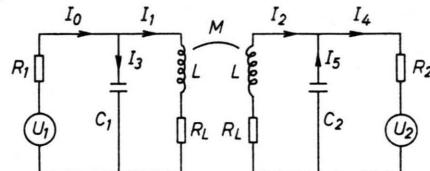


Abb. 2.

Zwischen beiden Spulen besteht eine Kopplung

$$M = k L \quad \text{für } 0 \leq k \leq 1; \quad (9)$$

k enthält implizit die örtliche Phasenverschiebung. U_1 und U_2 sind zwei verschiedene Generatoren mit zunächst als vernachlässigbar angenommenen Innenwiderständen, R_1 und R_2 sind zwei Serienwiderstände (frei wählbar), C_1 und C_2 sind zusätzlich notwendige Schaltelemente, um die gewünschte Phasendrehung verwirklichen zu können.

In komplexer Schreibweise ergibt sich das Gleichungssystem

$$I_0 = I_1 + I_3, \quad I_4 = I_2 + I_5;$$

$$\begin{aligned} U_1 &= R_1 I_0 + I_3 / j \omega C_1, \\ U_1 &= R_1 I_0 + j \omega L I_1 + j \omega M I_2 + R_L I_1, \\ U_2 &= R_2 I_4 + I_5 / j \omega C_2, \\ U_2 &= R_2 I_4 + j \omega L I_2 + R_L I_2 + j \omega M I_1. \end{aligned} \quad (10)$$

Hieraus folgt

$$\begin{aligned} A_{11} I_1 + A_{12} I_2 &= U_1, \\ A_{21} I_1 + A_{22} I_2 &= U_2 \end{aligned} \quad (11)$$

mit

$$\begin{aligned} A_{11} &= R_1 + j \omega C_1 (R_1 + 1/j \omega C_1) (R_L + j \omega L), \\ A_{12} &= j \omega C_1 (R_1 + 1/j \omega C_1) j \omega M, \\ A_{21} &= j \omega C_2 (R_2 + 1/j \omega C_2) j \omega M, \\ A_{22} &= R_2 + j \omega C_2 (R_2 + 1/j \omega C_2) (R_L + j \omega L). \end{aligned} \quad (12)$$

Als Lösung für I_1 und I_2 ergibt sich aus (11)

$$\begin{aligned} I_1 &= (U_1 A_{22} - U_2 A_{12}) / (A_{11} A_{22} - A_{12} A_{21}); \\ I_2 &= (U_2 A_{11} - U_1 A_{21}) / (A_{11} A_{22} - A_{12} A_{21}). \end{aligned} \quad (13)$$

Die zeitliche 90° -Phasenverschiebung der beiden Felder B_{s1} und B_{s2} wird erzielt durch die Bedingung

$$I_2 = j I_1 \quad (14)$$

bzw. wegen (13)

$$U_2 / U_1 = (A_{21} + j A_{22}) / (A_{11} + j A_{12}). \quad (15)$$

Setzt man

$$U_1 = U_2 = U, \quad R_1 = R_2 = R, \quad (16)$$

was technisch bedeutet, daß man beide Generatoren durch einen einzigen ersetzt und die beiden Hilfs-

widerstände R_1 und R_2 gleich groß wählt ($R = \text{Parameter}$), so muß

$$A_{21} + j A_{22} = A_{11} + j A_{12} \quad (17)$$

gewählt werden.

Mit den Hilfsgrößen

$$\begin{aligned} q &= \omega L/R_L, \quad q_1 = \omega C_1 R_1, \quad \frac{R_1}{R_L} = r, \\ k &= \omega M/R_L, \quad q_2 = \omega C_2 R_2, \quad \frac{R_2}{R_L} = r, \end{aligned} \quad (18)$$

ergeben sich durch Einsetzen von (12) in (17) zwei Gleichungen nach q_1 und q_2

$$\begin{aligned} q_1 q - q_2 (1 + k q) &= 1 + r - k q + q, \\ q_1 (1 - k q) + q_2 q &= 1 + r + k q - q \end{aligned} \quad (19)$$

mit den Lösungen

$$\begin{aligned} q_1 &= \frac{q^2(1-k)^2 + q(r+2k+k r) + (1+r)}{1+q^2(1-k^2)}, \\ q_2 &= \frac{-q^2(1-k)^2 + q(r+2k+k r) - (1+r)}{1+q^2(1-k^2)}. \end{aligned} \quad (20)$$

Da [siehe Gl. (18)] q und k vom Experiment her vorgegebene Größen sind und r eine frei wählbare Größe (mit der Bedingung $r > 0$) ist, lassen sich hieraus q_1 und q_2 berechnen.

- ¹ W. BIEGER, A. STAMPA u. H. TUCZEK, Beschleunigung von Plasma mit elektromagnetischen Wanderwellen, DLR-Mitt. 68-12, 1968.
- ² R. E. JONES u. R. W. PALMER, Experimental Investigation of a Constant Velocity Travelling Magnetic Wave Plasma Engine, NASA TND 2676 [1965].
- ³ J. KATZENSTEIN, Acceleration of Plasma by Travelling Electromagnetic Waves, Nuclear Fusion 1, 224 [1962].
- ⁴ R. KÖHNE, A. MEERT u. H. G. WICHMANN, Theoretical and Experimental Investigations on Inductive Plasma Accelerators with Electromagnetic Standing Waves, XIX-th Internat. Astronautical Congress, Volume 3, Propulsion. Reentry Physics 1970. Pergamon Press, PWN-Polish Scientific Publishers, S. 75–99.
- ⁵ A. MEERT, Zur Berechnung der mittleren Plasmageschwindigkeit bei Plasmabeschleunigern mit harmonischen elektromagnetischen Wellen, DLR FB 69-15, 1969, und Mathematical Description of a Quasi Continuous Inductive Plasma Accelerator with Standing R. F. Waves, 10-th Internat. Conf. Oxford Phenomena in Ionized Gases 1971, p. 349.

Aus (18) folgt dann

$$C_1 = q_1/\omega r R_L; \quad C_2 = q_2/\omega r R_L. \quad (21)$$

Es existieren stets Lösungen, da der Nenner $n = 1 + q^2(1 - k^2)$ von q_1 und q_2 infolge $0 \leq k \leq 1$ und $q > 0$ stets $n \geq 1$ bzw. $n \neq 0$ ist.

Je nach Größe von r , q und k sind negative Lösungen für q_2 nicht auszuschließen. Physikalisch bedeutet dies dann, daß die kapazitive Größe durch eine entsprechende induktive Größe zu ersetzen ist.

Zusammenfassend ist mit

$$\begin{aligned} q_i > 0, \quad C_i &= q_i/\omega r R_L, \\ q_i < 0, \quad L_i &= -r R_L/\omega q_i \end{aligned}$$

gemäß Abb. 1 und mit nur einem Generator U ($= U_1 = U_2$) die zeitliche 90° -Phasenverschiebung prinzipiell realisierbar. Eine analoge Rechnung läßt sich durchführen, wenn der Generator einen nicht vernachlässigbaren Innenwiderstand R_g hat. In diesem Fall kann man die Hilfsgrößen R_1 und R_2 gleich Null setzen, ohne die Existenz einer Lösung für die Bedingung (14) zu gefährden.

⁶ W. BIEGER, H. GRESSER, F. HOENEN, R. LÄUTER, F. RICHTER, A. STAMPA u. H. TUCZEK, Untersuchungen zur Beschleunigung von Plasma mit elektromagnetischen Wanderwellen für die Entwicklung von Plasma-Windkanälen und -Antrieben, BMwF - FB W 68 - 38, 1968.

⁷ R. W. PALMER, R. E. JONES u. G. R. SEIKEL, Analytical Investigations of Coil-System Design Parameters for a Constant-velocity Travelling Magnetic Wave Plasma Engine, NASA Techn. Note D-2278, 1964.

⁸ W. BUSCHBECK u. F. RICHTER, Technische Möglichkeiten zur Erzeugung kontinuierlicher Wanderwellen, DLR-Mitt. 68-12, 1968.

⁹ J. NAAS u. H. SCHMID, Mathematisches Wörterbuch mit Einbeziehung der theoretischen Physik, Band II, S. 868, „Welle“, Akad.-Verlag, Teubner-Verlagsgesellschaft, Berlin 1961.

¹⁰ W. PESCHKA, H. EITEL u. W. SEEGER, Magnetoplasmodynamische (MPD)-Wandler, DLR FB 69-85, 1969.