

4. DIE STREIFENLEITUNG ALS BLINDWIDERSTAND (REAKTANZ)

4.1. INDUKTIVITÄT UND KAPAZITÄT

Wie Bild 1 zeigt, kann eine Leitung in einer L/C-Schaltung dargestellt werden. Dabei ist ein Stück Leitung, dessen Länge $l \leq \lambda/8$ ist, einer π - oder T-Schaltung nach Bild 7 äquivalent. Die Induktivität L und die Kapazität C können wie folgt errechnet werden:

$$L_{\pi} = \frac{Z}{2\pi f} \sin \frac{2\pi fl}{v}$$

v = Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen.

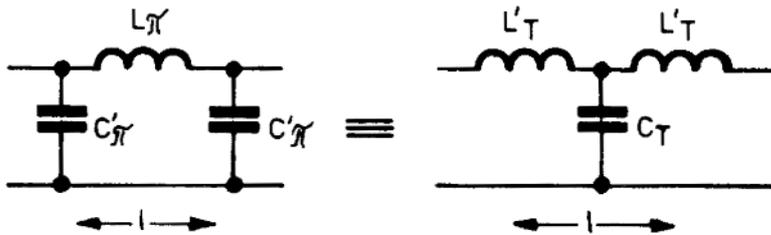


Bild 7: Ersatzschaltungen

Bild 7 a: π -Schaltung

Bild 7 b: T-Schaltung

Wie bereits erwähnt, sollen nur Längen $l \leq \lambda/8$ betrachtet werden. Für die Schaltung läßt sich dann eine einfache Formel angeben:

$$L = L_{\pi} = \frac{Z_0 \cdot l}{v} \quad \left(v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \right)$$

c = Lichtgeschwindigkeit ($3 \cdot 10^{10}$ cm/s)

Für die T-Schaltung gilt bei $l \leq \lambda/8$ für die Induktivität L'_T : $L'_T = \frac{Z_0 \cdot l}{2v}$

Aus den beiden Formeln und Bild 7 ist zu entnehmen, daß: $L_{\pi} = 2 L'_T$

Die Kapazitätsanteile C'_{π} und C_T lassen sich ebenfalls für kleine Leitungslängen ($l \leq \lambda/8$) berechnen:

$$C'_{\pi} = \frac{l}{Z \cdot 2v} \quad C_T = \frac{l}{Z \cdot v}$$

Daraus geht hervor, daß $C_T = 2 C'_{\pi}$ ist.

Für Leitungen mit $Z > 60 \Omega$ kann bei der Ersatzschaltung nach Bild 7 der Wert C'_{π} vernachlässigt werden, wenn die Generator- oder die Abschlußwiderstände nicht sehr hochohmig sind. In Grenzfällen müssen sie in die Schaltung mit einbezogen werden, was auch meist möglich ist.

Die auftretenden L_{π} - und C'_{π} -Werte sollen einmal zur Übersicht für ein Leitungsstück mit $l = \lambda/16$ im 23-cm-Band und dem Wellenwiderstand $Z = 100 \Omega$ ($\epsilon_r = 1$) ermittelt werden. $\lambda/16$ entspricht bei 23 cm Wellenlänge etwa einer Länge von 14,5 mm.

$$L_{\pi} = \frac{Z \cdot l}{v} = \frac{100[\Omega] \cdot 14,5[\text{mm}]}{3 \cdot 10^{11}} = 5 \text{ nH}$$

$$C'_{\pi} = \frac{l}{Z \cdot 2v} = \frac{14,5[\text{mm}]}{100 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 10^{11}} = 0,23 \text{ pF}$$

Für das 14,5 mm lange Stück der 100-Ω-Leitung ergibt sich so eine Schaltung nach Bild 8 bei 1,3 GHz. Die induktiven und kapazitiven Widerstände sind zum Vergleich mit angegeben. Da die kapazitiven Widerstände etwa zehnmal größer als die induktiven Widerstände sind, können sie in üblichen Transistorschaltungen vernachlässigt werden. Als Resultat ergibt sich die vereinfachte Ersatzschaltung nach Bild 8b.

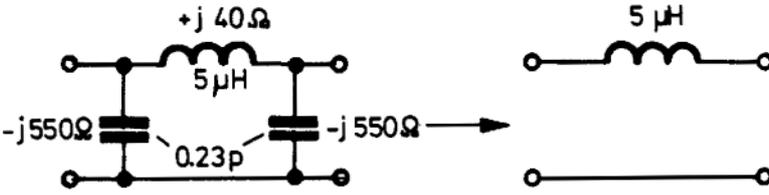


Bild 8: L_{π} - und C_{π}' -Werte für ein Leitungsstück im 23-cm-Band

Bild 8 a: Genaue Ersatzschaltung Bild 8 b: Vereinfachte Ersatzschaltung

Man wählt für den Aufbau von Induktivitäten in Streifenleitungen zweckmäßig einen Wellenwiderstand von etwa 120 Ω. Der Wert C_{π}' wird dadurch vernachlässigbar klein. Für einen gewünschten Wert der Induktivität ergibt sich dann für die Leitungslänge l (mm):

$$l = \frac{L \cdot v}{Z_0}$$

dabei sind Z_0 = Wellenwiderstand (Ω) mit $\epsilon_r = 1$; $v = 3 \cdot 10^{10}$ cm/s. Die Induktivität L wird in nH eingesetzt.

Für die Praktiker ist die vorstehende Formel in einer graphischen Darstellung (Bild 9) angegeben. Dabei ist der Wellenwiderstand Z_0 bereits im Verhältnis w/h ausgedrückt, so daß eine Dimensionierung sofort erfolgen kann.

Das vorhergehende Beispiel sei anhand dieser Kurve nachgeprüft:

Der angenommene Wellenwiderstand von $Z_0 = 100$ Ω bedingt ein Verhältnis w/h von 1,65. Mit diesem Wert geht man von der horizontalen Achse aus in die Kurve und erhält auf der vertikalen Achse einen Wert von etwa 3,4 nH/cm.

Die Induktivität L ist dann bei einer Länge $l = 14,5$ mm:

$$L = 3,4 \frac{\text{nH}}{\text{cm}} \cdot 1,45 \text{ cm} = 4,95 \text{ nH} \quad 5 \text{ nH}$$

Aus dem Vorhergehenden ist ersichtlich, daß ϵ_r für die Induktivität kurzer Leitungsstücke ohne Bedeutung ist.

Es folgt ein praktisches Beispiel aus der Transistor-Anpaßtechnik:

Ein Leistungstransistor für eine Ausgangsleistung von 6 W bei 432 MHz weist einen komplexen Basis-Emitter-Widerstand R_{BE} von etwa $2 \Omega + j3 \Omega$ auf (B10).

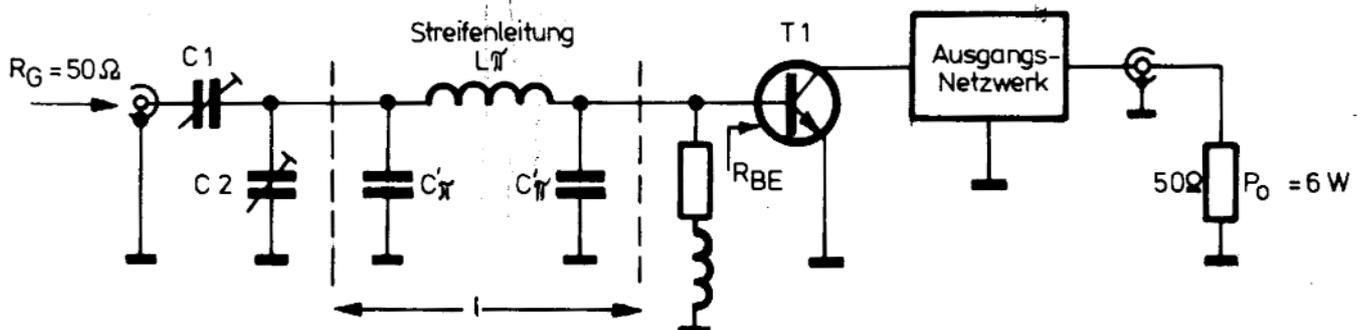


Bild 10: Anpassung einer Transistor-Schaltung über eine Streifenleitung an einen Widerstand von 50 Ohm

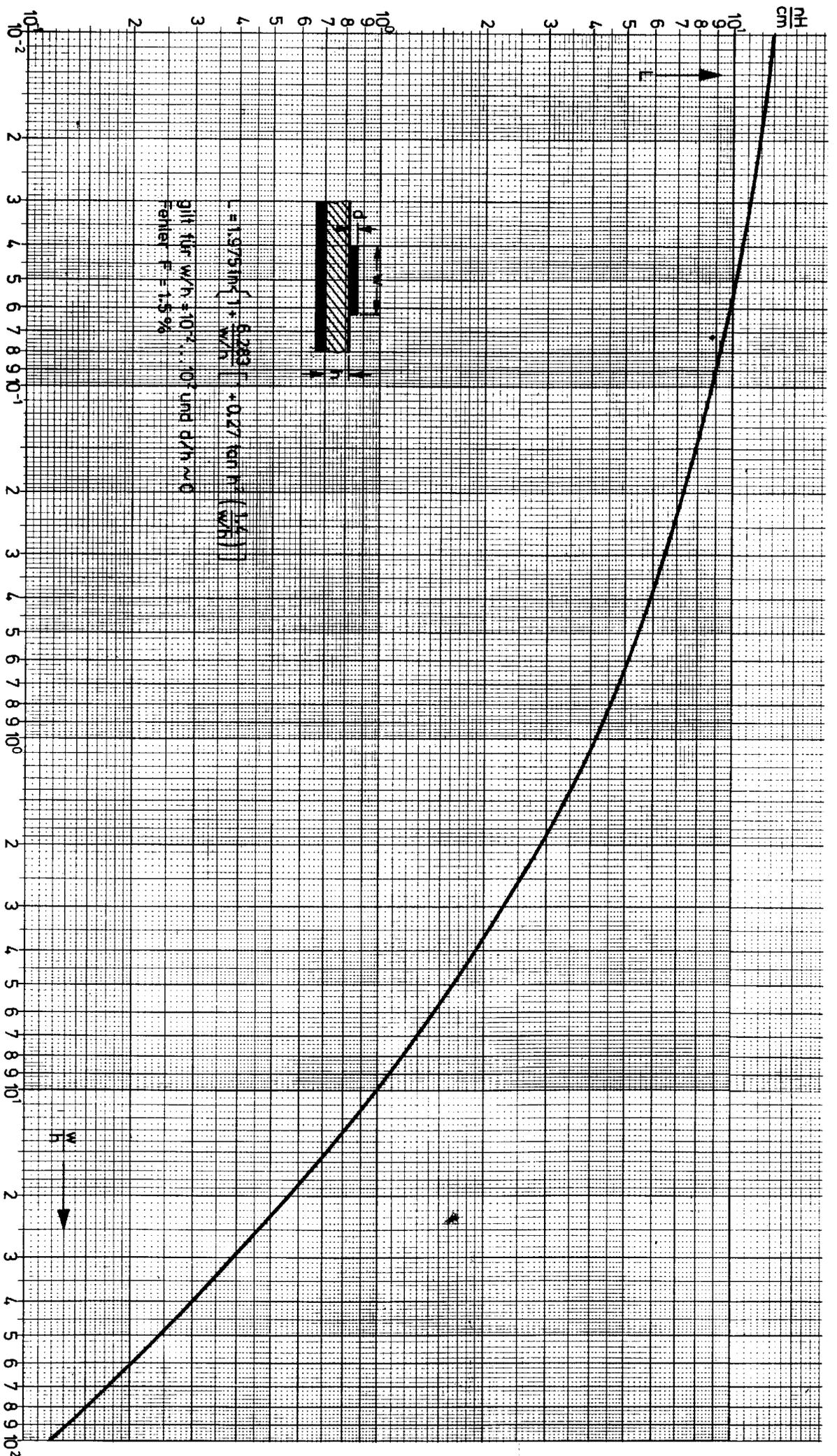


Bild 9: Ermittlung der Induktivität L aus dem Verhältnis w/h

Durch die Schaltelemente L_{π} , C_2 und C_1 soll der niederohmige komplexe Basis-Emitter-Widerstand des Transistors T_1 auf den Eingangswiderstand $R_G = 50 \Omega$ transformiert werden. Die dabei notwendige Induktivität ist durch eine Streifenleitung mit dem Wellenwiderstand Z und der Länge l herzustellen.

Ermittlung der Schaltwerte von C_1 , C_2 und L_{π} :

Man benutzt hierzu z. B. das Widerstands-Leitwertdiagramm nach Bild 11 und normiert die Eingangswerte $R_{BE} = 2 + j3 \Omega$ und $R = 50 \Omega$ auf 10Ω , um im Diagramm arbeiten zu können. R_{BE} wird dann zu: $0,2 + j 0,3 \Omega$ und R_G zu 5Ω .

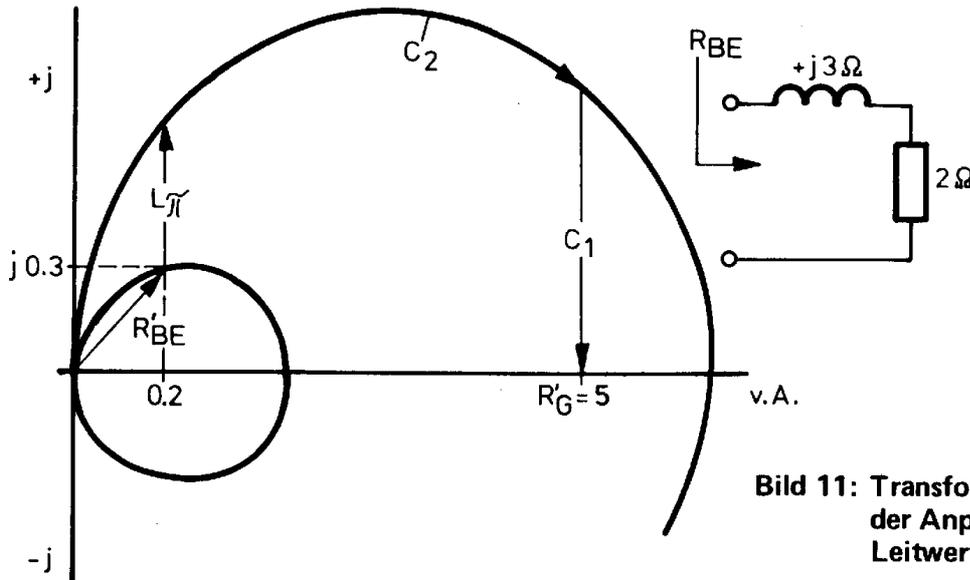


Bild 11: Transformationsvorgang (normiert) der Anpaßschaltung im Widerstands-Leitwert-Diagramm

Im Diagramm ist jetzt von $0,2 + j 0,3 \Omega$ auf 5Ω zu transformieren; dies ist in Bild 11 skizziert:

X_L bestimmt sich daraus zu $X_{L_{\pi}} = 10 \cdot X_{L'_{\pi}} = 8,0 \Omega$

$$L = \frac{X_{L_{\pi}}}{\omega} = \frac{8 [\Omega]}{2 \pi \cdot 432 [\text{MHz}]} = 3 \text{ nH}$$

Aus der vorhergehend besprochenen graphischen Darstellung (Bild 9), erhält man bei einem Verhältnis w/h von 2 und einer Länge l von 10 mm eine Induktivität $L = 3 \text{ nH}$. Damit ist die mechanische Ausführung von L_{π} bestimmt. Führt man die Rechnung für die Schaltelemente des Anpaßnetzwerkes fort, so erhält man für den Trimmer-Kondensator $C_2 = 10$ bis 20 pF und $C_1 = 5$ bis 20 pF . Daraus kann man ersehen, daß C_{π} in der Streifenleitungs-Ersatzschaltung nach Bild 7 keinen Einfluß hat.

4.2. KAPAZITÄT

Wie bereits in Absatz 4.1. gezeigt, kann eine Streifenleitung auch als Kapazität ausgebildet werden. Nach Ersatzschaltbild 7 ergibt sich:

$$C_T = \frac{l}{Z \cdot v} = \frac{l \cdot \epsilon_{\text{eff}}}{Z_0 \cdot c}$$

Wird Z sehr niedrig gewählt, (große Streifenbreite, hohes ϵ_r), so wird C_T groß. Zur Darstellung von Kapazitäten in Streifenleitungstechnik sind Z -Werte von etwa 10Ω gebräuchlich. Die störenden Zuleitungsinduktivitäten L'_T aus Bild 7b werden dann vernachlässigbar klein.

Deshalb ist es zweckmäßig auch hier, wie bei der Induktivitätsbestimmung, die Kapazität einer Streifenleitung für ein gegebenes ϵ_r graphisch zu ermitteln. In Bild 12 ist dieser Kapazitätsbelag für $\epsilon_r = 5$ aufgetragen.

Als Beispiel soll die Kapazität einer Streifenleitung mit $Z = 20 \Omega$ ($\frac{W}{h} = 7,2$) bei einer Länge von 10 cm ermittelt werden. Die Leitung ist auf beidseitig beschichtetem Epoxyd-Hartglasgewebe mit $\epsilon_r = 5$ untergebracht.

Aus der Kurve in Bild 12 erhält man von der horizontalen Achse beim Wert $\frac{W}{h} = 7,2$ ausgehend einen Kapazitätsbelag von 380 pF/m an der vertikalen Achse. Bei einer Leitungslänge von 10 cm ergibt sich somit eine "gedruckte Kapazität" von 38 pF.

Aus dem letzten Beispiel ist zu ersehen, daß nur verhältnismäßig kleine Kapazitäten bei üblichen Trägermaterialdicken von Leiterplatten darstellbar sind. Größere Kapazitäten können nur auf dünnerem Trägermaterial oder bei normalem Trägermaterial auf größeren Flächen verwirklicht werden.

Um in VHF- und UHF-Schaltungen mit gedruckten Induktivitäten noch einen Abgleich der Kreise zu erhalten, müssen ohnedies veränderbare Kondensatoren vorgesehen werden. In vielen Fällen kann deshalb auf gedruckte Kapazitäten verzichtet werden. Man beschränkt sich dann auf die Herstellung von Leitungen mit gewünschten Wellenwiderständen und Induktivitäten.

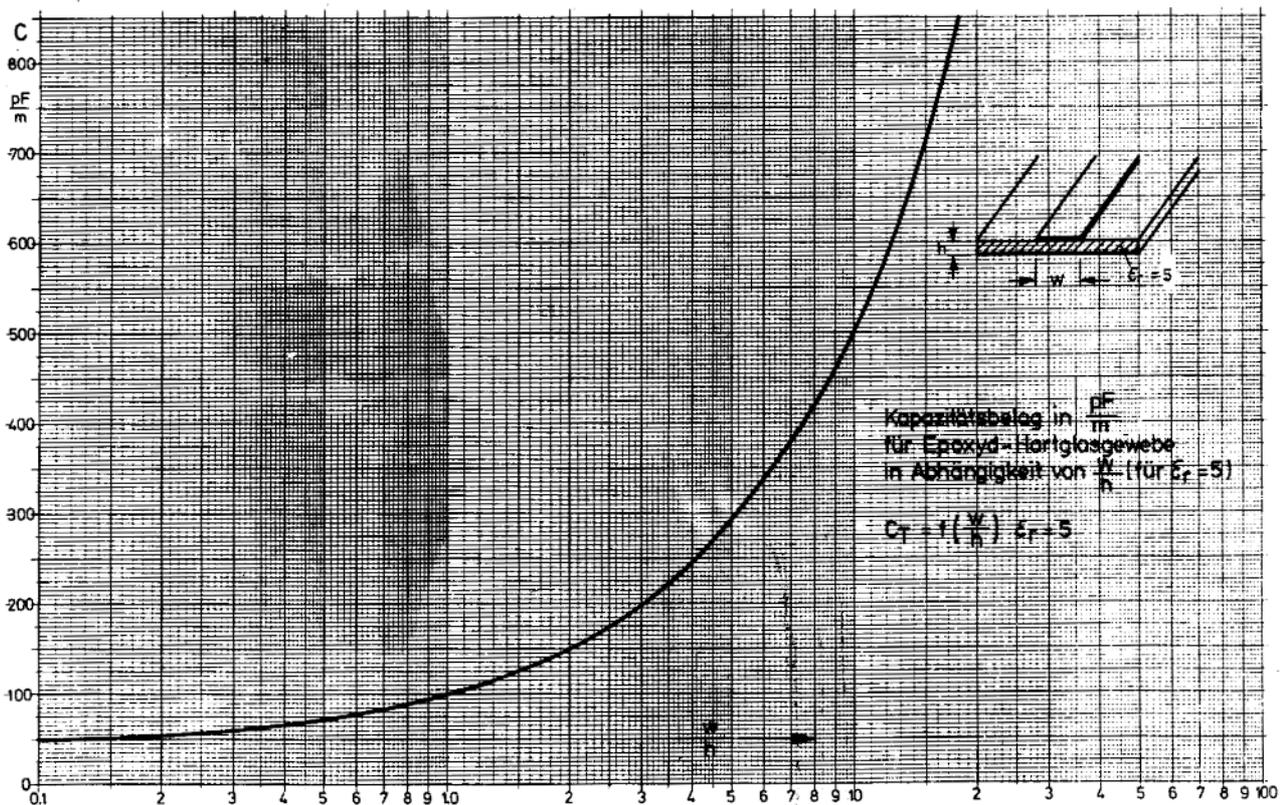


Bild 12: Kapazitätsbelag einer Streifenleitung in Abhängigkeit vom Verhältnis w/h

5. LITERATUR

- (1) "Streifenleitungen": H. Geschwinde und W. Krank
Wintersche Verlagshandlung 1960
- (2) "Taschenbuch der Hochfrequenztechnik": Meinke, Gundlach
- (3) "Design of Distributed Transistor Amplifiers at Microwave Frequencies"
Microwave Journal p.41-47, January 1967
- (4) IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques
MTT-3, No. 2, March 1955
- (5) "Microwave Filters, Impedance-Matching Networks and Coupling Structures"
G. L. Matthaei, Leo Young and E. M. T. Jones; McGraw-Hill, 1964