

63266

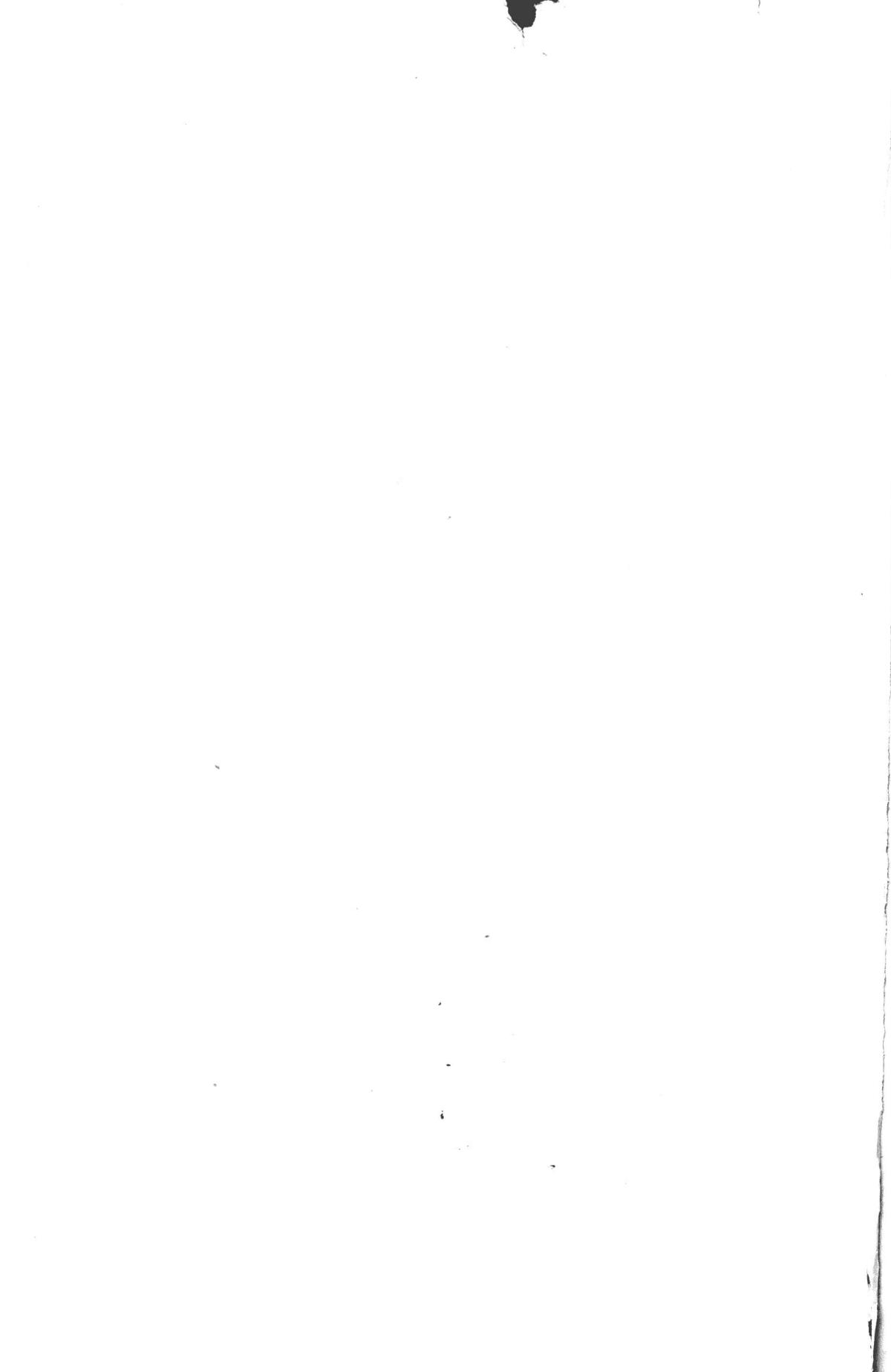
Breitband-Antennen

Theorie und Anwendung

von Gérard Dubost

und Siegfried Zisler,





N822
D1

7863266

Breitband-Antennen

Theorie und Anwendung



E7863266

von **Gérard Dubost**
Professor an der Universität Rennes (Frankreich)

und **Siegfried Zisler, Dr.-Ing.**
Chefingenieur bei Thomson-CSF, Paris

Mit 223 Abbildungen, 4 Tabellen
und einem Geleitwort von Professor P. Grivet,
Mitglied der Académie des Sciences, Paris



R. Oldenbourg Verlag München Wien 1977

Autorisierte Übersetzung der französischsprachigen Originalausgabe, erschienen im Verlag Masson & C^{ie}, Paris unter dem Titel „Antennes à large bande“.

© Masson & C^{ie}, Editeurs, Paris, 1976

Übersetzt von Dr. Ing. *Siegfried Zisler*, Grasse, Frankreich

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Dubost, Gérard

Breitband-Antennen : Theorie u. Anwendung /
von Gérard Dubost u. Siegfried Zisler. — 1.

Aufl. — München, Wien : Oldenbourg, 1977.

(Einführung in die Nachrichtentechnik)

Einheitssacht.: Antennes à large bande (dt.)

ISBN 3-486-20531-5

NE: Zisler, Siegfried:

© 1977 R. Oldenbourg Verlag GmbH, München

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege sowie der Speicherung und Auswertung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Werden mit schriftlicher Einwilligung des Verlages einzelne Vervielfältigungsstücke für gewerbliche Zwecke hergestellt, ist an den Verlag die nach § 54 Abs. 2 Urh.G. zu zahlende Vergütung zu entrichten, über deren Höhe der Verlag Auskunft gibt.

Gesamtherstellung: R. Oldenbourg Graphische Betriebe GmbH, München

ISBN 3-486-20531-5

Inhalt

Geleitwort	8
Vorwort	11
1. Grundbegriffe	13
1.1. Bandbreite	13
1.2. Sende- und Empfangsantennen. Das Reziprozitätsgesetz	14
1.3. Aktive Antennen	19
1.4. Gewinn und Richtfaktor	19
1.5. Wirksame Antennenfläche und effektive Höhe	26
1.6. Strahlungsimpedanz	30
1.7. Antennenrauschtemperatur	31
1.7.1. Rauschstatistik	31
1.7.2. Die Antenne unter dem Einfluß schwarzer Strahlung der Temperatur T	39
1.7.3. Definition der Rauschtemperatur einer Antenne	41
1.7.4. Gütezahl einer Empfangsstation	43
1.8. Kopplungsimpedanz	45
1.9. Kopplung zwischen Sende- und Empfangsantenne	48
1.9.1. Der Senderfall	48
1.9.2. Empfangsfall	50
Literatur zu Kapitel 1	53
2. Theorie der Antennen	55
2.1. Einführung	55
2.2. Allgemeine Integralgleichung	66
2.3. Hallensche Integralgleichung. Lösungsmethoden	76
2.3.1. Auflösungsmethode durch sukzessive Iteration	78
2.3.2. Numerische Auflösungsmethoden	82
2.4. Strahlung dünner Leiter	90

2.5.	Strahlung von Reflektorantennen	98
	Literatur zu Kapitel 2	108
3.	Elementarstrahler	111
3.1.	Die zylindrische Antenne	111
3.2.	Der optimale Rundstrahler	124
3.3.	Ebene Flächenstrahler und Schlitzantennen	133
3.3.1.	Ebene Flächenstrahler	133
3.3.2.	Schlitzantennen	143
3.4.	Die Vertikalantenne mit begrenztem Gegengewicht	146
3.5.	Breitbandige Trichterstrahler	148
3.6.	Wendelantennen	165
3.7.	Spiralantennen	170
3.7.1.	Zweiarmige archimedische Spiralantenne mit zwei- seitiger Strahlung	172
3.7.2.	Zweiarmige archimedische Spiralantenne mit unend- lich großem ebenen Reflektor	179
3.8.	Gefaltete Dipole	185
3.9.	Aktive Antennen	198
3.9.1.	Allgemeines	198
3.9.2.	Aktive Empfangsantennen	200
	Literatur zu Kapitel 3	221
4.	Frequenzunabhängige Antennen	232
4.1.	Allgemeines	232
4.2.	Winkelkonstante konische Spiralantennen	234
4.2.1.	Zweiarmige winkelkonstante konische Antenne	235
4.2.2.	Mehrarmige winkelkonstante konische Antenne	243
4.3.	Winkelkonstante ebene Spiralantennen	257
4.3.1.	Zweiarmige winkelkonstante ebene Antenne	258
4.3.2.	Mehrarmige winkelkonstante ebene Antennen	265
4.4.	Log-periodische Antennen	272
	Literatur zu Kapitel 4	287

5.	Strahlergruppen	293
5.1.	Gruppe aus winkelkonstanten Spiralantennen	293
5.1.1.	Gruppe aus winkelkonstanten konischen Spiralantennen	293
5.1.2.	Ebene Spiralantenne mit einem Reflektor	296
5.1.3.	Winkelkonstante konische Spiralantenne mit ebenem Reflektor	301
5.1.4.	Ebene Spiralantenne mit konischem Reflektor	312
5.2.	Gruppe aus log-periodischen Antennen	316
5.3.	Gruppe aus dicken gefalteten Dipolen	319
	Literatur zu Kapitel 5	322
6.	Breitbandradome	324
	Literatur zu Kapitel 6	340
7.	Sach- und Namenverzeichnis	342

Geleitwort

Mit der grundlegenden Entdeckung der "Hertzischen Wellen", 1888, hatte Heinrich HERTZ gleichzeitig die erste Antenne, den "Hertzischen Dipol" erfunden und eine präzise Theorie seiner Strahlung ausgearbeitet. Die Memoiren dieses großen Physikers aus den 90er Jahren zählen heute zu den Klassikern der Physik. Etwa 10 Jahre später hat MARCONI die außerordentliche praktische Bedeutung dieser Wellen für die Nachrichtenübertragung voll erfaßt. Sie geht klar aus der asymptotischen Form der Dipolgleichung hervor und liegt in der großen Reichweite des abgestrahlten Feldes, sehr zum Unterschied zu den bisher bekannten statischen oder pseudo-statischen Feldern. Die zahlreichen Erfindungen Marconis und seine experimentellen Demonstrationen, beginnend mit einem BRANLY-Empfänger, erregten großes Aufsehen. Viele Physiker versuchten anschließend eine genaue, ins Einzelne gehende wissenschaftliche Erklärung zu finden. Dies war der Anfang einer eindrucksvollen Reihe von Forschungsarbeiten, welche zur Definition von Begriffen wie Oberflächen- und Raumwelle führten, weiter zur Aufklärung der Eigenschaften des Bodens, dann der Ionosphäre, deren Existenz schon 1900 von KENNELY und HEAVISIDE vorhergesagt worden war. Gleichzeitig wurden neue Antennentypen erfunden und deren Richtwirkungen berechnet und gemessen. So hat sich in den 20er Jahren der Begriff der "Hertzischen Richtstrahler" entwickelt, als mit Gruppen aus linearen Antennen für Meterwellen interkontinentale Reichweiten wirtschaftlich realisierbar wurden, allerdings zum Preis von ein wenig Geduld: Zeitweise wurden minutenlange Unterbrechungen erforderlich, die - trotz sorgfältiger Auswahl der von der Jahres-, der Tages- oder Nachtzeit bedingten Wellenlänge - ein restlicher aleatorischer Charakter der Übertragung mit sich brachte.

Dies leitete eine bisher unbekannte Entwicklungswelle für Antennenfunktionen und -typen ein, die für Fernseher, später für Ra-

dar, Formen wie Doppeltrichter und Hornstrahler annahmen. Gleichzeitig wuchs die Anwendung von Mikrowellen, zuerst im Meterwellenbereich (1930 - 40) und dann bei den Zentimeterwellen (1940 - 45).

Heute führt die Verwendung von Satelliten als Relaisstationen für die Übertragung komplizierter breitbandiger Signale zu zahlreichen neuen Antennentypen. Dieses Buch ist einer sehr wichtigen Kategorie von Neuentwicklungen gewidmet, den Breitbandantennen: Ihr bemerkenswerter Charakter zielt auf die Übertragung eines Frequenzbandes Δf , welches von sehr beträchtlichem Ausmaß gegenüber der mittleren Bandfrequenz f_0 , der Trägerfrequenz, sein kann, unter möglichst gleichen Bedingungen hin. Diese Hauptforderung ist stets mit stark variierenden anderen technischen Bedingungen zu vereinen. Sie bestehen z. B. in den Notwendigkeiten einer großen Richtwirkung, beschränkter Abmessungen, leichter elektrischer Anpassungsbedingungen, einer sehr langen oder besonders geformten Speiseleitung.

Dieses Buch zeigt Wege zur Lösung der genannten aktuellen Probleme. Wir verdanken es zwei bedeutenden Spezialisten, Professor Dr. DUBOST und Dr. ZISLER, die beide im Entwurf der Konstruktion und der Berechnung der modernen Breitbandstrahler besonders bewandert sind. Einer der bemerkenswertesten Fortschritte der letzten 10 Jahre ist die Erarbeitung von Berechnungsmethoden, "Näherungen" genannt, die jedoch in Wirklichkeit sehr genau sind. Sie gestatten es heute, Berechnungen mit elektronischen Rechnern bei vernünftigem Preis und in kurzer Zeit durchzuführen. Obwohl auch bei den experimentellen Methoden große Fortschritte gemacht wurden, ist in vielen Fällen die Genauigkeit der rechnerischen Näherungen ebenso gut oder sogar besser wie die der Vermessung von Modellen. Schließlich haben in den letzten Jahren die Fortschritte der Halbleitertechnik den Forschern und Ingenieuren neue "aktive Elemente", z. B. Tunnelioden, bipolare Transistoren oder FET-Transistoren, zur Verfügung gestellt, welche direkt in die Antennenstruktur integriert werden können. Durch diese Integration können deren Eigenschaften stark verbessert werden. So kann z. B. die vom japanischen Physiker ESAKI 1958 entdeckte Tunneliode in Empfangsantennen eingebaut werden, so daß diese störfreier werden und die

Empfängerempfindlichkeit in den m- und cm-Bändern verbessert wird, ein Vorteil beim Empfang von Sendungen mit Frequenzmodulation oder beim Fernsehen. Der Einbau von nicht-reziproken Vierpolen, wie Transistoren, ermöglicht noch andere - zunächst unvorhergesehene - nützliche Verbesserungen: Z. B. können die Richtwirkung verbessert, die Antennenabmessungen verkleinert, die Richtung einer Hertzschen Strahlung elektronisch gesteuert werden.

Beim Studium dieses Werkes, das sich vor allem an den in Forschung und Entwicklung tätigen Ingenieur wendet, wird der Leser durch die Klarheit und Einfachheit des Textes angenehm überrascht. Ohne an Präzision zu verlieren, werden der Student wie der Fachmann fortschreitend zu einer vertieften Sachkenntnis gebracht: Die gut abgestufte Arbeit ermöglicht es ihm, die für ein detailliertes Antennenprojekt erforderlichen Kenntnisse zu erwerben, und er kann sich auf einen sicheren Führer für den Entwurf eines geeigneten Modells stützen. Der Text baut auf eine Reihe von grundlegenden Forschungsergebnissen der Verfasser auf, welche einem Kreis von anerkannten Spezialisten vorstehen: Deshalb vermittelt dieses Buch eine gute Information über wichtige Fortschritte auf diesem stets in kräftiger Entwicklung befindlichen Arbeitsgebiet.

P. GRIVET

Vorwort

Die immer dichtere Ausnutzung des für Nachrichtenverbindungen verwendbaren Frequenzbandes hat seit vielen Jahren zu einem wachsenden Bedarf von Antennen geführt, welche mit gutem Wirkungsgrad gerichtete oder ungerichtete Strahlung in einem möglichst breiten Frequenzband gestatten. Die Berechnung von solchen Antennen ist kaum möglich ohne Benutzung von leistungsfähigen automatischen Rechnern.

Das Buch wendet sich zunächst an Studenten höheren Semesters mit soliden mathematischen Kenntnissen, welche ihr Wissen auf dem Gebiet der elektromagnetischen Strahler vertiefen wollen.

Im ersten Kapitel werden allgemeine Begriffe dargestellt, um den Leser mit den verwendeten Definitionen und physikalischen Grundlagen vertraut zu machen. Es wird der Begriff der Rauschtemperatur eingeführt und dessen physikalische Bedeutung mit Hilfe der statistischen Thermodynamik erklärt.

Im 2. Kapitel werden die theoretischen Grundlagen dargestellt, welche zur Berechnung von Breitbandantennen notwendig sind. Eines der Hauptprobleme ist die Bestimmung der Stromverteilung auf miteinander gekoppelten leitenden Oberflächen, unter Berücksichtigung der Quellenverteilung und der Grenzbedingungen. Diese Beziehungen werden häufig mit Hilfe eines Systems von gekoppelten Integralgleichungen ausgedrückt. Numerische Lösungsmethoden und die Verwendung von automatischen Rechnern erlauben selbst bei im Verhältnis zur Wellenlänge kleinen Abständen eine Berechnung mit guter Näherung, sodass die elektromagnetischen Felder im Nah- und Fernbereich leicht bestimmt werden können. Bei grossen Abständen, z.B. von mehreren Reflektoren, können aus der physikalischen Optik bekannte Näherungslösungen benutzt werden.

Die eigentlichen Beugungsprobleme wurden in den Grenzen dieses Buches bewusst vernachlässigt.

Die beiden ersten Kapitel wenden sich auch an Forschungs- und Entwicklungsingenieure.

Die Kapitel 3, 4 und 5 sind der Zusammenstellung von Breitbandantennen gewidmet, wobei auf eine bequeme Auswertung für Fachleute besonders Wert gelegt wurde. Ausser der Zusammenfassung von früheren Veröffentlichungen speziell in amerikanischen, deutschen und französischen Fachzeitschriften, werden neuere theoretische

und experimentelle Arbeiten von der Universität RENNES, Frankreich, mitgeteilt und Entwicklungsergebnisse, die im Laufe der letzten Jahrzehnte bei der Firma THOMSON-CSF, Paris, erhalten wurden.

Kapitel 3 gibt die Charakteristiken von wichtigen breitbandigen Einzelstrahlern wieder.

Kapitel 4 behandelt die sogenannten "frequenzunabhängigen" Antennen, deren Charakteristiken sich in breiten Frequenzbändern nur wenig ändern.

In Kapitel 5 werden breitbandige Gruppenstrahler mit erhöhter Richtwirkung gezeigt.

Abschliessend wird ein besonderes Kapitel der Wiedergabe von Antennenschutzhauben mit breitbandigem Durchlassbereich gewidmet.

Die Verfasser

1. Grundbegriffe

1.1 Bandbreite

Die Bandbreite einer Antenne ist das Frequenzband in dem diese besondere Eigenschaften oder Merkmale aufweist. Eine Antenne kann so viele Arbeitsbänder haben, wie in gewissen Grenzen enthaltene radioelektrische Eigenschaften.

Besonders Merkmale sind z.B. :

- der Strahlungswiderstand, dessen Bedeutung grundlegend für den Energietransport vom Sender in den freien Raum und vom freien Raum zum Empfänger ist.
- die Richtcharakteristik, ihr Maximalwert, der Richtfaktor und das Niveau der Nebenzipfel ;
- die Polarisation und die Kreuzpolarisation bei linear polarisierten Antennen.

Bei einem gegenüber der halben Wellenlänge kleinen symmetrischen Dipol ist die kleinste Bandbreite im Allgemeinen durch die Güte der Anpassung seines Strahlungswiderstandes gegeben, da die Polarisation unabhängig von der Frequenz ist und die Richtcharakteristik sich nur wenig mit ihr ändert.

Bei einer Antenne für die Radioastronomie oder für Nachrichtenverbindungen mit Raumfahrzeugen sind die Bandgrenzen durch die Abnahme des Gütefaktors G_M/T bestimmt, wobei G_M der maximale Antennengewinn und T_M die Rauschtemperatur des gesamten Empfangsystems bedeutet. Die durch die Anpassung des Eingangswiderstandes des Erregers begrenzte Bandbreite ist im Allgemeinen viel grösser.

Wenn für die Bestimmung der Bandbreite auf den Strahlungswiderstand Bezug genommen wird, kann es nützlich sein eine Kreisgüte bei der mittleren Arbeitsfrequenz f_0 zu definieren.

$$Q = \frac{f_0}{2R} \left(\frac{\partial X}{\partial f} \right)_{f=f_0} = \frac{f_0}{2G} \left(\frac{\partial B}{\partial f} \right)_{f=f_0}$$

$R + jX$ und $G + jB$ sind die Eingangsimpedanz bzw.

Admittanz der Antenne eventuell zusammen mit zusätzlichen Anpassungsgliedern. In der Tat besteht häufig das Problem, die Impedanz mit brauchbarem Wirkungsgrad innerhalb der gewünschten Bandbreite anzupassen.

1.2 Sende- und Empfangsantenne – Das Reziprozitätsgesetz

Bevor das eigentliche Antennenproblem behandelt wird, ist es notwendig einige Ergebnisse der Theorie der Netzwerke anzuführen. Das Gesamtsystem der radioelektrischen Verbindung, bestehend aus einer Sendeantenne, einer Empfangsantenne und dem Medium, in dem sich die elektromagnetischen Wellen fortpflanzen, kann als Vierpol betrachtet werden, für den das Reziprozitätsgesetz gilt, wenn das Ausbreitungsmedium isotrop und linear ist.

Abb. 1.1



In einem beliebigen Netzwerk mit einer einzigen EMK sollen die Zweige h und k ausschliesslich nur einer der Maschen " h " und " k " angehören. Durch geeignete Wahl der unabhängigen Maschen des Netzwerks ist dies stets möglich. In der Theorie der Netzwerke wird folgende Beziehung abgeleitet [1] :

$$\frac{E_k}{I_h} = \frac{\delta}{\delta_{kh}} (-1)^{h+k} = W_{kh} \quad (1.1)$$

δ ist die Determinante der Maschenimpedanzen Z des Netzes, δ_{kh} ist der zu Z_{kh} gehörige Minor der Determinante bei Unterdrückung der k -ten Zeile und der Spalte h . Wenn m der Grad der Determinante δ ist (m = Zahl der unabhängigen Maschen des Netzes), hat δ_{kh} den Grad $m-1$.

E_k stellt die EMK eines Generators mit dem Innenwiderstand Null im Zweig " k " dar (gegebenenfalls kann stets angenommen werden, dass dieser Widerstand in das Netzwerk eingeschlossen ist) und I_h ist der Strom im Zweig " h ".

$W_{kh} = \frac{\delta}{\delta_{kh}} (-1)^{h+k}$ ist die Kopplungsimpedanz zwischen den Zweigen h und k des Netzwerkes.

Lineare elektrische Netzwerke haben grundsätzlich symmetrische Determinanten δ bezüglich ihrer Hauptdiagonale, voraus folgt :

$$\delta_{kh} = \delta_{hk} \quad \text{und} \quad W_{kh} = W_{hk} \quad (1.2)$$

Das Verhältnis zwischen EMK und Empfangsstrom ändert sich nicht, wenn Generator und Empfänger vertauscht werden. Diese Eigenschaft wird als Reziprozitätsgesetz bezeichnet und folgt aus der Gleichheit der Kopplungsimpedanzen $|1|$.

Mit Hilfe der Abb. 1.2.a und b kann das Reziprozitätsgesetz folgendermassen ausgedrückt werden :

$$\frac{V_G}{i_2} = \frac{V'_G}{i'_1} \quad \text{oder} \quad V_G i'_1 = V'_G i_2 \quad (1.3)$$

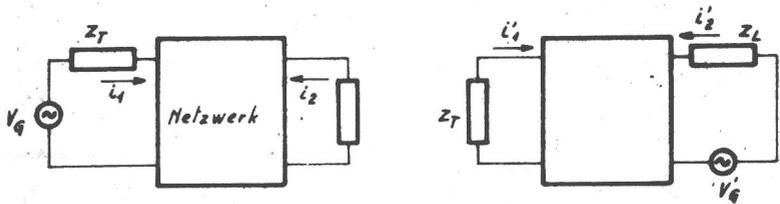


Abb. 1.2

- a. -

- b. -

Der lineare Vierpol der Abb. 1.3. genügt den Gleichungen :

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= Z_{11} i_1 + Z_{12} i_2 \\ V_2 &= Z_{21} i_1 + Z_{22} i_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.4.)$$

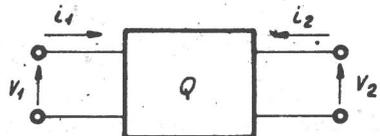


Abb. 1.3

Z_{12} und Z_{21} sind die Kopplungsimpedanzen.

$$Z_{12} = Z_{21} \quad (1.5)$$

Die linearen Gleichungen 1.4 können auf den Vierpol Abb. 1.4 angewendet werden.

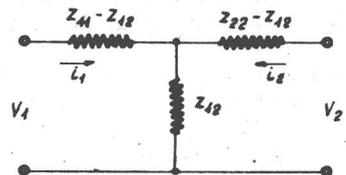


Abb. 1.4

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= (Z_{11} - Z_{12}) i_1 + Z_{12} (i_1 + i_2) \\ V_2 &= (Z_{22} - Z_{12}) i_2 + Z_{12} (i_1 + i_2) \end{aligned} \right\} (1.6)$$

Mit Generator und Last ergibt sich das Schema der Abb. 1.5, woraus unter Anwendung des Thevenin'schen Satzes Abb. 1.6 entsteht.

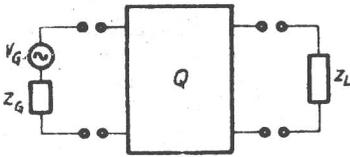


Abb. 1.5

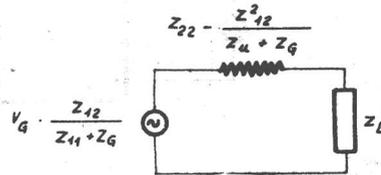
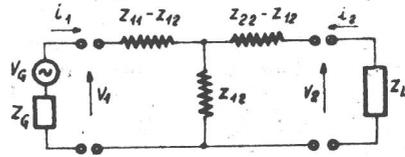


Abb. 1.6

Für die grösste Leistungsübertragung in die Last Z muss diese angepasst, d.h. gleich der konjugiert komplexen Impedanz des Generators sein.

$$Z_L = Z_{22}^* - \frac{(Z_{12}^*)^2}{Z_{11} + Z_G} \quad (1.7)$$

Z^* bezeichnet den konjugiert komplexen Wert von Z .

Bei Anwendung des Reziprozitätsgesetzes auf Antennen, kann dieses folgendermassen ausgedrückt werden ^[13] :

Eine EMK V_G an den Klemmen einer Antenne A ruft zwischen den Klemmen einer Antenne B den Strom i_2 hervor (Abb. 1.7a). Wenn die gleiche EMK V_G an die Klemmen der Antenne B gelegt wird ($V_G = V_G'$), ruft sie zwischen den Klemmen der Antenne A den gleichen Strom $i_2' = i_2$ hervor (Abb. 1.7b)

Aus dem Reziprozitätsgesetz folgt die Übereinstimmung der Sende- und Empfangscharakteristiken einer Antenne :

A und B sollen zwei beliebig zueinander orientierte Antennen sein. Bei Sendebetrieb mit der konstanten Klemmenspannung V_G der Antenne A, verändert die Drehung der Antenne A den Empfangsstrom i_2 in der Antenne B entsprechend der Sendecharakteristik der Antenne A.