

Definition of Plug and Jack

The Rosenberger plug/male and jack/female designations are defined by the connector's inner contact design.

This definition may deviate from other manufacturers' definitions.

Definition Stecker/Kuppler

Rosenberger definiert die Stecker/male - Kuppler/female-Bezeichnung nach der Form des Innenleiters.

Diese Definition kann von der Definition anderer Hersteller abweichen.

Cable, Platings, Number Designation

Please see following pages.

You can find the cable overview also inside the flap cover on the reverse side.

Kabel, Oberflächen und Nummernschlüssel

Siehe Übersichten auf den folgenden Seiten.

Die Katalog-Rückseite enthält zusätzlich eine praktische Lasche zum Ausklappen mit der Kabel-Übersicht.

Attention!

The drawings of articles in catalog are not full scaled.

Achtung!

Die Abbildungen der Artikel im Katalog sind nicht maßstäblich.

Company Profile

Rosenberger, founded in 1958, is one of the leading manufacturers of high-frequency coaxial connectors worldwide. Our products play a key role in many high-tech industries, e.g. telecommunication, automotive electronics, test & measurement applications, medical electronics, data systems, etc.

The product range includes high-frequency coaxial connectors, automotive connectors, RF-test & measurement products and wireless terminal components for wireless applications, mainly in consumer electronics or mobile phone terminals. In addition, fiber optic products as well as cable assemblies are also available.

Our headquarters - with research & development, production and administrative departments - are located in Fridolfing, in the south-eastern part of Bavaria, Germany. Approximately 2,000 employees in our headquarters, manufacturing plants and sales offices in Europe, Asia as well as in North and South America take care of development, production and sales of our products.

Rosenberger is certified according to ISO/TS 16949:2002, ISO 9001 and ISO 14001.

Unternehmensprofil

Rosenberger, gegründet 1958, zählt zu den weltweit führenden Herstellern von Hochfrequenz-Koaxial-Steckverbindern und spielt eine Schlüsselrolle in vielen High-Tech-Branchen, z. B. in der Telekommunikation, der Automobil-Elektronik, in der Datentechnik, in der industriellen Messtechnik oder in der Medizinelektronik.

Das Produktspektrum umfasst Hochfrequenz-Koaxialsteckverbinder, Steckverbinder für die Automobil-Elektronik, HF-Messtechnik-Produkte sowie Mobilfunk-Komponenten für Wireless-Anwendungen. Hinzu kommen Fiber-Optik-Produkte und der Bereich Kabel-Konfektionierung.

Unser Stammwerk - mit Forschung & Entwicklung, Produktion und Zentralstellen - befindet sich in Fridolfing (Oberbayern) im bayerischen Voralpenland. Weltweit sorgen mehr als 2000 Mitarbeiter in unserem Stammwerk, den Fertigungs- und Montage-Standorten sowie unseren Vertriebsniederlassungen in Europa, Asien sowie Nord- und Südamerika für Entwicklung, Fertigung und Verkauf unserer Produkte.

Rosenberger ist zertifiziert nach ISO/TS 16949:2002, ISO 9001 und ISO 14001.

Additional Rosenberger catalogs

- Catalog 2: RF Precision Connectors, Test and Measurement Applications
- Reverse Polarity Connectors
- FMC: Series FMC
- SnapN: Series SnapN
- Automotive: FAKRA- RF Connectors
- Automotive: Flyer Automotive Connectors, III. Generation
- WTC: Flyer Wireless Terminal Components

Weitere Rosenberger- Kataloge

- *Katalog 2: Präzisionssteckverbinder und Testzubehör für die Messtechnik*
- *Reverse Polarity- Steckverbinder*
- *FMC: Steckverbinder- Serie FMC*
- *SnapN: Steckverbinder- Serie SnapN*
- *Automotive: FAKRA- HF- Steckverbinder*
- *Automotive: Flyer Automotive- Steckverbinder III. Generation*
- *WTC: Flyer Wireless Terminal Components*

New in the catalog:

- FMC Connectors
- SnapN Connectors
- Reverse Polarity Connectors for SMA, BNC, TNC

Neu im Katalog:

- *Steckbinderserie FMC*
- *Steckbinderserie SnapN*
- *Reverse Polarity Steckverbinder der Serien SMA, BNC, TNC*

Marking of preferred types

Kennzeichnung von Vorzugstypen

Straight Plug

Stecker gerade

Ordering Number	Remarks	Panel Piercing / PCB Layout	Packing	Packing Unit
19 S 101- 40M E4	Limited detent	B 120	VG 01.01M00	100 blister, 1500 tape & reel
19 S 141- 40M E4	Smooth bore	B 120	VG 01.01M00	100 blister, 1500 tape & reel

← Preferred type / Vorzugstyp

Quality

The quality of our products and services is an essential part of our corporate strategy. Rosenberger's quality philosophy is not just to optimize components and products, but to continuously improve and optimize all processes to ensure customer satisfaction: from product development, planning, purchasing, production, sales, logistics and service to environmental policy - all in all, to offer maximum benefit to our customers all over the world.

Furthermore, our quality responsibility includes being proactive in protecting our environment and natural resources. We endeavour to avoid or minimize environmental pollution - even beyond the requirements of legal regulations whenever possible.

Rosenberger is certified according to ISO/TS 16949:2002, ISO 9001 and ISO 14001.

European Environmental Directives

Connectors and cable assemblies manufactured by Rosenberger correspond to the following European Directives:

- 2002/95/EG – Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment (**RoHS**)
- 2002/96/EG – Waste Electrical and Electronic Equipment (**WEEE**)
- 2003/11/EG and 2000/53/EC – End of Life Vehicle (**ELV**)
- IEC 61760- 1 - max. soldering temperature +260°C for 10 sec. for PCB connectors

The objective of the above mentioned European Directives is to avoid or to limit the use of the following hazardous substances:

- Lead
- Mercury
- Cadmium
- Chrome VI
- PBB (Polybrominated Biphenyls)
- PBDE (Polybrominated Diphenyl Ethers)

Qualität

Die hohe Qualität unserer Produkte und Serviceleistungen ist ein grundlegender Bestandteil unserer Unternehmensstrategie. Die Rosenberger-Qualitätsphilosophie beinhaltet nicht nur die Optimierung aller einzelnen Produkte, sondern auch die kontinuierliche und abteilungsübergreifende Verbesserung und Optimierung aller Unternehmensprozesse: von der Produktentwicklung über Planung, Einkauf, Produktion, Vertrieb, Logistik bis hin zur Umweltpolitik – mit dem Ziel, allen unseren Kunden weltweit größtmögliche Kundenzufriedenheit zu bieten.

Darüber hinaus umfasst unsere Verantwortung für Qualität auch stets umweltbewusstes Handeln und Schutz der natürlichen Ressourcen. Unser Ziel ist es, eine Verschmutzung der Umwelt zu vermeiden beziehungsweise auf ein Minimum zu beschränken – möglichst deutlich unterhalb der gesetzlich erlaubten Grenzwerte.

Rosenberger ist zertifiziert nach ISO/TS 16949. Viele weitere Zertifikate, z.B. das Umwelt-Zertifikat ISO 14001, zeugen von konsequent angewandtem Qualitätsmanagement.

EU- Umweltschutzrichtlinien

Die von Rosenberger gelieferten Steckverbinder und Kabel-Assemblies sind mit folgenden EU- Richtlinien konform:

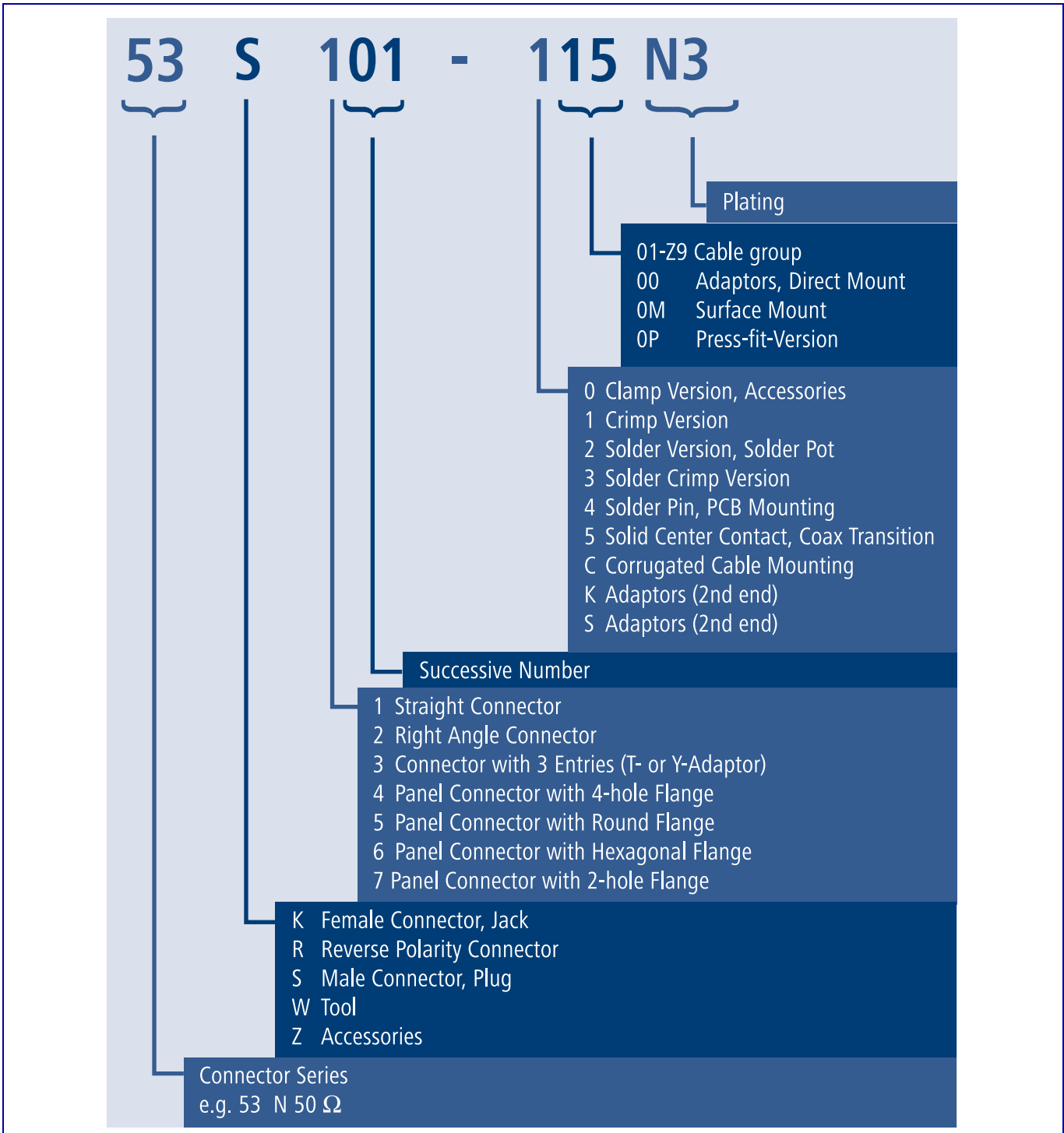
- 2002/95/EG – Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment (**RoHS**)
- 2002/96/EG – Waste Electrical and Electronic Equipment (**WEEE**)
- 2003/11/EG und 2000/53/EC – End of Life Vehicle (**ELV**)
- IEC 61760- 1 - max. soldering temperature +260°C for 10 sec. for PCB connectors

In den aufgeführten EU- Richtlinien ist die Vermeidung bzw. die Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte bei Einsatz folgender Stoffe geregelt:

- Blei
- Quecksilber
- Cadmium
- Chrom VI
- PBB (Polybromierte Biphenyle)
- PBDE (Polybromierte Diphenylether)

Number Designation

Nummernschlüssel



Cable Groups

Kabelgruppen

Cable Group	Impedance	Cable Type
01	50 Ω	RG 178, RG 196
02	50 Ω	RG 316/U, RG 174 A/U, RG 188, G 022 32
02	75 Ω	RG 179, RG 187, L910/22
03	50 Ω	RG 316/U- d, K 02252 D, 5YCC6Y 0,54/1,5
03	75 Ω	RG 179- d, L 910/19
06	50 Ω	RG 58 , RG 141
07	50 Ω	RG 142, RG 223, RG 400
08	50 Ω	RG 142, RG 223, RG 400
09	75 Ω	RG 59, G 04233- 2, URM 104, Video 0,6/3,7
10	93 Ω	RG 62
11	93 Ω	RG 71
12	75 Ω	RG 212, RG 222
13	75 Ω	Belden 9248, 2YCY 0,80/4,8
14	75 Ω	RG 6
15	50 Ω	RG 213
16	50 Ω	RG 225, RG 393
17	50 Ω	RG 214
18	75 Ω	RG 11
21	50 Ω	RG 217
22	50 Ω	RG 218
26	75 Ω	Video 1,0- 6,6
28	75 Ω	BT 2003, G 04233
29	75 Ω	G 03233d, 2 S PTT 6012
40	75 Ω	RG 180, RG 195, 2YCY 0,4/2,5
41	75 Ω	2YCCY 0,4/2,5; 2YC(ms)CY 0,4/2,5
42	75 Ω	2YCY 0,7/4,4
43	75 Ω	2YCCY 0,7/4,4
44	75 Ω	2YCCY 1,0/6,5
50	75 Ω	BT 2001
M4	50 Ω	RTK 031, RTK 032
N8	50 Ω	LMR 200
N9	50 Ω	LMR 400, TZC 50032
P7	75 Ω	Flex 3
S3	75 Ω	R1- T 2.0 LIXI 75K
S4	75 Ω	ST 212
T6	75 Ω	Tella TM 13
T7	75 Ω	Flex 5/75
V2	75 Ω	735 A, 02Y(St)CY 0,45/2,0
V4	75 Ω	02XSC(ms)C6Y0.45/2.0; 02Y12Y(ms)C6X0.45/2.0
V6	75 Ω	BT 3002, TZC 75024, TZC 75025
Y4	50 Ω	RTK 043, HF50 1,4/3,7 C
Y8	50 Ω	RTK 057, TZC 50025
70	50 Ω	UT 47
71	50 Ω	UT 85, RG 405/U, RTK- FS 085
72	50 Ω	UT 141, RG 402/U, RTK- FS 141
73	50 Ω	UT 250, RG 401/U, RTK- FS 250

Cable Group	Impedance	Cable Type
C01	50 Ω	Flexline 1-4"R
C02	50 Ω	Flexline 3/8"S
C03	50 Ω	Flexline 1/2"R
C05	50 Ω	Flexline 7/8"R
C06	50 Ω	Flexline 1 1/4"R
C07	50 Ω	Flexline 1 5/8"R
C08	50 Ω	Flexline 1/2"S
C09	50 Ω	Flexline 1/4"S
C15	50 Ω	Flexline 7/8"S

Plating Code

The used platings of outer and center contacts of Rosenberger connectors can be identified by each part number.

Example:

28S247- 303N3

Plating outer contact: white bronze (N)

Plating center contact: gold (3)

Oberflächenschlüssel

Die verwendeten Oberflächen bei Innen- und Außenleiter der Rosenberger-Steckverbinder sind durch die beiden letzten Stellen der jeweiligen Artikel- Bestellnummer definiert.

Beispiel:

28S247- 303N3

Oberfläche Außenleiter: White bronze (N)

Oberfläche Innenleiter: Gold (3)

Standard plating codes of Rosenberger connectors

Die Rosenberger Standard- Oberflächen

Outer Contact

Außenleiter

Code	Plating	Symbol	Layer thickness	Magnetic properties
A	Nickel	Ni	3.00 μm	
B	Silver	Ag	3.00 μm	Non magnetic
E	Gold	Au	0.80 μm	
F	Gold	Au	0.10 μm	
H	Gold	Au	1.27 μm	
L	Gold over chem. Nickel	Au	0.15 μm	Non magnetic
N	White bronze (e.g. Optalloy ®) Flash white bronze over silver (e.g. Optargen ®)			Non magnetic
S	Stainless Steel			
T	Tin/Lead	Sn	6.00- 8.00 μm	Non magnetic

Center Contact

Innenleiter

Code	Plating	Symbol	Layer thickness	Magnetic properties
1	Silver	Ag	3.00 μm	Non magnetic
3	Gold	Au	1.27 μm	
4	Gold	Au	0.80 μm	
5	Gold	Au	0.15 μm	Non magnetic

Belting and Packing

A lot of Rosenberger PCB connectors are supplied in rolled packaging (tape & reel) for automatic component placement. Different types of blister tapes are available.

The dimensions of tape & reel packaging can be provided on request from your Rosenberger partner. Please refer to specific VG-number (column packing, product section).

Belting and packaging correspond to **IEC 60286- 3/EIA- 481**.

Gurtung und Verpackung

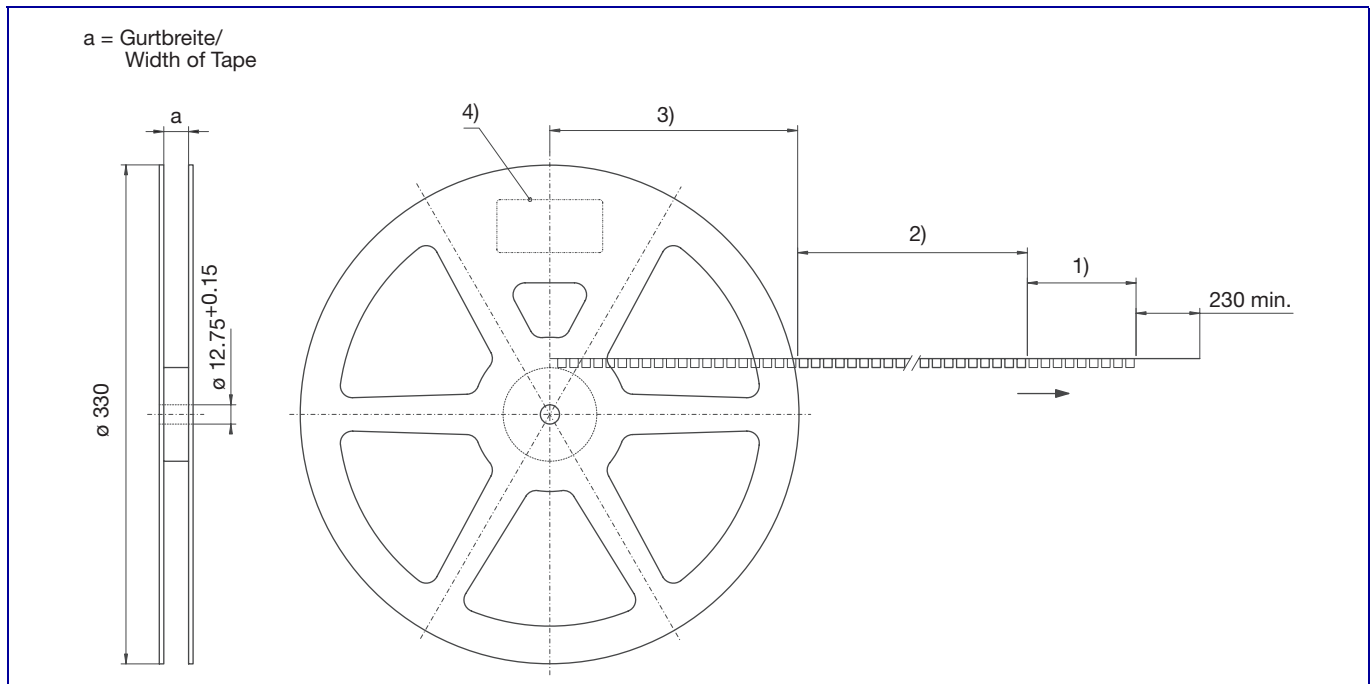
Viele Leiterplatten- Steckverbinder von Rosenberger werden für automatische Bestückung in Rollenverpackungen (Tape & Reel) ausgeliefert. Als Verpackung werden verschiedene Blistergurt- Typen verwendet.

Die genauen Abmessungen der jeweiligen Tape & Reel- Verpackungen erhalten Sie unter Angabe der VG- Nummer (Spalte Packing im Produktteil) von Ihrem Ansprechpartner.

Gurtung und Verpackung entsprechen **IEC 60286- 3/EIA- 481**.

Tape & Reel Packing

Rollenverpackung



Legend Text

- 1) Blister tape, without connectors
- 2) Blister tape, with connectors
- 3) Blister tape, without connectors
- 4) Barcode: number of connectors, connector types, date, lot number

Legendentext

- 1) Leeres Gurtstück
- 2) Gurtstück mit Steckverbindern
- 3) Leeres Gurtstück
- 4) Barcode: Anzahl Steckverbinder, Artikel- Nummer, Datum, Los- Nummer

Basics

1. Cable termination

A coaxial connector can be mounted on a coaxial cable in different manners, which in turn significantly determine the physical design of the connector.

Common cable termination methods are:

- Screw-clamp termination
- Full-crimp termination
- Solder-crimp termination
- Soldered termination (for semi-rigid cables).

a) Screw-clamp termination (**clamp**)

The center pin of the connector is soldered to the central conductor of the stripped and trimmed coaxial cable. The cable braid screen is clamped to the inside of the connector body by means of a threaded conical clamping nut. A rubber gasket secures the cable jacket.

Advantages: This method of termination is robust, offers a certain degree of moisture protection and permits reuse of the terminator components. The connector can be assembled in the field using simple open-jawed spanners and does not require special tools.

b) Full-crimp termination (**crimp**)

The tube-like center pin of the connector is pushed onto the central conductor of the stripped and trimmed coaxial cable. The tube section is then deformed using a specially designed crimping tool in such a manner as to create a gas-tight joint between the two parts. The prepared cable is finally inserted into the connector body. The cable braid extends over the crimp ferrule in the connector body and is joined by deforming the cylindrical crimping sleeve.

Advantages: Low cost termination method with consistent quality, ideally suited for large quantities. The clamping force is so high that the cable breaks before the crimp connection cedes. **Disadvantages:** the connector components cannot be reused and special tools are required.

c) Solder-crimp termination (**solder-crimp**)

This method is similar to that described in method b), with the exception that the central conductors of both the cable and the connector are soldered together.

d) Soldered termination (**solder**)

This method is usually employed for the preparation of semi-rigid cables and can be performed in two ways:

The center pin and body of the connector are soldered respectively to the center and outer conductors of the semi-rigid cable, or the central conductor of the prepared semi-rigid cable is also utilized as the center pin of the connector and only the body of the connector is soldered to the outer conductor of the semi-rigid cable. This method is restricted to the SMA connector series. During assembly, special attention must be paid to the maximum permissible temperature of the dielectric material.

2. Cable retention force

The design of the cable terminal fixture is such that the retention force is in excess of that needed for the individual cable. Relevant standards (i. e. CECC 22 000) specify these retention requirements.

Under normal circumstances, the cable termination is designed to ensure that it will not fail before cable breakage occurs.

3. Center pin retention

The center pin of the coaxial connector can be mounted in two ways:

Non-captivated pin

After soldering or crimping the center pin to the cable center conductor, it is inserted into the connector's dielectric support. This method avoids sudden variations in the diameter of the center pin and therefore offers extremely low reflection values.

Captivated pin

The center pin features a shoulder and is held axially between two dielectric supports within the connector body. In order to minimize effects on reflection, the increase in diameter is electrically compensated. This method offers precise mechanical positioning even under conditions of extreme mechanical and/or thermal stress.

4. PCB-mounted coaxial connectors

The Rosenberger product range includes numerous PCB-mounted coaxial connectors. The selection obviously concentrates on those connector series whose physical size and mass are suited to such applications.

The available connector types include both plugs (male) and jacks (female) in straight and angled versions, with various footprint dimensions and numbers of contact pins. The electrical connection to the PCB is performed by one of the following techniques: soldering, press-fit or surface-mount-technology.

Press-fit technology is an electrically and mechanically sound solderless connection method. Elastically compliant contact pins of varying shapes are pressed into the metallized PCB holes. The dimensioning of the press-in area is such that the contact area between the compliant zone of the contact pins and the metallized PCB hole walls transforms into a gas-tight and reliable high quality electrical connection. Thermal stress on PCB and components as well as contamination, both present in the wave soldering process are avoided here. Repair and exchange of components is straightforward. These and other reasons recommend press-fit technology for low-cost mass production.

5. Coaxial connectors for planar circuits

Connectors are frequently being applied to fast digital and planar circuits in the RF area using printed circuit boards which do not require through-plating of the board.

These Surface Mount Devices (SMD) permit fast and reliable data transmission on low-priced circuit boards, since the interconnection routes between the individual components are extremely short.

Surface Mount Coaxial Connectors (SMCC) were developed to satisfy the requirements of SMD technology. They are low-priced miniature connectors which permit a high packing density and satisfy stringent electrical requirements up to 20 GHz.

They provide interfaces from a PCB to other PCBs, antennas, modems, output amplifiers and many other devices.

Detailed information, sample connectors with various coaxial interfaces, motherboards and necessary measurement accessories are contained in the developer's kit 99E001-000.

6. Glossary

Attenuation

The reduction of the amplitude of a signal after passing through a high-loss two port network. A section of a transmission line can be considered to be such a network. On a coaxial line, the sum of the following loss elements causes the attenuation of the transmitted electromagnetic wave:

- resistive loss of the inner conductor
- resistive loss of the outer conductor
- leakage loss between the inner and outer conductors

whereby the resistive losses are influenced by the \Rightarrow skin effect especially at high frequencies. It must also be noted that the current routes are longer if the conductor surface is rough. The effective resistance and losses are greater than in the case of conductors with a smooth surface.

The attenuation is normally stated as the logarithm of the ratio of the network input signal to the network output signal in Neper (N) or decibel (dB).

The following equation is used to calculate the attenuation from the input

$$\alpha = \ln \frac{U_1}{U_2} [\text{N}] \qquad \alpha = 20 \log \frac{U_1}{U_2} [\text{dB}]$$

$$\alpha [\text{N}] = 8,686 \times \alpha [\text{dB}]$$

and output powers of the network:

$$\alpha = 10 \log \frac{P_1}{P_2} [\text{dB}]$$

Attenuation constants

The real component of the \Rightarrow propagation constant γ is described as the attenuation constant. It describes the exponential reduction of the amplitudes of the current and voltage as a function of the line length.

The attenuation constant is zero for zero-loss lines, i.e. for lines where the resistance per unit length and the conductance per unit length are equal to zero.

For relatively low loss lines where $G' \ll \omega C'$ (C' capacitance per unit length) and $R' \ll \omega L'$ (L' inductance per unit length) the equation

$$\alpha \approx \frac{R'}{2Z_L} + \frac{G'Z_L}{2}$$

gives a real value for the attenuation constants which is solely dependent on the line parameters.

Characteristic impedance

Characteristic parameter of a transmission line for the calculation of the current and voltage distribution on the transmission line and its transformation properties. The characteristic impedance is defined as the quotient of the voltage and current at any point on the transmission line, if solely a traveling wave exists on the transmission line.

On a low-loss transmission line where $R' \ll \omega L'$ and $G' \ll \omega C'$, the characteristic impedance can be determined by

$$Z_L = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

If the transmission line is coaxial and has an external conductor with diameter D , an inner conductor with diameter d and an insulation with the dielectric constant ϵ_r , then the characteristic impedance of the transmission line can be calculated using

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d}$$

Coaxial connector

A coaxial connector should provide a connection between two lines of the same characteristic impedance, that is as uniform, reliable and reflection-free as possible. It should be simple to connect and disconnect, possess good electrical transmission characteristics and offer a high degree of insensitivity to electromagnetic interference. The \Rightarrow characteristic impedance of the connector can be very well matched to the characteristic impedance of the various cables.

One can differentiate between two basic types of connector:

the **polarized** connector, where one part has a (male) plug pin contact and the other part, a (female) socket contact, and

the **non-polarized** connector, where the connector elements to be connected are generally symmetrical in form and the contact at the inner and outer conductors is achieved by a butt contact.

The inner conductor is mostly retained within the outer conductor by means of a dielectric support. The design of this support significantly influences the reflection behavior of the connector.

Coaxial cavity resonator

Transmission line sections of particular lengths and termination resistances possess similar resonance characteristics to oscillating circuits comprising capacitance, inductance and resistance. Depending on the layout, parallel or serial resonance can be generated.

Crosstalk

Mutual interference of signals in neighboring transmission lines or electrical systems by electrical, magnetic and/or electromagnetic coupling.

- \Rightarrow Shielding
- \Rightarrow EMC
- \Rightarrow Transfer impedance

Cutoff frequency

The highest frequency at which only the fundamental wave of the corresponding waveguide can be propagated. The transmission characteristics of the waveguide can become unstable above the cutoff frequency due to the occurrence of higher modes.

The cutoff frequency for coaxial cables describes the maximum frequency at which only the fundamental wave of the \Rightarrow two-wire line, the TEM_{00} wave, can be propagated. It can be calculated by:

$$f_G = \frac{2c}{\pi\sqrt{\epsilon_r}} \times \frac{1}{D+d}$$

where

- ϵ_r = relative dielectric constant of the insulator
- c = speed of light
- d, D = diameters of the inner and outer conductors

Dielectric constant

The insulation or dielectric materials used in electrical engineering are characterized by several material constants. The loss factor $\tan\delta$ and the relative dielectric constant ϵ_r of the insulating material are the main parameters to be considered when selecting the optimum dielectric material and the associated component design. Both parameters significantly influence the \Rightarrow propagation constant (and the \Rightarrow characteristic impedance Z_0 of a line or line section, e.g. of a connector).

The dielectric constant describes the behavior of the material in electric fields.

The absolute dielectric constant $\epsilon_0 = 8,8542 \times 10^{-12}$ As/Vm applies to a vacuum as an insulator. The relative dielectric constant ϵ_r is to be observed for real materials used in practical applications. The relative dielectric constant ϵ_r is to be as low as possible for most applications. Examples of the relative dielectric constant for materials often used as insulators are:

Air	$\epsilon_r = 1.0006$
Polystyrol	$\epsilon_r \approx 2.56$ (frequency dependent)
PTFE	$\epsilon_r \approx 2,04$ (frequency dependent)

EMC

Electro-Magnetic Compatibility describes the degree of protection of an electrical system against external interference, or the degree of interference of other systems by this system. The mutual interference of the systems can be caused by electrical, magnetic or electromagnetic fields. The reduction of the interference and the associated increase in the EMC can be achieved mainly by appropriate \Rightarrow shielding

Equivalent line circuit

The representation of the line circuit by means of locally concentrated circuit elements, which are calculated from the line parameters per unit length of the line section being considered. After applying these concentrated elements, line calculations can be performed using the general Kirchhoff's laws.

Free space impedance

Free space impedance represents the ratio of electrical to magnetic field strength for a plane wave in a vacuum. The relationship in the equation for two-wire lines gives the so-called free space impedance.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377\Omega$$

Input impedance

The input impedance is the quotient of the complex voltage and the complex current at the start of the line and is dependent upon the line parameters (\Rightarrow characteristic impedance and \Rightarrow propagation constant), the line length and also the line termination resistance.

Depending upon the type of line terminator and the line length, the input impedance can behave as an inductance or a capacitance. It can be equal to the characteristic impedance or behave as a parallel or serial resonant circuit. This behavior is utilized to generate circuit elements such as inductance, capacitance or resonators based on such line sections.

Intermodulation

Produced new, undefined and unwanted signals on non-linear characteristics at components in signals.

Intermodulation factors:

- magnetic materials
- Contact force, contact surfaces
- Oxidized contact surfaces

Line parameters

The specific line parameters define the electrical properties of a line as the so-called primary \Rightarrow transmission line constants. They represent the circuit elements of the \Rightarrow line equivalent circuit related to the line length. The following are defined:

Resistance per unit length R'

The ohmic line resistance for both the outgoing and return wires under consideration of the skin effect, related to a unit of length

Inductance per unit length L'

The line inductance for both the outgoing and return wires related to a unit of length

Conductance per unit length G'

The line conductance between the outgoing and return wires related to a unit of length

Capacitance per unit length C'

The line capacitance between the outgoing and return wires related to a unit of length.

The following values are typical for a low-loss coaxial line

$$(G' \ll \omega C' \text{ and } R' \ll \omega L')$$

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{d}$$

$$C' = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln \frac{D}{d}}$$

where

- D = diameter of the outer conductor
- d = diameter of the inner conductor
- μ_0 = 1.256×10^{-6} Vs / Am
- ϵ_0 = 8.854×10^{-12} As / Vm
- ϵ_r = relative dielectric constant of the dielectric used, in the case of air 1.0006

Line transformer

Transmission line sections possess certain transformation properties depending on their length, i.e. the resistance at the end of a line (termination resistance) is transformed into another resistance (input resistance) at the start of the line.

The $\lambda/4$ - and $\lambda/2$ transformers are of special significance in this respect.

Measurement line

Measurement lines are rigid transmission lines of the respective line type (e.g. waveguide or coaxial line) with which the field distribution along the line is sampled using a specially designed low power probe.

The mismatched test specimen, (e.g. a piece of coaxial cable of unknown, to be determined, characteristic impedance), which is fitted to the measurement line as the terminating resistance, causes a standing wave on the measurement line; this in turn has a certain relationship between the maximum and minimum amplitudes, and from this, the \Rightarrow reflection coefficient of the test specimen can be calculated.

Mismatching

If the termination resistance of a line is different to its characteristic impedance, then the line is mismatched. Mismatching causes reflections and results in losses which are generally undesirable. It is caused in coaxial connectors by deviations from the theoretical design dimensions (tolerances) and also by inaccuracies in the assumed material used for manufacture.

The extent of the mismatching is characterized by the \Rightarrow reflection coefficient.

Mono mode range for coaxial cables

Frequency range within which only the Lecher wave is capable of propagation on the coaxial cable and which is in turn responsible for the propagation parameters. A \Rightarrow cutoff frequency occurs at the higher end of this mono mode range. Above this frequency, additional wave types can be stimulated (e.g. by line discontinuities) in waveguide mode (E or H Modes) and can lead to irregularities.

As an approximate calculation of the cutoff wavelength λ_c for other wave types in addition to the Lecher wave, the following equation is valid for the ratio $d/D > 0.2$ (D = diameter of the outer conductor and d = diameter of the inner conductor of the coaxial cable).

$$\lambda_c \approx \frac{\pi}{2}(d + D)[H_{11}]$$

$$\lambda_c \approx (D - d)[E_{01}]$$

Typical examples are

coaxial cross section 3/7 (N connector)	$f_c \approx 19$ GHz
coaxial cross section 7/16 (7/16 connector)	$f_c \approx 8,3$ GHz

Multiple reflections

As a general rule, most transmission lines do not have ideal terminations without reflections at both ends of the line. The waves that throughout the transmission system are reflected both at the input and the output ends are propagated. By this means, repeatedly reflected waves are propagated that superimpose themselves on the primary waves. Continuous new reflections finally cause a resulting multiple reflection wave.

No- load impedance

\Rightarrow Input impedance of a line that is open at the remote end.

Phase constant

The imaginary component of the \Rightarrow propagation constant γ is designated as phase constant β . It indicates the gradient of the current and voltage phases as a function of the transmission line length.

For relatively low-loss lines, where $G' \ll \omega C'$ (C' capacitance per unit length) and $R' \ll \omega L'$ (L' inductance per unit length), the equation

$$\beta = \omega \sqrt{L'C'}$$

gives a real value for the phase constant that is solely dependent on the line constants and the frequency.

Phase speed

The phase speed v_{ph} is the speed with which a voltage phase relationship is propagated on a transmission line. It is equal to the ratio of the angular frequency $\omega = 2\pi f$ and the phase constant β . It corresponds to the group velocity v_{gr} for the Lecher or, on coaxial lines, TEM (Transversal Electro-Magnetic) waves and is the determinative velocity for the transmission of information.

Propagation constant γ

The propagation constant describes the longitudinal wave propagation along a conductor. Together with the \Rightarrow characteristic impedance, it permits the calculation of the current and voltage distribution on the conductor and their transformation characteristics.

Relatively simple \Rightarrow line equations can be stated for the special case of coaxial cables which represent the gradient of the voltage and current along the line as a function of the primary \Rightarrow transmission line constants (\Rightarrow propagation constants per unit length) namely resistance per unit length R' , electrical conductance per unit length G' , capacitance per unit length C' and the inductance per unit length L' . The propagation constant γ is given with \Rightarrow attenuation constant α and \Rightarrow phase constant β .

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

The attenuation constant α is zero for zero-loss lines.

Rated voltage

Maximum voltage that can be continuously applied to a connector, a cable or any other electrical component without causing a permanent change to the technical parameters or even the destruction of the component.

Reflection coefficient

The ratio of the voltage returning from the load to the voltage supplied by the generator and measured at the terminating resistance is defined as the complex reflection coefficient. In the same manner, a definition based on the transmitted and reflected currents is also possible.

The reflection coefficient is therefore related to the complex characteristic

$$r = \frac{(Z - Z_0)}{(Z + Z_0)}$$

impedance Z_0 of the transmission line and the complex \Rightarrow termination resistance Z by the equation

The values for the \Rightarrow voltage standing wave ratio and the \Rightarrow inverse voltage standing wave ratio can be calculated from the value of the reflection coefficient.

As a practical example a reflection coefficient is named here resulting from the connection of a 50Ω connector with a 75Ω connector, which is quite possible with many connectors, e.g. a BNC, whether intended or not:

$$r = \frac{(75 - 50)}{(75 + 50)} = 0,2$$

corresponding to a voltage standing wave ratio (VSWR) $s = 1.5$ and an inverse voltage standing wave ratio $m = 0.67$.

Return loss coefficient

Logarithmic measure for \Rightarrow reflection coefficient.

$$\alpha = -20 \log(r)$$

Shielding

Shielding structures made from various metals or combinations of metals (housing, braids, foil tape, etc.) are employed to minimize the influence of electrical and magnetic fields on electronic modules, components and circuits. The effectiveness of the shielding is dependent upon the quality and impermeability of the protective measures and the type of materials \Rightarrow transfer impedance.

Short circuit impedance

\Rightarrow Input impedance of a line with a short circuit at the remote end.

Skin effect

Alternating currents do not uniformly occupy the entire cross section of the conductor, rather inductance effect in the conductor deflects the current towards the surface of the conductor, whereby this deflection increases with the frequency.

The resistive attenuation of a transmission line increases with the frequency as a result of this skin effect.

The skin depth (equivalent thickness of the layer in which current flows) can be determined using

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{f\pi\sigma\mu_0\mu_r}}$$

where

f = frequency

σ = conductivity of the conductor material

$\sigma_{Ag} = 62 \times 10^6 \text{ S/m}$

$\sigma_{Cu} = 58 \times 10^6 \text{ S/m}$

$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Vs / Am}$

μ_r = relative permeability constant for the employed material

Smith chart

Representation of the complex plane of the \Rightarrow reflection coefficient within the restrictions of the unit circle. This contains lines of constant real components and constant imaginary components of complex resistances, each normalized respectively to the \Rightarrow characteristic impedance. Resistance transformations on transmission lines and the corresponding matching circuits can be calculated relatively easily using the Smith chart.

\Rightarrow Line transformer.

TEM wave

Transversal Electro-Magnetic waves possess electrical and magnetic field components that lie exclusively in one plane that is transversal (vertical) to the propagation direction. No components exist in the propagation direction. The fundamental waves capable of propagation on \Rightarrow twin-wire lines (e.g. coaxial lines) are of the TEM type.

Test voltage

The maximum voltage to which a component (e.g. connector) may be subjected under defined environmental conditions (temperature, atmospheric pressure) for a specified time without causing its destruction.

Transfer impedance

The design of the outer conductor of coaxial cables is responsible for the shielding effect. Its impermeability, i.e. the portion of the electromagnetic wave carried down the coaxial cable that is radiated through the outer conductor, is defined by the transfer impedance.

The transfer impedance Z_k of a section of line (e.g. cable, connector) is defined as the quotient of the voltage difference measured between the ends of the outer conductor of the line section and the current flowing in the inner conductor. The specification of the specific transfer impedance i.e. transfer impedance per unit length, is meaningful for coaxial cables.

A high frequency system consisting of cables with respective connectors is more impermeable when the transfer impedance of the system or its individual components is small at a comparable frequency. The connection points of the connector to the coaxial cable cause additional transfer impedance which increases approximately proportional to the frequency. Special attention should be paid to the correct and low-inductance layout of these connection points.

Transmission coefficient g

Measurement of the degree of transmission of a signal through a two port network: ratio of the transmitted wave voltage amplitudes to the wave at the input to the two port network.

Transmission equations

Using the transmission equations, the current and voltage profiles on the line can be calculated as a function of the \Rightarrow transmission line constants (characteristic impedance and propagation constant) as well as the frequency and line length.

Transmission line constants

The transmission line constants are the characteristic parameters of a transmission line. A differentiation is made between the primary specific transmission line constants (capacitance per unit length C' , inductance per unit length L' , resistance per unit length R' , and the electrical conductance per unit length G'), and the secondary transmission line constants \Rightarrow characteristic impedance Z and the \Rightarrow propagation constant γ .

Two-wire line

The most common type of electrical cable consists of two individual, mutually insulated conductors. The technical design can vary considerably, ranging from a parallel conductor type cable to a concentric coaxial cable. The most common wave mode encountered on a two-wire line is the Lecher wave (\Rightarrow TEM mode). This possesses only transverse electrical or magnetic field components but none in the direction of propagation. The propagation of this type of wave on a line is possible for all wavelengths. If the frequency is sufficiently high, special Type E or Type H waves can be propagated, thus causing disturbances to the basic Lecher wave.

Relatively simple \Rightarrow line equations can be stated for two-wire lines which represent the gradient of the voltage and current along the line as a function of the primary \Rightarrow transmission line constants, resistance per unit length R' , electrical conductance per unit length G' , capacitance per unit length C' and the inductance per unit length L' . R' and G' are small for the low-loss two-wire lines normally employed, and the following generally apply:

$$R' \ll \omega L' \quad \text{and} \quad G' \ll \omega C'$$

so that a real frequency-independent parameter Z_0 results for the \Rightarrow characteristic impedance.

This characteristic impedance is solely dependent on the geometric dimensions of the line and the employed dielectric, so that practical designs of two-wire lines and components can be quite simply dimensioned on this basis.

VSWR (Voltage standing wave ratio)

The ratio between the value of the largest and the smallest voltages on a loss-free line is known as the ripple or voltage standing wave ratio s (where $1 \leq s \leq \infty$). The reciprocal value of the VSWR is known as the inverse voltage standing wave ratio m (where $0 \leq m \leq 1$).

The value of s is linked with the \Rightarrow reflection coefficient r on a transmission line according to the equation

$$s = \frac{(1 + |r|)}{(1 - |r|)}$$

Waveguide

Waveguides are hollow tubes of variable dimensions with electrically conducting walls, in which electromagnetic waves can propagate in an axial direction. Various propagation modes are possible. The transmission characteristics of a waveguide are comparable to a high-pass. At frequencies higher than the cutoff frequency (that is dependent upon the geometry of the waveguide), the electromagnetic wave is propagated in a longitudinal direction. At frequencies below the cutoff frequency, the wave represents a critically damped field. The fundamental wave of a waveguide is the natural wave with the lowest cutoff frequency, i.e. the wave with the lowest frequency that is capable of propagation. The mono mode range of a waveguide defines the frequency range for which there is only one wave in the waveguide that is capable of propagation.

The most commonly used waveguides possess rectangular, circular or elliptical cross-sections.

Waveguide waves (mostly undesirable) can also be stimulated and propagated in a coaxial cable. The mono mode range dictated by the geometry of the coaxial line must be carefully considered during design.

Wavelength

Local period duration of an oscillation.

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta}$$

mit (β = phase constant)

$$\beta = \omega \sqrt{L'C'}$$

or

$$\lambda = \frac{c_0}{f}$$

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2,997925 \times 10^8 \text{ m/s}$$

c_0 = Velocity of light in a vacuum

Technische Erläuterungen

1. Kabelbefestigung

Zum Anschluss des Steckverbinders an das vorgesehene Kabel sind verschiedene Möglichkeiten vorgesehen, wobei die gewählte Anschlussart die konstruktive Ausführung des Steckverbinders wesentlich mitbestimmt.

Es werden unterschieden

- Kabelbefestigung in Schraub- Klemm- Technik
- Kabelbefestigung in Voll- Crimp- Technik
- Kabelbefestigung in Löt- Crimp- Technik
- Kabelbefestigung in Löt- Technik (Semi- rigid- Kabel).

a) Schraub- Klemm- Befestigung (**klemm**)

Der Innenleiter des Steckverbinders wird mit dem Innenleiter des vorbereiteten Koaxialkabels verlötet, der Schirm des Kabels über eine Klemmkonus- Schraubpressung mit dem Steckverbinderkörper verbunden. Der Mantel des Kabels wird durch eine Gummidichtung festgehalten.

Vorteile: Die Verbindungsart ist zuverlässig und in bestimmten Grenzen feuchtigkeitsdicht, die Einzelteile des Steckverbinders sind wiederverwendbar. Die Bearbeitung kann auch unter Feldbedingungen erfolgen, es sind keine Spezialwerkzeuge erforderlich, ausreichend sind einfache Maulschlüssel.

b) Voll- Crimp- Befestigung (**crimp**)

Der Innenleiter des Steckverbinders wird mit seinem rohrförmigen Teil auf den Innenleiter des vorbereiteten Koaxialkabels aufgeschoben und danach wird dieses rohrförmige Teil definiert mittels eines speziellen angepassten Werkzeuges so verformt, dass eine Pressverbindung zwischen den beiden Teilen entsteht. Anschließend wird das so vorbereitete Kabel in den Steckverbinderkörper eingedrückt. Der Schirm des Kabels liegt auf der Crimptülle des Körpers auf und wird durch Anpressen der Crimphülse fest mit diesem verbunden.

Vorteile: Kostengünstige Variante für große Stückzahlen, sie liefert sehr gleichmäßige Kabelanschlüsse. Die Kabelfesthaltekraft erreicht hohe Werte, im Normalfall reißt das Kabel vor der Lösung der Crimpverbindung. Nachteile: Die Einzelteile des Steckverbinders sind nicht wiederverwendbar, zur Verarbeitung werden Spezialwerkzeuge benötigt.

c) Löt- Crimp- Befestigung (**löt- crimp**)

Im Unterschied zur Befestigungsart b) werden die Innenleiter von Kabel und Steckverbinder verlötet.

d) Löt- Befestigung (**löt**)

Diese Anschlussart ist bei der Konfektionierung von halbstarren Kabeln (semi- rigid- Kabeln) üblich.

Es existieren zwei Möglichkeiten: Bei der ersten werden Innenleiter und Gehäuse des Steckverbinders mit Innenleiter bzw. Außenleiter des Kabels verlötet, bei der zweiten wird der Innenleiter des Kabels gleichzeitig als Steckverbinder- Innenleiter mitbenutzt, und nur ein spezieller Außenleiterkörper wird mit dem Kabelmantel verlötet. Die zweite Variante ist auf SMA- Steckverbinder beschränkt.

Bei der Verarbeitung ist besonders auf Einhaltung der für das eingesetzte Isolationsmaterial zulässigen Maximaltemperatur zu achten.

2. Kabelhaltekraft

Die Konstruktion der Kabelfesthaltung ist so ausgeführt, dass ihre Haltekraft auf jeden Fall die Zugfestigkeit, die vom Aufbau des Kabels abhängig ist, übersteigt. Diese Zugfestigkeit entspricht den einschlägigen Normen (z. B. CECC 22 000) und wird vom Hersteller des Kabels spezifiziert.

Im Normalfall ist die Konstruktion des Steckverbinders so ausgelegt, dass vor dem Nachgeben der Kabelfesthaltung zuerst das Kabel selbst reißt.

3. Innenleiter- Festhaltung

Der Innenleiter kann im Koaxialsteckverbinder auf zwei verschiedene Arten angeordnet sein:

loser Innenleiter- Kontakt:

Der Innenleiterkontakt wird bei der Konfektionierung auf den Innenleiter des Kabel geschoben und mit diesem verbunden (Lötung oder Crimpung). Anschließend wird diese Verbindungsstelle in die Isolierstütze des Steckverbinders eingeschoben. Derartige Kontakte vermeiden Durchmessersprünge am Innenleiter und erlauben damit eine reflexionsarme Konstruktion.

festgehaltener Innenleiter:

Der Innenleiterkontakt besitzt eine Verdickung und wird mittels einer zweigeteilten Isolierstütze axial im Steckverbinderkörper festgehalten. Der Innenleitersprung wird elektrisch kompensiert, so dass der Einfluss auf den Reflexionsfaktor gering bleibt. Derartige Kontakte besitzen den Vorteil der präzisen mechanischen Positionierung auch bei extremer thermischer oder mechanischer Belastung des Steckverbinders.

4. Steckverbinder für Leiterplatteneinsatz

Im Gesamtsortiment ist eine Vielzahl von Steckverbindern für den Einsatz auf Leiterplatten vorhanden, wobei sich die Auswahl vor allem auf solche Steckverbinderserien konzentriert, die von ihrer Größe und ihrer Masse her für derartige Anwendungen geeignet erscheinen.

Es existieren Bauformen für Stecker und Kuppler in gerader und winkliger Ausführung mit verschiedenen Rastermaßen und unterschiedlicher Anzahl von Kontaktstiften, die Kontaktierung zur Leiterplatte kann mittels Löt- oder Einpresstechnik erfolgen.

Einpresstechnik ist eine elektrisch und mechanisch saubere Verbindungsmethode ohne Lötung, wobei unterschiedlich gestaltete, meist elastisch verformbare Kontaktstifte in die metallisierten Bohrungen der Leiterplatte eingepresst werden. An den Berührungsstellen zwischen den Einpresszonen der Kontaktstifte und den Metallwänden der Bohrungen entstehen bei richtig aufeinander abgestimmter Dimensionierung von Einpressbereich des Kontaktstiftes und Einpressloch elektrisch hochwertige und

sehr zuverlässige sowie außerdem gasdichte Verbindungen. Diese lötfreie Verbindungsart vermeidet thermische Belastung der Leiterplatte und Bauelemente sowie Kontaktverunreinigungen durch Lötchemikalien, sie ist reparaturfreundlich und bei Fehlbestückung unkritisch. Deshalb und wegen einer Vielzahl anderer Gründe stellt sich die Einpresstechnik als kostengünstige Lösung für Massenfertigung dar.

5. Koaxiale Steckverbinder für planare Schaltungen

Zunehmend werden in schnellen Digitalschaltungen und planaren Schaltungen im HF-Bereich auf sog. Printed Circuits Boards (PCB) Bauelemente eingesetzt, die keine Durchkontaktierung durch den Schaltungsträger benötigen.

Diese Surface-Mount Devices (SMD) erlauben eine schnelle und zuverlässige Datenübertragung auf sehr preisgünstigen Schaltungsträgern, da die Verbindungswege zwischen den einzelnen Bauteilen extrem kurz sind.

Surface-Mounted Coaxial Connectors (SMCC) wurden mit den Erfordernissen der SMD-Technologie entwickelt. Es sind kostengünstige Miniatursteckverbinder, die eine hohe Packungsdichte erlauben und den hohen elektrischen Ansprüchen bis zu 20 GHz gerecht werden. Sie realisieren Schnittstellen vom PCB zu weiteren PCB's, Antennen, Modems, Endstufen und vielen mehr.

Detailliertere Informationen, Musterstecker mit verschiedenen koaxialen Anschlüssen, Musterboards und notwendiges Messzubehör sind in dem Entwicklungskit 99E001-000 enthalten.

6. Glossar

Abschirmung

Zur Verringerung des Einflusses elektrischer und/oder magnetischer Felder auf elektrische Baugruppen, Bauteile oder Anordnungen werden Schirmaufbauten aus unterschiedlichen Metallen oder Metallkombinationen (Gehäuse, Drahtgeflechte, Folienwickel o. ä.) benutzt, die diese zu schützenden Anordnungen umgeben. Der Grad der Abschirmung richtet sich nach Güte und Dichtigkeit der Abschirmmaßnahmen und der Art der eingesetzten Materialien. \Rightarrow Kopplungswiderstand (Transferimpedanz)

Ausbreitungskonstante γ

Die Ausbreitungskonstante ist die charakteristische Kenngröße einer Leitung, die die Wellenausbreitung auf dieser Leitung in Längsrichtung beschreibt. Zusammen mit dem \Rightarrow Wellenwiderstand gibt sie die Möglichkeit zur Berechnung der Strom- und Spannungsverteilung auf der Leitung sowie deren Transformationseigenschaften.

Für den Spezialfall Koaxialleitung lassen sich relativ einfache \Rightarrow Leitungsgleichungen aufstellen, die den Verlauf der Spannung und des Stromes auf der Leitung als Funktion der primären \Rightarrow Leitungskonstanten (? Leitungsbeläge) Widerstandsbelag R' , Leitwertbelag G' , Kapazitätsbelag C' und Induktivitätsbelag L' wie-

dergeben. Die Ausbreitungskonstante γ kann dann wie folgt angegeben werden

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

mit \Rightarrow Dämpfungskonstante α und \Rightarrow Phasenkonstante β . Für verlustlose Leitungen ist die Dämpfungskonstante α gleich Null.

Betriebsspannung

Maximale Spannung, die auf Dauer an einen Steckverbinder, an ein Kabel oder allgemein an ein beliebiges Bauteil angelegt werden kann, ohne dass sich die technischen Parameter dieses Bauteils bleibend verändern oder es sogar zerstört wird.

Dämpfung

Abschwächung eines Signals beim Durchgang durch einen verlustbehafteten Vierpol, wobei auch ein Abschnitt einer Übertragungsleitung als solcher angesehen werden kann. Auf der koaxialen Leitung bewirkt die Summe folgender Verlustanteile die Dämpfung der übertragenen elektromagnetischen Welle:

Widerstandsdämpfung des Innenleiters,
Widerstandsdämpfung des Außenleiters,
Ableitungsdämpfung zwischen Innen- und Außenleiter,

wobei die Widerstandsdämpfungen besonders bei hohen Frequenzen maßgeblich durch den \Rightarrow Skineffekt beeinflusst werden. Weiterhin ist zu beachten, dass bei Leitern mit rauhen Oberflächen die Stromwege länger und damit die Wirkwiderstände und Verluste größer sind als bei Leitern mit glatten Oberflächen.

Die Dämpfung wird allgemein als logarithmisches Maß des Verhältnisses Signalspannung am Eingang zu Signalspannung am Ausgang des Vierpols in Neper [N] oder Dezibel [dB] angegeben.

$$\alpha = \ln \frac{U_1}{U_2} [\text{N}] \qquad \alpha = 20 \log \frac{U_1}{U_2} [\text{dB}]$$

$$\alpha [\text{N}] = 8,686 \times \alpha [\text{dB}]$$

Zur Berechnung der Dämpfung aus Ein- und Ausgangsleistung des Vierpols benutzt man die Beziehung

$$\alpha = 10 \log \frac{P_1}{P_2} [\text{dB}]$$

Dämpfungskonstante

Als Dämpfungskonstante wird der Realteil der \Rightarrow Ausbreitungskonstanten γ bezeichnet, sie gibt die exponentielle Abnahme der Amplituden von Spannung und Strom als Funktion der Leitungslänge an.

Die Dämpfungskonstante ist gleich Null bei verlustlosen Leitungen, d. h. bei Leitungen, bei denen der Widerstandsbelag R' und der Leitwertbelag G' gleich Null sind.

Für relativ verlustarme Leitungen mit $G' \ll \omega C'$ (C' Kapazitätsbelag) und $R' \ll \omega L'$ (L' Induktivitätsbelag) ergibt sich mit

$$\alpha \approx \frac{R'}{2Z_L} + \frac{G'Z_L}{2}$$

für die Dämpfungskonstante eine reelle, nur von den Leitungsparametern abhängige Größe.

Dielektrizitätskonstante

Die in der Elektrotechnik eingesetzten Isolierstoffe oder Dielektrika werden durch mehrere Materialkonstanten gekennzeichnet, wobei für die Auswahl des optimalen Dielektrikums und für die dadurch bestimmte Konstruktion des Bauteils hauptsächlich der Verlustfaktor $\tan \delta$ und die relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r des Isolierstoffes beachtet werden müssen. Beide Kenngrößen bestimmen ganz wesentlich die \Rightarrow Ausbreitungskonstante und den \Rightarrow Wellenwiderstand Z_0 einer Leitung oder eines Leitungsabschnittes, z. B. einer Steckverbindung.

Die Dielektrizitätskonstante beschreibt das Verhalten des betreffenden Materials in elektrischen Feldern. Für Vakuum als Isolierstoff gilt die absolute Dielektrizitätskonstante $\epsilon_0 = 8,8542 \times 10^{-12} \text{ As/Vm}$, für praktisch einsetzbare Materialien muss die relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r des jeweiligen Materials beachtet werden, wobei für die meisten Anwendungsfälle gilt, dass ϵ_r möglichst niedrig zu halten ist. Als Beispiel die relativen Dielektrizitätskonstanten häufig eingesetzter Isolierstoffe:

Luft	$\epsilon_r = 1,0006$
Polystyrol	$\epsilon_r \approx 2,56$ (frequenzabhängig)
PTFE	$\epsilon_r \approx 2,04$ (frequenzabhängig)

Doppelleitung

Am häufigsten benutzte Form der elektrischen Leitung, die aus zwei voneinander isolierten Einzelleitern besteht. Dabei kann die technische Ausführungsform sehr verschiedenartig sein, sie reicht von der Paralleldrahtleitung bis zur konzentrisch aufgebauten Koaxialleitung. Der am häufigsten auftretende Wellentyp auf einer Doppelleitung ist die Lecherwelle (\Rightarrow TEM-Typ), die nur transversale elektrische bzw. magnetische Feldstärkekomponenten, aber keine in Ausbreitungsrichtung besitzt. Die Ausbreitung dieses Wellentyps auf der Leitung ist bei beliebigen Wellenlängen möglich. Daneben können sich bei genügend hohen Frequenzen auch spezielle Hohlleiterwellen vom E- oder H-Typ ausbreiten und den eigentlichen Grundtyp Lecherwelle störend beeinflussen.

Für die Doppelleitung lassen sich relativ einfache \Rightarrow Leitungsgleichungen aufstellen, die den Verlauf der Spannung und des Stromes auf der Leitung als Funktion der primären \Rightarrow Leitungskonstanten Widerstandbelag R' , Leitwertbelag G' , Kapazitätsbelag C' und Induktivitätsbelag L' wiedergeben. Dabei sind R' und G' bei der normalerweise angewandten verlustarmen Doppelleitung klein und es gilt ganz allgemein

$$R' \ll \omega L' \quad \text{und} \quad G' \ll \omega C'$$

so dass sich für den \Rightarrow Wellenwiderstand eine reelle frequenzunabhängige Größe Z_0 ergibt.

Dieser Wellenwiderstand ist nur noch von den geometrischen Abmessungen der Leitung und vom eingesetzten Dielektrikum abhängig, so dass praktische Ausführungen von Doppelleitungen und Bauteile daraus recht einfach dimensioniert werden können.

Eindeutigkeitsbereich der Koaxialleitung

Frequenzbereich, in dem auf der Koaxialleitung (\Rightarrow Doppelleitung) nur die Lecherwelle ausbreitungsfähig und für die Ausbreitungsparameter verantwortlich ist. Am hochfrequenten Ende dieses Eindeutigkeitsbereiches existiert eine \Rightarrow Grenzfrequenz, oberhalb derer zusätzlich verschiedene Wellentypen vom Hohlleitermodus (E- oder H- Modi) angeregt werden können (z. B. durch Leitungsdiskontinuitäten), die zu Unregelmäßigkeiten führen können. Als Näherung zur Ermittlung der Grenzwellenlänge λ_c für den möglichen Einsatzpunkt anderer Wellentypen zusätzlich zur Lecherwelle kann für das Verhältnis $d/D > 0,2$ (D Durchmesser des Außenleiters und d Durchmesser des Innenleiters der Koaxialleitung) angegeben werden

$$\lambda_c \approx \frac{\pi}{2}(d + D)[H_{11}]$$

$$\lambda_c \approx (D - d)[E_{01}]$$

Praktische Beispiele sind

Koaxialquerschnitt 3/7 (N-Connector)	$f_c \approx 19 \text{ GHz}$
Koaxialquerschnitt 7/16 (7/16-Connector)	$f_c \approx 8,3 \text{ GHz}$

Eingangswiderstand

Der Eingangswiderstand ist der Quotient aus komplexer Spannung und komplexem Strom am Anfang der Leitung und ist sowohl von den Parametern der Leitung (\Rightarrow Wellenwiderstand und \Rightarrow Ausbreitungskonstante) als auch von der Leitungslänge und vom Widerstand, mit dem das Ende der Leitung abgeschlossen ist, abhängig.

Je nach Art des Leitungsabschlusses und der Leitungslänge kann der Eingangswiderstand sich verhalten wie eine Induktivität oder eine Kapazität, er kann gleich dem Wellenwiderstand sein oder das Verhalten eines Parallel- oder Serienresonanzkreises besitzen. Diese Eigenschaft wird benutzt, um mit derartigen Leitungsabschnitten Schaltelemente wie Induktivitäten, Kapazitäten oder Resonatoren zu erzeugen.

EMV

Elektro-Magnetische Verträglichkeit beschreibt den Grad des Schutzes eines elektrischen Systems gegen Einflüsse von außen oder den Grad der Beeinflussung anderer elektrischer Systeme durch dieses System. Die gegenseitige Beeinflussung der Systeme kann dabei durch elektrische, magnetische und/oder elektromagnetische Felder erfolgen. Die Verringerung der Beeinflussung und damit die Vergrößerung der EMV ist meist durch entsprechende \Rightarrow Abschirmung möglich.

Fehlanpassung

Unterscheidet sich der Widerstand, mit dem eine Leitung abgeschlossen ist, vom \Rightarrow Wellenwiderstand dieser Leitung, so ist diese Leitung fehlangepasst. Durch Fehlanpassung werden

Reflexionen und damit Verluste hervorgerufen, die im allgemeinen unerwünscht sind. Fehlanpassungen werden bei koaxialen Steckverbindungen durch Abweichung der Fertigungsmaße von den theoretischen Entwurfsmaßen (Toleranzen) sowie von nicht genau bekannten Materialkennwerten der eingesetzten dielektrischen Materialien hervorgerufen.

Die Größe der Fehlanpassung wird durch den \Rightarrow Reflexionsfaktor gekennzeichnet.

Feldwellenwiderstand

Der Feldwellenwiderstand stellt bei einer ebenen Welle das Verhältnis von elektrischer zu magnetischer Feldstärke im Vakuum dar. Die in den im Zusammenhang mit \Rightarrow Doppelleitungen aufstellbaren Gleichungen vorkommende Beziehung

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377 \Omega$$

gibt den sogenannten Feldwellenwiderstand des freien Raumes an.

Grenzfrequenz

Höchste Frequenz, bei der kein anderer als der Grundtyp des betreffenden Wellenleiters ausbreitungsfähig ist. Oberhalb der Grenzfrequenz können die Übertragungseigenschaften des Wellenleiters wegen des Auftretens höherer Modi instabil werden.

Für Koaxialleitungen beschreibt die Grenzfrequenz die Frequenz, bis zu der nur die Grundwelle der \Rightarrow Doppelleitung, die TEM₀₀-Welle, ausbreitungsfähig ist. Sie kann berechnet werden zu

$$f_G = \frac{2c}{\pi \sqrt{\epsilon_r}} \times \frac{1}{D+d}$$

mit

- ϵ_r relative Dielektrizitätskonstante des Isolators
- c Lichtgeschwindigkeit
- d, D Durchmesser von Innen- und Außenleiter

Hohlleiter

Hohlleiter sind Hohlrohre mit verschiedener möglicher Geometrie mit elektrisch leitenden Wänden, in denen sich elektromagnetische Wellen in axialer Richtung ausbreiten können, wobei verschiedene Ausbreitungsmodi möglich sind. Die Übertragungseigenschaften eines Hohlleiters sind mit einem Hochpass vergleichbar: Bei Frequenzen, die oberhalb einer von der Hohlleitergeometrie abhängigen Grenzfrequenz liegen, breitet sich die elektromagnetische Welle in Längsrichtung aus, bei Frequenzen unterhalb der Grenzfrequenz stellt die Welle in Längsrichtung ein aperiodisch gedämpftes Feld dar. Die Grundwelle eines Hohlleiters ist die Eigenwelle mit der niedrigsten Grenzfrequenz, also die Welle, die mit der niedrigsten Frequenz ausbreitungsfähig ist. Der Eindeutigkeitsbereich eines Hohlleiters gibt den Frequenzbereich an, für den es im Hohlleiter nur eine ausbreitungsfähige Welle gibt.

Die gebräuchlichsten Hohlleiter besitzen rechteckförmigen, kreisrunden oder elliptischen Querschnitt.

Auch in der Koaxialleitung sind (meist unerwünschte) Hohlleiterwellen anregbar und ausbreitungsfähig, bei der Dimensionierung der Koaxialleitung ist der geometrisch bestimmte Eindeutigkeitsbereich zu beachten.

Intermodulation

Die Entstehung neuer, nicht gewünschter Signale (IM Produkte) an nichtlinearen Kennlinien von Bauteilen im Signalpfad.

Intermodulationsfaktoren:

- magnetische Werkstoffe
- Kontaktkräfte, Kontaktflächen
- Korrosion und Oxidschichten

Koaxiale Steckverbindung

Eine koaxiale Steckverbindung soll eine möglichst konstante, zuverlässige und reflexionsarme Verbindung zweier Leitungen gleichen Wellenwiderstandes herstellen. Sie muss sich möglichst einfach stecken und lösen lassen, soll gute elektrische Übertragungseigenschaften besitzen und gegenüber elektromagnetischen Störfeldern weitgehend unempfindlich sein. Der \Rightarrow Wellenwiderstand der Steckverbindung kann den Wellenwiderständen der unterschiedlichen Kabel sehr gut angepasst werden.

Zwei grundsätzliche Steckverbinderarten können unterschieden werden:

die **polarisierte** Steckverbindung, wobei der eine Teil einen Steckerstift-Kontakt (Männchen, male) und der andere **Teil** einen Buchsenkontakt (Weibchen, female) besitzt, und

die **nichtpolarisierte** Steckverbindung, wobei die zu verbindenden Steckverbindungsteile im allgemeinen symmetrisch gestaltet sind und der Kontakt am Innen- und Außenleiter durch Stirnkontakt erreicht wird.

Der Innenleiter wird meist durch eine dielektrische Stütze im Außenleiter gehalten, die Konstruktion dieser Stütze beeinflusst stark das Reflexionsverhalten der Steckverbindung.

Kopplungswiderstand

Die Konstruktion des Außenleiters bei Koaxialkabeln ist für die Abschirmwirkung verantwortlich, ihre Dichtigkeit, d. h. der Grad der Abstrahlung der über das Koaxialkabel geführten elektromagnetischen Welle durch den Außenleiter, wird durch den Kopplungswiderstand (oder Transferimpedanz) beschrieben.

Als Kopplungswiderstand Z_k eines Leitungsstückes (z. B. Kabel, Steckverbindung) ist der Quotient der zwischen den Enden des Außenleiters dieses Leitungsstückes gemessenen Spannungsdifferenz und dem im Inneren des Leitungsstückes fließenden Stromes definiert. Bei Koaxialkabeln ist die Angabe des spezifischen Kopplungswiderstandes, d. h. Kopplungswiderstand pro Kabellänge sinnvoll.

Ein hochfrequentes System, bestehend aus Kabeln und den entsprechenden Steckverbindern, ist umso dichter, je kleiner der Kopplungswiderstand des Systems oder der Einzelkomponenten

bei vergleichbarer Frequenz ist.

Die Anschlussstellen der Steckverbinder an das Koaxialkabel geben zusätzliche Kopplungswiderstände, die näherungsweise proportional zur Frequenz ansteigen, auf ihre einwandfreie und induktionsarme Gestaltung muss besonderer Wert gelegt werden.

Kurzschlusswiderstand

⇒ Eingangswiderstand einer Leitung bei Kurzschluss am Leitungsende.

Leerlaufwiderstand

⇒ Eingangswiderstand einer Leitung bei offenem Leitungsende.

Leitungsbeläge

Die Leitungsbeläge beschreiben als sogenannte primäre ⇒ Leitungskonstanten die elektrischen Eigenschaften einer Leitung, sie stellen die auf die Leitungslänge bezogenen Werte der Schaltelemente des ⇒ Leitungsersatzschaltbildes dar. Im Einzelnen sind definiert:

Widerstandsbelag R'

auf die Längeneinheit bezogener ohmscher Leitungswiderstand für Hin- und Rückleitung gemeinsam unter Berücksichtigung des Skin-effektes,

Induktivitätsbelag L'

auf die Längeneinheit bezogene Induktivität der Hin- und Rückleitung,

Leitwertbelag G'

auf die Längeneinheit bezogener Querleitwert zwischen Hin- und Rückleitung,

Kapazitätsbelag C'

auf die Längeneinheit bezogene Querkapazität zwischen Hin- und Rückleitung.

Für eine verlustarme Koaxialleitung ($G' \ll \omega C'$ und $R' \ll \omega L'$) können angegeben werden:

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{d}$$

$$C' = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln \frac{D}{d}}$$

mit

D = Außenleiterdurchmesser

d = Innenleiterdurchmesser

μ_0 = $1,256 \cdot 10^{-6}$ Vs / Am

ϵ_0 = $8,854 \cdot 10^{-12}$ As / Vm

ϵ_r = relative Dielektrizitätskonstante des eingesetzten Dielektrikums, bei Luft 1,0006

Leitungsersatzschaltbild

Darstellung der Leitung durch örtlich konzentrierte Schaltelemente, die aus den Leitungsbelägen und der zugehörigen Länge

des betrachteten Leitungsstückes berechnet werden. Durch die Anwendung dieser konzentrierten Elemente ist die Berechnung der Leitung mit den allgemeinen Kirchhoff'schen Regeln möglich.

Leitungsgleichungen

Mit den Leitungsgleichungen lässt sich der Verlauf von Strom und Spannung auf der Leitung als Funktion der ⇒ Leitungskonstanten (Wellenwiderstand und Ausbreitungskonstante) sowie der Frequenz und der Leitungslänge berechnen.

Leitungskonstanten

Die Leitungskonstanten sind die charakteristischen Kenngrößen einer Leitung, wobei man die als primäre Leitungskonstanten bezeichneten Leitungsbeläge (Kapazitätsbelag C' , Induktivitätsbelag L' , Widerstandsbelag R' und Leitwertbelag G') und die als sekundäre Leitungskonstanten bezeichneten Größen ⇒ Wellenwiderstand Z und ⇒ Ausbreitungskonstante γ unterscheidet.

Leitungsresonator

Leitungsabschnitte bestimmter Länge und mit bestimmtem Abschluss zeigen ähnliche Resonanzeigenschaften wie aus Kapazitäten, Induktivitäten und Widerständen aufgebaute Schwingkreise. Je nach Ausführung ist Parallel- oder Serienresonanz erzeugbar.

Leitungstransformator

Leitungsabschnitte besitzen in Abhängigkeit von ihrer Länge bestimmte Transformationseigenschaften, d. h. der Widerstand am Ende einer Leitung (Abschlusswiderstand) wird in einen anderen Widerstand am Anfang der Leitung (Eingangswiderstand) transformiert.

Besondere Bedeutung in diesem Zusammenhang besitzen der $\lambda/4$ - und der $\lambda/2$ -Transformator.

Messleitung

Messleitungen sind starre Übertragungsleitungen des jeweils betrachteten Leitungstyps (z. B. Hohlleiter oder Koaxialleitung), auf denen die Feldverteilung entlang der Leitung mit einer entsprechend ausgebildeten Sonde möglichst belastungsarm abgetastet werden kann.

Das als Abschlusswiderstand der Messleitung angebrachte und fehlangepasste Messobjekt, z. B. ein Stück einer Koaxialleitung mit unbekanntem Wellenwiderstand, der zu bestimmen ist, verursacht auf der Messleitung eine stehende Welle mit bestimmtem Verhältnis von Maximal- zu Minimalamplitude, aus dem der ⇒ Reflexionsfaktor des Messobjekts ermittelt werden kann.

Phasengeschwindigkeit

Die Phasengeschwindigkeit v_{ph} ist die Geschwindigkeit, mit der sich eine bestimmte Phasenlage der Spannung auf einer Leitung ausbreitet. Sie ergibt sich als das Verhältnis von Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ und Phasenkonstante β . Sie ist bei der z. B. auf Koaxialleitungen existierenden TEM – (Transversal-Elektro-Magnetische-) oder Lecherwelle gleich der Gruppengeschwindigkeit v_{gr} , d. h. der

für die Übertragung von Nachrichten maßgebenden Geschwindigkeit.

Phasenkonstante

Als Phasenkonstante β wird der Imaginärteil der \Rightarrow Ausbreitungskonstanten γ bezeichnet, sie gibt den Verlauf der Phasen von Spannung und Strom als Funktion der Leitungslänge an.

Für relativ verlustarme Leitungen mit $G' \ll \omega C'$ (C' Kapazitätsbelag) und $R' \ll \omega L'$ (L' Induktivitätsbelag) ergibt sich mit

$$\beta = \omega \sqrt{L'C'}$$

für die Phasenkonstante eine reelle, nur von den Leitungsparametern und der Frequenz abhängige Größe.

Prüfspannung

Maximale Spannung, mit der ein Bauteil (z.B. ein Steckverbinder) unter bestimmten Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftdruck u. ä.) für eine bestimmte Zeitspanne beaufschlagt werden kann, ohne dass dieses Bauteil zerstört wird.

Reflexionsfaktor

Als komplexer Reflexionsfaktor wird das Verhältnis der rücklaufenden, d. h. der am Verbraucher reflektierten Spannung zur hinlaufenden, d. h. vom Generator gelieferten Spannung, am Leitungsabschluss, dem Abschlusswiderstand, definiert. In gleicher Weise ist eine Definition über die hin- und rücklaufenden Ströme möglich.

Der Reflexionsfaktor ist somit über die Beziehung

$$r = \frac{(Z - Z_0)}{(Z + Z_0)}$$

mit dem komplexen \Rightarrow Wellenwiderstand der Leitung Z_0 und dem komplexen \Rightarrow Abschlusswiderstand Z verbunden.

Aus dem Betrag des Reflexionsfaktors können die Werte für \Rightarrow Welligkeit und \Rightarrow Anpassungsfaktor berechnet werden.

Als Beispiel aus der Praxis soll hier der Reflexionsfaktor genannt werden, der sich bei der Kopplung eines 50Ω mit einem 75Ω Steckverbinder ergibt, was sich bei vielen Steckverbindern, z. B. BNC, sowohl gewollt als auch ungewollt durchaus ergeben kann:

$$r = \frac{(75 - 50)}{(75 + 50)} = 0,2$$

entsprechend einer Welligkeit (VSWR) $s = 1,5$ und einem Anpassungsfaktor $m = 0,67$

Rückflussdämpfung (Return Loss)

Logarithmisches Maß des \Rightarrow Reflexionsfaktors

$$\alpha = -20 \log(r)$$

Skineffekt

Wechselströme erfüllen den Leiterquerschnitt nicht gleichmäßig, sie werden durch Induktionswirkung im Leiter zur Oberfläche hin verdrängt, wobei diese Stromverdrängung mit wachsender Frequenz zunimmt.

Die Widerstandsdämpfung einer Übertragungsleitung wird demzufolge mit wachsender Frequenz durch einen zusätzlichen Anteil erhöht, der auf den Skineffekt zurückzuführen ist.

Das Eindringmaß (äquivalente Dicke der Schicht, in der die Stromleitung stattfindet), kann bestimmt werden nach

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{f \pi \sigma \mu_0 \mu_r}}$$

mit

f	= Frequenz
σ	= Leitfähigkeit des eingesetzten Leitermaterials
σ_{Ag}	= 62×10^6 S/m
σ_{Cu}	= 58×10^6 S/m
μ_0	= $1,256 \cdot 10^{-6}$ Vs / Am
μ_r	= relative Permeabilitätskonstante des benutzten Materials

Smith- Diagramm

Darstellung der komplexen Ebene des \Rightarrow Reflexionsfaktors in der Begrenzung des Einheitskreises. Darin existieren Linien konstanten Realteils und konstanten Imaginärteils von komplexen Widerständen, wobei jeweils auf den \Rightarrow Wellenwiderstand normiert wird. Im Smith-Diagramm können auf relativ einfache Weise Widerstandstransformationen auf Leitungen und damit Anpassungsschaltungen berechnet werden. \Rightarrow Leitungstransformator

TEM- Welle

Transversal- Elektro- Magnetische Wellen besitzen elektrische und magnetische Feldkomponenten, die nur in einer Ebene transversal (senkrecht) zur Ausbreitungsrichtung liegen, es existieren keine Komponenten in Ausbreitungsrichtung. Die auf \Rightarrow Doppelleitungen (z. B. Koaxialleitung) ausbreitungsfähigen Grund- Wellen sind vom Typ TEM.

Transferimpedanz

\Rightarrow Kopplungswiderstand

Übersprechen

Gegenseitige Beeinflussung von Signalen in benachbarten Leitern oder elektrische Systemen durch elektrische, magnetische und/oder elektromagnetische Kopplung.

- ⇒ Abschirmung
- ⇒ EMV
- ⇒ Kopplungswiderstand

Übertragungsfaktor g

Maß für den Grad der Übertragung eines Signales über einen Vierpol : Verhältnis der Spannungsamplituden der übertragenen Welle und der Welle am Eingang des Vierpols.

Vielfachreflexionen

In einem Leitungssystem gilt allgemein, dass in den meisten Fällen weder am Anfang noch am Ende der Leitung ein idealer Abschluss ohne jede Reflexion vorhanden ist. Die sich auf dem Leitungssystem ausbreitenden Wellen werden dann sowohl am Eingang als auch am Ausgang reflektiert, dadurch breiten sich zusätzlich neue reflektierte Wellen aus, die sich den primären Wellen überlagern. Durch fortlaufende neue Reflexionen entsteht schließlich eine resultierende, vielfach reflektierte Welle.

Wellenlänge

Örtliche Periodenlänge einer Schwingung.

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta}$$

mit (β = phase constant)

$$\beta = \omega \sqrt{L'C'}$$

or

$$\lambda = \frac{c_0}{f}$$

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2,997925 \times 10^8 \text{ m/s}$$

c_0 = Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

Wellenwiderstand

Charakteristische Kenngröße einer Leitung zur Berechnung der Strom- und Spannungsverteilung auf einer Leitung sowie deren Transformationseigenschaften. Definiert wird der Wellenwiderstand als der ortsunabhängige Quotient der Spannung und des Stromes an jedem Punkt der Leitung, wenn auf der Leitung nur eine fortschreitende Welle vorhanden ist.

Für eine verlustarme Leitung mit $R' \ll \omega L'$ und $G' \ll \omega C'$ kann der Wellenwiderstand mit

$$Z_L = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

bestimmt werden.

Ist diese Leitung vom Typ koaxial und besitzt einen Außenleiter mit dem Durchmesser D und einen Innenleiter mit dem Durchmesser d sowie einen Isolierkörper mit der Dielektrizitätskonstanten ϵ_r des eingesetzten Isolationsmaterials, so kann der Wellenwiderstand der Leitung berechnet werden zu

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d}$$

VSWR (Stehwellen-Verhältnis)

Als Stehwellen-Verhältnis s (mit $1 \leq s \leq \infty$) ist das Verhältnis der Beträge der größten und der kleinsten Spannung auf einer verlustlosen Leitung zu verstehen. Der reziproke Wert der Welligkeit wird als Anpassungsfaktor m (mit $0 \leq m \leq 1$) bezeichnet.

Mit dem \Rightarrow Reflexionsfaktor auf einer Leitung r ist s über folgende Beziehung verknüpft.

$$s = \frac{(1 + |r|)}{(1 - |r|)}$$