

Einheiten

1. Allgemein gebräuchliche Einheiten

| | | | |
|----------------|---------------------|------------------|----------------|
| Spannung U | in Volt (V) | Ableitung G | in Siemens (S) |
| Strom I | in Ampere (A) | Induktivität L | in Henry (H) |
| Leistung N | in Watt (W) | Kapazität C | in Farad (F) |
| Widerstand R | in Ohm (Ω) | Frequenz f | in Hertz (Hz) |

| | | | |
|-----------------------------|-------------------|---------------------------|-----------------------|
| Nach AEF ¹⁾ ist: | M (Mega) = 10^6 | m (Milli) = 10^{-3} | n (Nano) = 10^{-9} |
| | k (Kilo) = 10^3 | μ (Mikro) = 10^{-6} | p (Piko) = 10^{-12} |

2. Das Neper und das Dezibel

In der Fernmeldetechnik ist für das Verhältnis von elektrischen oder akustischen Größen gleicher Einheit zueinander oder zu ihren genormten Bezugswerten ein logarithmisches Maß gebräuchlich. Das entspricht dem exponentiellen Verlauf von Spannungen, Strömen und Leistungen auf elektrischen Leitungen und der Unterschiedsempfindlichkeit des menschlichen Gehörsinns. Als Einheit des logarithmischen Verhältnisses gilt bei Benutzung der natürlichen Logarithmen das Neper (N), bei Benutzung der Briggschen Logarithmen das Bel (b) oder, was gebräuchlicher ist, sein 10. Teil, das Dezibel (db).

Sind N_1 und N_2 zwei Leistungen, die aufeinander bezogen werden sollen, A_1 und A_2 zwei Spannungen, Ströme oder Schalldrücke, die quadratisch in die Leistung eingehen, so erhält man ihr Verhältnis nach den geltenden Bestimmungen als

$$\frac{1}{2} \ln \frac{N_1}{N_2} \text{ bzw. } \ln \frac{A_1}{A_2} \text{ in Neper}^2) \text{ und als } 10 \log \frac{N_1}{N_2} \text{ bzw. } 20 \log \frac{A_1}{A_2} \text{ in Dezibel}^3)$$

Neper und Dezibel nehmen den Charakter von Einheiten für die Dämpfung und Verstärkung von Vierpolen bzw. für den Pegel elektrischer und akustischer Größen an. Für ihre zahlenmäßige Ermittlung gelten je nach den Betriebsverhältnissen die im nächsten Abschnitt ausgeführten Regeln.

1) Ausschuß für Einheiten und Formelgrößen.

2) Bei der Festlegung des Neper waren die der Messung zugänglichen Spannungen und Ströme Ausgangspunkt:

$$e^x = \frac{A_1}{A_2}; \quad x = \ln \frac{A_1}{A_2} \text{ in Neper.}$$

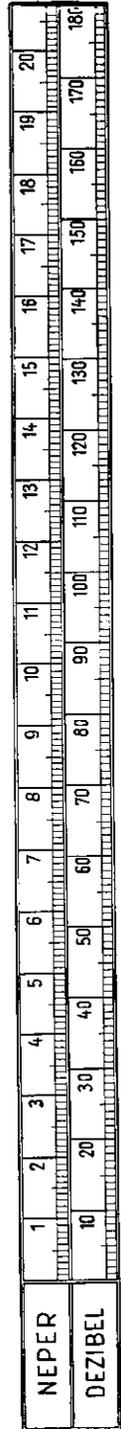
Daher gilt für das Leistungsverhältnis $\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 = e^{2x}$; $x = \frac{1}{2} \ln \frac{N_1}{N_2}$ in Neper.

3) Beim Bel ging man von der dem elektrischen und akustischen Gebiet gemeinsamen Größe Leistung aus:

$$10^x = \frac{N_1}{N_2}; \quad x = \log \frac{N_1}{N_2} \text{ in Bel bzw. } 10^{0,1x} = \frac{N_1}{N_2}; \quad x = 10 \log \frac{N_1}{N_2} \text{ in Dezibel.}$$

Für das Spannungs- und Stromverhältnis ergibt sich daraus

$$10^x = \frac{N_1}{N_2} \cdot \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2; \quad 10^{\frac{x}{2}} = \frac{A_1}{A_2}; \quad x = 2 \cdot \log \frac{A_1}{A_2} \text{ in Bel bzw. } 10^{0,1 \cdot \frac{x}{2}} = \frac{A_1}{A_2}; \quad x = 20 \log \frac{A_1}{A_2} \text{ in Dezibel.}$$

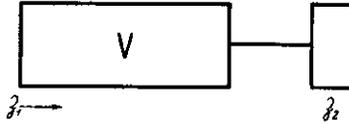


Neper-Dezibel-Umrechnung
Zahlenwerte a in Neper und b in Dezibel sind untereinander umzurechnen nach den Formeln: $a = b \cdot 0,1151$; $b = a \cdot 8,686$

Grundbegriffe

I. Scheinwiderstände eines Vierpols

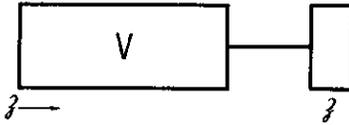
Der Eingangsscheinwiderstand Z_1 eines Vierpols ist außer von seinen eigenen Werten vom Abschlußwiderstand Z_2 abhängig. Es ist ohne weiteres ersichtlich, daß im Fall $Z_2 = 0$ (Kurzschluß am Ausgang)



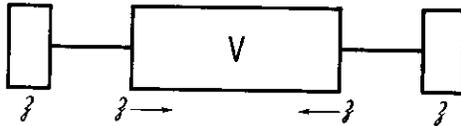
$Z_1 > Z_2$ ist, und daß bei $Z_2 = \infty$ (Leerlauf) $Z_1 < Z_2$ ist. Bei anwachsendem Z_2 steigt der Wert Z_1 mit, jedoch um so schwächer, je größer die Dämpfung des Vierpols ist.

Kenn- oder Wellenwiderstand

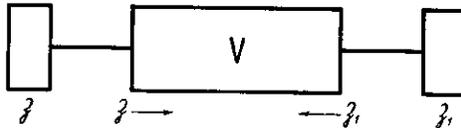
ist derjenige Scheinwiderstand, bei dem $Z_1 = Z_2 = Z$ wird:



Können hierbei Ein- und Ausgang des Vierpols vertauscht werden, so nennt man ihn einen symmetrischen Vierpol:



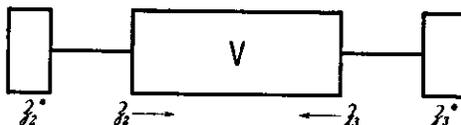
Im allgemeinen Fall eines unsymmetrischen Vierpols sind Z und Z_1 die Kennwiderstände, wenn Z der Eingangsscheinwiderstand bei Abschluß des Ausgangs mit Z_1 und wenn Z_1 der Ausgangsscheinwiderstand bei Abschluß des Eingangs mit Z ist:



Bei gleichmäßigen (homogenen) Leitungen (symmetrischer Vierpol) ist der Ausdruck Wellenwiderstand der gebräuchlichere. Der Wellenwiderstand ist nur von den kilometrischen Leitungs konstanten C , G , L und R , nicht aber von der Länge der Leitung abhängig. Er ist frequenzabhängig und auch gleich dem Grenzwert des Scheinwiderstands bei unendlicher Leitungslänge. Bei der Zusammenschaltung von zwei Leitungen mit verschiedenem Wellenwiderstand entsteht eine Stoßstelle, die den Wellenverlauf stört.

Konjugiert-komplexe Scheinwiderstände

Ist der innere Widerstand einer Stromquelle rein ohmisch, so erhält man bekanntlich größte Leistung an einem gleichgroßen Abschlußwiderstand (Anpassung). Bei komplexen Widerständen wird größte Leistung dann übertragen, wenn Z_2^* zu Z_3 bzw. wenn Z_3^* zu Z_2 konjugiert-komplex ist, d. h., wenn die Beträge und die Winkel von Z_2^* und Z_3 bzw. Z_3^* und Z_2 einander gleich, die Winkelvorzeichen jedoch verschieden sind.



2. Dämpfungen und Pegel

Leitungs­dämpfung

Sind U_1 und I_1 Spannung bzw. Strom am Anfang, U_2 und I_2 am Ende der Leitung, dann ist bei beiderseitigem Anschluß mit dem Wellenwiderstand

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_1}{I_2} = e^{\alpha} = e^b \cdot e^{ja}$$

Dabei ist $g = b + ja$ das **Übertragungsmaß**; b heißt das Dämpfungsmaß, a das Phasenmaß. Die Dämpfung b ist dann bestimmt durch das Verhältnis der Scheinleistung $N_1 = I_1 U_1$ am Anfang zur Scheinleistung $N_2 = I_2 U_2$ am Ende gemäß der Beziehung

$$(1) \quad e^{2b} = \frac{N_1}{N_2}$$

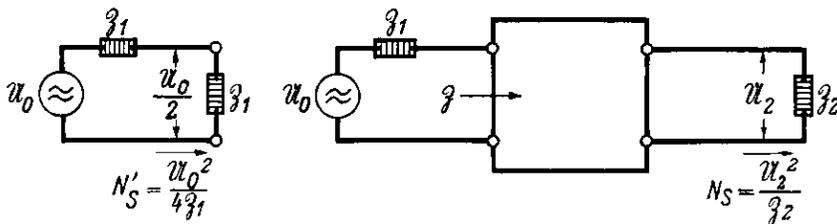
oder auch

$$(2) \quad b = \ln \frac{U_1}{U_2} = \ln \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{2} \ln \frac{I_1 U_1}{I_2 U_2} \text{ [N]}.$$

Die so bestimmte Dämpfung b heißt **Vierpoldämpfung** der Leitung. Allgemein ist Vierpoldämpfung die Dämpfung eines mit seinen Kennwiderständen abgeschlossenen Vierpols.

Betriebsdämpfung

Um für beliebig abgeschlossene Vierpole ein bequemes Maß ihrer Dämpfung unter Betriebsverhältnissen zu haben, ist der Begriff der **Betriebsdämpfung** geschaffen: Liegt am Eingang des betrachteten Vierpols mit einem beliebigen Wellenwiderstand Z ein Generator mit dem inneren Widerstand Z_1 , so ist die Betriebsdämpfung b^B bestimmt durch das logarithmische Verhältnis der Scheinleistung N'_S ,



die der Generator an einen Widerstand Z_1 abgeben würde, zu der Scheinleistung N_S , die er unter Zwischenschaltung des Vierpols an dessen Abschlußwiderstand Z_2 abgibt.

Mit den Bezeichnungen des Bildes, ferner Z = Betrag von Z und U = Betrag von U ist also:

$$(3) \quad e^{2b_B} = \frac{N'_S}{N_S} = \frac{U_0^2 \cdot Z_2}{4 U_2^2 \cdot Z_1}$$

oder

$$(4) \quad b_B = \ln \frac{U_0}{2 U_2} + \frac{1}{2} \ln \frac{Z_2}{Z_1} \text{ [N]}.$$

Positives Vorzeichen bedeutet Dämpfung, negatives Vorzeichen bedeutet Verstärkung.

Pegel

Zur Darstellung der Leistungs- bzw. Spannungs- und Stromverhältnisse längs eines Übertragungssystems wird der Begriff **Pegel** — ähnlich den Pegelangaben für Wasserstände — gebraucht. Je nach den Größen, die zueinander in ein logarithmisches Verhältnis gesetzt werden, ist zu unterscheiden

zwischen Leistungs-, Spannungs- und Strompegel. Wird dabei der Wert an der Meßstelle verglichen mit dem entsprechenden am Anfang des Übertragungssystems, so spricht man vom relativen Pegel, wird er verglichen mit einem genormten Bezugswert, so spricht man vom absoluten Pegel.

Sind N_x und U_x Leistung bzw. Spannung an der Meßstelle, N_A und U_A Leistung bzw. Spannung am Anfang des Systems, so ergibt sich demnach:

für den relativen Leistungspegel

$$(5) \quad p = \frac{1}{2} \ln \frac{N_x}{N_A} \text{ [N]}$$

für den relativen Spannungspegel

$$(6) \quad p_s = \ln \frac{U_x}{U_A} \text{ [N]}.$$

Der relative Pegel am Anfang der Leitung ist also immer gleich Null.

Sind ferner N_1 und U_1 genormte Bezugsgrößen, so sind der absolute Leistungspegel

$$(7) \quad p = \frac{1}{2} \ln \frac{N_x}{N_1} \text{ [N]}$$

und der absolute Spannungspegel

$$(8) \quad p_s = \ln \frac{U_x}{U_1} \text{ [N]}.$$

Durch zwischenstaatliche Regelung ist festgesetzt, daß diese Normalwerte durch einen „Normalgenerator“ gegeben sind, der bei konstanter EMK einen inneren Widerstand von $Z_1 = 600 \Omega \llangle 0^\circ$ hat und an einen gleichen äußeren Widerstand die Leistung $N_1 = 1 \text{ mW}$ abgibt. Die EMK des Normalgenerators ist demnach $U_0 = 1,55 \text{ V}$, der Normalwert der Klemmenspannung an dem Belastungswiderstand Z_1 beträgt $U_1 = \frac{U_0}{2} = 0,775 \text{ V}$ und der Normalwert des in diesem Belastungswiderstand fließenden Stromes $I_1 = 1,29 \text{ mA}$. Die Normalwerte $0,775 \text{ V}$, $1,29 \text{ mA}$ und 1 mW werden mit „Spannungs-, Strom- bzw. Leistungspegel Null“ bezeichnet.

Ferner ist man übereingekommen, dem an irgendeinem Punkt der Leitung bestehenden Leistungspegel p bei positiver Betriebsdämpfung ein negatives Vorzeichen zu geben und umgekehrt bei negativer Betriebsdämpfung (= Betriebsverstärkung) ein positives Vorzeichen. Es ist also

$$(9) \quad e^{2p} = e^{-2b_B}$$

d. h., wenn als Stromquelle ein Normalgenerator benutzt wird, hat der Leistungspegel p den Betrag der Betriebsdämpfung b_B .

Wird der Spannungspegel p_s mit einem hochohmigen Empfänger an Zwischenpunkten der Leitung gemessen, so daß Z_2 durch den Wellenwiderstand der weiterlaufenden Leitung gegeben ist, so berechnet sich der Leistungspegel am Meßpunkt aus der dort beobachteten Spannung U_2 aus Gleichung (4) in Verbindung mit Gleichung (9) zu

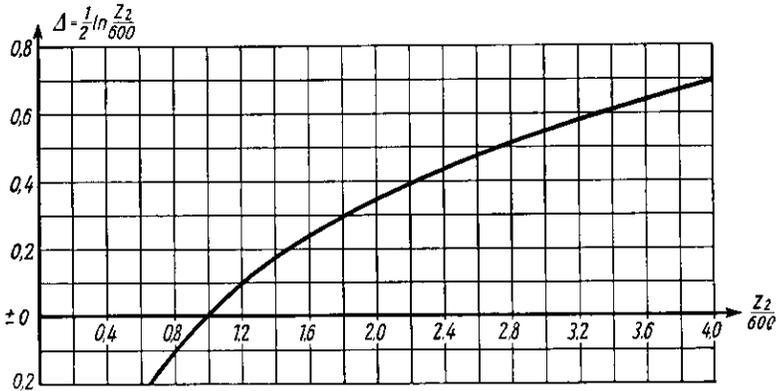
$$(10) \quad p = \ln \frac{U_2}{0,775} - \frac{1}{2} \ln \frac{Z_2}{600} \text{ [N]},$$

während für den Spannungspegel

$$(11) \quad p_s = \ln \frac{U_2}{0,775} \text{ [N]}$$

folgt. Der Leistungspegel unterscheidet sich also vom Spannungspegel lediglich durch die Korrekturgröße $\Delta = \frac{1}{2} \ln \frac{Z_2}{600}$, die durch die Scheinwiderstandsabweichung von Z_2 gegen 600Ω bedingt ist.

Zum Vergleich des Spannungspegels mit dem Leistungspegel bei beliebigem Z_2 dient das folgende Diagramm, das den Unterschied zwischen den Gleichungen (10) und (11) in Abhängigkeit von dem Verhältnis $Z_2/600$ darstellt.



Ermittlung des Leistungspegels p aus dem Spannungspegel p_s

$$p = p_s - \Delta = \ln \frac{U_2}{0,775} - \frac{1}{2} \ln \frac{Z_2}{600}$$

Restdämpfung

Ist auch noch $Z_2 = 600 \Omega$, so wird aus der Betriebsdämpfung die Restdämpfung. Wie die Gleichungen (10) und (11) zeigen, wird in diesem Fall der Leistungspegel p gleich dem gemessenen Wert des Spannungspegels p_s und hat den Betrag der Restdämpfung.

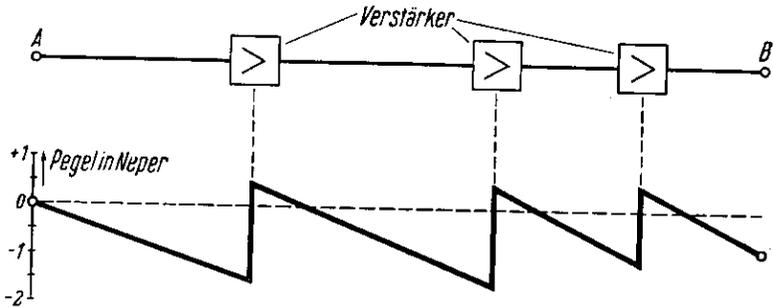
Tafel für Pegelwerte

| I. Spannungspegel und Spannung | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| p_s N | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | |
| -10,0 | 35,18 | 31,84 | 28,81 | 26,07 | 23,59 | 21,34 | 19,31 | 17,47 | 15,81 | 14,31 | μV |
| 9,0 | 95,64 | 86,54 | 78,31 | 70,84 | 64,10 | 58,01 | 52,47 | 47,49 | 42,98 | 38,89 | |
| 8,0 | 260,0 | 235,3 | 212,9 | 192,6 | 174,3 | 157,7 | 142,7 | 129,1 | 116,8 | 105,7 | |
| 7,0 | 706,5 | 639,4 | 578,8 | 523,6 | 473,7 | 428,7 | 387,9 | 351,0 | 317,5 | 287,4 | |
| 6,0 | 1,921 | 1,738 | 1,573 | 1,423 | 1,288 | 1,165 | 1,054 | 954,0 | 863,2 | 781,1 | |
| 5,0 | 5,222 | 4,726 | 4,275 | 3,869 | 3,500 | 3,167 | 2,866 | 2,593 | 2,346 | 2,123 | mV |
| 4,0 | 14,19 | 12,84 | 11,62 | 10,52 | 9,515 | 8,609 | 7,791 | 7,045 | 6,379 | 5,771 | |
| 3,0 | 38,56 | 34,91 | 31,59 | 28,59 | 25,87 | 23,40 | 21,17 | 19,16 | 17,34 | 15,69 | |
| 2,0 | 104,9 | 94,91 | 85,87 | 77,70 | 70,33 | 63,63 | 57,58 | 52,01 | 47,14 | 42,65 | |
| 1,0 | 285,1 | 258,0 | 233,4 | 211,2 | 191,1 | 172,9 | 156,5 | 141,6 | 128,1 | 115,9 | |
| -0,0 | 775,0 | 701,4 | 634,7 | 574,1 | 519,4 | 470,0 | 425,4 | 384,8 | 348,2 | 315,0 | V |
| + 0,0 | 775,0 | 856,4 | 946,3 | 1,046 | 1,156 | 1,278 | 1,412 | 1,560 | 1,725 | 1,906 | |
| 1,0 | 2,106 | 2,328 | 2,573 | 2,843 | 3,143 | 3,473 | 3,838 | 4,242 | 4,689 | 5,182 | |
| 2,0 | 5,726 | 6,329 | 6,994 | 7,730 | 8,540 | 9,439 | 10,43 | 11,55 | 12,74 | 14,08 | |
| 3,0 | 15,58 | 17,20 | 19,01 | 21,01 | 23,22 | 25,67 | 28,36 | 31,35 | 34,64 | 38,28 | |
| 4,0 | 42,31 | 46,76 | 51,68 | 57,12 | 63,12 | 69,76 | 77,10 | 85,25 | 94,16 | 104,1 | |
| + 5,0 | 115,0 | 127,1 | 140,5 | 155,2 | 171,6 | 189,6 | 209,6 | 231,5 | 256,0 | 282,9 | |

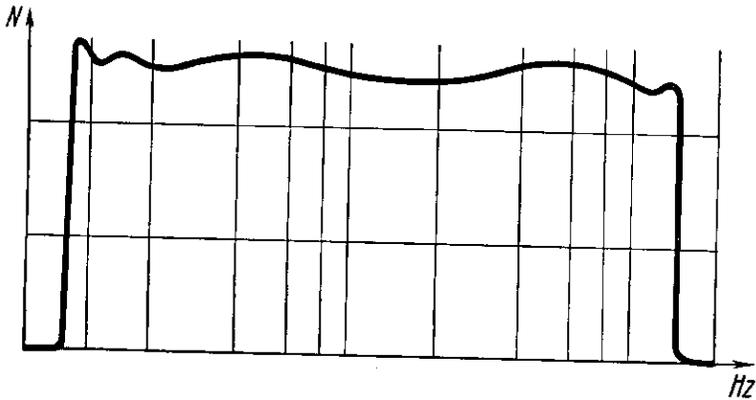
| II. Leistungspegel und Leistung | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| p N | -4,0 | -3,0 | -2,0 | -1,0 | ± 0,0 | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 |
| Leistung | 0,34 μW | 2,48 μW | 18,3 μW | 135 μW | 1,00 mW | 7,39 mW | 54,6 mW | 404 mW | 2,98 W | 22,0 W |

Pegeldiagramm und Pegelkurve

Das Pegeldiagramm zeigt den Verlauf des relativen Leistungspegels längs einer Leitung A—B.



Die Pegelkurve, wie sie z. B. der Pegelschreiber selbsttätig aufzeichnet, zeigt die Frequenzabhängigkeit des absoluten Pegels an der Meßstelle.



Rückflußdämpfung

Stoßen zwei Leitungen mit den Scheinwiderständen \mathcal{Z}_1 und \mathcal{Z}_2 zusammen, so verursacht die Stoßstelle eine reflektierte Welle. Das Verhältnis der reflektierten Welle zur ankommenden Welle ist bekanntlich durch den Reflexionsfaktor r gegeben, der sich aus den Scheinwiderständen \mathcal{Z}_1 und \mathcal{Z}_2 aus der Gleichung

$$(12) \quad r = \frac{\mathcal{Z}_2 - \mathcal{Z}_1}{\mathcal{Z}_2 + \mathcal{Z}_1}$$

bestimmt. Im Fall idealer Anpassung $\mathcal{Z}_2 = \mathcal{Z}_1$ verschwindet die reflektierte Welle. Die reflektierte Welle fließt der ursprünglichen Stromrichtung entgegen zum Leitungsanfang zurück und kann dort eine echoähnliche Wirkung hervorrufen. Das logarithmische Verhältnis von ankommender und reflektierter Welle heißt **Rückflußdämpfung**; sie ist bestimmt durch

$$(13) \quad b_r = \ln \left| \frac{1}{r} \right| = \ln \left| \frac{\mathcal{Z}_2 + \mathcal{Z}_1}{\mathcal{Z}_2 - \mathcal{Z}_1} \right| \text{ [N].}$$

Fehlerdämpfung

In Ausgleichschaltungen, wie sie bei Zweidrahtverstärkern und Vierdrahtgabelschaltungen üblich sind, verursacht der Unterschied zwischen Nachbildung der Leitung und wirklicher Leitung eine Rückkopplung, die unter besonderen Umständen zur Selbsterregung der Leitungen führen kann. Zur Kennzeichnung der Genauigkeit des erreichten Abgleichs der Nachbildung verwendet man die

Fehlerdämpfung. Diese ist bestimmt durch den Scheinwiderstand \mathfrak{N} der Nachbildung und den Scheinwiderstand \mathfrak{S} der Leitung gemäß der Gleichung

$$(14) \quad b_f = \ln \left| \frac{\mathfrak{S} + \mathfrak{N}}{\mathfrak{S} - \mathfrak{N}} \right| [N].$$

Im allgemeinen ist die Fehlerdämpfung stark frequenzabhängig. Man kennzeichnet dann die Nachbildung durch den kleinsten Wert der Fehlerdämpfung innerhalb des Übertragungsbereichs der Leitung, z. B. zwischen 300 und 2400 Hz.

Nebensprechdämpfung

Zwischen zwei benachbarten Doppelleitungen oder zwischen ihnen und der aus ihnen gebildeten Viererleitung (Phantomkreis) entstehen störende Übertragungen (Nebensprechen) durch magnetische und elektrische Kopplungen.

Die Nebensprechdämpfung ist gegeben durch das Verhältnis der in den Anfang der störenden Leitung gesendeten Leistung zu der am Anfang (Nebensprechen) oder Ende (Gegennebensprechen) der gestörten Leitung unter bestimmten Abschlußbedingungen (z. B. Abschluß mit dem Wellenwiderstand) auftretenden Leistung.

Die in der Hauptsache das Nebensprechen verursachenden Kapazitätsunterschiede werden als Kopplungen folgendermaßen bezeichnet:

| Vorgang innerhalb eines Vierers V | Bezeichnung | Dämpfung | Kopplung |
|--|---------------------------------|----------|----------|
| Übersprechen Stamm 1 auf Stamm 2 | I/2 | b_1 | k_1 |
| Mitsprechen Vierer auf Stamm 1 | V/I | b_2 | k_2 |
| Mitsprechen Vierer auf Stamm 2 | V/2 | b_3 | k_3 |
| Erdunsymmetrie des Stammes 1 | E/I | — | e_1 |
| Erdunsymmetrie des Stammes 2 | E/2 | — | e_2 |
| Erdunsymmetrie des Vierers | E/V | — | e_3 |
| Vorgang zwischen Nachbarvierern I und II | | | |
| Übersprechen | | | |
| Vierer I auf Vierer II | I, II | b_4 | k_4 |
| Stamm 1 des Vierers I auf Vierer II | I ₁ /II | b_5 | k_5 |
| Stamm 2 des Vierers I auf Vierer II | I ₂ /II | b_6 | k_6 |
| Vierer I auf Stamm 1 des Vierers II | I/II ₁ | b_7 | k_7 |
| Vierer I auf Stamm 2 des Vierers II | I/II ₂ | b_8 | k_8 |
| Stamm 1 des Vierers I auf Stamm 1 des Vierers II | I ₁ /II ₁ | b_9 | k_9 |
| Stamm 1 des Vierers I auf Stamm 2 des Vierers II | I ₁ /II ₂ | b_{10} | k_{10} |
| Stamm 2 des Vierers I auf Stamm 1 des Vierers I | I ₂ /II ₁ | b_{11} | k_{11} |
| Stamm 2 des Vierers I auf Stamm 2 des Vierers II | I ₂ /II ₂ | b_{12} | k_{12} |

Gegennebensprechdämpfungen werden durch Index g gekennzeichnet, z. B. Gegenübersprechen von Vierer I auf Stamm 2 des Vierers II: $b_{g_{23}}$, Dämpfungen oder Kopplungen zwischen Nachbarvierern in verschiedenen Lagen (Sternvierer) durch einen zusätzlichen Stern, z. B. k^*_{23} .

Setzt man

$$k - \frac{1}{4} k_1 = \frac{1}{2} k_2 = \frac{1}{2} k_3,$$

so gilt, mit Z als Abschlußwiderstand eines kurzen Leiterstückes, zwischen k und der Nebensprechdämpfung b_N die Beziehung

$$(15) \quad b_N = \ln \frac{2}{Z \cdot \omega \cdot k} [\text{N}].$$

Mikrofon- und Telefon-Übertragungsmaß

Das Übertragungsmaß eines Mikrofons ist bestimmt durch das Verhältnis der elektrischen Ausgangsspannung an 600Ω zum Schalldruck ausgedrückt in $\text{V}/\mu\text{b}$. Das Übertragungsmaß des Telefons ist bestimmt durch das Verhältnis des Schalldrucks zur Eingangsspannung ausgedrückt in $\mu\text{b}/\text{V}$.

Bezugsdämpfung

Ein Normalnachrichtensystem, nämlich der in Paris im Laboratorium des „Internationalen Beratenden Ausschusses für Telefonie auf große Entfernungen“ (CCI) aufgestellte Fernsprech-Ureichkreis (SFERT)¹⁾, dessen Sender, Leitung und Empfänger vorgeschriebene Werte des Übertragungsmaßes haben, die jederzeit objektiv nachgemessen und auf ihren Sollwert eingeregelt werden können, bildet in der Praxis für die Messungen an Fernsprechgeräten den internationalen Bezugspunkt. Für die im CCI vertretenen Länder gilt je ein dem Ureichkreis nachgebildeter Haupteichkreis als Normalsystem.

Die Messungen an Mikrofonen und Telefonen bestehen im Vergleichen der mit ihnen erzeugten Spannung bzw. Lautstärke mit der des Ureichkreises. Das hierfür gewählte Maß heißt die Bezugsdämpfung des betreffenden Geräts, und zwar Sendebezugsdämpfung beim Mikrofon und Empfangsbezugsdämpfung beim Telefon. Ureichkreis und Haupteichkreis haben also die Bezugsdämpfung Null. Die Bezugsdämpfung eines beliebigen Systems oder Systemteils ist die Zahl in Neper, die den Unterschied seiner Lautstärke gegen die des betreffenden Teiles des Normalsystems angibt. Dabei gibt positive Bezugsdämpfung an, daß das betreffende System leiser ist als das entsprechende des Ureichkreises.

Die Messungen in der Praxis werden mit Hilfe von Arbeitseichkreisen (SETEM)²⁾ vorgenommen, die ihrerseits wieder am Haupt- oder Ureichkreis geeicht sind.

3. Fremdspannung, Geräuschspannung, Geräusche

Fremdspannung

Als Fremdspannung bezeichnet man die in einem Übertragungssystem durch fremde Stromquellen hervorgerufene Spannung, und zwar bei Frequenzgemischen die effektive Summenspannung. Beim Abhören über ein Telefon entsteht ein subjektiver Störeindruck. Dieser hängt nicht nur vom Betrag der Fremdspannung, sondern auch von der Verteilung der Frequenzen ab, weil die Empfindlichkeit des menschlichen Ohres und das Übertragungsmaß des Telefons frequenzabhängig sind. Die entsprechend frequenzbewertete Spannung heißt

1) Système fondamental européen de référence pour la transmission téléphonique.

2) Système étalon de travail utilisant des microphones électromagnétiques.

Geräuschspannung

Um die Geräuschspannung objektiv messen zu können, gibt man dem Anzeigergerät vor der effektiven Summierung ein Filter, dessen Übertragungsmaß als mittlerer Frequenzgang von Ohr und Telefon vom CCI festgesetzt ist („A-Filter“). Dabei wurde 800 Hz als Bezugsfrequenz gewählt, d. h. für einen reinen Ton von 800 Hz ist die Geräuschspannung gleich der Fremdspannung.

Geräusche

An Geräuschen, die ein Ferngespräch stören können, werden unterschieden:

das Raumgeräusch an der Sprechstelle,

das Mikrofongeräusch, vom Mikrofon erzeugt,

die Leitungsgeräusche, wie

Verstärkergeräusch, von den Verstärkerröhren hervorgebracht,

verständliches Nebensprechen, durch Sprechströme, die ohne Verschiebung oder Umkehrung des Frequenzbandes aus einem störenden Sprechkreis in den gestörten übergehen,

unverständliches Nebensprechen, durch Sprechströme, die mit Verschiebung oder Umkehrung des Frequenzbandes aus einem störenden Sprechkreis oder -kanal in einen ungestörten übergehen,

Stromversorgungsgeräusch, durch die Speisevorrichtungen der Mikrofone und Verstärker hervorgebracht,

Telegrafiergeräusche, durch Telegrafiereinrichtungen auf denselben Adern oder auf anderen Adern derselben Leitung erzeugt,

Knackgeräusche, durch Schaltvorgänge hervorgerufen, und

Starkstromgeräusch, durch die magnetische oder elektrische Einwirkung von Starkstromanlagen erzeugt.

4. Verzerrungen

Die Güte einer Übertragung wird nicht nur durch Leistungsverluste und durch Geräusche, sondern auch durch die verschiedenen Verzerrungen beeinträchtigt.

Dämpfungsverzerrungen

sind vorhanden, wenn die Betriebsdämpfung eines Vierpols für die verschiedenen zu übertragenden Frequenzen nicht die gleiche ist; sie werden auch lineare Verzerrungen genannt und z. B. mit dem Pegelschreiber gemessen. Dämpfungsverzerrungen lassen sich durch Entzerrungsglieder mit spiegelbildlichem Frequenzgang der Dämpfung ausgleichen.

Phasenverzerrungen

sind vorhanden, wenn der Gang des Winkelmaßes a mit der Kreisfrequenz ω vom linearen Normalverlauf abweicht. Bei Fernsprechkreisen und bei Rundfunkleitungen äußert sich das durch den Unterschied der (Gruppen-) Laufzeit $da/d\omega$ bei 800 Hz gegen die Laufzeit der unteren bzw. oberen Frequenz des Übertragungsbereichs. Laufzeit ist die Zeitspanne, die ein Höchstwert der Hüllkurve einer Gruppe von zwei Sinuswellen der benachbarten Kreisfrequenzen ω und $\omega \pm d\omega$ braucht, um den Sprechkreis zu durchlaufen.

Nichtlineare Verzerrungen

treten auf, wenn bei der Übertragung einer ursprünglich reinen Sinusschwingung höhere Teilchwingungen (Oberschwingungen) entstehen. Werden mehrere Schwingungen auf ein nichtlineares Übertragungsglied gegeben, so entstehen neben den Oberschwingungen auch noch Kombinationstöne, die die Übertragungsgüte meist in weit höherem Maße beeinträchtigen als die Oberschwingungen. Praktisch stören im wesentlichen die Differenzöne erster und zweiter Ordnung (quadratische und kubische Verzerrungen).

Der Klirrfaktor kennzeichnet die Nichtlinearität eines Übertragungsgliedes bei einer Frequenz. Er wird gebildet durch das Verhältnis der effektiven Summe der Oberschwingungsamplituden zur effektiven Summe der Grund- und Oberschwingungsamplituden in Prozent¹⁾ und kann dabei auch für jede Oberschwingung einzeln angegeben werden, z. B.

$$(16) \quad k_3 = 100 \cdot \frac{\text{Amplitude der dritten Teilschwingung}}{\text{effektive Summe der Grund- und Oberschwingungsamplituden}}$$

Es wird auch der Ausdruck Klirrdämpfung verwendet. Es ist

$$(17) \quad b_k = \ln \frac{100}{k} [\text{N}].$$

Als Maß der Kombinationstonbildung dienen nach den Empfehlungen des CCI der Differenztonfaktor erster Ordnung oder Faktor der quadratischen Verzerrung v_2 und der Differenztonfaktor zweiter Ordnung oder Faktor der kubischen Verzerrung v_3 . Dabei wird v_2 gebildet durch das Verhältnis des Effektivwertes der Differenzschwingung erster Ordnung $y - x$ zur Summe der Effektivwerte der beiden Grundschwingungen x und y am Ausgang des Übertragungsgliedes und v_3 durch das Verhältnis der Summe der Effektivwerte der beiden Differenzschwingungen zweiter Ordnung $2x - y$ und $2y - x$ zur Summe der Effektivwerte der beiden Grundschwingungen x und y .

Meßverfahren

I. Brückenverfahren

Dieses Verfahren beruht bekanntlich darauf, daß eine aus mehreren z. T. veränderbaren Zweigen gebildete Schaltung so abgeglichen wird, daß zwischen zwei Punkten (im Nullzweig der Brücke) kein Spannungsunterschied auftritt. Ist diese Bedingung erfüllt, so kann eine unbekannte Größe aus den übrigen bekannten ermittelt werden. Um bei Wechselstrom die Bedingung zu erfüllen, müssen die Brückenarme nach Betrag und Winkel abgeglichen werden. Es sind also im allgemeinen mindestens zwei Abgleichelemente nötig, und zwar nicht nur bei Messungen von Scheinwiderständen, sondern auch von Wirk- und Blindwiderständen wegen der unvermeidlichen Fehlwinkel.

Wesentlich für das Brückenverfahren ist es, daß das Anzeigergerät im Nullzweig keinerlei Eichung bedarf, sondern nur empfindlich sein muß. Dementsprechend läßt sich die Empfindlichkeit des Brückenabgleichs weitgehend steigern. Die Meßgenauigkeit der Brücke dagegen ist begrenzt durch die Genauigkeit der verwendeten Normale.

Das einfachste Anzeigergerät im Bereich der Tonfrequenzen ist das Telefon in Verbindung mit dem Ohr. Das menschliche Ohr hat zwar eine geringe Empfindlichkeit für Änderungen einer Lautstärke, dagegen eine sehr hohe absolute Empfindlichkeit. Neben seiner hohen Empfindlichkeit ist das Telefon außerordentlich überlastbar und kann daher ohne Umschaltung über einen großen Bereich benutzt werden. Begrenzt ist die Empfindlichkeit durch die Reizschwelle des Ohres. Reicht die Empfindlichkeit nicht aus, so ist dem Meßhörer ein Verstärker (z. B. Richtspannungszeiger) vorzuschalten, der die Empfindlichkeitsschwelle entsprechend hebt.

Die Lage der Reizschwelle hängt — außer von der Frequenz und von individuellen Faktoren — von Art und Stärke störender Nebengeräusche ab. Die Messung in lärmgefüllten Räumen erfordert daher schon für verhältnismäßig geringe Meßempfindlichkeit die Benutzung eines Empfangsverstärkers mit Zeigerablesung.

Hat der Nullzweig der abgeglichenen Meßschaltung Spannung gegen umgebende Außenleiter und damit meist gegen Erde, so werden Ströme fließen, die diesem Potentialunterschied und der betreffenden Ableitung entsprechen und das Meßergebnis fälschen. Daher ist man nach Möglichkeit bestrebt, die Schaltung symmetrisch gegen den Nullzweig zu gestalten, so daß dieser bei gleichfalls symmetrischer Stromquelle von selbst das Potential der Umgebung annimmt.

¹⁾ Die ältere Festsetzung lautete: Effektivsumme der Oberschwingungsamplituden zur Grundschwingungsamplitude; bei kleinen Klirrfaktoren (bis etwa 20%) stimmen die Zahlenwerte nach beiden Formeln praktisch überein.

2. Vergleichsverfahren

Die gesuchte Meßgröße wird durch Vergleich mit einer entsprechenden Größe ermittelt, die regelbar und bekannt ist. Die Gleichheit wird dabei durch Lautstärke-Hörvergleich oder Ausschlagsvergleich an einem Anzeigegerät festgestellt. Das Verfahren wird angewendet, wenn nur das Verhältnis zweier Größen, gesucht ist, insbesondere, wenn ohne Rücksicht auf Phase nur der Betragsvergleich erforderlich ist.

In den meisten Fällen handelt es sich um Dämpfungsmessungen an Vierpolen. Man bestimmt dann das gesuchte logarithmische Verhältnis von Anfangs- und Endspannung in der Weise, daß ein in Dämpfungswerten geeichter, veränderbarer Vierpol (Eichleitung) parallel an die Anfangsspannung geschaltet und seine Ausgangsspannung auf gleichen Betrag mit der Endspannung geregelt wird (Dämpfungs-Meßeinrichtung).

Die Vergleichsspannung kann nötigenfalls auch von einer zweiten Stromquelle geliefert werden. Es ist dabei aber notwendig, daß die absolute Spannung der beiden Stromquellen bekannt ist (Normalgenerator).

Kennzeichnend für das Vergleichsverfahren ist der geringere Aufwand derartiger Schaltungen, besonders bei Hörvergleich, bei dem jedoch die Genauigkeit durch die Ohrempfindlichkeit beschränkt ist (auf etwa 10^{0/10} bzw. 0,1 N). Ein Verstärker allein vermag hieran nichts zu ändern, doch ist es bei genügender Leistung möglich, die Meßspannung gleichzurichten und einem Spannungsmesser zuzuführen. Die so erhaltene eindeutige Anzeige ist von besonderer Bedeutung, um die Gefahr subjektiver Meßfehler zu vermeiden, wie sie ein Lautstärkevergleich, namentlich bei verschiedener Klangfarbe, mit sich bringt. Derartige Geräte sind im allgemeinen so ausgeführt, daß der Verstärker wahlweise zur Anzeige oder als Hörverstärker benutzt werden kann (z. B. Richtspannungsgzeiger).

3. Pfeifpunktverfahren

Eine andere Art, Dämpfungen oder Verstärkungen zu messen, besteht darin, daß man das System unbekannter Dämpfung mit einem System bekannter und regelbarer Verstärkung (oder umgekehrt) zu einem Ring schließt, dessen Gesamtdämpfung Null ist. Die Gesamtdämpfung Null ist daran erkenntlich, daß eine ganz kleine Steigerung der Verstärkung das System zum „Pfeifen“ bringt (daher der Name Pfeifpunktverfahren).

Die unbekannt Dämpfung ist dann dem Betrage nach gleich der bekannten Verstärkung bzw. umgekehrt. Es handelt sich also bei dem Pfeifpunktverfahren auch um ein Nullverfahren. Es hat den Vorzug, daß als Anzeigeorgan ein Nullgerät (meist Fernhörer) genügt. Weiter hat es den Vorzug, daß sich eine besondere Stromquelle erübrigt. Die Pfeiffrequenz ist diejenige, bei der das Gesamtsystem die geringste Dämpfung hat. Die Messung bei einer bestimmten gewollten Frequenz erreicht man durch geeigneten Frequenzgang (etwa Schwingkreis) des bekannten Systems.

Nach diesem Verfahren arbeiten z. B. die Fehlerdämpfungs-Meßeinrichtung sowie die Eicheinrichtungen vieler Meßverstärker, z. B. Schalldruckmesser, Geräuschspannungsmesser und Pegelmesser.

4. Unmittelbare Anzeige des Meßwerts

Die bisher beschriebenen Verfahren erfordern meistens mehrere Einstellungen und Ablesungen. Die Meßgeräteentwicklung zielt dahin, den dadurch bedingten größeren Zeitaufwand soweit wie möglich herabzusetzen. Dies ist nur möglich, wenn der Meßwert unmittelbar an einem Meßgerät abgelesen werden kann.

Eine solche unmittelbare Eichung bedingt hochwertige, d. h. vor allem konstante und bei großem Frequenzbereich frequenzunabhängige Schaltungselemente. Die Verwendung von Röhren, die für empfindlichere Meßbereiche nicht zu umgehen ist, erfordert eine Eichung vor jeder Meßreihe, es sei denn, daß besondere Schaltmaßnahmen angewendet werden und das Übertragungsmaß damit genügend beständig gemacht werden kann. Unmittelbar angegebende Geräte sind z. B. Strom- und Spannungsmesser, Dämpfungsmesser, Pegelmesser, Aussteuerungsmesser, Geräuschspannungsmesser und Schalldruckmesser. Darüber hinaus sind für verschiedene Meßzwecke bereits schreibende Geräte entwickelt worden (Pegelschreiber).

5. Verfahren zur Frequenzanalyse

Zur Kennzeichnung eines Frequenzgemisches ist eine einzige Größe oft nicht hinreichend, sondern die Bestimmung der frequenzmäßigen Zusammensetzung notwendig. Die bekannten älteren oszillographischen Verfahren zur Analyse von Frequenzgemischen sind nicht nur sehr zeitraubend, sondern auch meist nicht aufschlußreich genug. Das Suchtonverfahren gestattet bei großen Auflösungsvermögen die unmittelbare Messung (Anzeige bzw. Aufschreiben) der einzelnen Teiltöne. Das gesamte Frequenzgemisch wird mit einem stetig veränderbaren Suchton von bekannter Frequenz und konstanter Amplitude moduliert und über ein feststehendes Bandfilter gegeben. Je nach der Lage des Suchtons wird eine bestimmte Frequenz des Gemisches gemessen. Das Suchtonverfahren hat den Vorteil, daß bei sehr großem Auflösungsvermögen das Ergebnis der Frequenzanalyse leicht unmittelbar aufgezeichnet werden kann. Dies erfordert jedoch im allgemeinen einen verhältnismäßig großen Aufwand. In vielen Fällen genügt eine Grobanalyse, die man nach dem Filterverfahren mittels eines von Hand umschaltbaren Bandfilters (Oktav-Bandpaß) vornimmt. Mit diesem läßt sich aus dem Frequenzgemisch der jeweils eingestellte Teilbereich herausziehen und von einem geeigneten Gerät zur Anzeige bringen oder der zeitliche Verlauf aufzeichnen (Oszillograph). Die einzelnen Oszillogramme können dann noch weiter analysiert werden.

Das Suchtonverfahren wie auch das Filterverfahren von Hand erfordern verhältnismäßig lange Analysierzeiten (etwa 1 bis 10 Minuten). Vorgänge, die sich innerhalb dieser Zeit stark ändern, können also nicht erfaßt werden. Wesentlich kürzere Analysierzeiten (etwa $\frac{1}{10}$ Sekunde) lassen sich dadurch erreichen, daß das zu untersuchende Frequenzgemisch gleichzeitig einer größeren Anzahl parallelgeschalteter Bandfilter mit nebeneinanderliegenden Durchlaßbereichen gegeben wird und die Ausgangsspannungen der einzelnen Filter gleichzeitig zur Anzeige gebracht werden (Tonfrequenz-Spektrometer). Hierdurch ist es möglich, auch zeitlich schnell veränderliche Vorgänge fortlaufend als Spektrum zu beobachten oder aufzuzeichnen.