HOCHFREQUENZ- und IMPULSTECHNIK-Referat Thomas PANHOFER 5HNB (96/97)
22.2.1997

UHF- und MIKROWELLEN-MESSTECHNIK

Höhere Technische Bundeslehranstalt Wien 10 Dr. Jonke

INHALTSVERZEICHNIS

Thema Seite

1) Begriffserklärung: UHF, Mikrowelle 3

2) Allgemeines zu Strom-, Spannungs- und Leistungsmessung bei HF 3

3) Strommessung 3
3.1. Allgemeines zur HF-Strommessung 3
3.2. Thermische Strommeßverfahren 4
3.2.1. Thermoumformer 4
3.2.2. Hitzdrahtinstrument 5
3.2.3. Hitzdrahtluftthermometer 6
3.2.4. Photoamperemeter 6
3.2.5. Photoamperemeter mit Schlierenmethode 6
3.2.6. Strommessung durch Widerstandserhöhung (Bolometer) 6
3.3. Strommesser mit Gleichrichter 7
3.4. Strommessung durch Spannungsmessung 8

4) Spannungsmessung 8
4.1. Allgemeines zur HF-Spannungsmessung 8
4.2. Spannungsmessung durch Spitzengleichrichtung 8
4.3. Samplingoszilloskop 10

5) Leistungsmessung 10
5.1. Allgemeines zur HF-Leistungsmessung 10
5.2. Leistungsmessung mit dem Bolometer 10
5.3. Leistungsmessung mit Thermoelementen 11
5.4. Elektrostatischer Leistungsflußmesser 12
5.5. Messung großer Leistungen mit dem Kalorimeter 12
5.6. Leistungsmessung durch Temperaturerhöhung an Widerständen 12
5.7. Leistungsmessung mit Glühlampen 13
5.8. Leistungsmessung durch Spannungsmessung an einem Widerstand 13
5.9. Leistungsmessung durch Strommessung an einem Widerstand 13

6) Literaturverzeichnis 13

1) Begriffserklärung: UHF, Mikrowelle

Der UHF-Bereich (ultra high frequency) reicht von 300MHz bis 3GHz, die Wellenlängen liegen damit zwischen 10cm und 100cm und haben die Bezeichnung Dezimeterwellen.
Als Mikrowellenbereich wird der Frequenzbereich von etwa 1GHz bis 30GHz bezeichnet, die Wellenlängen liegen zwischen 1cm und 30cm.

2) Allgemeines zu Strom-, Spannungs- und Leistungsmessung bei HF

Die Messung hochfrequenter Ströme und Spannungen läßt sich nur im Gebiet unterhalb von etwa 2GHz praktisch durchführen. Bei höheren Frequenzen breitet sich eine elektromagnetische Welle vorwiegend als Rohrwelle aus. der Bedarf nach Strom- und Spannungsmessung ist nur gering, an ihre Stelle tritt die Leistungsmessung.

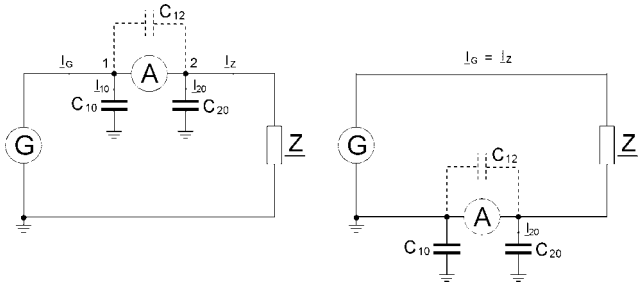
3) Strommessung

3.1. Allgemeines zur HF-Strommessung

Direkte Strommessungen werden in der HF-Technik nur selten durchgeführt. Meistens ersetzt man sie durch Spannungsmessungen.
Die Gründe sind:

a) Mangel an zur Verfügung stehenden Meßgeräten
b) Zur Strommessung muß ein HF-Kreis aufgetrennt werden. Die verteilten Kapazitäten der Kreise bewirken, daß der Strom ortsabhängig wird, also an verschiedenen Stellen eines Leiters verschiedene Werte besitzt. Der für die Messung interessante Punkt ist dabei häufig nicht zugänglich.

Im allgemeinen liegt am Strommesser eine nennenswerte Spannung gegen Erde. Über die unvermeidlichen Erdkapazitäten des Meßinstruments fließen dann Ströme, die mit zunehmender Frequenz zu unzulässigen Fehlern führen können (bei Thermoumformern verursacht der kapazitive Strom über das Thermoelement noch zusätzliche Fehler).



a) b)

Wie in Zeichnung a zu sehen ist, fließen über die Erdkapazitäten C_{10} und C_{20} Ströme gegen Erde ab. Das Meßgerät zeigt also nicht den tatsächlichen Verbraucherstrom $\underline{I}_Z$, sondern die Summe von $\underline{I}_Z+\underline{I}_{20}$ an. Der vom Generator abgegebene Strom $\underline{I}_G$ wird dagegen um $\underline{I}_{10}$ zu klein gemessen. Dieser Meßfehler wird merkbar, wenn die Blindwiderstände von C_{10} bzw. C_{20} klein im Verhältnis zu $\underline{Z}$ sind.

Wesentlich günstigere Verhältnisse hat man, wenn der Strommesser erdseitig mit dem Verbraucher in Reihe geschaltet wird (Zeichnung b). Dann fließt nämlich in C_{10} kein Strom, und C_{20} liegt parallel zum Strommesser. Der dadurch verursachte Fehler hängt vom Verhältnis des (ohm'schen) Innenwiderstandes des Strommessers zum Blindwiderstand von C_{20} ab. Der Fehler ist normalerweise jedoch wesentlich kleiner als im Fall a.

Die Parallelkapazität C_{12} hängt im wesentlichen vom verwendeten Meßinstrument ab.

Wenn es die Meßobjekte zulassen, wird man den Strommesser also immer erdseitig einbinden.
Für die in der Praxis auftretenden Fälle läßt sich durch sinngemäße Anwendung der vorhergehenden Darstellungen stets eine Fehlerabschätzung durchführen.
Die in den Zeichnungen angegebenen Störungen lassen sich teilweise dadurch verhindern, daß man das gesamte Meßinstrument innerhalb eines metallischen, von Erde isolierten Schirm unterbringt, der entweder mit Klemme 1 oder 2 verbunden ist.
Es wird dann wird entweder der Verbraucherstrom $\underline{I}_Z$ (bei Verbindung mit Klemme 2), oder der Generatorstrom $\underline{I}_G$ (bei Verbindung mit Klemme 1) richtig angezeigt.

Die in Frage kommenden Meßinstrumente haben einen relativ hohen Eigenverbrauch, sodaß durch die Einschaltung des Instruments die Meßobjekte häufig unzulässig stark beeinflußt werden (z.B. Dämpfung von Schwingkreisen). Die kleinsten erzielbaren Meßbereiche ergeben dabei ebenfalls vielfach noch keine ausreichende Empfindlichkeit.
Die Überlastbarkeit ist vor allem bei thermischen Meßgeräten nur gering.
Schwierigkeiten bereitet die Änderung des Meßbereiches: Die bei Gleichstrom üblichen Nebenwiderstände sind in der HF-Technik wegen ihrer Eigen-Induktivität und Kapazität kaum anwendbar. Deshalb werden HF-Strommesser meist nur mit einem Meßbereich ausgeführt; die Meßbereichserweiterung erfolgt dann am besten durch Stromwandler.

3.2. Thermische Strommeßverfahren

Von den für Hochfrequenz anwendbaren Strommeßgeräten haben die auf thermischer Grundlage arbeitenden die größte Verbreitung gefunden. Ihre Hauptvorzüge liegen in der weitgehenden Frequenzunabhängigkeit, der leichten Abschätzbarkeit von Fehlerquellen und der Freiheit von Kurvenformfehlern.
Allgemeine kommen nur direkt zeigende Verfahren in Betracht, die auf der Ausnützung des thermoelektrischen Effekts bzw. der Wärmeausdehnung beruhen.

3.2.1. Thermoumformer

Thermoumformerinstrumente haben sich aus folgenden Gründen in der Hochfrequenzmesstechnik durchgesetzt:

*) Es lassen sich Meßbereiche zwischen 100❍A und 10A herstellen
*) Eine Anzeigegenauigkeit von 1% vom Endausschlag ist erreichbar
*) Die Eichung der Strommesser ist mit Gleichstrom möglich, dadurch lassen sich Vergleichsmessungen mit noch wesentlich höherer Genauigkeit durchführen
*) der tolerierbare Eigenverbrauch liegt bei 1mW-2W
*) als obere Frequenzgrenze ist 10GHz möglich
*) Das Anzeigeinstrument kann getrennt vom Hochfrequenzteil angeordnet werden

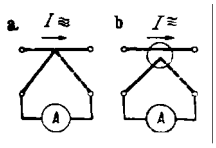
Der Thermoumformer besteht aus einem Heizdraht, der von dem zu messenden HF-Strom durchflossen wird. Die dadurch entstehende Temperaturerhöhung wird auf ein Thermoelement übertragen, welches eine dazu proportionale Spannung erzeugt. Diese Spannung kann nun von einem Gleichstrominstrument angezeigt werden.
Die Thermospannung ist proportional der Temperaturdifferenz zwischen der beheizten Lötstelle und den kalten Anschlußenden, oder wenn die Wärmeabfuhr von der beheizten Lötstelle verhindert wird, proportional zur Heizleistung (Leistung, welche die Erwärmung verursacht).

$$u = K*(T_1-T_0) = K_1*I^2*R$$

u=Thermospannung [V] K,K_1=Konstanten (->Metallkombinationen)
T_1=Temperatur der warmen Lötstelle T_0=Temperatur der kalten Lötstelle
I=Heizstrom-Effektivwert [A] R=Heizdraht-Widerstand [Φ]

Man erhält also einen Strommesser mit quadratischem Skalenverlauf.

Zum Aufbau der Thermoumformer werden die folgenden Verfahren angewendet.



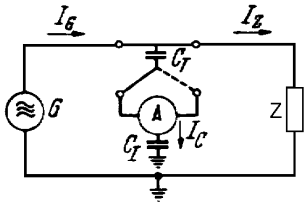
a) Thermoelement mit Heizdraht verschweißt (direkte Heizung)

b) Thermoelement mit Heizdraht nur thermisch verbunden (Glasperle, indirekte Heizung)

In beiden Fällen fließt der zu messende Strom über einen Heizdraht, dessen Querschnitt dem Meßbereich angepaßt ist.
Im Fall a ist das Thermoelement etwa in der Mitte des Heizdrahtes angeschweißt, durch den idealen Wärmekontakt kommt es zu kurzen Einstellzeiten.
Im Fall b erfolgt die Wärmeübertragung zwischen Heizdraht und Thermoelement durch eine Isolierschicht (z.B. Glasperle).

Die im Heizdraht umgesetzte Leistung ist proportional zum Quadrat des Stromes, wodurch sich eine exakte Effektivwertanzeige ergibt, und proportional zum Widerstand R. Der Anstieg des Wirkwiderstandes mit der Frequenz durch die Stromverdrängung (Skineffekt) führt zu einem positiven Anzeigefehler für den Strom und legt auch die obere Frequenzgrenze fest.
Durch die Verwendung von dünnwandigen Heizrohren anstelle von Drähten läßt sich der Fehler verringern, und die obere Frequenzgrenze ca. um den Faktor 10 erhöhen.

Bei Thermostrommessern kommt zusätzlich zu den kapazitiven Störungen (siehe Bild unten) noch die Aufheizung der Thermoelementschenkel durch den über die Raumkapazität C_I des Anzeigeinstruments abfließenden Strom hinzu.



Kapazitiver Störstrom über die Thermoelementschenkel bei (indirekt geheizten) Thermoumformern

Die Größe dieses Stromes $\underline{I}_C$ hängt von der Größe der Raumkapazität C_I und der Kapazität C_T zwischen Heizer und Thermoelement ab.
Der Wert von C_T wird durch die Verbindungsleitungen zum Meßinstrument und bei räumlicher Trennung von Thermoumformer und Instrument erhöht.
Bei großen HF-Spannungen am Heizer führt der Strom I_C zu einer zusätzlichen Erwärmung der Elementschenkel und damit zu einer wesentlichen Fehlanzeige.

Die Eichung von Thermostrommessern kann entweder mit niederfrequentem Wechselstrom oder auch mit Gleichstrom erfolgen.

3.2.2. Hitzdrahtinstrument

War früher das meist verwendete, direkt zeigende, HF-Meßinstrument. Dabei wird die Verlängerung des stromdurchflossenen Drahtes auf einen Zeiger übertragen.

Eigenschaften:
*) Raumtemperaturabhängigkeit des Nullpunktes
*) geringe Stromempfindlichkeit (>100mA)
*) hoher Eigenverbrauch (0,1W - einige hundert Watt, bei großen Strömen)
*) geringe mechanische Festigkeit
*) räumliche Verbindung von Meß- und Anzeigeort
*) Genauigkeit ca 1%
*) geringe Überlastbarkeit
*) quadratische Skala

Ein vom Strom i durchflossener Draht mit der Länge l_0 und dem Widerstand r nimmt in erster Näherung eine Übertemperatur von $\Delta T = k*i^2*r$ an und verlängert sich dabei um

$$\Delta l = l_t - l_0 = \beta \cdot \Delta T \cdot l_0 = k \cdot \beta \cdot i^2 \cdot r \cdot l_0 \Rightarrow i = \sqrt{\frac{\Delta l}{k \cdot \beta \cdot r \cdot l_0}}$$

β=linearer Ausdehnungskoeffizient k=Boltzmann Konstante = 1,38 E-23 JK^{-1}
Die obere Meßbereichsgrenze liegt bei einigen hundert Ampere.

3.2.3. Hitzdrahtluftthermometer

Hier wird die Ausdehnung eines Gases, welches den Heizdraht in einem abgeschlossenen Gefäß umgibt, beobachtet. Mit dieser Meßanordnung sind hohe Empfindlichkeit und guter Frequenzgang möglich, da sich der Heizdraht sehr kurz und kapazitätsarm halten läßt, sodaß nur der berechenbare Skineffekt eine Rolle spielt.

Der Draht erhitzt das Gas, die Ausdehnung wird z.B. durch eine Quecksilbersäule angezeigt.
Wenn der Druck konstant ist, kann sich bei einer Temperaturänderung nur das Volumen ändern:

$$V_t = V_0 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \Delta T\right)$$

♋...Volumsausdehungskoeffizient
Diese Meßmethode bietet Genauigkeiten bis zu 100❍A.

3.2.4. Photoamperemeter

Photoamperemeter enthalten einen kurzen gestreckten Draht, der in ein evakuiertes Glasgefäß eingeschmolzen ist. Bei ausreichender Belastung wird vom glühenden Draht Licht ausgesendet, dessen Intensität mittels einer Photozelle bzw. einem Photoelement durch ein Gleichstrominstrument angezeigt werden kann.

Der Meßbereich ist eng begrenzt, die Eichkurve stark gekrümmt.

Photoamperemeter sind zur Messung bei sehr hohen Frequenzen geeignet, da praktisch nur der Skineffekt des sehr dünnen Drahtes eine Rolle spielt. Der Eigenverbrauch ist jedoch relativ hoch (>0.1W).

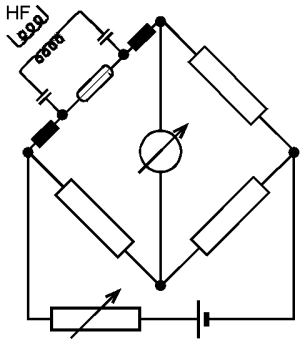
3.2.5. Photoamperemeter mit Schlierenmethode

Funktioniert ähnlich wie das Photoamperemeter, jedoch wird hier die Erwärmung des Drahtes unterhalb der Glühtemperatur über die Luftströmung um den Draht beobachtet (z.B. mittels Infrarot-Lichtschranken).

Dadurch läßt sich der Eigenverbrauch auf einige mW herabsetzen.

3.2.6. Strommessung durch Widerstandserhöhung - Bolometer

Bei den Bolometerschaltungen wird die Widerstandsänderung eines durch den HF-Strom erwärmten Leiters bestimmt, welcher ein Zweig einer Gleichstrombrücke ist.
Die Ankopplung des Hochfrequenzkreises an den Gleichstromkreis kann z.B. induktiv erfolgen.



Zwei Drosselspulen verhindern, daß der HF-Strom außer durch den Heizdraht auch noch durch andere Teile der Brücke fließt.
Die Kondensatoren verhindern, daß der Gleichstrom zur HF-Ankopplung gelangt.

R ■ R_{20} ◄1 ■ ☺ $_{20}$ ◄ ☺ ■ 20 ■ C ☹

Bei genauen Messungen muß berücksichtigt werden, daß die Widerstandstemperaturkennlinie nicht geradlinig verläuft, sondern bei hohen Temperaturen gekrümmt ist.
Es gilt dann folgende Gleichung:

R ■ R_{20} ◄1 ■ ☺ ◄ ☺ ■ 20 ■ C ☹ ■ ☺ ◄ ☺ ■ 20 ■ C ☹ ^{2} ☹

Als temperaturabhängige Leiter werden entweder Metalldrähte (z.B. Platin) oder neuerdings auch Heißleiter (Thermistoren) verwendet.
Der Eigenverbrauch läßt sich bis auf 10^{-8} W herabsetzen.
Es ist somit das empfindlichste der bisher genannten Meßverfahren, die obere Frequenzgrenze liegt bei einigen 100 MHz.

3.3. Strommesser mit Gleichrichter

Drehspulinstrumente lassen sich in Verbindung mit Gleichrichtern auch bei Hochfrequenz zur Strommessung verwenden.

Die Strom-Spannungs-Kennlinie der Kristall-Gleichrichterdioden hat um den Arbeitspunkt U_0/I_0 einen exponentiellen Verlauf:

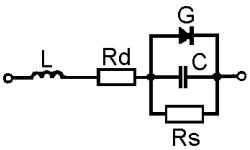
$$I = I_0 \cdot \exp\frac{U}{U_0} - 1$$

Durch die Nichtlinearität entstehen Oberwellen, die folgenden Einfluß auf die Anzeige haben:
Geradzahlige Harmonische liefern keinen Beitrag zur Anzeige, der Meßwert liegt also unter dem Effektivwert.
Ungeradzahlige Harmonische der Ordnungszahl n führen zu einer Ausschlagsänderung, die von der Phasenlage abhängig ist.
Die Größtwerte dafür sind: $\frac{\varphi_n}{\varphi_1} = \frac{1}{n}\frac{I_n}{I_1}$

Der angezeigt Wert kann also sowohl über, als auch unter dem Effektivwert liegen.

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^4}{4!} + \ldots$$

$$x = \hat{U} \cdot \cos\omega t + U_0$$

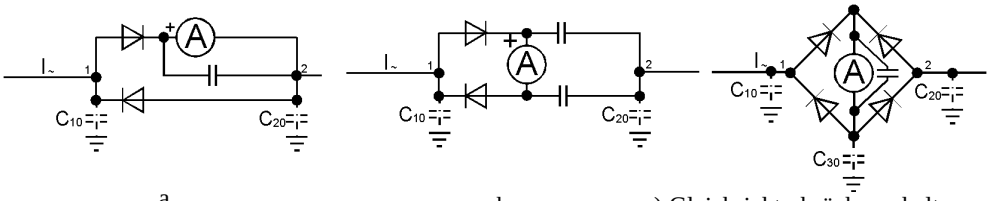


Gleichrichterersatzschaltung

Das Verhalten dieser Gleichrichter, insbesondere der Frequenzgang, läßt sich anhand der Ersatzschaltung erklären.

L...Induktivität der Gleichrichteranordnung
R_d...Bahnwiderstand, maßgeblich für den Durchlaßstrom
R_S...Sperrwiderstand (beide von Strom und Spannung abhängig)
C...Kapazität der Sperrschicht, ebenfalls spannungsabhängig
G...ideale Diode

Für Hochfrequenz eignen sich in erster Linie folgende Schaltungen:



a b c) Gleichrichterbrückenschaltung

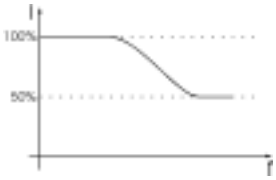
Strommesserschaltungen mit Kristall-Gleichrichtern mit Erdkapazitäten

Bei Ausführung a fließt die eine Halbwelle des Stromes über die obere Diode und das Meßinstrument, die andere durch die untere Diode am Instrument vorbei; es handelt sich also um eine Halbweggleichrichtung. Der Kondensator C sorgt dafür, daß am induktiven Widerstand der Drehspule kein zu hoher Spannungsabfall entsteht.

Ausführung b unterscheidet sich bei ausreichend großen Kondensatoren nur dadurch, daß Gleichstrom gesperrt wird.
Der Frequenzgang der Schaltungen a und b ist nicht nur durch die Raumkapazitäten C_{10} und C_{20} gegeben, sondern auch durch Kapazitäten parallel zu den Gleichrichterstrecken.
Ihre Wirkung hängt vom Durchlaßwiderstand der Gleichrichterstrecke ab, da sich der Wechselstrom auf der Parallelschaltung beider verzweigt. Da der Durchlaßwiderstand mit zunehmender Belastung kleiner wird, ist der Frequenzgang bei hohen Strombereichen besser.
Zusätzlich zu diesen Frequenzfehlern zeigt sich auch noch eine Frequenzabhängigkeit durch die Trägheit der in Flußrichtung wirksamen Raumladung.

Die vor allem bei niedrigen Frequenzen verwendete Graetz-Gleichrichterschaltung c hat den Vorteil, daß im Gegensatz zu den bisherigen Schaltungen, der doppelte Gleichstrom fließt.

Dafür tritt der doppelte Spannungsabfall an jeweils 2 in Reihe liegenden Dioden auf. Außerdem weist diese Schaltung einen schlechten Frequenzgang auf.
Die Kapazität C_{30} überbrückt bei Erdung von Punkt 2 bei hoher Frequenz die beiden rechten Dioden, sodaß bei wachsender Frequenz die Schaltung in die Ausführung a übergeht und nur noch der halbe Strom angezeigt wird.



Der Skalenverlauf dieser sogenannten Flächengleichrichterschaltungen (Anzeige des Strommessers entspricht der Fläche einer oder beider Halbwellen, unabhängig von der Kurvenform) ist nahezu linear. Der Leistungsverbrauch liegt zwischen 10^{-8}W und 10^{-2}W. Gleichrichterstrommesser dieser Art sind hoch überlastbar.

3.4. Strommessung durch Spannungsmessung

Bei dieser Meßmethode wird die an einer bekannten Impedanz auftretende Spannung durch eines in der HF-Technik gebräuchlichen Spannungsmessverfahren ermittelt. Dazu eignet sich am besten ein nahezu verlustfreier Kondensator, dessen Kapazität aber genau bekannt sein muß.

4) Spannungsmessung

4.1. Allgemeines zur HF-Spannungsmessung

Viele für NF verwendete Meßgeräte erstrecken sich in ihrem Meßbereich weit in den Bereich der Hochfrequenz, wie auch viele HF-Meßgeräte für NF-Anwendungen geeignet sind.
Die Frage, für welchen Frequenzbereich der Spannungsmesser geeignet ist, hängt daher weniger vom Meßprinzip, sondern vielmehr von der Dimensionierung der einzelnen Schaltelemente ab.

Wie auch bei NF soll der Meßkreis durch das Gerät nicht oder nur unwesentlich beeinflußt werden. Die Spannungsmesser sollen daher einen hohen Eingangswiderstand besitzen und einen geringen Eigenverbrauch haben. Ist der Eingangswiderstand nicht rein ohm'sch, so ist der Einfluß auf den Meßkreis auch noch frequenzabhängig. Die Eigenkapazität des Meßinstrumentes kann die Meßspannung verringern oder einen Schwingkreis verstimmen.
Weitere Fehler können durch die Zuleitungen entstehen, deren Größe jedoch abgeschätzt werden kann, wenn man die Kapazitäten, Induktivitäten und ohm'sche Widerstände der Zuleitungen bedenkt.
Besonders bei hohen Frequenzen muß darauf geachtet werden, daß durch Fremdfelder nicht zusätzliche Spannungen in den Leitungen induziert werden. Unter Umständen müssen die Leitungen daher abgeschirmt werden.
Bei der Einschaltung des Spannungsmessers in einen Meßkreis ist auch die Spannungsverteilung längs der Anordnung zu beachten (z.B. bei Antennen).
Weiters ist zu beachten, daß manche Spannungsmesser Effektivwerte, andere jedoch Scheitelwerte anzeigen.

4.2. Spannungsmessung durch Spitzengleichrichtung

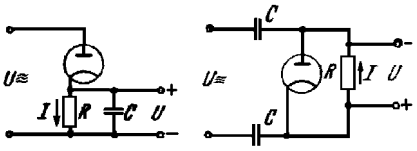
Das Standardmeßgerät für die Spannungsmessung bei HF stellt das mit Spitzengleichrichtung arbeitende Röhrenvoltmeter dar. Unter den verschieden Spannungsmessern haben Röhrenvoltmeter eine besondere Bedeutung, weil sie für einen großen Spannungs- und Frequenzbereich verwendet werden können.
Als kleinster Meßbereich wird aus Gründen der Nullpunktstabilität meist 1V vorgesehen.
Die untere Frequenzgrenze liegt bei ca 10kHz, die obere hängt hauptsächlich von der Elektronenlaufzeit in der Röhre ab und reicht üblicherweise bis über 3GHz.

Für bestimmte Zwecke der Meßtechnik sind auch Röhrenvoltmeter mit bestimmter, meist schmaler, Frequenzbandbreite in Gebrauch (=selektive Röhrenvoltmeter). Es werden dafür Verstärker mit Siebgliedern oder abgestimmte Verstärker, aber auch Überlagerungsempfänger verwendet.
Durch schaltungstechnische Maßnahmen läßt sich auch eine logarithmische Anzeige erzielen, sodaß die Anzeige in Np oder dB geeicht werden kann.

Weitere Vorteile sind der große, umschaltbare Meßbereich (0,1V bis 1kV , mit Vorverstärker und kapazitivem Spannungsteiler von 1❍V bis 100kV), der große Eingangswiderstand auch bei kleinen Meßspannungen, sowie kleine Eingangskapazität, hohe Überlastbarkeit und gute Genauigkeit.

Wie die Überschrift schon erkennen läßt, wird der Scheitelwert angezeigt, sodaß bei verzerrter Kurvenform nicht mehr auf den Effektivwert geschlossen werden kann.

Andererseits ist das Meßgerät hierdurch für die Messung von Impulsamplituden (weil Spitzengleichrichter) geeignet, wobei die Anzeige weitgehend unabhängig von der Impulsform ist.

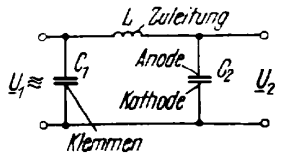


Grundschaltung für Einwegspitzengleichrichter

Die Gleichrichterstrecke wird während der negativen Halbperiode mit der doppelten Scheitelspannung in Sperrichtung beansprucht, wodurch sich Grenzen für die höchste zu messende Spannung ergeben. Während Röhren stets einige 100V vertragen, sind Kristallgleichrichter auf etwa 100V Sperrspannung beschränkt.

Der Wirkleistungsverbrauch ergibt sich aus der Gleichstromleistung zu $P=U^2/R$.
Die untere Frequenzgrenze ergibt sich durch die Entladung des Kondensators C über R.
Für kleine Anzeigefehler F ergibt sich angenähert: $F=0{,}5\cdot f\cdot R\cdot C$
Für einen zulässigen Fehler von 2% ergibt sich damit eine Zeitkonstante von ♦=RC=25/f, also z.B. bei f=25Hz => ♦=1s.
Eine solche Zeitkonstante hat eine störende Verlängerung der Abklingzeit der Anzeige bei Wegnahme der Meßspannung zur Folge. Die Anstiegszeit, die praktisch nur vom Gleichrichterinnenwiderstand bedingt ist, wird dagegen nicht merklich beeinflußt. Es gilt also einen Kompromiß zwischen unterer Grenzfrequenz und Einstellzeit zu finden.

Die obere Frequenzgrenze wird einerseits durch Resonanzüberhöhung andererseits durch die Elektronenlaufzeit in der Diode bestimmt.
Die Kapazität zwischen Anode und Kathode bildet zusammen mit der Induktivität der Zuleitungen näherungsweise einen Serienresonanzkreis (siehe nebenstehende Abbildung).
C_2 stellt die Eingangskapazität der Röhre dar, L die Summe der Induktivitäten der Zuleitungen zu beiden Polen.
C_1 ist die Kapazität der Eingangsklemmen selbst.
Ausgangs- zu Eingangsspannung verhält sich also wie folgt:



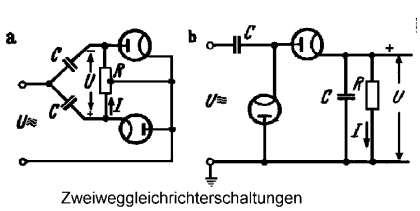
Ersatzbild der Eingangsschaltung für hohe Frequenzen

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{1 - \omega^2 L C_2}$$

Der dadurch verursachte Fehler beträgt näherungsweise $F \approx \omega^2 L C_2$ [illegible]

Bei hohen Frequenzen wird also eine höhere Spannung gemessen als an den Klemmen anliegt.

Um kurze Zuleitungen (und damit geringe Induktivitäten) realisieren zu können, werden Voltmeter für hohe Frequenzen stets mit einem Tastkopf ausgeführt, welcher die Diode bzw. den Gleichrichter enthält. Die Verbindungsleitung zum Meßgerät kann dann beliebig lang sein, da sie nur Gleichstrom führt. Geeignete Dioden müssen möglichst kleine Abmessungen mit kleiner Kapazität und kürzesten Elektrodenzuleitungen vereinigen.
Hierzu tritt noch die Forderung nach kleinem Abstand zwischen Anode und Kathode, denn wenn die Laufzeit der Elektronen in die Größenordnung der Periodendauer der Meßspannung kommt, tritt nicht mehr die volle Richtspannung auf.



Zweiweggleichrichterschaltungen

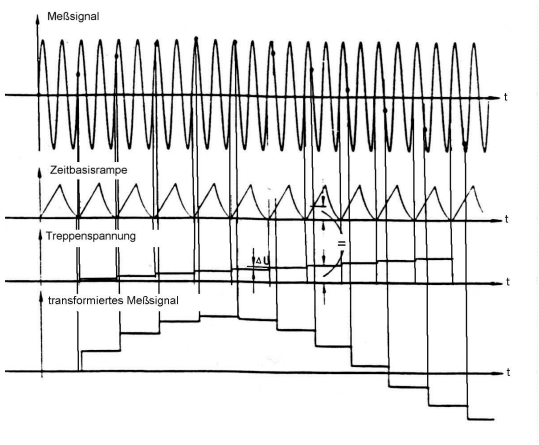
Die Richtspannung U entspricht in beiden Schaltungen dem doppelten Scheitelwert der Wechselspannung.
Die Spannungsverdopplerschaltung b ist besonders für einpolig geerdete Spannungen geeignet, da dann auch die Richtspannung einpolig an Erde liegt. Dabei tritt auf der Gleichstromseite die Meßspannung nicht auf.

In beiden Fällen stört eine der Meßspannung überlagerte Gleichspannung nicht.

Während die Einweggleichrichterschaltungen nur eine der meist sehr verschiedenen Halbwellen erfassen, liefert die Zweiweggleichrichterschaltung die Amplitude von „Spitze zu Spitze“.
Bei Effektivwerteichung ist also mit einem entsprechenden Wert (abhängig von der Kurvenform) zu multiplizieren.

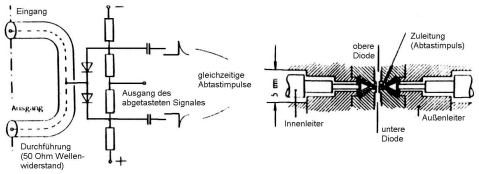
4.3. Samplingoszilloskop

Die wichtigsten Komponenten (Triggereinheit, Zeitablenkung) eines „normalen“ Oszilloskopes sind nicht beliebig breitbandig (derzeit ca 1GHz). Man hat deshalb für den Einsatz im UHF und Mikrowellenbereich ein Verfahren entwickelt, mit dem auch diese Frequenzen gemessen werden können. Vorraussetzung ist ein periodisches Signal mit konstanter Amplitude. Das Originalsignal wird abgetastet, wobei auf das Abtasttheorem keine Rücksicht genommen wird, also z.B. nur eine Abtastung je Periode oder mehreren Perioden durchgeführt wird. Der Abtastzeitpunkt wird gegenüber dem vorigen immer um eine bestimmte Zeit t_i verschoben.
Da das Signal periodisch ist, kann der ursprüngliche Kurvenzug wiedergegeben werden, der Zeitmaßstab wird bei diesem Verfahren also gedehnt.



4.4 Tastköpfe

Im Frequenzbereich über 1GHz ist hochohmiges Messen mit üblichen Tastköpfen (1MΦ, 10pF) nicht zulässig. Um Anpassung zu erreichen bzw. richtig abschließen zu können, müssen daher spezielle Durchführungstastköpfe mit einem Eingangswiderstand von 50Φ verwendet werden.



5) Leistungsmessung

5.1. Allgemeines zur HF-Leistungsmessung

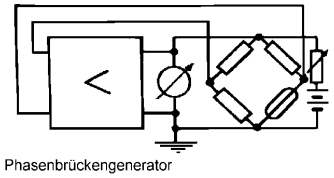
Bei Frequenzen über 1GHz wird meist die Leistungsmessung einer Strom- bzw- Spannungsmessung vorgezogen.
Dabei ist es oft üblich, den Leistungsmesser als Gesamtlast zu verwenden.
Es werden aber auch Leistungsmesser gebaut, die den Leitungsstrom durch eine Rohrleitung oder ein koaxiales Kabel zum Verbraucher messen, selbst aber nur einen Bruchteil der Gesamtleistung benötigen.
Hiezu zweigen die empfindlichen Meßgeräte aus der Leitung einen bestimmten, der Gesamtleistung proportionalen Teil ab.
Zu diesen Geräten gehören das Bolometer und der Thermoumformer.
Weiters ist zwischen mittlerer Leistung und Impulsleistung (Leistung, die nur als Impuls über eine kurze Zeitdauer auftritt) zu unterscheiden. In der Regel zeigen die Meßgeräte aber unmittelbar die mittlere Leistung an.

5.2. Leistungsmessung mit dem Bolometer

Beim Bolometer wird die temperaturabhängige Widerstandsänderung eines sich durch die HF-Leistung erwärmenden Drahtes zur indirekten Messung der Leistung benutzt.

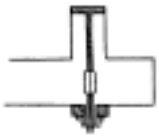
Die Bolometeranordnungen werden wegen ihrer großen Empfindlichkeit vorwiegend zur Messung kleiner Leistungen benützt. Als temperaturabhängige Widerstände verwendet man dafür den Baretter und den Thermistor (Erklärung siehe später unten). Die Empfindlichkeit kann durch Verstärkung wesentlich erhöht werden.

Eine große Empfindlichkeit erhält man ebenfalls, wenn man die Bolometereinrichtung als Zweig eines Phasenbrücken-Rückkopplungsgliedes verwendet.



Der Generator ist so abgeglichen, daß der maximale Ausschlag entsteht, wenn der temperaturabhängige Widerstand keine HF erhält. Durch eintreffende HF wird die Brücke verstimmt und der Rückkopplungsfaktor verringert, das Instrument zeigt einen geringeren Ausschlag. Das Meßgerät ist unmittelbar in ❍W Hochfrequenzleistung geeicht, man erreicht eine Empfindlichkeit von ca 50❍W bei Vollausschlag.

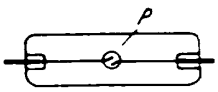
Die Einkopplung der HF kann wie bei der Strommessung (siehe 3.2.6.) durchgeführt werden. Es gibt jedoch auch noch andere Möglichkeiten wie z.B. die Baretter-Anordnung in einem Rechteckrohr.



Die Widerstandsachse verläuft dabei in Richtung des elektrischen Feldes der sich in horizontaler Richtung fortbewegenden Welle

Baretter: Der Baretter ist ein dünner Platindraht der sich in einem Glasgefäß befindet.
Dieses ist, zwecks kleinerer Zeitkonstante zur Abkühlung, nicht evakuiert, obwohl dadurch die Empfindlichkeit steigen würde.
Die Wärmeträgheit des Widerstandes ist so gering, daß die Widerstandsänderung auch einer niederfrequenten Modulation der HF folgen kann.
Der Baretter kann mit Niederfrequenz geeicht werden. Die Widerstandszunahme aufgrund des Skineffektes ist für Frequenzen bis zu 10GHz geringer als 1%.
Zwischen der Widerstandserhöhung und der zugeführten Leistung besteht nahezu ein linearer Zusammenhang: $R-R_0=k*P^n$
R ist der Widerstand bei zugeführter HF-Leistung, R_0 der Widerstand ohne Leistungszufuhr (etwa 100Ω). n liegt zwischen 0.9 und 1.0, k ist eine Konstante von meist einigen Φ/mW.

Thermistor: Der Thermistor ist ein temperaturabhängiger Halbleiter, in der Form einer kleinen Perle. Ein üblicher Widerstandswert ist 10kΩ. Die Anordnung in einer Glaspatrone schützt vor Einfluß von Luftströmungen, das Gefäß ist zur Vermeidung der Wärmeträgheit nicht evakuiert. Die Empfindlichkeit ist etwas größer als die des Baretters, jedoch ist auch die Zeitkonstante größer.



Thermistor
P=Perle aus Halbleiter mit hohem negativen Temperaturkoeffizienten des Widerstandes

5.3. Leistungsmessung mit Thermoelementen

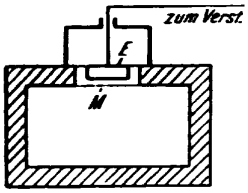
Thermoumformer mit Vakuumthermoelementen zeigen nahezu die gleiche Empfindlichkeit wie das Bolometer. Wegen der größeren Leiterabmessungen lassen sich aber Thermoumformer nur bis etwa 3GHz verwenden, der Kohlefaden-Thermoumformer ist jedoch auch für höhere Frequenzen brauchbar.
Thermoelemente aus Eisen und Konstantan in Form von Vakuumthermoelementen werden hauptsächlich bei geringeren Frequenzen benützt.
Für hohe Frequenzen eignet sich vor allem äußerst dünner Platindraht gegen Platinrhodium, es gibt jedoch auch Thermoelemente mit Widerstandsperlen für sehr hohe Frequenzen bei großer Empfindlichkeit (siehe 3.2.1.).
Die Empfindlichkeit des Thermoumformers liegt bei einigen Hundertstel mV/❍W.

5.4. Elektrostatischer Leistungsflußmesser

Die Rohrwand eines Rechteckrohrleiters ist an einer Stelle durch eine dünne Metallmembran M ersetzt. Ihr gegenüber befindet sich, außerhalb des Rohrleiters, eine feste Elektrode E.
Bei Auftreten hochfrequenter Felder im inneren des Rohrleiters wird die Membran durchgebogen und somit die Kapazität zwischen Membran und Elektrode vermindert.

Diese Kapazitätsänderung ist ein Maß für die Feldstärke im Rohrleiter und somit auch für den Leistungsfluß.
Aus der Überlegung, daß die mechanische Arbeit gleich der elektrischen sein muß folgt bei Differentiation nach s:
$dW_{mech}=F*ds = dW_{el}=0.5*U^2*dC$

$$F = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{ds}$$



F ist die Kraft zwischen den beiden Platten, U die anliegende Spannung, ds der Weg, der unter der Wirkung dieser Kraft zurückgelegt wird und dC die daraus folgende Kapazitäts-Änderung.
Die Kapazität zweier Platten mit der Fläche A, dem Abstand a und der Dielektrizitätskonstante ε ist:

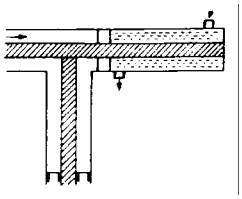
$$C = \frac{\varepsilon A}{4\pi a}$$

Elektrostatischer Leistungsflußmesser
M=Membran, E=Gegenelektrode

Wie man sieht, kann die Kapazitätsänderung durch Verändern der Elektrodenfläche oder, so wie es bei diesem Meßprinzip durchgeführt wird, durch Verändern des Abstandes erfolgen.
Es werden Meßwerke nach beiden Verfahren gebaut.
Die Anordnung ist frequenzunabhängig und hat einen sehr geringen Leistungsbedarf.
Es können noch Leistungen in der Größe von 1mW gemessen werden.

5.5 Messung großer Leistungen mit dem Kalorimeter

Das Kalorimeter stellt gleichzeitig die Gesamtlast dar, welche die Leistung verbraucht und wird daher meist als Abschluß eines Koaxialkabels oder eines Rohrleiters angeordnet.
Wasser eignet sich gut als Kalorimeterflüssigkeit, denn infolge seiner hohen dielektrischen Verluste erwärmt es sich im elektrischen Feld.
Seltener wird eine Mischung aus Öl und Kohlepulver verwendet.
Nebenstehende Abbildung zeigt die Leistungsmessung an einem Koaxialkabel.
Am Ende ist das Kabel von einem Wasserstrom durchflossen, der das Dielektrikum darstellt.



Leistungsmessung an einem koaxialen Kabel mittels Kalorimeter

Ist m die Flüssigkeitsmenge je Sekunde in g/s, c_p die spezifische Wärme in cal/(g*°C) und ΔT die Temperaturerhöhung, so ergibt sich die absorbierte Leistung entsprechend dem elektrischen Wärmeäquivalent zu

$P=4{,}18*m*c_p*\Delta T$ [Watt] 1[cal]= 4.186 [J]

Für kleine Leistungen werden entsprechend kleine Flüssigkeitsmengen benötigt.
Kalorimetrische Meßgeräte lassen sich zur direkten Anzeige ausbauen, indem man in das zufließende und in das abfließende Wasser je ein Widerstandsthermometer einbaut.
Ist die Brücke dann ohne Temperaturdifferenz abgeglichen, so kann der Ausschlag des Nullinstruments direkt zur Anzeige der Temperaturdifferenz und bei konstantem Durchfluß zur Anzeige der Leistung dienen.

5.6. Leistungsmessung mit Glühlampen

Zum Nachweis von HF-Leistung können auch Glühlampen verwendet werden.
Der sehr dünne Wolframdraht befindet sich in einem evakuierten Glaskolben.
Man mißt die Temperaturerhöhung durch den Hochfrequenzstrom mittels Photozelle oder über die Widerstandsänderung in Bolometeranordnung. Eine andere Möglichkeit ist der Helligkeitsvergleich mit einer gleichstromgespeisten Lampe.
Die Empfindlichkeit hängt von der Stärke des Glühfadens ab, erreichbar sind einige hundertstel Watt.
Diese Leistungsmessung wird bis ca. 1kW verwendet.

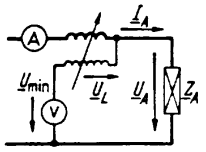
5.7. Leistungsmessung durch Spannungsmessung an einem Widerstand

Sind der ohm'sche Zustand und der Ohmwert bekannt, so kann bei Anpassung die Leistung folgendermaßen aus der Spannung berechnet werden (z.B. wenn eine Antenne mit Hilfe eines Abstimmgerätes, z.B. Stehwellenmeßgerät oder Antennen-Anpaßgerät („Matchbox"), nach Größe und

Phase richtig an eine Antennenspeiseleitung mit dem Wellenwiderstand Z_L angepaßt ist):

$$P = \frac{U^2}{Z_L} = I^2 \cdot Z_L$$

Ist exakte Anpassung nicht gegeben, so kann im Mittelwellengebiet und bei längeren Wellen mit folgender Schaltung eine einfache Leistungsmessung realisiert werden:

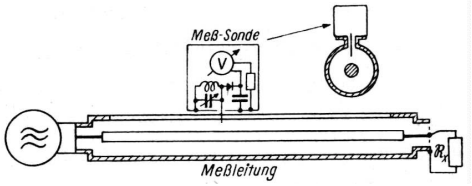


Einfaches Verfahren zur Leistungsmessung bei kleinem Phasenfehler

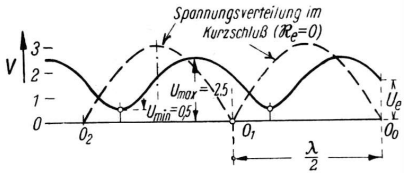
Am Lastwiderstand $\underline{Z}_A$ liegt die Spannung $\underline{U}_A$ und es fließt der Strom $\underline{I}_A$. Zur experimentellen Ermittlung der in Richtung von $\underline{I}_A$ liegenden Komponente von $\underline{U}_A$ ist vor das Voltmeter eine Hilfsspule geschaltet, in welche eine mit variabler Kopplung veränderliche Hilfsspannung $\underline{U}_L$ mit 90° Nacheilung senkrecht auf $\underline{I}_A$ induziert wird.
Bei Variation der Kopplung durchläuft die Anzeige des Voltmeters ein Minimum $|\underline{U}|_{min} = U_{min}$. Die Wirkleistung ergibt sich dann zu:

$$P = I_A \cdot U_A \cdot \cos\varphi = I_A \cdot U_{min}$$

Der Widerstand sollte einen möglichst geringen Skineffekt aufweisen.
Dieses Verfahren führt oft zu großen Meßfehlern, da der Spannungsverlauf bei Dezimeterwellen meist stark von der Sinusform abweicht.
Für Labormessungen im UKW- und Dezimeterwellengebiet eignet sich eine Meßleitung mit verschiebbarem Abtaster.



Man stellt die absolute Größe des Maximums und des Minimums der Spannungsverteilungskurve längs der Leitung fest.



Die Leistung ist dann gleich: $P = \frac{U_{max}^2}{s \cdot Z_L} = \frac{U_{min}^2 \cdot s}{Z_L}$

$s = U_{max}/U_{min}$

Somit ist $P = \sqrt{\frac{U_{max}^2}{s \cdot Z_L} \cdot \frac{s \cdot U_{min}^2}{Z_L}} = \frac{U_{max} \cdot U_{min}}{Z_L}$

Wird die Stromverteilung abgetastet, so gilt: $P = I_{max} \cdot I_{min} \cdot Z_L$

5.8. Leistungsmessung durch Strommessung an einem Widerstand

Hier ergeben sich die gleichen Probleme wie beim vorhergehenden Verfahren, die beide nur wegen ihrer Einfachkeit verwendet werden. Zu beachten sind die bei Dezimeterwellen besonders stark in Erscheinung tretenden Fehler durch Skineffekt und kapazitive Nebenschlüsse. Um diese Fehler zu vermeiden bzw. zu verringern werden diese Meßgeräte so dimensioniert, daß von ihnen die gesamte Leistung aufgenommen und kein Teiler benötigt wird.

6) Literaturverzeichnis

Meinke/Gundlach. „Taschenbuch der Hochfrequenztechnik“, 3.Auflage, Springer Verlag, TU

F.Benz: „Meßtechnik für Funkingenieure“, Springer Verlag, TU

P.M.Pflier: „Elektrische Meßgeräte und Meßverfahren“, 2.Auflage, Springer Verlag, Schulbibliothek