

S-Parameter (= Streu- oder Scattering-Parameter) -- eine kurze Einführung

Bei hohen Frequenzen lassen sich Ströme und Spannungen nicht mehr so einfach messen, außerdem klappt auch die Sache mit Leerlauf- oder Kurzschluss-Messung zum Bestimmen des Innenwiderstandes einer Quelle nicht mehr richtig. Die Systembeschreibung und -berechnung geht deshalb dort von Größen aus, die auch **bei höchsten Frequenzen leicht messbar sind und man benützt deshalb schon bei Frequenzen ab 10MHz ein völlig anderes Denkmodell:**

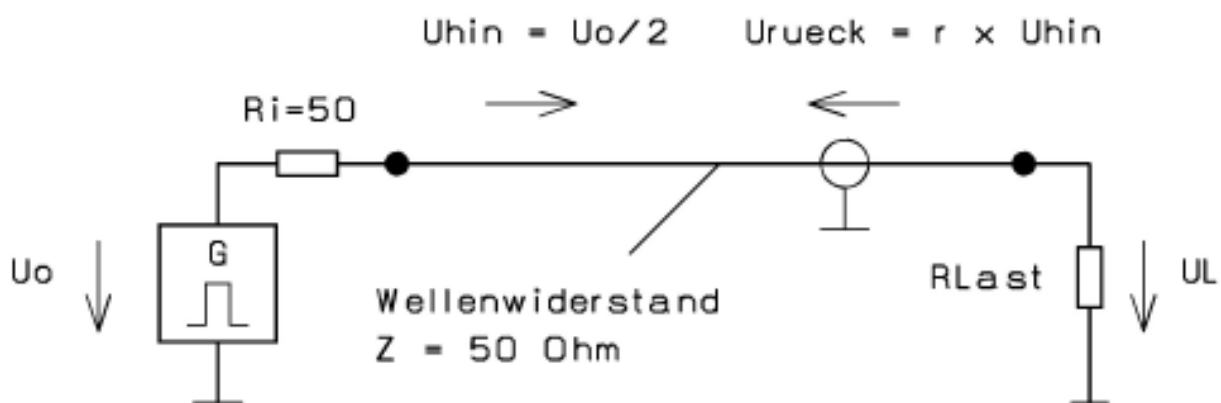
Überall im System wird derselbe „Systemwiderstand“ verwendet (üblich sind 75Ω bei der Unterhaltungselektronik und Videotechnik, dagegen 50Ω bei allen anderen Gebieten). Er gilt für den Innenwiderstand der Speisespannungsquellen, die Ein- und Ausgangswiderstände der verwendeten Baugruppen, den Wellenwiderstand aller Verbindungskabel und die Abschlusswiderstände.

Erste Erkenntnis:

Der Kern dieser Sache ist also der Versuch der perfekten Leistungsanpassung (mit $R_i = R_a$) im kompletten System!

Durch geeignete Messgeräte (=Richtkoppler) misst man nun die Abweichungen von diesem Idealfall und drückt sie durch „**Reflektionsfaktoren**“ aus. Dazu sollte man jedoch die grundsätzlichen Vorgänge auf Leitungen etwas kennen.

Beispiel: Eine Signalquelle schickt kurze Pulse in ein Verbindungskabel zu einem beliebigen Lastwiderstand oder irgendeiner Baugruppe.



Dann laufen folgende Vorgänge ab:

- Bei größerer Kabellänge „merkt man wegen der endlichen Signal-Ausbreitungsgeschwindigkeit (in Luft sind es in einer Nanosekunde 30cm) im ersten Moment noch nichts vom Verbraucher“.
- Folglich weist das Kabel einen Eingangswiderstand von 50Ω auf und es bildet mit dem Innenwiderstand der Quelle einen Spannungsteiler. Dadurch herrscht also zunächst „Leistungsanpassung“ (weil $R_i = R_a$) und die vom Kabeingang aufgenommene **maximal abgebbare Wirkleistung** (zu der die Spannungsamplitude $U_o/2$ gehört) macht sich mit der Kabelgeschwindigkeit auf den Weg in Richtung Verbraucher.
- Kommt diese „hinlaufende Wirkleistung“ (sie wird immer als „**hinlaufende Welle**“ bezeichnet) am Verbraucher an, so wird sie nur dann voll absorbiert, wenn auch hier Leistungsanpassung ($R_{LAST} = Z = 50\Omega$) herrscht. Jede Abweichung des Lastwiderstandes vom Systemwiderstand bedeutet, dass nun keine Leistungsanpassung mehr möglich ist. **Folglich wird die „überschüssige Energie in Richtung Signalquelle zurückgeschickt“ (= reflektiert) und wir können plötzlich zusätzlich eine „rücklaufende Welle“ auf der Leitung beobachten!**

Für diesen Sachverhalt wurde der Begriff des **Reflektionsfaktors** „ r “ eingeführt und wir erhalten damit:

$$r = \frac{(Z_{\text{Last}} - Z)}{(Z_{\text{Last}} + Z)} = \frac{U_{\text{rück}}}{U_{\text{hin}}} \quad \text{bzw.} \quad U_{\text{rück}} = r \cdot U_{\text{hin}}$$

Für die **Spannung am Lastwiderstand** können wir dann schreiben:

$$U_{\text{Last}} = U_{\text{hin}} + U_{\text{rück}}$$

Hinweis:

Für die auf dem Kabel wandernden Wellen muss ja -- da es sich hierbei um elektrische Energie handelt -- , das Ohm'sche Gesetz gelten. Damit kann bei Bedarf der zugehörige Strom berechnet werden:

$$Z = \frac{U_{\text{hin}}}{I_{\text{hin}}} \quad \text{bzw.} \quad Z = \frac{U_{\text{rück}}}{I_{\text{rück}}}$$

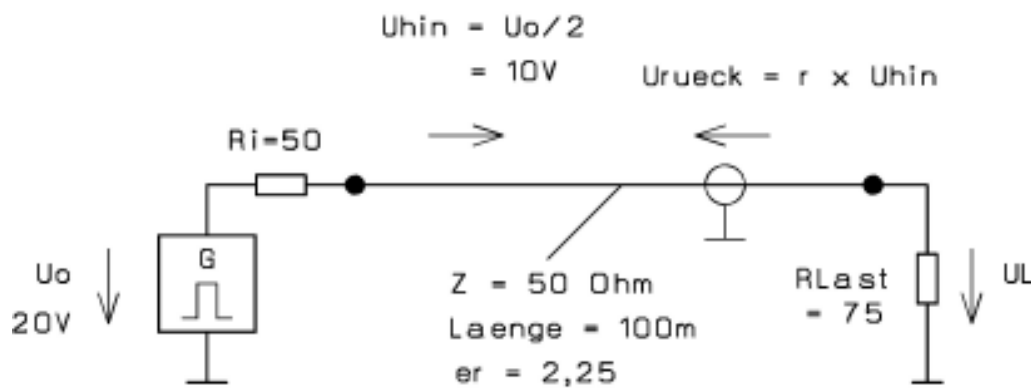
Übungsaufgabe: Ein Pulsgenerator mit dem Innenwiderstand 50Ω liefert im Leerlauf an seinen Klemmen kurze Impulse mit der Folgefrequenz 1kHz, der Pulsbreite 10ns und der Amplitude 20V. Er wird nun über ein 100m langes Kabel ($Z = 50\Omega$) mit einem Abschlusswiderstand von 75Ω verbunden. Die Dielektrizitätskonstante der Kabel-Innenisolation beträgt $\epsilon = 2,25$.

Bestimmen Sie die Signalverläufe

a) am Kabeleingang

b) in Kabelmitte

c) am Kabelende



Lösung:

a) Bestimmung des Reflektionsfaktors:

$$r = \frac{R_{\text{LAST}} - Z}{R_{\text{LAST}} + Z} = \frac{75\Omega - 50\Omega}{75\Omega + 50\Omega} = +0,2$$

b) Bestimmung der Kabelgeschwindigkeit:

$$v_{\text{Kabel}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_R}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m}}{\sqrt{2,25 \text{ s}}} = 2 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

c) Signal-Laufzeit für 100 m Kabellänge:

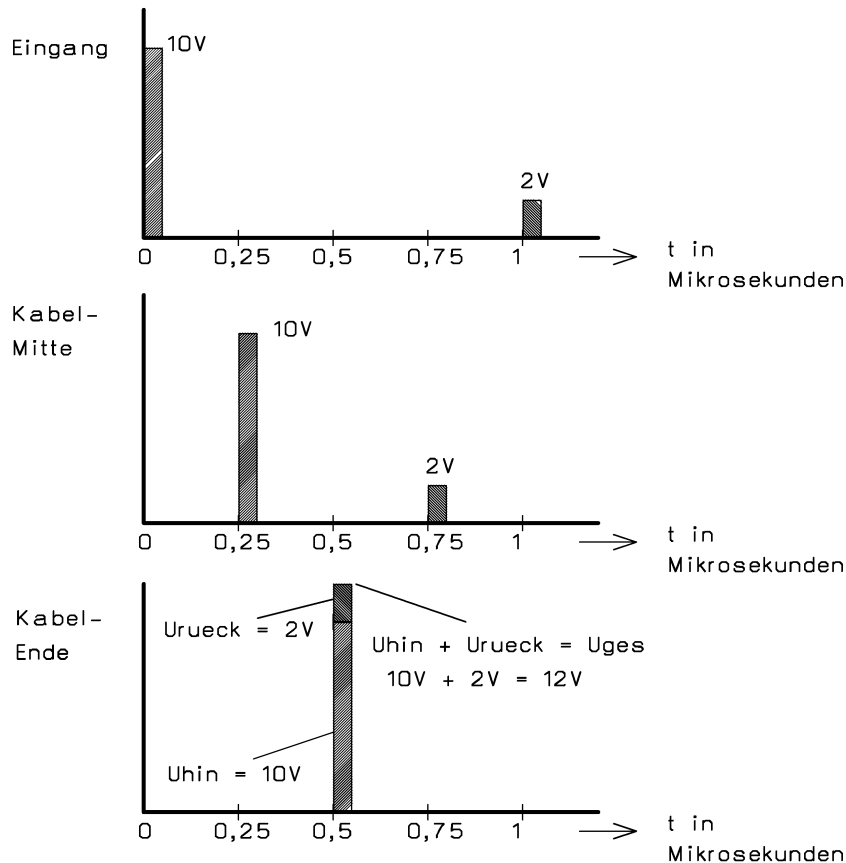
$$t_{\text{Delay}} = \frac{100 \text{ m} \cdot \text{s}}{2 \cdot 10^8 \text{ m}} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

d) Hinlaufende Welle:

$$U_{\text{hin}} = \frac{U_0}{2} = \frac{20 \text{ V}}{2} = 10 \text{ V}$$

e) Rücklaufende Welle:

$$U_{\text{rück}} = r \cdot U_{\text{hin}} = 0,2 \cdot 10 \text{ V} = 2 \text{ V}$$



Am Eingang beobachtet man zunächst die hinlaufende Welle mit einer Amplitude von 10V (= halber Ursprung). Nach 2 x Kabellauzeit taucht das Echo (= rücklaufende Welle) auf.

Nach 0,25 Mikrosekunden hat die hinlaufende Welle die Kabelmitte erreicht. Das Echo kommt 0,5 Mikrosekunden später vorbei.

Genau nach 0,5 Mikrosekunden erreicht die hinlaufende Welle das Kabelende. Die angelieferte maximale Wirkleistung kann jedoch nicht vollständig an den „falschen“ Abschlusswiderstand abgegeben werden. Deshalb entsteht sofort eine „rücklaufende Welle“ mit 2V, durch die alle „überschüssige Energie“ zurück zur Quelle transportiert wird. Für einen kurzen Augenblick misst man also dort eine Spannung von 12V.

Anmerkungen:

Der Energietransport auf der Leitung geschieht natürlich immer durch Leistungen. Um aber bei diesen Leistungen wieder mit **Spannungen** rechnen zu können, zieht man einfach die **Quadratwurzel aus der Leistungsformel** und tauft das Ergebnis „**Welle**“.

Das ergibt die „hinlaufende Welle a“ zu

$$a = \sqrt{P_{\text{hin}}} = \sqrt{\frac{U_{\text{hin}}^2}{Z}} = \frac{U_{\text{hin}}}{\sqrt{Z}}$$

Entsprechend gilt für die „rücklaufende Welle b“:

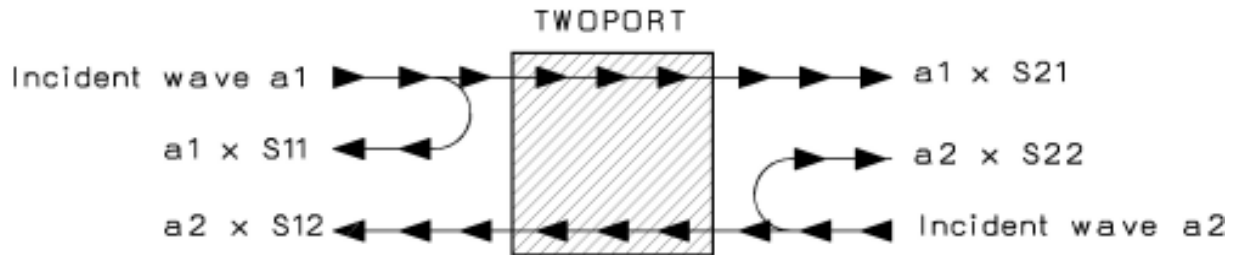
$$b = \sqrt{P_{\text{rück}}} = \sqrt{\frac{U_{\text{rück}}^2}{Z}} = \frac{U_{\text{rück}}}{\sqrt{Z}}$$

Außerdem spricht man bei den verschiedenen Anschlüssen eines Bausteins nun von „**PORTS**“ (oder „**Toren**“). Ein einfacher Baustein mit Eingang und Ausgang heißt dann „**TWO PORT**“ oder „Zweiter“, ein einfaches Bauteil (z. B. eine Diode oder ein Widerstand) wäre ein „**ONE PORT DEVICE**“ oder ein „**EINTOR**“.

Die verwendeten TWOPORT-Baugruppen (wie Filter, Verstärker, Abschwächer, Weichen....) weisen nun alle eine Verstärkung oder Dämpfung auf. Das bedeutet:

Die hinlaufende Welle an einem Port wird bei einem solchen „TWOPORT“ stets auch ein Signal am anderen Port erzeugen. Diese Wirkung lässt sich ebenfalls leicht messen und stellt die zweite Größe zur Beschreibung der Baustein-Eigenschaften dar.

Wir wollen nun die eben besprochenen Überlegungen auf ein Zweitor, nämlich einen Verstärker anwenden und das Durcheinander der verschiedenen laufenden Wellen in einer „**FLOW CHART**“ darstellen:



Erläuterungen zur Eingangsseite:

Die Ansteuerung des Eingangs durch die Signalquelle drücken wir durch die hinlaufende Welle a_1 aus (= „incident wave“). In der Praxis werden wir dann als Folge eine rücklaufende Welle b_1 auf der Eingangsleitung beobachten können (= reflected wave). Sie lässt sich durch einen Richtkoppler von der hinlaufenden Welle trennen und besteht aus zwei Anteilen, nämlich

- 1) aus einem **reflektierten Anteil von a_1** , der von den Abweichungen des Eingangswiderstandes gegenüber $Z = 50\Omega$ herrührt und
- 2) einem zweiten Anteil, der durch **Rückwirkungen des Ausgangs** (bei dem sich ja auch irgendwelche Signale a_2 herumtreiben) **auf den Eingang** erzeugt wird.

Damit lässt sich das Echo so ausdrücken:

$$b_1 = a_1 \cdot S_{11} + a_2 \cdot S_{12}$$

Bedeutung der Koeffizienten:

Wird der Ausgang korrekt mit $R_{last} = Z$ abgeschlossen, dann müssen wir dort nicht mehr mit Echos rechnen, die zum Verstärkerausgang zurücklaufen. Also wird $a_2 = \text{Null}$ und wir können plötzlich unseren Faktor S_{11} bestimmen:

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \quad \text{für } a_2 = \text{Null}$$

Aber das kennen wir doch, denn damit ist **S_{11} nichts anderes als unser Eingangs - Reflektionsfaktor r aus dem vorigen Rechenbeispiel** -- bei diesem Zweitor natürlich für **korrekten Abschluss am Ausgang**. Leider ist er in der Praxis immer komplex, deshalb wird in den S-Parameter-Dateien der Halbleiterhersteller immer „Betrag“ (= MAGNITUDE = MAG) und „Phase“ (= ANGLE = ANG) bei verschiedenen Frequenzen angegeben!

Die Größe **S_{12}** ist dann der „**Rückwärts-Übertragungsfaktor**“ vom Ausgang zurück zum Eingang. Er liefert uns Informationen über die Rückwirkungen im Zweitor, wenn der Eingang nicht angesteuert und zusätzlich korrekt mit $Z = 50\Omega$ abgeschlossen wird. Auf den Ausgang wird in diesem Fall mit einem Signalgenerator die Leistung a_2 „draufgeblasen“:

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \quad \text{für } a_1 = \text{Null}$$

Und nun nehmen wir uns die Ausgangsseite vor:

Wir denken uns auf der rechten Seite einen Signalgenerator, der den Ausgang des Zweitors mit der Wellengröße a_2 quält. Mit einem Richtkoppler können wir dann in der Ausgangsleitung folgendes „Echo b_2 “ messen (das wieder aus 2 Teilen besteht):

$$b_2 = a_1 \cdot S_{21} + a_2 \cdot S_{22}$$

Wird der Eingang des Zweitors gerade nicht angesteuert, dann ist a_1 automatisch Null. Also kann ein aus dem „Ausgang des Zweitors herauslaufendes Signal“ nur durch eine Reflektion am nicht perfekten Innenwiderstand entstanden sein. **Damit ist S_{22} nichts anderes als der Ausgangs - Reflektionsfaktor des Zweitores** (natürlich bei korrektem Abschluss des Einganges mit $Z = 50\Omega$)!

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \quad \text{für } a_1 = \text{Null.}$$

Nun bleibt nur noch der linke Summand übrig, aber der macht uns keine Probleme:

Wird nur der Eingang von einer Quelle mit 50Ω Innenwiderstand angesteuert und der Ausgang korrekt mit $Z = 50\Omega$ abgeschlossen, dann haben wir die klassische Verstärkerschaltung vor uns. Dann ist nämlich $a_2 = \text{Null}$.

S_{21} ist folglich nichts anderes als die „Spannungsverstärkung des Zweitores bei korrekter Anpassung aus Ausgang“!

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \quad \text{für } a_2 = \text{Null.}$$

Behutsamer Hinweis: Wir arbeiten in Wirklichkeit ja stets mit Leistungen, und eine Leistung ändert sich bekanntlich mit dem Quadrat der Spannung. Also bekommen wir die **Leistungsverstärkung** eines solchen Zweitores im Idealfall als **$(S_{21})^2$** und **nicht als S_{21}**also Vorsicht!

Hinweise für die Praxis:

Aus den Eingangs- bzw. Ausgangs - Reflektionsfaktoren lassen sich natürlich bei Bedarf die zugehörigen Widerstandswerte bestimmen. Bitte aber beachten, dass diese im Normalfall komplex sind und wir deshalb einen Wirk- und einen Blindanteil erhalten:

z. B. Eingangswiderstand $Z_{11} = Z \cdot \frac{(1 + S_{11})}{(1 - S_{11})}$

oder der Innenwiderstand $Z_{22} = Z \cdot \frac{(1 + S_{22})}{(1 - S_{22})}$

Genauso lassen sich aus den gemessenen komplexen Widerstandswerten die Reflektionsfaktoren bestimmen, aber da greift man einfach zum Smith-Diagramm oder -- noch besser! -- zu modernen HF-CAD-Programmen (APLAC, PUFF; ANSOFT-Serenade...) oder passenden Tools aus dem Internet. Das geht viel schneller und besser (sobald man sich damit auskennt...).