

Technischer Bericht Nr. 32

Die H_{01} -Welle im Kreishohlleiter

— Übersicht —

Dipl.-Ing. G. MORGENSTERN

Die H_{01} -Welle im Kreishohlleiter

- Übersicht -

Zusammenfassung

Unter geeigneten Betriebsbedingungen läßt sich der Hohlleiter mit kreisförmigem Querschnitt als Nachrichten-Übertragungskanal mit geringer Dämpfung und großer Bandbreite für weite Entfernungen benutzen.

Die Berechnungen und experimentellen Untersuchungen im Zusammenhang mit der technischen Verwirklichung einer Nachrichtenübertragung durch den Kreishohlleiter, die in der letzten Zeit veröffentlicht worden sind, werden nach einem systematischen Gesichtspunkt geordnet, deren Methoden skizziert und die wichtigsten Ergebnisse erwähnt.

Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung

Der Bearbeiter

gez. G. Morgenstern

(Dipl.-Ing. G. Morgenstern)

Der Abteilungsleiter

gez. Gundlach

(Prof.Dr.-Ing.F.W. Gundlach)

Der Institutsdirektor

gez. Cremer

(Prof.Dr.-Ing. Lothar Cremer)

Berlin-Charlottenburg, den 25. September 1959

I n h a l t

Einführung

- I) Kleine Abweichungen des Hohlleiters vom Kreiszyylinder
- II) Elimination von unerwünschten Wellentypen durch Verwendung von Wellenfiltern und von Hohlleitern mit anisotroper Leitfähigkeit.
- III) Anregungsmethoden für die H_{01} -Welle
- IV) H_{01} -Welle im gekrümmten Kreishohlleiter
- V) Verschiedene in der Praxis des Leitungsbaues entstehende Probleme
- VI) Spezielle für H_{01} -Betrieb erfundene Messverfahren
- VII) Literaturverzeichnis.

E i n f ü h r u n g

Ziel und Zweck der folgenden Ausführungen soll sein, einen Überblick über den Stand der theoretischen und experimentellen Forschung im Zusammenhang mit einem neuen Anwendungsgebiet der Hohlleitertechnik zu geben, der H_{01} -Welle im Kreishohlleiter.

Um den stark steigenden Bedarf an Nachrichtenmitteln zu befriedigen, ist man gezwungen, immer höhere Frequenzen in Form von Hertzschen Kabeln zu benutzen.

Dieser Entwicklung sind ziemlich unverrückbare Grenzen gesetzt, einmal durch die Absorption der elektromagnetischen Wellen in der Atmosphäre im Bereich der Millimeterwellen und dann durch die Brechung an den verschiedenen Schichten der Atmosphäre, die eine Ausbreitung jenseits des Horizonts hervorruft und eine gegenseitige Störung der Richtfunkstrecken befürchten läßt, sobald diese zu zahlreich werden.

Unbefriedigend ist ferner der Mangel des Schutzes gegen das Abhören.

Einen vielversprechenden Ausweg aus dieser Sackgasse bietet die Verwendung der Wellenausbreitung in einem begrenzten Medium, in einem Hohlleiter.

Der nach klassischer Art in der Grundwelle betriebene Rechteckhohlleiter weist eine viel zu große Dämpfung (etwa 120 db/km für $\lambda = 3,2$ cm) und zu starke Dispersionsverzerrung auf, um als Nachrichtenübertragungskanal verwendet werden zu können.

Diese beiden Nachteile der starken Dämpfung und der hohen Dispersion können stark reduziert werden, wenn man dafür den unbequemen Umstand in Kauf nimmt, daß sich in dem Hohlleiter nicht nur ein einziger Wellentyp, sondern eine große Zahl (mit verschiedenen Eigenschaften) Wellen ausbreiten können.

Während im Rechteckhohlleiter für alle Wellentypen die Dämpfung α von der Betriebsfrequenz derart abhängt, daß α ein Minimum nicht allzuweit oberhalb der Grenzfrequenz besitzt, ist im Kreishohlleiter eine Gruppe von Wellentypen vorhanden, die H_{on} -Wellen, bei denen die theoretisch berechnete Dämpfung mit wachsender Frequenz sich mit $f^{-3/2}$ dem Wert 0 nähert. Von diesen hat die H_{01} -Welle die kleinste Grenzfrequenz und die geringste Dämpfung.

Je kleiner die Dämpfung sein soll, desto mehr Wellen sind im Hohlleiter ausbreitungsfähig. Diese parasitären Wellen sind es, - deren Entstehungsursachen, deren Einfluß auf die H_{01} -Welle, deren Elimination, - die die Untersuchungen über die H_{01} -Welle zu einem umfangreichen Forschungskapital der Nachrichtentechnik haben anwachsen lassen. Sie sind die Ursachen - bei Unregelmäßigkeiten, Diskontinuitäten und Krümmungen, - von zusätzlichen Energieverlusten und von Verzerrungen. Sie machen die Richtungsänderung einer Leitung zu einem delikaten Problem und die Anregung dieser Welle erfordert umfangreiche Vorsichten.

I) Kleine Abweichungen des Hohlleiters vom Kreiszyylinder

Nachdem die Theorie der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in Hohlleitern eine Wellenform mit begehrenswerten Ausbreitungseigenschaften hat erkennen lassen, ergibt sich nun die weit mühseligere Aufgabe, sich diesem von der Theorie gelieferten asymptotischen Wert möglichst weit zu nähern.

Diese Annäherung erfolgt in der Weise, daß die verschiedenen Einflüsse möglichst weitgehend getrennt durch Rechnung und Versuch bestimmt werden.

Die Ursachen für die H_{01} -Energieverluste können in zwei Kategorien gegliedert werden:

- a) Verluste durch Umwandlung in andere, parasitäre Wellen, die in gleicher oder entgegengesetzter Richtung fortschreiten, kurz Umwandlungsverluste
- b) Verluste durch Umwandlung der H_{01} -Welle in Wärme.

Die erste Gruppe stellt ein typisches Problem der Multiwellenhohlleiter dar und wird nun genauer analysiert:

Ein großer Teil der Probleme im Zusammenhang mit der H_{01} -Welle im Kreishohlleiter befaßt sich mit den Störungen, die durch irgendwelche kleine Abweichungen des Hohlleiters von der idealen Gestalt eines vollkommenen Kreiszylinders verursacht werden.

Bei der mathematischen Behandlung wird fast durchweg das tatsächliche Feld im gestörten Kreishohlleiter nach den Normalwellen oder Wellentypen des ungestörten Kreishohlleiters entwickelt, und das zu lösende Problem besteht darin, die Amplituden der Normalwellen des idealen Kreishohlleiters zu bestimmen.

Als Normalwellen werden solche rein fortschreitenden Wellen bezeichnet, die

- 1) voneinander unabhängig sind und
- 2) die ohne Änderung ihrer Amplitude und der Struktur ihres Feldlinienbildes längs des Hohlleiters fortschreiten. Diese Definition wird im Verlauf der Ausführungen auch auf gekrümmte oder mit Dielektrikum gefüllte Hohlleiter angewandt.

a) Die Achsen von zwei Hohlleiterabschnitten bilden einen kleinen Winkel

In dem ersten Teil einer japanischen Arbeit 25) werden die Amplituden der Wellentypen berechnet, die erregt werden, wenn eine H_{01} -Welle auf einen leichten Knick der Achse des Hohlrohres fällt. Die sich schneidenden Achsen der beiden vollkommenen Kreisrohre bilden einen Knickwinkel von 2α , die Rechnung wird

in erster Näherung als Funktion des Knickwinkels durchgeführt.

Mathematisches Verfahren:

Der Gedankengang der Rechnung ist folgender:

Die elektrischen und magnetischen Felder in dem ersten und zweiten Hohlleiter werden in Reihen nach den Normalwellen des Kreishohlleiters mit unbestimmten Amplituden entwickelt. Unter Beachtung der Tatsache, daß die Querschnitte beider Hohlleiter nicht parallel zu der gemeinsamen Schnittebene der Hohlleiter sind und daß in der Schnittebene die elektrischen und magnetischen Felder in beiden Hohlleitern gleich sein müssen, erhält man zwei vektorielle Gleichungen - eine für die Gleichheit des zur Schnittebene tangential liegenden elektrischen Feldes, die andere für die Gleichheit des zur Schnittebene tangential liegenden magnetischen Feldes. Indem man beide Seiten dieser obigen Gleichungen mit derjenigen Normalfunktion skalar multipliziert, die untersucht werden soll, über den Querschnitt integriert und von den Orthogonalitätsbeziehungen zwischen den Normalfunktionen Gebrauch macht, erhält man Amplitude von reflektierter und durchgelassener Welle dieses Wellentyps.

Ergebnis:

Es ergibt sich, daß durch die einfallende H_{01} -Welle folgende Wellentypen erregt werden: Reflektierte und durchgelassene H_{1n} -Wellen und durchgelassene E_{11} -Wellen.

Bemerkenswert ist der Vergleich mit den noch später zu diskutierenden Ergebnissen einer kontinuierlichen Krümmung. Es werden in beiden Fällen die gleichen Wellentypen erregt und bei gleichem Krümmungswinkel ist die Stärke der Erregung der E_{11} -Welle die gleiche.

b) Die Achsen von zwei Hohlleiterabschnitten sind gegeneinander versetzt

Nach dem gleichen Verfahren werden in dem zweiten Teil die-

ser Arbeit 25) die bei einfallender H_{01} -Welle erregten parasitären Wellen berechnet an einer Stelle, an der zwei Kreishohlleiter aufeinanderstoßen, deren Achsen parallel, aber um eine kleine Größe d gegeneinander versetzt sind.

Ergebnis:

Die Näherung der Rechnung ist wiederum von 1. Ordnung in d/a (a = Hohlleiterradius) und zeigt, daß H_{1n} -Wellen erregt werden und mit umso größerer Amplitude, je näher die Phasenkonstante bei der H_{01} -Welle liegen.

c) Übergang zwischen konischen Abschnitten von verschiedenen Öffnungswinkeln

In Kreishohlleitersystemen tritt die Notwendigkeit auf, Hohlleiter verschiedener Durchmesser durch konische Abschnitte miteinander zu verbinden.

In einer weiteren theoretischen japanischen Studie 24) wird die Wellenumwandlung bei einem Übergang von zwei konischen Abschnitten mit verschiedenen Öffnungswinkeln $\theta_1 : \theta_2$ untersucht und die Koeffizienten der Streumatrix werden für die einfallenden Wellentypen H_{01} , H_{11} und E_{11} berechnet.

Die Rechnung ist eine Näherung der 1. Ordnung in den Öffnungswinkeln θ_1 und θ_2 und der Differenz $\Delta \theta$ beider Winkel.

Aus der Fülle der in Tabellen und graphischen Darstellungen gegebenen Ergebnissen seien einige qualitativ zitiert:

Die H_{01} -Welle erregt nur H_{0n} -Wellen.

Aus den Elementen der Streumatrix entnimmt man, daß von Grenzfällen abgesehen, die Vorwärtsstreuung prop. zu $a \cdot \Delta \theta$ und unabhängig vom Öffnungswinkel ist.

Aus den gegebenen Formeln lassen sich ebenfalls die verteilten Kopplungskoeffizienten pro Längeneinheit eines nicht li-

nearen konischen Abschnittes berechnen. Die Werte stehen in Einklang mit exp. Ergebnissen.

d) Elliptische Verformung

Eine weitere mögliche Abweichung vom idealen Kreishohlleiter besteht in der elliptischen Verformung des Querschnittes.

Zwar lassen sich die Mathieu'schen Funktionen zur Analyse elliptischer Hohlleiter verwenden, aber diese Funktionen sind kompliziert, vollständige Tabellen existieren nicht und das eigentliche lohnenswerte Studium in diesem Zusammenhang ist der elliptische Hohlleiter mit sehr kleiner Exzentrizität.

Hierzu besonders geeignet ist die Methode der Reihenentwicklung nach der Exzentrizität der Ellipse 23). Es werden die Dämpfungen und Phasenkonstanten der Wellen eines elliptischen Hohlleiters unter Verwendung der Lösungen des Kreishohlleiters in Form einer Reihe nach Potenzen von e berechnet. Nur Bessel- und trigonometrische Funktionen werden verwendet.

Für die H_{01} -Welle ist folgendes Ergebnis bemerkenswert.

1. Im Falle des idealen Kreishohlleiters ist die Dämpfung am geringsten.
2. Bei noch so geringer Elliptizität geht die Dämpfung mit steigender Frequenz nicht mehr nach Null, sondern hat ein von e^2 abhängiges Min, welches bei umso niedrigeren Frequenzen liegt, je größer die Exzentrizität e ist.

Auch bei sehr großen Exzentrizitäten wird das Minimum der Dämpfung kaum erreicht, geschweige denn überschritten werden.

e) Sehr geringe, aber sonst beliebige Abweichungen

Ein Störungsproblem etwas anderer Art ist ebenfalls behandelt worden:

Eine rein fortschreitende H_{01} -Welle in einem vollkommenen, ideal kreisrunden und geraden Hohlleiter läuft durch einen ein wenig deformierten Abschnitt endlicher Länge des Hohlleiters.

Die Anregung der einzelnen Wellentypen wird folgendermaßen berechnet:

Der verbeulte Hohlleiter mit verschwindender tangentialer elektrischer Feldstärke an der Oberfläche des deformierten Leiters wird ersetzt durch einen ideal kreiszylindrischen Hohlleiter, aber das tangential elektrische Feld an der Leiteroberfläche verschwindet nicht mehr, sondern ist eine gegebene Funktion der Geometrie der Verbeulung und der Anregung des Hohlleiters.

Eine Messung der Umwandlungsverluste der H_{01} unter kontrollierbaren Bedingungen der Verformung ist im Bell Laboratorium durchgeführt worden, die eine gute Übereinstimmung mit der Rechnung zeigte 4).

f) Zufällige Deformation des Kreishohlleiters:

Anstatt an den Eigenschaften eines einzigen Abschnittes ist man vielmehr an den durchschnittlichen Eigenschaften einer Leitung interessiert, die aus sehr vielen Abschnitten zusammengesetzt ist, deren Abweichungen vom Kreisquerschnitt mehr oder weniger zufällig sind.

Dieses Problem 4) ist mit Hilfe statistischer Annahmen über die Verformung gelöst worden und ergab Ergebnisse, die in Einklang mit durchgeführten Dämpfungsmessungen gebracht werden konnten.

Mit Hilfe der Resultate dieser soeben in großen Umrissen behandelten Studien über Wellenumwandlung durch kleine Deformationen und Diskontinuitäten lassen sich bei einem Entwurf und der Ausführung einer H_{01} -Leitung die einzuhaltenden Toleranzen angeben, um ein vorgegebenes Maß an Verlusten durch Erregung von parasitären Wellen nicht zu überschreiten.

II) Elimination von unerwünschten Wellentypen durch Verwendung von Wellenfiltern und von Hohlleitern mit anisotroper Leitfähigkeit

Wie in einem der folgenden Kapitel noch genauer begründet wird, ist die Beseitigung der entstandenen parasitären Wellen eine Notwendigkeit, sobald die H_{01} -Welle als Nachrichtenkanal verwendet werden soll.

Es sind also Vorrichtungen in die Leitung einzubauen, die die H_{01} -Welle weder reflektieren noch wesentlich dämpfen, aber alle anderen Wellentypen möglichst stark unterdrücken.

Allgemeine Wirkungsweise von Filtern

Einen Hinweis zum Entwurf eines solchen Filters bietet der Verlauf der durch die H_{01} -Welle induzierten Wandströme im Hohlleiter.

Die H_{01} -Welle erzeugt, ebenso wie ihre homologen Wellen, die H_{0n} -Wellen, nur Ströme quer zur Ausbreitungsrichtung, oder Ringströme. Alle übrigen Wellen induzieren Ströme, die auch Komponente in der Wellenausbreitungsrichtung haben.

Weiter ist der Umstand von Nutzen, daß bei der H_{01} -Welle die elektrischen Feldlinien zur Hohlleiterachse konzentrische Kreise bilden, so daß in ebenen, leitenden oder halbleitenden Blättern, die durch die Zylinderachse laufen, von den H_{0n} -Wellen keine Ströme induziert werden, da diese Flächen senkrecht auf den E-Feldlinien stehen.

Scheibenfilter:

Eine beträchtliche Dämpfung der parasitären Wellen wird durch Ersatz des einfachen Zylinderhohlleiters durch eine konzentrische Anordnung von Metallringen erreicht, die gegenseitig isoliert, oder noch besser die in einem verlustbehafteten Medium eingebettet sind, so daß sich keine Längsströme ausbilden können, oder diese stark gedämpft werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, statt der Ringe Scheiben in gleicher Art anzuordnen. Damit die radial austretenden Wellen nicht am Außenrand reflektiert werden, und so wieder die zu eliminierenden Wellen erneut erregen, werden die radialen Wellen durch Dämpfungsmaterial zwischen den Ringen oder Scheiben in Wärme umgewandelt.

Zwei Näherungsverfahren eignen sich gut zu einer quantitativen Studie dieser Scheibenfilterhohlleiter:

- 1) Die Spalten in dem Hohlleiter werden als radiale Hohlleiter betrachtet, die durch die verschiedenen Wellentypen des zentralen Kreishohlleiters angeregt werden 18).
- 2) Ein weiteres Rechenverfahren, ersetzt das geschichtete Medium, bestehend aus Metallplatten und dielektrischen Platten, durch ein homogenes Medium, mit anisotropen Eigenschaften 14).

Schraubenfilterleitung:

Eine sich für die maschinelle Fertigung besonders eignende Form eines Wellenfilters ist die Schraubenleitung:

Ein dünner, isolierter Draht wird als Wendel auf eine kreiszylindrische Form so gewickelt, daß die Windungen dicht liegen. Diese Wendel werden mit einem verlustbehafteten Dielektrikum umgossen und die Zylinderform wird entfernt. Der aufgewickelte Draht bildet dann die Hohlleiterwandung.

Auch diese Art Wellenfilter ist einer genäherten quantitativen Auswertung zugänglich 13):

Dabei wird der wendelförmige Draht idealisiert durch eine Grenzschrift mit anisotropen Grenzbedingungen: In Richtung des Drahtes wird diese Grenzschrift als idealer Leiter betrachtet. Quer zur Drahtichtung wird die Grenzschrift als ideal dielektrisch angesehen. Ein Beispiel für die maximal erzielbare Dämpfung eines Wellentyps, der sehr wenig durch diese Filter gedämpft wird: Durchmesser des Hohlleiters: 51 mm, H_{12} -Welle, freie Wellenlänge 5,4 mm, Dämpfung: 10 db/m.

Flügelfilter 3):

Eine andere Möglichkeit, parasitäre Wellen zu eliminieren, besteht darin, verlustbehaftete Blätter so einzufügen, daß die elektrischen Feldlinien der H_{01} -Welle senkrecht darauf stehen:

Filter für die H_{on} -Wellen

Eine Sonderstellung unter den parasitären Wellen nehmen die H_{on} -Wellen mit n größer als 1 ein, denn ihre Feldverteilung ist der der H_{01} -Welle so ähnlich, daß sie durch keine der bisher erwähnten Filter irgendwie beeinflußt werden.

Einen Angelpunkt zu ihrer Elimination bieten die von der H_{01} -Welle verschiedenen Phasenkonstanten:

Es ist vorgeschlagen worden 26), in den Hohlleitern periodische Strukturen in Form von dielektrischen planparallelen Scheiben senkrecht zur Ausbreitungsrichtung einzubauen. Solche periodische Anordnung hat Sperr- und Durchlassbereich, die von der Hohlleiterwellenlänge abhängen.

Das Filter muß nun so dimensioniert werden, daß die H_{01} -Welle bei der benutzten Frequenz in einem Durchlassbereich und die H_{02} - und vielleicht auch noch die H_{03} -Welle in einem Sperrbereich liegen.

Dieses Filter eliminiert aber nicht die parasitären H_{on} -Wellen sondern reflektiert sie und stellt somit nur eine teilweise Lösung des Problems dar. Außerdem wird die große, zur Verfügung stehende Bandbreite erheblich eingeschränkt. Es fragt sich, ob es nicht günstiger ist, die Erregung der H_{on} -Wellen durch größte Vorsicht so klein zu halten, daß keine große Störungen zu befürchten sind.

III) Anregungsmethoden für die H_{01} -Welle

Es folgen nun einige Beispiele von Vorrichtungen zur Erregung von H_{01} -Wellen.

Anregung durch Doppelöffnungen

Verhältnismäßig einfach in Wirkungsweise und Konstruktion sind Erregervorrichtungen, die in einer geeignet angebrachten kleinen Zahl von Koppellöchern im Kreishohlleiter bestehen, die in Phase und Polarisationsrichtung so erregt werden, daß starke Komponenten des erregenden Feldes an der Kreishohlleiteroberfläche in Richtung der Komponenten des H_{01} -Feldes im Kreishohlleiter liegen.

Hier in Form von Bildern zwei Beispiele:

1.) nach LANCIANI 9) Bild 1; Seite 27

2.) " SIMS 7) Bild 2; Seite 27

Diese Vorrichtungen haben den Nachteil, daß die Stärke der Erregung frequenzabhängig ist und viele parasitäre Wellen angeregt werden können.

Anregung durch Interferenzrichtungskoppler:

Das Prinzip des Interferenzrichtungskopplers 8) läßt sich verwenden um praktisch die gesamte Energie von einem Rechteckrohr

in die H_{01} -Welle eines Kreisrohres zu übertragen.

Dabei werden neben der Feldkonfiguration der zu erregenden Welle die Unterschiede in den Phasenkonstanten der verschiedenen Wellentypen benutzt, um eine reine H_{01} -Wellenerregung zu erreichen.

Das Prinzip des Interferenzrichtungskopplers kann kurz folgendermaßen beschrieben werden:

In einem Hohlleitersystem, das aus zwei parallelen aneinanderliegenden Hohlleitern besteht, in dem zwei ursprünglich unabhängige Wellentypen gleicher Phasenkonstanten miteinander durch Koppellöcher oder -schlitze gekoppelt werden, existieren wieder zwei unabhängige Wellen, sogenannte Normalwellen, diesmal aber mit ein wenig verschiedenen Phasenkonstanten, die durch die Summe und die Differenz der ungekoppelten Wellentypen gebildet werden. Die Erregung eines Wellentyps des ungekoppelten Systems entspricht der Erregung beider Normalwellen des gekoppelten Systems mit gleichen Amplituden. Wegen der verschiedenen Phasenkonstanten der gekoppelten unabhängigen Wellentypen, entstehen längs der Hohlleiterachsen Schwebungen in der Anregung der Normalwellen.

Bei der Verwendung des Interferenzrichtungskopplers zur Erregung der H_{01} -Welle wird das Hohlleitersystem durch eine Kombination eines Rechteckhohlleiters und eines Kreishohlleiters gebildet, die durch Löcher oder Schlitze in gleichmäßigem Abstand über eine gewisse Länge miteinander gekoppelt sind. Die Querschnittsdimensionen sind so gewählt, daß die Phasenkonstanten der H_{01} -Welle im Kreishohlleiter und der Grundwelle im Rechteckhohlleiter gleich sind.

Wenn am Anfang der Koppelstrecke die Energie in den Rechteckhohlleiter eingespeist wird, ist auf Grund des eben genannten Prinzips nach einer Koppellänge der halben Schwebungswellenlänge der beiden Normalwellen des gekoppelten Systems die gesamte Energie im Kreishohlleiter.

Wellen, deren Phasenkonstanten von der Grundwelle des Rechteckhohlleiters verschieden sind, werden nur sehr schwach erregt.

Der Wirkungsgrad der Anordnung ist frequenzabhängig, wie sich aus der Wirkungsweise eines Interferenzkopplers ergibt.

Anregung durch allmählichen Übergang vom Rechteck- zum Kreisquerschnitt

Eine praktisch 100 %ige Ankopplung, die weitgehendst frequenzunabhängig ist, besteht in einem allmählichen Übergang des Rechteckquerschnitts zum Kreisquerschnitt, der so ausgeführt werden muß, daß die Feldlinien der Grundwelle des Rechteckrohres beim Fortschreiten in Wellenrichtung (Wellenausbreitungsrichtung) langsam und allmählich in die Feldlinien der H_{01} -Welle des Kreisleiters gebogen werden (9); 3); 10).

Der Wirkungsgrad, die Wellenreinheit und die Frequenzbreite dieser Anregungsvorrichtung können durch Verlängern des Überganges sehr gesteigert werden.

IV) H_{01} -Welle im gekrümmten Kreishohlleiter

Ohne die Möglichkeit, im Zuge einer Leitung eine Richtungsänderung durchzuführen, hat die Konstruktion einer Kreishohlleitung für die H_{01} -Welle nur ein akademisches Interesse.

Das Problem des Verhaltens elektromagnetischer Wellen in schwach gekrümmten Kreishohlleitern ist nach dem Verfahren der Reihenentwicklung nach Normalwellen des nicht gekrümmten Kreishohlleiters behandelt, und für den wichtigen Fall der Erregung durch die H_{01} -Welle in erster Näherung weitgehendst gelöst worden (15); 21).

Für die Amplituden dieser Normalwellen des geraden Kreishohlleiters erhält man bei diesem Verfahren ein unendliches System gekoppelter Diff. Gl. der folgenden Form:

$$\frac{da_i}{dz} = j \sum_{k=1}^{\infty} c_{ik} a_k \quad (i = 1; 2; 3 \dots\dots)$$

c_{ik} sind die von z , der Koordinate der Ausbreitungsrichtung unabhängigen, aus den Maxwell'schen Gleichungen und den Randbedingungen durch Integration berechenbaren Ausbreitungs-; bez. Kopplungskoeffizienten.

$a_i(z)$ sind die Amplituden der Normalwellen des geraden Hohlleiters.

Aus dem Koeffizientenschema der c_{ik} ergibt sich, daß durch die Krümmung folgende Wellen direkt mit der H_{01} -Welle gekoppelt sind:

$$E_{11}, H_{1n} \quad (n = 1; 2; 3 \dots\dots)$$

Diese Wellen sind nun wieder mit anderen Wellen gekoppelt, so daß letzten Endes eine sehr große Zahl parasitärer Wellen angeregt werden.

Die Kopplung dieser Wellentypen wirkt sich physikalisch so aus: Wird eine Welle, z.B., die H_{01} -Welle am Anfang des gebogenen Hohlleiters angeregt, so pendelt beim Fortschreiten längs des gekrümmten Hohlleiters die Energie teilweise oder ganz zwischen den gekoppelten Wellentypen hin und her, genauso, wie die Energie zwischen mehreren lose gekoppelten Pendeln mit der Zeit hin und her wandert.

Zwecks quantitativer Diskussion der Kopplung wird die Wechselwirkung von jeweils nur zwei Wellen betrachtet. Dann bleibt folgendes Diff. Gl. System übrig:

$$\frac{da_0}{dz} = -j\beta_0 a_0 - jc_{01} a_1$$

$$\frac{da_1}{dz} = -jc_{01} a_0 - j\beta_1 a_1$$

Nun läßt sich die praktisch wichtige Frage beantworten:

Wie groß ist maximal die Energie, die in einer parasitären Welle vorliegen kann?

a_0 sei die Amplitude der H_{01} -Welle
 a_1 sei die Amplitude einer mit der
 H_{01} -Welle gekoppelten Welle.

Bei $z = 0$ beginne die Krümmung, dort werde eine reine H_{01} -Welle angeregt. Bei diesen Randbedingungen erhält man für die Energie der parasitären Welle als Funktion von z folgenden Ausdruck:

$$E_1 = |a_1(z)|^2 = \frac{4c_{01}^2}{(\beta_0 - \beta_1)^2 + 4c_{01}^2} \sin^2 \left\{ \frac{1}{2} \left[(\beta_0 - \beta_1)^2 + 4c_{01}^2 \right]^{\frac{1}{2}} z \right\}$$

Die maximale Energie ist gleich dem Ausdruck:

$$\frac{4c_{01}^2}{(\beta_0 - \beta_1)^2 + 4c_{01}^2}$$

Diese maximale Energie ist umso kleiner, je kleiner der Koppelungskoeffizient ist und je größer die Differenz der Phasenkonstanten der gekoppelten Wellen ist. Es werden also nur solche Wellentypen stark angeregt, deren Phasenkonstante fast gleich der der H_{01} -Welle sind.

Da sämtliche Kopplungskoeff. prop. zur Krümmung sind, läßt sich die parasitäre Energie durch Wahl eines genügend großen Krümmungsradius beliebig klein machen, sofern nur die Phasendifferenz der beiden Wellen von 0 verschieden ist.

Bei der H_{01} -Welle tritt der unangenehme Sonderfall ein, daß sie mit einer Welle gleicher Phasenkonstanten, der E_{11} -Welle, gekoppelt ist. Dann ist bei noch so geringer Kopplung und wegen der Proportionalität noch so geringer Krümmung an räumlich

periodischen Abständen in Ausbreitungsrichtung die gesamte Energie der H_{01} -Welle in die E_{11} -Welle umgewandelt. Der Krümmungswinkel, nach dem eine vollständige Energieumwandlung stattgefunden hat, beträgt unabhängig vom benutzten Krümmungsradius bei der Biegung: in Grad: $155 \frac{\lambda_0}{a}$ (a = Durchmesser des Kreishohlleiters) und wird zu Ehren des Forschers, der ihn zuerst berechnet hat Jouguet'scher Winkel genannt, 1).

Unter diesen idealisierten Umständen würde es also nicht möglich sein, die H_{01} -Welle in einem Kreishohlleiter am Äquator um die Erde herumzuführen. An bestimmten Breitengraden würde die H_{01} -Welle vollständig in die E_{11} -Welle überführt werden.

Tatsächlich sind wir hier das Opfer einer Idealisierung geworden: Wegen der Differenz der Dämpfung zwischen der H_{01} - und der E_{11} -Welle sind die Phasenkonstanten der beiden Wellen verschieden, ist also die Entartung nicht vollständig. Jouguet gibt dazu folgendes numerisches Beispiel:

Ein Kupferrohr vom Querschnittsradius 5 cm wird am Anfang durch eine reine H_{01} -Welle angeregt mit der freien Wellenlänge $\lambda_0 = 1$ cm. Damit in Form der E_{11} -Welle nicht mehr als 4 % der Energie vorliegt, muß der Krümmungsradius mindestens 9 km groß sein. Um sich eine anschauliche Vorstellung von diesen Größenverhältnissen zwischen Krümmungsradius und Hohlleiterdurchmesser zu machen, stelle man sich eine Bogenlänge von 50 m dieses gekrümmten Rohres vor. Dann würde man von der Öffnung an einem Ende aus durch das gekrümmte Rohr noch die vollständige Öffnung des anderen Endes sehen können.

Aber auch das sind noch sehr scharfe Toleranzen, die an die Geradlinigkeit gestellt werden.

Beschreibung durch Normalwellen des gekrümmten Rohres

Es gibt eine zweite für das Folgende wichtige Beschreibungsweise des Verhaltens der H_{01} -Welle im gekrümmten Hohlleiter 2):

Aus dem System der beiden gekoppelten Diff. Gl. folgt:

Auch im gekrümmten Hohlleiter gibt es Normalwellen - vollständige Leitfähigkeit vorausgesetzt - , die ohne Änderung ihrer Amplitude und Ihrer Struktur des Feldbildes längs des gekrümmten Hohlleiters fortschreiten.

Solche Normalwellen des gekrümmten Hohlleiters lassen sich - genauso wie jede nur mögliche Feldverteilung - als Linearkombination der Normalwellen des geraden Hohlleiters darstellen. Uns interessieren die Normalwellen des gekrümmten Hohlleiters, die einen bedeutenden Anteil an H_{01} -Wellen enthalten.

Diese sind z.B. in erster Näherung und unendliche Leitfähigkeit vorausgesetzt:

$$H_{01}-E_{11} \quad \text{und} \quad H_{01}+E_{11}$$

mit ein wenig voneinander verschiedenen Phasenkonstanten. Eine einfallende H_{01} -Welle erregt beide Normalwellen des gekrümmten Hohlleiters mit gleich großer Amplitude und wegen der verschiedenen Phasengeschwindigkeiten treten die räumlichen Schwebungen beim Fortschreiten in z-Richtung auf.

Außerdem ist eine weitere Normalwelle des geraden Hohlleiters zugleich eine uns im Folgenden interessierende Normalwelle des gekrümmten Hohlleiters, nämlich diejenige E_{11} -Welle, die zu derjenigen senkrecht polarisiert ist, in die die H_{01} -Welle bei der Krümmung umgewandelt wird.

Die eben behandelte Theorie gibt die nötige Anhaltspunkte, um sich Methoden auszudenken, die H_{01} -Welle möglichst verlustfrei und rein am Ausgang einer Krümmung von beliebigem Krümmungswinkel zu erhalten.

Vornahme von Eingriffen in der Biegung selbst:

Einmal können Veränderungen in dem Hohlleiter so vorgenommen werden, daß die Differenz der Phasenkonstanten der betrachteten beiden gekoppelten Wellen sich vergrößert, bez. von 0 verschieden wird.

Dazu wurden folgende Vorschläge gemacht, die teilweise auch schon ausgeführt worden sind:

Auf die Innenoberfläche des Hohlleiters wird eine dünne dielektrische Schicht aufgetragen, diese beeinflußt die Phasenkonstante von H_{01} - und E_{11} -Welle in verschiedener Weise 16).

Die Aufhebung der Entartung zwischen den H_{01} - und E_{11} -Wellen in Bezug auf Phasenkonstanten kann auch erzielt werden, indem dem Hohlleiter eine schwache Elliptizität gegeben wird 5).

Eine dritte Methode, die Entartung zwischen H_{01} - und E_{11} -Welle aufzuheben, besteht in der Verwendung gesickter oder gewellter Hohlleiter 5).

Ein kleinwenig abweichendes Prinzip besteht in der Beseitigung der Entartung durch erhebliche Erhöhung der Dämpfung des gekoppelten parasitären Wellentyps, etwa durch Verwendung von Filterhohlleitern in Form von Schrauben- und Scheibenhohlleitern.

Dieses Verfahren ist bei starker, beabsichtigter Krümmung den anderen in Bezug auf Verlusten unterlegen, da ja hier kein periodischer Wechsel der Energie zwischen den gekoppelten Wellentypen erfolgt, sondern die einmal in die parasitäre Wellenform überführte Energie - sei sie auch sehr klein - in den Hohlleiterwandungen in Wärme umgewandelt wird.

Die Kopplungstheorie kann auch eine ganz andersartige Möglichkeit erklären, eine Umwandlung von H_{01} - in E_{11} -Welle zu verringern, ja sogar vollständig zu verhindern: Nämlich durch ei-

ne Veränderung des gekrümmten Hohlleiters in der Weise, daß der Kopplungskoeffizient c zu null gemacht wird, indem der Hohlleiter teilweise oder ganz mit einem Dielektrikum gefüllt wird, dessen Influenzkonstante ϵ von den Querschnittsvariablen abhängt.

Die mathematische Behandlung besteht wieder in der üblichen Entwicklung des tatsächlichen Feldes nach den Normalwellen des homogenen mit Dielektrikum gefüllten Hohlleiters.

Man fragt sich unwillkürlich: Ist es möglich, durch geschickte Wahl der DK und der Permeabilität als Funktion der Ortskoordinaten zu erreichen, daß die H_{01} -Welle auch in dem gekrümmten Hohlleiter unverändert fortschreitet? Diese Frage ist von S.P. M o r g a n 15) verneinend beantwortet worden:

Auch bei beliebig wählbaren skalaren Funktionen des Ortes für ϵ und μ ist es unmöglich, die Maxwell'schen Gleichungen in Toroidkoordinaten des gekrümmten Kreishohlleiters so zu erfüllen, daß nur die Feldkomponenten H_z ; H_r ; E der H_{01} -Welle von 0 verschieden sind.

Eine ideale Kompensation der Krümmung ist also nicht möglich.

Das Hauptziel einer geeigneten DK Verteilung besteht darin, die dielektrische Kopplung zwischen der H_{01} -Welle und der E_{11} -Welle genauso groß, wie die Krümmungskopplung aber mit entgegengesetztem Vorzeichen zu machen, gleichzeitig aber auch andere Kopplungskoeffizienten zu kompensieren, und möglichst wenig zusätzliche Kopplungen zu anderen Wellentypen durch das Dielektrikum einzuführen 15).

Der geometrische Optik-Kompensator

Günstig ist der geometrische Optik-Kompensator, dessen Dielektrikum so über den Querschnitt kontinuierlich variabel verteilt ist, daß der Lichtweg für alle zur Toroidachse coaxialen Kreise innerhalb des Hohlleiters gleich lang ist.

Seine theoretischen Eigenschaften sind:

- 1) Kompensation der Krümmungskopplung zwischen H_{01} - und E_{11} -Welle.
- 2) Er koppelt nur diejenigen Wellen, die durch die Krümmung miteinander gekoppelt werden, aber in anderer Stärke, so daß die anderen Wellen nicht entkoppelt werden.
- 3) Die Energieanteile sämtlicher parasitärer Wellen nehmen mit wachsender Betriebsfrequenz asymptotisch gegen Null ab.

Dieser Kompensator hat nur eine theoretische Bedeutung, so lange man nicht im Stande ist, verlustarme Dielektriken mit vorgegebener kontinuierlich variabler DK in genau kontrollierbarer Weise herzustellen.

Der Einsektor-Kompensator:

Der Einsektor-Kompensator, bei dem ein Kreissektor des Querschnitts des Kreishohlleiters mit einem Dielektrikum konstanter Influenzkonstante angefüllt ist, stellt eine praktisch leichter durchführbare Methode zur Entkopplung von E_{11} - und H_{01} -Welle dar. Bei gegebenem ϵ ist durch die Entkopplungsbedingung der Sektorwinkel des Kreissektors festgelegt.

Der Dreisektor-Kompensator

Der Dreisektor-Kompensator erlaubt wegen der höheren Zahl der verfügbaren Parameter die Entkopplung einer weiteren Wellentypen-Familie.

Dieser etwas schwerer ausführbare Kompensator wird bei einer Leitung mit einer relativ großen Anzahl ausbreitungsfähiger Wellen erforderlich sein.

Noch eine wichtige Bemerkung über das Verfahren von nicht genauen Kompensatoren. Wird der Kopplungskoeffizient zwischen entarteten Wellen nicht vollständig zu Null gemacht, so tritt immer noch eine 100 %ige Energieumwandlung ein, allerdings wird der Jouguert'sche Winkel größer.

Alle bisher beschriebenen Verfahren sind relativ wenig frequenzabhängig.

Vornahme von Eingriffen vor und hinter der Biegung

Ganz anders ist das Prinzip der Normalwellenumwandlung. Hier wird durch eine sinnreiche Vorrichtung vor und hinter der Krümmung die H_{01} -Welle in eine der Normalwellen des gekrümmten Hohlleiters umgewandelt und am Ende der Biegung wieder in die H_{01} -Welle überführt.

Eine Reihe genialer Anordnungen sind erdacht worden, um diese Wellenumwandlung durchzuführen, die aber meistens stark frequenzabhängig sind, da sie nach dem Prinzip des Interferenzkopplers arbeiten 2) 5).

Es gibt jedoch ein physikalisches Prinzip, dessen Anwendung den Entwurf einer fast frequenzunabhängigen Umwandlungsvorrichtung für den Normalwellenkrümmer gestattet 17). Es besteht in einer kontinuierlichen Umwandlung der Welle durch eine schwach variable Kopplung. Voraussetzung dabei ist die Aufhebung der Entartung zwischen H_{01} - und E_{11} -Welle durch einen der eben beschriebenen Kunstgriffe.

Es gibt noch weitere Möglichkeiten der Richtungsänderung der Leitung, die versprechen, weitgehend frequenzunabhängig zu sein:

Ein allmählicher für die H_{01} -Welle möglichst reflexionsfreier Übergang von dem runden Querschnitt auf eine Querschnittsform, in der keine entarteten Wellentypen existieren, die miteinander infolge der Krümmung gekoppelt sind 9).

Für kleine Richtungsänderungen eignet sich gut ein dielektrisches Prisma und für beliebige Winkel eine Kombination von zwei Spiegeln und einem Drehflansche, der die gegenseitige Drehung der verbundenen Rohre gestatten 20). Diese beiden Vorrichtungen sind, wie die Messungen ergeben haben, besonderes günstig bei Frequenzen, die weit über der Grenzfrequenz des Hohlleiters liegen.

V) Verschiedene in der Praxis des Leitungsbaues entstehende Probleme

Im Laufe der Untersuchungen und Berechnungen stellten sich weitere Schwierigkeiten ein, die bei einer praktischen Installation auftreten könnten, von denen die wichtigste gestreift werden soll, die die Notwendigkeit der Elimination der parasitären Wellen zeigt.

Mit der Wellenumwandlung in parasitäre Typen steht der als Wellenrückwandlung bezeichnete Effekt in Zusammenhang 11):

Zur Erklärung dieses Effektes begleite ich einen H_{01} -Impuls auf seiner Reise durch einen Kreishohlleiter, der in einem größeren Abstand zwei Störstellen aufweist, die Ursachen zu Wellenumwandlungen darstellen.

Der Impuls trifft auf die erste Störstelle, ein Teil seiner Energie wandelt sich in eine andere Wellenform, etwa die H_{02} -Welle um, der andere Teil wandert als H_{01} -Impuls fort.

Die beiden Impulsteile haben verschiedene Gruppengeschwindigkeiten. Sie kommen also zu verschiedenen Zeiten an dem Ort der zweiten Störstelle an. Die zweite Störstelle sei so beschaffen, daß die H_{01} -Welle weitgehend erhalten bleibt, die H_{02} -Welle aber teilweise in die H_{01} -Welle zurückgewandelt wird. Nach Passieren der zweiten Störstelle liegen also zwei örtlich voneinander getrennte Impulse in Form der H_{01} -Welle vor. Der Impuls ist durch eine Hin- und Rückwandlung vollständig verzerrt

worden. Aus diesem Grunde müssen alle parasitäre Wellen vollständig beseitigt werden. Die Umwandlung in H_{on} -Wellen ist wegen des derzeitigen Mangels an Filtermöglichkeiten für diese Wellentypen besonders unangenehm.

VI) Spezielle für H_{01} -Betrieb erfundene Meßverfahren

Die theoretischen Betrachtungen zeigten, daß die wichtigste Aufgabe der Meßtechnik für Multiwellenhohlleiter in der Analyse eines erregten Hohlleiters nach den verschiedenen Normalwellen besteht, ein Problem, das in der klassischen Hohlleitertechnik überhaupt nicht auftritt.

Interferenzrichtungskoppler

Sehr geeignet für eine Wellenanalyse ist der im Zusammenhang mit der Erregung erwähnte Interferenzrichtungskoppler 8). Jedoch wird man sich hier mit einer sehr schwachen Ankopplung begnügen können, damit das zu untersuchende Hohlleitersystem nicht unnötig gestört wird.

Impulsmethode

Eine sehr ergiebige Meßmethode besteht darin, eine nicht zu kurze Leitung in sehr kurzzeitigen Impulsen periodisch zu erregen. Je nach der speziell durchzuführenden Untersuchung wird der Versuchsaufbau gewählt:

a) Dämpfungsmessung:

Soll z.B. die Dämpfung einzelner Wellentypen gemessen werden, so wird eine beiderseits kurzgeschlossene Leitung gewählt und die Energie wird ganz lose ein- und ausgekoppelt. Pulsdauer und Leitungslänge müssen so gewählt werden, daß der durch

den Impuls erregte Wellenzug im Hohlleiter nicht den ganzen Hohlleiter einnimmt, besser sogar nur einen sehr kleinen Teil seiner Gesamtlänge in Anspruch nimmt 6).

Der erregte Impuls läuft in der Leitung ständig hin und her und seine Energie nimmt dabei auf Grund der Ohmschen Verluste ab. Ein sehr kleiner, der Stärke des Impulses proportionaler Betrag der Energie wird zur Messung ausgekoppelt. Da bei der Anregung durch ein kleines Koppelloch mehrere Wellentypen gleichzeitig erregt werden, die sich durch Gruppengeschwindigkeit und Dämpfung unterscheiden, erhält man auf dem Oszillographen eine Überlagerung von mehreren Impulsfolgen, die sich durch verschiedene Abstände der Impulse und durch verschieden starke Abnahme ihrer Impulsstärke unterscheiden.

b) Wellenumwandlungsmessung:

In einer etwas abgewandelten Form gestattet die Impulsmethode, die Ursache einer Wellenumwandlung in einer langen Leitung zu lokalisieren 12):

Am Anfang der Leitung wird eine reine H_{01} -Welle mit Hilfe eines kontinuierlichen Wellenwandlers, dem noch ein Wellenfilter folgen kann, erregt. Im Anschluß daran befindet sich ein Interferenzrichtungskoppler, der einen bestimmten parasitären Wellentyp auskoppelt und das ferne Ende der Leitung ist kurzgeschlossen. Durch eine irgendwo in der Leitung befindliche Unregelmäßigkeit wird beim Hinlaufen wie beim Rücklaufen des H_{01} -Impulses dieselbe parasitäre Welle induziert. Wegen des Unterschiedes der Gruppengeschwindigkeit von H_{01} -Welle und der parasitären Welle (E_{11} -Welle ausgeschlossen) erreichen die beiden Streuwellen zu verschiedenen Zeiten den Wellenumwandler. Aus dem Abstand der beiden Impulse und der Gruppengeschwindigkeitsdifferenz läßt sich dann auf den Ort der Wellenumwandlungsursache schließen.

Eine wichtige Voraussetzung für eine Analyse dieser Art sind sehr kurze Impulslängen. In der Zeitschrift BSTJ 12) wird von Versuchen dieser Art berichtet, die bei einer freien Wellenlänge von 3,2 cm mit Impulsen von 5 Millimicrosec. ausgeführt wurden. Das entspricht Wellenzügen von etwa 50 HF-Perioden, die eine räumliche Länge von ungefähr zwei Metern haben. Dementsprechend hoch ist auch das räumliche Auflösungsvermögen.

Feldkonfiguration

Schließlich läßt sich noch die Feldkonfiguration am Kreishohlleiterrand mit Hilfe eines kleinen Koppelloches, eines Antennenstiftes oder einer Koppelschleife bestimmen und daraus auf den Wellentypengehalt des Hohlleiters Schlüsse ziehen. Diese Vorrichtungen sprechen gleichzeitig auf mehrere Wellengruppen an.

Kontinuierlicher Wellenwandler:

Der allmähliche Übergang von Rechteck auf Kreis-Querschnitt, der zur reinen Erregung der H_{01} -Welle beschrieben wurde läßt sich auch zur Bestimmung des Gehaltes des Wellengemisches an H_{01} -Welle benutzen.

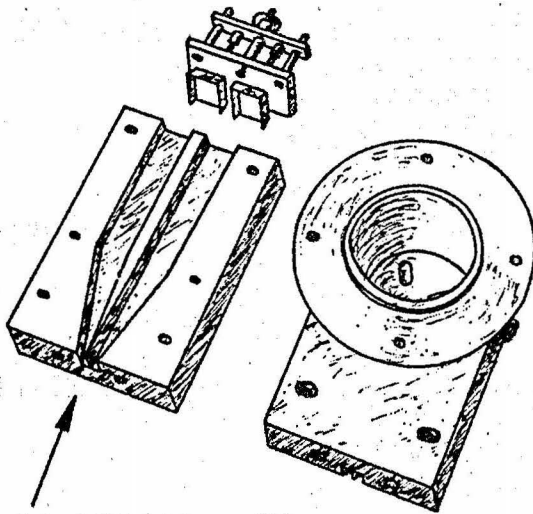
S c h l u s s :

Die vielen, teils recht intensiv betriebenen experimentellen und theoretischen Untersuchungen auf diesem Gebiet sind schon für sich ein Beweis, daß die Ausnutzung der H_{01} -Welle für die Nachrichtentechnik sehr vielversprechend ist und zukünftig eine Notwendigkeit zur Befriedigung des steigenden Bedarfs an Nachrichtenmitteln sein wird.

Zwei Vorrichtungen zur Anregung der H_{01} -Welle im Kreishohlleiter durch die H_{10} -Welle im Rechteckhohlleiter

Bild 1: nach LANCIANI⁹⁾:

Links im Bild der untere Teil, rechts der obere Teil der Vorrichtung. Der Rechteckhohlleiter wird parallel zur Breitseite in seiner Mitte in 2 Arme gespalten. Die vier radial an der Stirnfläche des Kreishohlleiters angebrachten länglichen Kopplungsöffnungen (eines ist in dem Bild erkennbar) werden durch den aufgespaltenen Rechteckhohlleiter so erregt, daß ein starkes H_{01} -Feld im Kreishohlleiter erregt wird.



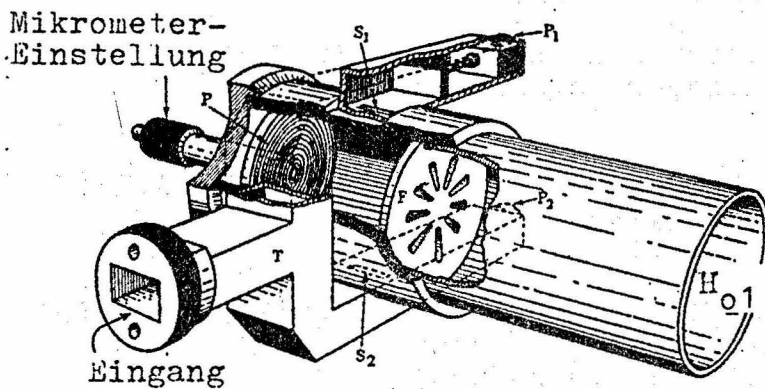
Rechteckhohlleiter-Eingang

Bild 2: nach SIMS⁷⁾:

Die vorne links in Form der H_{10} -Welle in den Rechteckhohlleiter eingespeiste Energie erregt über die Rechteckhohlleitergabel und die Koppellöcher S_1 und S_2 einen Kreiszyylinderhohlraumresonator, der mit Hilfe eines Kolbens P gerade auf die Resonanz der H_{01} -Welle eingestellt wird.

Ausgang

Durch die radial angeordneten Schlitze in der Kreisplatte F wird in dem nach vorne rechts laufenden Kreishohlleiter die H_{01} -Welle erregt.



VII) L i t e r a t u r v e r z e i c h n i s :

- 1) M. JOUGUET: Les effets de la courbure sur la propagation des ondes electromagnetiques dans les guides a section circulaire.
(Cables et Transmission, 1^{re}A., N° 2, 1947)
- 2) M. JOUGUET: La propagation des ondes dans les guides a section presque circulaire; dispositifs de franchissement de coudes pour les ondes (H_0).
(Cables et Transmission, 2^eA. No 4, S. 257, 1948)
- 3) J. ORTUSI: Les conditions de propagation de l'onde H_0 et ses applications.
(Annales de Radioelectricite, No 4, S. 95, 1949)
- 4) S.P. MORGAN;Jr.: Mode conversion losses in transmission of circular electric waves through slightly non - cylindrical guides.
(J.Appl.Phys. 21; S. 329, April 1950)
- 5) S.E. MILLER: Notes on methods of transmitting the circular electric wave around bends.
(Proc. I.R.E., S. 1104, Sept. 1952)
- 6) S.E. MILLER, A.C. BECK: Low loss waveguide transmission.
(Proc. I.R.E., S. 348, März 1953)
- 7) G.D. SIMS: The influence of bends and ellipticity on the attenuation and propagation characteristics of the H_{01} -circular waveguide mode.
(Proc. Inst. of Electr. Engrs. 100, Part IV, No 5, S. 25, Okt. 1953)
- 8) S.E. MILLER: Coupled wave theory and waveguide applications.
(Bell Sys. Techn. Journ. Vol. 33, S. 661, Mai 1954)
- 9) D.A. LANCIANI: H_{01} -mode circular waveguide components.
(Trans. Inst. Radio Engrs. Prof. Group on M.Th. and T., MTT-2, No 2, S. 45, Juli 1954)
- 10) G. COMTE, J.M. PARIS: An experimental study of circular waveguides using TE_{01} -waves in the 25 000 Mc/s band.
(Cables et Transmission, 8; No 4, S. 311, Okt. 1954)
- 11) S.E. MILLER: Waveguide as a communication medium.
(Bell Syst. Techn. Journ., Nov. 1954, S. 1209)
- 12) A.C. BECK: Waveguide investigations with millimicrosecond pulses.
(Bell Syst. Techn. Journ. No 1, Jan. 1956, S. 35)

- 13) S.P. MORGAN: Helix Waveguide.
J.A. JOUNG : (Bell Syst. Techn. Journ., No 4, Nov. 1956,
S. 1347)
- 14) G. PIEFKE: Wellenausbreitung in der Scheiben-Leitung.
(A.E.Ü. Bd. 11, Febr. 1957, Heft 2, S. 49)
Die Übertragungseigenschaften einer Leitung
aus axial angeordneten, voneinander isolier-
ten Metallringen.
(A.E.Ü., Vol. 11, No 10, S. 423; Okt. 1957)
- 15) S.P. MORGAN: Theory of curved circular waveguide contain-
ing an inhomogeneous dielectric.
(Bell Syst. Techn. Journ., Sept. 1957,
S. 1209)
- 16) H.G. UNGER: Circular electric wave transmission in a
dielectric-coated waveguide.
(Bell Syst. Techn. Journ., Sept. 1957,
S. 1253)
- 17) H.G. UNGER: Normal mode bends for circular electric
waves.
(Bell. Syst. Techn. Journ., Sept. 1957,
S. 1292)
- 18) G. COMTE: Guides d'onde éolotropes à structure filt-
rante continue pour la propagation du mode
A. PONTUS: TE_{01} .
(Onde Electrique, 38^eA., No 376 bis. Supplé-
ment spécial: Congrès International Cir-
cuits & Antennes Hyperfréquences: Paris 21
- 26 oct. 1957: Tome 1, Seite 167)
- 19) P. MARIE: Transitions créant le mode TE_{01} circulaire
à partir du mode TE_{01} rectangulaire.
(wie 18), Tome2, S. 471)
- 20) J.M. PARIS: Franchissement des coudes par des guides d'
F.DE CARFORT: ondes circulaires utilisant le mode TE_{01} .
(wie 18, Tome1, S. 173)
- 21) Bun-ichi OGUCHI: The effects of the circular TE_{1m} -waves on
Midori KATO: the propagation of the circular TE_{01} -wave
in curved waveguides.
(wie 18, Tome 1, S. 185)
- 22) Y. SHIMIZU: Transmission of the circular TE_{01} -wave in
curved circular wave guides.
(wie 18, Tome 1, S. 179)
- 23) B. OGUCHI: On elliptic waveguides:
Mlle M. KATO: (wie 18, Tome 1, S. 113)

- 24) K. TANAKA: Mode Conversions through the tapered section of circular waveguide system.
(wie 18, Tome 1, S. 63)
- 25) Shin-ichi IIGUCHI: Mode conversion in the transmission of TE_{01} -wave through a slight tilt and a slight off-set of waveguide.
(wie 18, Tome 1, S. 150)
- 26) M. JOUGUET: Propagation dans les systems à structure discontinue et périodique et application aux guides d'ondes.
(Cables et Transmissions, Jan. 1958, S. 23)