

# Wo bleibt die rücklaufende Leistung? (1)

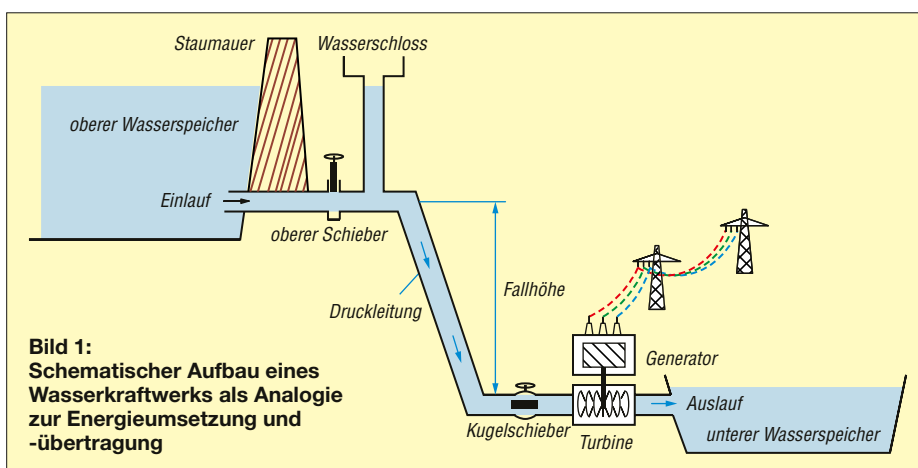
THOMAS SCHILLER – DC7GB

Wenn es beispielsweise um die Impedanzanpassung zwischen Senderausgang und Antenne oder um das Stehwellenverhältnis geht, ist unter Funkamateuren oft von vor- und rücklaufender Sendeleistung die Rede. Eine nähere Betrachtung lässt jedoch Zweifel an der Richtigkeit dieser Sichtweise aufkommen und macht die Komplexität des Themas deutlich. Dennoch wird im Folgenden versucht, die physikalischen Zusammenhänge anhand einfacher Beispiele zu erklären.

Das am häufigsten verwendete Messgerät des Funkamateurs ist die Stehwellenmessbrücke, auch VSWR- oder SWV-Meter genannt. Sie ist heute in nahezu alle größeren Funkgeräte eingebaut und dient in erster Linie dazu, Fehlanpassungen der Antenne zu erkennen. Viele Geräte zeigen auch die von der Endstufe „abgegebene Leistung“ und die „reflektierte Leistung“ an. Aber wo bleibt diese von der Antenne

nenschaukeln eines Generators ausgeübt wird, siehe Bild 1.

Gibt es hier Leistung am Einlauf, in der Druckleitung, am Turbinenrad, im Generator oder erst im elektrischen Stromnetz? Fließt tatsächlich Leistung vom oberen Staubecken über mehrere Stufen bis zum elektrischen Verbraucher? Was passiert, wenn man die Schieber in der Druckleitung schließt? Treten hier auch Reflexionen auf



**Bild 1:** Schematischer Aufbau eines Wasserkraftwerks als Analogie zur Energieumsetzung und -übertragung

zum Sender angeblich „zurückgeflossene Leistung“? Kann sie die Senderendstufe beschädigen?

In [1] ging es bereits um dieses Thema. Allerdings wurde dort der Begriff *Leistung* trotz richtiger Definition und Schlussfolgerungen in einer physikalisch gar nicht möglichen Weise, eher umgangssprachlich, verwendet.

Weit verbreitet ist auch die Auffassung, dass man aus der Messung von Spannung und Strom auf die am gleichen Ort wirkende Leistung schließen könne. Es mag vielleicht überraschen – aber das Ergebnis ist meistens grob falsch. Warum dies so ist, klärt sich im Weiteren auf und trägt damit zur Beantwortung der Ausgangsfrage bei.

## ■ Analogie Wasserkraftwerk

Ein Wasserkraftwerk erzeugt elektrische Energie aus der Kraft einer Wassersäule, die in einer Druckleitung von einem höher gelegenen Wasserspeicher auf die Turbi-

und gibt es einen Rückfluss „ungenutzter Leistung“ zurück in den Speichersee? Kann Wasser ohne zusätzlichen Aufwand überhaupt wieder in den Speichersee zurückfließen?

## ■ Eine erste Antwort

Die knappe Antwort auf alle in Anführungszeichen gesetzten Begriffe lautet: Der Wasserspeicher, das Druckrohr und auch Senderendstufen geben keine Leistung ab. Leistung kann gar nicht fließen und daher auch nicht zurücklaufen. Trotzdem kann z. B. eine Senderendstufe in bestimmten Fällen bei Fehlanpassung heißer werden. Woran liegt das?

Die Verwirrung dürfte nun komplett sein, ist aber nur eine Folge nicht ganz richtig angewendeter physikalischer Definitionen und darauf basierender unzulässiger Ableitungen. Das Problem liegt im Verständnis des Begriffs *Leistung*. Wikipedia [2] bietet die Auslegung, dass eine verrichtete

Arbeit pro Zeit  $\Delta W/\Delta t$  mit der aufgewendeten Energie pro Zeit  $\Delta E/\Delta t$  gleichgesetzt und beides als *Leistung P* bezeichnet wird.

Energie und Arbeit sind aber nicht das Gleiche! Dies erfordert eine nähere Erklärung.

## ■ Energie, Arbeit, Leistung

*Energie* ist ein fundamentaler physikalischer Zustand und die Ursache für Vorgänge bzw. Prozesse. Sie kann weder erzeugt, noch verbraucht oder gar ausgelöscht werden und ist in einem vollständig abgeschlossenen System konstant, siehe *Erster Satz der Thermodynamik*. Sie lässt sich nur in eine andere Energieform umwandeln und dabei nutzen. Jeder Energie-„Verbrauch“ ist daher tatsächlich immer ein Energieumsatz.

*Arbeit* ist ein überholter, unnötiger Begriff aus der Denkweise des 19. Jahrhunderts. Mit ihm bezeichnet man die Energiemenge, die zur Umwandlung in eine andere Energieform benötigt wird. Sie hat deshalb – wie die Energie – die gleiche SI-Einheit *Joule* bzw. *Newtonmeter* oder *Wattsekunde*, in Basiseinheiten:  $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$ . Arbeit ist aber kein Zustand wie Energie, sondern eine Aufgabe oder exakt: eine Prozessgröße.

*Leistung* ist ein Maß für die Geschwindigkeit der Umwandlung von Energie, also dafür, wie schnell eine Arbeit verrichtet wird. Ihre SI-Einheit ist *Joule pro Sekunde* bzw. *Newtonmeter pro Sekunde* oder abgekürzt *Watt*. Leistung ist eine stationäre Prozessgröße. Sie existiert nur am Ort der Energieumwandlung in einem Volumen. Dabei wirkt Kraft auf Materie entlang einer Strecke. Leistung ist eine Wirkung der Ursache Energie, sie kann nur positiv sein, bei Überlagerung nur zunehmen und sich nicht gegenseitig auslöschen. Leistung kann sich nicht ausbreiten – das kann nur Energie.

Bei jeder Energieumwandlung entsteht auch ungewollt Wärmeenergie, die den Wirkungsgrad der Umwandlung mindert. In einem geschlossenen System kann die Wärmemenge daher immer nur zu- und nie abnehmen, siehe *Zweiter Satz der Thermodynamik*.

Wärme lässt sich als niedrigste oder endgültige Energieform ansehen. Nur durch eine Wärmedifferenz entsteht ein Wärmefluss, aus dem z. B. mit Thermo- oder Peltierelementen Energie zurückgewonnen werden kann. Weil dabei aber Umwandlungsverluste auftreten, ist der Wirkungsgrad immer kleiner als 100 %. Aus diesem Grund kann es auch kein Perpetuum mobile geben.

Wärme ist die physiologische Wirkung einer elektromagnetischen Strahlung, die Energie transportiert. Ihre Ausbreitung erfolgt gleichförmig in alle Richtungen und unterliegt nur dem Einfluss von Reflexion, Absorption und nach der Relativitätstheo-

rie auch der durch Gravitation hervorgerufenen Raumkrümmung. Wärme steigt in der Luft nach oben, wenn ihre Moleküle durch Strahlung zu Schwingungen angeregt werden, was zu einer geringeren Dichte führt. Die wärmere Luft wird dann durch die absinkende schwerere, kältere Luft nach oben verdrängt. Wenn sich Wärme ausbreitet, dann fließt keine Leistung, sondern Energie. Ihre Wirkung, eine Leistung, entfaltet sie nur durch Absorption an Materie.

Im allgemeinen Sprachgebrauch ist der Begriff *Leistung* durchaus richtig besetzt, denn jemand, der eine Aufgabe schneller erledigt, wird als *leistungsfähiger* bezeichnet.

Die drei Größen lassen sich durch den Vergleich des Treppensteigens verdeutlichen: Die zu verrichtende Arbeit sei das Ersteigen einer Treppe. Ohne Energie ist das nicht möglich. Man kann die Aufgabe schnell oder langsam vollbringen und benötigt dazu viel oder wenig Leistung. Letztere kann örtlich schwanken, aber nur ihre Ursache, die in den Muskeln gespeicherte Energie, bewegt sich, die Leistung wirkt immer nur an einem Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt und bewegt sich nicht.

### ■ Energie in elektrischen Systemen

Die Denkweise der Physik hat sich mit den Entdeckungen elektrischer Phänomene ändern müssen. So gibt es elektrische Systeme, z. B. Schwingkreise, in denen – ohne Verluste zu betrachten – ständig ein Strom fließen kann. Hierbei wird, ebenso wie beim Stromfluss in Supraleitern, keine Arbeit verrichtet und keine (Wirk-)Leistung erbracht.

Obwohl sich dabei Ladungsträger bewegen, in diesem Fall Elektronen, kann man hier nicht von kinetischer Energie sprechen, weil dazu kein klassisches Potenzialgefälle nötig ist. Die genauen Hintergründe sind kom-

plexer, aber zur Klärung der Ausgangsfrage nicht von Bedeutung.

Zur Beschreibung des Vorgangs gibt es für schwingende elektrische Systeme die Begriffe *Blindleistung* und *Blindenergie*. Erstere bleibt dabei an einen Ort in Form periodischer Energieänderungen gebunden und beschreibt die Umwandlung des elektrischen in ein magnetisches Feld und wieder zurück. Wird dabei keine Wirkleistung erbracht, so ist das System verlustlos, hat also eine unendlich hohe Güte und die Energie bleibt endlos lange gespeichert.

Eine dabei tatsächlich nur mathematisch auftretende negative Amplitude der Blindleistung hat nichts mit negativer Wirkleistung zu tun, die es gar nicht geben kann! Die negative Blindleistung kennzeichnet nur das Pendeln von Energie zwischen nur das Pendeln von Energie zwischen zwei Zuständen bzw. Orten, bei denen sich zwangsläufig die Flussrichtung der Energie umkehren muss.

Ob Energie von rechts nach links oder in der Gegenrichtung fließt, ändert nichts am Potenzialgefälle selbst. Wenn man den Stromfluss durch einen ohmschen Widerstand umpolt, ergibt sich daraus schließlich auch keine Kühlung.

### ■ Beispiele aus der Mechanik

Um eine Schaukel zum Schwingen zu bringen, ist Energie erforderlich, denn man muss sie ja zunächst durch Kraft über einen Weg auslenken und somit eine Leistung erbringen. Nach dem Loslassen erfolgt die Umsetzung der so vorgegebenen potenziellen Anfangsenergie durch das Schaukeln periodisch in kinetische und wieder zurück in potenzielle Energie. Wäre die Schaukel verlustfrei, dann würde sie unendlich lange weiterschwingen.

Diese Energie ist jederzeit wieder abrufbar. Stellt man sich z. B. der schwingenden

Schaukel in den Weg, so macht sich die gespeicherte Energie der Schaukel beim Abbremsen durch das Körpergewebe als Schmerz bemerkbar. Dies lässt sich schon recht gut als Impulsleistung bezeichnen. Je kürzer die Zeit zur Energieumsetzung ist, um so mehr Leistung wird dabei vollbracht und um so mehr tut es weh.

Die Schutzfunktion einer Knautschzone und des Airbags im Kfz verdeutlicht das Prinzip: Deren Aufgabe ist es, die Aufprallenergie bei einem Unfall über eine längere Zeit in Form einer geringeren Kraft an die zu schützenden Insassen abzugeben, um damit die wirkende Leistung zu verringern. Zerstörerisch ist hier die sehr hohe Pulsleistung, maßgeblich die Kraft beim Aufprall, die wegen der Trägheit der Masse punktuell stärker wirkt. Eine Energiespeicherung durch die Knautschzone sowie die langsamere und breiter verteilte Energieumsetzung beim Airbag, also insgesamt eine breitere Leistungsverteilung, sind schonender für die Insassen.

Beim Wasserkraftwerk in Bild 1 erfolgt die Speicherung der potenziellen Energie in einem höher gelegenen See. Über die Druckleitung wird auf die Schaufeln Kraft übertragen und in kinetische Energie umgesetzt, die der Generator in elektrische Energie umwandelt. Jeder Schritt erbringt eine Wirk- und eine Verlustleistung. Aus etwa 10 % bis 15 % der Energie entsteht dabei nicht nutzbare Abwärme. Hinzu kommen noch die Transportverluste über Hochspannungsleitungen.

### ■ Beispiele aus der Elektrotechnik

Man kann einen Kondensator beliebig langsam aufladen und trotzdem bei einem Kurzschluss einen Funken erzeugen. Dies wird z. B. bei Punktschweißgeräten ausgenutzt. Die umgesetzte Energiemenge ist dabei



## Siglent SDS6000A

Entdecken Sie die neue Siglent SDS6000A Serie!



Eigenschaften:

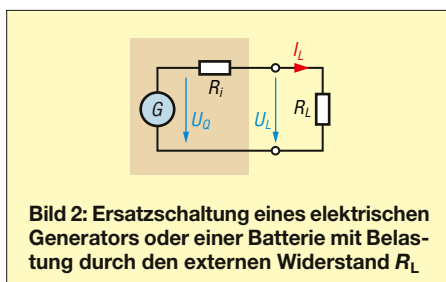
- 500 MHz - 2 GHz Bandbreite
- 5 GSa/s Abtastrate
- 500 Mpts Speichertiefe
- 30.7 cm (12.1") Touch TFT LCD Display
- Eye/Jitter Analysefunktion
- bis 750.000 wfms/s

Jetzt selbst von Batronix überzeugen:  
[www.batronix.com](http://www.batronix.com) • [service@batronix.com](mailto:service@batronix.com)  
 Telefon +49 (0)4342 90786-0

immer die gleiche, doch wenn die Zeit dazu sehr kurz ist, steigt auch die Impulsleistung.

Die mittlere Dichte des Universums ist mit etwa  $4,7 \cdot 10^{-30} \text{ g/cm}^3$  so unvorstellbar gering, dass im interplanetaren Raum mit weniger als 100 Teilchen pro Liter zu rechnen ist [3]. Die Wahrscheinlichkeit für eine Energieumsetzung z. B. in Wärme durch Wechselwirkung ist damit nahezu Null.

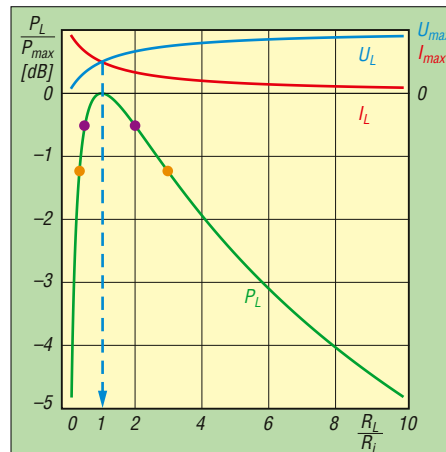
Kann Energie ein verlustloses System nicht verlassen, so bleibt sie dort ewig gespeichert. Dies gilt auch für abgestrahlte elektromagnetische Wellen, eine in Feldern gespeicherte Energie, und nur deshalb können wir nach über 13,8 Milliarden Jahren noch die sogenannte *Hintergrundstrahlung* des Urknalls nachweisen.



**Bild 2:** Ersatzschaltung eines elektrischen Generators oder einer Batterie mit Belastung durch den externen Widerstand  $R_L$

Der Grund, warum Strahlungsenergie in der Ferne abnimmt, besteht also nur darin, dass die Feldlinien mit zunehmendem Abstand einen immer größeren Raum ausfüllen müssen, siehe auch *Strahlensatz*. Dabei findet im Fernfeld wegen kaum vorhandener Materie, siehe oben, keine Energieumwandlung mehr statt. Es gibt nur eine Funkfeldausdünnung, also geringere Energiedichte. Dies ist aber keine Funkfelddämpfung, bei der zwingend eine Verlustleistung wirken müsste [4].

In Supraleitern fließt ein elektrischer Strom ohne Verluste unendlich lange und erzeugt dabei ein magnetisches Feld. Es enthält keine Leistung, sondern Energie. Schneidet ein Körper diese Feldlinien, so kann Kraft auf Materie über einer Strecke wirken, siehe *Induktion*. Dafür ist Leistung zu erbringen. Die Energie des Feldes und/oder der Bewegung nimmt ab und wird auf den Körper



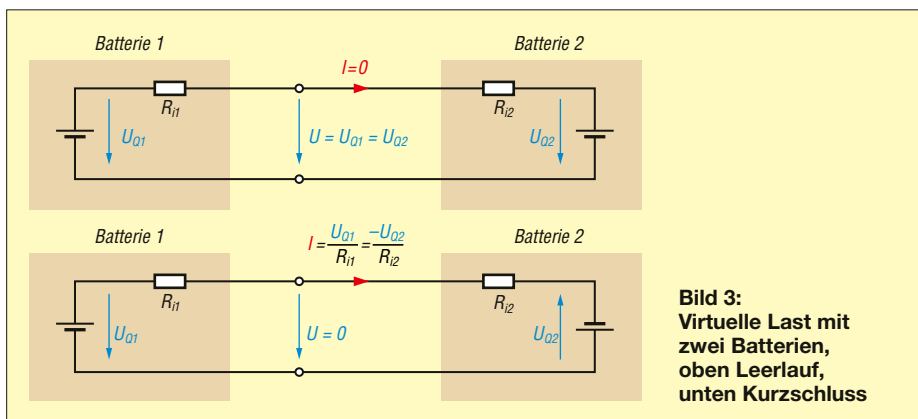
**Bild 4:** Auf die Leistungsanpassung normierter Verlauf der Verluste bei Abweichung vom Idealfall  $R_L = R_i$ , grün, sowie der Spannung  $U_L$  und des Stroms  $I_L$ ; die kleinen farbigen Kreise markieren einige Punkte, die bei Senderstufen von Bedeutung sind, Näheres dazu siehe Text.

z. B. als Wärmeenergie oder elektrischer Strom übertragen. Dies ist die Grundfunktion eines Dynamos, einer Induktionskochplatte und einer Wirbelstrombremse.

■ Ersatzschaltung einer Energiequelle

In Bild 2 ist der Aufbau eines elektrischen Stromkreises zu sehen. Ein Generator liefert ohne Belastung die Ur- oder Quellspannung  $U_Q$  und hat einen Innenwiderstand  $R_i$ . Schließt man eine Last  $R_L$  an, so fließt der Strom  $I_L$  und am Lastwiderstand stellt sich eine von  $U_Q$  abweichende, kleinere Spannung  $U_L$  ein. Zusammen ergeben die Spannungen an beiden in Reihe geschalteten Widerständen  $R_i$  und  $R_L$  die Quellspannung  $U_Q$ . Die im Widerstand  $R_L$  wirkende Leistung kann mit  $P_L = U_L \cdot I_L$  oder über den Lastwiderstand mit  $P_L = U_L^2/R_L$  bzw.  $P_L = I_L^2 \cdot R_L$  berechnet werden.

Die höchste mögliche Leistung kann nur dann im Lastwiderstand  $R_L$  wirken, wenn  $R_L = R_i$  gilt. Dieser Zustand heißt Leistungsanpassung. Die Leistung in  $R_L$  ist dann genauso groß wie die Verlustleistung in  $R_i$ . Verringert man  $R_L$ , so steigt die Verlustleistung in  $R_i$  und erreicht bei Kurz-



**Bild 3:** Virtuelle Last mit zwei Batterien, oben Leerlauf, unten Kurzschluss

schluss, also  $R_L = 0$ , den vierfachen Wert im Vergleich zur Leistungsanpassung.

In Bild 4 ist der Anpassungsverlust bei Abweichung von der Leistungsanpassung in Dezibel in Abhängigkeit vom Verhältnis  $R_L/R_i$  grafisch dargestellt. Die Punkte auf der Leistungskurve markieren den Anpassungsverlust, der sich bei einem am Senderausgang gemessenen Stehwellenverhältnis  $s = 2$  (violett) und  $s = 3$  (orange) ergibt. Er ist geringer, als sicher von vielen Lesern erwartet!

■ Parallelschaltung von Batterien

Es lohnt sich, zwei Sonderfälle zu untersuchen, bei denen Energiequellen, also Generatoren oder Batterien, parallelgeschaltet werden, siehe Bild 3. Beide bestehen nach Bild 2 aus einer inneren Quelle, die die Spannung  $U_Q$  abgibt und einem dazu in Reihe geschalteten Innenwiderstand  $R_i$ . Was passiert nun, wenn man zwei völlig identische Batterien parallel schaltet, wie oben in Bild 3?

Es ist leicht einzusehen, dass dann kein Strom fließt ( $I = 0$ ), denn zwischen der Reihenschaltung aus  $R_{i1}$  und  $R_{i2}$  wirkt die Differenz der Quellspannungen der beiden Batterien  $U_{Q1} - U_{Q2}$  und diese ist im Beispiel gleich Null. Zwei Quellen können also so zusammengeschaltet werden, dass kein Strom zwischen ihnen fließt, obwohl beide einen geschlossenen Stromkreis bilden.

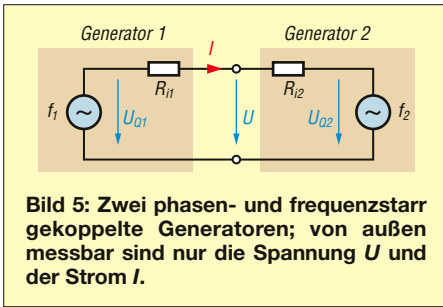
Bild 3 unten zeigt die Situation mit umgepolter Batterie 2. Zwischen der Reihenschaltung aus  $R_{i1}$  und  $R_{i2}$  wirkt nun die Summe der Quellspannungen der beiden Batterien  $U_{Q1} + U_{Q2}$ . Es fließt der Strom  $I = (U_{Q1} + U_{Q2})/(R_{i1} + R_{i2})$ . An beiden Widerständen fällt die gleiche Spannung  $U_{Q1}$  bzw.  $U_{Q2}$  ab. Dadurch ist die Spannung  $U$  zwischen den Klemmen der Batterien Null.

Jede von ihnen wirkt jetzt wie direkt an ihren Klemmen kurzgeschlossen. Es findet trotz eines weiterhin gemeinsamen Stromkreises erstaunlicherweise kein Energieaustausch statt, denn eine Entladung würde genauso lange dauern wie bei einem Kurzschluss mit galvanisch völlig getrennten Batterien.

■ Parallelschaltung von Generatoren

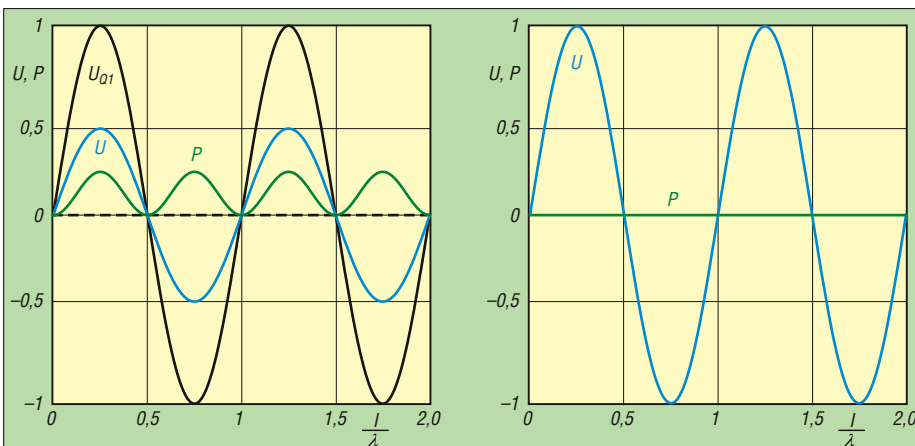
Tauscht man die Batterien in Bild 3 gegen zwei phasenstarr gekoppelte Generatoren mit gleicher Frequenz  $f_1 = f_2$  und gleichen Innenwiderständen, so entsteht eine Schaltung nach Bild 5.

Beträgt die Quellspannung von Generator 2 zunächst 0 V, so ergibt sich bei  $R_{i1} = R_{i2}$  wieder den Fall der Leistungsanpassung. Es wirkt nur noch die Reihenschaltung der Innenwiderstände  $R_{i1} + R_{i2}$  im Stromkreis an der Quellenspannung  $U_{Q1}$  des Genera-

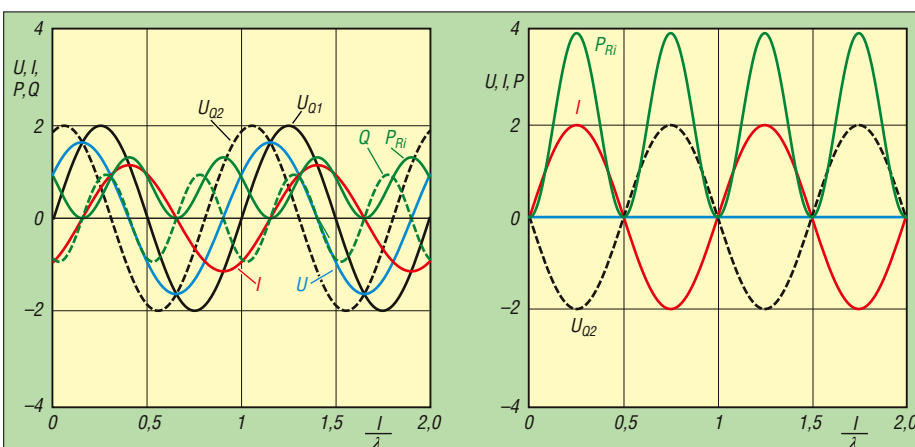


**Bild 5: Zwei phasen- und frequenzstarr gekoppelte Generatoren; von außen messbar sind nur die Spannung  $U$  und der Strom  $I$ .**

tors 1. Der blaue Spannungsverlauf links in Bild 6 zeigt die Spannungsteilung auf:  $U = U_{Q1}/2$ . Die gleiche Spannung fällt auch an  $R_{11}$  ab, sodass sich mit  $P_1 = U_{Q1}^2/R_{11}$  die im Innenwiderstand des Generators 1 wirkende Leistung bestimmen lässt, siehe grüner Verlauf in Bild 6. Erhöht man die Quellenspannung  $U_{Q2}$  von Generator 2 bei gleicher Phase  $\varphi = 0^\circ$  bis auf den Wert von  $U_{Q1}$ , so steigt die Spannung  $U$  der gemeinsamen Spannungsteilung bis auf  $U_{Q1} = U_{Q2}$  an und in beiden Generatoren wird schließlich keine Energie mehr umgesetzt, siehe Bild 6, rechts, weil es keine Potenzialdifferenz zwischen ihnen mehr



**Bild 6: Spannung und Leistung bei Parallelschaltung zweier gleichartiger Generatoren gemäß Bild 5, links bei  $U_{Q2} = 0$ ; rechts sind beide Quellenspannungen gleich groß, es gilt  $U_{Q2} = U_{Q1}$ . Es kann keine Leistung mehr erbracht werden (Leerlauf). Dargestellt sind  $U_{Q1}$  und  $U$  am Zusammenschluss beider Generatoren und die Leistung  $P$  (doppelte Frequenz!) in  $R_{11}$  oder  $R_{12}$ .**



**Bild 7: Spannung, Strom und Leistung bei Parallelschaltung zweier Generatoren, links bei  $\varphi = 70^\circ$  Phasenunterschied, rechts bei  $\varphi = 180^\circ$ ; die Summenspannung an den Klemmen ist blau und die Blindleistung  $Q$  (doppelte Frequenz!) zwischen den Generatoren grün gestrichelt dargestellt.**

gibt. Dieser Fall entspricht dem in Bild 3 dargestellten Leerlauf bei Batterien.

Ändert man die Phasenlage  $\varphi$  zwischen den Generatoren in Bild 5, so bildet sich am Verbindungspunkt eine vom Phasenunterschied abhängige Summenspannung  $U$  aus, siehe Bild 7, links. Die Amplitude kann jeden Wert zwischen 0 und  $U_Q$  einnehmen. Der sich einstellende Strom  $I$  (rot) ist immer um  $90^\circ$  gegenüber der Spannung  $U$  (blau) phasenverschoben. Es variieren nur die Amplituden von  $U$  und  $I$ . Am Zusammenschluss der Generatoren wirkt nun ein virtueller, als Bauelement gar nicht vorhandener, kapazitiver oder induktiver Blindwiderstand  $jX$ , an dem man eine Blindleistung  $Q$  errechnen kann.

Die Blindlast erhöht bei  $\varphi = 70^\circ$  Phasenunterschied die in den Innenwiderständen der Generatoren wirkende Verlustleistung bereits um etwa 32 % gegenüber Leistungsanpassung. Zwischen den Generatoren findet zwar eine periodische Umladung statt, doch solange die Bedingung  $U_{Q1} = U_{Q2}$  erfüllt ist, hebt sich die Belastung und Entlastung für jeden Generator auf, siehe Ver-

**Erkenntnisse**

- Ohne Energie gibt es keine Leistung.
- Energiepotenziale sind Voraussetzung für den Transport bzw. den Fluss von Energie.
- Bei der Parallelschaltung gleicher Energiequellen findet kein Energieaustausch statt.
- Energie kann nur von einem höheren Potenzial zu einem tieferen fließen.
- Leistung ist die Wirkung einer Energieumwandlung und an den Ort gebunden. Sie kann nicht fließen.
- Leistung ist ein Maß für die Geschwindigkeit einer Energieumwandlung.
- Die gleiche Energiemenge kann mit unterschiedlicher Leistung umgesetzt werden.
- Bei Leistungsanpassung wird die größtmögliche Energie im Lastwiderstand umgesetzt.

lauf der Blindleistung in Bild 7 um die Nulllinie.

Bei einem Phasenunterschied von  $\varphi = 90^\circ$  verdoppelt sich die Verlustleistung in den Innenwiderständen und bei  $\varphi = 180^\circ$  (Bild 7, rechts) steigt sie auf das Vierfache. Die Blindleistung bleibt im Mittel immer Null und jeder Generator erwärmt sich nur durch seine eigene Energie, deren Ursache eine Phasenverschiebung durch eine Blindlast ist.

Ist Generator 1 ein Elektrizitätswerk und Generator 2 die Summe aller an ihn angeschlossenen Verbraucher, so ist dieser Betriebszustand für das Kraftwerk äußerst unwirtschaftlich, denn es muss Energie aufbringen, für die beim Kunden keine Arbeit verrichtet wird. Dabei spielt es keine Rolle, dass der Verbraucher selbst gar keine Quellenspannung hat,  $U_{Q2} = 0$ . Es kommt nur auf die am Eingang von Generator 1 wirkende Phasenverschiebung an.

Deshalb sind bei Großverbrauchern besondere Blindleistungszähler installiert und man kompensiert zusätzlich die durch induktive Verbraucher, zumeist Motoren, auftretende Phasenverschiebung mit Kondensatoren.

**Zusammenfassung**

Aus den bisherigen Überlegungen über die physikalischen Vorgänge beim Transport von Energie, dem Wirken von Leistung und der Zusammenschaltung von Energiequellen sind als Grundlage der weiteren Betrachtung die bisher gewonnenen Erkenntnisse als Zwischenergebnis im Kasten dargestellt. (wird fortgesetzt)

**Literatur**

[1] Borucki, L., DL8EAW: Leistungsbilanz in einer fehlabgeschlossenen HF-Leitung. FUNKAMATEUR 58 (2009) H. 11, S.1164-1165  
 [2] Wikipedia: Leistung (Physik), Definition. [https://de.wikipedia.org/wiki/Leistung\\_\(Physik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Leistung_(Physik))  
 [3] Wikipedia: Vakuum, Vakuum des Weltraums. <https://de.wikipedia.org/wiki/Vakuum>  
 [4] Schiller, T., DC7GB: „Dämpfung“ der Funkstrecke. FUNKAMATEUR 61 (2012) H. 1, S. 64; H. 2, S. 171; H. 3, S. 273

# Wo bleibt die rücklaufende Leistung? (2)

THOMAS SCHILLER – DC7GB

Ausgehend von einigen grundlegenden Ausführungen zu den physikalischen Größen Energie und Leistung im ersten Teil des Beitrags befasst sich der zweite Teil mit Leitungen, Reflexionen und stehenden Wellen. Die Kenntnis der wechselseitigen Zusammenhänge führt letztlich zur Antwort auf die in der Überschrift gestellte Frage.

Nach den Überlegungen zur Parallelschaltung von Batterien und Generatoren im Teil 1 des Beitrags geht es nun um die Vorgänge zwischen Generator, Speiseleitung und Abschlusswiderstand. Geklärt wird auch die oft diskutierte Frage, ob und wie die rücklaufende Energie am Leitungseingang reflektiert wird und wo die Energie bleibt.

## Die Leitung als Energiespeicher

Eine Leitung kann Energie in Form elektromagnetischer Felder speichern. Ist sie am Ende offen, so kann sie bei Gleichspannung die Energie nur in einem elektrischen Feld in einer Kapazität speichern.

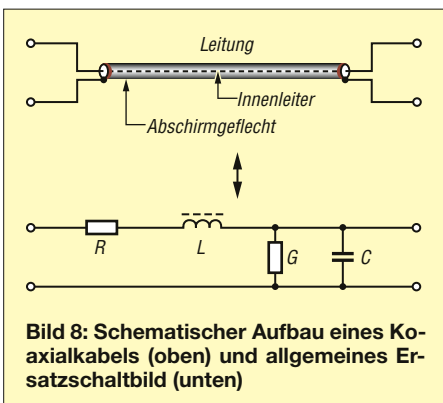


Bild 8: Schematischer Aufbau eines Koaxialkabels (oben) und allgemeines Ersatzschaltbild (unten)

Das häufig verwendete Koaxialkabel RG58 hat einen Kapazitätsbelag  $C' = 100,7 \text{ pF/m}$ , siehe Tabelle und [5]. Ein 50-m-Ring besitzt somit eine Kapazität  $C = 5,04 \text{ nF}$ . In Bild 8 ist oben der schematische Aufbau eines Koaxialkabels und unten das Ersatzschaltbild dargestellt. Anders als bei einem Kondensator lädt sich die Leitung beim Anlegen einer Gleichspannung mit einem konstanten Strom auf, weil neben der Kapazität  $C$  auch eine Längsinduktivität  $L$  wirkt. Beide zusammen ergeben eine spezifische Signalverzögerung  $t'$ , sodass die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v_L$  in der Leitung immer geringer als die Lichtgeschwindigkeit  $c$  ist. Das Verhältnis ist als Verkürzungsfaktor bekannt:  $VF = v_L/c$  mit  $c \approx 300\,000\,000 \text{ m/s}$ . Eine am Ende kurzgeschlossene Leitung speichert die Energie in einem magnetischen Feld. Bei Gleichspannung wird jedoch die größte Energiemenge im ohmschen Anteil  $R$  umgesetzt, sodass kaum ein

magnetisches Feld entstehen kann. Dies ändert sich jedoch bei Wechselspannung, wenn der Blindanteil  $j\omega L$  größer als  $R$  ist. Die ohmschen Komponenten bestehen aus dem Längswiderstand  $R$  des Innenleiters und des Abschirmgeflechts (Außenleiter) und dem Querleitwert  $G$  des isolierenden Dielektrikums im Innern der Leitung. In ihnen treten Verluste auf, die zur Dämpfung bei der Signalausbreitung führen. Sind die ohmschen gegenüber den Blindanteilen von  $L$  und  $C$  zu vernachlässigen, so ergibt  $Z_0 = \sqrt{L/C}$  den reellen Wellenwiderstand der Leitung.

Anders als bei der Entladung eines Kondensators kann eine Leitung nur über einen reellen Widerstand größer Null entladen werden. Auch dabei fließt bei einer gleichförmigen Ladung in der Leitung ein konstanter Strom und die umgesetzte Energie pro Zeit ist konstant. Ein idealer Kurzschluss führt dagegen nur zu einer Umladung der Leitung (elektrisches Feld  $\rightarrow$  magnetisches Feld).

Beispiel: Liegt am Ende einer Leitung ein Widerstand  $R_L = 50 \text{ }\Omega$ , so wird dort bei  $U_L = 70,7 \text{ V}$  eine Leistung  $P_L = U_L^2/R_L = (70,7 \text{ V})^2/50 \text{ }\Omega = 100 \text{ W}$  erbracht. Die Leitung selbst speichert dann die Energie  $W_L = 0,5 \cdot C_L \cdot U_L^2$ . Die angenommene 50 m lange Koaxialleitung RG58 kann daher  $W_L = 0,5 \cdot 5,04 \text{ nF} \cdot (70,7 \text{ V})^2 = 12,6 \text{ }\mu\text{Ws}$  speichern. Daran ändert sich auch bei Wechselspannung nichts. Es fließt dann allerdings ein Wechselstrom und die Energie ist in einem Wechselfeld in der Leitung gespeichert.

Bei Leerlauf am Leitungsende verdoppelt sich die Spannung auf den Wert der Leerlaufspannung  $U_Q = 2 \cdot U_L$  des Generators,

im Beispiel auf  $U_Q = 141,4 \text{ V}$ . Damit kann die Leitung wegen  $(2 \cdot U_L)^2 = 4 \cdot U_L^2$  die vierfache Energie  $W = 4 \cdot W_L = 4 \cdot 12,6 \text{ }\mu\text{Ws} = 50,4 \text{ }\mu\text{Ws}$  speichern. War die Leitung zuvor ungeladen, so ist bis zum Ladeende die doppelte Laufzeit  $2 \cdot t$  erforderlich. Die Belastung des Generators während des Ladevorgangs erfolgt mit dem Wellenwiderstand  $Z_0$ . Dies gilt auch bei Gleichspannung.

## Die Leitung am Generator

Nach der Analyse der Parallelschaltung von Batterien und Generatoren im Teil 1 des Beitrags, Bild 5, soll nun der eigentlich interessante Fall betrachtet werden. Dazu ist Generator 2 durch eine Leitung mit dem Wellenwiderstand  $Z_0 = R_{i1}$  zu ersetzen und zur Vereinfachung als verlustlos zu betrachten, Bild 9.

Das Aufladen der Leitung geschieht durch Generator 1. Bei  $R_L = \infty$  (Leerlauf) ist dazu die doppelte Laufzeit der Leitung erforderlich. Zu Beginn der Aufladung wirkt am Leitungseingang noch der Wellenwiderstand  $Z_0$  und mit der Vorgabe  $R_{i1} = Z_0$  besteht Leistungsanpassung. Wie bereits bekannt, halbiert sich dann die Spannung am Eingang auf  $U = U_Q/2$ . Dieser Zustand dauert aber nur an, bis die Leitung nach zwei Laufzeiten aufgeladen ist.

Weil danach kein Strom  $I$  mehr in die Leitung fließen kann, muss sich zwischen Generator und Leitungseingang die Spannung  $U = U_Q = U_L$  einstellen. Dies entspricht – abgesehen von der anfänglichen Verzögerung – dem Verhalten zweier parallelgeschalteter Generatoren (Bilder 6 und 7 im ersten Teil des Beitrags).

## Kontrollrechnung zur Entladung

Trennt man den Generator vom Eingang einer vollständig aufgeladenen, am Ende leerlaufenden Leitung und schließt sofort danach die Leitung am Ende mit  $R_L = Z_0$  ab, so liefert sie für zwei Laufzeiten die in ihr gespeicherte Energie.

Die aus der Kapazität des 50-m-Rings RG58 und der Spannung im Leerlauf berechnete gespeicherte Energie  $W = 50,4 \text{ }\mu\text{Ws}$  (siehe weiter vorn) fließt konstant während der Entladezeit  $t = 2 \cdot 253 \text{ ns}$  und erbringt in  $R_L$  eine Leistung  $P = W/t = 50,4 \text{ }\mu\text{Ws}/506 \text{ ns}$

### Charakteristische Daten gebräuchlicher Koaxialkabel nach [5] und [6]

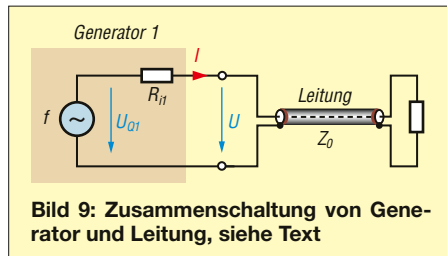
	RG213	RG58	RG174
Wellenwiderstand $Z_0$ [ $\Omega$ ]		$50 \pm 2$	
Kapazitätsbelag $C'$ [pF/m]	101	100,7	101
Verkürzungsfaktor VF		0,66	
Signallaufzeit $t'$ [ns/m]		5,03	
Dämpfung $a'$ bei 20 MHz [dB/m]	0,023	0,065	0,135
Dämpfung $a'$ bei 150 MHz [dB/m]	0,074	0,17	0,35
ohmscher Widerstand (innen) [ $\Omega/\text{km}$ ]	6	36	306
ohmscher Widerstand (außen) [ $\Omega/\text{km}$ ]	4,4	17	54
Außendurchmesser [mm]	10,3	4,85	2,8
Innenleiteraufbau	$7 \times 0,75 \text{ mm}$	$19 \times 0,18 \text{ mm}$	$7 \times 0,16 \text{ mm}$

= 99,6 W. Die Abweichung von 0,4 % zur Vorgabe der 100 W bei Leistungsanpassung erklärt sich aus den gerundeten Werten der Kabeldaten. Es handelt sich nicht um Verluste!

### ■ Reflexionen

Ist der Generator (Quelle) ohne Leitung direkt mit der Last (Senke) verbunden, so stellt sich sofort ein Gleichgewichtszustand ein und der Generator liefert nur die Energie, die die Last benötigt. Liegt dazwischen eine Leitung, so erfolgt die Belastung des Generators im Vorlauf zunächst mit dem Wellenwiderstand  $Z_0$ . Dies bedeutet in der Regel Leistungsanpassung und die maximal entnehmbare Energiemenge fließt zum Leitungsende.

Liegt hier eine Fehlanpassung vor, so wird der nicht benötigte Energieanteil als Rück-



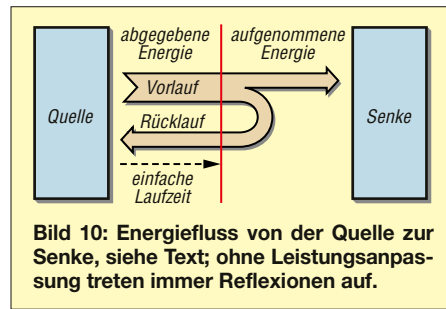
**Bild 9: Zusammenschaltung von Generator und Leitung, siehe Text**

lauf reflektiert, Bild 10. Erst zwei Laufzeiten nach dem Einspeisen der maximal möglichen Energie erreicht der Rücklauf den Leitungseingang und reduziert die vom Generator abgegebene Energie auf genau den Anteil, der am Leitungsende aufgenommen wird.

Jede Abweichung von der Leistungsanpassung führt zu Reflexionen. Dabei kommt es auf der Leitung zu gegeneinander laufenden Wellen, die sich zu sogenannten *stehenden Wellen* überlagern. Ihre Entstehung während der Aufladung einer Leitung lässt sich im gelben Kasten auf der nächsten Seite nachlesen. Eine Animation der Vorgänge findet man z.B. auf [7].

SWV-Messbrücken zeigen nur simple Beiträge von hin- und rücklaufenden Wellen an, ohne deren von der Reflexion abhängige Phasenlage zu berücksichtigen. Zudem werden die Messwerte der ausgekoppelten Spannungen und der in Spannungen umgesetzten Ströme nur addiert und nicht miteinander multipliziert. Bei einem Kurzschluss am Messort ist  $U_L = 0$  und bei Leerlauf gilt  $I_L = 0$ , sodass wegen  $P = U \cdot I$  in beiden Fällen gar keine Energie vorhanden ist. Daraus folgt, dass SWV-Messbrücken nur den Ladezustand ihrer eigenen Messstrecke ermitteln können und indirekt auf einen Rückfluss und das SWV schließen. Eine Leistungsmessung ist auf diese Weise gar nicht möglich.

Die HF-Leistungsanzeigen wohl aller kommerzieller Amateurfunkgeräte können da-



**Bild 10: Energiefluss von der Quelle zur Senke, siehe Text; ohne Leistungsanpassung treten immer Reflexionen auf.**

her nur bei Anpassung richtig kalibriert sein. Besser wäre es hier, die Differenz aus Hin- und Rücklaufmessung anzuzeigen, denn diese wäre proportional zu der in der Antenne umgesetzten Energie bzw. der erbrachten Leistung und auch bei Reflexionen noch richtig. Ein Abgleich der Anpassung auf maximale Energieabgabe anstelle der Kontrolle von Hin- und Rücklauf wäre auch viel einfacher.

### ■ Stehende Wellen

Bei Fehlanpassung werden Wechselspannungen und Wechselströme reflektiert. Wenn sich gegenläufige Wellen gleicher Frequenz überlagern, bilden sich in der Amplitude schwankende Summensignale aus, deren Phase sich örtlich nicht ändert. Sie tragen deshalb die Bezeichnung *stehende Wellen*. Ihre Amplitude ist bei Anpassung gleich Null und bei Totalreflexion maximal.

Die stehenden Wellen haben fixierte Orte mit maximal schwankender Amplitude (Bäuche) und bei Totalreflexion auch Orte, an denen die Amplitude theoretisch sogar ständig Null werden kann (Knoten). Die Ladung auf der Leitung ist bei Fehlanpassung also nicht mehr so gleichförmig verteilt wie bei Anpassung.

Stehende Strom- und Spannungswelle sind bei rein ohmschen Fehlanpassungen an allen Orten um  $90^\circ$  in der Phase verschoben. Ihr Produkt ist deshalb eine stehende Blindenergie, dessen Vorzeichen aber keine negative Energie oder gar Leistung darstellt, sondern – wie in einem Schwingkreis – nur den Wechsel zwischen elektrischer und magnetischer Energie. Bei einer reinen Blindlast am Leitungsende ist der Phasenunterschied der reflektierten Wellen  $0^\circ$ , sodass es eine stehende Wirk-Energie-welle gibt. Auch hier entspricht eine negative Halbwelle keiner negativen Energie, ebenso wie eine umgepolte Batterie nicht plötzlich negative Energie enthält.

### ■ Totalreflexion beim Rücklauf?

Dies ist die Ausgangsfrage des vorliegenden Beitrags, die unter Funkamateuren endlos diskutiert wird [8]. So kursiert z. B. die Behauptung, dass die am Leitungsende durch Fehlanpassung „reflektierte Leistung“ oder ein Strom nach dem Rücklauf entweder zurück in (!) den Generator oder am

Leitungseingang re-reflektiert und wieder zum Leitungsende fließt. Selbst wenn man hier den falschen Begriff *Leistung* durch *Energie* ersetzt, wird zumindest die erste Variante dann nicht richtiger. Wohin fließt nun aber die reflektierte Energie der zweiten Erklärung, wo bleibt sie oder wird in was umgesetzt?

Bei Fehlanpassung am Ausgang fließen je eine im Allgemeinen gegeneinander phasenverschobene Strom- und Spannungswelle zurück, die sich mit den hinlaufenden Wellen zu stehenden Strom- und Spannungswellen überlagern, siehe weiter vorn. Sie bilden über die Leitungslänge und ihre Laufzeit eine zusätzliche Ladung in der Leitung. Der Reflexionsfaktor der rücklaufenden Welle hat am Leitungsanfang vom Betrag zwar den gleichen Wert wie am Leitungsende. Doch diese Betrachtung ist nur dann richtig, wenn der Generator selbst keine Energie liefert und der Rücklauf damit auf einen passiven  $R_1$  treffen würde.

Mit aktivem Generator kann die Rücklaufenergie bei  $0^\circ$  Phasenunterschied nicht in ihn hineinfließen, da es kein Potenzialgefälle gibt. Auch bei den beiden leerlaufenden Generatoren aus Bild 6, rechts, im Teil 1 herrscht eine Totalreflexion, da keiner von ihnen Energie abgeben kann. Bei anderen Phasenlagen kommt es zu einer periodischen Ent- und Belastung, die im Mittel jedoch Null ist. Ähnlich ist es auch z. B. mit einem Hafenbecken, dem vom Meer her Wellen zufließen. Sein Wasserstand bleibt im Mittel konstant.

Die Betrachtung zweier gleichartiger, phasenverschobener Generatoren (Bild 7, links, Verlauf von  $Q$ ) bestätigt dies. Eine Energieübertragung der Reflexion in den Generator ist auch nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik unmöglich. Danach kann ein niedriges Energieniveau bzw. der Rücklauf ohne zusätzliche Energiezufuhr, also von selbst, nie auf ein höheres oder gleiches Niveau (Generator) fließen.

Am aktiven Leitungseingang findet bei passiver Fehlanpassung am Ausgang also grundsätzlich immer eine Totalreflexion statt und die Speicherung der reflektierten Energie in der Leitung als zusätzliche Ladung (vergleiche RG58-Beispiel weiter vorn). Der Generator liefert dann nur noch die Energie, die durch die Fehlanpassung am Leitungsende weiterhin abgenommen und jene, die ggf. durch Leitungsverluste umgesetzt wird.

### ■ Der „Wechselstrom-Akku“

Ist die fehlangepasste Leitung am Ausgang wieder reflexionsfrei angepasst, so liefert sie für eine Leitungslaufzeit (wenige Mikrosekunden) sofort wieder die Energie bei Leistungsanpassung, nicht etwa das Doppelte. Solange die zusätzliche Ladung der

Leitung abfließt, muss der Generator am Eingang noch nicht wieder die volle Energie einspeisen. Dies erfolgt erst, wenn die Leitung alle in ihr stehenden Wellen abgebaut hat und ihr Eingangswiderstand wieder  $Z_0$  entspricht. Es geht also nichts verloren, es muss keine Energie irgendwo in Wärme umgesetzt werden und es fließt auch zu keinem Zeitpunkt Energie zurück in den Generator.

Wäre die Leitung verlustfrei und würde auch am Leitungsende Totalreflexion herrschen, also bei offenem oder kurzgeschlossenem Ausgang, so würde die reflektierte Energie in der Leitung ständig hin und her laufen, ohne dass eine Auffrischung erforderlich wäre. Man kann die Leitung daher auch als „Wechselstrom-Akkumulator“ bezeichnen, da sie nicht nur Energie, sondern wegen ihrer Laufzeit auch noch die zugehörige Frequenz speichern und wieder abgeben kann.

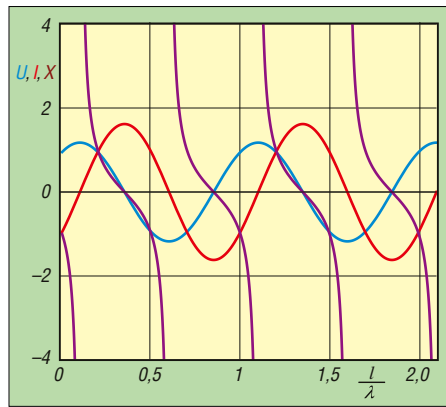
In der Realität wäre die Ladung aber bereits nach wenigen Reflexionen bzw. Mikrosekunden durch die Leitungsverluste abgebaut. Wollte man nur für eine Sekunde ein starkes HF-Signal oder 50 Hz Netzenergie in einem Koaxialkabel speichern, so müsste es eine Länge von 200 000 km haben und supraleitend sein. Die Idee eines „Wechselstrom-Akkumulators“ hat daher wenig Aussicht realisiert zu werden. Doch sie gibt eine Vorstellung davon, wie viel Energie allein in Überland-Hochspannungsleitungen gespeichert ist.

## Die Leitung als Widerstandstransformator

Aus den stehenden Spannungs- und Stromwellen auf einer Leitung lässt sich mit  $Z = U/I$  ein stationär wirkender Widerstand errechnen. Da Spannungs- und Stromwelle durch die Reflexion um bis zu  $90^\circ$  gegeneinander phasenverschoben sein können, ist der sich ergebende Widerstand komplex:  $Z = R + jX$ .

Der Blindanteil  $jX$  verschwindet an Stellen, an denen die Spannung auf der Leitung  $U = 0$  ist. An Stellen, wo der Strom  $I = 0$  ist, wird er theoretisch unendlich groß und praktisch vom ohmschen Querleitwert  $G$ , Bild 8, bestimmt. Diese Orte findet man im Abstand von  $\lambda/4$ . In Bild 11 zeigen die Kurven in violetter Farbe den Verlauf des Blindanteils  $jX$  für die im gelben Kasten als Beispiel verwendete, leerlaufende Leitung, während des Ladevorgangs.

Wesentlich interessanter sind auf den Wellenwiderstand  $Z_0$  normierte Widerstandsverläufe bzw. die Darstellung der Frequenzabhängigkeit des komplexen Reflexionsfaktors eines Ein- oder Ausgangs als S-Parameter. Die Abkürzung stammt vom englischen Wort *scatter*, übersetzt *Streuung*. Sie sind für die Optimierung von



**Bild 11:** Aus stehenden Wellen  $U$  und  $I$  berechneter Blindwiderstand  $X = U/I$  auf der Leitung; negative Werte repräsentieren eine Kapazität, positive eine Induktivität.

Schaltungen besonders nützlich, wenn die Wellenlänge in den Größenbereich der Bauelemente kommt.

## Bedeutung für Senderendstufen

Die in der Leitung zwischen Senderendstufe (Quelle) und Antenne (Senke) gespeicherte Energie kann nur über einen realen Lastwiderstand an einem der beiden Enden wieder abgegeben werden. Die Senderendstufe, also der Generator bzw. die Quelle, kann die Energie in seinem Innenwiderstand

$R_i$  nur dann in Wärme umsetzen, wenn sein eigenes Energieniveau geringer als das in der Leitung gespeicherte ist. Dies ist bei Reflexionen seiner eigenen Energie an Leitungen allerdings grundsätzlich völlig unmöglich. Woher sollte dieser Energieüberschuss auch kommen?

Trotzdem können sich Senderendstufen bei Fehlanpassung zusätzlich erhitzen. Wie bereits im ersten Teil des Beitrags mit Batterien und Generatoren erklärt, kann dies nur dann passieren, wenn der Lastwiderstand am Ausgang der Senderendstufe geringer als ihr Innenwiderstand, also in der Regel kleiner als  $50 \Omega$  ist. Dies entspricht dem Bereich links vom grünen Maximum in Bild 4. Der Strom, also die dort gezeichnete rote Kurve, nimmt dann zu und die Ausgangsspannung ab, siehe blaue Kurve. Dadurch muss die Spannung am Innenwiderstand der Senderendstufe zwangsläufig zunehmen, denn die Quellenspannung der Endstufe bleibt konstant.

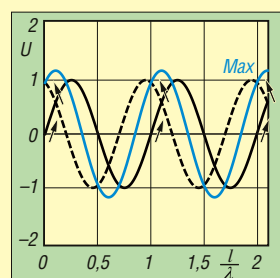
Zusammen mit dem höheren Strom führt dies sehr schnell zu einer bis zu vierfachen Erhöhung der Verlustleistung und damit zu einer erheblichen Erwärmung der Sende-

## Stehende Wellen auf der Leitung

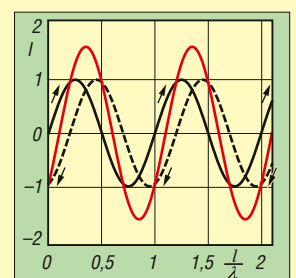
Bei einer Fehlanpassung am Leitungsende kann nur ein Teil der vorhandenen Energie im Lastwiderstand  $R_L$  eine Leistung erbringen. Es kommt zu einer Reflexion. Der ungenutzte Energieanteil fließt für eine Kabellaufzeit zum Generator zurück und lädt die Leitung auf einen höheren Wert gegenüber dem bei Leistungsanpassung möglichen Wert auf. Damit

Zusammen mit der rücklaufenden Welle (schwarz gestrichelt) bildet sich auf der Leitung die Summe einer stehenden Spannungswelle (blau) und einer stehenden Stromwelle (rot).

Die Spannung wird am offenen Leitungsende mit  $0^\circ$  reflektiert. Der Strom muss dort jedoch Null sein, damit die Summe aus Hin- und



**Bild 12:** Einschwingvorgang beim Aufladen einer verlustlosen, entladenen Leitung der Länge  $2,1 \cdot \lambda$  und Ausbildung einer stehenden Spannungswelle ...



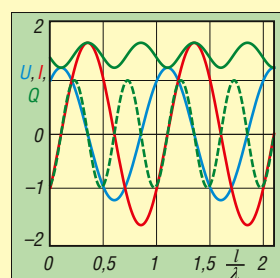
**Bild 13:** ... sowie einer stehenden Stromwelle

gibt es auf der Leitung zwei gegenläufige Wellen gleicher Frequenz, die sich zu einer stehenden Welle überlagern.

Die Bilder 12 und 13 zeigen Strom und Spannung auf einer  $2,1 \cdot \lambda$  langen, am Ende offenen, verlustlosen Leitung. Im ersten Durchlauf (hin und zurück) kommt es am Leitungsende – in den zwei Bildern jeweils rechts – zur Totalreflexion der hinlaufenden Welle (schwarz).

Rücklauf auch Null ergibt. Dies erfordert bei der Reflexion einen Phasensprung von  $180^\circ$ . Die sich ergebenden stehenden Wellen sind bei Totalreflexion um  $90^\circ$  gegeneinander phasenverschoben. Sie zeigen Ort und Stärke des stationären elektrischen und magnetischen Feldes auf der Leitung.

Ihre vektorielle Summe ergibt den Betrag der Ladungsverteilung auf der Leitung (grün in Bild 14). Die durch Reflexion auftretende Scheinenergie ist das Produkt aus beiden Wellen und grün gestrichelt dargestellt. Ihr Wechsel um die Nullachse zeigt die Umladung zwischen elektrischem und magnetischem Feld an. Beide Verläufe haben die doppelte Frequenz.



**Bild 14:** Stehende Stromwelle (rot) und stehende Spannungswelle (blau) aus den Bildern 12 und 13, sowie die Ladungsverteilung  $Q$  (grün) und die Scheinenergie  $W$  (grün gestrichelt) auf der Leitung unmittelbar nach dem ersten Rücklauf

### Zusammenfassung der Ergebnisse

- Eine SWV-Messbrücke zeigt keine Leistungswerte an, sondern nur die Betragssumme ausgekoppelter Spannungen und Ströme.
- Bei Fehlanpassung lädt sich die Leitung in zwei Laufzeiten auf. Danach wird dem Generator nur noch so viel Energie entnommen, wie am Leitungsende und durch die Leitungsverluste tatsächlich erforderlich ist.
- Die in der Leitung gespeicherte Energie ist vernachlässigbar gering und kann daher selbst theoretisch nie den Generator erwärmen.
- Anders als ein Kondensator liefert eine Leitung während der Entladung ständig eine konstante Energiemenge und kann während dieser kurzen Zeit als Generator mit dem Innenwiderstand  $Z$  betrachtet werden.
- Bei Fehlanpassung fließt keine Energie zurück in den Generator.
- Bei gleichem SWV führt nur ein niederohmiger Abschluss zu einer zusätzlichen Wärmeentwicklung im Innenwiderstand des Generators.
- Die Messung von Spannung und Strom an einem beliebigen Ort auf einer Leitung sagt nichts über die an diesem Ort umgesetzte Leistung aus.
- Der Begriff *Leistung* kann nicht durch den Begriff *Energie* ersetzt werden, denn Energie ist keine Leistung.
- Leistung ist die stationäre Wirkung einer Energieumsetzung. Sie kann nicht fließen, negativ werden, hat keine Phase und lässt sich nicht auslöschen.
- Stehende Wellen auf fehlangepassten Leitungen sind nur die Hüllkurve der örtlich fixierten, aber über die Leitungslänge schwankenden Ladungsverteilung.

endstufe. Die dazu notwendige Energie kommt jedoch nicht aus der extrem geringen in der Leitung gespeicherten Energie, siehe Abschnitt *Leitung als Energiespeicher*, sondern nur aus der Endstufe selbst. Eine leerlaufende Endstufe kann daher trotz des dabei unendlich hohen SWV niemals warm werden, sofern die Länge interner HF-Leitungen bis zur Endstufe deutlich unter  $\lambda/4$  bleibt, also keine nennenswerten Widerstandstransformation stattfindet. Dies bedeutet, dass der gefährliche Fall immer der niederohmige Lastbetrieb ist.

Ausnahmen können allerdings bei Röhrendstufen auftreten, die aus Kostengründen zu eng und mit zu schwach dimensionierten Bauteilen aufgebaut sind. Die im Leerlauf auftretenden höheren Spannungen können hier ggf. zu Spannungsüberschlägen führen, die Schaden anrichten. Dies hat aber nichts mit einer zurückfließenden Energie zu tun. Weil einfache Messeinrichtungen beim SWV nicht zwischen dem hochohmigen, in der Regel unkritischen, und dem gefährlichen niederohmigen Fall unterscheiden können, erfolgt ab  $s = 2$  aus Sicherheitsgründen fast immer eine automatische Reduzierung der Ansteuerung der Endstufe. Im hochohmigeren Fall würde sie hier zwar sogar 11 % weniger Wärme umsetzen müssen, doch bei niederohmiger Last wären dies bereits zusätzliche 78 %. Dafür ist die Kühlung handelsüblicher Geräte schon aus Kostengründen nicht ausgelegt.

Die verminderte Ansteuerung bewirkt eine Reduktion der HF-Quellenspannung. Bei einer niederohmigen Last fällt dadurch am Innenwiderstand der Endstufe auch weniger HF-Spannung ab, der HF-Strom wird geringer und die Verlustleistung nimmt ab.

#### ■ Begriffsverwirrung

Naturwissenschaftliche Sachverhalte und ihre Klärung erfordern präzise Begriffe und deren sachlich richtige Verwendung. Noch einfach einzusehen ist, dass Energie

von selbst nicht auf ein höheres Potenzial fließen kann. Der Begriff einer „fließenden Leistung“ ist aber völlig inakzeptabel, weil physikalisch unmöglich. Er hat sich leider, ähnlich wie der Begriff „Stromspannung“, trotzdem in der technischen (nicht in der wissenschaftlichen) Umgangssprache und Literatur festgesetzt und erzeugt viele Missverständnisse. Selbst Firmenschriften können solche Ausrutscher enthalten, siehe [9].

Im allgemeinen technischen Sprachgebrauch sind z. B. *Leistungsflussdiagramme* eigentlich *Energieflussdiagramme* und mit *Leistungsabgabe* ist an sich eine *Energieabgabe* gemeint. *Leistungsverstärker* kann es an sich gar nicht geben, denn sie verstärken Energie und nur indirekt die im sogenannten *Verbraucher* umgesetzte Leistung. Beim Begriff *Leistungsverbrauch* weiß zwar jeder, was gemeint ist, doch noch nicht einmal Energie kann im physikalischen Sinn „verbraucht“ werden, usw. Was hier etwas spitzfindig klingt, kann bei der Klärung von Sachverhalten sehr wichtig sein.

Es hat wenig Aussicht auf Erfolg, diese falsche Ausdrucksweise unter Funkamateuren abändern zu wollen. Man muss aber bei Aufsätzen, Artikeln, Vorträgen oder in der Lehre sehr aufpassen, keinen Unsinn zu verbreiten, nur um beim anerkannten (falschen) Sprachgebrauch bleiben zu können. Zumindest sollte der Leser um die Problematik verwirrender oder falscher Begriffe wissen.

#### ■ Ergebnis und Ausblick

Die eingangs gestellt Frage „Wohin fließt die reflektierte Leistung?“ kann jetzt abschließend beantwortet werden: Leistung kann nicht fließen, da sie nur eine stationäre Wirkung für die Umsetzung von Energie ist. Nur eine verschwindend geringe Energiemenge fließt tatsächlich zurück, kann aber während der Fehlanpassung nirgendwo (außer in Leitungsverlusten) aus der Leitung abfließen.

Es bleiben noch die Fragen zum Wasserkraftwerk. Auch hier kann es beim schnellen Absperren der Druckleitung zu Reflexionen in Form von Druckstößen kommen. Energie fließt dann zurück zum Einlauf und kann kurzzeitig beträchtliche Schäden anrichten. Das Wasserschloss am Einlauf, Bild 1 im Teil 1, minimiert diese Kräfte. Es wirkt wie eine Art Dummy-Load für den reflektierten Druckstoß der Wassersäule, wenn die Schieber im Tal geschlossen werden. Wasser kann natürlich ohne zusätzlichen Energieaufwand nicht in den See zurückfließen.

Die Ergebnisse sind im gelben Kasten auf dieser Seite zusammengefasst. Begründungen dazu findet man im Text. Ich hoffe, dass der vorliegende Beitrag weniger neue Verwirrung als Erkenntnis gebracht hat und einige Fragen klären konnte.

dc7gb@vfdb.org

#### Literatur

- [5] Huber + Suhner AG: RF cables. <https://literature.hubersuhner.com/Technologies/Radiofrequency/RFCablesEN/?page=1>
- [6] arnotec GmbH: Datenblatt RG213. [www.koax24.de/storage/datasheet/de/050247\\_Datenblatt\\_RG213U.pdf](http://www.koax24.de/storage/datasheet/de/050247_Datenblatt_RG213U.pdf)
- [7] Fendt, W.: Animation zur stehenden Welle. [www.walter-fendt.de/html5/phde/standingwave\\_reflection\\_de.htm](http://www.walter-fendt.de/html5/phde/standingwave_reflection_de.htm)
- [8] Popken, L.: Ein hartnäckiges Mysterium im Amateurfunk. [www.totalreflexion.net](http://www.totalreflexion.net) → Download → [Totalreflexion\\_ilr2.pdf](http://www.totalreflexion.net/Totalreflexion_ilr2.pdf)
- [9] Huber & Suhner: HF-Verbinder-Handbuch. 2. Auflage 2007; Dokument Nr. 84009 865
- [10] Lass, M., DJ3VY: Kombinierte Antennenanpassung: kompensieren und transformieren. FUNK-AMATEUR 60 (2011) H. 7, S. 713

## Nachlese

### ■ Impedanzanpassung mithilfe von Koaxialkabeln

FA 1/22, S. 35–37

Das Ergebnis der Gleichung (2) lautet korrekt  $34,72 \Omega$ . In der Bildunterschrift für Bild 1 muss  $Z = 71,3\Omega -j0,9 \Omega$  stehen, so wie im Bild erkennbar. Gleichung (5) lautet korrekt:

$$R_A = \frac{R_E \sqrt{1 + \left(\frac{Z_K}{R_E} \cdot \tan(360^\circ \cdot l_W)\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_E}{Z_K} \cdot \tan(360^\circ \cdot l_W)\right)^2}}$$

### ■ Timer-IC NE555 – seit 50 Jahren ein bewährtes Multitalent

FA 2/22, S. 122–124

Der Kondensator C4 in den Bildern 2 und 7 ist falsch gepolt dargestellt. Der Plusanschluss muss an Masse liegen.

Alle bis zum Zusammenstellen des FA-Jahrgangs-PDFs bekannt gewordenen Fehler werden korrigiert.