

## So transformiert die Viertelwellenleitung

Mit HF-Leitungen kann man bekanntlich Impedanzen transformieren und somit Antennen anpassen. So transformiert beispielsweise eine 50-Ohm-Viertelwellenleitung eine Impedanz von 25 Ohm auf 100 Ohm. Doch wie macht sie das?



Vollkommen anders als ein gewickelter Trafo, nämlich durch Reflexion und Phasendrehung.

### Gewickelter Trafo und Transformationsleitung

Ein gewickelter Trafo ist ein konzentriertes Bauteil und lässt sich sehr kompakt ausführen. Primär- und Sekundärkreis sind immer rein elektrische Stromkreise. Die transformierte Impedanz steht sofort an der Sekundärwicklung zur Verfügung. Je nach Kernmaterial ist ein solcher Trafo mehr oder weniger breitbandig. Zur Erklärung der Funktion genügt die Elektrotechnik.

Der gewickelte Trafo ist kein Vorbild für die Transformationsleitung, denn diese beruht auf einer elektromagnetischen Welle, welche reflektiert wird, sodass die transformierte Impedanz nicht sofort zur Verfügung steht. Dieser Transformator funktioniert im Prinzip nur für eine Frequenz und ist praktisch schmalbandig. Zur Erklärung seiner Funktion reicht die Elektrotechnik nicht aus, sondern es ist in erster Linie die Elektrodynamik nach Maxwell und Hertz zu bemühen.

Um seine Arbeitsweise transparent zu machen, wurde eine grafische Methode entwickelt, Lattice Diagram (Lattendiagramm), Bounce Diagram (Abpralldiagramm) oder „Wellenfahplan“ genannt. Googelt man danach, findet man viele Beispiele, allerdings oft nur für eine Flanke oder für einen Impuls geltend. Doch das Lattice-Diagramm ist ein universelles Hilfsmittel und funktioniert mit allen Signalformen.

### Das Lattice-Diagramm: Fahrplan für die Welle

Es geht von der Tatsache aus, dass mit Anschluss der Leitung an die Quelle eine nur von deren Innenwiderstand und dem Wellenwiderstand bestimmte Eingangsspannung an der Leitung liegt. Diese errechnet sich nach der Spannungsteilerregel. Mit anderen Worten: Die Quelle sieht stets den Wellenwiderstand. Die Eingangsspannung einer HF-Leitung ist also in allen möglichen Betriebsfällen der Leitung von Anfang an konstant. Alle nur denkbaren Variationen sind möglich: Veränderung der Frequenz, Veränderung der Leitungslänge, Kurzschluss der Leitung, Leerlauf der Leitung, beliebige Belastung der Leitung, etwa mit einem Blind-

widerstand oder einer komplexen Impedanz – niemals wird sich die Vorlaufanzweige eines Richtkopplers deswegen ändern (abgesehen von kleinen Schwankungen infolge mehr oder weniger starker Reflexionen wegen der endlichen Isolation des Kopplers). Alle dem Autor bekannten Richtkoppler (Aufmacherbild) zeigen sogar unabhängig von der Belastung immer vollen Vorlauf an. Das entspricht bei Abschluss mit einer zur Impedanz des Kopplers passenden Leitung auch den Tatsachen.

### Was das alles lehrt

Bereits an dieser Stelle kann man mehrere wichtige Schlussfolgerungen ziehen:

1. Alle denkbaren Betriebsfälle einer HF-Leitung haben eine Gemeinsamkeit: Der Generator sieht stets und ständig den Wellenwiderstand der Leitung.
2. Die Eingangsspannung der Leitung und somit die Leistung in die Leitung ist von Beginn an bis zum Abschalten des Generators konstant.
3. Die Eingangsspannung lässt sich leicht über die Spannungsteilerregel errechnen:  $U_e = Z_w / (R_i + Z_w)$ .
4. Die Eingangsleistung lässt sich leicht über die Formel  $P_e = U_e^2 / Z_w$  errechnen.
5. Wenn auch in eine offene oder kurzgeschlossene Leitung eine konstante Leistung fließt, so muss diese nach Reflexion wieder in den Generator zurückkehren, denn einen anderen Weg gibt es nicht. Andernfalls würde sich die Leitung mehr und mehr „aufblähen“ und schließlich infolge zu hoher Spannung kaputtgehen.
6. Eine HF-Leitung ist kein elektrotechnischer Stromkreis,

sondern ein Übertragungssystem auf Basis einer elektromagnetischen Welle. Diese Welle verkörpert die zu übertragende Leistung. Die Elektrotechnik kennt keine elektromagnetische Welle.

### So transformiert die „Viertelwelle“

Nun sind wir bestens vorbereitet, um eine Viertelwellenleitung zu berechnen und zu verstehen. Sie soll von 25 auf 100 Ohm transformieren. Aus Bild 1 können wir entnehmen, wie das passiert. Neben der Eingangsspannung von 1,333 V sind noch die Reflexionsfaktoren  $r$  an beiden Seiten der Leitung zu berechnen:

$$r = (\text{Außenwiderstand} - Z_w) / (\text{Außenwiderstand} + Z_w)$$

Multipliziert man die Spannung der ankommenden Welle mit dem Reflexionsfaktor, so erhält man die Spannung des reflektierten Anteils. Ein Reflexionsfaktor kann nur im Bereich -1 bis 1 liegen. -1 bedeutet eine Phaseninversion (180°).

Und schon können wir mit dem Taschenrechner loslegen und fortlaufend die errechneten Spannungen mit den Reflexionsfaktoren multiplizieren, bis die Spannung vernachlässigbar klein geworden ist (Abbruch). Wir sehen, dass das Einschwingen der Leitung rein theoretisch unendlich lange dauert.

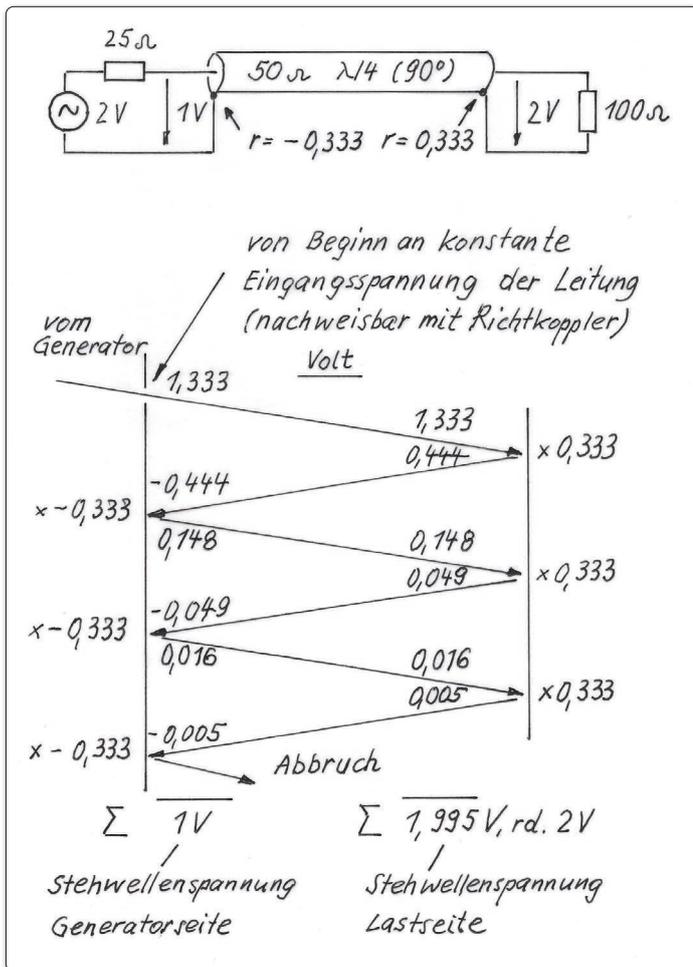
Bild 2 bringt gewissermaßen die Rückwärtsrechnung. Es gibt zu Bild 1 aber einen Unterschied: Da der Innenwiderstand der Quelle vervierfacht wurde, hat sich die Leistung geviertelt. Für Bild 1 beträgt sie

$$(2 \text{ V} - 1 \text{ V})^2 / 25 \text{ Ohm} = (2 \text{ V})^2 / 100 \text{ Ohm} = 0,04 \text{ W}$$

und für Bild 2

$$(2 \text{ V} - 1 \text{ V})^2 / 100 \text{ Ohm} = (0,5 \text{ V})^2 / 25 \text{ Ohm} = 0,01 \text{ W}$$

FS



**Bild 1: Wellenfahrtplan für die Transformation von 25 auf 100 Ohm**

Doch warum haben die Werte beim Hinlauf (von links nach rechts) gleiche Vorzeichen, während die Werte beim Rücklauf (von rechts nach links) negiert werden? Ganz einfach: Mit dieser Negation wird der Phasendrehung durch die Leitung Rechnung getragen. Auch sie beträgt hier  $180^\circ$  ( $90^\circ$  auf der Hin-Strecke und  $90^\circ$  auf der Rück-Strecke).

### Nur damit wir uns richtig verstehen...

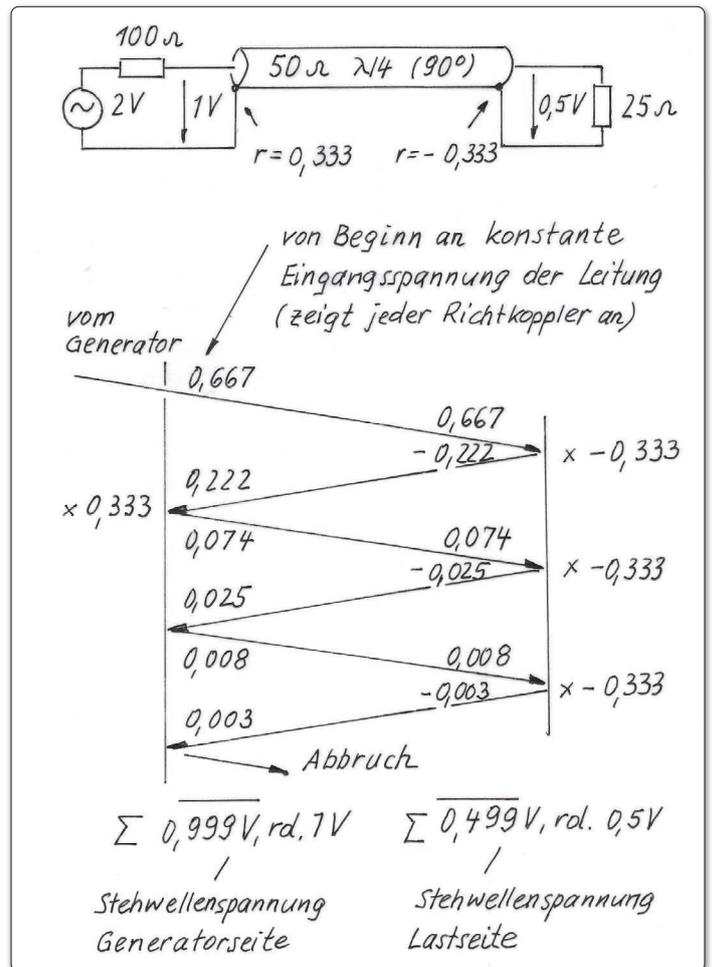
Lt. Leitungstheorie lässt sich für jede Leitung eine transformierte Impedanz ausrechnen, auch als Eingangsimpedanz der Leitung bezeichnet. In unseren beiden Fällen ist die Sache klar. Denn allgemein ist bekannt, dass die Viertelwellenleitung so transformiert, dass das Verhältnis der Außenwiderstände zum Wellenwiderstand auf beiden Seiten gleich ist:

$100 \text{ Ohm} / 50 \text{ Ohm} = 2$  und  $50 \text{ Ohm} / 25 \text{ Ohm} = 2$ .

Wir wissen, dass der Generator diese Impedanz nicht sieht. Ist dieser Rechenwert darum nutzlos? Keineswegs. Er hat sogar doppelten Nutzen:

Erstens ist diese Impedanz, falls ohmsch, identisch mit der erforderlichen Impedanz des Generators für Leistungsanpassung. Unsere Systeme mit 100 (25) Ohm Last fordern also Generator-Innenwiderstände von 25 (100) Ohm und die haben sie auch. Zweitens kann man mit ihm den Generatorkreis berechnen. So gilt für den dortigen Strom:  $U_{\text{rs}} / (Z_{\text{innen}} + Z_{\text{transformiert}})$  Für Bild 1 also:

$2 \text{ V} / (25 \text{ Ohm} + 25 \text{ Ohm}) = 0,04 \text{ A}$ , Leistung pro Widerstand also  $(0,04 \text{ A})^2 \times 25 \text{ Ohm} = 0,04 \text{ W}$ . Kommt bekannt vor, oder? Auf gleiche Weise errechnen sich für



**Bild 2: Wellenfahrtplan für die Transformation von 100 auf 25 Ohm**

Bild 2 die ebenfalls bekannten 0,01 W.

### Noch ein paar Infos

Die Transformationswirkung wird im Grunde nicht durch die Länge der Leitung erzielt, sondern durch die Phasendrehung. Die Länge der Leitung ist nur ein Ausdruck der für eine bestimmte Transformationsaufgabe benötigten Phasendrehung. Eine 50-Ohm-Leitung, die  $90^\circ$  dreht, transformiert z.B. 10 (20, 25) Ohm auf 250 (125, 100) Ohm nach der bekannten Formel für die Viertelwellenleitung, weil es wegen den erforderlichen  $90^\circ$  Phasendrehung nun einmal eine Viertelwellenleitung sein muss.

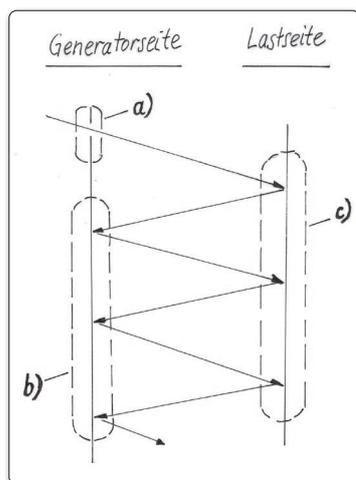
Ein elektrisch sehr kurzes Stück Leitung bringt keine nennenswerte Phasendrehung zustande. Daher kann es auch keine nennenswerte Transformationswirkung entfalten. Es transformiert

praktisch 1:1 wie die Halbwellenleitung, welche hin und zurück um  $360^\circ$  bzw.  $0^\circ$  dreht. Stoßstellen mit elektrisch kurzen Leitungen (Stecker, Buchsen, Flickstellen) sind daher eher harmlos und verursachen keinen nennenswerten Signalverlust.

Bei einem billigen Kabel wie RG-58 entsprechen sich Phasendrehung und Leitungslänge nicht so präzise wie bei einem hochwertigen Kabel. Das ist der erste Grund, weshalb man für eine gute Transformationsleitung ein solches wählen sollte. Der zweite Grund ist die geringere Dämpfung des hochwertigen Kabels.

### Spannungen sortieren

Am Richtkoppler führt bei der experimentellen Aufdeckung der Funktion einer Transformationsleitung kein Weg vorbei. Warum? Dazu betrachten wir



**Bild 3: Am Wellenfahrtplan lassen sich stets drei Spannungsarten definieren, s. Text**

Bild 3. Es ist allgemeingültig und schlüsselt drei Spannungen auf:

- a) die Eingangsspannung der Leitung
- b) die Summe der von der Lastseite ankommenden und reflektierten Spannungen an der Generatorseite

Durch Addition von a) und b) erhalten wir die Stehwellenspannung an der Generatorseite. Diese setzt sich aus der Eingangsspannung (a) und einer Summen-Ausgangsspannung (b) zusammen. Die Generatorseite der Leitung ist also Eingang und Ausgang zugleich.

Der Wellenfahrtplan zeigt: Die Spannung an der Generatorseite der Leitung entspricht nicht mehr der Eingangsspannung der Leitung, sobald Reflexionen auftreten, sondern der Stehwellenspannung. Hier sind praktisch Werte zwischen nahe null und nahe der Leerlaufspannung des Generators (z.B. 2 V) möglich.

- c) die Summe der von der Generatorseite ankommenden und reflektierten Spannungen an der Lastseite

Das ist die Stehwellenspannung an der Lastseite.

Da beim Auftreten von Reflexionen die Generatorseite einen Eingang und einen Ausgang zugleich darstellt, ist es sinnvoll, nicht mehr von einem Eingang und einem Ausgang der Leitung

zu sprechen, sondern eben von Generator- und Lastseite.

An dieser Stelle wird nun auch der Unterschied zwischen gewickeltem Transformator und Leitungstransformator deutlich, was die Spannungen und den Strom im Generatorkreis betrifft: Beim gewickelten Trafo gibt es nur eine Spannung bzw. einen Strom aus dem Generator am Trafo. Beim Leitungstransformator gibt es jedoch zwei Spannungen bzw. zwei Ströme: die Eingangsspannung/den Eingangsstrom direkt aus dem Generator und die Spannung/den Strom der reflektierten Welle.

## Quellen

[1] Frank Sichla: Kabel & Co. in der Funkpraxis, VTH Baden-Baden, 2. Auflage 2004

[2] Frank Sichla: HF-Leitungen verstehen und nutzen, DARC-Verlag Baunatal, 2012

[3] Ludwig Niebel: Leserbrief in CQ DL 5/23, S. 89: „Nicht haltbar bei etwas Nachdenken ist die Einordnung von U und I mal als primäre und mal als sekundäre Größen...“ (Hätte er nur etwas nachgedacht... FS)

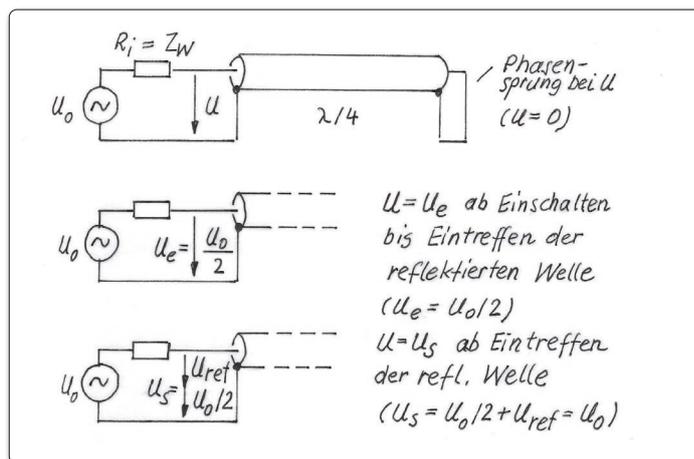
[4] [8] Rudolf Kalocsay: Vortrags-Ankündigung in CQ DL 4/2023, Geheimnisvolle Totalreflexion, S. 11: „Dabei findet bei den Vektoren der Spannung und des Stroms ... ein Phasensprung um  $-180^\circ$  statt.“

[5] Luitjens Popken, Senior Member, IEEE: Das hartnäckige Mysterium der „Totalreflexion“ auf HF-Leitungen, Mai 2021, [http://totalreflexion.net/PDF%20Files/Totalreflexion\\_i1r2.pdf](http://totalreflexion.net/PDF%20Files/Totalreflexion_i1r2.pdf) (stimmig, aber viel zu aufwendig, FS)

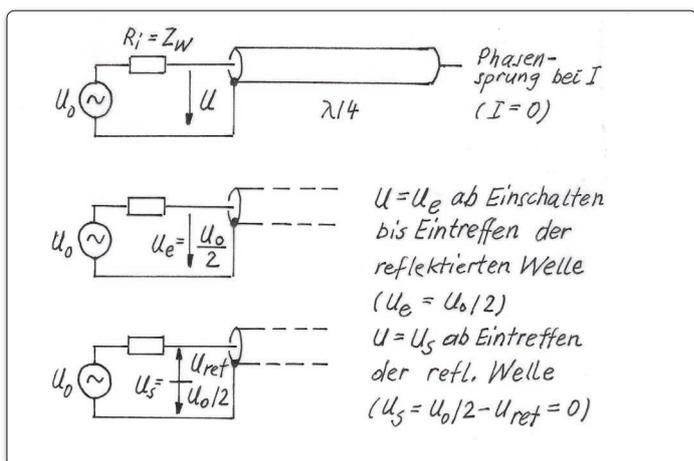
[6] Frank Sichla: Einfache Experimente mit einer HF-Leitung, CQ DL 9/2023, S. 22ff

[7] Thomas Schiller: Wo bleibt die rücklaufende Leistung? FUNKAMATEUR 2/2022, S. 132ff und 3/2023, S. 214ff

[8] Ludwig Niebel: Leserbrief in CQ DL 5/23, S. 89: „Wenn dem so wäre, dürften wir bei einem Speisekabel mit zum Senderausgang passenden Wellenwiderstand nie eine Fehlanpas-



**Bild 4: Kurzgeschlossene verlustfreie Viertelwellenleitung am Generator. Amateure halten die Spannung U für die Leerlaufspannung des Generators. Es gibt aber keinen Leerlauf. In Wirklichkeit besteht U aus zwei phasengleichen Teilspannungen. Amateure halten den Generatorkreis für stromfrei. In Wirklichkeit fließen hier die zu den Teilspannungen gehörenden betragsgleichen, aber um  $180^\circ$  phasenversetzten Ströme, sodass der Gesamtstrom jederzeit null ist. Alle reflektierte Leistung geht in die Urspannungsquelle zurück, sodass deren Leistungsbilanz null ist**



**Bild 5: Offene verlustlose Viertelwellenleitung am Generator. Amateure halten den Generator für kurzgeschlossen. Es gibt aber keinen Kurzschluss. In Wirklichkeit existieren am Generator zwei betragsgleiche um  $180^\circ$  phasenversetzte Teilspannungen, sodass die Gesamtspannung jederzeit null ist. Amateure meinen, im Generatorkreis flösse der Kurzschlussstrom. In Wirklichkeit fließen dort aber die zu den Teilspannungen gehörenden betrags- und phasengleichen Ströme. Alle reflektierte Leistung wird im Innenwiderstand in Wärme umgesetzt**

sung haben, egal was am anderen Ende angeschlossen wäre.“(eine Scheinlogik, wie im Beitrag ausführlich gezeigt, FS)

[9] Rudolf Kalocsay: Vortrags-Ankündigung in CQ DL 4/2023, S. 11: „Wenn die rücklaufenden Wellen der Spannung und des Stromes am Leitungsanfang angekommen sind, sieht der Generator den Wert der transformierten Last und liefert nur noch so viel Energie, wie in der Last verbraucht wird.“(Funktionelle Gleichsetzung des gewickelten

Trafos mit dem Leitungstransformator, FS)

[10] Thomas Schiller: Leserbrief zu den experimentellen Ergebnissen in [6], CQ DL 10/2023, S. 89: „Aus dem Text von Frank Sichla kann man ersehen, dass er die Thermodynamik nicht verstanden hat. ... Was er schreibt, sind noch nicht einmal Thesen.“ (Einen Scan der Nicht-mal-Thesen schicke ich Interessenten gern zu, [frank.sichla@gmx.de](mailto:frank.sichla@gmx.de))

## HF-Leitungen: Was Amateure nicht verstehen

Der Autor, selbst Funkamateur, hat in den letzten zwei Jahrzehnten mit Zeitschriftenbeiträgen und zwei Büchern [1, 2] versucht, Amateuren die klassische Leitungstheorie nach Maxwell und Herz nahezubringen. Dazu sah er das Lattice-Diagramm als ideales Hilfsmittel an, da es im Gegensatz zur Wellengleichung einfach anzuwenden ist und einen uneingeschränkten Blick auf die Vorgänge auf der Leitung gestattet. Zudem hat er Wichtiges in Experimenten bestätigt und mithilfe eines USB-Scopes dokumentiert. Dennoch sieht er sich heute als gescheitert. Hier versucht er, diesen Misserfolg anhand der typischen Irritationen seiner Kritiker zu erklären. Die folgenden Ausführungen sind also subjektiv und stellenweise etwas polemisch.

Was Amateure typischerweise über HF-Leitungen wissen, ist:

- Diese Leitungen haben im Gegensatz zu anderen Leitungen einen Wellenwiderstand.
- Auf diesen Leitungen kann es im Gegensatz zu anderen Leitungen zu Reflexionen kommen.
- Mit diesen Leitungen kann man im Gegensatz zu anderen Leitungen transformieren.

Ihr Kardinalfehler besteht nun nach Beobachtung des Autors darin, dass, obwohl alle drei Punkte offensichtlich mit einer elektromagnetischen Welle nach Maxwell und Herz in Verbindung stehen, wie bei anderen Leitungen eine rein elektrotechnische Betrachtungsweise gepflegt wird. Diese ist jedoch nur für den Generator- und den Laststromkreis ausreichend, da es dort keine Welle gibt. Das Primat der elektromagnetischen Welle auf der Leitung, welche die Definition eines Wellenwiderstands, Reflexionen und Transformation erst ermöglicht, wird übersehen oder sogar abgelehnt [3]. Dies führt zu folgenden typischen Irrtümern:

### • Die Spannung an der Generatorseite der Leitung ist die Eingangsspannung der Leitung.

Dies sind wir aus der Elektrotechnik gewohnt, wobei die Leitung auch durch jeden beliebigen Zwei- oder Vierpol (z.B. Verbraucher oder Verstärker) ersetzt werden könnte. Bei HF-Leitungen stimmt das aber immer dann nicht, wenn reflektiert wird. Denn dann ist die Spannung am Generator eine Summenspannung aus der Spannung vom Generator (Eingangsspannung der Leitung) und der Spannung der reflektierten Welle aus der Leitung (Ausgangsspannung der Leitung). Der Amateur sieht hier aus eingefleischter Gewohnheit heraus nicht, dass die Generatorseite der Leitung dann Eingang und Ausgang zugleich ist, etwa wie das Portal eines Kaufhauses, wo gleichzeitig Menschen hinein- und herausgehen.

Wie dramatisch dieser Irrtum sein kann, zeigt Folgendes: Vor etwa 20 Jahren begann der aus dem Beruf scheidende Professor für Digitaltechnik Lorenz Borucki, in der Zeitschrift FUNKAMATEUR den Lesern Vorgänge auf HF-Leitungen zu erläutern. Dabei verfiel er obigem Irrtum und entwickelte daraus die These, dass es am Generator trotz Anpassung (Generator-Innenwiderstand = Wellenwiderstand) immer zu einer Totalreflexion der rücklaufenden Welle kommt. An dieser „geheimnisvollen Totalreflexion“ ist nicht nur geheimnisvoll, dass sie keiner Stoßstelle bedarf, sondern auch, dass sowohl bei Strom als auch bei Spannung ein Phasensprung erfolgt [4]. Dass ihr experimentelle Beweis bis heute aussteht, verwundert nicht.

Trotz der Gegenargumente des Autors wurde diese These weiter im FUNKAMATEUR, in Vorträgen und in einem Buch (Co-Autor: Dr. Rudolf Kalocsay) publiziert, s. [1...5] in [5].

Sie lässt sich

- durch die von Herz experimentell bestätigte Theorie der Reflexion von Maxwell,
- mit einer Simulation [5] oder auch
- experimentell mit einem Richtkoppler [6]

leicht ad absurdum führen.

Doch was bei Profis wohl nicht vorkommen würde, ist im Amateurbereich ohne Weiteres möglich: Dem Gespenst der Totalreflexion am Generator wurde unlängst neues Leben eingehaucht mit dem der Thermodynamik entlehnten Argument, Energie könne nicht von einem niedrigeren auf ein höheres Niveau und daher nicht zurück in den Generator fließen, ein esoterisch anmutender Tiefpunkt in der Amateurliteratur [7]. Dass dies öffentlich unwidersprochen blieb, ist schon ein gewisses Armutszeugnis für die Amateure. Auch diese sollten doch wissen, dass sich nicht nur Spannungen und Ströme, sondern auch elektromagnetische Wellen überlagern.

### • Die zum Generator hin transformierte Last bestimmt die Eingangsspannung der Leitung.

In der Elektrotechnik wird die Eingangsspannung der Leitung von der Last bestimmt. Diese bildet mit dem Innenwiderstand der Quelle einen Spannungsteiler. (Bei unseren 230-V-Netzen merkt man davon nicht viel, da der Innenwiderstand zum Zwecke einer nahezu lastunabhängigen Spannung bei hohem Wirkungsgrad sehr gering ist.) Anders bei HF-Leitungen. Hier wird die Eingangsspannung der Leitung nicht von der Last, sondern vom Wellenwiderstand der Leitung bestimmt, der mit dem Innenwiderstand der Quelle einen Spannungsteiler bildet. Das lässt sich mit einem Richtkoppler leicht beweisen [6], wird aber von Funkamateuren nicht anerkannt, die im elektrotechnischen Denken gefangen sind [8]. Sie können sich nicht vorstellen, dass eine Leitung trotz dieser Tat-

sache Impedanzen im Bereich von null Ohm bis unendlich transformieren kann (Bilder 4 und 5), weil sie keinen funktionalen Unterschied zwischen dem gewohnten gewickelten Transformator und einer Transformationsleitung erkennen [9].

### • Mit der Summenspannung auf der Leitung lässt sich die Leistung oder Energie auf der Leitung errechnen.

Ausgehend von den auf einer Niederspannungsleitung an jedem Punkt anzutreffenden 230 V kann man bei Kenntnis des Lastwiderstands die Leistung ausrechnen. Dies verführt Funkamateure dazu, mit der zumindest an den beiden Seiten einer koaxialen HF-Leitung leicht zu errechnenden und zu messenden (HF-Voltmeter, Oszilloskop) Summenspannung (meist Stehwellenspannung genannt) und dem Wellenwiderstand  $Z_w$  eine Leistung oder Energie auf der Leitung ausrechnen zu wollen [7, Teil 2]. Dieser Ansatz und somit das Ergebnis sind jedoch sinnlos, diese Leistung oder Energie existiert nicht. Bei Reflexion gibt es nur die hinlaufende Leistung  $U_{\text{hin}}^2/Z_w$  und die rücklaufende Leistung  $U_{\text{rück}}^2/Z_w$ . Wer das nicht weiß, sollte besser keine Beiträge zu HF-Leitungen schreiben. Und wer sich zu experimentellen Beweisen wie in [10] äußert, ist von wissenschaftlichem Vorgehen (Hypothese – Theorie – experimentelle Bestätigung) ebenso weit entfernt wie von professioneller Diskussionskultur.

Diese Beispiele sollen genügen. Darüber hinaus gibt es im Amateurbereich noch weitere fehlgehende Ansichten zu HF-Leitungen, und so wird es nach Einsicht des Autors leider auch bleiben, zumindest wenn für Amateurzeitschriften Verantwortliche weiterhin auf professionelle Begutachtung und experimentelle Beweise verzichten und Halbwissenden, ja sogar Spinnern freien Lauf lassen. ◀