

Untersuchungen an Transformationsgliedern
zwischen Hohlleitern und Lecherdrähten im
3cm-Gebiet

Investigations on Matching Transitions between
Waveguides and Lecher Wires in the 3cm Region

H. Klingenberg, W. Makios, G. Meinhold,
A. Siddiqui

IPP 3/53

März 1967

I N S T I T U T F Ü R P L A S M A P H Y S I K

G A R C H I N G B E I M Ü N C H E N

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

Untersuchungen an Transformationsgliedern
zwischen Hohlleitern und Lecherdrähten im
3cm-Gebiet

Investigations on Matching Transitions between
Waveguides and Lecher Wires in the 3cm Region

H. Klingenberg, W. Makios, G. Meinhold,
A. Siddiqui

IPP 3/53

März 1967

Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem Institut für Plasmaphysik GmbH und der Europäischen Atomgemeinschaft über die Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik durchgeführt.

IPP 3/53 H. Klingenberg
W. Makios
G. Meinhold
A. Siddiqui

Investigations on Matching
Transitions between Waveguides
and Lecher Wires in the 3cm
Region.

March 1967 (in German)

ABSTRACT

The Lecher system developed by W. Makios [1] shall be used to measure the parameters of a plasma produced in a shock tube. Investigations of the system in the 3cm microwave region showed that most of the input power is radiated into free space. The Lecher wires themselves radiate hardly any power; radiation occurs mainly at the openings of the transitions required for converting the H_{10} wave of the waveguide into the transverse wave of the Lecher line.

The radiation losses vary with the standing-wave-ratio and the position of the nodes relative to that of the radiating element. Fluctuations were measured which could cause an error of $\pm 10\%$ in measurements of the plasma parameters. These include fluctuations, also due to standing waves, which take the form of variations of the ohmic losses in the components of the system (error $\pm 5\%$).

The reflection losses were reduced by appropriate dimensioning (with good matching) to 40% of the input power.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
ZUSAMMENFASSUNG	1
1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	2
2. MESSUNGEN	4
2.1. Messverfahren	4
2.2. Messsystem nach W. Makios (System 1)	6
2.3. Abstrahlung von den Lecherdrähten	8
2.4. Verbesserte Modelle der Übergangsstücke (Systeme 2 und 3)	8
2.5. Beeinflussung der Abstrahlung durch eine stehende Welle ..	9
2.6. Weitere Versuche zur Herabsetzung der Abstrahlungsverluste	14
2.6.1 Vorbemerkungen	14
2.6.2 Dielektrische Füllung des Überganges (System 4)	15
2.6.3 Steghohlleiter mit kleinerem Querschnitt (System 5)	18
2.6.4 Steghohlleiter mit grösserem Querschnitt (System 6)	18
2.6.5 Steghohlleiter mit Blenden (System 7)	18
2.6.6 Übergang Rechteckhohlleiter - Koaxialleiter - Lecherdrähte - Koaxialleiter - Hohlleiter	21
3. ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE	23
Literatur	24

ZUSAMMENFASSUNG

Für Messungen der Parameter eines im Stosswellenrohr erzeugten Plasmas soll das von W. Makios [1] entwickelte Lecherdrahtverfahren benutzt werden. Untersuchungen der Anordnung im 3cm-Mikrowellengebiet zeigten, dass der grösste Teil der eingespeisten Leistung abgestrahlt wird.

Die Lecherdrähte selbst strahlen praktisch keine Leistung ab; die wesentliche Abstrahlung tritt an den für die Umformung der H_{10} -Welle des Hohlleiters in die transversale Welle der Lecherleitung notwendigen Übergangsstücken (und zwar an deren Öffnungen) auf.

Die Abstrahlungsverluste ändern sich mit dem Stehwellenverhältnis und mit der Lage der Knoten relativ zum Ort des abstrahlenden Elementes. Gemessen wurden Schwankungen, die einen Fehler von $\pm 10\%$ bei den Messungen der Plasma-Parameter verursachen können. Darin sind auch Schwankungen enthalten, die als Änderung der Ohmschen Verluste in den Bauelementen ebenfalls durch stehende Wellen verursacht werden (Fehler in Höhe von $\pm 5\%$).

Die Abstrahlungsverluste konnten (bei guter Anpassung) durch geeignete Dimensionierung auf 40 % der Eingangsleistung reduziert werden.

1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

In einer Arbeit von W. Makios [1] wird ein Wellenleiter-System für das 4mm-Gebiet beschrieben, das Messungen an Plasmakonfigurationen mit hoher räumlicher Auflösung gestattet. Das System, eine Art "Lecher-System", besteht aus einem Zweidrahtleiter (Lecherleiter) und aus Übergangsstücken, die die Wellen von einem Rechteckhohlleiter auf den Lecherleiter (bzw. vom Lecherleiter auf den Rechteckhohlleiter) transformieren. Das System hat sich bei Messungen an Stosswellen bewährt, allerdings war seine technische Entwicklung nur auf den speziellen Messzweck hin ausgerichtet. Eine allgemeinere Kenntnis seiner Eigenschaften (wie die der Bandbreite usw.) scheint aber wünschenswert. Abb. 1 zeigt das von Makios benutzte System.

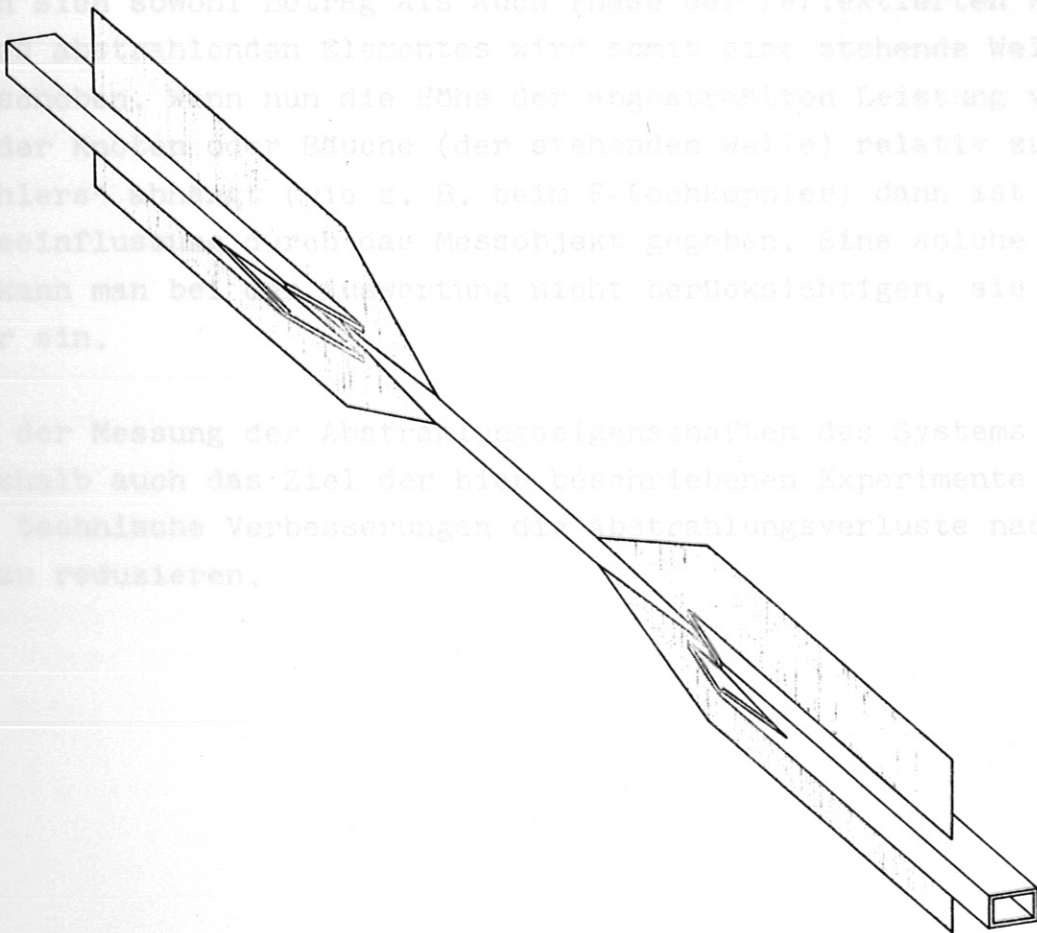


Abb. 1 Übergänge und Lecherleiter, vgl. [1]

Hier soll über Messungen berichtet werden, die die Eigenschaften eines solchen Lecher-Systems klarer erkennen lassen. Die Messungen wurden im 3cm-Gebiet durchgeführt, weil bei diesen Wellenlängen wegen der entsprechend grösseren geometrischen Dimensionen die Herstellung verschiedener Messsysteme einfacher und genauer ist. Eine möglichst breitbandige Anpassung sollte erreicht werden, vor allem aber sollte der Einfluss von Abstrahlungsverlusten untersucht werden.

Abstrahlungsverluste können sich störend bemerkbar machen, wenn die abgestrahlte Energie an benachbarten Objekten reflektiert und dadurch dem Messsignal überlagert wird. Noch kritischer könnte aber eine Veränderung der Höhe der Abstrahlung durch eine Wechselwirkung zwischen Strahler und Messobjekt werden. Am Messobjekt (dem Plasma) wird ein Teil der Leistung reflektiert. Mit den Eigenschaften des Plasmas ändern sich sowohl Betrag als auch Phase der reflektierten Welle. Am Ort des abstrahlenden Elementes wird somit eine stehende Welle vorbeigeschoben. Wenn nun die Höhe der abgestrahlten Leistung von der Lage der Knoten oder Bäuche (der stehenden Welle) relativ zum Ort des "Strahlers" abhängt (wie z. B. beim E-Lochkoppler) dann ist eine solche Beeinflussung durch das Messobjekt gegeben. Eine solche Beeinflussung kann man bei der Auswertung nicht berücksichtigen, sie geht als Fehler ein.

Neben der Messung der Abstrahlungseigenschaften des Systems sollte es deshalb auch das Ziel der hier beschriebenen Experimente sein, durch technische Verbesserungen die Abstrahlungsverluste nach Möglichkeit zu reduzieren.

$$V = 100 - (P+R)$$

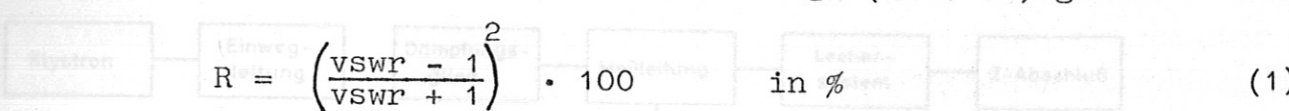
(2)

2. MESSUNGEN

2.1. Messverfahren

Zu ermitteln sind die Reflexions- und Transmissionseigenschaften der verschiedenen Messsysteme. Daraus ergeben sich die Abstrahlungseigenschaften, wenn man die Ohmschen Verluste vernachlässigt. Abb. 2 zeigt die Messanordnungen.

Die reflektierte Leistung R lässt sich aus dem Stehwellenverhältnis (vswr) errechnen, das mit einer Messleitung (Abb. 2a) gemessen wurde:


$$R = \left(\frac{\text{vswr} - 1}{\text{vswr} + 1} \right)^2 \cdot 100 \quad \text{in \%} \quad (1)$$

Zur Messung von vswr wurde bei einer beliebigen Einstellung des Dämpfungsgliedes die Sonde der Messleitung verschoben, bis der Ausschlag am Anzeigeinstrument ein Maximum erreicht hatte. Dann wurde die Sonde verschoben, bis das Instrument ein Minimum anzeigte und mit dem Dämpfungsglied der gleiche Ausschlag des Anzeigeinstrumentes eingestellt wie er sich beim Maximum ergeben hatte. Die Differenz der Einstellungen des Dämpfungsgliedes ergab das Stehwellenverhältnis in db.

Die transmittierte Leistung T wurde durch den Vergleich der hinter der Lecherleitung am Detektor gemessenen Leistung (Abb. 2b) mit der in das Lechersystem eingespeisten Leistung, d. h. der Eingangsleistung (Abb. 2c) ermittelt. Dazu wurde mit dem Dämpfungsglied jedesmal der gleiche Ausschlag des Anzeigeinstrumentes eingestellt. Die Differenz der Einstellungen des Dämpfungsgliedes ergab das Leistungsverhältnis in db. Unter der Annahme, dass die Ohmschen Verluste vernachlässigbar klein sind, ist die abgestrahlte Leistung V:

$$V = 100 - (T+R) \quad \text{in \%} \quad (2)$$

Abb. 2 Anordnung zur Messung

a) der in das Lechersystem eingespeisten Leistung,

b) der von Lechersystem durchgelassenen Leistung,

c) der in das Lechersystem eingespeisten Leistung.

2.2. Messsystem nach W. Makios (System 1)

Zunächst wurde ein System gebaut, das dem von W. Makios benutzten nachgebildet ist. Allerdings sind die einzelnen Stücke - bezogen auf die Wellenlänge - kürzer, um die Gesamtlänge in vernünftigen Grenzen zu halten. In den Hohlleiter wurde, wie in [1] ausführlich beschrieben (vgl. auch Abb. 1), ein Doppelstege eingesetzt, der sich nach beiden Seiten verjüngt und aus dem Hohlleiter herausgeführt wird. An die äußeren Enden dieses Doppelsteiges wurden jeweils die Drähte angebracht. Der Hohlleiter wurde an beiden Seiten aufgetrennt. Alle Änderungen der geometrischen Form erfolgten stetig, verteilt über einige

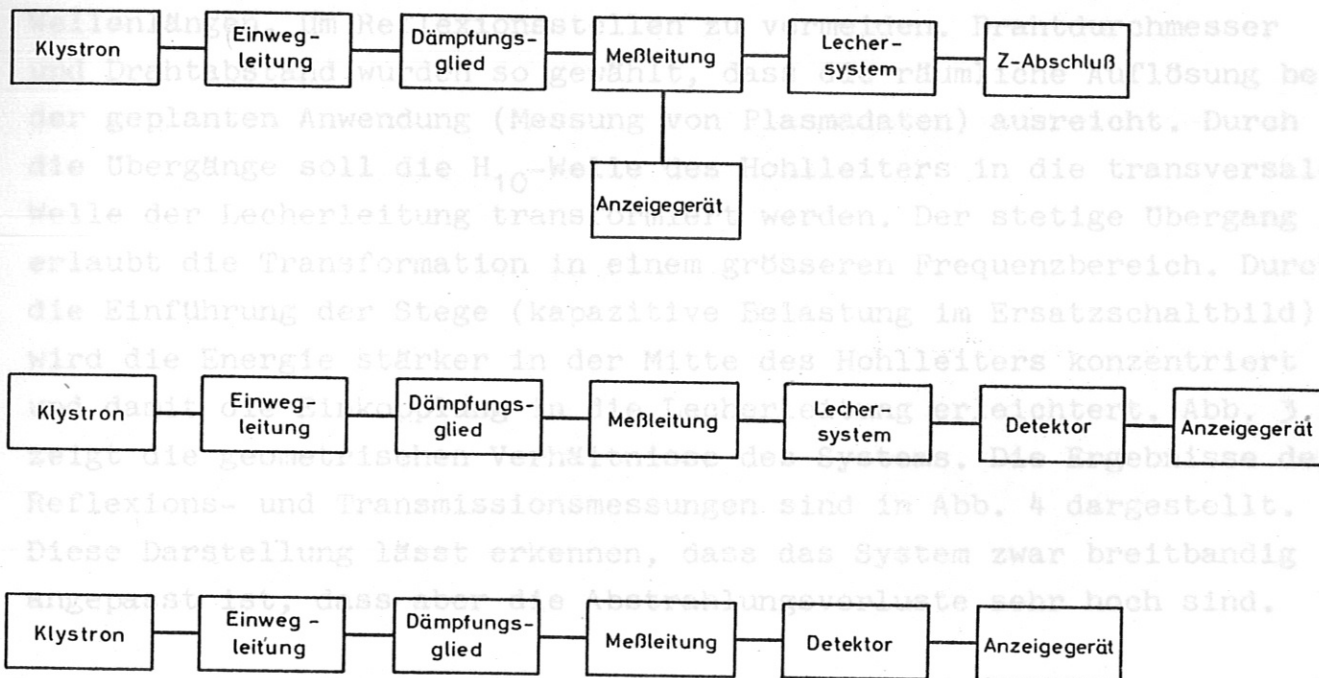


Abb. 2 Anordnung zur Messung

- a) der vom Lechersystem reflektierten,
- b) der vom Lechersystem durchgelassenen
- c) der in das Lechersystem eingespeisten Leistung.

2.2. Messsystem nach W. Makios (System 1)

Zunächst wurde ein System gebaut, das dem von W. Makios benutzten nachgebildet ist. Allerdings sind die einzelnen Stücke - bezogen auf die Wellenlänge - kürzer, um die Gesamtlänge in vernünftigen Grenzen zu halten. In den Hohlleiter wurde, wie in [1] ausführlich beschrieben (vgl. auch Abb. 1), ein Doppelsteg eingesetzt, der sich nach beiden Seiten verjüngt und aus dem Hohlleiter herausgeführt wird. An die äusseren Enden dieses Doppelsteges wurden jeweils die Drähte angelötet. Der Hohlleiter wurde an beiden Seiten aufgetrennt. Alle Änderungen der geometrischen Form erfolgten stetig, verteilt über einige Wellenlängen, um Reflexionsstellen zu vermeiden. Drahtdurchmesser und Drahtabstand wurden so gewählt, dass die räumliche Auflösung bei der geplanten Anwendung (Messung von Plasmaparametern) ausreicht. Durch die Übergänge soll die H_{10} -Welle des Hohlleiters in die transversale Welle der Lecherleitung transformiert werden. Der stetige Übergang erlaubt die Transformation in einem grösseren Frequenzbereich. Durch die Einführung der Stege (kapazitive Belastung im Ersatzschaltbild) wird die Energie stärker in der Mitte des Hohlleiters konzentriert und damit die Einkopplung in die Lecherleitung erleichtert. Abb. 3 zeigt die geometrischen Verhältnisse des Systems. Die Ergebnisse der Reflexions- und Transmissionsmessungen sind in Abb. 4 dargestellt. Diese Darstellung lässt erkennen, dass das System zwar breitbandig angepasst ist, dass aber die Abstrahlungsverluste sehr hoch sind.



Abb. 4 Messergebnisse für das System 1
R = reflektierte Leistung
A = Abstrahlungsverluste in dB

2.3. Abschätzung von den Lecherleitungen

...abstrahlungsverluste, wo in den Statoren die Verluste auftreten, ob also von den Lecherleitungen... Anteil der Eingangsleistung... Übergangsstücke... diese Frage zu beantworten... wurden die... (der ersten)... Leistung in... vernachlässigt werden kann. Tabelle 1 gibt die Messergebnisse wieder.

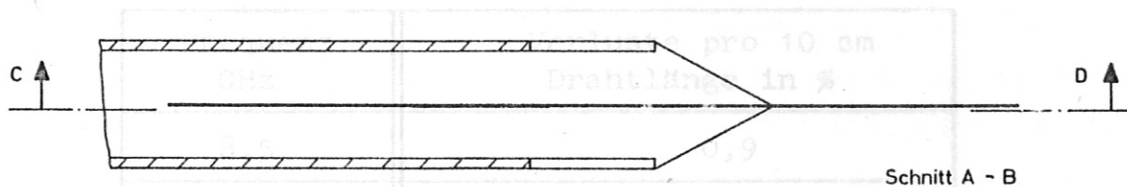
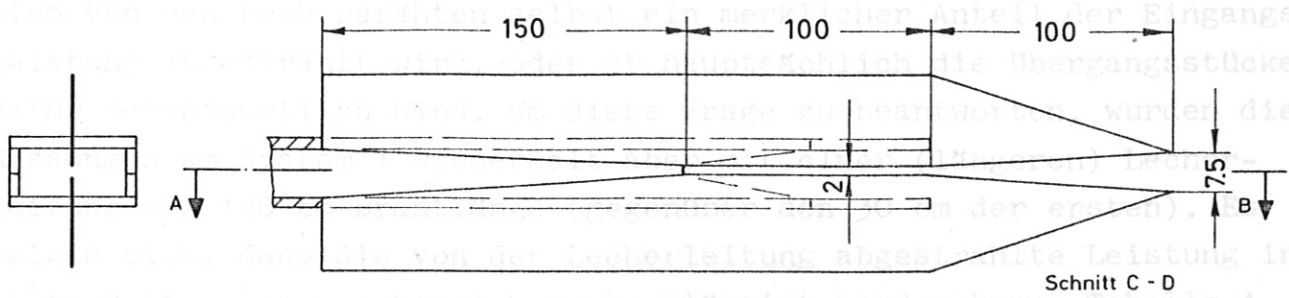
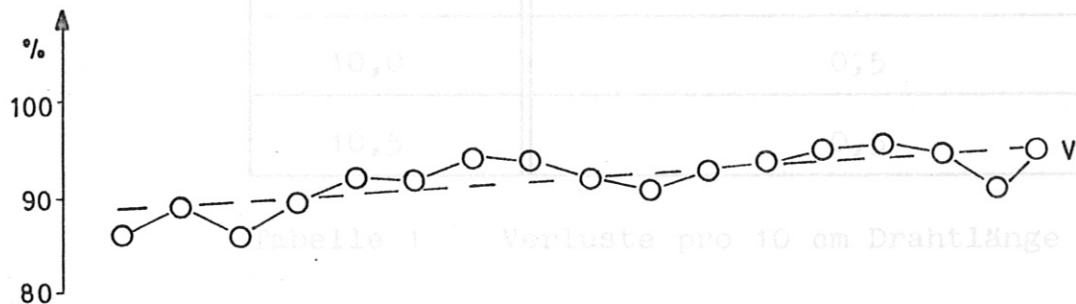


Abb. 3 Messsystem nach W. Makios (System 1)



2.4. verbesserte Modelle der Übergangsstücke (Systeme 2 und 3)

Da Abstrahlungsverluste also vor allem an den Übergangsstücken auftraten, mussten diese verbessert werden, um die Verluste herabzusetzen. Das ergab in einer Reihe von Messungen, bei denen die seitlichen Schlitzze in den Übergangsstücken schrittweise immer vollständiger mit Kupferblech abgedeckt waren, zwei Modelle (Systeme 2 und 3), die sich vom System 1 im wesentlichen dadurch unterscheiden, dass der Honnleiter nicht mehr geschützt ist, bei den Messungen stellte sich nämlich heraus, dass die Abstrahlungsverluste mit zunehmender Abdeckung der Schlitzze abnahm.

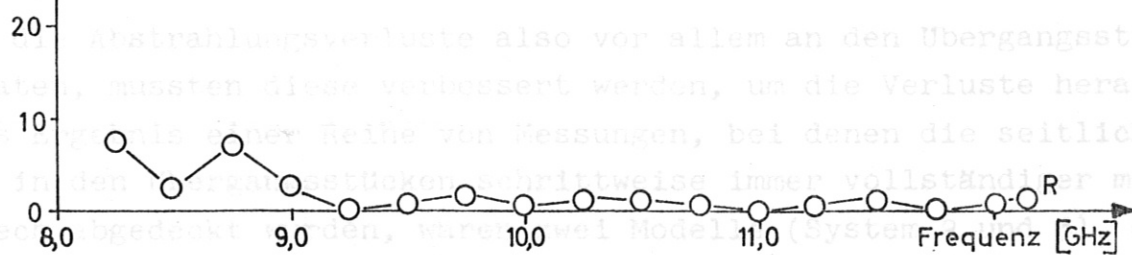


Abb. 4 Messergebnisse für das System 1

R = reflektierte Leistung

V = Abstrahlungsverluste in %

2.3. Abstrahlung von den Lecherdrähten

Zunächst interessierte, wo im Gesamtstrom die Verluste auftreten, ob also von den Lecherdrähten selbst ein merklicher Anteil der Eingangsleistung abgestrahlt wird, oder ob hauptsächlich die Übergangsstücke dafür verantwortlich sind. Um diese Frage zu beantworten, wurden die Messungen am System 1 wiederholt aber mit einer (längeren) Lecherleitung von 120 cm Drahtlänge (gegenüber den 30 cm der ersten). Es zeigte sich, dass die von der Lecherleitung abgestrahlte Leistung in einem weiten Frequenzbereich vernachlässigt werden kann. Tabelle 1 gibt die Messergebnisse wieder.

Frequenz GHz	Verluste pro 10 cm Drahtlänge in %
8,5	0,9
9,0	0,5
9,5	1,0
10,0	0,5
10,5	0,5

Tabelle 1 Verluste pro 10 cm Drahtlänge

2.4. Verbesserte Modelle der Übergangsstücke (Systeme 2 und 3)

Da die Abstrahlungsverluste also vor allem an den Übergangsstücken auftraten, mussten diese verbessert werden, um die Verluste herabzusetzen. Das Ergebnis einer Reihe von Messungen, bei denen die seitlichen Schlitze in den Übergangsstücken schrittweise immer vollständiger mit Kupferblech abgedeckt wurden, waren zwei Modelle (System 2 und 3), die sich vom System 1 im wesentlichen dadurch unterscheiden, dass der Hohlleiter nicht mehr geschlitzt ist. Bei den Messungen stellte sich nämlich heraus, dass die Abstrahlung mit zunehmender Abdeckung der Schlitze abnahm. Abb. 5 zeigt die Geometrie dieser Modelle und Abb. 6 die Ergebnisse der Reflexions- und Transmissionsmessungen.

Das Reflexionsverhalten dieser Modelle ist nicht mehr so gut, was mit dem un stetigen Übergang am Hohlleiterende erklärt werden kann. Die Abstrahlungsverluste sind viel geringer als für das System 1, am geringsten für das System 3, für das der Drahtabstand und damit der Öffnungswinkel der aus dem Hohlleiter herausragenden Flossen kleiner sind (vgl. Abb. 5). Eine Art Resonanzstelle tritt für dieses System 3 bei etwa 9,9 GHz auf. Dort sind die Verluste gering und die Reflexion ist hoch.

Das Auftreten einer solchen Stelle, ebenso wie die Schwankungen der Verluste um einen mittleren Wert (gestrichelte Gerade) kann damit erklärt werden, dass die Reflexionsstellen bezüglich der Phase der von ihnen reflektierten Teilwellen gerade einen solchen Abstand haben, dass sich die Teilwellen verstärken oder auslöschen. Eine solche Erklärung für die Schwankungen der Verluste setzt aber die vermutete Wechselbeziehung zwischen der Abstrahlung und der relativen Lage von Knoten oder Bäuchen einer stehenden Welle voraus.

2.5. Beeinflussung der Abstrahlung durch eine stehende Welle

Um experimentell zu prüfen, inwieweit stehende Wellen die Abstrahlung beeinflussen, wurden Messungen am System 3 mit einer Anordnung durchgeführt, die in Abb. 7 gezeigt wird: Das Lechersystem ist hier mit einem verschiebbaren Kurzschluss abgeschlossen, mit dem die stehende Welle verschoben werden kann. Das Stehwellenverhältnis ist wegen der Abstrahlungsverluste endlich. Wenn sich das Stehwellenverhältnis mit der Stellung des Kurzschlusschiebers ändert, zeigt das eine Änderung der Abstrahlungsverluste an (unter der Annahme, dass die Ohmschen Verluste vernachlässigbar sind). Die Abstrahlungsverluste V können aus dem gemessenen Stehwellenverhältnis bzw. mit der reflektierten Leistung R berechnet werden:

$$V = 100 - R \quad \text{in \%} \quad (3)$$

Abb. 8 zeigt das Ergebnis dieser Messungen bei einer Frequenz von 8,59 GHz (als Beispiel). Die Stellung des Kurzschlusschiebers ist ausgedrückt durch Vielfache der Wellenlänge im Kurzschlusschieberhohlleiter.

Diese Messergebnisse zeigen die Beeinflussung der Abstrahlung durch die stehende Welle. Die Abstrahlungsverluste schwanken um insgesamt 15 % der Eingangsleistung oder um ± 10 % der mittleren prozentualen Verluste (Prozent von Prozent). Der Abstand Maximum - Minimum der Kurve entspricht einem Verschieben des Kurzschlusschiebers um $1/4$ Wellenlänge (im Hohlleiterstück des Kurzschlusschiebers); an jedem Ort der Leistung wechseln dann Minima mit Maxima. Die Abstrahlung hängt also von der relativen Lage der Knoten und Bäuche bezogen auf den Ort der Antenne ab.

Um zu prüfen, ob solche Schwankungen des Stehwellenverhältnisses schon mit den anderen Bauelementen - ohne Lecherleitung - auftreten, wurden die Messungen ohne Lecherleitung wiederholt (Kurzschlusschieber hinter der Messleitung, vgl. Abb. 7).

Das Stehwellenverhältnis ist dann zwar sehr gross, aber die in die Sonde der Messleitung eingekoppelte Leistung kann als Kriterium dienen. Es stellte sich heraus, dass auch in diesem Fall die ausgekoppelte Leistung je nach Stellung des Kurzschlusschiebers um etwa 10 % der Eingangsleistung schwankte (± 5 % - Prozent von Prozent). Diese Schwankungen (bei grossem Stehwellenverhältnis) sind etwas geringer als die mit der Lecherleitung gemessenen Schwankungen der Verluste (kleineres Stehwellenverhältnis) und gehen immer als Fehler ein; auch bei der Bestimmung der Schwankungen der Abstrahlungsverluste des Lecher-Systems werden sie mit erfasst. Verursacht werden diese Schwankungen an den Bauelementen z. B. durch die Änderung der Ohmschen Verluste in den Dämpfungsgliedern (auch der Einwegleitung) je nach der relativen Lage der Knoten und Bäuche. Das konnte durch Einfügen eines zusätzlichen Dämpfungsgliedes zwischen Messleitung und Kurzschlusschieber in die Messanordnung (Abb. 7) leicht gezeigt werden. (Auch von Richtkopplern - sogar von Vielschlitzkopplern - ist bekannt, dass sie solche Schwankungen der ausgekoppelten Leistung verursachen). Eine Rückwirkung auf das Klystron als Ursache solcher Schwankungen kann wegen der hohen Dämpfung im Messpfad praktisch immer ausgeschlossen werden.



Abb. 7. Verhältnis von Reflexions- und der Transmissionsmessungen im System

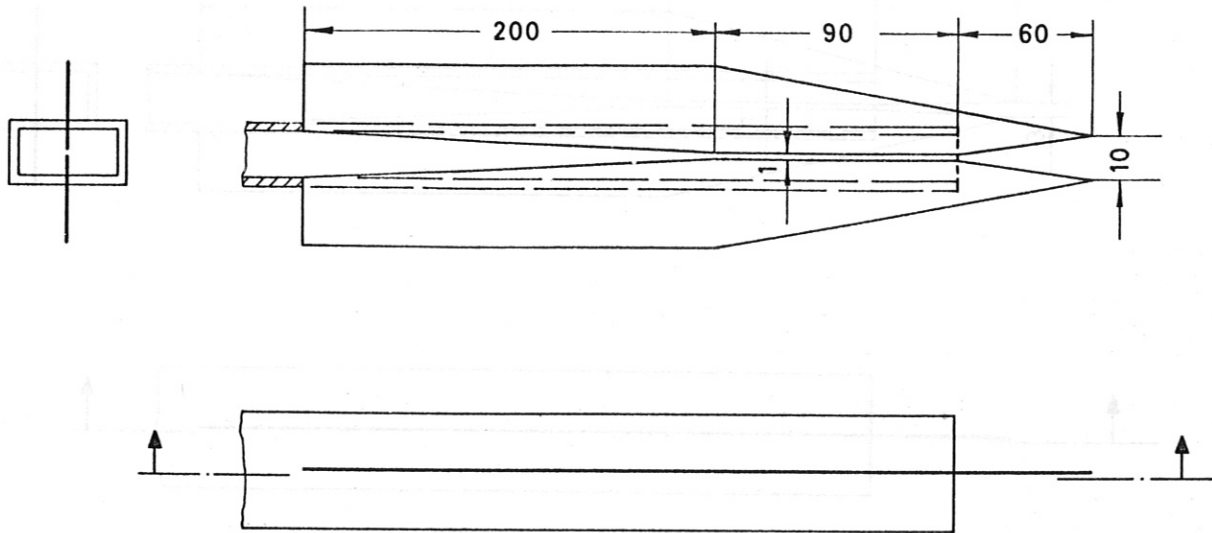


Abb. 5a Zur Geometrie der Messsysteme (System 2)

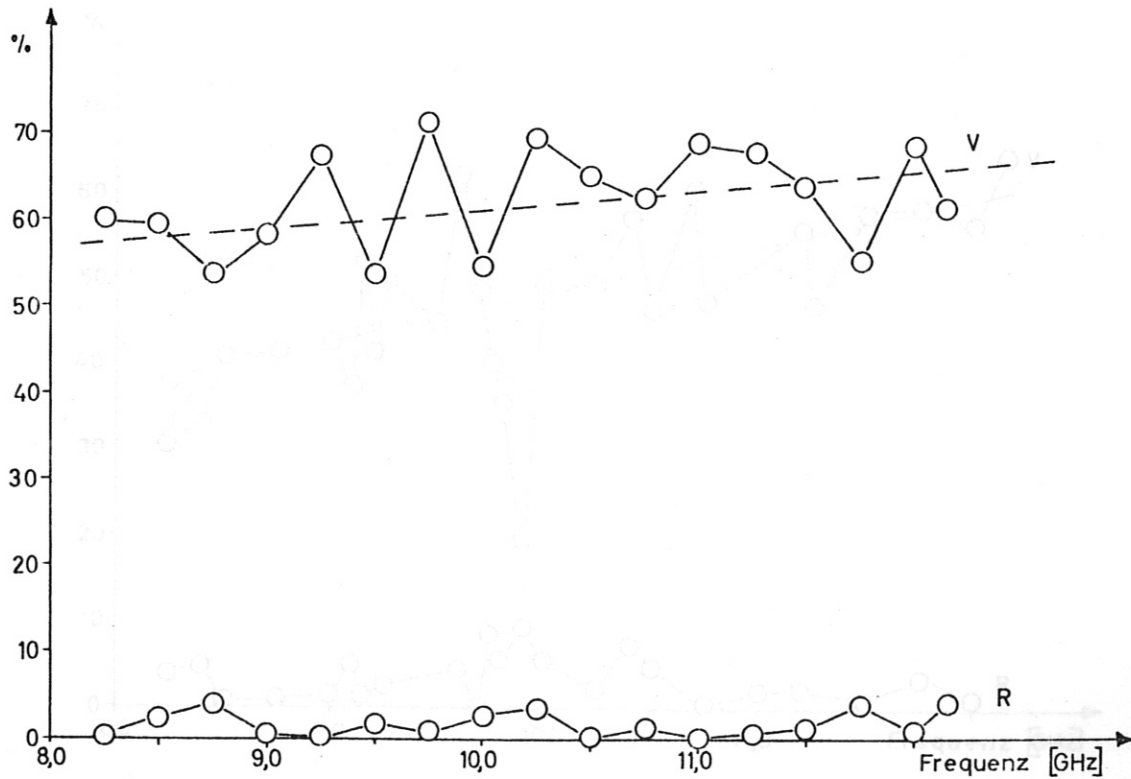


Abb. 6a Ergebnisse der Reflexions- und der Transmissionsmessungen (System 2)

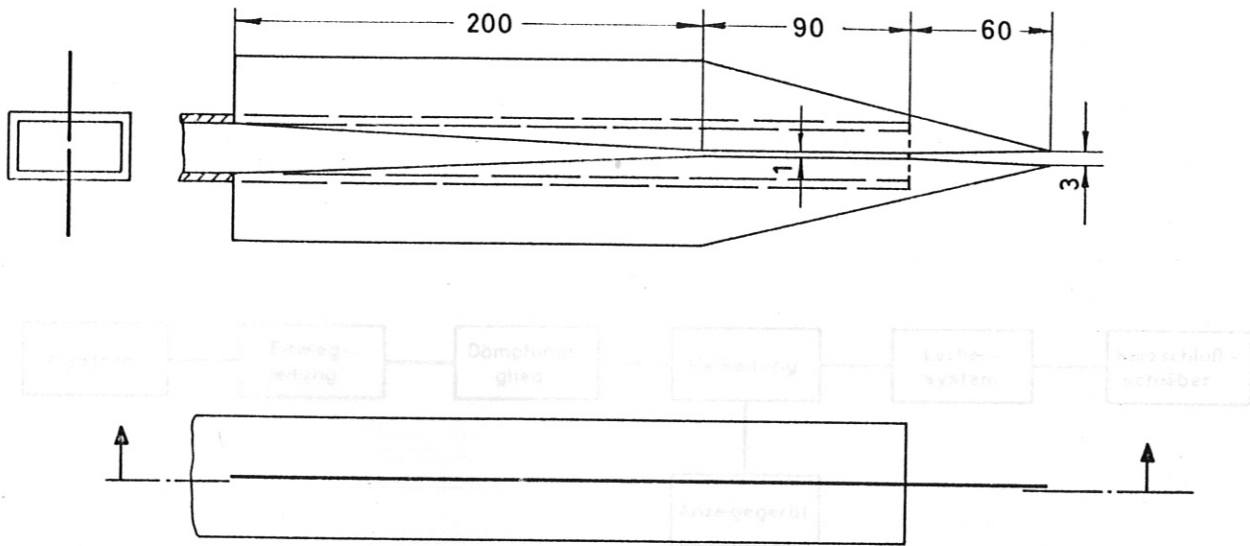


Abb. 5b Zur Geometrie der Messsysteme (System 3)

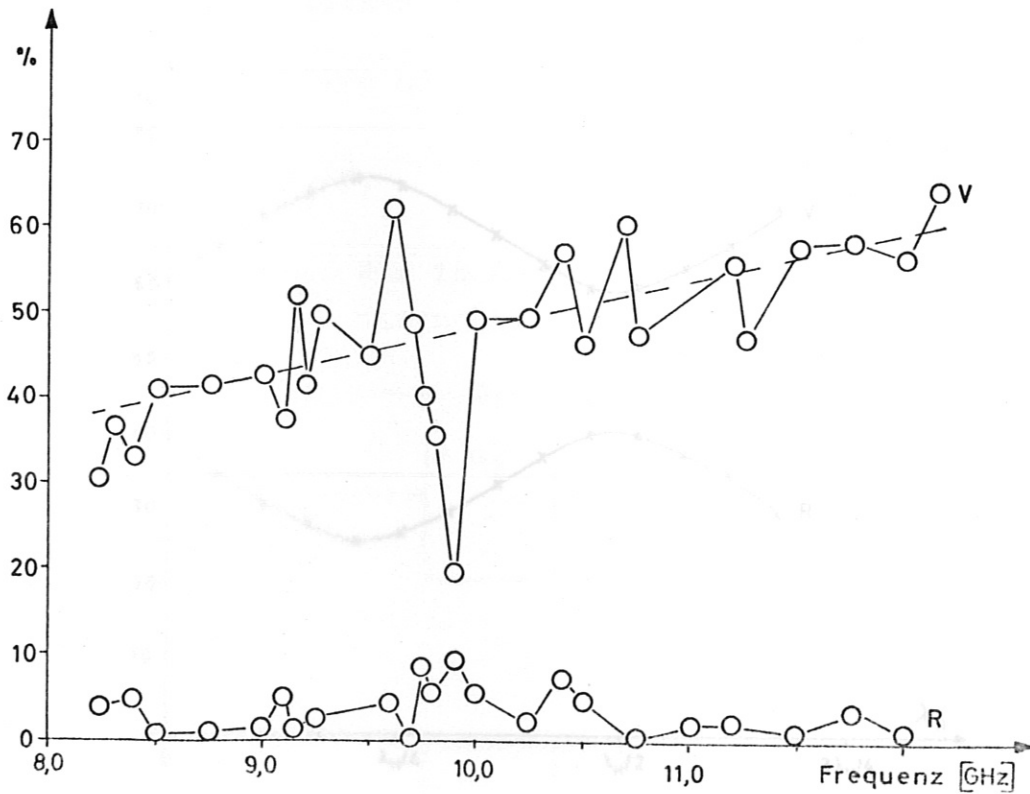
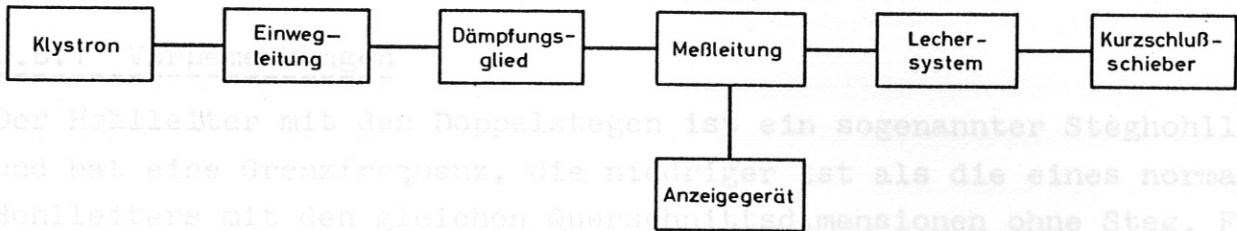


Abb. 6b Ergebnisse der Reflexions- und der Transmissionsmessungen (System 3)

2.6. Weitere Versuche zur Herabsetzung der Abstrahlungsverluste

Die Abb. 6b zeigt für das System 2 mit den bisher geringsten Abstrahlungsverlusten qualitativ die Abnahme der Abstrahlungsverluste zu kleineren Frequenzen hin erkennen, was Markt an der Vermutung, dass sich diese Abnahme zu noch kleineren Frequenzen hin fortsetzt. Da die Frequenz nicht beliebig veränderbar ist, kann man diesen Sachverhalt dadurch überprüfen, dass man die Geometrie des Leiters so verändert, dass die Eigenschaften in ein höheres Frequenzband transformiert werden.



Der Hohlleiter mit dem Doppelstegen ist ein sogenannter Steghohlleiter und hat eine Grenzfrequenz, die nicht kleiner ist als die eines normalen Hohlleiters mit den gleichen Querschnittsabmessungen ohne Steg. Für die Grenzwellenlänge λ_0 der H_{10} -Welle in einem solchen Steghohlleiter erhält man den Ausdruck (vgl. S. B. 23).

$$\lambda_0 = \pi \sqrt{\epsilon} \sqrt{a_1 \left(\frac{a_2^2 b_1^2}{b_2^2} + 2 b_1 \cdot C \right) - \left(\frac{a_2^2 b_1^2}{b_2^2} + 2 a_2 b_1 \cdot C \right)} \quad (4)$$

Abb. 7 Messanordnung mit Kurzschlussschieber

wobei ϵ = Dielektrizitätskonstante im Steghohlleiter,

$$C = \frac{1}{2} \left\{ \frac{x^2 + 1}{x} \arccos h \left(\frac{1-x}{1+x} \right) - 2 \ln \frac{4x}{1-x^2} \right\} \quad (5)$$

und a_1, a_2, b_1, b_2 die in Abb. 8 definierten Abmessungen des Steghohlleiters sind.

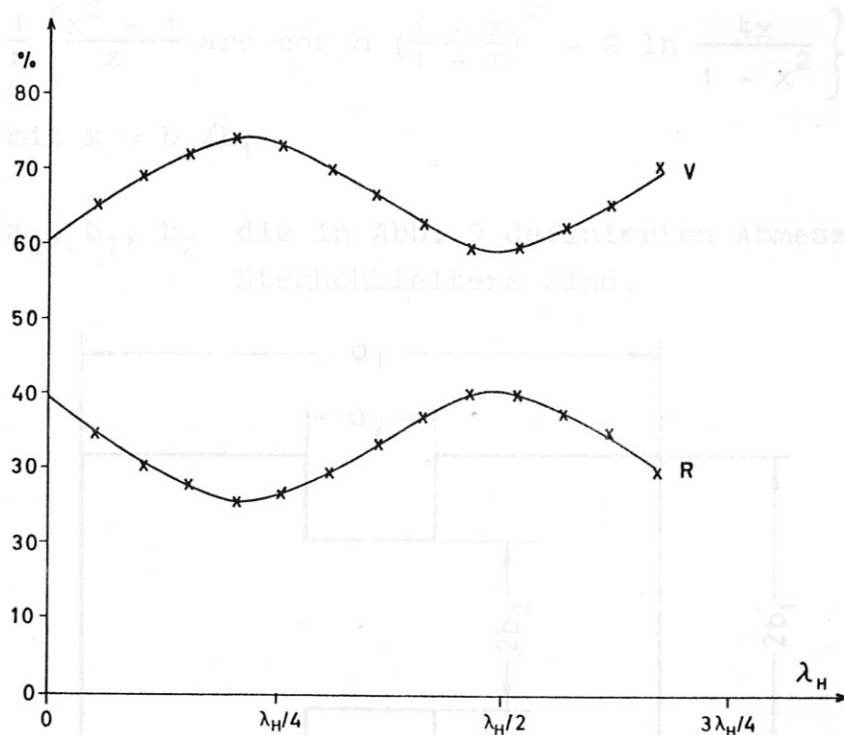


Abb. 8 Reflektierte Leistung R bzw. Abstrahlungsverluste V in Abhängigkeit von der Stellung des Kurzschlussschiebers (in Vielfachen der Wellenlänge)

2.6. Weitere Versuche zur Herabsetzung der Abstrahlungsverluste

Die Abb. 6b lässt für das System 3 mit den bisher geringsten Abstrahlungsverlusten qualitativ eine Abnahme der Abstrahlungsverluste zu kleineren Frequenzen hin erkennen. Das führt zu der Vermutung, dass sich diese Abnahme zu noch kleineren Frequenzen hin fortsetzt. Da die Frequenz nicht beliebig variierbar ist, kann man diesen Sachverhalt dadurch überprüfen, dass man die Geometrie des Leiters so verändert, dass die Eigenschaften in ein höheres Frequenzband transformiert werden.

2.6.1 Vorbemerkungen

Der Hohlleiter mit den Doppelstegen ist ein sogenannter Steghohlleiter und hat eine Grenzfrequenz, die niedriger ist als die eines normalen Hohlleiters mit den gleichen Querschnittsdimensionen ohne Steg. Für die Grenzwellenlänge λ_c , der H_{10} -Welle in einem solchen Steghohlleiter erhält man den Ausdruck (vgl. z. B. 2):

$$\lambda_c = \pi \sqrt{\epsilon} \sqrt{a_1 \left(\frac{a_2 b_1}{b_2} + 2 b_1 \cdot C \right) - \left(\frac{a_2^2 b_1}{b_2} + 2 a_2 b_1 \cdot C \right)} \quad (4)$$

wobei ϵ = Dielektrizitätskonstante im Steghohlleiter,

$$C = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{x^2 + 1}{x} \operatorname{arc} \cos h \left(\frac{1+x}{1-x} \right)^2 - 2 \ln \frac{4x}{1-x^2} \right\} \quad (5)$$

mit $x = b_2/b_1$

und a_1, a_2, b_1, b_2 die in Abb. 9 definierten Abmessungen des Steghohlleiters sind.

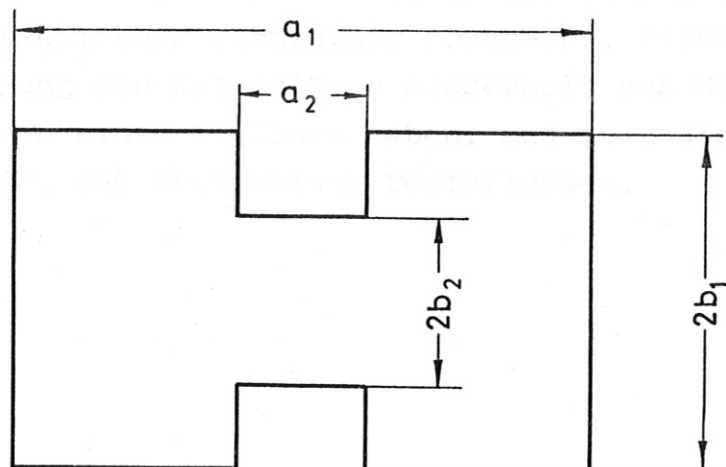


Abb. 9 Querschnitt des Steghohlleiters

Die Grenzfrequenz lässt sich also dadurch erhöhen, dass man a_1 kleiner wählt (Gl.(4)). Den entgegengesetzten Effekt (Herabsetzen der Grenzfrequenz) erhält man z. B. durch Einbringen eines Dielektrikums ($\epsilon > 1$) in den Steghohlleiter. Letzteres führt zu einer "idealen" Transformation der Leitereigenschaften, allerdings nicht in der gewünschten Richtung.

2.6.2 Dielektrische Füllung des Überganges (System 4)

Um mit möglichst geringem technischem Aufwand weitere experimentelle Unterlagen für die Beantwortung der Frage zu erhalten, ob sich durch die Änderung der Geometrie die Strahlungseigenschaften des Überganges beeinflussen lassen, wurde in den Steghohlleiter des Systems 3 ein Dielektrikum eingebracht. Dadurch werden die Eigenschaften des Leiters in ein niedrigeres Frequenzband transformiert und auch die Grenzfrequenz nach unten verschoben. Abb. 10 zeigt die Geometrie des so gebildeten Systems 4. Zur Vermeidung von zusätzlichen Reflexionsstellen sind die Plexiglasstücke keilförmig gearbeitet und ragen aus dem Hohlleiter heraus. Dadurch wird auch die Wellenlänge in dem Bereich der Flossen verkürzt. Abb. 11 zeigt die Ergebnisse der Messungen von Reflexion und Transmission (vgl. Abschnitt 2.1). Tatsächlich sind die Verluste im Mittel höher als für den Leiter ohne Plexiglas. Wenn man die mittleren Werte (gestrichelte Kurve) für das System mit Plexiglas an die Werte des Systems ohne Plexiglas anfügt, so beginnen die ersteren bei 8,2 GHz mit einem Wert, der für die letzteren erst bei 10 GHz erreicht wird. Die Abstrahlungseigenschaften scheinen also durch Einfügen der Plexiglaskeile um den Faktor 1,2 bezüglich der Frequenz nach unten verschoben. Dieser Faktor ist zwar kleiner als der mit dem ϵ errechnete, aber der Leiter ist auch nicht ganz gefüllt, so dass diese Verschiebung vernünftig erscheint. Allerdings könnte auch die Veränderung der Wellenlänge ausserhalb des Hohlleiters im Bereich der Flossen einen Einfluss haben, und auch die zusätzlichen Grenzflächen werden die Abstrahlung beeinflussen.



Abb. 11 Ergebnisse der Messungen von Reflexion und Transmission (System 4) (mit Plexiglas)

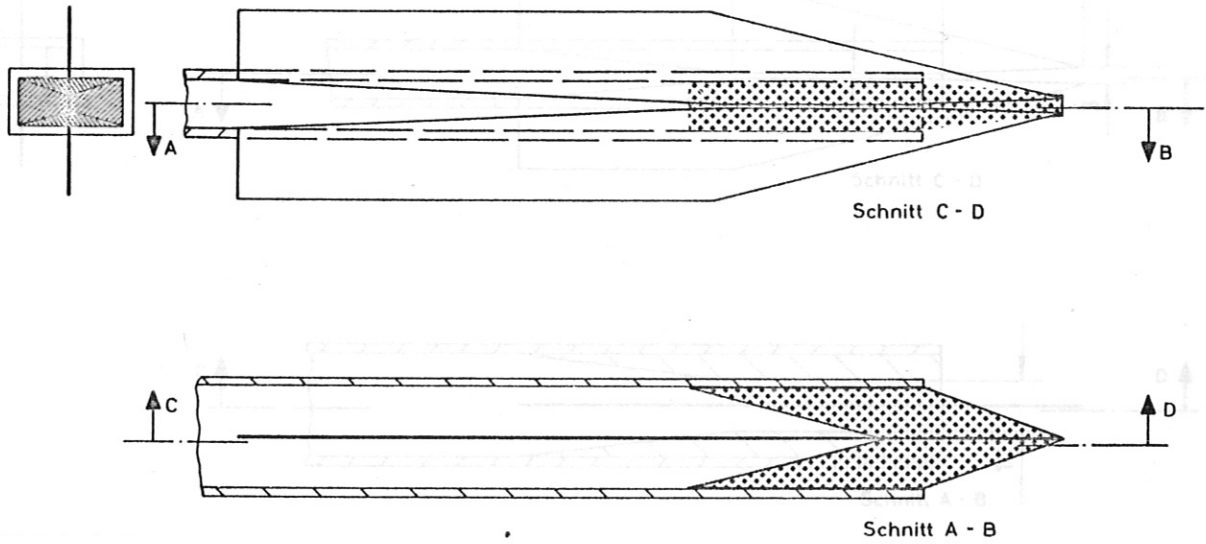


Abb. 10 System 4 (mit Plexiglaskeilen)

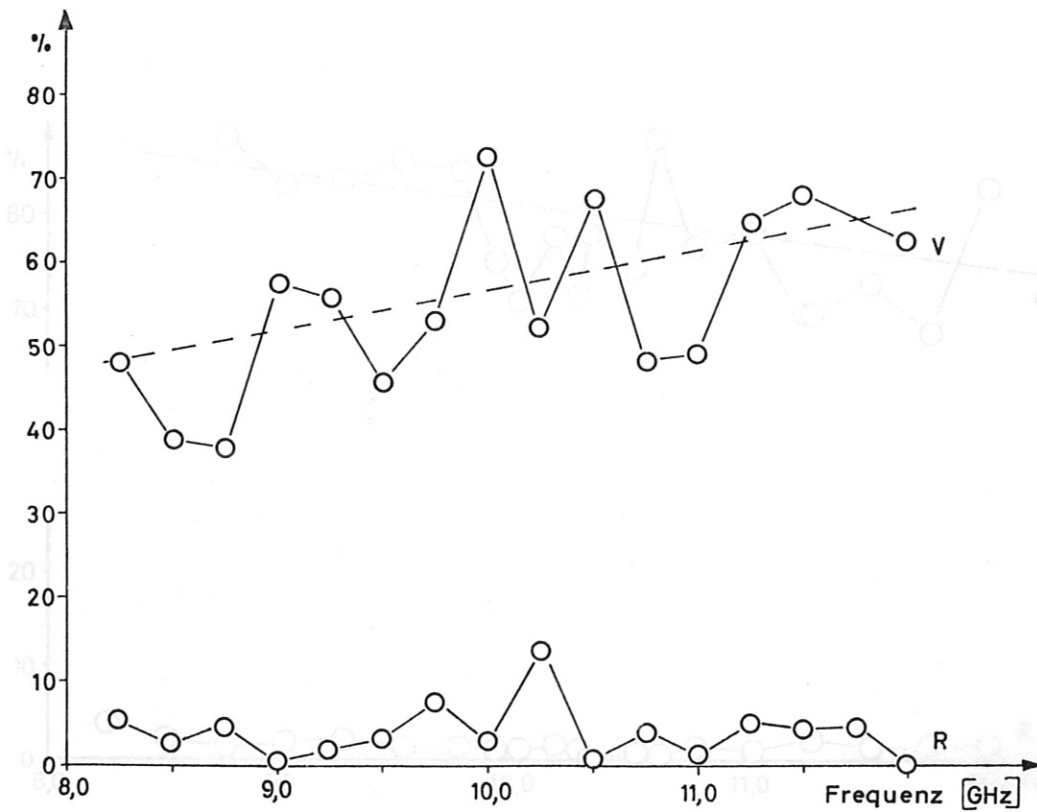


Abb. 11 Ergebnisse der Messungen System 4 (mit Plexiglas)

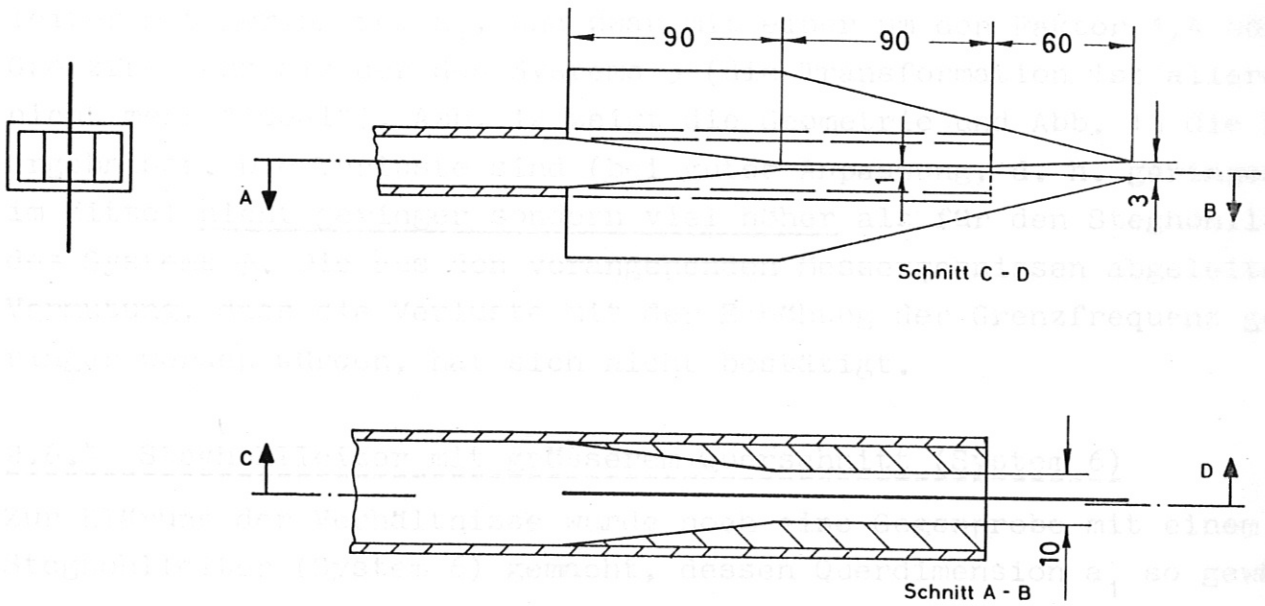


Abb. 12 System 5 (geringerer Querschnitt)

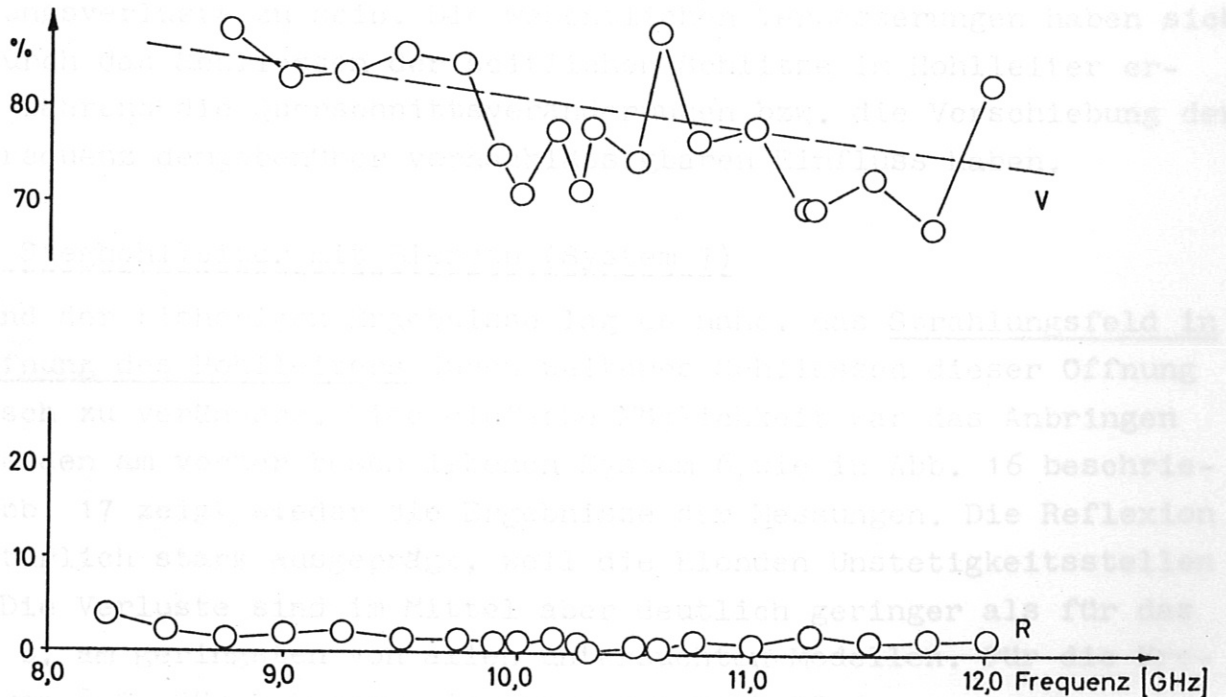


Abb. 13 Messergebnisse für das System 5

2.6.3 Steghohlleiter mit kleinerem Querschnitt (System 5)

Nach den Ergebnissen der Messungen an System 4 schien es sinnvoll zu sein, zu höheren Grenzfrequenzen Überzugehen. Erprobt wurde ein Hohlleiter mit geringerem a_1 , und zwar mit einer um den Faktor 1,4 höheren Grenzfrequenz als der des Systems 3 (die Transformation ist allerdings nicht mehr "ideal"). Abb. 12 zeigt die Geometrie und Abb. 13 die Messergebnisse. Die Verluste sind (bei guter Anpassung, d. h. geringem R) im Mittel nicht geringer sondern viel höher als für den Steghohlleiter des Systems 3. Die aus den vorangehenden Messergebnissen abgeleitete Vermutung, dass die Verluste mit der Erhöhung der Grenzfrequenz geringer werden würden, hat sich nicht bestätigt.

2.6.4 Steghohlleiter mit grösserem Querschnitt (System 6)

Zur Klärung der Verhältnisse wurde noch eine Gegenprobe mit einem Steghohlleiter (System 6) gemacht, dessen Querdimension a_1 so gewählt wurde, dass die Grenzfrequenz um den Faktor 1,2 zu niederen Frequenzen verschoben war (entsprechend dem vorher beschriebenen Fall mit Plexiglaskeilen). Abb. 14 zeigt dies System und Abb. 15 die Messergebnisse. Auch hier sind die Verluste im Mittel wieder höher als für das System 3 und stimmen mit den mittleren Werten der Messungen mit Plexiglas überein. Bei den vorgegebenen Dimensionen des Steges scheint der normale Querschnitt des Hohlleiters ($a_1 = 22,8$ mm) optimal bezüglich der Abstrahlungsverluste zu sein. Die wesentlichen Verbesserungen haben sich also durch das Schliessen der seitlichen Schlitze im Hohlleiter ergeben, während die Querschnittsveränderungen bzw. die Verschiebung der Grenzfrequenz demgegenüber vernachlässigbaren Einfluss haben.

2.6.5 Steghohlleiter mit Blenden (System 7)

Aufgrund der bisherigen Ergebnisse lag es nahe, das Strahlungsfeld in der Öffnung des Hohlleiters durch weiteres Schliessen dieser Öffnung drastisch zu verändern. Eine einfache Möglichkeit war das Anbringen von Blenden am vorher beschriebenen System 6, wie in Abb. 16 beschrieben. Abb. 17 zeigt wieder die Ergebnisse der Messungen. Die Reflexion ist natürlich stark ausgeprägt, weil die Blenden Unstetigkeitsstellen sind. Die Verluste sind im Mittel aber deutlich geringer als für das System 6, am geringsten von allen untersuchten Modellen. Für die Frequenz von 8,75 GHz betragen sie sogar nur noch 10 %.

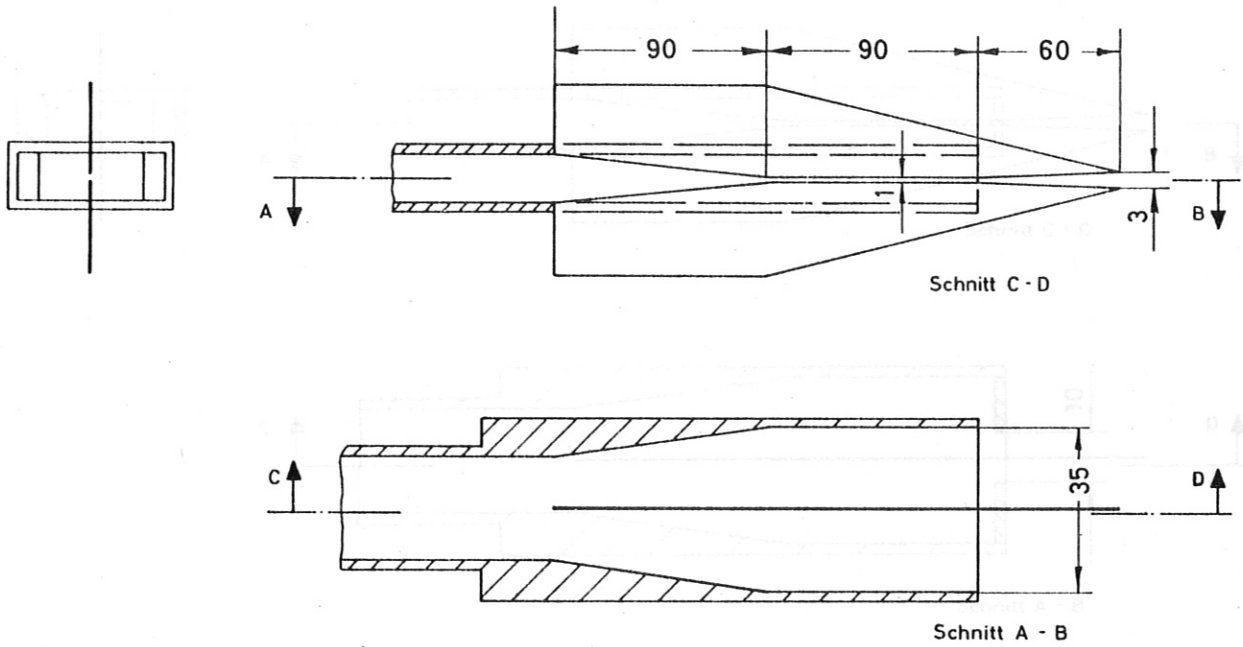


Abb. 14 System 6 (erweiterter Querschnitt)

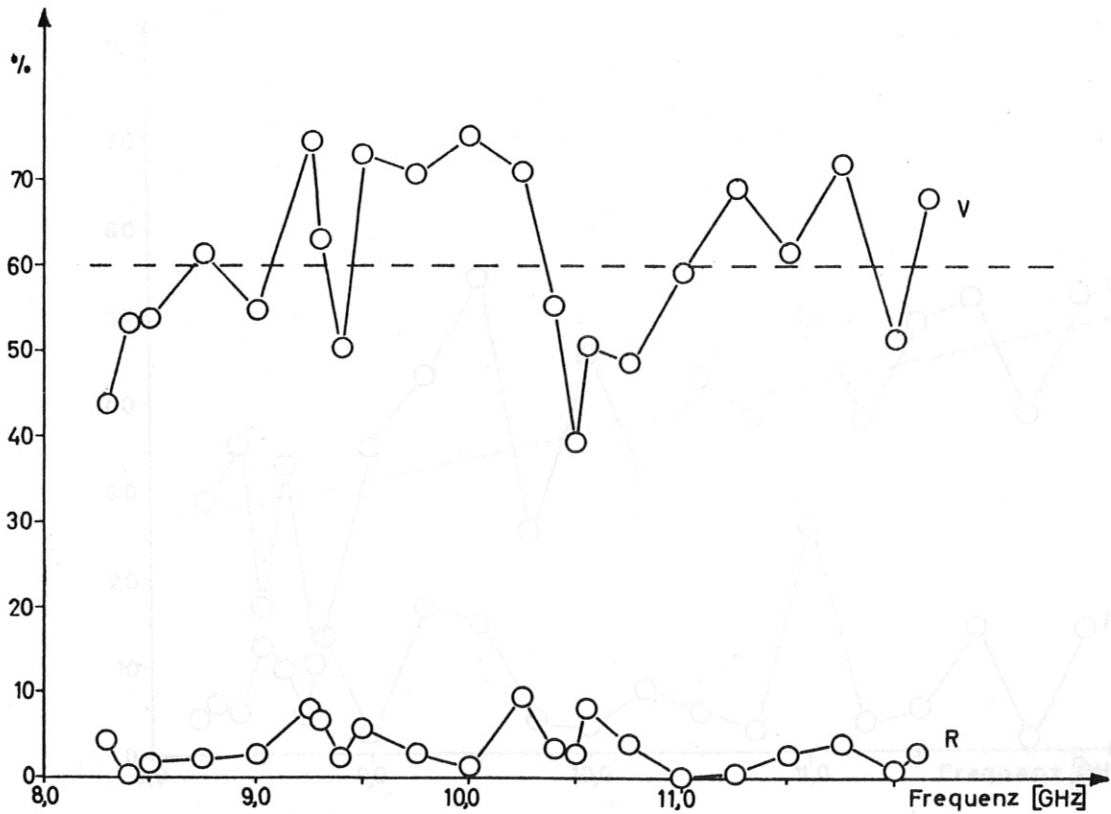


Abb. 15 Messergebnisse für das System 6

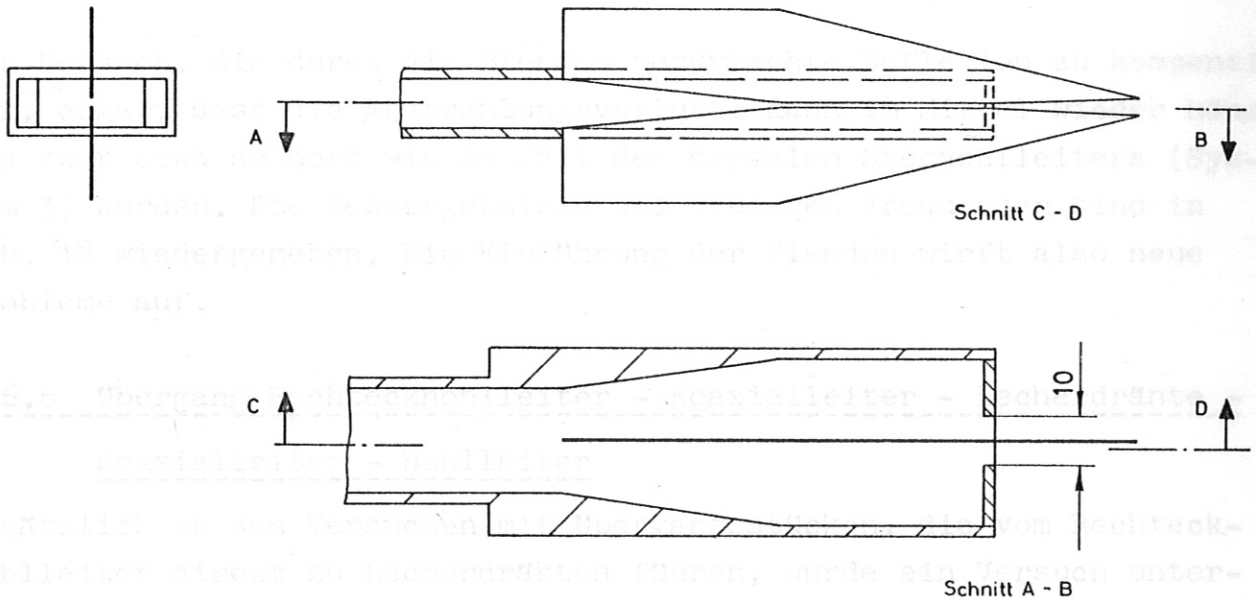


Abb. 16 System 7 (mit Blenden)

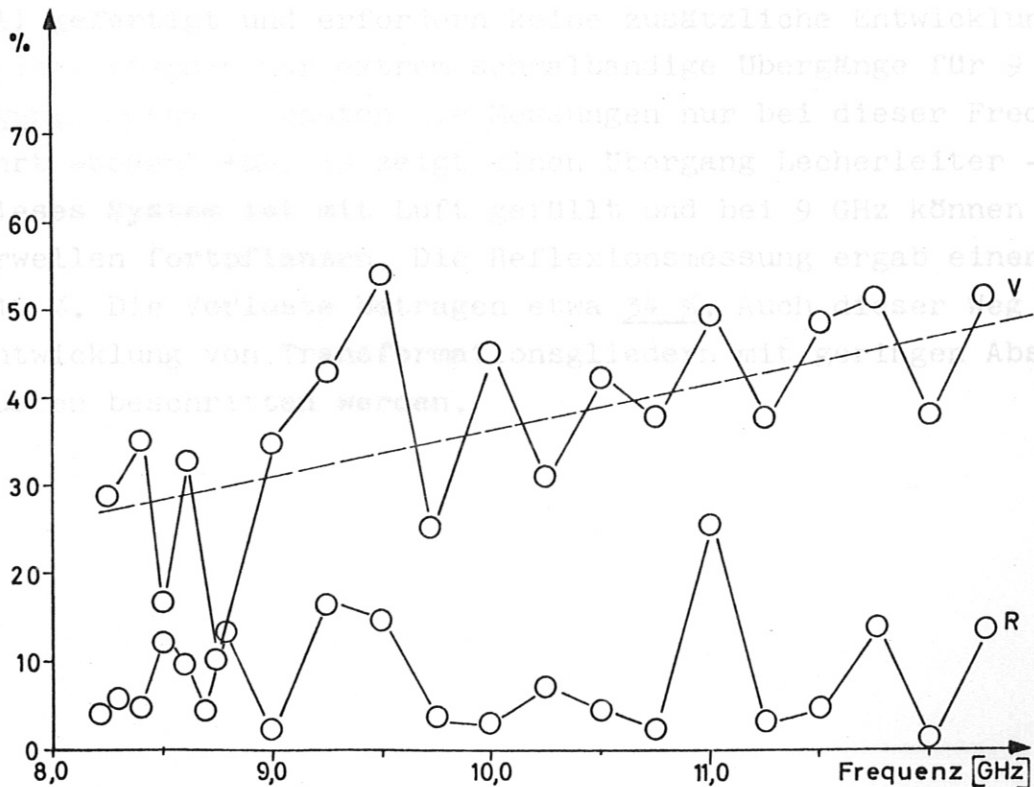


Abb. 17 Messergebnisse für das System 7

Damit ist gezeigt, dass das Strahlungsfeld in der Nähe der Öffnung beeinflusst werden muss, wenn die Abstrahlungsverluste herabgesetzt werden sollen.

Ein Versuch, die durch die Blenden verursachte Reflexion zu kompensieren, ergab, dass die Abstrahlungsverluste dann im Mittel wieder höher, und zwar etwa so hoch wie im Fall des normalen Steghohlleiters (System 3) wurden. Die Messergebnisse bei niederen Frequenzen sind in Abb. 18 wiedergegeben. Die Einführung der Blenden wirft also neue Probleme auf.

2.6.6 Übergang Rechteckhohlleiter - Koaxialleiter - Lecherdrähte - Koaxialleiter - Hohlleiter

Zusätzlich zu den Versuchen mit Übergangsstücken, die vom Rechteckhohlleiter direkt zu Lecherdrähten führen, wurde ein Versuch unternommen, das Problem mit Hilfe von zwischengeschalteten Koaxleitern zu lösen. Im Koaxleiter kann sich die Wellenenergie bei richtiger Dimensionierung nur in Form von Lecherwellen fortpflanzen. Es sollte also einfacher sein, TEM-Wellen dieser Form in die Drahtleitung zu transformieren. Übergänge vom Hohlleiter auf den Koaxleiter werden industriell gefertigt und erfordern keine zusätzliche Entwicklungsarbeit. Leider standen nur extrem schmalbandige Übergänge für 9 GHz zur Verfügung. Deshalb konnten die Messungen nur bei dieser Frequenz durchgeführt werden. Abb. 19 zeigt einen Übergang Lecherleiter - Koaxleiter. Dieses System ist mit Luft gefüllt und bei 9 GHz können sich nur Lecherwellen fortpflanzen. Die Reflexionsmessung ergab einen Wert von etwa 10 %. Die Verluste betragen etwa 34 %. Auch dieser Weg kann bei der Entwicklung von Transformationsgliedern mit geringen Abstrahlungsverlusten beschritten werden.

Munte

Draht

Übergang vom Lecher- zum Koaxleiter

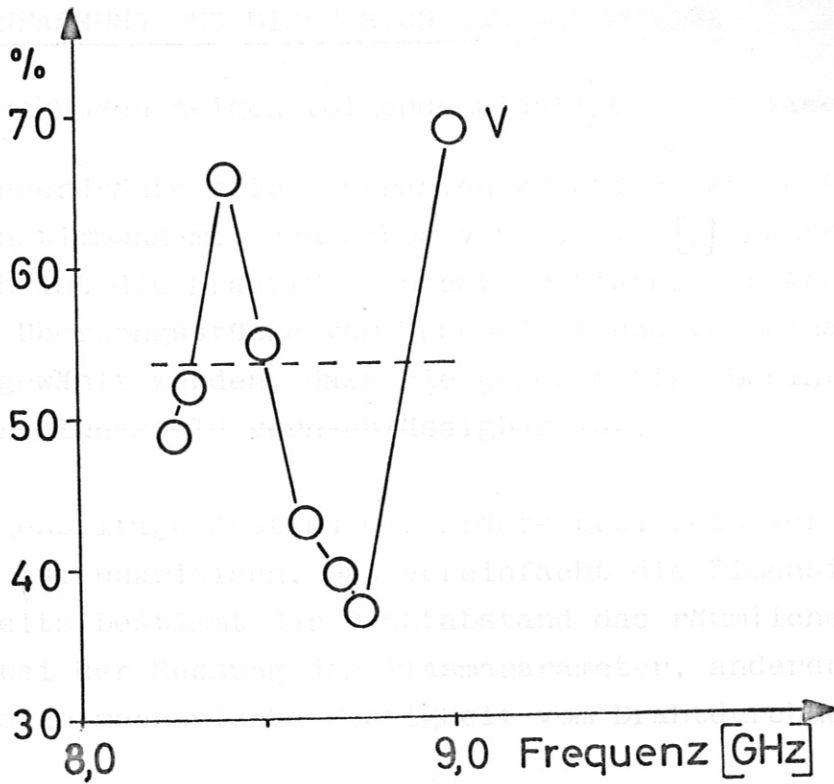


Abb. 18 Messergebnisse für das System 7 bei Kompensation der Reflexion

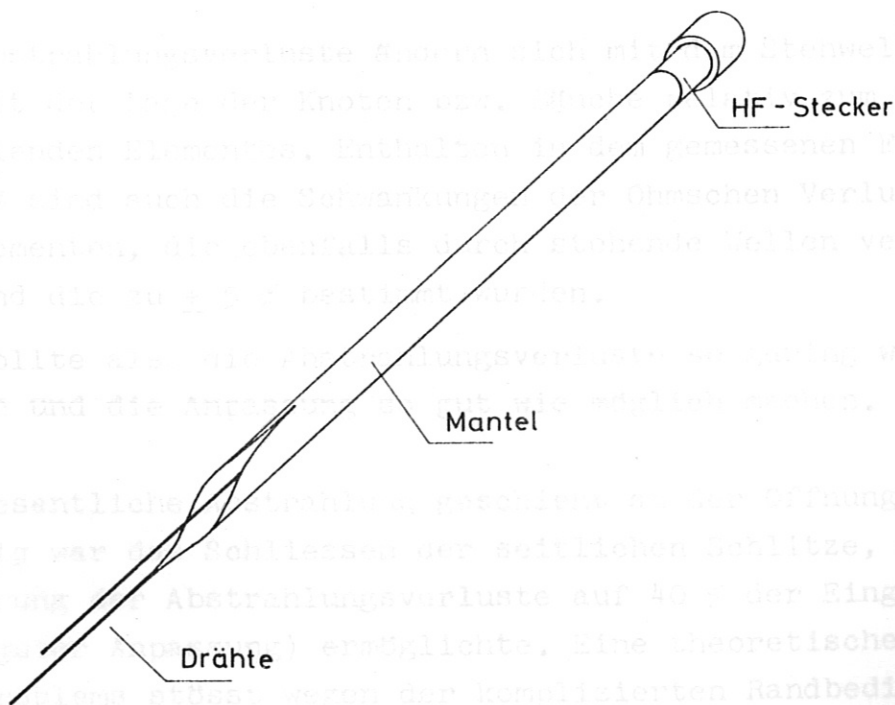


Abb. 19 Übergang vom Lecher- zum Koaxleiter

3. ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Die Untersuchungen zeigen folgende wichtige Ergebnisse:

- 1.) Die Lecherdrähte selbst strahlen praktisch keine Leistung ab (in Übereinstimmung mit den schon von G. Mie [3] gemachten Annahmen). Dadurch ist die Drahtlänge nicht kritisch. Der Abstand der strahlenden Übergangsstücke vom Messobjekt und von einander kann so gross gewählt werden, dass die gegenseitige Beeinflussung über das Strahlungsfeld vernachlässigbar ist.
- 2.) Der gegenseitige Abstand der Drähte bzw. sein Verhältnis zum Durchmesser ist unkritisch. Das vereinfacht die Dimensionierung, denn einerseits bestimmt der Drahtabstand das räumliche Auflösungsvermögen bei der Messung der Plasmaparameter, andererseits hängt die notwendige mechanische Festigkeit vom Drahtdurchmesser ab.
- 3.) Die Übergänge strahlen einen erheblichen Teil der Leistung ab. Es ist aber möglich, diese Verluste durch geeignete Formgebung der Übergangsstücke merklich zu reduzieren. Damit steht für die Messung mehr Leistung zur Verfügung, was bei Interferometerschaltungen im Bereich sehr hoher Frequenzen wichtig ist.
- 4.) Die Abstrahlungsverluste ändern sich mit dem Stehwellenverhältnis und mit der Lage der Knoten bzw. Bäuche relativ zum Ort des abstrahlenden Elementes. Enthalten in dem gemessenen Fehler von $\pm 10\%$ sind auch die Schwankungen der Ohmschen Verluste in den Bauelementen, die ebenfalls durch stehende Wellen verursacht werden und die zu $\pm 5\%$ bestimmt wurden.

Man sollte also die Abstrahlungsverluste so gering wie möglich halten und die Anpassung so gut wie möglich machen.

- 5.) Die wesentliche Abstrahlung geschieht an der Öffnung der Übergänge. Günstig war das Schliessen der seitlichen Schlitzes, das eine Reduzierung der Abstrahlungsverluste auf 40% der Eingangsleistung (bei guter Anpassung) ermöglichte. Eine theoretische Behandlung des Problems stösst wegen der komplizierten Randbedingungen auf zu grosse Schwierigkeiten, als dass auf diesem Weg Hinweise für weitere Verbesserungen schnell zu erwarten sind.

- 6.) Die empirische Variation der Geometrie der Übergangsstücke führte zu keinem systematischen Lösungsweg des Problems und wurde deshalb (auch aus zeitlichen Gründen) abgebrochen. Dass durch Verwendung eines Koaxleiters zwischen Hohlleiter und Lecherleitung weitere Verbesserungen erzielt werden können, ist nicht auszuschliessen.

Literatur

- [1] W. MAKIOS: Mikrowelleninterferometrie an elektromagnetisch erzeugten Stosswellen, IPP 3/35 (Febr. 1966)
New Microwave Interferometric Device Using Lecher Wires for High Spatial Resolution, Rev.Sci.Instr. (March 1967)
- [2] TSUNG-SHAN CHEN: Calculation of the Parameters of Ridge Waveguides, IRE-MTT, (January 1957) p. 12
- [3] G. MIE: Elektrische Wellen an zwei parallelen Drähten, Annalen der Physik 2, 201 (1900)