

# Praktikum Hochfrequenztechnik, Teil 1

## Lineare Antennen

SoSe 2021

### 1 Einleitung

In diesem Versuch werden charakteristische Größen linearer Antennen untersucht. Dazu werden beispielhaft verschiedene Monopole betrachtet. Neben Resonanzfrequenz, Fußpunktimpedanz und Dachkapazität im 1. Teil des Versuchs wird im 2. Teil die Abstrahlcharakteristik ermittelt.

### 2 Theorie

In einem nicht drahtgebundenen Übertragungssystem übernehmen Antennen die Aufgabe, ein von der Senderstufe geliefertes Signal (Leitungswelle) in eine Freiraumwelle zu wandeln bzw. diesen Vorgang wieder umzukehren.

#### 2.1 Charakterisierung einer einzelnen Antenne

**Leitungsnäherung:** Als einfaches Beispiel für eine lineare Antenne wird zunächst ein Dipol betrachtet. Dieser kann man sich als eine auseinander geklappte, offene Zweidrahtleitung vorstellen. Die Stromverteilung entspricht dann näherungsweise dem Stromverlauf auf einer Leitung und wird als sinusförmig approximiert.

**Ersatzschaltbild:** Der durch eine Antenne fließende Strom wird am Fußpunkt  $z' = 0$  (Abb. 1) in eine abgestrahlte Leistung umgesetzt. Um diesen Vorgang zu beschreiben, kann ein Ersatzschaltbild eingeführt werden, in dem die verlorene Leistung mit Hilfe von einem *Strahlungswiderstand*  $R_S$  bei  $z' = 0$  charakterisiert wird. Wird die komplette Eingangsleistung in abgestrahlte Leistung umgesetzt, so reicht dieser Widerstand aus, um die Antenne zu beschreiben. Sollte ein Anteil der Leistung in der Antenne gespeichert bleiben, so muss das durch eine imaginäre Impedanz  $jX$  berücksichtigt werden. Damit lässt sich die *Fußpunktimpedanz* als

$$\underline{Z} = R_S + jX$$

definieren.

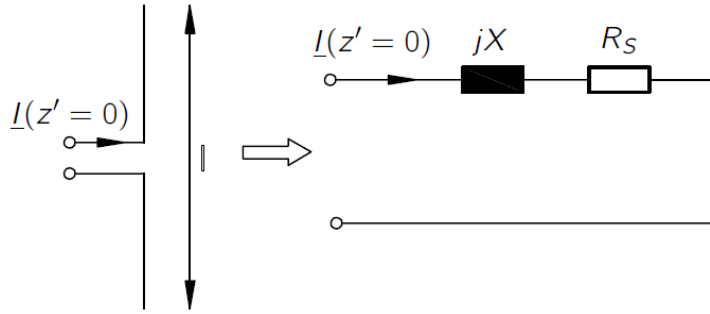


Abbildung 1: Ersatzschaltbild einer verlustfreien linearen Antenne.

Diese Definition gilt für verlustfreie Leitungen. Eventuelle Verluste sollen durch einen weiteren ohmschen Widerstand berücksichtigt werden. In dieser Betrachtung wird ausschließlich von verlustfreien Leitungen ausgegangen.

Wie aus Kapitel LEI im Skript Hochfrequenztechnik I bekannt ist die Impedanz einer Leitung abhängig von deren geometrischen Abmessungen. Damit ist auch die Fußpunktimpedanz eine Funktion von der Antennenhöhe und dem Antennenradius.

Wie man aus der Definition der Fußpunktimpedanz sieht, ist die abgestrahlte Leistung maximal genau dann, wenn diese komplett in Verlustleitung am Widerstand  $R_S$  umgesetzt wird, d.h wenn die Fußpunktimpedanz rein reell ist:  $\underline{Z} = R_S$ . Bekanntlich aus der Netzwerktheorie ist das der Fall, wenn die Antenne bei einer *Resonanzfrequenz* betrieben wird. Diese lässt sich mit der Annahme einer sinusförmigen Stromverteilung durch Betrachtung der Nullstellen der Sinusfunktion rechnerisch ermitteln. Eine Sinusfunktion der Kreisfrequenz  $\omega$ , die an der Stelle  $l$  zu Null erzwungen wird, besitzt an dieser Stelle das Argument  $n\pi$  (die Sinus-Nullstellen). Daraus lassen sich die Resonanzfrequenzen aller möglichen Schwingungen auf dieser Leitung berechnen:

$$\omega l = n\pi, n \in \mathbb{Z} \quad \Rightarrow \quad f_r = \frac{nc_0}{2l} \quad (1)$$

mit  $c_0$  die Lichtgeschwindigkeit im Freiraum.

In diesem Versuch werden statt Dipolstrahler Monopolantennen verwendet, die im Gegensatz zu den Vorherigen unsymmetrisch aufgebaut sind. Dabei beträgt ihre Höhe  $h = l/2$  und die zweite Hälfte der Antenne wird als Erdung bezeichnet und beispielsweise durch eine elektrisch gut leitende Oberfläche realisiert. Für die Berechnung der Resonanzfrequenz soll dann in Formel 1 die doppelte Antennenhöhe eingesetzt werden.

$$f_r = \frac{nc_0}{4h}, n \in \mathbb{Z} \quad (2)$$

Da sich Formel 2 unter gewissen Annahmen ergibt, muss meist in der Praxis eine Korrektur vorgenommen werden. Tab. 1 zeigt die Resonanzwellenlängen und die dazugehörigen Fußpunktimpedanzen eines Monopols, die mit Korrekturfaktoren, abhängig von der Monopolhöhe  $h$  und dem Monopolradius  $a$ , gewichtet sind. Hierbei wurden der Strahlungswiderstand  $R'_\eta = 75 \log_{10} \left( \frac{h}{2a} \right)$  und der Korrekturfaktor  $F' = \frac{h/a}{1 + h/a}$  verwendet.

Tabelle 1: Höhen und Fußpunktimpedanzen eines Monopols bei den ersten 4 Resonanzen [4]

	1. Resonanz	2. Resonanz	3. Resonanz	4. Resonanz
$h$	$0,24 \lambda F'$	$0,48 \lambda F'$	$0,72 \lambda F'$	$0,96 \lambda F'$
$\underline{Z}_F$	34	$\frac{R'_\eta{}^2}{34}$	48	$\frac{R'_\eta{}^2}{48}$

Neben rechnerisch lässt sich die Resonanzfrequenz auch graphisch aus einer Ortskurve wie in Abb. 2 ablesen. Die Abhängigkeit der Fußpunktimpedanz von den Antennenabmessungen führt zu verschiedenen Verläufen für verschiedene Radius-zu-Höhe-Verhältnisse (Schlankheitsgrade).

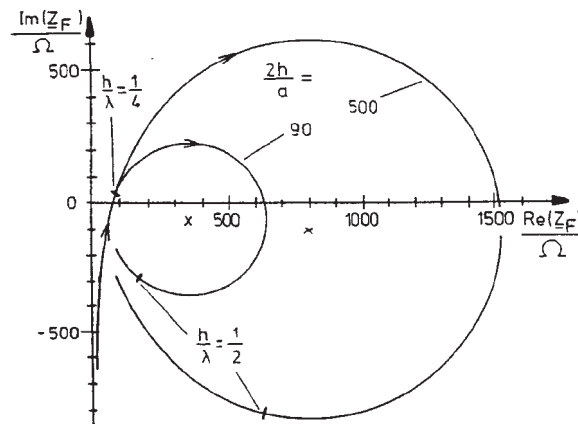


Abbildung 2: Ortskurve der Fußpunktimpedanz eines Monopols für verschiedene Schlankheitsgrade [3]

Ist die Arbeitsfrequenz fest vorgegeben, lässt sich beispielsweise aus der Ortskurve der Fußpunktimpedanz ablesen, bei welcher Antennenhöhe ein rein reeller Widerstand resultiert.

Um eine Absenkung der Resonanzfrequenz zu erzielen, ohne zu hohe Antennen bauen zu müssen, wird in der Praxis eine *Dachkapazität* verwendet. Diese können z.B. in Form von aufgesetzten Scheiben realisiert werden. Zur Veranschaulichung wird an dieser Stelle ein im oberen Bereich geknicktes Monopol betrachtet (Abb.3).

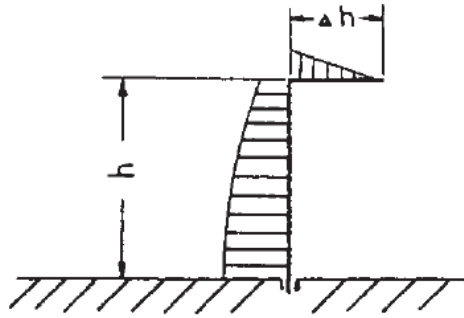


Abbildung 3: Monopol mit Dachkapazität

Die Stromverteilung setzt sich auf dem horizontalen Stück fort. Unter Annahme einer ungefähr sinusförmigen Stromverteilung gilt in Analogie zu Formel (2)

$$h + \Delta h = \frac{\lambda_{res}}{4}. \quad (3)$$

bzw. lässt sich die Antennenverlängerung umrechnen als:

$$\Delta h = \frac{\lambda_{res}}{4} - h \quad (4)$$

Da dieses Leitungsstück kürzer als  $\lambda/4$  ist, hat dieser ein kapazitives Verhalten, damit die Bezeichnung als Dachkapazität. Ohne Herleitung wird folgende Formel für die Berechnung der Dachkapazität verwendet:

$$C_D \approx \frac{\Delta h}{c_0 Z_A} \quad (5)$$

mit dem Leitungswellenwiderstand

$$Z_A = 60 \Omega \ln\left(1.15 \frac{h}{2a}\right). \quad (6)$$

**Abschtrahlcharakteristik** Das abgestrahlte Feld einer Antenne lässt sich durch die Einführung einer mathematischen Hilfsgröße - das Vektorpotential ausrechnen. Dieses ergibt sich aus einem Integral, in dem im Wesentlichen die Stromverteilung entlang der Antenne beteiligt ist. Die physikalischen Größen - elektrisches Feld und Magnetfeld sind ihrerseits proportional dem Vektorpotential. Damit können diese mit bekannter Stromverteilung bestimmt werden. Der genaue Rechenweg ist ausführlich im Kapitel LA im Skript Hochfrequenztechnik I beschrieben.

Mit den bekannten Feldgrößen lässt sich die Strahlungsleistungsdichte der Antenne berechnen. Dadurch, dass unterschiedliche Monopole unterschiedliche Stromverteilung haben, besitzen diese auch unterschiedliche Abstrahlcharakteristik und weisen dementsprechend Strahlungsmaxima in anderen Richtungen auf. Da die Leistungsdichte eine Funktion von den Kugelkoordinaten  $\vartheta$  und  $\varphi$  ist, kann man diese Abhängigkeit in einem Richtdiagramm durch Einsetzen von verschiedenen Winkeln darstellen. Dabei bezieht sich die Leistungsdichte auf die eines isotropen Kugelstrahlers. Man spricht von horizontalem Richtdiagramm, wenn der Winkel  $\vartheta$  konstant ist und  $\varphi$  variiert. Im umgekehrten Fall handelt sich um ein vertikales Richtdiagramm [1].

## 2.2 Charakterisierung von Gruppenstrahlern

Im Richtdiagramm einer Antenne sind meist Haupt- und Nebenkeulen zu sehen. Oft möchte man die Richtcharakteristik in einer bestimmten Richtung verbessern und die Nebenkeulen unterdrücken. Dies kann erreicht werden, wenn man ein Antennen-Array verwendet.

**Strahlungsgekoppelte Elemente** Betrachte man zwei im Abstand  $d$  voneinander positionierten Dipolantennen der Höhe  $h$ . Das System lässt sich als Vierpol modellieren und die Spannungs- und Stromabhängigkeiten können mit Hilfe von Vierpolparametern beschrieben werden:

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Da die Klemmen des 2. Stabes im allgemeinen kurzgeschlossen sind ( $U_2 = 0$ ), ergibt sich für das Verhältnis der beiden Fußpunktströme:

$$\frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_1} = -\frac{\underline{Z}_{21}(d/\lambda)}{\underline{Z}_{22}(h/\lambda)} \quad (8)$$

Die Addition der von den jeweiligen Strömen in horizontaler Richtung in großem Abstand erzeugten Feldstärken führt auf den sog. Gruppenfaktor  $M(\varphi, \vartheta)$ , der die gemeinsame Wirkung der Antennen beschreibt. Das gesamte Fernfeld in beliebige Raumrichtungen ergibt sich durch Multiplikation mit der Charakteristik des Einzelstrahlers (multiplikatives Gesetz).

$$\underline{H}_\varphi = \underline{M}(\varphi, \vartheta) \cdot \underline{H}_{1\varphi} \quad (9)$$

Ein Ausdruck zur Berechnung des Gruppenfaktors in der Horizontalen kann man wie folgt (ohne Herleitung) angeben:

$$\begin{aligned} \underline{M}_\varphi &= 1 + \frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_1} \cdot \exp(j\varphi_x) \quad \text{einsetzen von Gl.8 mit} \\ \varphi_x &= k_0 d \cos \varphi \\ \underline{Z}_{12}(d/\lambda) &= |Z_{12}| \exp(j\varphi_{12}) \\ \underline{Z}_{22}(h/\lambda) &= |Z_{22}| \exp(j\varphi_{22}) \quad \text{ergibt} \\ \underline{M}_\varphi &= 1 + \frac{|Z_{12}|}{|Z_{22}|} \exp\left(j(\pi + \varphi_x + \varphi_{12} - \varphi_{22})\right) \end{aligned}$$

Der Gruppenfaktor und damit auch der Richtfaktor und der Gewinn kann in einer bestimmten Richtung verbessert werden, je nachdem in welchem Abstand beide Antennen voneinander stehen (Änderung von  $\underline{Z}_{12}$ ) oder wie groß die Höhe des 2. Stabes ist (Änderung von  $\underline{Z}_{22}$ ). Diese zwei Abhängigkeiten können jeweils einer Ortskurve entnommen werden (Abb.4 und 5).

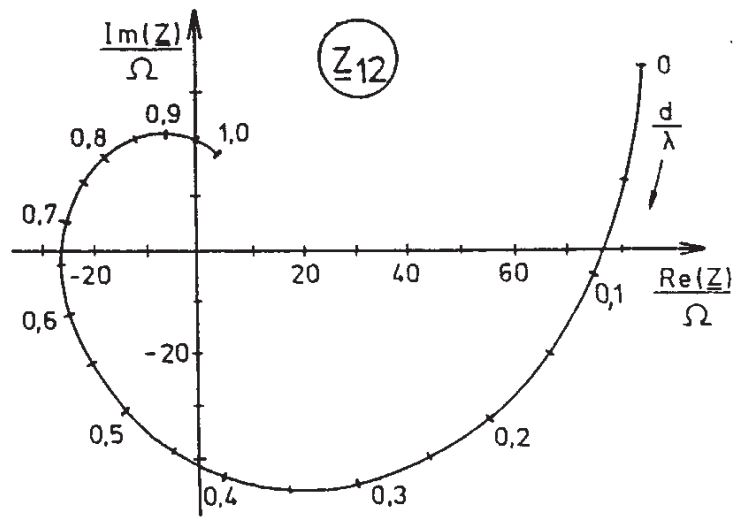


Abbildung 4: Ortskurve von  $Z_{12}$  [2]

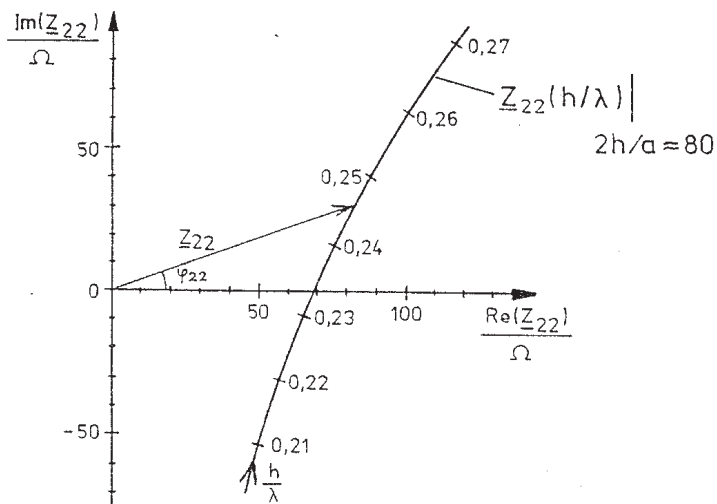


Abbildung 5: Ortskurve von  $Z_{22}$  [2]

**YAGI-Antenne** Je nach Positionierung und Bauhöhe kann eine zweite Antenne die Abstrahlcharakteristik einer gegebenen Antenne entweder verbessern oder verschlechtern. Damit spricht man im ersten Fall von Direktoren und im Zweiten von Reflektoren. Eine Anordnung mit mehreren Direktoren und Reflektoren wird als YAGI-Antenne bezeichnet.

## 3 Durchführung und Messung

Der Versuch besteht aus zwei Teilen. Im Folgenden wird auf die Messprinzipien und den Versuchsaufbau eingegangen.

### 3.1 Fußpunktimpedanz

Im ersten Teil werden Resonanzfrequenz, Fußpunktimpedanz und Dachkapazität eines dünnen und dicken Monopols bestimmt. Dies kann mithilfe eines Smith-Diagramms erzielt werden, das sich aus einer Messung des Reflexionsfaktors ergibt.

**Messverfahren** Zur Messung des Reflexionsfaktors gibt es je nach Problemstellung eine Vielzahl von Verfahren. Erwähnt sei von diesen zunächst die Messleitung als klassische Methode, bei welcher die durch Interferenz hin- und rücklaufender Wellen sich ergebende ortsfeste Feldverteilung (eine stehende Welle) in der Leitung gemessen wird. Man erhält damit Betrag und Phase des Reflexionsfaktors, hat jedoch die Messung für jede Frequenz erneut durchzuführen.

Zur einfachen Messung ganzer Frequenzbänder eignet sich gut die sog. *Reflektometerschaltung*. Hier wird mit Richtkopplern eine Trennung zwischen hin- und rücklaufenden Wellen vorgenommen, sodass bei einer entsprechenden Auswertung eine direkte Anzeige des Return Loss erfolgt.

Diese Methode ist zur *Wobbelung* (bezeichnet das kontinuierliche Durchstimmen eines bestimmten Frequenzbereiches durch sägezahnförmige Ansteuerung des Generators) geeignet, gestattet jedoch in dieser Form keine Phasenmessung, weil die Detektoren die Phase nicht auswerten. Die Wobbelmessung des Reflexionsfaktors, sowohl nach Betrag und Phase, erfordert einen erheblich größeren Aufwand. Es wird ein Netzwerk-Analysator verwendet, der im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

**Messung mit einem Netzwerkanalysator** Mithilfe eines Netzwerkanalysators können die S-Parameter  $S_{11}$  (bzw.  $S_{22}$ ) - Reflexionsfaktor und  $S_{21}$  (bzw.  $S_{12}$ ) - Transmissionsfaktor bestimmt werden. Wir verwenden den Vektornetzwerkanalysator von Keysight P9373A, der eine Messung bis 14 GHz ermöglicht. Die zu untersuchende Antennen werden bis 1,3 GHz charakterisiert.

Zur Messung der Resonanzfrequenz ist eine 1-Port-Messung ausreichend, bei der der Reflexionsfaktor in einem Smith-Diagramm über den kompletten Frequenzbereich dargestellt werden kann. Die Resonanzfrequenz tritt dort auf, wo der Imaginärteil der Antennenimpedanz Null wird.

Vor der Messung ist eine Kalibrierung mit dem Agilent 3,5 mm Calibration Kit (85033 D) durchzuführen, so dass der Einfluss der Zuleitungen nicht mitgemessen wird.

## 3.2 Richtdiagramme

Im zweiten Versuchsteil werden die Richtdiagramme der dünnen und dicken Monopolantenne gemessen.

**Messverfahren** Die Messung der Richtdiagramme erfolgt folgendermaßen:

- Das Ausgangssignal vom Antennenmessplatz wird dem zweiten Port vom Netzwerkanalysator zugeführt. Dabei ist eine Kalibrierung des zweiten Ports und der Transmission notwendig.
- Das Vertikaldiagramm jeder Antenne bei ihrer ersten Resonanzfrequenz wird aufgenommen, indem der Parameter  $S_{21}$  bei verschiedenen Positionen der Messsonde notiert wird.
- Ein Winkelschritt von  $10^\circ$  ist sinnvoll zu wählen.

## Verwendete Geräte

In diesem Versuch werden

- Netzwerkanalysator Keysight P9373A
- Agilent 3,5mm Calibration Kit (85033 D)
- PC zum Anzeigen der Messkurven
- Antennenmessplatz
- Dünner und dicker Monopol und ggf.. Dachkapazität

verwendet.

## 4 Aufgaben

### 4.1 Vorbereitungsaufgaben

1. Bestimmen Sie die erste Resonanzfrequenz (Gl.2) eines dünnen Monopols ( $h = 125 \text{ mm}$ ,  $2a = 1,5 \text{ mm}$ ) und eines dicken Monopols ( $h = 125 \text{ mm}$ ,  $2a = 10 \text{ mm}$ ). Berechnen Sie auch die korrigierten Resonanzfrequenzen mit Hilfe von Tab. 1.
2. Der Gruppenfaktor  $M(\varphi)$  einer Monopol-Direktor-Anordnung ist anhand gegebener Werte zu bestimmen. Für eine grobe Aussage sind drei Stützpunkte für  $\varphi$  ausreichend (z.B.  $\varphi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ ). Die im Versuch benutzten Elemente haben folgende Abmessungen:  
Monopol:  $h = 30 \text{ mm}$ ,  $2a = 1,5 \text{ mm}$ ,  $d = 15 \text{ mm}$  (Höhe und Durchmesser)  
Direktor:  $h = 27 \text{ mm}$ ,  $2a = 1,5 \text{ mm}$ ,  $d = 15 \text{ mm}$



$\underline{Z}_{12}$  und  $\underline{Z}_{22}$  sind den Diagrammen in Bild 4 und 5 zu entnehmen. Betriebsfrequenz ist 2,5 GHz. Welche Tendenz zeigt die Fußpunktimpedanz beim Vergleich Monopol ohne/mit Direktor? ( $h$  ist in Abb. 5 die Höhe des Direktors)

## 4.2 Versuchsaufgaben und Auswertung

### 1. Teil

Messung:

1. Messen Sie die Fußpunktimpedanz und die Resonanzfrequenzen eines Monopols im Bereich  $f = 0 \dots 1,3$  GHz für folgende Fälle:
  - a) dünner Monopol ( $h = 125$  mm,  $2a = 1,5$  mm)
  - b) dicker Monopol ( $h = 125$  mm,  $2a = 10$  mm)
2. Messen Sie die Resonanzfrequenz des dünnen Monopols aus 1. mit Dachkapazität.

Auswertung:

1. Vergleichen Sie für den dünnen und den dicken Monopol die gemessenen Resonanzfrequenzen mit den theoretisch ermittelten Werten .
2. Schätzen Sie den Wellenwiderstand  $Z_A$  der Antennen ab (Gl.6).
3. Berechnen Sie die Größe der Dachkapazität.

### 2. Teil

Messung:

1. Messen Sie die Vertikaldiagramme (Richtdiagramme) bei der jeweiligen Resonanzfrequenz für folgende Monopole:
  - a) dünner Monopol ( $h = 125$  mm,  $2a = 1,5$  mm)
  - b) dicker Monopol ( $h = 125$  mm,  $2a = 10$  mm)

Auswertung:

1. Zeichnen Sie die Vertikaldiagramme.
2. Gibt es Unterschiede zwischen dem dünnen und dicken Monopol?

## Literatur

- [1] Petermann: Vorlesung Hochfrequenztechnik
- [2] Heilmann: Antennen I, II, III. B.I.-Hochschulstaschenbücher
- [3] King: The Theory of Linear Antennas. Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass., 1956
- [4] Balanis: Antenna Theory: Analysis and Design. Wiley & Sons, 3. Aufl. 2005
- [5] Zinke/Brunswig: Lehrbuch der Hochfrequenztechnik, Bd. 1. Springer-Verlag, 3.Aufl., 1986
- [6] Unger: Elektromagnetische Theorie für die Hochfrequenztechnik I. Hüthig Verlag