

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 41 (1950)
Heft: 21

Artikel: Ausgangs-Systeme von Messgeneratoren
Autor: Molinari, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058942>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

cuisson de grande puissance, plutôt qu'une solution de celui des pointes de cuisson, ce dernier problème pouvant être mieux résolu par l'emploi de

marmites à vapeur, qui offre non seulement l'avantage de réduire la pointe de charge, mais aussi celui d'améliorer le rendement de la cuisson.

Ausgangs-Systeme von Messgeneratoren

Von H. Molinari, Zürich

621.396.615:621.317.3

Die meisten Messgeneratoren besitzen einen geeichten Abschwächer, an dem die Spannungswerte angegeben sind. Diese Werte sind aber nur für eine bestimmte Belastungsimpedanz gleich der tatsächlich an den Ausgangsklemmen vorhandenen Spannung. Der Verfasser gibt eine Aufstellung der verschiedenen Größen, welche auf die wirkliche Klemmenspannung Einfluss haben, und weist auf eine zuverlässige Methode zur Ermittlung der Spannung an den Ausgangsklemmen mit Hilfe von Impedanzmessungen hin.

Les générateurs de mesure sont généralement équipés d'un affaiblisseur étalonné, sur lequel les valeurs des tensions sont indiquées. Ces valeurs ne correspondent toutefois à la tension effective aux bornes de sortie que dans le cas d'une impédance de charge déterminée. L'auteur indique les diverses grandeurs qui exercent une influence sur la tension aux bornes et signale une méthode qui permet de déterminer avec sûreté la tension aux bornes de sortie, en procédant à des mesures d'impédance.

I. Einführung

Bei Verwendung verschiedener Messgeneratoren in identischen Messanordnungen, z. B. bei Empfindlichkeitsmessungen am gleichen Empfänger, zeigen sich häufig scheinbar von einander abweichende Resultate, welche leicht zu falschen Schlussfolgerungen Anlass geben. Die Ursache dieser ungleichen Messergebnisse liegt, abgesehen von möglichen Konstruktions- und Eichfehlern, in der Verschiedenheit der Generatorausgangssysteme und der entsprechenden Abhängigkeit der Klemmenspannung von der äusseren Belastung. Die folgende Betrachtung bezweckt, die Spannungsverhältnisse an den Ausgangsklemmen eines Messgenerators zu analysieren und ein allgemein gültiges Ersatzschema aufzustellen.

II. Prinzipieller Aufbau eines Messgenerator-Ausgangssystems

Da es schwierig ist, hochfrequente Spannungen unter ca. 100 mV zu messen, befindet sich bei den meisten Laboratoriums-Messgeneratoren zwischen dem Voltmeter und den Ausgangsklemmen ein geeichter Abschwächer, welcher die am Voltmeter gemessene Spannung auf die gewünschten kleinen Werte in bekannten Verhältnissen reduziert. Dieser Abschwächer wird beispielsweise als Ohmscher Kettenleiter oder als HF-Transformator mit variabler Kopplung ausgeführt. Bei Hochfrequenz ist es ferner erwünscht, die Verbindungen zwischen Messgenerator-Ausgang und Belastung so kurz als möglich zu halten, so dass ihr Einfluss auf die Klemmenspannung bedeutungslos wird. Aus diesem Grunde sind Messgeneratoren gewöhnlich mit einem im betrachteten Frequenzbereich dämpfungsfreien Coaxialkabel versehen. Dieses Kabel ist auf der Generatorseite normalerweise durch die innere Impedanz des Generators abgeschlossen, während der Abschluss auf der Kabelausgangsseite einen Impedanzwert zwischen Null und Unendlich besitzen kann. Wie in der Folge gezeigt wird, lässt sich die Klemmenspannung am Kabelausgang besonders einfach für den Fall ermitteln, wo das Kabel mit seinem Wellenwiderstand abgeschlossen ist.

Aus diesem Grunde sind die Kabel meistens mit einem Abschlussglied versehen, dessen Impedanz gleich ihrem Wellenwiderstand ist.

III. Ersatzspannungsquelle

Bekanntlich kann ein Generator vollständig durch eine Ersatzspannungsquelle, bestehend aus Leerlaufspannung U_0 in Serie mit einer inneren Impedanz Z_i , ersetzt werden. Die Leerlaufspannung wird wie die EMK einer Batterie durch die Belastung nicht beeinflusst. Die innere Impedanz des Generators ist gleich dem Quotienten aus Leerlaufspannung und Kurzschlußstrom.

Bei den meisten Messgeneratoren ergibt sich nun die Leerlauf-Klemmenspannung direkt aus dem Produkt der Voltmeter- und Abschwächeranzeige. Die Spannung U_0 im Ersatzschema ist dann gleich diesem Produkt, vorausgesetzt, dass die Spannung am Voltmeter auch bei Belastung an den Generatorklemmen als unveränderte Grösse betrachtet werden kann. Diese Bedingung kann praktisch z. B. durch Spannungsnachregulierung leicht erfüllt werden.

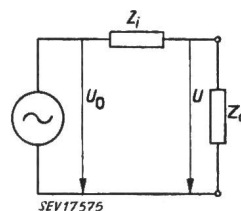


Fig. 1

Ersatzschema eines belasteten Messgenerators

- U Klemmenspannung
- U_0 Leerlaufspannung, die sich aus Voltmeter- und Abschwächer-einstellung ergibt
- Z_a Belastungsimpedanz
- Z_i Innere Impedanz des Messgenerators

den. Es ist also sehr erwünscht, dass der Generator eine gewisse Spannungsreserve besitzt, die das Einstellen des Leerlaufspannungswertes nach Möglichkeit für alle Belastungen zwischen Kurzschluss und Leerlauf erlaubt. Im übrigen gewährleistet der zwischen Voltmeter und Ausgangsklemmen befindliche Abschwächer weitgehend Rückwirkungsfreiheit der Belastung auf die Spannungsanzeige. Das Ersatzschema des diese Bedingung erfüllenden Messgenerators stellt sich somit recht einfach dar (Fig. 1). Die interessierende Klemmenspannung ergibt sich damit zu:

$$U = U_0 \frac{Z_a}{Z_i + Z_a} \quad (1)$$

IV. Ersatzschema des Messgenerators bei Hochfrequenz

Aus schon genannten Gründen wird bei Frequenzen über ca. 5 MHz gewöhnlich zwischen Messgene-

rator und äussere Belastung ein kurzes Coaxialkabel eingeschaltet. Ist dieses auf der Generator- oder Ausgangsseite nicht mit seinem Wellenwiderstand abgeschlossen, so bilden sich längs des Kabels stehende Wellen. Trotzdem lässt sich die interessierende Spannung am Kabelausgang auf zweckmässige Weise mit einer der Gl. (1) analogen Formel ermitteln. Es ist dazu nötig, das allgemeine Ersatzschaltbild des Generators mit angeschlossenem Kabel, Kabelabschlussglied und Belastungsimpedanz

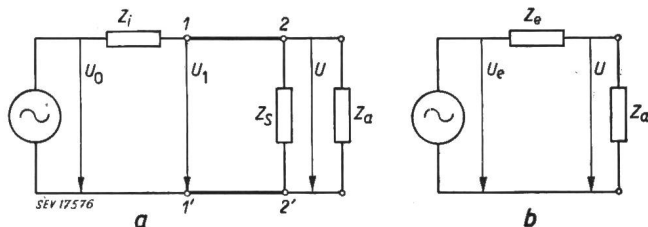


Fig. 2

Schema eines über ein Coaxialkabel belasteten Messgenerators
a Schema b Ersatzschema

U Klemmenspannung am Kabelausgang
 U_e Leerlaufspannung am Kabelausgang = Leerlaufspannung des Ersatzschemas
 U_1 Spannung am Kabeleingang
 Z_a Belastungsimpedanz
 Z_e Innere Impedanz des Generators im Ersatzschema
 Z_s Impedanz des Kabelabschlussgliedes

in ein elektrisch identisches Ersatzschema überzuführen (Fig. 2). Die Spannung am Kabelausgang ist dann

$$U = U_e \frac{Z_a}{Z_e + Z_a} \quad (2)$$

wobei hier im Gegensatz zu Gl. (1) U_e und Z_e als Folge einer Fehlanpassung des Kabels frequenzabhängige Grössen sein können. Sämtliche Ausgangssysteme von Messgeneratoren lassen sich in einen der fünf in der Folge behandelten Fälle einreihen, welche sich aus den möglichen Kombinationen des Kabelabschlusses ergeben.

V. Ermittlung der Grössen des Ersatzschemas für die fünf verschiedenen Messgenerator-Ausgangssysteme

Die gesuchten Grössen U_e und Z_e des Ersatzschemas gemäss Fig. 2b lassen sich einfach ableiten, indem die aus der Theorie der Übertragungsleitung bekannten Formeln ¹⁾ auf das ursprüngliche Ersatzschema (Fig. 2a) angewendet werden.

Ganz allgemein gilt für die Spannung an einer willkürlichen Stelle l eines Kabels, an dessen Eingang eine Spannungsquelle angeschlossen ist:

$$U_l = U_1 \frac{e^{j\alpha l} + r e^{-j\alpha l}}{e^{j\alpha s} + r e^{-j\alpha s}} \quad (3)$$

Darin bedeuten:

U_1 Spannung am Kabeleingang

r Reflexionsfaktor = $\frac{Z_s - Z_w}{Z_s + Z_w}$

Z_s Abschlussimpedanz des Kabels

Z_w Wellenimpedanz des Kabels

s totale Kabellänge

¹⁾ Marchand, N.: Ultrahigh Frequency Transmission and Radiation. New York, Wiley; London, Chapman & Hall, 1947.

l Distanz zwischen Kabelende und der betreffenden Stelle

Ist die Eingangsimpedanz des Kabels zwischen den Punkten 1 und 1' in Fig. 2a gleich W , dann folgt daraus:

$$U_1 = U_0 \frac{W}{Z_i + W} \quad (4)$$

und die Leerlaufspannung am Kabelausgang U_e ergibt sich nach Einsetzen von $l = 0$ und Gl. (4) in (3) zu:

$$U_e = U_0 \frac{W}{Z_i + W} \cdot \frac{1 + r}{e^{j\alpha s} + r e^{-j\alpha s}} \quad (5)$$

Die Eingangsimpedanz W in obiger Gleichung bezieht sich auf den Leerlauf, also auf das Kabel mit offenen Ausgangsklemmen. Gehört zum Kabel eventuell ein fest mit ihm verbundenes Abschlussglied mit der Impedanz Z_s , dann gilt für den vorliegenden Leerlauf nach der Kabeltheorie:

$$W = Z_w \frac{Z_s (e^{j\alpha s} - e^{-j\alpha s}) + Z_s (e^{j\alpha s} + e^{-j\alpha s})}{Z_w (e^{j\alpha s} + e^{-j\alpha s}) + Z_s (e^{j\alpha s} - e^{-j\alpha s})} \quad (6)$$

oder in trigonometrischer Schreibweise

$$W = \frac{Z_w Z_s \cos \alpha s + j Z_w^2 \sin \alpha s}{Z_w \cos \alpha s + j Z_s \sin \alpha s} \quad (7)$$

Wird dieser Ausdruck in Gl. (5) eingesetzt, dann folgt

$$U_e = U_0 \frac{Z_s Z_w}{Z_w (Z_i + Z_s) \cos \alpha s + j (Z_i Z_s + Z_w^2) \sin \alpha s} \quad (8)$$

Die innere Impedanz Z_e des Ersatzschemas ist definitionsgemäss gleich dem Quotienten aus Leerlaufspannung und Kurzschlußstrom oder was äqui-

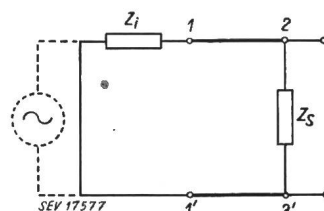


Fig. 3

Schema zur Ermittlung der inneren Impedanz des Generators

valent ist, gleich der Impedanz, welche bei überbrückter Leerlaufspannung an den offenen Ausgangsklemmen erscheint. Mit Fig. 3 wird somit:

$$\frac{1}{Z_e} = \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_s} \quad (9)$$

Z_2 ist hierbei gleich der Impedanz zwischen den Punkten 2 und 2' bei nicht-vorhandenem Z_s . Mit Hilfe der bekannten Kabelgleichungen ergibt sich:

$$Z_2 = Z_w \frac{e^{j\alpha s} + r e^{-j\alpha s}}{e^{j\alpha s} - r e^{-j\alpha s}} \quad (10)$$

Nach trigonometrischer Umformung und Einsetzen des Reflexionsfaktors für das generatorseitige Kabelende $r = \frac{Z_i - Z_w}{Z_i + Z_w}$ ergibt sich schliesslich:

$$\frac{1}{Z_e} = \frac{1}{Z_W} \cdot \frac{Z_W + j Z_i \operatorname{tg} \alpha s}{Z_i + j Z_W \operatorname{tg} \alpha s} + \frac{1}{Z_S} \quad (11)$$

1. Das beidseitig fehlangepasste Kabel

Unter Berücksichtigung der Beziehung zwischen Phase und Wellenlänge $\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}$ ergeben sich aus Gl. (8) und (11) die Ersatzgrößen für ein beidseitig fehlangepasstes Kabel zu:

$$U_e = U_0 \frac{Z_S Z_W}{Z_W(Z_i + Z_S) \cos \frac{2\pi s}{\lambda} + j(Z_i Z_S + Z_W^2) \sin \frac{2\pi s}{\lambda}} \quad (12)$$

$$\frac{1}{Z_e} = \frac{1}{Z_W} \cdot \frac{Z_W + j Z_i \operatorname{tg} \frac{2\pi s}{\lambda}}{Z_i + j Z_W \operatorname{tg} \frac{2\pi s}{\lambda}} + \frac{1}{Z_S} \quad (13)$$

2. Das beidseitig angepasste Kabel

Für ein beidseitig angepasstes Kabel ist $Z_S = Z_W = Z_i$ und Gl. (12) vereinfacht sich dann zu

$$U_e = \frac{U_0}{2} \cdot \frac{1}{\cos \frac{2\pi s}{\lambda} + j \sin \frac{2\pi s}{\lambda}} \quad (14)$$

oder in anderer Schreibweise

$$U_e = \frac{U_0}{2} e^{-j \frac{2\pi s}{\lambda}} \quad (15)$$

Hierin ist $\frac{U_0}{2}$ die Amplitude, während die e-Funktion die Phasendrehung angibt. Ebenfalls wird Z_e durch Einsetzen in Gl. (13) denkbar einfach:

$$Z_e = \frac{Z_W}{2} \quad (16)$$

Die Größen des äquivalenten Ersatzschemas sind folglich bei Anpassung des Kabels durch seinen Wellenwiderstand frequenzunabhängig. Damit ist auch die Klemmenspannung U , welche sich aus Gl. (2) ermitteln lässt, bei irgendeiner willkürlichen Belastung frequenzunabhängig.

3. Das auf der Generatorseite angepasste Kabel bei offenen Ausgangsklemmen

Ist der Generator an das Kabel angepasst, während der Kabelausgang offen ist, so wird $Z_i = Z_W$ und $Z_S = \infty$. Damit folgt aus den Gl. (12) und (13):

$$U_e = U_0 e^{-j \frac{2\pi s}{\lambda}} \quad (17)$$

$$Z_e = Z_W \quad (18)$$

Auch in diesem Fall sind U_e und Z_e frequenzunabhängige Größen, weshalb auch dieses Ausgangssystem bei einigen handelsüblichen Messgeneratoren zu finden ist.

4. Das auf der Ausgangsseite angepasste Kabel bei Fehlanpassung auf der Generatorseite

Bei Anpassung auf der Ausgangsseite und Fehlanpassung am Generator wird $Z_S = Z_W$. Es ergibt sich damit:

$$U_e = U_0 \frac{Z_W}{Z_W + Z_i} e^{-j \frac{2\pi s}{\lambda}} \quad (19)$$

$$Z_e = \frac{Z_W \left(Z_i + j Z_W \operatorname{tg} \frac{2\pi s}{\lambda} \right)}{(Z_W + Z_i) \left(1 + j \operatorname{tg} \frac{2\pi s}{\lambda} \right)} \quad (20)$$

Während hier die Leerlaufspannung frequenzunabhängig ist, zeigt die Impedanz Z_e ein von der Frequenz abhängiges Verhalten. Um dies zu veranschaulichen, wird Z_e in die Ohmsche und reaktive Komponente zerlegt, wodurch die Frequenzabhängigkeit zum Ausdruck kommt.

Wird die Gl. (20) zerlegt, dann ergibt sich für die rein Ohmsche Komponente der Impedanz

$$R_e = \frac{Z_W \left(\frac{Z_i}{Z_W} \cos^2 \frac{2\pi s}{\lambda} + \sin^2 \frac{2\pi s}{\lambda} \right)}{1 + \frac{Z_i}{Z_W}} \quad (21)$$

und für die reaktive Komponente

$$X_e = \frac{Z_W}{2} \cdot \frac{\left(1 - \frac{Z_i}{Z_W} \right)}{\left(1 + \frac{Z_i}{Z_W} \right)} \sin \frac{4\pi s}{\lambda} \quad (22)$$

Mit Hilfe der Beziehung $\lambda = \frac{1}{f \sqrt{LC}}$ zwischen elektrischer Wellenlänge und Frequenz ergibt sich der in Fig. 4 dargestellte harmonische Verlauf für R_e und X_e für den Fall einer Unteranpassung ($Z_S < Z_W$) von 50%.

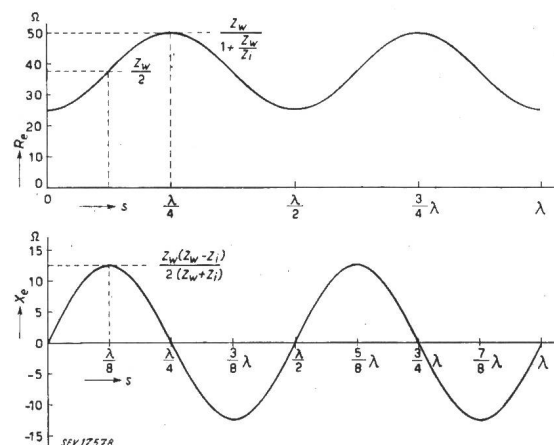


Fig. 4

Unteranpassung von 50 % auf der Generatorseite bei angepasstem Ausgang

$$Z_W = 75 \, \Omega; Z_i = 37,5 \, \Omega$$

Oben: Verlauf der Ohmschen Komponente von Z_e in Funktion der Kabellänge

Unten: Verlauf der reaktiven Komponente von Z_e in Funktion der Kabellänge

Positives X_e ist induktiv, negatives kapazitiv

5. Das auf der Generatorseite fehlangepasste Kabel bei offenen Ausgangsklemmen

In diesem Falle ist $Z_S = \infty$. In den Gl. (12) und (13) eingesetzt, ergibt sich

$$U_e = U_0 \frac{Z_W}{Z_W \cos \frac{2\pi s}{\lambda} + j Z_i \sin \frac{2\pi s}{\lambda}} \quad (23)$$

und somit die Amplitude

$$|U_e| = \frac{U_0}{\sqrt{\cos^2 \frac{2\pi s}{\lambda} + \left(\frac{Z_i}{Z_W}\right)^2 \sin^2 \frac{2\pi s}{\lambda}}} \quad (24)$$

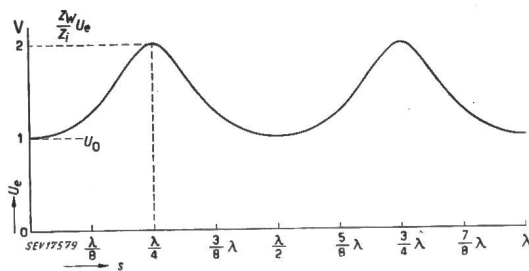


Fig. 5

Fehl Anpassung auf der Generatorseite bei offenem Ausgang
Verlauf der Leerlaufspannung des Ersatzschemas U_e in Funktion der Kabellänge
 $Z_W = 2 Z_i$

In Fig. 5 ist der Verlauf von U_e in Funktion der Kabellänge dargestellt.

Die innere Impedanz ist auch in diesem Falle komplex. Die Zerlegung in Real- und Imaginärkomponente führt auf

$$R_e = \frac{Z_i}{\cos^2 \frac{2\pi s}{\lambda} + \left(\frac{Z_i}{Z_W}\right)^2 \sin^2 \frac{2\pi s}{\lambda}} \quad (25)$$

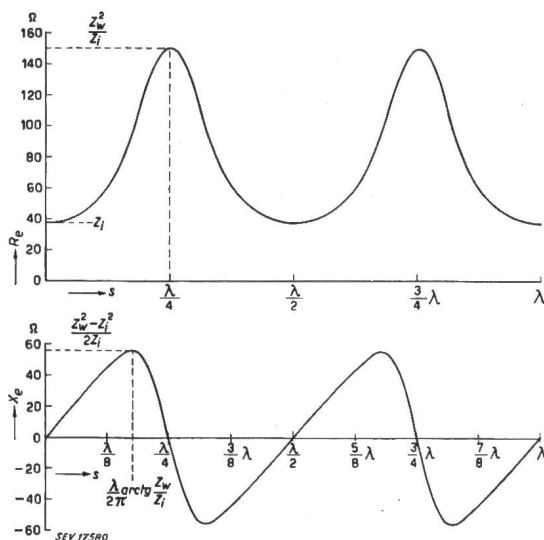


Fig. 6

Fehl Anpassung auf der Generatorseite bei offenem Ausgang
 $Z_W = 75 \Omega$; $Z_i = 37,5 \Omega$

Oben: Verlauf der Ohmschen Komponente von Z_e in Funktion der Kabellänge

Unten: Verlauf der reaktiven Komponente von Z_e in Funktion der Kabellänge

Positives X_e ist induktiv, negatives kapazitiv

und

$$X_e = \frac{Z_W (Z_W^2 - Z_i^2) \operatorname{tg} \frac{2\pi s}{\lambda}}{Z_W^2 + Z_i^2 \operatorname{tg}^2 \frac{2\pi s}{\lambda}} \quad (26)$$

In Fig. 6 ist der Funktionsverlauf von R_e abermals für den Fall einer Untereinpassung von 50% illustriert. Wie ersichtlich ist, treten Maxima auf, wenn $s = n \frac{\lambda}{4}$ (für $n = 1, 3, 5, \dots$) ist.

Ein gegensätzliches Verhalten weist die Reaktanz X_e auf. Ihre Maxima verschieben sich mit dem Verhältnis $\frac{Z_W}{Z_i}$ der Fehlanpassung. In Fig. 6 sind R_e und X_e wieder für das Beispiel $Z_W = 75 \Omega$ und $Z_i = 37,5 \Omega$ dargestellt.

VI. Schlussbetrachtung

Die Ermittlung der Klemmenspannung U nach Gl. (2) an einer gewissen Belastung setzt also die Kenntnis der Belastungsimpedanz Z_a , der Kabelgrößen, der Leerlaufspannung und der Innenimpedanz des Messgenerators voraus. Es ist offensichtlich, dass für die Wahl eines Ausgangssystems nur Fall 2 oder 3, also das beidseitig angepasste und das generatorseitig angepasste Kabel von praktischem Interesse sind. Nur in diesen Anordnungen sind nämlich die Größen U_e und Z_e des Ersatzschemas frequenzunabhängig, vorausgesetzt natürlich, dass die Kabelanpassung im betrachteten Frequenzbereich des Messgenerators erfüllt ist. Durch geeignete Massnahmen, wie z. B. zweckmässige Abschirmung und Kompensation innerhalb des Abschwächers und des Abschlussgliedes, sollte diese Anpassung bei einem guten Messgenerator bis mindestens 20 MHz nahezu ideal eingehalten werden können. Selbst für wesentlich höhere Frequenzen wird dann die Abweichung vom Wellenwiderstand gering und in den meisten Anwendungsfällen für die Ermittlung der Klemmenspannung vernachlässigbar sein. Ist jedoch eine möglichst genaue Kenntnis der Klemmenspannung erwünscht, dann empfiehlt es sich, die Impedanzen, welche für die Spannungsermittlung nach einem der vorher geschilderten Fälle benötigt werden, im interessierenden Frequenzbereich mit Hilfe einer Hochfrequenzmessbrücke zu ermitteln.

Neben dieser indirekten Methode kann grundsätzlich die Klemmenspannung mit einem Feldstärkemessgerät oder, allgemeiner, mit einem abgestimmten Röhrenvoltmeter direkt gemessen werden. Abgesehen vom beträchtlich grösseren Aufwand an Messapparatur stellen sich hierbei unter Umständen viel grössere Schwierigkeiten ein, die ein Vorgehen nach dieser Methode illusorisch machen.

Adresse des Autors:

Harald Molinari, Dipl. El. Ing. ETH, Seyffer & Co. A.-G., Kanzleistrasse 126, Zürich 4.