



PS-ACR (*Powersum Attenuation to Crosstalk Ratio* - Summe Signal-Störabstand): Differenz aus Dämpfung und PS-NEXT eines Paares.

3.5.4 Impedanz

Jeder Leiter weist einen bestimmten **elektrischen Widerstand** auf, den in Ohm Ω gemessen wird. Dieser elektrische Widerstand setzt sich in Wechselstromkreisen aus drei Teilen zusammen:

OHMscher Widerstand R (auch: Gleichstromwiderstand): Dieser Widerstand entsteht durch die Behinderung der Elektronen durch das Metallgitter des Kabels. Er ist verantwortlich dafür, dass sich das Kabel erwärmt, wenn Strom durchfließt. Er ist abhängig vom Kabelmaterial, vom Kabelquerschnitt und der Kabellänge

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

Der Gleichstromwiderstand bei Datenkabeln liegt – abhängig von Leiterquerschnitt und Kupferqualität bei etwa 50 – 100 Ω /km.

Induktiver Widerstand XL: Dieser Widerstand entsteht durch den ständigen Aufbau und Abbau magnetischer Felder und ist abhängig von der Geometrie des Drahtes (eine Spule, also ein gewickelter Draht, mit vielen Windungen hat einen größeren induktiven Widerstand als ein gerades Drahtstück) und der Frequenz der Wechselspannung. Es gilt:

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

L ... Induktivität in Henry

f ... Frequenz in Hertz

Der Induktivitätsbelag von Kabeln wird in der Einheit H/km (Henry pro Kilometer) angegeben. Bei Datenkabeln liegt der Induktivitätsbelag im Millihenry-Bereich (1 mH = 10^{-3} H).

Kapazitiver Widerstand X_C : Dieser Widerstand entsteht durch den Auf- und Abbau elektrischer Felder, vor allem an den Kabelenden. Es gilt:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot LC}$$

C ... Kapazität in Farad

f ... Frequenz in Hertz

Der Kapazitätsbelag von Kabeln wird in der Einheit F/km (Farad pro Kilometer) angegeben. Bei Datenkabeln liegt der Kapazitätsbelag im Nanofarad-Bereich (1 nF = 10^{-9} F)).

Der Gesamtwiderstand (auch: Wellenwiderstand) wird als Impedanz Z bezeichnet. Sie lässt sich leider nicht als Summe berechnen, sondern mit der relativ komplizierten Formel

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Auch die Impedanz wird in Ohm angegeben. Die Impedanz von Datenkabeln beträgt in der Regel 100 $\Omega \pm 15\%$ bei 100 MHz.

Ein Netzwerkkabel wirkt als sogenanntes Tiefpassfilter, es lässt tiefe Frequenzen durch und unterdrückt höhere Frequenzen.

RL (Return Loss – Rückflusdämpfung) und SRL (Structural Return Loss): Impedanzschwankungen entlang der Verbindung führen zu Signalreflexionen, die einerseits das zum anderen Ende gelangende Signal schwächen (Anteile, die reflektiert werden, dringen nicht bis zur anderen Seite durch), andererseits aber auch vom anderen Ende ankommende, entsprechend gedämpfte Signale stören könnten.

Die Rückflusdämpfung wird von beiden Seiten aus gemessen und in dB angegeben. Je größer der Zahlenwert, umso besser. Hinweis: RL-Werte unter 3 dB werden nur informativ angegeben.

Der Unterschied bei der Messung von RL und SRL ist, dass bei SRL das andere Ende mit einem 100 Ohm Widerstand abgeschlossen wird.

3.5.5 Skew Delay

Darunter versteht man den Unterschied zwischen den Signallaufzeiten in den einzelnen Adernpaaren eines Twisted Pair-Kupferkabels. Der Laufzeitunterschied resultiert aus der unterschiedlichen Verdrehung der einzelnen Kabelpaare. Der Wert wird in Nanosekunden (1 ns = 10^{-9} s) pro 100 m Kabelstrecke angegeben und liegt bei Cat 5e-Kabeln unter 50 ns/100 m; bei Cat 6/7-Kabeln liegt der Wert unter 20 ns/100 m.



Übertriebene Darstellung der unterschiedlichen Verdrehungen der Kabelpaare eines Twisted Pair-Kupferkabels (Quelle: www.siemon.com)

3.5.6 Rauschen

Bedingt durch die Wärmebewegung der Elektronen entsteht in jedem elektrischen Leiter ein Störstrom, der zufallsbehaftet ist. Macht man diese Stromschwankungen durch Verstärkung über einen Lautsprecher hörbar, so erklingt ein typisches Geräusch, das dem Phänomen den Namen gab.

Wärmerauschen ist von der Art her näherungsweise ein „weißes Rauschen“, d.h. es werden alle möglichen Frequenzen gleich stark abgegeben.

Für die Signalübertragung bedeutet das, dass jedes Nutzsignal mit einem Rausch-Störsignal überlagert wird.

Die maximale Kanalkapazität, die erreicht werden kann, wenn man weißes Rauschen als Störfaktor berücksichtigt, lässt sich mit dem SHANNON-HARTLEY-Gesetz berechnen:

$$C = (f_{\max} - f_{\min}) \cdot \lg_2(1 + SNR) = (f_{\max} - f_{\min}) \cdot \frac{\ln(1 + SNR)}{\ln 2}$$

Dabei bedeutet:

$f_{\max} - f_{\min}$...Bandbreite in Hz

SNR ...Signal-Rausch-Verhältnis (auch: Störabstand); gibt an, in welchem Verhältnis das Nutzsignal zum weißen Rauschen steht. Je geringer diese Zahl, umso schlechter hebt sich das Signal vom Hintergrundrauschen an; bei digitaler Übertragung steigt die Fehlerrate. Für einen Menschen ist in einem verrauschten Signal mindestens eine SNR von 6 dB nötig, um Sprache erkennen zu können.

Rechenbeispiel für VDSL2: VDSL2 benutzt 4096 Kanäle mit einer Bandbreite von jeweils 4,3125 kHz, die gesamte Bandbreite beträgt daher 17664 kHz. Wir nehmen an, dass wir eine gute SNR von 20 dB auf unserer Leitung erreichen können (muss gemessen werden).

$$C = 17664 \text{ kHz} \cdot \frac{\ln(1 + 30)}{\ln 2} = 77590 \frac{\text{kbit}}{\text{s}}$$

Wir können also mit knapp 80 Mbit/s rechnen.

3.5.7 GrenzwertefürDatenkabel

Die in der Folge angegebenen minimal erforderlichen Grenzwerte beziehen sich auf die Norm EN 50173-1; sie sind stets für die in der ersten Zeile angegebene Frequenz zu betrachten. Heute erhältliche Datenkabel haben

meist wesentlich bessere Werte, die in den entsprechenden Datenblättern des Herstellers angegeben sind und durch konkrete Kabelmessungen überprüft werden müssen.

3.5.8 MessenvonNetzwerkverkabelungen undNetzwerk Dosen

Für die Überprüfung der Funktionstüchtigkeit von Netzwerkverkabelungen gibt es Messgeräte, die mehrere Tests durchführen und dabei die besprochenen Kenngrößen wie Impedanz, Dämpfung, Nebensprechverhalten etc. messen.