Informationen zum Fach Elektrotechnik/Rechnersystemtechnik im dritten Jahr

[redacted]
ORT: Grand-Bateau
BEDIENER: [redacted]
NVP: 69.0%   FEHLERANOMALIESCHWELLE: 15%
FLUKE DSP-100   Serien-Nr.: 6396060
RESERVE: 8.7 dB

Testzusammenfassung: PASS
Kabelkennung: TIGGES P05/05
Datum/Uhrzeit: 05.03.2003   15:25:08
Test-Standard: EN 50173 Class D
Kabeltyp: ScTP 100 Ohm Cat 5
Standard-Version: 5.5
Software-Version: 5.5

Wire Map PASS   Ergebn.   RJ45-STIFT: 1 2 3 4 5 6 7 8 S
RJ45-STIFT: 1 2 3 4 5 6 7 8 S

Paar	1,2	3,6	4,5	7,8
Impedanz (Ohm), Grnz. 80-120	108	111	107	111
Länge (m), Grnz. 100.0	36.0	36.0	36.2	35.6
Laufzeit (ns), Grnz. 900	174	174	175	172
Abweichung (ns), Grnz. 50	2	2	3	0
Widerstand (Ohm), Grnz. 40.0	7.1	7.1	9.4	7.1
Dämpfung(dB)	8.3	8.3	8.7	8.4
Grenzwert (dB)	23.2	23.2	23.2	23.2
Reserve (dB)	14.9	14.9	14.5	14.8
Frequenz (MHz)	100.0	100.0	100.0	100.0
RL(dB)	19.8	18.9	19.9	19.6
Grenzwert (dB)	15.0	15.0	15.0	15.0
Reserve (dB)	4.8	3.9	4.9	4.6
Frequenz (MHz)	1.0	1.0	1.0	1.0

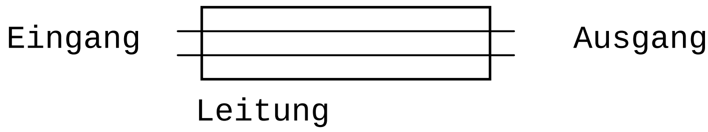
Paare	1,2-3,6	1,2-4,5	1,2-7,8	3,6-4,5	3,6-7,8	4,5-7,8
NEXT(dB)	43.5	38.0	50.5	41.5	34.1	54.8
Grenzwert (dB)	30.2	24.0	31.5	24.1	25.4	41.1
Reserve (dB)	13.3	14.0	19.0	17.4	8.7	13.7
Frequenz (MHz)	42.5	100.0	34.5	98.7	82.9	7.9
ACR(dB)	40.2	59.2	48.0	57.6	43.4	52.6
Grenzwert (dB)	21.7	39.1	24.6	36.3	27.9	36.8
Reserve (dB)	18.5	20.1	23.4	21.3	15.5	15.8
Frequenz (MHz)	35.4	5.1	27.7	8.5	20.3	7.9

Abbildung: Auszug aus einem Messprotokoll einer TP-Leitung

Oben ist ein Messprotokoll für ein achtadriges TP-Kabel abgebildet. Die folgenden Seiten sollen das Hintergrundwissen liefern, um die gemessenen Größen (z.B. Widerstand, Impedanz, Dämpfung, Next) interpretieren zu können.

Grundgrößen einer Leitung

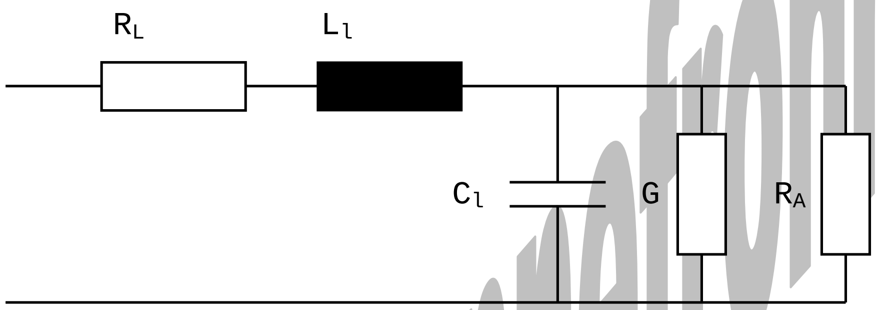
Betrachtet wird ein TP-Paar:



Es ergeben sich vier elektrische Größen, die die Signalübertragung beeinflussen:

1. Der Leitungswiderstand R_L
2. Die Leitungskapazität zwischen den Adern C_l
3. Die Leitungsinduktivität L_l
4. Der Isolationswiderstand R_{is} bzw. die Ableitung G.

Man stellt für diese Leitung ein vereinfachtes **Ersatzschaltbild** auf.



R_A: Anschlusswiderstand

1. Zum Leitungswiderstand R_L

Der Gleichstromwiderstand vom hin- und rückführenden Leiter beträgt

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

l: Länge des Leiters
A: Querschnittsfläche des Leiters
ρ: spezifischer Widerstand z.B. $\rho_{CU} = 1{,}79 \cdot 10^{-8}\,\Omega m$

Für Leitungen, die mit Wechselstrom betrieben werden, ist der Skineffekt zu berücksichtigen.

Skineffekt:

Das Leierinnere wird von mehr elektrischen Feldlinien durchflossen als die Außenhaut des Leiters, daher ist die induzierte Gegenspannung im Inneren des Leiters stärker als außen.
Die Folge: Es entsteht eine Stromverdrängung zur Außenhaut hin; das kann man als Verengung des Querschnitts sehen. Der Wirkwiderstand Z steigt in Abhängigkeit von der Signalfrequenz an.

F in kHz	**Z/R ∅ 1,3mm**	**koax 2,6/9,5**
0	1	nicht verwendet
5	1,03	nicht verwendet
50	1,68	nicht verwendet
100	2,26	nicht verwendet
550	5,05	nicht verwendet
1000	nicht verwendet	8
2000	nicht verwendet	11,3
6000	nicht verwendet	19,5

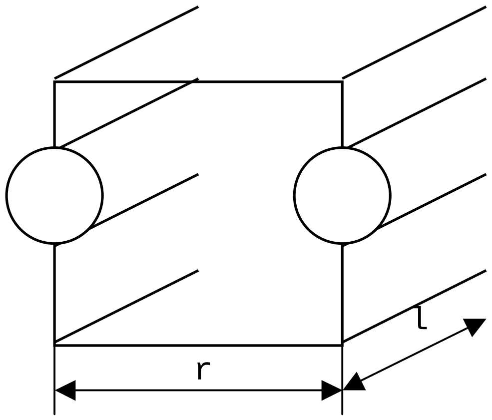
Tabelle: Skineffekt in Abhängigkeit von der Signalfrequenz

2. Zur Leitungskapazität C_L

Die Adern einer zweiadrigen Leitung bilden mit der Isolierung des Leiters einen Kondensator mit der Kapazität C

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{r}$$

ε_0 : Elektrische Feldkonstante
ε_r : Relative Feldkonstante
A : Wirksame Oberfläche des Leiters
r : Abstand der Leiter



Zur Leitergeometrie

Zur Fläche:
Es ist die Oberfläche eines Leiters einzusetzen:

$$A = U \cdot l$$

U: Umfang
L: Leiterlänge

Bei einer frequenzbehafteten Signalübertragung entsteht ein kapazitiver Blindwiderstand:

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{\varpi \cdot C}$$

Dieser Blindwiderstand wirkt quer zu den Leitungsadern (siehe Ersatzschaltbild).

3. Zur Leitungsinduktivität L_L

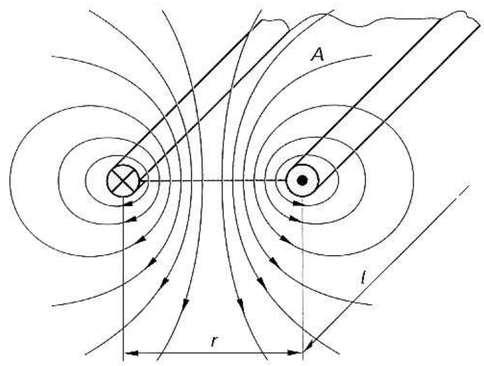
Durch die Leitung fließt ein Strom; dieser erzeugt ein magnetisches Feld, welches den Leiter umgibt.
Die Induktivität L fasst alle Bedingungen zusammen, durch die das magnetische Feld vom Werkstoff und von der Geometrie der Leitung beeinflusst wird.

Es gilt: $L = N^2 \cdot \frac{\mu \cdot A}{l_m}$

N: Windungszahl
μ: Permeabilität
A: Fläche, die von Feldlinien durchsetzt ist
l_m: mittlere Feldlinienlänge

Die beiden Leiter der dargestellten zweiadrigen Leitung können zusammen mit dem Widerstand am Leitungsende als eine Windung angesehen werden. Daher ist N=1 und N^2=1.

Für die Fläche A gilt: $A = r \cdot l$



Die Induktivität lässt sich somit für diesen Leiter vereinfachen:

$$L = \frac{\mu \cdot r \cdot l}{l_m}$$

Daraus folgen folgende Dinge:

- Je größer der Abstand der Leiter r, desto größer ist die von Feldlinien durchsetzte Fläche und damit die Induktivität L.
- Je geringer der Abstand der Leiter r, desto geringer ist die von Feldlinien durchsetzte Fläche und damit die Induktivität L.
- Je länger die Leiterlänge l, desto größer die Induktivität L.
- Die Permeabilität μ und die mittlere Länge der Feldlinien l_m sind für diesen Leiter unveränderlich und somit als konstant zu betrachten.

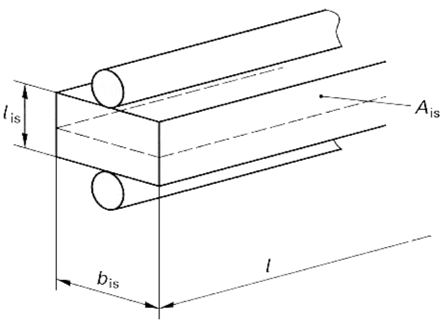
Es ergibt sich bei Wechselstromübertragung der folgende Blindwiderstand der Induktivität:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = \varpi \cdot L$$

Dieser Blindwiderstand wirkt in Längsrichtung des Leiters (siehe Ersatzschaltbild).

4. Zum Isolationswiderstand R_{IS} bzw. zur Ableitung G

Es fließt ein geringer Strom zwischen den Adern einer Leitung. Dieser ist bei längeren Leitungen zu berücksichtigen und er wird durch den Ersatzwiderstand R_{is} bzw. durch die Ableitung G im Ersatzschaltbild symbolisiert. Den Isolationswiderstand kann man folgendermaßen berechnen:



$R_{is} = \frac{\rho \cdot l_{is}}{A_{is}}$ mit $A = b_{is} \cdot l$ siehe Zeichnung

Der Leitwert G ist der Kehrwert des Isolationswiderstandes und wird auch Ableitung G genannt. Die Einheit der Ableitung G ist S (Siemens).

$$G = \frac{1}{R_{is}} \qquad [G] = \frac{1}{\Omega} = S$$

Aus der Formel ist ersichtlich das in ihr die Signalfrequenz nicht vorkommt. Die Ableitung ist also von der Frequenz nahezu unabhängig.

Die Ableitung wirkt quer zu den Leitungsadern (siehe Ersatzschaltbild).

Leitungskennwerte

Die Leitungsgrößen R_L, C, L und G sind direkt proportional zur Leitungslänge l. Direkt proportional bedeutet, dass die entsprechende Größe mit zunehmender Leitungslänge l steigt.
Diese Leitungsgrößen werden nun auf die Leitungslänge bezogen bzw. durch diese geteilt. Die Standardlänge ist 1 km. Hierdurch entstehen die so

genannten *Leitungskenngrößen* oder *Leitungsbelege* mit den Bezeichnungen R', C', L' und G'.

Es gilt z. B. für den Widerstandskennwert R':

$$R' = \frac{R}{l}$$

Die folgende Tabelle gibt einige Leitungskenngrößen für f=800Hz an:

Leitungsart	**Leiter-Werkstoff**	**Durchmesser mm**	**R' Ω/km**	**C' nF/km**	**L' mH/km**	**G' µS/km**
Freileitung	Bronze	2	17,7	5,4	2,2	1
	Hartkupfer	3	5,5	6,0	2,0	1
Kabelleitung, symmetrisch	Kupfer, Isolierung mit Zell-Polyethylen	0,4	300	36	0,7	0,1
		0,6	130	38	0,7	0,1
		0,8	73,2	40	0,7	0,1
		0,9	56,6	34	0,7	0,1
		1,2	31,8	35	0,7	0,1
		1,4	23,4	36	0,7	0,1

Der Wellenwiderstand Z_w

Der Eingangswiderstand einer unendlich langen Leitung heißt *Wellenwiderstand Z_w*. Er lässt sich nach dem Ohmschen Gesetz als Verhältnis zwischen Spannung und Stromstärke darstellen:

$$Z_w = \frac{U}{I}$$

Sowohl Spannung als auch Strom werden nehmen mit zunehmender Leitungslänge ab, da die zuvor beschriebenen Störgrößen wirken. Das Verhältnis dieser Größen zueinander bleibt jedoch gleich. Es ist über die Leitungslänge betrachtet, konstant. Es gilt:

$$Z_w = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U_2}{I_2}$$

Index 1: Größen am Eingang
Index 2: Größen am Ausgang
Index x: Größen an einer beliebigen Stelle x der Leitung

Der Wellenwiderstand ist ein für die verwendete Leitung typischer Kennwert , aber unabhängig von der Länge der Leitung.
Bei der Ermittlung dieses Widerstandes fällt der Anschlusswiderstand R_a somit nicht ins Gewicht, weil die Leitung ja unendlich lang ist.

Die Berechnung des Wellenwiderstandes aus den Leitungsgrößen:

Die oben beschriebenen Leitungs-(Stör-)Größen bestimmen den Wellenwiderstand. Es lassen sich für die Berechnung sowohl die Störgrößen als auch die Leitungskennwerte zugrunde legen, weil der Wellenwiderstand sowieso nicht von der Leitungslänge abhängt.

Für niedrige Frequenzen gilt:

$$Z_w = \sqrt{\frac{R}{\varpi \cdot C}}$$

Für hohe Frequenzen gilt:

$$Z_w = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Es stellt sich die Frage, wo die Grenze zwischen einer niedrigen und einer hohen Frequenz liegt. Hier gelten folgende Bedingungen (für Fernmelde-kabel):

- Frequenzen kleiner 5kHz sind niedrige Frequenzen
- Frequenzen über 30kHz sind hohe Frequenzen
- Für Frequenzen zwischen 5kHz und 30kHz gilt die Bedingung $\boxed{R=X_L}$. Hier ist also zur Bestimmung der Frequenz zunächst X_L zu bestimmen.

Es zeigt sich des weiteren, dass der Wellenwiderstand nur bei niedrigen Frequenzen frequenzabhängig ist. Bei hohen Frequenzen ist er frequenzunabhängig.

Ein Beispiel, das die Berechnung des Wellenwiderstandes verdeutlicht:

Bsp. 1: Es ist der Wellenwiderstand Z_w für eine Leitung mit Kupferadern von 0,6mm Durchmesser bei einer Frequenz von f=800Hz gesucht.

Die Lösung: Es handelt sich um eine niedrige Frequenz, da sie unter 5kHz liegt. Wir entscheiden uns also für diese Formel:

$Z_w = \sqrt{\frac{R}{\varpi \cdot C}}$ und dürfen Leitungskennwerte einsetzen: $Z_w = \sqrt{\frac{R'}{\varpi \cdot C'}}$

Zur Einheit des Wellenwiderstandes: $\left[\frac{R'}{\varpi \cdot C'}\right] = \frac{\Omega \cdot s \cdot V \cdot km}{km \cdot 1 \cdot A \cdot s} = \frac{\Omega^2}{1}$

Mit Werten aus der Tabelle für die Leitungskennwerte:

$$Z_w = \sqrt{\frac{130 \cdot \Omega \cdot s \cdot km \cdot 10^9}{km \cdot 2 \cdot \pi \cdot 800 \cdot 38 \cdot F}} = 824 \cdot \Omega$$

Bitte nachrechnen.

Dämpfung

Durch die bereits erklärten Störungen (insbesondere durch den Leitungswiderstand) entstehen bei der Signalübertragung auf einer Leitung Signalverluste, die sich durch eine Abnahme der Signalhöhe bemerkbar machen. Man kann sagen das Signal ist am Leitungsausgang gedämpft worden. Die Störungen verursachen, wie zuvor erklärt sowohl eine Abnahme der Signalspannung U_V wie auch der Signalstromstärke I_V. Das Produkt dieser Größen ist die Verlustleistung P_V. Alternativ ergibt sich die Verlustleistung aus der Differenz der Ausgangs- und der Eingangsleistung.

$$P_V = U_V \cdot I_V \quad \text{oder} \quad P_V = P_{ein} - P_{aus}$$

Die Verlustleistung wird in Form von Wärmeenergie ($W = P \cdot t$) an die Umwelt abgegeben.

Das *Dämpfungsmaß a* wird in der Nachrichtentechnik zur Kennzeichnung des Verhältnisses von Eingangsleistung zu Ausgangsleistung benutzt.
Es wird als Logarithmus zur Basis 10 des Leitungsverhältnisses angegeben.

$$a = \lg \frac{P_{ein}}{P_{aus}}$$

Es hätte die Einheit 1, da eine Leistung durch eine Leistung dividiert wird. Man verwendet aber die Einheit *Bel (B)* oder *Dezibel (dB)*.

Ein Beispiel hierzu:

Am Eingang einer Leitung ist die Eingangsleistung von $P_{ein} = 25mW$; an ihrem Ausgang ist die Ausgangsleistung von $P_{aus} = 2{,}5mW$ vorhanden. Das Dämpfungsmaß ist also:

$$a = \lg \frac{P_{ein}}{P_{aus}} = \lg \frac{25mW}{2{,}5mW} = \lg 10 = 1B = 10dB$$

Die Verlustleistung würde 22,5mW betragen, das Eingangssignal wird durch die Leitung auf ein Zehntel gedämpft. Ein Dämpfungsmaß von 10dB entspricht demnach einer Dämpfung von 90%.
Zur Messung einer Leistung ist immer eine Messung der Stromstärke nötig. Zur Messung der Stromstärke wiederum muss die Leitung aufgetrennt werden, was in der Praxis sehr ungern gemacht wird. Der Bedarf nach einer spannungsabhängigen Formel ist daher groß, da zur Spannungsmessung die Leitung nicht aufgetrennt, das Endgerät nicht abgetrennt werden muss.

$$a = \lg \frac{P_{ein}}{P_{aus}} = \lg \frac{U_{ein} \cdot I_{ein}}{U_{aus} \cdot I_{aus}} = \lg \frac{U_{ein} \cdot \frac{U_{ein}}{R}}{U_{aus} \cdot \frac{U_{aus}}{R}} = \lg \frac{U_{ein}^{\;2}}{U_{aus}^{\;2}} = \lg \left(\frac{U_{ein}}{U_{aus}} \right)^2 = 2 \cdot \lg \left(\frac{U_{ein}}{U_{aus}} \right)$$

mit $U = R \cdot I$ sowie $P = U \cdot I$ und $\lg x^2 = 2 \cdot \lg x$ (Logarithmengesetz)

Genau wie bei den Leitungskennwerten kann man das Dämpfungsmaß auf einen Kilometer Leitungslänge beziehen. Man erhält den *Dämpfungskennwert α.*

$$\alpha = \frac{a}{l}$$

Pegel

Man versteht unter dem Begriff Pegel das als Logarithmus angegebene Verhältnis des gemessenen Spannungswertes zu einem Bezugs-Spannungswert.

Wird die Spannung U_2 an einem beliebigen Messpunkt der Leitung mit einer Spannung U_1 am Anfang der Leitung auf die obige Art verglichen, dann erhält man den relativen Pegel p_r.
Oft ist es sinnvoll, eine Bezugsspannung U_N festzulegen. Der Pegel, der sich auf diese Bezugsspannung bezieht wird absoluter Pegel P_s genannt.

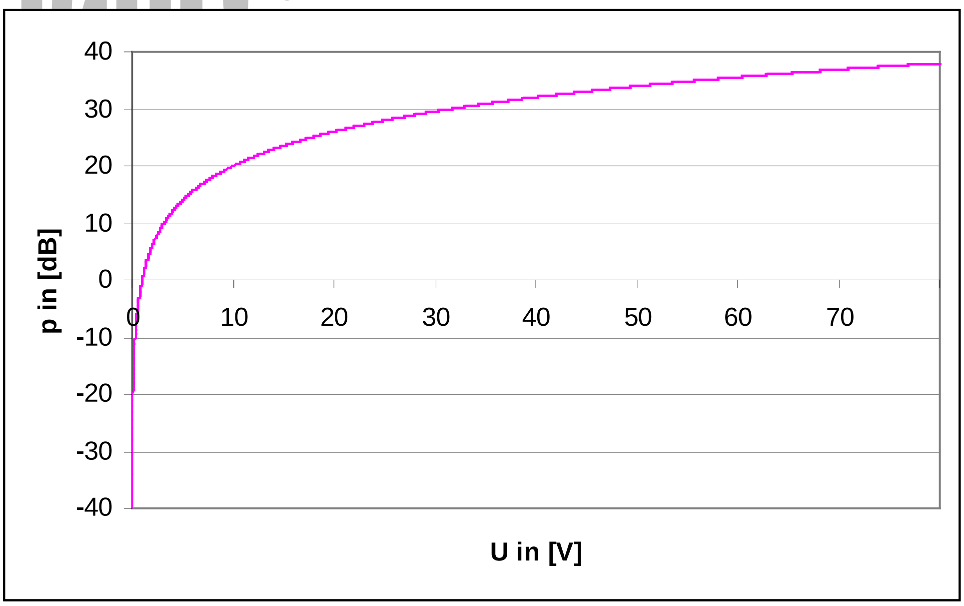
$$p_r = 20 \cdot \lg \frac{U_2}{U_1} \qquad p_s = 20 \cdot \lg \frac{U_2}{U_N}$$

Hinweis: Beachten Sie bitte die Unterschiede in den Formeln für das Dämpfungsmaß und den Pegel !

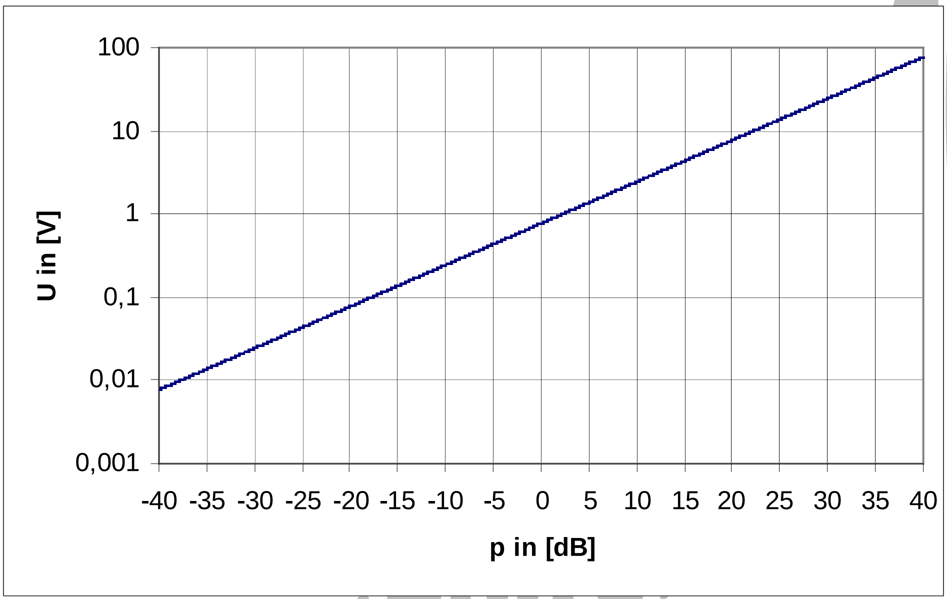
Es wird für diesen absoluten Pegel eine Bezugsspannung von $U_N = 0{,}775V$ gewählt, denn dieser Wert entspricht der Leistung von 1mW an einem Widerstand von 600Ω:

$$P = U_N \cdot I = U_N \cdot \frac{U_N}{R} = \frac{U_N^2}{R} = \frac{(0{,}775V)^2}{600\Omega} = 0{,}001W = 1mW$$

Diese Leistung wird als die Leitung angesehen, bei der der Pegel 0dB beträgt. Dieser Pegel heißt Normalpegel P_N. Er beträgt 0dB.
Sie sehen, dass die Einheit des Pegels so wie bei der Dämpfung in dezibel (dB) angegeben wird. Wenn eine gemessene Spannung größer als $U_N = 0{,}775V$ ist, dann ist auch der Pegel größer als 0dB. Ist die gemessene Spannung kleiner als $U_N = 0{,}775V$, dann setzt man ein Minuszeichen vor die Pegelangabe.



Das Diagramm stellt den absoluten Pegel über der Spannung dar. Man sieht, dass bei einer Spannung von $U_N = 0{,}775V$ ein Pegelwert von 0dB entsteht. Man sieht aber auch, dass man in diesem Diagramm die Pegel gerade für kleine Spannungswerte schlecht ablesbar sind. Aus diesem Grunde verwendet man Diagramme mit sogenannter logarithmischer Achsenteilung. Das selbe Diagramm mit einer solchen Achsenteilung ist unten abgebildet:



Man sieht, dass das Diagramm den selben Spannungsbereich abdeckt, die Ablesbarkeit ist im Vergleich zu dem Diagramm mit linearer Achsenteilung gerade für kleine Werte erheblich besser. Man kann auch hier für einen Absolutpegel von 0 dB den Spannungswert von $U_N = 0{,}775V$ ablesen.

Pegeldiagramm

- under Construction -