

Kupfer in der Elektrotechnik – Kabel und Leitungen



**Deutsches
Kupfer-Institut e.V.**

Auskunfts- und Beratungsstelle
für die Verwendung von
Kupfer und Kupferlegierungen

Danksagung

Für die freundliche Unterstützung bei der Erstellung dieser Broschüre danken wir Dr. Hermann Franke und Kurt Juhl sowie dem Fachverband Kabel und isolierte Drähte im ZVEI. Besonderer Dank gilt der ICA International Copper Association, New York, für ihre finanzielle Unterstützung.

Impressum

Herausgeber:
Deutsches Kupfer-Institut
Auskunfts- und Beratungsstelle
für die Verwendung von
Kupfer und Kupferlegierungen
Am Bonnehof 5
40474 Düsseldorf
Telefon (02 11) 4 79 63 00
Telefax (02 11) 4 79 63 10
E-mail: info@kupferinstitut.de
www.kupferinstitut.de

Bildnachweis:

Alcatel
Bild 30, 31, 35, 37
Leoni
Bild 36, 39, 40, 41, 42
Niehoff
Bild 15
Pirelli
Bild 16, 19, 20, 21, 22, 23, 24,
25, 27, 28, 29, 32, 33, 34

Gestaltung:
Kommunikation und Design
Bernard Langerock,
Düsseldorf

Druck:
breuerdruck, Düsseldorf

03/2000

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Kupfer als Leiterwerkstoff	3
2.1	Kupfersorten	3
2.2	Eigenschaften	5
2.2.1	Physikalische Eigenschaften	5
2.2.2	Mechanische Eigenschaften	8
2.2.3	Chemische Eigenschaften – Korrosionsbeständigkeit	10
2.3	Verbindungstechnologien	10
2.3.1	Löten und Schweißen	11
2.3.2	Mechanische Verbindungen	13
3	Anwendungen	16
3.1	Überblick	16
3.2	Elektrische Leiter	18
3.3	Isolier- und Mantelwerkstoffe für Kabel und Leitungen	22
3.4	Produktgruppen	24
3.4.1	Starkstromkabel	24
3.4.2	Starkstromleitungen	27
3.4.2.1	Leitungen für feste Verlegung	27
3.4.2.2	Flexible Leitungen	28
3.4.3	Elektrische Nachrichtenkabel und -leitungen	30
3.4.3.1	Nachrichtenkabel	32
3.4.3.2	Nachrichtenleitungen	34
3.4.4	Wickeldrähte	35
4	Nationale, europäische und internationale Normung	37
5	Kennzeichnung	38

Einleitung

Kupfer war das erste Gebrauchsmetall des Menschen. Seine Geschichte reicht weit zurück. Schon 4000 v.Chr. wurden Werkzeuge und Waffen aus Kupfer in Ägypten hergestellt und verwendet [1]. Der Name des Kupfers geht wahrscheinlich auf die Insel Zypern zurück. Die Römer nannten das rote Metall aes cyprium (Erz aus Zypern), später cuprum. Die zyprischen Erzgruben versorgten im Altertum Griechenland, Rom und andere Mittelmeerländer mit Kupfer.

Eine völlig neue Bedeutung erlangte das Kupfer mit der einsetzenden technischen Nutzung der Elektrizität in der Mitte des 19. Jahrhunderts. Bei den ersten Versuchen, den Transport (die Leitung) des elektrischen Stromes effektiv zu realisieren, erkannte man die guten Eigenschaften des Kupfers für diese Zwecke. Seine hohe elektrische Leitfähigkeit gab u. a. den Ausschlag für die seit dieser Zeit unbestrittene Verwendung des Kupfers als Leitermaterial in der Elektrotechnik. Ein erfolgreicher Auftakt für die Anwendung der Elektrizität war u. a. der Demonstrationsversuch von Gauß mit einem Induktionstelegraphen 1833 in Göttingen. Die ersten Telegrafenfrequenzen, die im Jahre 1847 Werner von Siemens verlegte, waren Kupferleiter. Aufgrund der Störanfälligkeit versuchte man bald, Freileitungen durch erdverlegte Kabel zu ersetzen. Bereits im Jahre 1866 gelang die erste Inbetriebnahme eines transatlantischen Kabels.

Mit der Erfindung des Telefons im Jahre 1875 zeichnete sich der Beginn der modernen Nachrichtentechnik ab, verbunden mit der Entwicklung von Fernmeldeleitungen und -kabeln. Die Starkstromübertragungsleitung hingegen entwickelte sich erst, als die Erzeugung und der Verbrauch von elektrischer Energie so weit gestiegen war, dass die Verteilung auf größere Entfernungen, mindestens aber im Bereich einer Stadt, notwendig wurde. Dem voraus ging die Entwicklung des Dynamos durch Werner von Siemens im Jahre 1866. Mit der Entdeckung des elektromagnetischen Prinzips wurden die grundlegenden Voraussetzungen für eine weitreichende wirtschaftliche Nutzung der elektrischen Energie geschaffen. Die Erfindung des Wechselstromtransformators und des Wechselstrommotors im Jahre 1889 leitete die nächste wichtige Etappe in der Nutzung der elektrischen Energie ein.

Die 1. Internationale Elektrotechnische Ausstellung in Frankfurt am Main 1891 wurde durch eine 178 km lange 15 kV-Drehstromleitung vom Wasserkraftwerk in Laufen a. N. mit elektrischer Energie versorgt. Oscar von Miller bewies durch den Bau dieser Leitung erstmals die Möglichkeit der elektrischen Energieübertragung über weite Entfernungen. Es konnten damals bereits 220 kW mit einem Wirkungsgrad von 70 % übertragen werden. Waren die ersten Elektrizitätswerke Blockstationen, die zur Versorgung einer bestimmten Abnehmergruppe errichtet wurden, so entstanden mit Beginn des 20. Jahrhunderts Großkraftwerke überall dort, wo die entsprechenden Energieressourcen zur Verfügung standen. Eine Grundlage für die Überlandfernversorgung in Deutschland bildeten im Jahre 1905 die 50 kV-Verbindung Moosburg – München (47 km), im Jahre 1911 die 100 kV-Verbindung Lauchhammer – Riesa – Gröbau und 1913 der Bau des Goldenberg-Werkes durch die Rheinisch-Westfälische-Energiegesellschaft.

Diese Entwicklung wurde durch die sichtbaren Vorteile des Drehstroms beschleunigt, nämlich die Transformierbarkeit seiner Spannung und die einfache Bauart der Drehfeldmotoren. Der Übergang zu höheren Übertragungsspannungen ermöglichte den wirtschaftlichen Transport größerer elektrischer Leistungen. Als erste Leitung für 380 kV Betriebsspannung wurde im Jahre 1952 in Schweden eine fast 1000 km lange Übertragungsanlage zwischen dem Wasserkraftwerk Harspranget und dem

schwedischen Verbraucherschwerpunkt im Raum Stockholm in Betrieb genommen. In Deutschland erfolgte die erste Inbetriebnahme einer 380-kV-Leitung von Rommerskirchen nach Hoheneck im Jahre 1957.

Inzwischen hat sich die Elektrotechnik mit einem umfangreichen Erzeugnisspektrum entwickelt, das sowohl Maschinen, Geräte und Anlagen für die Erzeugung, Übertragung und Anwendung von Elektroenergie als auch informationsverarbeitende Geräte und Anlagen der Nachrichten-, Mess- und Automatisierungstechnik sowie der Datenverarbeitung und Rechentechnik umfasst. In allen diesen Bereichen hat sich das Kupfer als Leiterwerkstoff bewährt, so dass heute bereits mehr als die Hälfte der gesamten Kupfererzeugung der Welt für die Erzeugnisse der Elektroindustrie verwendet werden.

Die Entwicklung des Kupferverbrauches unter dem Einfluss der steigenden Nutzung der Elektroenergie ist aus der Darstellung im Bild 1 ersichtlich. Dabei muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass Kupfer und die meisten anderen Metalle nicht verbraucht, sondern genutzt werden, denn nach Gebrauch laufen sie zum großen Teil zurück in den Stoffkreislauf. Gerade Kupfer kann ohne Qualitätsverlust beliebig oft wieder aufbereitet werden. So stammt heute schon rund die Hälfte des erzeugten Kupfers aus Schrott, und sollte der Bedarf eines Tages aufhören zu steigen, würde sich diese Quote auf 90 % erhöhen. Da die meisten Kupferprodukte sehr langlebige Güter sind, ist das heutige Rücklaufmaterial Jahrzehnte alt und macht etwa 90 % des damaligen Marktes aus.

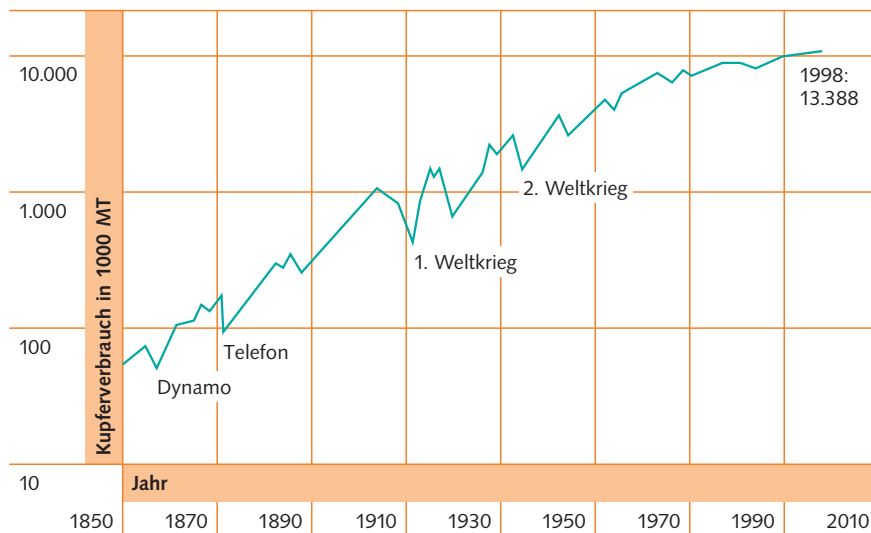


Bild 1: Entwicklung des Kupferverbrauches

2 Kupfer als Leiterwerkstoff

Die Elektroindustrie bedient sich einer Vielzahl von Leiterausführungen, von denen jede einzelne für ein besonderes Anwendungsgebiet bestimmt ist und somit spezifische Anforderungen an die Werkstoffeigenschaften stellt.

Der Einsatz von Kupferwerkstoffen basiert auf den herausragenden Eigenschaften, wie der sehr guten Leitfähigkeit für elektrischen Strom und Wärme, der ausreichenden Festigkeit, guten Bearbeitbarkeit (sowohl bei der Herstellung der Halbzuge als auch bei der Anwendung) sowie der guten Korrosionsbeständigkeit, welche bei entsprechender metallurgischer Behandlung optimal an die Erfordernisse des Einsatzfalles angepasst werden können.

Eine Auswahl der für die Elektroindustrie wichtigsten Kupferwerkstoffe wird im Folgenden beschrieben.

2.1 Kupfersorten

Die unlegierten Kupfersorten werden unterteilt in die sauerstoffhaltigen, sauerstofffreien und sauerstofffreien desoxidierten Kupferwerkstoffe (Tabelle 1).

Kurzzeichen nach EN	Werkstoff-Nummer nach EN	Kurzzeichen nach vorm. DIN	Werkstoff-Nummer nach vorm. DIN	Elektrische Leitfähigkeit bei 20 °C K $m/\Omega mm^2$	Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C λ $W/m \cdot K$	Längenausdehnungskoeffizient bei 20 bis 30 °C α $10^{-6}/K$
Sauerstoffhaltiges Kupfer						
Cu-ETP	CR004A	E-Cu58	2.0065	> 58	> 394	17,7
Cu-FRHC	CR005A	E-Cu58	2.0065	> 58	> 394	17,7
Sauerstofffreies Kupfer (nicht desoxidiert)						
Cu-OF	CW008A	OF-Cu	2.0040	> 58	> 393	17,7
Sauerstofffreies Kupfer, mit Phosphor desoxidiert						
Cu-PHC	CW020A	SE-Cu	2.0070	57 - 58	> 386	17,7
Cu-HCP	CW021A	SE-Cu	2.0070	57 - 58	> 386	17,7
Cu-DLP	CW023A	SW-Cu	2.0076	≈ 52	≈ 364	17,7
Cu-DHP	CW024A	SF-Cu	2.0080	41 - 52	293 - 364	17,7

Tabelle 1: Physikalische Werte für Kupfersorten nach EN

Die Zugfestigkeit des reinen Kupfers beträgt im weichen Zustand 200 N/mm², im kaltverfestigten 360 N/mm² bei einer Bruchdehnung (A₅) von 45 %. Der Elastizitätsmodul liegt je nach Kaltverfestigung zwischen 110 und 130 kN/mm² und die Brinellhärte zwischen 40 und 120.

Die sauerstoffhaltigen Kupfersorten Cu-ETP und Cu-FRHC enthalten bis 0,04 % Sauerstoff, der im Kupfer als Kupfer(I)-oxid (Cu₂O) vorliegt. Diese Kupfersorten mit der hohen elektrischen Leitfähigkeit von mindestens 58 m/Ω mm² kommen fast in allen Gebieten der Elektrotechnik und Elektronik zur Anwendung. Bei den

sauerstoffhaltigen Kupfersorten ist die Verarbeitung durch Löten, Schweißen und Glühen in reduzierender Atmosphäre mit der Gefahr der Versprödung (sog. Wasserstoffkrankheit) verbunden. In der Wärme diffundiert Wasserstoff in das Kupfer und reagiert dort mit Cu₂O unter Bildung von Wasserdampf, der nicht diffusionsfähig ist und die Kupferkristallite auseinander drückt. Die Wasserstoffversprödung beginnt bereits bei etwa 500°C.

Sauerstofffreies Kupfer ist wasserstoffbeständig, d. h. alle Schweiß- und Lötverfahren sind problemlos anwendbar. Die sauerstofffreie (nicht desoxidierte) Kupfersorte Cu-OF ist völlig sauerstofffrei und hat eine hohe elektrische Leitfähigkeit von mindestens 58 m/Ω mm². Als Ausgangsmaterial verwendet man hierzu Kathoden der Höchstgüte Cu-CATH-1, die in einem elektrischen Ofen unter reduzierender Atmosphäre eingeschmolzen und anschließend in wassergekühlten Kokillen oder im Strangguss unter Schutzgas vergossen werden. Cu-OF ist auch frei von ausdampfenden Elementen lieferbar und findet deshalb in der Vakuumtechnik, Raumfahrt, bei Linearbeschleunigern und in der Supraleittechnik Verwendung.

Die sauerstofffreien, mit Phosphor desoxidierten Kupfersorten Cu-DHP, Cu-DLP, Cu-HCP und Cu-PHC werden durch Zugabe von Phosphor, vereinzelt auch Lithium, während des Raffinationsprozesses vom Sauerstoff befreit. Neben dem häufigsten Desoxidationsmittel Phosphor können auch die Elemente Silizium, Lithium, Magnesium, Bor oder Kalzium zugesetzt werden. Sie verbinden sich mit Sauerstoff zu Oxiden, die als Schlacke aus der Schmelze aufsteigen. Liegen die Oxidationsmittel im Überschuss vor, verringern sie die elektrische und die Wärmeleitfähigkeit. Dies gilt vor allem für Phosphor. Der Überschuss an Phosphor wird vom festen Kupfer unter Mischkristallbildung aufgenommen.

Cu-HCP und Cu-PHC mit dem geringsten Restphosphorgehalt von ca. 0,003 % haben eine recht hohe elektrische Leitfähigkeit von mindestens 57 m/Ω mm² und lassen sich überall dort einsetzen, wo Halbzeuge hoher elektrischer Leitfähigkeit mit besonderen Anforderungen an die Umformbarkeit sowie gute Schweiß- und Hartlötbarkeit gefordert werden (z. B. in der Elektronik, als Plattierwerkstoff und in einer Sonderqualität, frei von ausdampfenden Elementen, auch für Vakuumkontakte).

Cu-DLP ist eine Kupfersorte mit begrenztem, niedrigem Restphosphorgehalt von 0,005 bis 0,013 % ohne genau festgelegte elektrische Leitfähigkeit um etwa 52 m/Ω mm². Ihr Einsatz erfolgt vorwiegend im Apparatebau und Bauwesen mit Anforderungen an gute Schweiß- und Hartlöteignung.

Cu-DHP mit einem vorgeschriebenen hohen Restphosphorgehalt von 0,015 bis 0,04 % ist eine Kupfersorte, an die in Bezug auf elektrische Leitfähigkeit keine besonderen Anforderungen gestellt wird (41 bis 52 m/Ω mm²). SF-Cu ist sehr gut schweiß- und hartlötbar und die wichtigste Kupfersorte im Maschinen- und Apparatebau, für Rohrleitungen, im Elektrogerätebau (z. B. für elektrische Abschirmungen) und im Bauwesen (z. B. Dachabdeckungen).

Die niedriglegierten Kupfersorten sind Legierungen auf Kupferbasis mit verhältnismäßig geringen Zusätzen anderer Elemente, durch deren Einfluss spezifische Eigenschaften des Werkstoffes erreicht werden. Entscheidend für die Verwendung dieser Werkstoffe in der Elektroindustrie ist die Tatsache, dass die elektrische Leitfähigkeit bei den niedrigen Legierungszusätzen nur geringfügig verringert wird, aber gleichzeitig andere geforderte Eigenschaften, wie z. B. Festigkeit, Kaltformbarkeit, Zerspanbarkeit, Zeitstandfestigkeit u.a.m. je nach Element und Zusatzmenge gezielt verbessert werden können (siehe auch Kapitel 2.2).

2.2 Eigenschaften

2.2.1 Physikalische Eigenschaften

Die elektrische Leitfähigkeit ist die wichtigste Eigenschaft der Kupferwerkstoffe für ihre Verwendung in der Elektrotechnik und Elektronik. Bei hochreinem Kupfer (99,998 % Cu) kann dieser Wert annähernd 60 m/Ω mm² = 103,5 % IACS (International Annealed Copper Standard) erreichen. Das heißt, ein Kupferdraht mit einem Querschnitt von 1 mm² hat erst bei einer Länge von 60 m einen elektrischen Widerstand von 1 Ω. Die entsprechenden Längen für Silber, Aluminium und Eisen betragen 63 m, 38 m und 10 m. Nur um 5 % übertrifft die Leitfähigkeit des relativ teuren Silbers diejenige von Kupfer. Tabelle 2 gibt einen Vergleich der Leitfähigkeit einiger Metalle und verdeutlicht, dass Kupfer für die Elektrotechnik das wichtigste Metall ist, wenn es um die möglichst verlustarme Leitung des elektrischen Stromes geht.

Die elektrische Leitfähigkeit des Kupfers wird, wie auch bei anderen Reinetallen zu beobachten, durch die Verunreinigung oder Legierung mit anderen Elementen negativ beeinflusst [2, 3]. Der Grad der Einwirkung hängt davon ab, ob sich die Verunreinigungen oder Zusätze im Grundmetall unter Mischkristallbildung lösen oder als neue Pha-

sen ein heterogenes Gefüge bilden. Der Einfluss auf die Eigenschaften einer Legierung ist im Falle einer Mischkristallbildung (lösliche Metalle) weitaus stärker als bei der heterogenen Kristallgemischbildung (unlösliche Metalle). Bei Gegenwart mehrerer, im festen Kupfer gelöster Elemente ergibt die Summe der Einzeleffekte die beobachtete Widerstandserhöhung. Bei Mischkristallbildung verändern oftmals

Metall	Relative elektrische Leitfähigkeit (Kupfer = 100)	Relative Wärmeleitfähigkeit (Kupfer = 100)	Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient bei 20 °C (10 ⁻⁶ /K)	Dichte
Silber	106	108	19	10,5
Kupfer	100	100	17	8,9
Gold	72	76	14	19,3
Aluminium	62	56	23	2,7
Magnesium	39	41	26	1,7
Zink	29	29	30	7,1
Nickel	25	15	13	8,9
Cadmium	23	24	31	8,7
Kobalt	18	17	12	8,9
Eisen	17	17	12	7,3
Stahl	13 - 17	13 - 17	12	7,8
Platin	16	18	9	21,5
Zinn	15	17	21	7,3
Blei	8	9	28	11,3

Tabelle 2: Vergleich technischer reiner Metalle

bereits kleine Zusatzmengen die Eigenschaften stark; so kann z. B. die Leitfähigkeit bis auf die für elektrische Anwendungen erforderlichen Mindestwerte herabgesetzt werden. Deshalb schreiben die Normen außer einem Mindestgehalt von 99,90 % Kupfer noch einen Mindestwert der elektrischen Leitfähigkeit vor.

In Anlehnung an die IEC-Werte wird in den ausländischen Normen (Tabelle 3), z. B. den international bedeutenden amerikanischen Normen ASTM und den internationalen Normen der ISO, von dem Kupfer hoher elektrischer Leitfähigkeit eine Mindestleitfähigkeit von 58,0 m/Ω mm² verlangt. Die deutschen Normen bezeichneten früher mit der Abkürzung „E-Cu“ Kupfer für elektrotechnische Zwecke und verlangten von diesem eine Mindestleitfähigkeit von 57,0 m/Ω mm² für E-Cu57 (2.0060; wurde nicht in die EN übernommen) bzw. 58,0 m/Ω mm² für E-Cu58 (DIN 1787).

Kurzzeichen nach EN	Kurzzeichen nach vorm. DIN 1787	Werkstoff-Nr. nach EN	Werkstoff-Nr. nach vorm. DIN	International ISO 1337 ISO 431	USA ASTM B 224	Frankreich NF-A51-050	Großbritannien BS 6017	Italien UNI 5649
Sauerstoffhaltiges Kupfer								
Cu-ETP	E-Cu58	CR004A	2.0065	Cu-ETP Cu-FRHC	C 11000/ETP C 11020/FRHC	Cu-a1 Cu-a2	Cu-ETP-2/C 101 Cu-FRHC/C 102	Cu-ETP
Cu-FRHC	E-Cu58	CR005A	2.0065	Cu-ETP Cu-FRHC	C 11000/ETP C 11020/FRHC	Cu-a1 Cu-a2	Cu-ETP-2/C 101 Cu-FRHC/C 102	Cu-ETP
Sauerstofffreies Kupfer (nicht desoxidiert)								
Cu-OF	OF-Cu	CW008A	2.0040	Cu-OF Cu-OFE	C 10200/OF C 10100/OFE	Cu-c1 Cu-c2	Cu-OF/C 103 Cu-OFE/C 110	
Sauerstofffreies Kupfer, mit Phosphor desoxidiert								
Cu-PHC	SE-Cu	CW020A	2.0070	Cu-HCP	C 10300/OFXLP			
Cu-HCP	SW-Cu	CW021A	2.0076	Cu-DLP	C 1200/DLP	Cu-b2		Cu-DLP
Cu-DLP	SF-Cu	CW023A	2.0090	Cu-DHP	C 12200/DHP	Cu-b1	Cu-DHP/C 106	Cu-DHP

Tabelle 3: Normbezeichnungen im internationalen Vergleich

Im Bild 2 ist der Einfluss der verschiedenen Elemente auf die elektrische Leitfähigkeit des Kupfers dargestellt. Im Mischkristallbereich setzen Elemente wie Phosphor, Silizium und Arsen die Leitfähigkeit stark herab. Die in Kupfer praktisch unlöslichen Elemente Blei, Selen und Tellur mindern die Leitfähigkeit nur in geringem Maße. Durch Zusatz von 0,03 % Ag erhält man eine Kupfersorte mit der gleichen Leitfähigkeit wie Cu-ETP. Durch diesen geringen Silberzusatz wird jedoch die Zeitstandfestigkeit (s. Pkt. 2.2.2) wesentlich erhöht. Zusätze von Cadmium, Chrom, Tellur und Zirkon unter 1 % bewirken zwar eine leichte Verringerung der elektrischen Leitfähigkeit, dafür aber die Verbesserung anderer Eigenschaften. Cadmium und Chrom erhöhen insbesondere die mechanische und Verschleißfestigkeit, Tellur hingegen übt einen günstigen Einfluss auf die span abhebende Verarbeitbarkeit des Kupfers aus. Kupfer-Zirkon besitzt neben der erhöhten Warmfestigkeit eine geringe Kerbempfindlichkeit und ist daher besonders für Kommutatorlamellen geeignet. Alle fünf Legierungselemente erhöhen bei nur wenig verringerter elektrischer Leitfähigkeit die Anlass- und Erweichungstemperatur des Kupfers. Bevorzugt für diesen Zweck wird z. B. Silber als Zusatzelement bei der Herstellung von Hartloten verwendet [4, 5].

Die elektrische Leitfähigkeit ist, wie bei allen Metallen, von der Temperatur abhängig. Ein Vergleich der Leitfähigkeiten von SF-Cu mit einem Restphosphorgehalt von 0,042 % und E-Cu in Abhängigkeit von der Temperatur ist im Bild 3 dargestellt. Bei tiefen Temperaturen nimmt die Leitfähigkeit des Kupfers kontinuierlich zu, zeigt aber keine Tendenz zur Supraleitfähigkeit. Selbst bei sehr tiefen Temperaturen tritt keine Versprödung des Materials auf. Deshalb ist Kupfer auch für die Anwendung in der Kältetechnik und in der Tieftemperaturtechnik besonders geeignet.

Nach der Matthiessen-Regel gilt für den elektrischen Widerstand R (als Kehrwert der Leitfähigkeit) die Gleichung $R = R_{id} + R_{Rest}$. Das heißt, die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes unreiner Metalle besteht aus einem temperaturabhängigen Widerstand des reinen Metalls R_{id} und dem temperaturunabhängigen Restwiderstand R_{Rest} , der auf Verunreinigungen und Störungen des Kristallgitters zurückzuführen ist. Für die Untersuchung des Reinheitsgrades von Kupfer wird die Messung des Restwiderstandsverhältnisses genutzt. Unter dem Restwiderstandsverhältnis versteht man im Allgemeinen das Verhältnis des Widerstandes bei 300 K zu demjenigen bei 4 K (Temperatur des flüssigen Heliums); dieses Verhältnis stellt ein Maß für die Reinheit des Kupfers dar [6].

Neben der elektrischen Leitfähigkeit spielt die Wärmeleitfähigkeit eine wichtige Rolle für die Anwendung in der Elektrotechnik. Die gute Ableitung der beim Stromdurchgang in einem elektrischen Stromkreis entstehenden Wärme hat besonders für die Übergangszonen, z. B. Kontakt- oder Verbindungsstellen, Bedeutung. Vorteilhaft ist auch die gute Wärmeableitung in elektrischen Einrichtungen, bei denen Schaltvorgänge oder Kurzschlüsse mit hohen Stromstärken auftreten können. Bei Kabeln und Leitungen erhöht die gute Wärmeableitung deren Strombelastbarkeit, wodurch der Materialaufwand bei gleicher zu übertragender elektrischer Leistung verringert werden kann. Zwischen beiden Größen, der elektrischen Leitfähigkeit und der Wärmeleitfähigkeit, besteht bei Raumtemperatur ein näherungsweise linearer Zusammenhang. Während die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Temperatur für sauerstoffhaltiges Kupfer sinkt, steigt sie bei allen Legierungen, auch bei phosphordesoxidiertem Kupfer an (Bild 4). Beim sauerstoffhaltigen Kupfer, das bereits eine hohe Leitfähigkeit aufweist, wird die Wärmeleitung durch Gitterschwingungen behindert, hingegen ermöglichen Verunreinigungen der zulegierten Elemente sowie Störungen im Gitteraufbau der Kupferlegierungen (mit einer bereits herabgesetzten Leitfähigkeit) mit zunehmender Temperatur eine bessere Wärmeleitung.

Obwohl das Kupfer selbst nicht supraleitend ist, spielt es auf Grund seiner guten Wärmeleitfähigkeit z. B. beim Bau von Spulen mit supraleitendem Material eine wichtige Rolle. Zur Vermeidung der lokalen Widerstandserhöhung (Degradation) im Supraleiter, die zur Zerstörung der Spule führen kann, wird das Supraleitmaterial in eine Kupfermatrix eingelagert. In einer anderen Ausführung werden die verwendeten NiZr-Leiter mit einer Kupferoberfläche versehen [44].

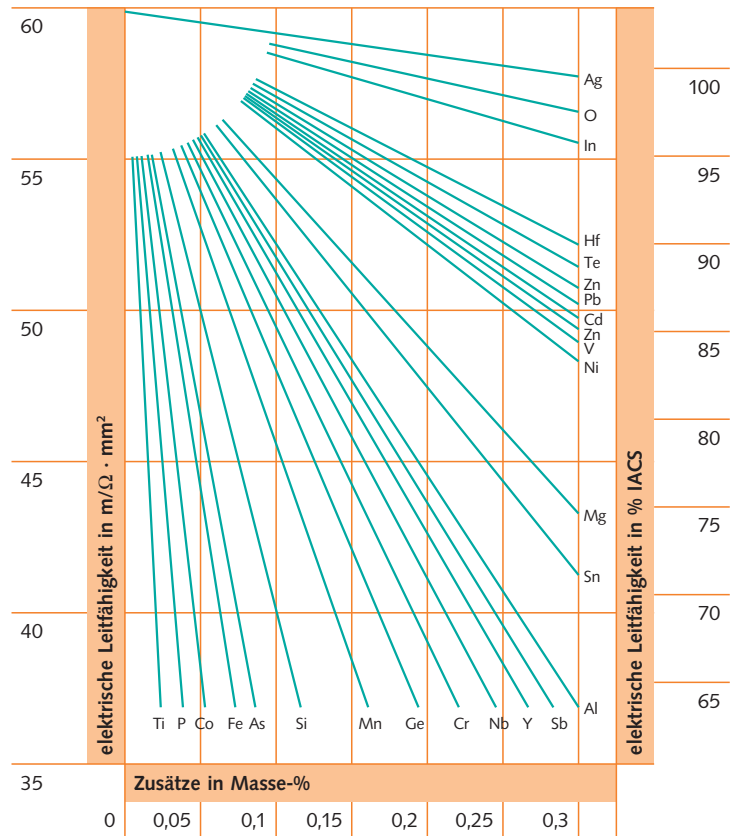


Bild 2: Einfluss von Zusätzen auf die elektrische Leitfähigkeit

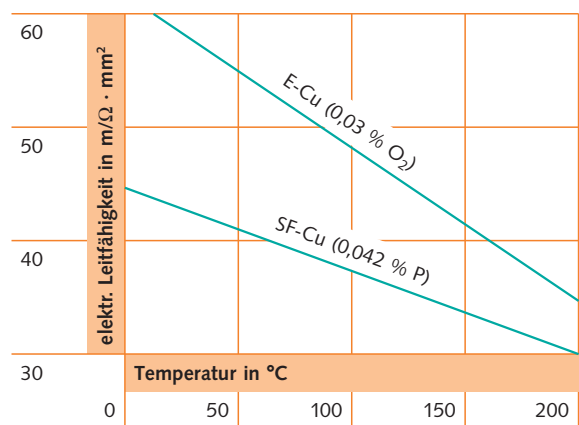


Bild 3: Einfluss der Temperatur auf die elektrische Leitfähigkeit

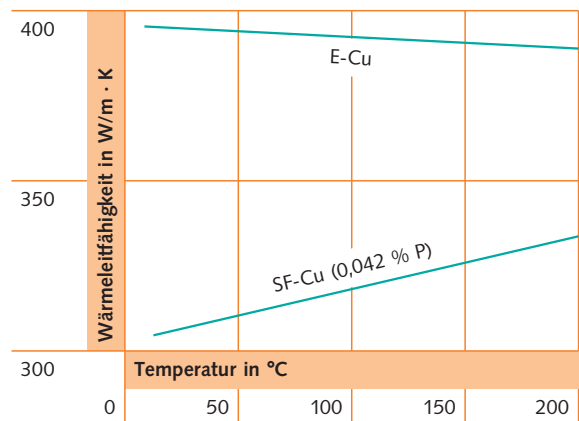


Bild 4: Einfluss der Temperatur auf die Wärmeleitfähigkeit

Einige weitere physikalische Eigenschaften des reinen Kupfers sind in Tabelle 4 zusammengestellt [8, 9].

Ordnungszahl	29
relative Atommasse	63,546
Kristallstruktur	kubisch-flächenzentriert
Gitterkonstante (20°C)	$3,607 \cdot 10^{-10}$ m
Dichte (20°C)	8,94 kg/dm ³
Schmelzpunkt	1083,4°C
Siedepunkt	2595°C
spezifische Wärme (20°C)	0,386 J/(g · K)
Wärmeleitfähigkeit bei 20°C	394 W/(m · K)
spezifische elektrische Leitfähigkeit bei 20°C	58 m/(Ω mm ²)
spezifischer elektrischer Widerstand bei 20°C	0,017 (Ω mm ²)/m
Längenausdehnungskoeffizient (von 20 - 100°C)	$17 \cdot 10^{-6}$ K
Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes bei 20°C (gültig von 100 - 200°C)	$3,93 \cdot 10^{-3}$ K
elektrisches Normpotential gegenüber H	Cu ⁺⁺ -0,344 V Cu ⁺ -0,47 V
magnetische Eigenschaft	diamagnetisch
Elastizitätsmodul bei 20°C	96 - 190 kN/mm ²

Tabelle 4: Eigenschaften für Reinkupfer (= 99,9 % Cu) für die Elektrotechnik

2.2.2 Mechanische Eigenschaften

Kupfer ist sehr duktil, also sehr gut kalt verformbar. Die mögliche Umformung, d. h. der Umformungsgrad, bis zu dem ohne Zwischenglühen umgeformt werden kann, ist größer als bei den meisten anderen Metallen. Beim Drahtziehen ist auf diese Art eine Querschnittsverminderung von mehr als 99 % möglich. Bei einer Wärmebehandlung über die Rekristallisationstemperatur (s. u.) hinaus entfestigt sich das Material vollständig und setzt günstige Voraussetzungen für weitere Umformungsvorgänge (Weichglühen, Rekristallisationsglühen). Glühbehandlungen werden zur Entspannung vorgenommen und dienen dem Abbau von Spannungsspitzen, ohne dass dadurch das bei der Kaltumformung erzielte Verfestigungsniveau wesentlich beeinträchtigt wird (Spannungsfreiglühen).

Die mikroskopische Untersuchung kaltgeformten Kupfers zeigt, dass die einzelnen Kristallite in der Umformrichtung ausgestreckt sind. Während der Kaltumformung kann man an diesem Kupfer eine mit der Umformung zunehmende Verfestigung bemerken. Glüht man dieses Material, so bilden sich neue, kleine Kristallite, die mit steigender Temperatur oder Glühdauer wachsen. Bei dieser als Rekristallisation bezeichneten Neubildung eines Korngefüges gehen auch die Festigkeitseigenschaften auf die Werte des unverformten Kupfers zurück. Ein Maß für den Ablauf der Rekristallisation ist die Rekristallisationstemperatur. Darunter versteht man allgemein denjenigen Temperaturbereich, in dem man nach etwa einer Stunde Glühzeit nach mittleren Verformungsgraden die Kaltverfestigung abbauen kann. Das sehr gute Formänderungsvermögen des Kupfers ist besonders zur Herstellung von Halbzeugen mit sehr geringer Dicke (Folien, Feindrähte), ferner für Treiarbeiten und zum Drücken geeignet.

Kupfer hat keine Streckgrenze. Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm des weichgeglühten Reinkupfers zeigt keinen Übergang vom elastischen in den plastischen Bereich. Deshalb wird diejenige Spannung, bei der die Dehnung 0,2 % der verwen-

deten Messlänge beträgt, an Stelle der Streckgrenze bestimmt und als 0,2 %-Dehngrenze bezeichnet. Üblicherweise wird dieser Wert aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm grafisch ermittelt. Die 0,2 %-Dehngrenze liegt bei weichem Kupfer zwischen 40 und 80 N/mm².

Kurzzeichen nach EN	Festigkeitszustand Kurzzeichen nach EN	Elektrische Leitfähigkeit bei 20 °C	Spezifischer Widerstand bei 20 °C	Zugfestigkeit	0,2 %-Grenze	Brinellhärte (Mittelwerte; eine Umrechnung von Härte in Festigkeit ist nicht möglich)
		mindestens m/Ωmm ²	höchstens Ωmm ² /m	R _m N/mm ²	R _{p,0,2} N/mm ²	HV
Cu-ETP	R200	58	0,01724	200 - 250	max. 100	55 weichgeglühtes Band (5 - 10 mm)
	R220	58	0,01724	220 - 260	max. 140	55 weichgeglühtes Band (0,1 - 5 mm)
	R240	57	0,01754	240 - 300	min. 180	80 kaltgewalztes Band
	R290	57	0,01754	290 - 360	min. 250	95
Cu-ETP	R360	56	0,01786	min. 360	320	min. 110
	R200	58	0,01724	min. 200	max. 120	55 weichgeglühter Draht (2 - 80 mm)
	R250	57	0,01754	min. 250	min. 200	80 kaltgezogener Draht (2 - 10 mm)
	R300	57	0,01754	min. 300	min. 260	95
	R350	56	0,01786	min. 350	min. 320	110

Tabelle 5: Einfluss des Festigkeitszustandes auf die elektrische Leitfähigkeit

Die Härte im weichgeglühten Zustand ist abhängig von der Korngröße des Mikrogefüges und beträgt in Brinellhärte etwa 45 bis 120 HB. Die Zugfestigkeit des weichgeglühten Kupfers liegt zwischen 200 und 250 N/mm². Sorten geringerer Reinheit liegen an der oberen Grenze, während sehr reines Metall etwas niedrigere Werte haben kann (Tabelle 5).

Die Bruchdehnung von sauerstofffreiem Kupfer (weichgeglüht) liegt bei etwa 40 bis 60 %, die Einschnürung bei etwa 75 %. Für Druckbeanspruchungen kann man die Werte für Festigkeit und 0,2 %-Dehngrenze aus dem Zugversuch annehmen. Bei reiner Druckbelastung des Kupfers sind hohe Umformgrade ohne Kantensrisse möglich. Die Einflüsse der Kaltumformung und der Temperatur auf die Festigkeitseigenschaften des Kupferwerkstoffes zeigt Bild 5 [10].

Eine Kenngröße, mit der das mechanische Langzeitverhalten von Bauteilen bei häufig wiederholter wechselnder Beanspruchung beurteilt wird, ist die Dauerschwingfestigkeit (Biegewechselfestigkeit). Sie hat für weiches Kupfer bei Raumtemperatur und 10⁸ Lastspielen etwa den Wert 70 N/mm² (Richtwerte: Aluminium 50 N/mm², Bronze 90 N/mm², Messing 120 N/mm²) und ist für federnde Bauteile von Bedeutung, deren Funktion auch bei längerem Einsatz gesichert sein muss, wie z. B. Kontakte für Relais.

Die Zeitstandfestigkeit des Kupfers ist auf Grund seiner gegen Null gehenden Kriechgeschwindigkeit sehr vorteilhaft für die Zuverlässigkeit von Schraubverbindungen, welche deshalb in gefährdeten Einsatzbereichen (z. B. im Bergbau, wo wegen der Explosionsgefahr

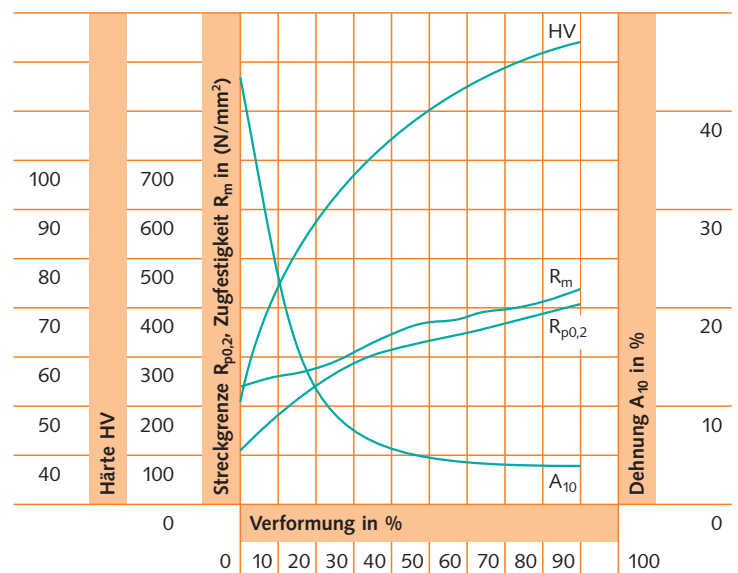


Bild 5: Einfluss der Kaltformung (Richtwerte)

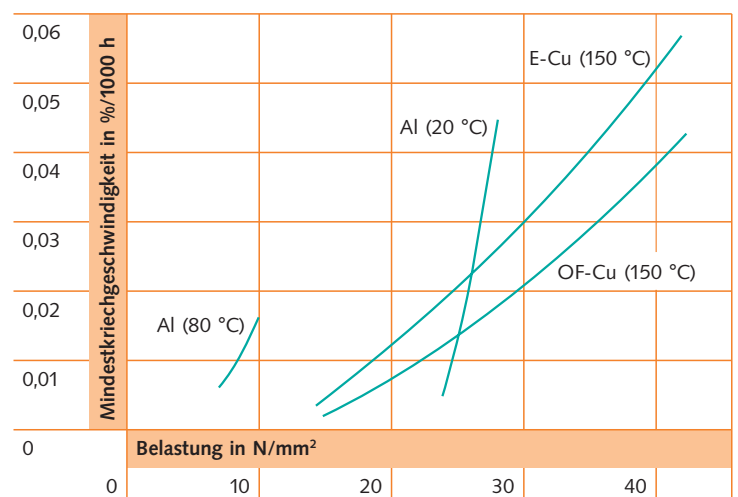


Bild 6: Typisches Kriechverhalten von Kupfer und Aluminium

keine Löt- oder Schweißarbeiten durchgeführt werden dürfen) ausschließlich angewendet werden. Ein während der Dauer eines Jahres bei Raumtemperatur mit 75 % seiner Zugfestigkeit belasteter Draht zeigte nach der Anfangsperiode mit etwas verstärktem Kriechen eine gleichmäßige Kriechgeschwindigkeit von 5×10^{-7} mm/(mm Tag) [6]. Die vorteilhafte Eigenschaft der Kupferwerkstoffe zeigt der Vergleich des Kriechverhaltens zwischen Kupfer- und Aluminiumwerkstoffen im Bild 6 [11]. Das Zeitstandsverhalten ist abhängig von der Korngröße im Kristallgefüge des Materials. Feineres Korn zeigt im Allgemeinen unterhalb der Rekristallisationstemperatur, gröberes Korn oberhalb dieser Temperatur bessere Dauerstandeigenschaften [6]. Die Dauerstandfestigkeit von unlegiertem und auch niedriglegiertem Kupfer hat u. a. Bedeutung beim Bau großer Elektromaschinen.

2.2.3 Chemische Eigenschaften – Korrosionsbeständigkeit

Das chemische Element Kupfer steht im periodischen System der Elemente zusammen mit Silber und Gold in der I. Nebengruppe bzw. in der 4. Periode zwischen den Elementen Nickel und Zink. Kupfer ist in der Regel einwertig, kann aber auch zwei- und dreiwertig, im Einzelfall sogar vierwertig auftreten. Zu Silber und Gold ist, wie bei Elementen der gleichen Gruppe üblich, eine gewisse Verwandtschaft hinsichtlich seiner Eigenschaften, wie z. B. der elektrischen Leitfähigkeit sowie der Korrosionsbeständigkeit, vorhanden. Kupfer ist in zahlreichen Medien, auch in Industrieatmosphäre, gut korrosionsbeständig [12]. Die hohe Korrosionsbeständigkeit in der Atmosphäre gegen Witterungseinflüsse beruht auf der Bildung einer gleichmäßigen Schutzschicht aus Korrosionsprodukten auf seiner Oberfläche, der Patina, die im Gegensatz zum Rost auf Stahl den weiteren Angriff stark verzögert.

Kupfer ist das einzige Gebrauchsmaterial, das in der normalen Spannungsreihe edler ist als Wasserstoff. Auf Grund des edleren Potenzials in Lösungen mit Wasserstoffionen wird Kupfer von Wasser, wässrigen Lösungen und nicht oxidierend wirkenden Säuren bei Abwesenheit von Oxidationsmitteln nicht angegriffen. Ein Angriff des Kupfers kann dann stattfinden, wenn das Angriffsmittel Sauerstoff oder Oxidationsmittel enthält oder oxidierend wirkt, wie z. B. Salpetersäure.

Die Korrosionsbeständigkeit des Kupfers ist ferner dann gefährdet, wenn Kupfer mit dem einwirkenden Mittel Komplexsalze bildet, da hierdurch die Ausbildung von Schutzschichten verhindert wird. Die bei der Reaktion entstehenden Cu^+ -Ionen werden laufend abgetragen, so dass sie immer wieder aus dem Grundwerkstoff ersetzt werden müssen. In reiner, trockener Luft überzieht sich blankes Kupfer mit einer dünnen Schicht aus Kupferoxid (Cu_2O). Auch wenn diese Schicht unsichtbar sein kann, erhöht sie die Beständigkeit gegen nachfolgende Angriffe von Luft, die durch Industriegase oder anderweitig verunreinigt ist. Im Gegensatz zu der sich schnell bildenden Oxidschicht auf Aluminium behindert diese Kupferoxidschicht nicht die Kontaktierung, was ein Vorteil für die elektrische Zuverlässigkeit von Schraub- und Klemmverbindungen mit Kupferleitern ist. Eine Verbesserung des Korrosionsverhaltens von Kupfer wird durch geringe Zusätze von Nickel, Aluminium oder Zinn erreicht.

2.3 Verbindungstechnologien

Kupfer lässt sich nach allen bekannten Verfahren einwandfrei verbinden. Neben den wichtigen Löt- und Schweißverfahren spielen in der Elektrotechnik auch die mechanischen Verbindungen eine wesentliche Rolle.

Löten und Schweißen

Nach DIN 8505, Teil 1, ist Löten ein „thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen und Beschichten von Werkstoffen, wobei eine flüssige Phase durch Schmelzen eines Lotes (Schmelzlöten) oder durch Diffusion an den Grenzflächen (Diffusionslöten) entsteht. Die Solidustemperatur (Grenztemperatur, unterhalb derer keine Schmelze vorliegt) der Grundwerkstoffe wird nicht erreicht“. Die beim Löten anzuwendende Temperatur richtet sich nach der Schmelztemperatur des benutzten Lotes.

Nach der Liquidustemperatur der Lote (Grenztemperatur, oberhalb derer nur Schmelze vorliegt) teilt man die Lötverfahren ein in:

- Weichlöten (Liquidustemperatur unterhalb 450°C) und
- Hartlöten (Liquidustemperatur oberhalb 450°C).

Soll die Löttemperatur an der Lötstelle möglichst niedrig sein und steht die elektrische Funktion der Verbindung im Vordergrund, was häufig der Fall bei Lötstellen an isolierten Leitern oder empfindlichen elektronischen Bauelementen ist, so wird das Lot mit der niedrigeren Arbeitstemperatur gewählt. Weichlöten ist ein einfaches und kostengünstiges Verfahren zum Verbinden von Kupfer. Von allen Metallen lässt sich Kupfer am besten weichlöten, wozu die gute Lösung der Oxide des Kupfers durch die Flussmittel und die gute Legierbarkeit mit dem Lotwerkstoff beitragen. Die überwiegende Anzahl der Weichlote ist auf Zinn- und/oder Bleibasis aufgebaut (EN 29453). Im Elektromotorenbau werden auf Grund der hohen Warmfestigkeitsforderungen Sonderweichlote eingesetzt, deren Liquidustemperatur etwas höher liegt (bis 400°C). In EN 29453 sind alle gebräuchlichen Weichlote, sowohl in ihrer Zusammensetzung, dem Schmelzbereich, der Dichte, dem bevorzugten Lötverfahren als auch in ihrer Verwendung aufgeführt. Beim Weichlöten muss immer ein Flussmittel verwendet werden, das die auf der metallischen Oberfläche vorhandenen, die Benetzung durch das flüssige Lot herabsetzenden Oberflächenfilme beseitigt und durch Abdeckung der Lötstelle während des Erwärmungsvorganges eine Neubildung verhindert [13, 14].

Nach EN 29454 teilt man die Weichlötflussmittel in drei Gruppen ein:

- Flussmittel, deren Rückstände Korrosion hervorrufen
- Flussmittel, deren Rückstände korrodierend wirken können
- Flussmittel, deren Rückstände nicht korrodierend wirken.

Werden dagegen hohe Anforderungen an die Festigkeit bzw. Warmfestigkeit und Temperaturbeständigkeit gestellt, so ist das Hartlöten vorzuziehen. Kupfer lässt sich durch Hartlöten sehr gut verbinden. Dabei ist vorausgesetzt, dass das Weichglühen von kaltverfestigten Werkstücken in Kauf genommen werden kann, weil die Rekristallisationstemperatur des Kupfers unter der Arbeitstemperatur des niedrigst schmelzenden Hartlotes (610°C) liegt. Die Hartlote nach EN 1044 für Schwermetalle sind überwiegend kupferhaltige, oft auch edelmetallhaltige Nichteisen-Legierungen. Neben den Standard-Hartloten gibt es für eine breit gefächerte Verwendung verschiedene Gruppen von Spezial-Hartloten mit speziellen Eigenschaften für gezielt vorgegebene Einsatzgebiete.

Hartlöten wird üblicherweise unter Verwendung von Flussmittel nach EN 1045 vorgenommen, wobei die technisch gebräuchlichen Schwermetalle mit sich selbst und in nahezu beliebiger Kombination unter einander verbunden werden können. Das flussmittelfreie Hartlöten an der Luft ist auf Kupfer als Grundwerkstoff mit phosphathaltigen Hartloten beschränkt.

Nach wie vor, wenn auch weniger als früher, werden Lote mit niedrigstmöglicher Arbeitstemperatur zwischen 610 und 700°C angewandt. Diese Lote lassen hohe Lötgeschwindigkeiten und schonendes Erwärmen des Werkstückes zu. Da sie Cadmium enthalten, ist während des Lötens für eine Absaugung der entstehenden Dämpfe zu sorgen. Der Ersatz durch cadmiumfreie Lote bereitet in einigen Anwendungen noch fertigungstechnische Probleme. Die Festigkeit der Hartlötverbindungen überschreitet die Scher- und Zugfestigkeit der Kupfersorten im weichgeglühten Zustand, sofern sachgemäße Vorbereitung und Ausführung der Lötung gewährleistet sind [15].

Zur Beurteilung der Lötbarkeit von Werkstoffen wird deren Benetzungsverhalten geprüft. Dieses Verhalten ist im Wesentlichen abhängig

- von den stofflichen und geometrischen Eigenschaften der Probe,
- von den Eigenschaften des Lotes,
- von den Hilfsmitteln zur Benetzungsförderung und
- von der Wärmeleitung während der Prüfung.

Lötbarkeitsprüfverfahren für das Weichlöten werden in der DIN 32506, Teil 1 bis 4, ISO 9455-10, eingehend beschrieben. Die Beeinträchtigung der Benetzbarkeit hängt ab von der Einwirkung der Umgebungsbedingungen auf die Oberfläche, z. B. während der Lagerung. Eine Präventivmaßnahme ist die Anwendung vorverzinnter Oberflächen.

Schweißen ist nach DIN 1910 „das Vereinigen von Werkstoffen in der Schweißzone unter Anwendung von Wärme und/oder Kraft mit oder ohne Schweißzusatz.“ In der Einteilung nach dem Ablauf des Schweißens kann man zwei Hauptgruppen unterscheiden:

- Schmelzschweißen: Schweißen bei örtlich begrenztem Schmelzfluss ohne Anwendung von Kraft mit oder ohne Schweißzusatz
- Pressschweißen: Schweißen unter Anwendung von Kraft mit oder ohne Schweißzusatz

In der praktischen Anwendung ist auch eine Kombination beider möglich.

Beim schweißtechnischen Verbinden von Kupferwerkstoffen sind einige Werkstoffeigenschaften in besonderem Maße zu berücksichtigen. Neben dem Sauerstoffgehalt sind das die gute Wärmeleitfähigkeit, die relativ hohe Wärmeausdehnung und die Gasaufnahme [16, 17].

Bei der Schweißung von Kupfer bewirkt die hohe Wärmeleitfähigkeit ein rasches Abwandern der eingebrachten Wärme in den benachbarten Grundwerkstoff. Zur Aufrechterhaltung des Schmelzflusses wird daher eine größere Wärmezuführung oder/und eine Vorwärmung des Grundwerkstoffes erforderlich. Die Wärmeausdehnung des Kupfers verursacht thermische Ausdehnungsbewegungen, die z. B. ein Fixieren des Schweißspaltes durch Heftstellen erschweren, oder bei der Stumpfnahschweißung eine Schweißspaltverengung verursachen. Zur Eigenschaft der Gasaufnahme während des Schweißens spielen zwei Vorgänge eine Rolle: Im flüssigen Zustand nimmt Kupfer beachtliche Mengen Sauerstoff auf, der sich aber bei der Erstarrung in Form von Kupfer(I)-oxid ausscheidet und dadurch die Zähigkeit der Schweißnaht deutlich herabsetzt. Das Eindringen von Wasserstoff in das hoch erhitze, sauerstoffhaltige Kupfer führt zu der beschriebenen Wasserstoffkrankheit.

Unter der Vielzahl gebräuchlicher Schweißverfahren, die für das Verbinden von Kupfer und Kupferlegierungen untereinander und mit anderen Werkstoffen angewendet werden [16, 17], sollen einige Verfahren erwähnt werden, die auf Grund weiter entwickelter Technologien neuerdings Bedeutung erlangt haben.

Ein spezielles Schutzgasschweißen, das Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG), wird z. B. als Automatschweißverfahren bei der Herstellung längsnahtgeschweißter Kabelmäntel aus Kupferwalzband eingesetzt.

Das Widerstandsschweißen von Kupfer hat für die Elektrotechnik besondere Bedeutung gewinnen können. Hierbei wird die zum Schweißen erforderliche Wärme durch Stromfluss über den elektrischen Widerstand der Schweißzone erzeugt. Geschweißt wird mit oder ohne Kraftbeaufschlagung und mit oder ohne Schweißzusatz. So wird z. B. das Press-Stumpfschweißen, und zwar das Zweiphasen-Stauchverfahren für das Verschweißen von Kupferlitzen und Kupferseilen bis zu Seilquerschnitten von 630 mm² angewendet. Die Qualität von Press-Stumpfschweißungen ist für die Weiterverarbeitung durch Kaltziehen, für das Richten, Walzen und auch für die Verarbeitung in Kabelwerken geeignet. Die elektrische Leitfähigkeit der Verbindungsstelle entspricht der des Grundwerkstoffes. Das Abbrenn-Stumpfschweißen ist ein zum Verbinden von Stromschiene und Walzdraht aus Kupfer mit Querschnitten von ca. 60 bis 500 mm² und größer angewandtes Verfahren.

Das Kaltpressschweißen ist ein Verfahren, bei dem begrenzte Oberflächenbereiche im kalten Zustand mit hoher Kraft in so innige Berührung gebracht werden, dass die Kohäsion beider Oberflächen eine Bindung bewirkt. Dieses Verfahren findet Anwendung an elektrischen Leitungen (z. B. Fahrleitungsdrähte, Kabelschuhe) [18], vor allem beim Verbinden von nicht oder schwer schweißbaren Werkstoffpaaren, z. B. Kupfer-Aluminium.

Die Anwendung des Mikroplasmenschweißens ist vorteilhaft im Bearbeitungsbereich dünner Bänder, Folien, Drähte, Siebe und Membranen aus Kupferlegierungen bei Werkstoffdicken von 0,01 bis etwa 0,1 mm. Mit diesem Verfahren werden z. B. Mikrorelaisgehäuse aus dünnen Kupfer-Nickel-Blechen oder auch dünne Drähte (0,05 mm Durchmesser) an Lötflächen größeren Querschnitts geschweißt.

2.3.2 Mechanische Verbindungen

Ganz gleich, wie eine mechanische Verbindung zwischen Strom führenden Bauteilen technisch ausgeführt wird, hat sie (bei gleichem Leiterquerschnitt) immer einen Bereich mit höherem elektrischem Widerstand als er den Bauteilwerkstoffen selbst eigen ist. Den zwischen den metallischen Berührungsstellen entstehenden Widerstand nennt man den Engewiderstand, so bezeichnet, da die Berührung nicht auf der gesamten makroskopischen Fläche erfolgt, sondern nur durch die vielen mikroskopischen Unebenheiten (Engstellen), die jeder Oberfläche eigen sind.

Diese Erscheinung bleibt auch bestehen, wenn die mechanische Verbindung über eine sehr große Kraft (Kontaktkraft) hergestellt wird. Die wahre Berührungsfläche an den einzelnen erhabenen Flächen ist also immer kleiner als die äußere Fläche erscheinen lässt. In den so genannten Engstellen können Stromdichten von 10⁵ A/mm² auftreten [10, 19]. Außerhalb der wahren Berührungsflächen verbleiben naturgemäß „Luftspalte“, in die die umgebende Atmosphäre (auch Schadstoffe) eindringt und Korrosionen bewirkt. Es werden Fremdschichten gebildet, die sich abhängig von der Reaktionsfähigkeit zwischen Grundwerkstoff und Atmosphäre ausbreiten und somit die Stromtragfähigkeit der Verbindung reduzieren. Es entsteht der so genannte Fremdschichtwiderstand, der sich zum Engewiderstand addiert. Die Aufgabe für die Konstruktion von dauerhaften Verbindungen liegt deshalb darin, die Stromwärme an der Kontaktstelle unter der Entfestigungstemperatur der betreffenden Leiterwerkstoffe zu halten, was nur durch eine definierte Kontaktkraft gesichert werden kann.

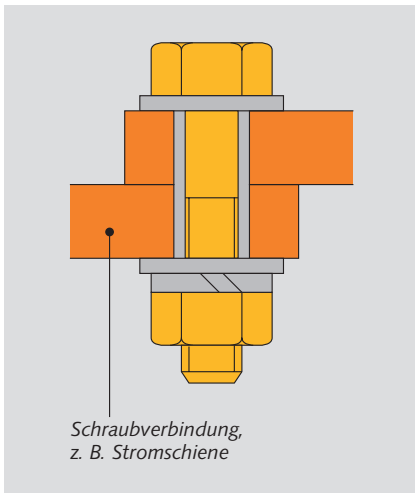


Bild 7: Schraubenverbindung

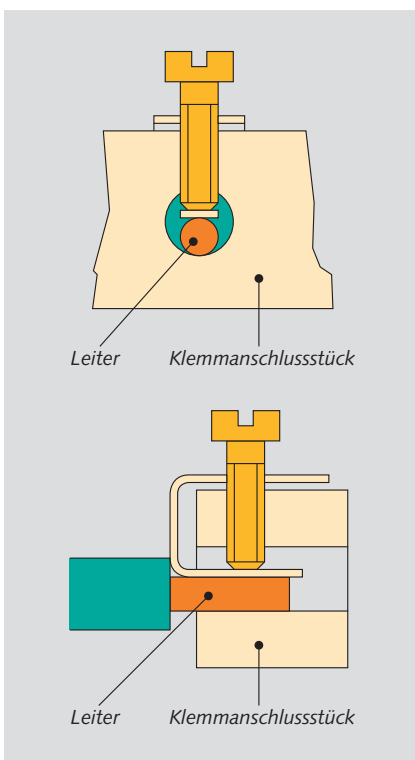


Bild 8: Buchsenklemme (Druckbügelausführung)

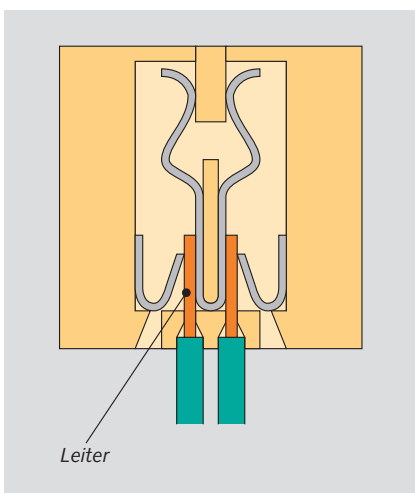


Bild 9: Schraublose Klemmstelle

Eine mechanische Verbindung steht meistens nicht unter dauernder Strombelastung und ein Abbau örtlicher, mechanischer Spannungen durch plastisches Verformen des Materials im warmen Zustand würde, sofern nicht sehr große Federkräfte zur Verfügung stehen, beim zwischenzeitlichen Erkalten den Kontaktpalt vergrößern und damit den Kontakt lockern.

Voraussetzung für eine elektrisch hochwertige Verbindung sind folgende Richtlinien:

- Die Berührungsflächen müssen metallisch blank sein
- Die Kontakteile müssen so dimensioniert sein, dass ein örtlich entstehender Wärmestau ohne unzulässige Überhitzung durch Wärmeleitung wieder abgeführt wird
- Der Kontaktwerkstoff muss eine ausreichende Kriechfestigkeit haben, damit die der Kontaktstelle ursprünglich gegebene mechanische Vorspannung über lange Zeit erhalten bleibt
- Die Kontaktkraft muss bei allen thermischen Belastungen gewährleistet sein (Federelemente verwenden)

In der praktischen Anwendung unterscheidet man lösbare und nicht lösbare mechanische Verbindungen.

Lösbare Verbindungen:

Schraubverbindungen für elektrische Leiter an Geräten, Maschinen und Anlagen sind solche, die direkt über Schrauben (Bild 7) oder indirekt über Klemmvorrichtungen hergestellt werden. Die Basisbestimmung für letztere ist VDE 0609, Teil 1 /4.94 (EN 60999). In ihr sind alle Anforderungen enthalten, die bei der Konstruktion, der Fertigung und der Prüfung zu beachten sind. Man unterscheidet im Wesentlichen zwei große Gruppen nach dem Konstruktionsprinzip: Flachklemmen werden mit oder ohne Druckstück für direkten Leiteranschluss oder für Kabelschuhanschluss verwendet. Buchsenklemmen sind ebenfalls mit oder ohne Druckstück für direkten Leiteranschluss oder Aderendhülsen verwendbar und werden als Druck- oder Zugbügelausführung eingesetzt (Bild 8).

Gut ausgeführte Schraubverbindungen haben gegenüber allen anderen Anschlussarten folgende Vorteile:

- hohe, querschnittsunabhängige Kontaktkraft
- Selbstlockerungsschutz
- großer Klemmbereich
- Spezialwerkzeug ist nicht erforderlich
- für alle Leiterarten ein-, mehr- und feindrähtig einsetzbar

Zu den schraubenlosen Anschlüssen gehören die federbelasteten Steckkontaktverbindungen, bei denen der blanke Kupferleiter durch schraubenloses Klemmen elektrisch verbunden wird (Bild 9). Zur Aufrechterhaltung der Kontaktkraft sind Klemmkörper und Federn erforderlich. Da das Öffnen und Schließen der Klemmstelle insbesondere bei kleinen Anschlussquerschnitten schneller möglich ist als bei einem Schraubvorgang, können dadurch Zeit und Montagekosten erheblich reduziert werden. Die vom Anschlussystem aufgebrachten Haltekräfte sind bei allen schraublosen Klemmen funktionsbedingt geringer als bei Schraubklemmen (Verhältnis 1 : 30).

Nichtlösbare mechanische Verbindungen:

Das Nieten erfolgt vorwiegend bei der Herstellung von Relaiskontakten, bei denen sich die Werkstoffkombination zwischen Kontakt und Träger nicht oder nur sehr

schlecht mit einander verschweißen lässt, z. B. AgCdO-Kontakte auf sämtlichen Trägerwerkstoffen oder Silber auf Kupfer. Die Kontaktkräfte werden hierbei durch den Nietvorgang vorgegeben, und die Aufrechterhaltung der im Niet erzeugten Vorspannung hängt von den Eigenschaften des Nietwerkstoffes ab (hohe Zeitstandsfestigkeit). Durch die Verformung auf dem Träger entsteht eine innige Verbindung ohne Spalt. Der Vorteil des Einnietens eines Kontaktes liegt hauptsächlich in der werkzeuggebundenen kurzfristigen Ausführung und einer problemlosen Fertigung.

Unter dem Begriff Quetschverbindung (Crimp) (Bild 10) werden alle Anschlussarten zusammengefasst, bei denen der Leiter mit einem Verbindungsteil durch Kaltverformung mittels geeigneter Werkzeuge verbunden wird. Die Crimp-Technik hat den Vorteil, dass es praktisch keine Querschnittsbegrenzung gibt und eine sehr zuverlässige Verbindung von mehrdrähtigen Leitern (Litze) z. B. mit Kabelschuhen, Steckverbindern und Aderendhülsen möglich ist. Sie hat aber den Nachteil, dass sie sich im Allgemeinen für eindrätige Leiter nicht eignet.

Während die vorgenannten Verbindungstechniken vorwiegend im Bereich der Starkstromtechnik Anwendung finden, haben sich im Bereich der Schwachstromtechnik verschiedene spezielle nicht lösbare Verbindungsverfahren durchgesetzt.

Die Wickelverbindung (Wire-Wrap, Bild 11) ist eine lötfreie elektrische Verbindung (DIN EN 60352-1). Dabei liefert ein blanker Kupferdraht, der unter hohem Zug um einen Vierkantstab z. B. aus Bronze, Neusilber oder Messing gewickelt wird, auf Grund der Kantenpressung (Kaltschweißung) den eigentlichen Kontakt. Der Wickelvorgang wird mit einer elektrisch getriebenen Pistole vorgenommen. Der verwendbare Leiterquerschnitt reicht bis maximal $0,5 \text{ mm}^2$.

Die Klammerverbindung (Thermi Point) (Bild 12) ist eine lötfreie elektrische Verbindung (DIN EN 60352-1). Der Anschluss erfolgt mit einer Druckluftpistole. Die Klammer wird gleichzeitig mit dem Leiter über einem Stift geschlossen. Die Stifte bestehen z. B. aus Bronze oder Neusilber mit rechteckigem Querschnitt. Es können sowohl ein- als auch mehrdrätige Leiter bis maximal $0,5 \text{ mm}^2$ angeschlossen werden.

Sowohl das Klammer- als auch das Wickelverfahren haben den Vorteil, dass eine Vielzahl von Anschlüssen auf engstem Raum hergestellt werden können. Die Stiftlänge wird in der Regel für drei Anschlüsse übereinander bemessen, so dass trotz des engen Raumes auch Querverbindungs- und Rangiermöglichkeiten bestehen.



Bild 10: Crimp-Verbindung an Litzen

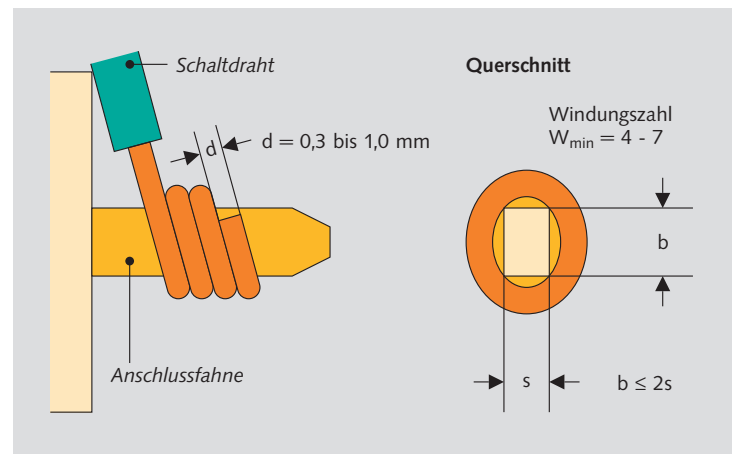


Bild 11: Wickelverbindung (Wire-wrap)

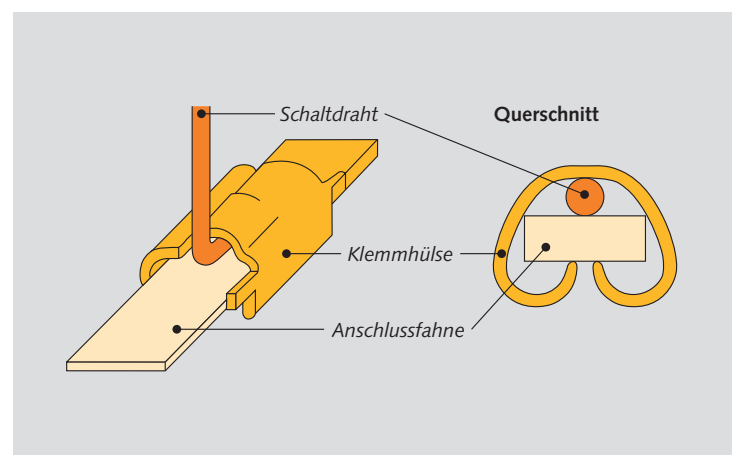


Bild 12: Klammerverbindung (Thermi-Point)

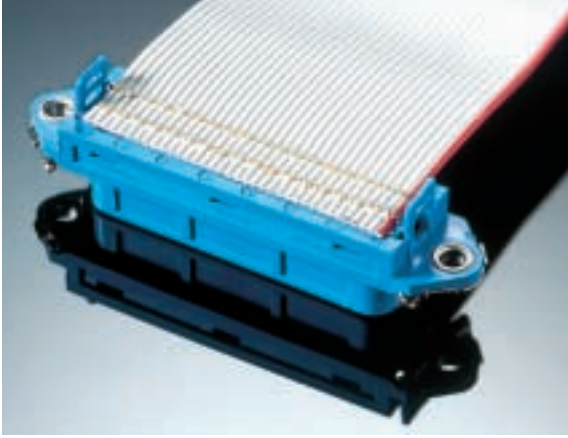


Bild 13: Steckerleiste mit in Schneidklemmtechnik kontaktierter 34-poliger Flachbandleitung

Die Schneidklemmtechnik (Bild 13) ist durch die Miniaturisierung in den Vordergrund getreten, insbesondere bei der Verwendung von Flachbandleitungen in Kombination mit Stecksystemen. Mit den entsprechenden Werkzeugen sind viele Verbindungen in einem Arbeitsgang schnell hergestellt. Das Schneidsystem muss jedoch exakt auf die verwendete Leitung abgestimmt sein [20].

Kupfer und Kupferlegierungen verfügen für mechanische Verbindungen über die günstigsten Voraussetzungen auf Grund ihrer vorteilhaften physikalischen (Leitfähigkeit), mechanischen (Zeitstandfestigkeit) und chemischen (Korrosionsbeständigkeit) Eigenschaften.

3 Anwendungen

3.1 Überblick

Kupfer ist auf Grund seiner hervorragenden Eigenschaften, insbesondere der hohen elektrischen Leitfähigkeit der mit dem Begriff der Elektrotechnik am engsten verknüpfte Werkstoff. Als elektrischer Leiter findet er zur Energie- oder Signalübertragung in allen Produktgruppen der Kabelindustrie Anwendung. Starkstromkabel und -leitungen werden zur Energieübertragung und -verteilung sowie zu Steuerungs- und Regelungszwecken eingesetzt.

Neben Kupfer ist Aluminium nur in Starkstromkabeln für Verteilungsnetze weit verbreitet. Für Aluminium spricht das geringere Gewicht bei guter Leitfähigkeit. Der belastungsgleiche Querschnitt beträgt dabei das 1,5-fache eines Kupferleiters, die erforderliche Masse jedoch nur die Hälfte. Daraus resultieren, wenn der Einsatz von Aluminium akzeptiert werden kann, deutlich geringere Kosten für das Leitermaterial. In Verteilungsnetzen besteht in der Regel kein Platzmangel, und das geringere Kabelgewicht ist bei der Verlegung großer Kabellängen von Vorteil. Zu beachten ist jedoch die Erhöhung des Gewichtes für die den Leiter umgebenden Aufbauelemente. Für Hochspannungskabel sind daher auch Kupferleiter die bessere Wahl.

Das geringere Gewicht des Aluminiums war auch dafür entscheidend, dass sich dieses im Freileitungsbau überwiegend kombiniert mit zugfesten Stahldrähten durchgesetzt hat. Bei Anwendung von Aluminium problematisch sind die Neigung zum Kaltfließen bei Druck (Problem bei Klemmverbindungen), der hohe Wärmeausdehnungskoeffizient und die starke Reaktionsfähigkeit. Die mit Sauerstoff gebildete Oxidhaut schützt zwar zum Teil vor weiterer Korrosion, ist jedoch ein guter Isolator. Ein dauerhaft guter Kontakt an den Verbindungs- und Anschlussstellen muss daher durch Anwendung von Schweißverbindungen bzw. speziellen Presstechniken gesichert werden.

In Industrienetzen werden deshalb wegen der geringeren Abmessungen und der größeren Kontaktsicherheit in der Regel Starkstromkabel aus Kupfer bevorzugt.

Im Bergbau, Tunnelbau oder auch in der Chemieindustrie werden Kupferleiter überall dort eingesetzt, wo wegen der Explosionsgefahr auf größte Kontaktsicherheit geachtet werden muss und keine Löt- oder Schweißverbindungen, sondern nur Schraub- oder Klemmverbindungen zugelassen sind.

Im Schiffsbau oder auch auf Förderanlagen sind vor allem die Korrosionsbeständigkeit insbesondere auch gegen Salzwasser und die Schwingungsfestigkeit sowie die Eignung für beengte Verlegebedingungen ausschlaggebend.

Bei der Gebäudeinstallation hat sich der Kupferleiter aus mehreren Gründen durchgesetzt und hat dort wegen des vielfältigen Einsatzes elektrischer Geräte mit hoher Leistungsaufnahme große Bedeutung. Aluminium war nur in wirtschaftlichen Mangelsituationen (z. B. in Kriegszeiten und in der ehemaligen DDR) im Einsatz und hat viele Probleme in der Anwendung gebracht. Die guten physikalischen und mechanischen Eigenschaften (s. Pkt. 2.2.1 und 2.2.2) gewährleisten zuverlässige und kosten sparende Installationen. Die hohe elektrische und Wärmeleitfähigkeit z. B. erlauben die Verwendung kleinerer Leiterquerschnitte, was der leichteren Verlegung (kleinere Raumerfordernisse und Biegeradien) und der möglichen elektrischen Belastungserweiterung der Stromkreise entgegen kommt. Die guten Festigkeitswerte und hohe Biegebarkeit erhöhen die Zuverlässigkeit bei der Legung (keine Querschnittsverminderung, kein Bruch- und Kerbungsschaden), wie auch die Langzeitzuverlässigkeit für die elektrischen Verbindungen (kriechfeste Schraub- und Klemmverbindung), die durch die gute Korrosionsbeständigkeit des Kupfers unterstützt wird. Hinzu kommen die leichte Montage der Leitungen, die ohne spezielle Werkzeuge und Fertigkeiten ausführbar sind, wie sie z. B. bei Aluminiumleitern benötigt werden.

In Leitungen zum Anschluss elektrischer Maschinen, Geräte und Anlagen, die während des Betriebes mechanischen Wechselbeanspruchungen unterworfen sind, die z. B. ständig gebogen, auf- oder abgewickelt oder über Rollen geführt werden, verwendet man ausschließlich Kupfer als Leiterwerkstoff. Die gute Biegefestigkeit des Kupfers in Verbindung mit einem fein- oder feinstdrähtigen Leiteraufbau garantieren langzeitige Einsatzbereitschaft.

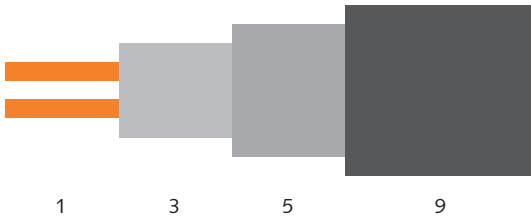
Sehr große Anwendungsgebiete für Kupfer und Kupferlegierungen sind auch die Nachrichtentechnik und Elektronik. Nachrichtenkel dienen der leitungsgebundenen Übertragung von Informationen in Gebäuden sowie im Orts- und Fernverkehr. Im Fern- und teilweise auch im Ortsverkehr ist das elektrische Nachrichtenkel mit Kupferleiter allerdings von den optischen Nachrichtenkeln ersetzt worden, in denen der Lichtwellenleiter durch seine Breitbandigkeit eine sehr hohe Übertragungskapazität bietet. Große Fortschritte hat es aber auch bei den elektrischen Nachrichtenkeln mit Kupferleiter für den ständig wachsenden Markt im Bereich lokaler Kommunikationsinfrastrukturen (Local Area Networks – LAN) gegeben. Nachrichtenleitungen stellen die Verbindung zu bzw. zwischen Informationsanlagen her oder werden für Regelungs- und Messzwecke eingesetzt. Hier, wo in der Regel viele Schnittstellen vorhanden sind, dominiert wegen der einfacheren Anschlusstechnik und der noch geringeren Kosten für die aktiven Schnittstellen noch der Kupferleiter. Lichtwellenleiter kommen bevorzugt bei besonderen Anwendungen zum Einsatz, z. B. wenn neben der Breitbandigkeit seine Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischer Beeinflussung oder Potenzialfreiheit ausgenutzt werden soll. Wegen der Unsicherheiten bei der Kontaktierung werden Aluminiumleiter auch bei Nachrichtenkeln und -leitungen nicht eingesetzt.

Im Elektromaschinenbau ist Kupfer das Leitermaterial, das allen Anforderungen gerecht werden kann. Die Haupteinsatzform bilden Wickeldrähte für Spulen und Wicklungen vorwiegend im Einsatz in elektrischen Maschinen (Transformator, Motor, Generator) sowie in Relais und in mess- und nachrichtentechnischen Geräten. Die hohe elektrische Leitfähigkeit (geringe Stromwärmeverluste) bei gleichzeitig guter thermischer Leitfähigkeit (gute Wärmeableitung bei Stromstößen) ermöglicht eine hohe Strombelastbarkeit bei relativ geringem Leiterquerschnitt (kleine

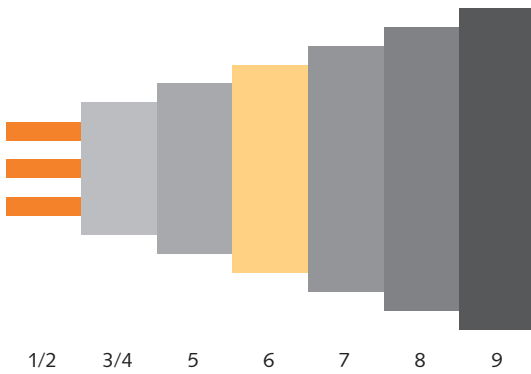
Wickeldraht und einadrige Leitungen



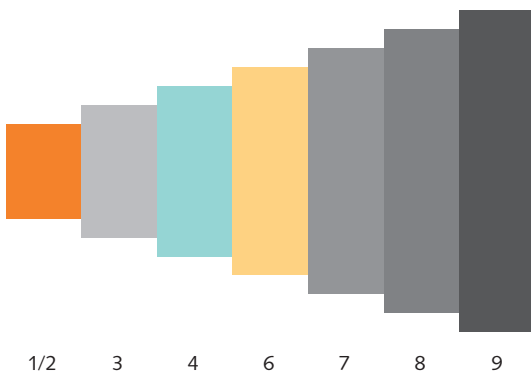
Mehradriges Kabel oder mehradrige Leitung



Mehradriges Kabel oder mehradrige Leitung



Einadriges Mittel- oder Hochspannungskabel



- 1 Leiter
- 2 innere Leitschicht (Leiterglättung)
- 3 Isolierhülle
- 4 äußere Leitschicht (Aderschirm)
- 5 gemeinsame Aderumhüllung oder Innenmantel
- 6 metallischer Schirm oder konzentrischer Leiter oder Metallmantel
- 7 innere Schutzhülle
- 8 Bewehrung
- 9 äußere Schutzhülle bzw. Außenmantel

Bild 14: Aufbauelemente

Bauausführung des Motors, Generators oder Transformators). Die gute mechanische Festigkeit spricht für den Einsatz auch bei rotierenden Maschinen (hohe Zentrifugalkräfte). Hinzu kommt die gute Verarbeitbarkeit hinsichtlich der Formgebung und der Verbindungstechnik (gute Löt- und Schweissbarkeit).

Elektrische Leiter sind Werkstoffe, die den elektrischen Strom gut leiten. Damit die Übertragung der elektrischen Energie leitungsgebunden erfolgt, muss das leitende Material (der Leiter) von nichtleitendem Material (der Isolierung), umgeben sein. Bei Freileitungen ist die Isolierung die Luft. Ein Maß dafür, wie gut ein Werkstoff den elektrischen Strom leitet, ist die elektrische Leitfähigkeit; sie beträgt für einen sehr guten Leiter $> 58 \text{ m}/\Omega \text{ mm}^2$. Für einen Isolator ist die Leitfähigkeit $< 10^{-10} \text{ m}/\Omega \text{ mm}^2$; für die häufig verwendeten Isolierstoffe $< 10^{-16} \text{ m}/\Omega \text{ mm}^2$. Leiter und Isolierhülle bilden die Ader und sind das Grundelement für elektrische Kabel und Leitungen. Mehrere Adern werden außer bei Flachleitungen verseilt, um einen runden, platzsparenden und allseitig biegbaren Aufbau zu erhalten.

Allgemein versteht man unter Kabel isolierte elektrische Leiter mit zusätzlich schützenden Hüllen, welche fest verlegt sind und auch in Erde und Wasser verlegt sein können. Leitungen sind für feste oder lose Verlegung bestimmte isolierte Leiter mit oder ohne zusätzliche schützende Hüllen, die bevorzugt in Innenräumen eingesetzt werden. Sie dürfen in der Regel nicht in Erde oder Wasser verlegt werden.

Die Grenze zwischen Kabeln und Leitungen ist nicht eindeutig und wird vom jeweiligen Anwendungsfall bestimmt. Eindeutige Merkmale sind:

- Kabel sind nur für feste Verlegung geeignet und haben immer einen Mantel.
- Immer als Leitungen anzusprechen sind flexible Bauarten und solche ohne Mantel.

Wickeldrähte dienen zur Herstellung von Spulen und Wicklungen für elektrische Maschinen und Geräte und sind nur aus Leiter und Isolierhülle zusammengesetzt.

Die wichtigsten Aufbauelemente für Kabel, Leitungen und Wickeldrähte sind:

- Leiter
- Isolierhülle
- Leitschichten (bei Kabeln und Leitungen ab 6 kV)
- Schirm oder konzentrischer Leiter
- Mantel
- Schutzhüllen und Bewehrungen

die entsprechend ihrem jeweiligen Anwendungsfall sowohl in ihrer Anordnung als auch in der Wahl des Materials in unterschiedlichster Form bei der Fertigung der Endprodukte zusammengestellt werden können (Bild 14).

3.2 Elektrische Leiter

Elektrische Leiter für Kabel, Leitungen und Wickeldrähte sind Drähte, aus Drähten hergestellte Seile oder Profilleiter aus einem gut elek-

trisch leitfähigen Metall. In der Kabeltechnik sind dies Kupfer und Aluminium. Auf Grund der Summe der hervorragenden Eigenschaften ist das Kupfer bis auf wenige beschriebene Ausnahmen dabei der dominierende Werkstoff.

Zur technischen und kommerziellen Verständigung zwischen den Herstellern und Anwendern von Kabeln, Leitungen und Drähten werden bestimmte Angaben über die Leiterabmessungen verwendet, die in genormten Größen festgelegt sind. Bei Starkstromkabeln und -leitungen sowie bei feindrähtigen Leitern von Nachrichtenleitungen wird der Nennquerschnitt angegeben. Bei Nachrichtenkabeln und ein-drähtigen Nachrichtenleitungen sowie für Wickeldrähte erfolgt die Angabe des Leiterdurchmessers.

Die Angabe des Nennquerschnitts erfolgt in mm², er ist jedoch nicht als geometrischer, sondern bestimmungsgemäß als elektrisch wirksamer Querschnitt des Leiters durch einen Widerstandswert bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C definiert. Er dient zur Bestimmung der maximalen Strombelastbarkeit und damit der Erwärmung der Kabel und Leitungen. Diese in der internationalen Norm IEC 60228 festgelegten Nennquerschnitte und zugeordneten Widerstandswerte werden weltweit angewendet. Eine Ausnahme bildet Nordamerika (USA und Kanada). Hier wurden Normquerschnitte definiert. Kleine Abmessungen werden mit einer AWG-Nummer (American Wire Gauge) bezeichnet, die im Starkstrombereich mit 19 AWG (0,653 mm²) beginnend mit größer werdendem Querschnitt kleiner wird und ab 126,64 mm² mit 250 MCM (milli circular mill) aufsteigend die Querschnittsfläche beschreibt. Eine praktisch anwendbare Zuordnung von Produkten zwischen beiden Systemen ist nicht möglich.

Der geometrische Leiterquerschnitt wird aus den Leiterabmessungen oder bei mehrdrähtigen Leitern aus der Masse eines Probestückes und der Dichte des Materials errechnet. Der elektrisch wirksame Querschnitt wird durch Messung des elektrischen Widerstandes ermittelt. Für die Umrechnung eines gemessenen Leiterwiderstandes auf die Bezugstemperatur von 20°C und 1000 m Länge gilt bei Kupfer:

$$R_{20} = R_{\vartheta} \cdot \frac{254,5}{234,5 \cdot \vartheta} \cdot \frac{1000}{l} \quad (\Omega/m)$$

R_{20} Widerstand bei 20°C

R_{ϑ} Widerstand bei Messtemperatur (Ω)

ϑ Messtemperatur (°C)

l Länge des Kabels oder der Leitung (m)

Die Einhaltung des dem Nennquerschnitt zugeordneten Widerstandes wird bei der Endprüfung der Produkte nachgewiesen und ist auch einer der Schwerpunkte der laufenden Fertigungsüberwachung.

Die Auswahl des anzuwendenden Nennquerschnitts erfolgt im konkreten Anwendungsfall nach entsprechenden Belastungstabellen. Zur verlustarmen Energieübertragung wählt man den wirtschaftlichen Querschnitt. Er ist größer, als der durch die Strombelastung erforderliche Nennquerschnitt und bildet ein Optimum zwischen Anschaffungs- und Kapitalkosten für die Kabelanlage und der jährlichen Verlustleistung. Dies ist bei einer Lebensdauer der modernen Starkstromkabel von etwa 50 Jahren von größter wirtschaftlicher Bedeutung. Gleichfalls ist das Vorhandensein einer Leistungsreserve bei fest verlegten Kabeln und Leitungen sinnvoll.

Neben dem Querschnitt/Widerstand sind auch die Leiteraufbauten normiert. In Deutschland sind diese Festlegungen in DIN VDE 0295 (basiert auf IEC 60228) enthalten.

Eindräftige runde Leiter (RE) sind bei fester Verlegung und als kleinere Abmessungen im Einsatz. Bei größeren Abmessungen nehmen die erforderlichen Biegekräfte zu, was der Anwendung eindräftiger Leiter Grenzen setzt.

Mehrdräftige runde Leiter (RM) sind aus Einzeldrähten zusammengesetzt. Dazu werden mehrere Drähte um einen Kern lagenweise verseilt. Geschlossene Lagen erhält man, wenn die Drahtzahl je Lage um 6 zunimmt. Die Leiterfläche ist nun nicht mehr massiv und der Leiterdurchmesser nimmt zu. Dies hat negative Auswirkungen auf den Kabeldurchmesser und führt zu erhöhtem Materialverbrauch für die den Leiter umhüllenden Aufbauelemente. Dem kann durch Verdichten des Leiters entgegengewirkt werden. Behält der Leiter seine runde Form, spricht man von mehrdräftigen runden verdichteten Leitern (RM/V*) (*- /v Zusatz nicht normiert).

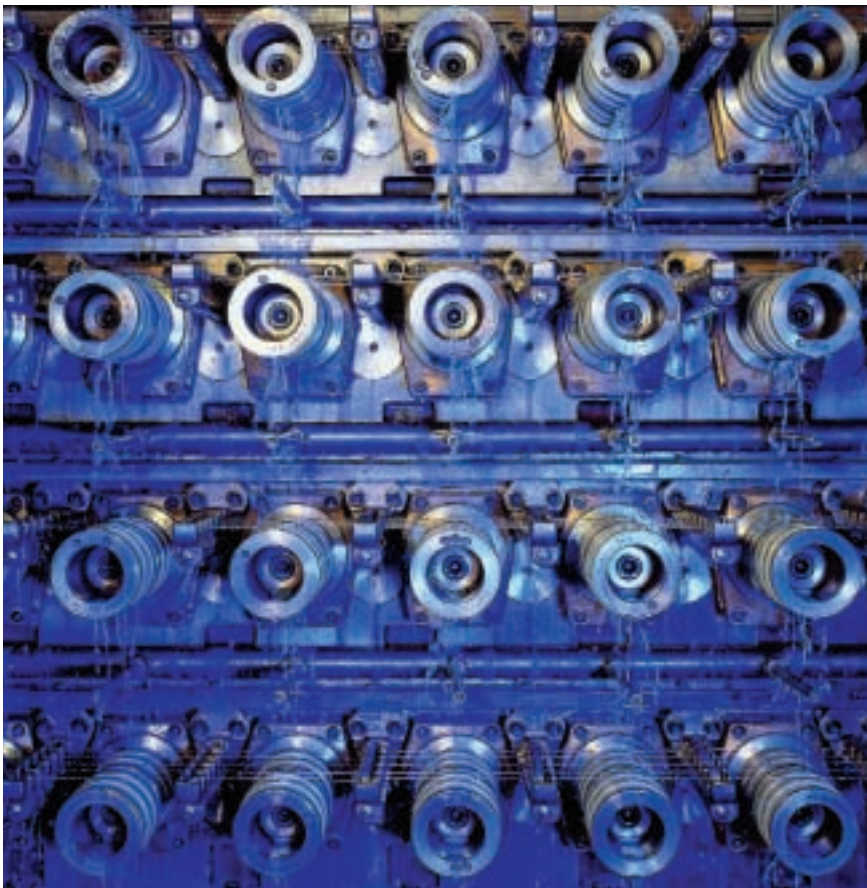
Für einadrige Ölkabel werden runde Hohlleiter (RM/H) aus Profildrähten hergestellt.

Bei mehrdräftigen Sektorleitern (SM) wird der Leiter im Kabel z. B. durch Walzen sektorförmig entsprechend der vorgesehenen Aderzahl geformt und verdichtet, wodurch eine weitere Reduzierung des Kabelaußendurchmessers erreicht wird. Eindräftige Sektorleiter (SE) sind nur bei Aluminium zugelassen und in Energieverteilungsnetzen üblich. Neben dem geringen Kabeldurchmesser wird durch den massiven Aufbau und damit geringerer Metalloberfläche der Korrosionsanfälligkeit des Aluminiums begegnet. Eine Sonderform der Anwendung von Sektorleitern stellen die segmentierten Leiter (Miliken-Leiter) dar. Drei oder mehr mehrdräftige Sektoren werden elektrisch von einander isoliert zu einem runden Leiter verseilt, um bei sehr großen Querschnitten ($\gg 1000 \text{ mm}^2$) den Wechselstromwiderstand durch Reduzierung der Auswirkungen des Skin-Effektes zu senken. Der Skin-Effekt beschreibt die Stromverdrängung innerhalb eines Leiters an die Leiteroberfläche bei Wechselstrom insbesondere bei hoher Frequenz. Bei Hochfrequenzkabel spielt dieser Effekt somit schon bei kleinen Leiterabmessungen eine große Rolle. In einigen

Fällen ist daher die Beschränkung des hochwertigen Kupfers auf die leitende Außenschicht durch Anwendung von kupferumhüllten Aluminiumdrähten sinnvoll.

Werden Leitungen häufig gebogen, sind nur Kupferleiter mit höheren Drahtanzahlen geeignet. Nur Kupfer hat die erforderliche Biegefestigkeit für die Belastungen bei Herstellung und Anwendung und lässt sich wirtschaftlich zu den notwendig kleinen Durchmessern ziehen. Selbst an den vom Grundsatz her hervorragend für diese Einsatzfälle geeigneten Werkstoff Kupfer werden für die heute im Einsatz befindlichen modernen Mehrdrahtziehmaschinen erhöhte Anforderungen an die Feinziehbarkeit gestellt. In solchen Anlagen werden z. B. gleichzeitig 28 Drähte auf einen Durchmesser von 0,10 oder 0,16 mm gezogen. Die Maximalgeschwindigkeit solcher Anlagen liegt zwischen 30 und 40 m/s. (Bild 15)

Bild 15: Mehrdrahtziehmaschine



Bei den für flexible Leitungen eingesetzten vieldräftigen Leitern (Litzenleiter) ist der jeweils maximal zulässige Einsatzdrahtdurchmesser festgelegt. So sind z. B. für die Abmessung $1,5 \text{ mm}^2$ bei feindräftigen Leitern (F) $0,21 \text{ mm}$ und bei feinstdräftigen Leitern (H) $0,16 \text{ mm}$ maximal zulässig. Kleine Drahtabmessungen führen zu hohen Drahtzahlen, welche für einfachste Anwendungen als parallel liegendes Drahtbündel (Strähne), allgemein jedoch wendelförmig zusammengelegt (Litze) sind.

Beim einfachen aber hocheffektiven Verseilen auf Würfelitzmaschinen zu Würfelitzen ist eine geordnete Lage der vielen kleinen Drähte nicht sicher gewährleistet. Unregelmäßigkeiten in der Litze können zu Störstellen in der Isolierung führen. Daher werden für anspruchsvolle Aufgaben bei Anwendung kleiner Wanddicken wie z. B. Kraftfahrzeugleitungen regelmäßig aufgebaute Leiter hergestellt, die entsprechend der 6er Regel aus 7, 19, oder 37 Drähten bestehen. Bei größeren Querschnitten und damit sehr hohen Drahtzahlen (z. B. $\gg 100$) ist die Herstellung in 2 Verseilarbeitsgängen (Vorlitze würgen und zu Rundseilen weiter verseilen) notwendig. Besonders hohe Flexibilität haben Lahnlitzenleiter (Y), welche aus Bündeln von mit feinen Kupferbändern ($0,3 \times 0,02 \text{ mm}$) wendelförmig umwickelten tragenden Kunststofffasern bestehen.

Konzentrische Leiter und metallene elektrische Schirme in Kabeln und Leitungen dienen dem Schutz gegen gefährliche Berührungsspannungen, dem Führen der Ableit-, Lade- und Fehlerströme und der Reduzierung des elektromagnetischen Feldes in seiner Wirkung auf die Umgebung oder des umgebenden elektromagnetischen Feldes auf das Produkt. Bevorzugtes Leitermaterial ist auch hier wieder Kupfer. Die genannten Aufgaben können funktionell auch von Metallmänteln oder metallischen Bewehrungen übernommen werden.

Der konzentrische Leiter, der in Niederspannungskabeln generell als Schutzleiter einzusetzen ist, besteht aus einer Lage Kupferdrähten mit Kupfergegenwendel, welche über der die verseilten Adern umgebenden gemeinsamen Aderumhüllung konzentrisch aufgeseilt (Ausführung C) oder wellenförmig (Ausführung CW) aufgebracht sind. Kupferschirme von Mittelspannungskabeln sind üblicherweise im Aufbau identisch mit konzentrischen Leitern, können aber auch aus geschlossenen Bewicklungen aus Kupferband bestehen. Schirme aus Kupferdrahtgeflecht bestehen aus sich kreuzend aufgelegten Bündeln feiner Kupferdrähte. Die Herstellung ist sehr aufwändig. Sie sind mechanischen Belastungen jedoch besonders gut gewachsen und werden z. B. bei Schiffskabeln, flexiblen Steuerleitungen und hochwertigen Nachrichtenleitungen eingesetzt. In Nachrichtenkabeln und -leitungen weit verbreitet sind auch Schirme aus kunststoffkaschierten Metallfolien oder -bändern (statischer Schirm).

In besonderen Fällen werden für elektrische Leiter und Schirme verzinnte Kupferdrähte verarbeitet. Neben einer verbesserten Lötbarkeit war überwiegend die Verhinderung von Wechselwirkungen zwischen Kupfer und bestimmten Kunststoffen (insbesondere schwefelvernetzter Gummi) der Anlass.

Für Hochleistungskabel zur Energieübertragung gibt es Bemühungen, Supraleiter einzusetzen. Diese Leiter bestehen aus Metallverbindungen, deren Widerstand bei tiefen Temperaturen praktisch Null ist, z. B. bei Niob unter $9,5 \text{ K}$. Durch die 1986 entdeckten Hochtemperatur-Supraleiter (HTSL), wie Verbindungen aus Wismut-Strontium-Kalzium-Kupfer-Oxid und Yttrium-Barium-Kupfer-Oxid mit einer Sprungtemperatur unter 110 K hat diese Entwicklung neue Impulse bekommen, da eine Kühlung mit flüssigem Stickstoff (77 K) möglich wird [22]. Mit einer praktischen Anwendung ist in naher Zukunft jedoch nicht zu rechnen.

Isolier- und Mantelwerkstoffe für Kabel und Leitungen

Die geforderten Gebrauchseigenschaften von Kabeln und Leitungen sind entscheidend für die Auswahl der Werkstoffe für Isolierungen und weitere schützende Hüllen wie z. B. Mäntel. Insbesondere sind dies solche Kriterien wie ausreichende Betriebssicherheit und Betriebslebensdauer, sowie Umweltverträglichkeit und Kosten.

Auf die Betriebssicherheit haben neben der richtigen Auswahl des Leiters vor allem die elektrischen Eigenschaften der Isolierhülle sowie Dimensionierung der Aufbaulemente den entscheidenden Einfluss. Die Wanddicken der Isolierhüllen bei Starkstromkabeln und -leitungen richten sich nach der Nennspannung, bis 1 kV auch nach dem Leiterquerschnitt, und bei Nachrichtenkabeln und -leitungen vorwiegend nach den geforderten Übertragungseigenschaften. Die Wanddicke von Schutzhüllen ist in der Regel unter dem Gesichtspunkt der mechanischen Belastung durchmesserabhängig festgelegt.

Unter dem Gesichtspunkt der Betriebslebensdauer (Lebensdauer im Gebrauch) spielen bei der Materialauswahl vor allem die Berücksichtigung der Einsatztemperaturen und weiterer Einsatzbedingungen (z. B. mechanische Belastung durch laufende Biegung; chemische Einflüsse durch Öle und Fette; UV-Strahlung u. a.), aber auch die gegenseitige Beeinflussung der Materialien untereinander eine große Rolle. In den Kunststoffen finden stets Alterungsprozesse statt, die durch Wirkung der genannten Einflüsse beschleunigt werden, was ohne wirksame Stabilisierung zum vorzeitigen Ausfall der Produkte führen könnte.

Aus der Sicht der Umweltverträglichkeit werden vor allem Forderungen zur Rezyklierbarkeit, zur Halogenfreiheit und zum Verhalten im Brandfall gestellt. Forderungen zum Brandverhalten beziehen sich z. B. auf Funktionserhalt über 30 oder 90 min, auf Vermeidung der Brandfortleitung sowie geringe Toxizität und Dichte der Rauchgase.

Für die kostenorientierte Auswahl der Werkstoffe sind neben den Beschaffungskosten und dem spezifischen Materialverbrauch die Verarbeitungskosten zu berücksichtigen. So kann bei einigen Kunststoffen durch Vernetzung ihr Eigenschaftsbild wesentlich verbessert werden, die Verarbeitungskosten steigen aber erheblich und die Rezyklierbarkeit ist stark eingeschränkt.

Das Eigenschaftsbild der Werkstoffe kann weiterhin durch Kombination der Kunststoffe, aber auch durch Zuschlagsstoffe modifiziert werden. Z. B. ist Kreide ein beliebter Füllstoff zur Kostensenkung, aber auch zur Verbesserung der mechanischen Kennwerte. Ruß wird nicht nur als preiswerter Farbstoff, sondern auch als wirksamer UV-Schutz für Kunststoffmäntel eingesetzt.

Als klassischer in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts dominierender Isolierstoff für Starkstromkabel ist das geschichtete Dielektrikum aus lagenweise gewickeltem getränktem Papier anzusehen. Wegen der guten dielektrischen Eigenschaften ist die Papierisolierung auch noch heute bei Hochspannungskabeln in geringem Umfang im Einsatz. Als moderne Isolierstoffe sind die in einer Schicht extrudierten Kunststoffe zu nennen, welche die Papierisolierung in den letzten Jahrzehnten im Bereich der Nieder- und Mittelspannung bis 30 kV abgelöst haben. Dieser Trend hat sich auch im Hochspannungsbereich bis 400 kV fortgesetzt. Als Kunststoffe für Isolierhülle und Mantel sind Thermoplaste und Elastomere im Einsatz. Bedeutung haben aber auch Werkstoffe, die nicht eindeutig diesen beiden Gruppen zugeordnet werden können, wie vernetzte Thermoplaste als auch thermoplastische Elastomere.

Die größte Bedeutung als Thermoplast hat immer noch der Massenkunststoff Polyvinylchlorid (PVC). PVC ist sowohl als Isolier- als auch als Mantelwerkstoff im Einsatz. Für die Kabelindustrie wird das Hart-PVC durch Weichmacher, Stabilisatoren, Füllstoffe und Gleitmittel für ein breites Anwendungsspektrum modifiziert. Allgemein ist PVC für Betriebstemperaturen bis 70°C zugelassen, ist aber auch bei Leitungen bei entsprechender Stabilisierung bis 90°C und höher in Anwendung. Nachteilig sind u. a. der hohe dielektrische Verlustfaktor, welcher gegen einen Einsatz bei Spannungen größer 6 kV spricht, sowie das Verhalten im Brandfall. PVC gilt zwar als schwer entflammbar, im Brandfall sind jedoch die starke Rauchentwicklung sowie die durch die Abspaltung von Chlor entstehenden korrosiven Gase (Salzsäure) problematisch.

Das thermoplastische Polyethylen (PE) ist wegen seiner guten dielektrischen Eigenschaften in Nachrichtenkabeln als Isolierung dominierend. Bei Starkstromkabeln höherer Spannungsebenen war in Deutschland bis Anfang der 80er Jahre wegen der niedrigen dielektrischen Verluste PE als Isolierwerkstoff im Einsatz und wurde durch das vernetzte PE abgelöst. PE ist halogenfrei, aber leicht brennbar. Wegen seiner guten mechanischen Eigenschaften hat es sich jedoch als Mantelwerkstoff insbesondere bei VPE-isolierten Mittel- und Hochspannungskabeln und teilweise bei Nachrichtenkabeln durchgesetzt. Aktuell gewinnt das dem PE verwandte Polypropylen (PP) als halogenfreier Werkstoff für den Einsatz bei Kabeln und Leitungen mit verbessertem Verhalten im Brandfall an Bedeutung.

Wegen seiner guten Füllstoffverträglichkeit wird für Kabel und Leitungen mit verbessertem Verhalten im Brandfall auch thermoplastisches EVA eingesetzt. Für besonders hohe Umgebungstemperaturen kommen Fluorkunststoffe (z. B. ETFE und FEP) zum Einsatz, welche auch eine sehr gute Chemikalienbeständigkeit haben.

Als vernetzte Thermoplaste haben vor allem Polyethylen (VPE) und Ethylen-Copolymere (EVA, EBA oder EEA) eine große Bedeutung. Durch die Vernetzung werden die thermoplastischen Kettenmoleküle dreidimensional verknüpft, wodurch eine höhere Wärmeformbeständigkeit erreicht wird. Die zulässige Leitertemperatur für ungestörten Betrieb steigt demzufolge bei VPE Isolierungen auf 90°C. Leiterschichten von Mittel- und Hochspannungskabeln bestehen im Fall der VPE-Isolierung in der Regel aus Ethylen-Copolymeren mit homogen verteilter Leitrußfüllung.

Die chemische Vernetzung durch Peroxide mittels kontinuierlicher Vernetzung im Druckrohr (CV-Verfahren) wird vor allem für Mittel- und Hochspannungskabel eingesetzt. Für Kabel und Leitungen im 1 kV-Bereich werden die Vernetzung durch Elektronenstrahlen und in den letzten Jahren bevorzugt die Silanvernetzung angewandt. Die Silanvernetzung erfordert einen wesentlich geringeren technischen Aufwand, da durch Einsatz modifizierter Materialien normale Anlagentechnik für die Aderherstellung nutzbar wird. Die Vernetzung erfolgt nach der Aderherstellung durch Einfluss von Wärme und Feuchtigkeit.

Der historisch bekannteste Vertreter der Elastomere, welche generell vernetzt sind (bei Gummi spricht man auch von Vulkanisation), ist Naturkautschuk, der in der Kabelindustrie jedoch nur noch eine geringe Rolle spielt. Er ist abgelöst durch synthetische Kautschuke z. B. auf der Basis von Ethylen und Propylen (EPR) als Ethylen-Propylen-Kautschuk (EPM) bzw. Ethylen-Propylen-Terpolymer-Kautschuk (EPDM). Die Summe hervorragender Eigenschaften sichern eine breite Anwendung insbesondere bei flexiblen Leitungen (gute Flexibilität bei Kälte und zulässige Betriebstemperatur bis 90°C) bis in den Mittelspannungsbereich. Als Mantelwerkstoffe mit besonderen Eigenschaften galt auch Nitril-Butadien-Kautschuk (NBR) wegen seiner sehr guten Ölbeständigkeit.

Heute dominieren statt dessen vor allem Polychloropren (CR) z. B. im Einsatz bei Leitungen im Bergbau und für Schiffskabel und Chloriertes Polyethylen (CM) oder Chlorsulfoniertes Polyethylen (CSM). Diese Elastomere zeichnen sich durch gute Witterungs- und Chemikalienbeständigkeit, Widerstandsfähigkeit gegen Kälte, Wärme und Einwirkung von Flammen sowie Abrieb und Reißfestigkeit aus. Vernetztes Ethylen-Vinylacetat (EVA) wird im Niederspannungsbereich eingesetzt und lässt Leitertemperaturen bis 110°C zu. Ein noch breiteres Temperaturspektrum wird mit Silikonkautschuk (-60°C bis +180°C) erreicht.

Bei den Thermoplastischen Elastomeren (TPE) wird angestrebt, die Gebrauchseigenschaften der Elastomere mit den günstigen Verarbeitungseigenschaften der Thermoplaste zu kombinieren. Einer der bedeutendsten Vertreter dieser Gruppe ist schon seit vielen Jahren das thermoplastische Polyurethan (TPU). Wegen seiner leichteren Verarbeitbarkeit gegenüber Elastomeren (keine Vernetzung erforderlich) in Verbindung mit hervorragenden mechanischen und chemischen Eigenschaften wird weiches TPU bevorzugt für hochflexible Leitungen eingesetzt.

3.4 Produktgruppen

3.4.1 Starkstromkabel

Die ersten Starkstromkabel wurden 1880 in Berlin für die Straßenbeleuchtung eingesetzt. Sie hatten Kupferleiter und die von den Nachrichtenkabeln bekannte Gut-tapercha-Isolierung. Wesentliche weitere Meilensteine waren die Einführung der mit Mineralöl getränkten geschichteten Papierisolierung. Als Kabelisolieröle wurden sowohl dünnflüssige Spezialisolieröle für Hochspannungskabel als auch hochviskose Kabelimprägniermassen und besonders zähe nicht abfließende Haftmassen (non-draining-Masse) eingesetzt. Ab etwa 1940 wurde begonnen, Kunststoffe, insbesondere PVC, für Isolierung und Mantel einzusetzen.

Starkstromkabel sind, je nach ihrem Aufbau, geeignet für die Verlegung in Erde, Luft, Flüssen, Seen, im Bergbau, auf Schiffen, auf fördertechnischen Anlagen, auf Schienenfahrzeugen und in den verschiedensten Industrieeinrichtungen. Der Aufbau eines Kabels (Leiter; Isolierhülle, Mantel und gegebenenfalls weitere schützende Aufbauelemente) hängt jeweils von den geforderten elektrischen, thermischen, mechanischen und chemischen Beanspruchungen ab und führt zu einer Vielzahl von verschiedenen Ausführungsformen. Die Standardbauarten sind für normale Verlege- und Betriebsbedingungen geeignet. Ihr Aufbau unterscheidet sich daher vorrangig nach der Spannungsebene.

Moderne Niederspannungskabel haben eine Isolierung aus PVC oder VPE und bestehen in der Regel aus mehreren Adern, über welchen eine gemeinsame Aderumhüllung und ein Mantel auf der Basis von PVC oder HDPE aufgebracht sind (Bild 16).

Die Aderzahl ist vom Einsatzzweck und den Netzbedingungen abhängig. Die Leiter werden als Phasenleiter (R, S, T, bzw. L1, L2, L3), als Neutralleiter (N), als Schutzleiter (PE) oder als kombinierter Neutral- und Schutzleiter (PEN) eingesetzt, wobei dieser in besonderen Fällen auch einen gegenüber dem Phasenleiter reduzierten Querschnitt haben kann (3-1/2-Leiter-Kabel). Zu beachten ist jedoch, dass eine gleichmäßige Lastverteilung nur im Idealfall vorhanden ist und durch Oberschwingungen überproportional große Ströme im Neutralleiter fließen können [23]. Der Einsatz von 3-1/2-Leiterkabeln ist daher nicht mehr zeitgemäß. Empfehlenswert sind 5-Leiterkabel bzw. für Abmessungen ab 35 mm² 4-adrige Kabel mit konzentrischem



Bild 16: 1 kV-Starkstromkabel

Leiter. Ein konzentrischer Leiter, der generell als Schutzleiter einzusetzen ist, besteht aus mehreren Cu-Drähten, welche über der gemeinsamen Aderumhüllung aufgeseilt (Ausführung C) bzw. wellenförmig (Ausführungsform CW) aufgebracht sind (Bild 17).

Bei Mittelspannungskabeln hat sich ebenfalls die Kunststoffisolierung durchgesetzt. In Deutschland ist vor allem VPE im Einsatz, wodurch die Papiermassenkabel fast vollständig verdrängt wurden. Typisch für Adern von Mittelspannungskabeln ist der 3-schichtige Aufbau. Durch leitfähige Schichten über dem Leiter (Leiterglättung) und über der Isolierung (Aderschirm) wird ein radialer Verlauf der Feldlinien in der Isolierung (gleichmäßige Belastung) erzwungen. Neben der Reinheit und Hohlraumfreiheit der Isolierung spielt die gute homogene Bindung zwischen diesen Schichten eine entscheidende Rolle für die Lebensdauer solcher Kabel. Bei VPE-Kabeln ist daher die gemeinsame Extrusion dieser drei Schichten üblich. Die Entwicklung der VPE-Mittelspannungskabel hatte anfänglich mit Rückschlägen durch Ausfälle von Kabeln nach einigen Betriebsjahren durch so genannte Water Trees (Wasserbäumchen) zu kämpfen. Diese Störstellen entstanden durch Anwesenheit von Feuchtigkeit in der Kabelisolierung im Zusammenwirken mit Unreinheiten und Inhomogenitäten. Die kontinuierliche Vernetzung der extrudierten Adern erfolgt daher schon seit vielen Jahren nicht mehr in einer Dampf-, sondern in einer Schutzgasatmosphäre aus Stickstoff. Der extrudierte Aderschirm wird ergänzt durch einen metallischen Schirm aus Cu-Runddrähten oder Cu-Band. In vielen Fällen werden zusätzliche Maßnahmen gegen eindringende Feuchtigkeit im Kabel unternommen (Bild 18).

Hoch- und Höchstspannungskabel unterscheiden sich von Mittelspannungskabeln vor allem durch die höhere elektrische Beanspruchung. Auf diesem Gebiet wächst der Anteil der Kunststoffisolierungen. Bis 123 kV kommen seit einigen Jahren überwiegend VPE-Kabel zum Einsatz und in Berlin wurden Ende der 90er Jahre erste 400 kV-VPE-Kabel verlegt [24].

Im Einsatz befinden sich aber noch überwiegend papierisolierte Kabel. Ölkabel (Bild 19) haben eine mit dünnflüssigem Spezialöl getränkte Isolierhülle aus Papier. Das Öl steht im Kabel unter Druck, der durch die in der Anlage eingebauten Ölausgleichsgefäße bei allen Betriebszuständen relativ konstant gehalten wird. Ökologisch günstiger als Ölkabel werden Gasdruckkabel eingeschätzt, bei denen die Papierisolierung mit einer zähflüssigen Masse getränkt ist. Sie sind aber nur bis ca. 200 kV einsetzbar. Papierisierte Kabel haben immer einen Metallmantel oder werden wie z. B. Gasdruckkabel in Stahlrohren verlegt.

Wegen der mittlerweile international guten Erfahrungen mit VPE-Kabeln bis 400 kV ist auch unter ökologischen Gesichtspunkten davon auszugehen, dass Neuinstallationen in diesem Bereich nur noch mit VPE-Kabeln ausgeführt werden. Im Sinne hoher Betriebssicherheit hat der Schutz der Kabelisolierung vor Feuchtigkeit große Bedeutung. Al/PE-Schichtenmäntel und über 150 kV Metallmäntel, insbesondere in Form des Aluminiumwellmantels, sind daher die Regel (Bild 20).

Kabel mit verbessertem Verhalten im Brandfall spielen eine Rolle bei Verlegung in Räumen mit erhöhten Sicherheitsanforderungen, wie



Bild 17: 1 kV-Starkstromkabel mit konzentriertem Leiter



Bild 18: 20 kV-VPE-Kabel längswasserdicht

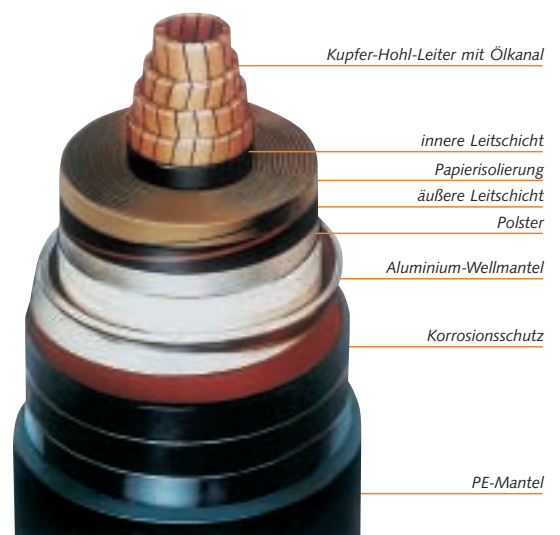


Bild 19: Niederdruck-Ölkabel-400kV



Bild 20: 400 kV-VPE-Kabel



Bild 21: 20 kV-VPE-Seekabel

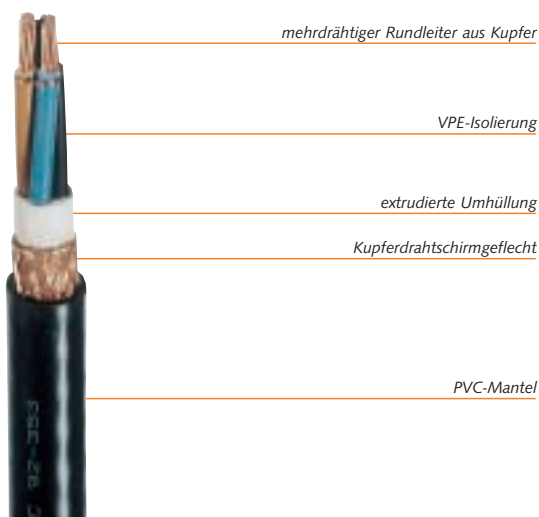


Bild 22: 1 kV-Schiffskabel

z. B. in Krankenhäusern. Diese Produkte sind auf jeden Fall halogenfrei und mit einem flammwidrigen Mantel ausgerüstet. Bei erhöhten Anforderungen, z. B. Funktionserhalt bis 90 min werden mit Flammenschutzmitteln gefüllte vernetzte Polymere für Isolierung und Mantel eingesetzt. Bestimmte Bauarten sind auch bei Belastung durch ionisierende Strahlung einsetzbar.

Bei Kabeln für besondere Beanspruchungen richtet sich der Aufbau nach den entsprechenden speziellen Anforderungen. So sind bei der Auswahl der Isolier- und Mantelwerkstoffe immer die Betriebstemperaturen zu berücksichtigen (Pkt. 3.2). Treten besondere Zugkräfte während der Legung oder im Betrieb auf, werden Bewehrungen aus runden oder flachen Stahldrähten eingesetzt. Stahlbandbewehrungen sind geeignet, Kabel vor mechanischen Einwirkungen zu schützen, aber auch vor Befall durch Insekten (vor allem Termiten) oder Nager. Harte PE-Mäntel haben sich ebenfalls als Termitenschutz bewährt.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Wahl des Mantelwerkstoffes hat die mögliche Beeinträchtigung durch Chemikalien. Sind die Anforderungen auch durch Modifikation der Kunststoffe nicht zu erfüllen, wird z. B. in der chemischen Industrie oft ein Bleimantel eingesetzt.

Für die Verlegung in Wasser sind Kunststoffkabel zwar allgemein zugelassen. Insbesondere bei VPE-isolierten Mittelspannungskabeln werden in feuchter Umgebung längs- und querwasserdichte Ausführungen eingesetzt. Wegen der oft erhöhten mechanischen Belastung, z. B. bei der Energieversorgung von Inseln, sind verzinkte Drahtbewehrungen üblich. (Bild 21).

Kabel für verkehrstechnische Anlagen werden zur Energieversorgung im Nahverkehr (600-1500 V) bzw. im Fernverkehr der Bahn (15 kV) eingesetzt. Diese Kabel sind einadrig und in der Regel mit Cu-Runddrähten geschirmt. In bestimmten Fällen, z. B. bei Verlegung in Tunneln, werden auch Kabel mit verbessertem Verhalten im Brandfall eingesetzt.

Besondere Bedeutung haben auch Kabel für Schiffe und Offshore-Anlagen. Wegen der schwierigen Verlegebedingungen und speziellen Belastungen durch Meerwasser und Schwingungen werden generell mehrdrätige Leiter aus Cu eingesetzt. Als Isolierwerkstoffe sind neben VPE auch EPR oder HEPR üblich. Bei Verlegung über Deck und in Räumen mit funktechnischen Anlagen erhalten die Kabel einen Schirm aus geflochtenen Cu-Drähten (Bild 22).

Kabel für den Bergbau unter Tage unterliegen naturgemäß hohen mechanischen und sicherheitstechnischen Anforderungen. Daher werden üblicherweise Kabel mit kunststoffisoliertem Cu-Leiter und Armierung aus verzinkten Stahldrähten eingesetzt. Diese Bauarten haben auch bei Spannungen > 0,6/1 kV stets einen konzentrischen Leiter. Damit ist bei mechanischer Beschädigung eine schnelle Unterbrechung des Stromflusses gewährleistet.

Zwischen den Kabeln und Freileitungen stehen die isolierten Freileitungen. Sie bieten statt Freileitungen bei schwierigen Trassenbedingungen Vorteile. Als Leitermaterial wird eine zugfeste Aluminiumlegierung eingesetzt, die Isolierung besteht aus vernetztem VPE.

3.4.2 Starkstromleitungen

Starkstromleitungen werden zur Verteilung elektrischer Energie und zur Übertragung von Mess- und Steuersignalen in der Installationstechnik von Gebäuden sowie dem Anschluss von Geräten, Maschinen, Schaltanlagen und Verteilern und deren innerer Verdrahtung eingesetzt. Einsatzgebiete und Anforderungen sind sehr unterschiedlich, so dass neben Standardbauarten eine Vielzahl von Sonderbauarten für unterschiedlichste Anwendungsbereiche existieren.

Starkstromleitungen bestehen aus einem oder mehreren isolierten Leitern (Adern), über denen außer bei Aderleitungen ein oder mehrere Schutzhüllen (Mäntel) und gegebenenfalls weitere Aufbauelemente aufgebracht sind. Die Leiter sind rund und bestehen im Interesse sicherer Anschlussbedingungen und geringer Baugröße generell aus Kupfer. Starkstromleitungen werden in die beiden großen Gruppen der Leitungen für feste Verlegung und der flexiblen Leitungen eingeteilt. Werden Leitungen fixierter Längen mit Endenausbildung hergestellt, z. B. Steckverbinder, so spricht man von konfektionierten Starkstromleitungen.

3.4.2.1 Leitungen für feste Verlegung

Leitungen für feste Verlegung sind so aufgebaut, dass sie bei ihrem Einsatz fest montiert oder so angeordnet werden müssen, dass sie sich nur unwesentlich bewegen können. Je nach Anforderung an die Beweglichkeit der Leitungen werden gleiche Leitungstypen mit unterschiedlichem Leiteraufbau hergestellt. Als Isolier- und Mantelmaterial überwiegt PVC. Erfordern die Einsatz- und Betriebsbedingungen eine erhöhte Beweglichkeit, wie z. B. bei einigen Aderleitungen, werden feindrähtige Leiter eingesetzt (Bild 23). Aderleitungen haben keinen Mantel, da sie geschützt in Rohren oder Schaltanlagen verlegt werden. Bei Stegleitungen für die feste Verlegung z. B. unter Putz (Bild 24) sind die Leiter massiv, die Adern unverseilt, parallel angeordnet und mit einem Mantel versehen. Bei mehradrigen Leitungen sind die Adern jedoch in der Regel verseilt, mit einer Füllmischung umhüllt und mit einem schützenden Mantel versehen, wie bei den in der Hausinstallation eingesetzten Mantelleitungen.

Erfolgt der Einsatz der Leitungen unter erhöhten mechanischen oder sicherheitstechnischen Anforderungen, wie z. B. in feuchten oder nassen Räumen, im Freien (jedoch nicht im Erdboden), sowie in feuer- oder explosionsgefährdeten Betriebsstätten, verwendet man erhöhte Wanddicken und/oder speziell ausgewählte Materialien (Pkt. 3.3) für Isolierhülle und Mantel.

Eine besondere Bedeutung haben auch in diesem Fall Leitungen mit verbessertem Verhalten im Brandfall. Die Palette reicht dabei von der schadstofffreien Mantelleitung (Bild 25), welche gegenüber der PVC- Mantelleitung bei gleichen Verwendungsbedingungen halogenfrei ist und sich im Brandfall durch geringere Rauchgasdichte auszeichnet, bis hin zu Produkten, welche einen Funktionserhalt im Brandfall bis zu 90 min gewährleisten.

In modernen Gebäudeinstallationen spielt neben der Übertragung der elektrischen Energie auch die Übertragung elektrischer Signale zwischen elektronischen Geräten, wie Alarmanlagen, Steuerung von Rollos usw. eine große Rolle. Ein dafür europaweit abgestimmtes System (EIB – Europäischer instabus) verlangt die parallele Verlegung von Datenleitungen mit der Elektroinstallation. Beides kann auch in einer EIB-Leitung vereint sein (Bild 26).

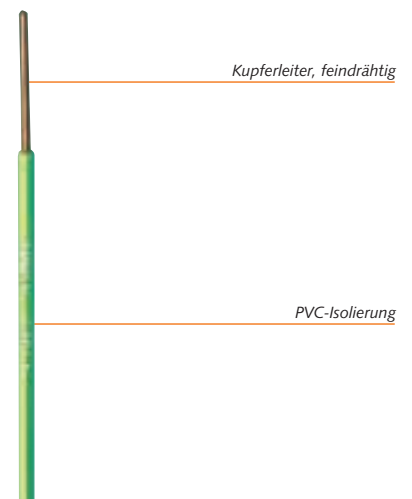


Bild 23: PVC-Aderleitung H07V-K

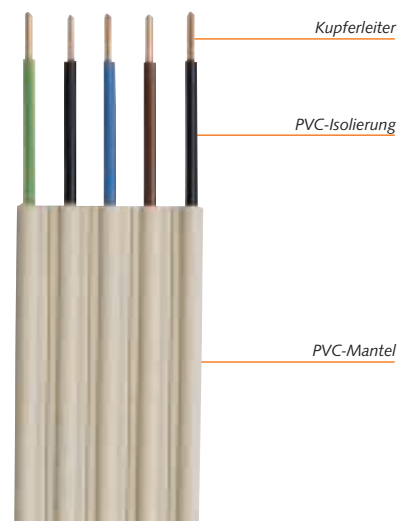


Bild 24: 1 PVC-Stegleitung



Bild 25: Schadstofffreie Mantelleitung

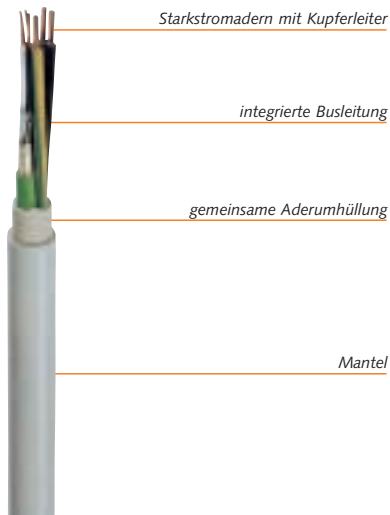


Bild 26: Leitung für Instabus

Kraftfahrzeugleitungen sind vorwiegend einadrig ohne Mantel. Es gibt sie aber auch mehradrig ohne oder mit Mantel und bei entsprechenden Anforderungen auch geschirmt. Immer höheren Übertragungsleistungen bei geringem Gewicht wird durch höhere zulässige Leitergrenztemperaturen Rechnung getragen. Als Isolierwerkstoff überwiegt zwar noch PVC, modifiziert für Temperaturen von 85°C bzw. 100°C. Für höhere Temperaturen werden jedoch spezielle Typen von PP, vernetztem VPE oder TPE bis hin zu Fluorkunststoffen für 175°C, in Sonderfällen bis 260°C, eingesetzt. Lichtwellenleiter haben sich wegen Sicherheitsproblemen in Fahrzeugen nur in geringem Umfang durchgesetzt. Im Brandfall werden im Gegensatz zu Cu-Leitern die optischen Fasern aus Kunststoff sofort zerstört.

Isolierte Heizleitungen mit einem Heizleiter aus einer Widerstandslegierung (z. B. CuNi2, CuNi6, CuNi23Mn) werden für ein breites Temperaturspektrum von 70 bis 220°C und damit mit unterschiedlichen Isolier- und Mantelwerkstoffen angeboten. Ihr Einsatz erfolgt z. B. in elektrischen Fußbodenheizungen.

Mineralisolierte Leitungen stellen eine besondere Produktlinie der Kabelindustrie dar. Ihr Einsatz konzentriert sich auf 2 wesentliche Einsatzgebiete:

- Leitungen im Einsatz bei besonders hoher thermischer und/oder mechanischer Beanspruchung sowie bei besonderen Forderungen zum Brandschutz
- Leitungen für den Einsatz als Heizleiter in Anlagen für hohe Temperaturen und bei geringem Einbauvolumen.

Charakteristisch ist die Verwendung von Magnesiumoxid (Schmelzpunkt ca. 2800°C) als elektrisch isolierende Schicht. Derartige Leitungen sind mechanisch äußerst robust, thermisch bis zum Schmelzpunkt des Leiters (Kupfer 1083°C) belastbar und können damit die höchsten Forderungen zum Brandschutz erfüllen. Sie stellen somit eine interessante, allerdings in Deutschland noch wenig genutzte Alternative zu den Leitungen mit Funktionserhalt bis 90 min dar [25].

3.4.2.2 Flexible Leitungen

Flexible Leitungen werden in der Regel zum Anschluss von ortsveränderlichen Geräten eingesetzt und haben mindestens einen feindräftigen Leiter. Bei erhöhten Anforderungen an die Beweglichkeit kommen feinstdräftige Leiter zum Einsatz. Die sich aus dem breiten Anwendungsbereich ergebenden unterschiedlichen Anforderungen an die Übertragungsleistung, die mechanische Festigkeit und chemische Beständigkeit machen ein großes Sortiment notwendig.

Beim Anschluss von Haushaltsgeräten in vorwiegend trockenen Räumen und bei geringen mechanischen Beanspruchungen reichen die leichten kunststoffisolierten Leitungen, wie Zwillingsleitungen (Bild 27) oder PVC-Schlauchleitungen (Bild 28) völlig aus.

Als Anschluss- und Verbindungsleitung für Steuerungen im Maschinen- und Anlagenbau werden PVC-Steuerleitungen eingesetzt. Sie sind nur bedingt für wiederkehrende Bewegung geeignet. In der Ausführung mit Schirmgeflecht werden sie zur Erfüllung der Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) verwendet (Bild 29).

Aufzugssteuerleitungen sind den Anforderungen an die Beweglichkeit beim Einsatz in Aufzügen und Förderanlagen angepasst. Durch ein Tragorgan z. B. aus Kunststoffgeflecht sind sie selbsttragend (Bild 30).

Für besonders kleine Biegeradien und sehr hohe Wechselbiegezyklen sind Schleppkettenleitungen (Leitungen für Energieketten) zum Anschluss von elektrischen Be-

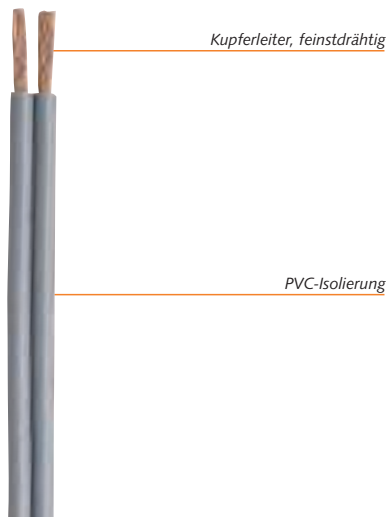


Bild 27: Zwillingsleitung

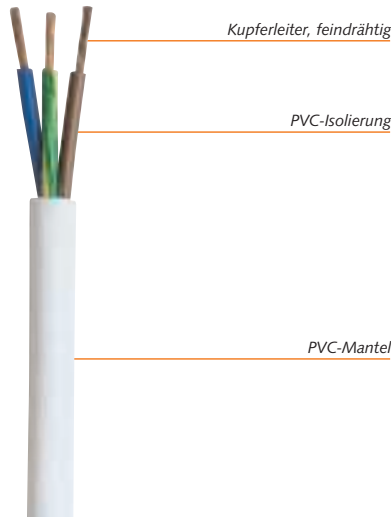


Bild 28: PVC-Schlauchleitung

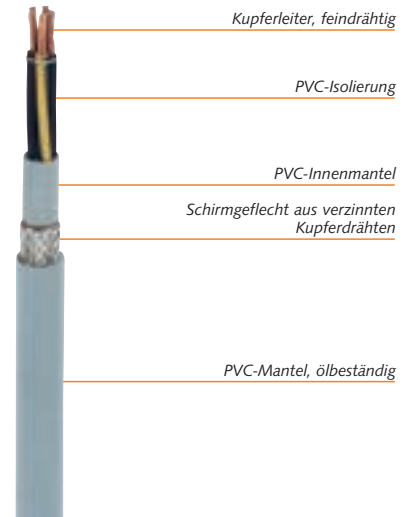


Bild 29: PVC-Steuerleitung geschirmt

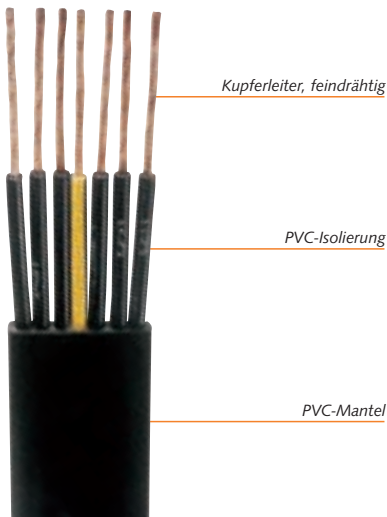


Bild 30: Aufzugssteuerleitung

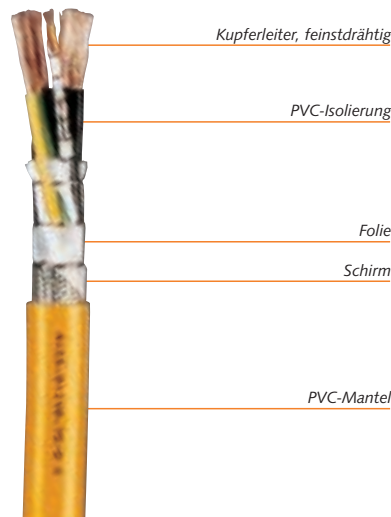


Bild 31: Schleppkettenleitung



Bild 32: Schweißleitung

triebsmitteln in der Automatisierungstechnik, in Fertigungsstraßen u. ä. ausgelegt. Neben einem feindrätigen Leiteraufbau wird insbesondere durch kurze Verseil-schlaglängen der Adern und gezielte Materialauswahl den hohen mechanischen Belastungen Rechnung getragen. In vielen Konstruktionen sind Energie- und Datenleitungen kombiniert (Bild 31).

Schweißleitungen erfüllen durch einen besonders feindrätigen Leiter und Gummimantel die Anforderungen an hohe Flexibilität (Bild 32).

Gummischlauchleitungen werden in leichter Ausführung ebenfalls zum Anschluss von Elektrogeräten im Haushalt eingesetzt. Überwiegend sind sie in verstärkter Ausführung jedoch im gewerblichen Bereich anzutreffen und für viele Einsatzfälle modifiziert. Bei Einsatz im Freien muss der UV-Strahlenbelastung bei der Materialauswahl Rechnung getragen werden. Eine einfache Möglichkeit ist die Schwarzfärbung mit Ruß. Temperaturbeständige Elastomere wie EVA bzw. Silikongummi sichern den Einsatz bei erhöhten Temperaturen.

Es gibt spezielle Ausführungen für den ständigen Einsatz im Wasser z. B. zum Anschluss von Tauchmotorpumpen. Die ständige Verwendbarkeit in Wasser wird durch spezielle Prüfungen nachgewiesen.

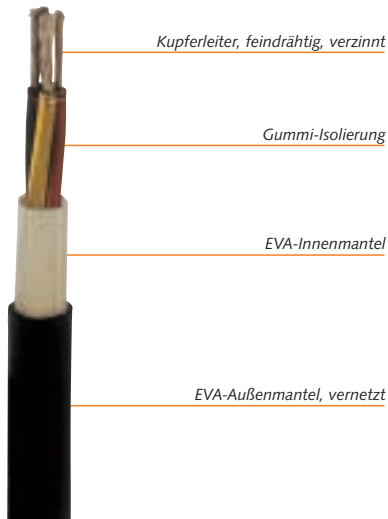


Bild 33: Gummischlauchleitung mit verbessertem Verhalten im Brandfall

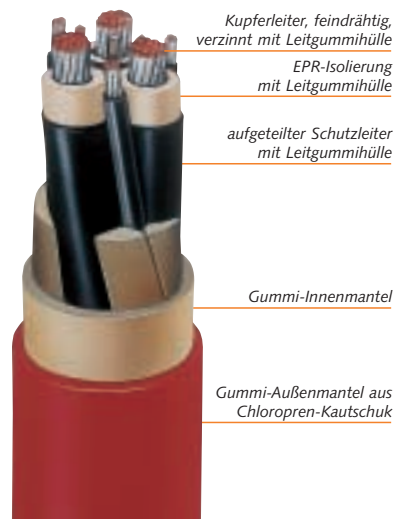


Bild 34: Leitungstrosse 3,6/6 kV

Halogenfreie Gummischlauchleitungen mit verbessertem Verhalten im Brandfall widerstehen auch den besonderen Belastungen durch energiereiche Strahlen im Containment von Kernkraftwerken (Bild 33). Ebenfalls der besonderen Strahlenbelastung angepasst sind die für die Spannungsversorgung von Röntgenröhren entwickelten Hochspannungs-Röntgenleitungen. Diese sind für hohe Gleichspannungen ausgelegt und enthalten gleichzeitig Adern, die den Heizstrom für die Glühkathode der Röntgenröhre führen.

Für extreme elektrische und mechanische Beanspruchung, wie sie beim Anschluss elektrischer Betriebsmittel im Tagebau, Bergbau unter Tage und Tunnelbau auftreten (die Leitung wird vom Gerät über die Gleise nachgeschleppt und im Betrieb ständig auf- und abgewickelt), werden Leitungstrossen eingesetzt (Trosse: sehr dickes Seil für hohe Zugbeanspruchung). Diese Gummileitungen sind durch besonders widerstandsfähige Gummiaußenmäntel wie Chloropren-Kautschuk, sowie teilweise Torsionsgeflechten oder Tragorganen, den hohen mechanischen Beanspruchungen angepasst. Bei Energiekabeln mit drei Strom führenden Adern ist der Schutzleiter in drei gleiche Leiter in den Außenwickeln aufgeteilt. Auch bei flexiblen Leitungen verwendet man bei Nennspannungen ab 6 kV leitfähige Mischungen zur Leiterglättung und Feldbegrenzung (Bild 34).

3.4.3

Elektrische Nachrichtenkabel und -leitungen

Für die Entwicklung der elektrischen Nachrichtenübertragung waren vor allem die Entwicklung des Telegrafenalphabetes durch Samuel Morse 1840 und der maschinellen Fertigung von Telegrafenkabel mit Guttapercha isolierten Kupferdrähten durch Werner von Siemens 1847 von besonderer Bedeutung. Auf Werner von Siemens gehen auch so wichtige Erfindungen wie die des Bleimantels 1877 als idealem Schutz der Kabelisolierung vor Feuchtigkeit und des Koaxialkabels 1882 zur Übertragung höherer Frequenzen zurück.

Ab etwa 1970 wurde ein neues Medium, der Lichtleiter, zur Nachrichtenübertragung eingeführt. Optische Nachrichtenkabel haben die Kabel mit Kupferleiter im Einsatz für größere Entfernungen weitgehend abgelöst. Der enorme Entwicklungssprung wird am Vergleich der Abbildungen eines LWL-Kabels (Bild 35) mit einem Trägerfrequenzkabel koaxialer Bauart (wie Bild 36) und einem konventionellen Fernmeldeortskabel (Bild 37) deutlich.

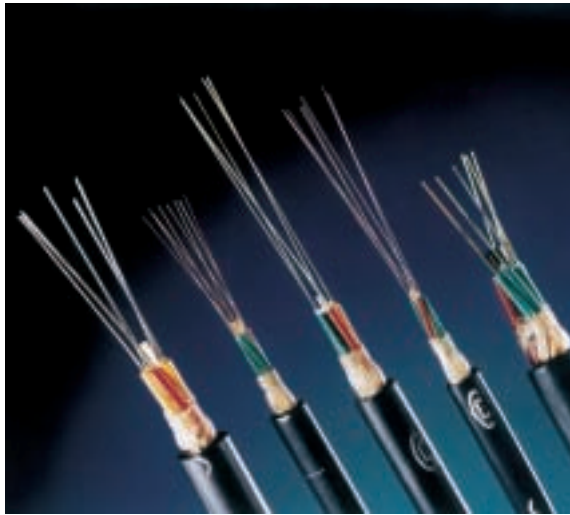


Bild 35: LWL-Aussenkabel



Bild 36: CATV-Außenkabel

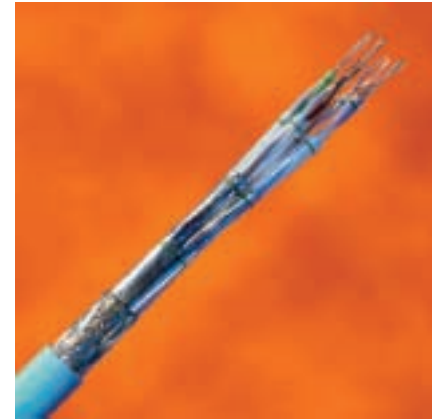


Bild 37: Fernsprechkabel mit Schichtenmantel

Aber auch die Kupferleiterkabel haben in den letzten Jahren enorme Fortschritte gemacht. Dies trifft insbesondere zu auf den Bereich der Datenkabel für lokale Kommunikationsnetze. In den elektrischen Nachrichtenkabeln und -leitungen erfolgt die Nachrichtenübertragung in einem durch Hin- und Rückleiter gebildeten geschlossenen Stromkreis mittels elektromagnetischer Energie. Strom oder Spannung werden dazu in der Amplitude, der Frequenz oder der Phase moduliert. Nutzbar ist derzeit ein Frequenzbereich bis etwa 100 GHz [26]. Die Leiterabmessung wird bei eindrähtigem Leiter abweichend von den Starkstromkabeln mit dem Leiterdurchmesser angegeben. Die Kupferdrähte sind je nach Anforderung zur Verhinderung chemischer Einflüsse auf die Isolierung oder zur Verbesserung der Kontaktierung verzinkt, versilbert oder gar vergoldet. Die Übertragungseigenschaften elektrischer Nachrichtenkabel und -leitungen werden durch eine Reihe elektrischer Kenngrößen wie Wellenwiderstand, Schleifenwiderstand, Kopplungen, Induktivitäten und Kapazitäten beschrieben und durch Materialauswahl, Konstruktion und Fertigungsqualität beeinflusst.

Durch die Fertigungsbedingungen wird entscheidender Einfluss auf die Symmetrie der Adern im Gesprächskreis und damit auf deren Übertragungseigenschaften genommen. Automatische Überwachung und Online-Regelung wichtiger Kenngrößen im Fertigungsprozess, wie Aderwanddicken, Schäumungsgrad der Isolierhülle aber auch der Parameter, die Einfluss auf die Drahtfestigkeit haben (siehe Wärmebehandlung der Kupferdrähte – Pkt. 2.2.2), sind daher Stand der Technik.

Für geringe Anforderungen reicht PVC als Isolierwerkstoff. Höhere Anforderungen erfordern die Verwendung verlustarmer Materialien (überwiegend PE) für die Isolierhülle, welche möglichst aus einem hohen Anteil von Luft bestehen sollte. Dies kann durch eine Hohlräumbildung durch Abstandhalter mit Folienisolierung oder durch Verzellung der Kunststoffe erreicht werden. Besteht die Isolierung aus verzelltem Material mit einer schützenden Hülle aus homogenem Material, spricht man von „Foam-skin“-Isolierung.

Für einfachste Übertragungsaufgaben, wie z. B. für Signal- und Messzwecke, ist eine lagenweise Verseilung der Adern üblich. Hier wird von unsymmetrischen Leitungen (Unbalanced Cables) gesprochen. Ihr Aufbau ist dem von Steuerkabeln und -leitungen sehr ähnlich. Sie unterscheiden sich jedoch durch die Anwendung kleinerer Querschnitte, die Übertragung höherer Frequenzen bzw. von Impulsen und sind nicht für den Einsatz in Starkstromanlagen zugelassen.

Wird der Stromkreis durch ein aus zwei miteinander verdrehten Adern, also einem Aderpaar gebildet, spricht man von symmetrischer Leitung (Balanced Cables). Die symmetrische Anordnung kann auch durch vier Adern (Vierer) gebildet werden. Beim Sternvierer liegen die Adern eines Gesprächskreises gegenüber. Die durch Fertigungstoleranzen bedingten Abweichungen in der Symmetrie (Leiterabmessung und Wanddicken sowie Lage zueinander) haben ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf die Übertragungseigenschaften.

Mehrere Paare oder Vierer werden miteinander zu Bündeln oder lagenweise verseilt. Durch Variation der Schlaglängen wird insbesondere Einfluss auf eine hohe Nebensprechdämpfung genommen.

Bei unsymmetrischen koaxialen Leitungen wird der Stromkreis durch einen runden Innenleiter und einen um eine Isolierung mit möglichst geringer Dielektrizitätskonstante (koaxial) gelegten Außenleiter gebildet. Ihr Einsatzgebiet ist die Übertragung hochfrequenter Signale. Wegen des hier auftretenden Skin-Effektes sind als Innenleiter neben solchen aus reinem Kupfer auch kupferplattierte Leiter mit einem Kern aus Aluminium oder Stahl im Einsatz. Als Abmessungen werden der Durchmesser des Innenleiters und der Innendurchmesser des konzentrischen Außenleiters angegeben.

Für Nachrichtenkabel und -leitungen spielt die Schirmung gegen elektromagnetische Beeinflussung eine große Rolle. Zu beachten sind niederfrequente (NF) Einflüsse vor allem von benachbarten Starkstromanlagen sowie die hochfrequenten (HF) Einflüsse. Im Zusammenhang damit spricht man von „Elektromagnetischer Verträglichkeit“ (EMV). Die Elektromagnetische Verträglichkeit ist die Fähigkeit einer elektrischen oder elektronischen Einrichtung, in ihrer elektromagnetischen Umgebung bestimmungsgemäß zu funktionieren und diese Umgebung nicht unzulässig zu beeinflussen. Üblich sind vor allem Schirme aus Kupferdrahtgeflecht oder/und aus kunststoffbeschichteten Metallfolien oder -bändern.

Als Mantelwerkstoffe dominieren im Außenbereich PE, im Innenbereich entweder PVC wegen der gegenüber PE geringeren Brandlast, oder halogenfreie, flammwidrige Compounds.

3.4.3.1 Nachrichtenkabel

Nachrichtenkabel lassen sich zum einen einteilen nach den Legebedingungen in Außenkabel, wie Erdkabel, Röhrenkabel, Luftpaket, Seekabel oder Innenkabel. Ein weiteres und wesentliches Einteilungskriterium ist ihr Aufbau aus symmetrischen Verseilelementen (Paare oder Vierer) oder ihr koaxialer Aufbau.

Fernsprechkabel werden vor allem in den Ortsnetzen der Telekommunikationsgesellschaften eingesetzt. Großen Einfluss auf die Qualität der Fernsprechkabel in Deutschland hatte in Zusammenarbeit mit der deutschen Kabelindustrie das ehemalige Forschungs- und Technologiezentrum der Deutschen Post (FTZ). Ortsfernsprechkabel verbinden die Teilnehmer mit der nächstgelegenen Endvermittlungsstelle. Da von der Vermittlungsstelle zu jedem Teilnehmer eine symmetrische Doppelader zu schalten ist, benötigt man Kabel mit einer sehr hohen Aderzahl (bis zu 1000 Leiter und mehr). Üblich sind sternvierer-verseilte Kabel mit Voll- oder Zell-PE-isolierten Adern. Die früher übliche Papierhohlraumisolierung spielt heute keine Rolle mehr. Als Kabelmantel wird bevorzugt ein PE-Schichtenmantel eingesetzt. Dieser besteht aus einem geschlossenen um die Kabelseele gelegten Aluminiumband und dem damit verklebten PE-Mantel (Bild 38). Als zusätzlicher Feuchteschutz sind Petrolatfüllungen üblich.

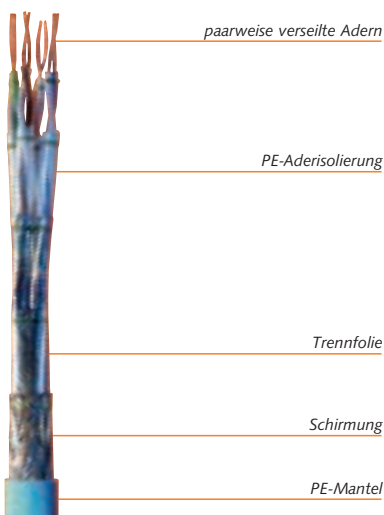


Bild 38: Fernsprechkabel mit Schichtenmantel

	mit symmetrischen Aufbauelementen	mit koaxialen Aufbauelementen
Außenkabel	Fernsprechkabel im Teilnehmeranschluss und im Ortsverkehrsnetz Sonderkabel z. B. für Kommunikationsnetze von Bahnen, auf Schiffen und im Bergbau, Signalkabel, Netzschutzkabel	CATV-Kabel in Breitbandnetzen Antennenkabel für HF-Funksysteme
Innenkabel	Datenkabel zur Gebäudeverkabelung Fernsprechkabel für lokale Telekommunikationsanlagen	Antennen-, Breitband- und Satellitenkabel für den privaten Hausbereich Messkabel für alle HF-Bereiche

Tabelle 6: Die wichtigsten Nachrichtenkabel und ihre Anwendung eingeteilt nach Aufbau und Einsatzort

Ortsnetzfernsprechkabel wurden früher nur im Sprachfrequenzband von 0,3 bis 3,4 kHz eingesetzt, heute jedoch auch für das ISDN-Netz zur digitalen Datenübertragung von bis zu 2048 kbit/s. Für Fernverbindungen bis hin zum Anschluss von Großverbrauchern wurde das Fernsprechkabel mit Kupferleiter weitgehend vom Lichtwellenleiterkabel verdrängt. Im Teilnehmeranschlussbereich wird das Kupferkabel auch in Zukunft seine dominierende Rolle behalten. Hierfür spricht die wesentlich einfachere Montagetechnologie und die Möglichkeit, durch neue Übertragungstechnologien wie ADSL und HDSL oder gar in Verbindung mit Lichtwellenleiterkabeln bis zum Kabelverzweiger bei VDSL das Kupferkabelnetz breitbandig von 1,6 bis zu > 10 Mbit/s auszubauen. [26]

Streckenfernmeldekanäle sind durch die Legung parallel zur Bahnstrecke starken elektromagnetischen Einflüssen ausgesetzt und müssen daher gut geschirmt sein. Dies erfolgt traditionell durch einen Aluminiummantel und eine Stahlbandbewehrung. Aktuellere Konstruktionen enthalten einen Cu-Drahtschirm und Schichtenmantel.

Eisenbahn-Signalkabel sind PE-isoliert und für Betriebsspannungen bis 600 V ausgelegt. Die Adern sind einzeln oder als Vierer in Lagen verseilt. Die Übertragung hoher Leistungen erfordert Leiterdurchmesser im Bereich von 0,9 bis 1,8 mm. Der starken elektromagnetischen Beeinflussung an Bahnanlagen wird durch gute Schirmung aus Kupfer mit Stahlbandbewehrung Rechnung getragen.

Datenkabel finden wir überwiegend in lokalen Netzen der Datenverarbeitung in Büros aber auch in der Industrieranwendung und im privaten Bereich. Die Verkabelung erfolgt sternförmig oder ringförmig in Bussystemen, wie z. B. Ethernet und Profibus. Verkabelungen in Bürogebäuden müssen den heutigen und zukünftigen Anforderungen der Datenverarbeitung und Telekommunikation auch bei Änderung der Raumnutzung angepasst sein. Durchgesetzt hat sich dafür eine international standardisierte (ISO/IEC 11801 bzw. DIN EN 50173) strukturierte anwendungsneutrale Gebäudeverkabelung. Lichtwellenleiterkabel dominieren in der Verbindung von Gebäuden und Etagen (Primär- und Sekundärbereich). Symmetrische Kupferkabel werden bevorzugt in der Verbindung vom Etagenverteiler zu den Anschlüssen (Terziärbereich) eingesetzt. Die Verkabelungsstrecken sind in die Klassen A bis D (E in Vorbereitung) eingeteilt:

- Klasse A für analoge Sprache und Daten bis 100 kHz
- Klasse B für das digitale Telefonnetz bis 1 MHz
- Klasse C für einfache digitale Datendienste bis 16 MHz
- Klasse D(E) für Hoch-(und Höchst-)leistungsdatendienste bis 100 MHz (600 MHz)

Die Datenkabel werden in dazu abgestimmte Kategorien eingeteilt. Definiert sind nicht ihr Aufbau, sondern übertragungstechnische Kenndaten. Für die gemeinsame Anwendung im Bereich der Tele- und Datenkommunikation sind die Kategorien 3

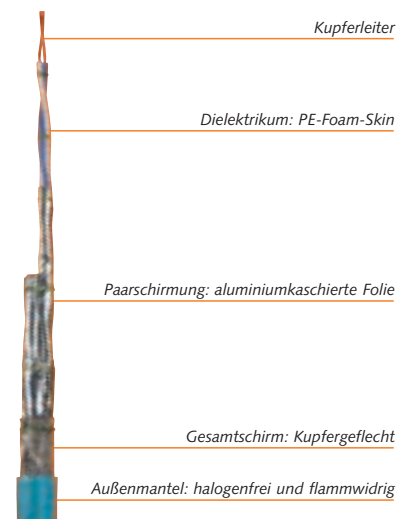


Bild 39: Datenkabel S-STP (PIMF) Kategorie 7

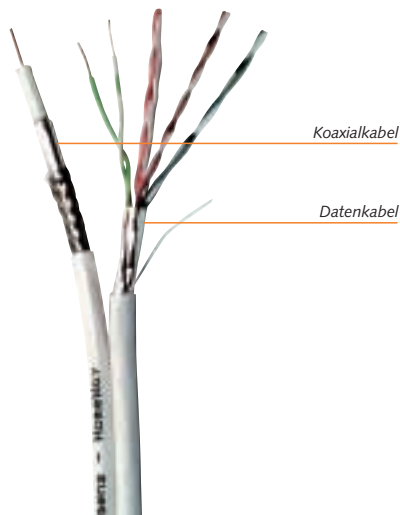


Bild 40: Hybridkabel

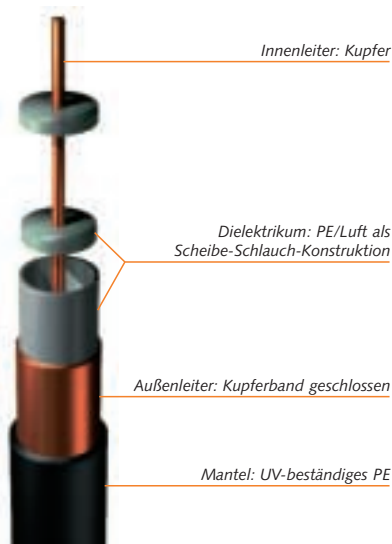


Bild 41: CATV-Außenkabel

(bis 16 MHz, z. B. für Ethernet-Anwendung bis 10 Mbit/s) und 5 (bis 100 MHz für alle derzeitigen LAN-Übertragungssysteme) am interessantesten. Den Markt erobern jedoch bereits Datenkabel der Kategorie 6 (bis 250 MHz) und Kategorie 7 (bis 600 MHz) sowie darüber hinaus bis 1200 MHz.

Der Aufbau der Kabel folgt entweder den Systemspezifikationen (z. B. IBM-Standard) oder wird entsprechend der Systemanforderungen gewählt. Üblich sind dabei oft die Verwendung von in Amerika gebräuchlichen Bezeichnungen.

Einfachste Datenkabel sind paarig verseilt und ungeschirmt (UTP cable – Unshielded Twisted Pair). Zusätzlich ist ein gemeinsamer Schirm möglich (S/UTP cable – Shielded Twisted Pair). Die leistungsfähigsten Datenkabel derzeit haben mit Metallfolie geschirmte Paare (PiMF) und eine gemeinsame Abschirmung aus Kupfergeflecht (S/STP cable – Screened Shielded Twisted Pair) (Bild 39).

Für private Haushalte wird für zukünftige Verkabelungen ein hybrides Kabelnetz bestehend aus SAT-fähigem Koaxialkabel und symmetrischem Datenkabel in allen Räumen empfohlen, um den Anforderungen von Unterhaltung, Kommunikation, Rechnernetz und Haustechnik gerecht zu werden [26] (Bild 40).

CATV-Kabel (Cable Television oder Common Antenna TV) dienen vor allem der Fernsehverteilung, können aber auch für alle anderen Multimediaanwendungen eingesetzt werden. Übertragbar sind sowohl analoge als auch digitale Signale mit einer Bandbreite bis ca. 1 GHz. Als Koaxialkabel haben sie einen Innenleiter aus Kupferdraht, überwiegend eine Hohlraumisolierung gebildet durch Abstandhalter aus PE-Scheiben in Verbindung mit einem aus Cu-Band geformten geschlossenen Außenleiter und einem schwarzen PE-Mantel (Bild 41). Die Abmessungen werden bestimmt von dem zu übertragenden Frequenzband und der Entfernung. Für größere Entfernungen werden auch in diesen Breitbandkabelnetzen Kabel mit Lichtwellenleiter eingesetzt, da damit weniger Zwischenverstärker erforderlich sind. Solche hybride Faser-Koax-Netze werden deshalb als HFC (Hybrid-Fiber-Coax)-Netze bezeichnet.

Im Teilnehmeranschlussbereich werden die Netze ergänzt mit Koaxialkabeln kleinerer Abmessungen. Über der Isolierung, überwiegend aus PE, befindet sich wegen der besseren Biegebarkeit ein Schirm aus Kupferdrahtgeflecht, der bei höherwertigen Produkten mit einer Folie oder Kupferband ergänzt sein kann (Bild 38).

3.4.3.2 Nachrichtenleitungen

Nachrichtenleitungen dienen der Informationsübertragung in und an elektronischen Geräten und Anlagen. Sie finden in fast allen Bereichen der Wirtschaft und Technik Verwendung. So sind sie z. B. zu finden in Fernmeldeämtern und in der Hausinstallation des Telefonnetzes, in Datenverarbeitungsanlagen, in Anlagen der Rundfunk-, Fernseh- und Phonindustrie, in medizinischen und wissenschaftlichen Geräten sowie elektronisch gesteuerten Anlagen. Die Produktpalette ist dementsprechend sehr umfangreich.

In Abhängigkeit von den Lege- und Betriebsbedingungen werden unterschiedliche Leiterformen eingesetzt:

- eindrängige und mehrdrängige Leiter für Leitungen, die fest verlegt werden
- Litzenleiter für Leitungen, die einer Biegebeanspruchung beim Gebrauch unterworfen sind
- Lahnitzenleiter für Leitungen, die extrem hohen Biegebeanspruchungen unterworfen sind, wie z. B. Apparateleitungen am Telefon.

Die Auswahl der Isolier- und Mantelwerkstoffe wird entscheidend von den Umgebungs- und Betriebsbedingungen bestimmt, so dass neben PVC und PE z. B. auch Fluorkunststoffe, Silikon oder FRNC-Compounds sowie PUR zum Einsatz kommen.

Schaltdrähte und Schallitzen werden zur Verdrahtung von Baugruppen, Geräten und Anlagen in der Elektronik, Elektrotechnik, Informationsverarbeitung und Fernmeldetechnik eingesetzt und bestehen aus Leiter und Isolierhülle, gegebenenfalls ergänzt mit Schirm und/oder Mantel.

Flachleitungen, auch Bandleitungen genannt, dienen als Vielfachverbindungen in Geräten der Büro- und Industrieelektronik. Sie enthalten bis zu 40 Adern, welche, parallel nebeneinander liegend, miteinander durch Verschweißen der Isolierhülle aus PVC verbunden sind. Ihre Konstruktion ermöglicht ein Abtrennen beliebig vieler Einzeladern vom Leitungsband, ohne die Isolierhülle zu beschädigen.

Schnüre mit Drahtlitz- oder Lahnitzenleiter werden zum Anschließen ortsveränderlicher Fernmeldegeräte (z. B. Tischfernsprecher) oder bewegten Baugruppen in Anlagen für Kommunikationsverarbeitung verwendet.

Steuerleitungen, hier nicht zu verwechseln mit den im Aufbau ähnlichen Steuerleitungen für Starkstrom, dienen der Signal- und Messwertübertragung in der Steuerungs- und Regelungstechnik der Leistungselektronik, der Messtechnik sowie der Rechner- und Peripheriegerätetechnik. Die Adern sind in den Standardausführungen PVC-isoliert und lagenverseilt. Angeboten werden geschirmte und ungeschirmte Ausführungen.

Datenleitungen als Geräteverbindung für internen und externen Informationsaustausch mit hoher Geschwindigkeit sind in ihrer Konstruktion den jeweiligen Anforderungen hinsichtlich Übertragungsleistung und Einsatzbedingungen angepasst. In diesem Bereich sind daher auch viele Sonderbauarten zu finden. Datenleitungen für Schleppketteneinsatz z. B. sind für den Einsatz in teilweise mit hoher Geschwindigkeit bewegten Maschinenteilen geeignet. Durch feinstdrähtige Litzleiter, kurze Verseilschlaglängen und Bandagierung wird diesen Anforderungen Rechnung getragen. Koaxiale HF-Leitungen sind durch die verbesserten Übertragungseigenschaften symmetrischer Datenleitungen weitgehend vom Markt verdrängt. Ihr Einsatz konzentriert sich fast ausschließlich auf den Fernseh/Videobereich oder Sonderanwendungen der Mess- und Gerätetechnik (Bild 42).

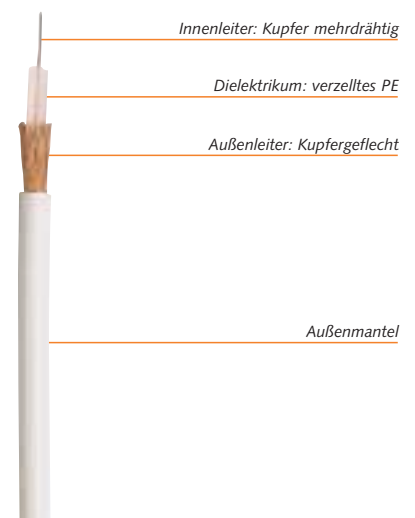


Bild 42: koaxiale HF-Leitung mit Doppelader

3.4.4 Wickeldrähte

Wickeldrähte sind konstruktiv die einfachste Form der elektrisch isolierten Leiter. Da es keinen universell einsetzbaren Wickeldrahttyp gibt, der alle Forderungen der Elektrotechnik erfüllt, kommen die verschiedensten Ausführungsformen zum Einsatz. Die hauptsächlichen Einsatzgebiete sind Wicklungen in Elektromaschinen und Elektrogeräten.

Wichtige Eigenschaften der Wickeldrähte sind unter anderem die elektrische Durchschlagspannung, Biegsamkeit, Dehnbarkeit, Abriebfestigkeit und Tränklackverträglichkeit. Eine der wichtigsten ist ihre thermische Beständigkeit, die durch die Wärmebeständigkeitsklasse ausgedrückt wird. Jeder Wärmebeständigkeitsklasse ist eine höchstzulässige Dauergebrauchstemperatur zugeordnet, bei der ein Isolierstoff die geforderte Lebensdauer von mindestens 25.000 Betriebsstunden garantiert. Die Dicke der Isolierhülle der Wickeldrähte beeinflusst unmittelbar den Ausnutzungsgrad des Wickelraumes der elektrischen Maschine und damit ihre Leistung je Gewichtseinheit.

Wickeldrähte kann man in ihrem Aufbau unterscheiden:

- lackisierte Wickeldrähte
- umspinnene Wickeldrähte
- kunststoffisolierte Wickeldrähte
- Hochfrequenzlitzen
- Drillleiter (transponierte Leiter)

Lackisierte Wickeldrähte haben den Vorteil einer sehr geringen Isolierhülle gegenüber anderen Wickeldrahttypen. Sie können als Rund- und Flachdrähte (Profildrähte) hergestellt sein. Es gibt verzinnbare Lackdrähte, bei denen der Draht ohne vorheriges Abisolieren verzinnbar ist. Bei den so genannten Backlackdrähten besteht die Isolierung aus zwei verschiedenen Lacken. Die am Leiter liegende Lack-schicht ist die eigentliche Isolierhülle, die darüber liegende Schicht ist thermoplas-tisch, so dass die einzelnen Windungen der gewickelten Spule bei thermischer Behandlung miteinander verbacken können, was die zusätzliche Tränklackung der Spule erübrigt.

Gegenstand der Entwicklung der letzten Jahre war vor allem die Erhöhung der Dauergebrauchstemperatur auf über 200°C. So sind in DIN EN 60317 Wickel-drähte mit Lackisolierung wie z. B. aus Polyurethan – Klasse 130; Polyester – Klas-se 155, Polyesterimid – Klasse 180, Polyamidimid – Klasse 200 auch Polyimid für die Klasse 220 enthalten. Der aus dem Herstellungsprozess resultierende viel-schichtige Aufbau ist die Gewähr für eine hochfeste Isolierhülle. Zur Verbesserung der Eigenschaften ist auch die Kombination von 2 Isolierlacken üblich.

Umspinnene Wickeldrähte sind blanke oder Lackdrähte mit ein- oder mehrlagiger Umspinnung. Sie werden entsprechend den verwendeten Isolierstoffen in vier Gruppen untergliedert:

- papierisolierte Wickeldrähte
- folienisolierte Wickeldrähte
- faserstoffisolierte Wickeldrähte
- Wickeldrähte mit kombinierter Umspinnung

Kunststoffisolierte Wickeldrähte sind massive oder litzenförmige Kupferleiter mit einer nahtlosen Thermoplastumhüllung. Durch die nahtlose Umhüllung und die geringe Wasseraufnahmefähigkeit der Umhüllung werden hohe elektrische Span-nungsfestigkeiten erzielt. Diese Art der Drähte wird z. B. für Unterwassermotoren eingesetzt.

Hochfrequenzlitzen bestehen aus verlitzen Kupferlackdrähten, die mit einer ge-meinsamen Faserstoffumspinnung oder -umflechtung versehen sein können. Cha-rakteristisch für eine Hochfrequenzlitze sind die einzelnen lackierten Drähte. Durch die Unterteilung des Leiterquerschnittes in mehrere kleine wird praktisch eine Ver-größerung der Oberfläche erzielt. Da hochfrequente Ströme an der Leiteroberflä-che fließen, bieten Hochfrequenzlitzen eine relativ große Oberfläche bei geringem Außendurchmesser an.

Drillleiter (Bild 43) ist ein Leiterbündel aus lackisierten Flachdrähten, deren Lage in regelmäßigen Abständen gewechselt wird und die eine gemeinsame Papier-außenumspinnung haben. Die Flachdrähte sind in zwei Teilstapeln angeordnet und ergeben zusammen einen näherungsweise rechteckigen Querschnitt. Die Unter-teilung des Leiters in mehrere voneinander isolierte Teileiter vermindert die elek-trischen Verluste. Drillleiter werden z. B. in Öltransformatoren mit hoher Leistung eingesetzt. Sie gestalten den Transformatorenbau rationeller (geringerer Wickelauf-wand) und gestatten hohe Energieeinsparungen durch Verminderung von Wirbel-strom-Verlusten.

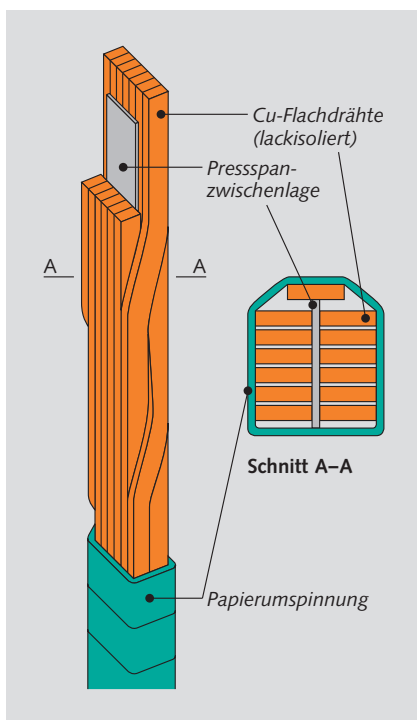


Bild 43: Aufbau eines Drillleiters (Röbeldraht)

Nationale, europäische und internationale Normung

Für die Erzeugnisse der Elektrotechnik und deren Verwendung gelten in Deutschland die DIN VDE-Bestimmungen als anerkannte Regeln der Technik. Für Kabel und Leitungen betrifft es Bestimmungen, die Produkte beschreiben, die die einzusetzenden Materialien definieren, die Prüfverfahren festlegen und die Anwendungsbedingungen kennzeichnen. Damit wird der Stand der Technik umfassend dokumentiert. Ein strukturiertes Gremiensystem, in dem Hersteller und Anwender zusammenarbeiten, sichert ein hohes technisches Niveau ab. Die VDE-Prüfstelle als unabhängige, neutrale Institution approbiert und überprüft die nach diesen Bestimmungen hergestellten Produkte und erteilt die Genehmigung, die Erzeugnisse mit dem VDE- Zeichen (< VDE >) zu kennzeichnen. Neben diesen VDE-Bestimmungen gibt es Hersteller- und Anwenderspezifikationen, z. B. des Militärs, der Bahnen usw.

Nationale Normen stellen Handelshemmnisse dar und sollen nach dem Willen von Wirtschaft und Politik für den europäischen Wirtschaftsraum bevorzugt durch europäische und internationale Normen abgelöst werden. In Europa wurde das Harmonisierungsabkommen geschlossen, das einheitliche technische Bedingungen u. a. für Kabel und Leitungen zum Ziel hat und die Basis ist für die gegenseitige Anerkennung von Prüfergebnissen der europäischen, diesem Abkommen beigetretenen Prüfinstitute. Das zuständige europäische Normenkomitee CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique) hat sich darüber hinaus verpflichtet, sich so weit wie möglich auf internationale Normen z. B. IEC (International Electrotechnical Commission) abzustützen. Durch CENELEC werden Harmonisierungsdokumente (HD) und Europäische Normen (EN) erarbeitet.

Technisch einheitliche Forderungen gelten so z. B. für Leiter für Kabel und isolierte Leitungen durch Übereinstimmung der nationalen Norm DIN VDE 0295 mit dem europäischen Harmonisierungsdokument HD 383 und der internationalen Norm IEC 60228. Prüfungen für Isolierwerkstoffe für Kabel und Leitungen sind in der DIN EN 60811 genormt, welche eine Übersetzung von IEC 60811 ist. Für Starkstromleitungen liegen die harmonisierten Normen DIN VDE 0281 „PVC-isolierte Leitungen mit Nennspannung bis 450/750 V“ sowie DIN VDE 0282 „Gummiisolierte Leitungen mit Nennspannung bis 450/750 V“ vor. Die Bauartenkurzzeichen der darin beschriebenen Produkte beginnen mit einem „H“ für „harmonisiert“ und sind in allen Mitgliedsländern von CENELEC zugelassen. Enthalten sind auch anerkannte nationale Bauarten (Buchstabe „A“ statt „H“), die nur im jeweiligen Land zugelassen sind.

Leitungen, die harmonisiert sind, tragen neben dem VDE-Zeichen das Harmonisierungszeichen < HAR > oder enthalten einen Kennfaden in den Farben der Nationalität der zuständigen Prüfbehörde, z. B. schwarz-rot-gelb. Noch nicht harmonisiert sind z. B. die in DIN VDE 0250 „Isolierte Starkstromleitungen“ verbliebenen Produkte. Ihr Buchstabenkurzzeichen beginnt mit einem „N“ als Zeichen für „Nationale Norm“. Die Anwendung der nur in nationalen Normen beschriebenen Produkte im Ausland ist möglich, wenn die Vorschriften im Einsatzland eingehalten sind. Gegebenenfalls ist dies durch eine Approbation nachzuweisen.

Der Aufbau von Starkstromkabeln ist nur für wenige Produkte harmonisiert, da die Verteilungsnetze in Europa sehr unterschiedlich aufgebaut sind. Eine ausreichende Transparenz der Normen zur Vergleichbarkeit wurde durch Zusammenfassung nationaler Bauarten in einheitlicher Form (Compendiumlösung) erreicht. So sind die harmonisierten Starkstromkabel in DIN VDE 0276 enthalten. Das zugrunde liegende Harmonisierungsdokument ist der VDE-Nummer nachgestellt (z. B. DIN VDE 0276-603).

Die Harmonisierung ist aber nur dann erfolgreich, wenn bei Gewährleistung des erforderlichen Sicherheitsniveaus sowie einer ausreichenden Lebensdauer der Erzeugnisse in allen Ländern die gleichen Erzeugnisse verwendet werden können. Bei Kabeln und Leitungen ist es im Gegensatz zu den meisten Geräten nicht möglich, durch Kurzzeitprüfungen am fertigen Erzeugnis alle erforderlichen Eigenschaften zu kontrollieren. Daher sind nicht nur aus Gründen der Austauschbarkeit, sondern auch mit Rücksicht auf Betriebssicherheit und Gebrauchsfähigkeit außer Prüfbestimmungen auch Aufbauvorschriften und Angaben für die zulässigen Werkstoffe erforderlich. Diskutiert wird heute die Frage, ob es nicht sinnvoller ist, Anforderungsprofile zu normen (Performance Standards), anstatt genau die Produkte zu beschreiben (Descriptive Standards), die diese Anforderungen erfüllen. Als Anwendungsbeispiel dieses Prinzips wäre die 1995 für den Bereich der Datenkabel verabschiedete DIN EN 50173 „Informationstechnik: Anwendungsneutrale Verkabelungssysteme...“ mit den Definitionen der Komponentenkategorien und Verkabelungsklassen bis 100 MHz zu nennen.

Voraussetzung für das Inverkehrbringen von Produkten innerhalb der EU ist dessen Übereinstimmung mit allen zutreffenden EU-Richtlinien. Die Bestätigung der Konformität mit den zutreffenden EU-Richtlinien ist durch eine Konformitätserklärung und die CE-Kennzeichnung deutlich zu machen. Für Kabel und Leitungen erfolgt in Deutschland die CE-Kennzeichnung nur auf der Verpackung oder dem Etikett bzw. den Lieferpapieren. Im Gegensatz zum VDE-Zeichen ist das CE-Zeichen für Produkte nach der Niederspannungsrichtlinie kein Zeichen für geprüfte Qualität.

5 Kennzeichnung

Aufbauelement	Kabel mit Kunststoffisolierung
Normtyp	N
Leiter ● Kupfer ● Aluminium	kein Zeichen A
Isolierung ● PVC ● vernetztes PE ● vernetztes halogenfreies Polymer	Y 2X HX
konzentrische Leiter aus Kupfer	C/CW (wellenförmig)
Schirm aus Kupfer	S/SE (Einzelader-)
Metallmantel ● Blei ● Aluminium	K KL/KLD (gewellt)
Schirm längswasserdicht	(F)
Bewehrung ● Stahlband ● Stahlflachdraht ● Stahlrunddraht ● Stahlbandgegenwendel	B F R GB
Schutzhüllen/Mäntel ● PVC ● PE ● Al-Band-/PE-Schichtenmantel ● halogenfreies Polymer	Y 2Y (F)2Y H/HX (vernetzt)
Kabel mit $U_0/U = 0,6/1$ kV ohne konzentrischen Leiter ● mit grün-gelber Ader ● ohne grün-gelbe Ader	-J -O

Tabelle 7: Kurzzeichen für Starkstromkabel (Auswahl)

Kabel und Leitungen werden durch Buchstabenkurzzeichen benannt. Das vorangestellte Bauarten-Kurzzeichen beginnt bei Starkstromkabeln und -leitungen mit einem Hinweis auf die Normung z. B. N für „Typ nach deutscher Norm“ und weiteren Buchstabenkurzzeichen für die Aufbauelemente des Kabels von innen (Leiter) nach außen. Dabei entfällt für Kupfer als dem klassischen Material für Leiter die gesonderte Kennzeichnung. Untergeordnete Aufbauelemente, wie gemeinsame Aderumhüllungen oder Trennfolien, werden ebenfalls nicht benannt.

Diesem Kurzzeichen sind weitere Angaben, wie z. B. Anzahl der Adern oder Aderpaare, Nennquerschnitt oder Leiterdurchmesser, Leiterform, Nennspannung u.a.m. hinzugefügt.

Starkstromkabel werden entsprechend DIN VDE 0298 durch folgende Angaben bezeichnet:

- Bauarten-Kurzzeichen, z. B. NYCWY für PVC-isoliertes und PVC-ummanteltes Starkstromkabel mit wellenförmigem konzentrischen Leiter
- Aderzahl/Nennquerschnitt in mm^2 , z. B. 4 x 35
- Kurzzeichen für Leiterform z. B. SM
- ggf. Nennquerschnitt des Schirms oder konzentrischen Leiters z. B. 16

- Nennspannung U0/U in kV, z. B. 0,6/1 kV
- U0- Effektivwert der Spannung zwischen Außenleiter und Erde
- U Effektivwert der Spannung zwischen zwei Außenleitern

Beispiel: NYCWY 4 x 35 SM/16 0,6/1 kV

Die wichtigsten Bezeichnungen sind in der Tabelle 7 dargestellt.

Bei der Kennzeichnung von Starkstromleitungen sind Leitungen nach nationaler Norm und harmonisierte Leitungen zu unterscheiden. Leitungen gemäß nationaler Norm DIN VDE 0250 werden ähnlich wie Starkstromkabel gemäß nationaler Norm bezeichnet nach:

- Bauartenkurzzeichen, z. B. NHMH für halogenfreie Mantelleitung mit verbessertem Verhalten im Brandfall (Die Zusammensetzung des Bauartenkurzzeichens richtet sich wiederum nach dem Aufbau von innen nach außen, wobei das Kurzzeichen für den Leitungstyp in der Regel nach dem Kurzzeichen für die Isolierhülle steht.)
- Aderzahl x Nennquerschnitt in mm² z. B. 3 x 1,5, gegebenenfalls mit Ergänzungen für zusätzliche Aufbauelemente
- Schutzleiterkennzeichnung bei Leitungen bis 1 kV, z. B. -J
- Nennspannung ab 1 kV in kV

Beispiel: NHMH-J 3 x 1,5

In Tabelle 8 ist eine Auswahl an Kurzzeichen zusammengestellt.

Harmonisierte Leitungen werden in Deutschland nach folgenden Normen produziert:

- DIN VDE 0281 für PVC-isolierte Starkstromleitungen bis 450/750 V
- DIN VDE 0282 für gummiisolierte Starkstromleitungen bis 450/750 V

Harmonisierte Leitungen werden in allen Mitgliedsländern von CENELEC einheitlich gekennzeichnet. Das Typenkurzzeichen, das aus drei Abschnitten zusammengesetzt ist, enthält im ersten Teil die Harmonisierungsart und die Spannung

- H- für eine voll harmonisierte Leitung
- A- für einen anerkannten nationalen Typ (u. a. auch bei Erweiterung von Aderzahl oder Leiterquerschnitt)

Der zweite Teil nennt die Aufbauelemente, und im dritten Teil werden Leiterzahl und Querschnitt hinzugefügt, sowie die Angabe, ob eine grün-gelbe Ader vorhanden ist oder nicht. Die Zusammensetzung des gesamten Kennzeichens und die erforderlichen Erläuterungen sind aus Tabelle 9 ersichtlich.

Die Aderkennzeichnung erfolgt für Starkstromkabel und -leitungen einheitlich mit Farben und bei mehr als 5

Normtyp	N
Leitungstyp <ul style="list-style-type: none"> • Aderleitung • Mantelleitung • Gummischlauchleitung • Bleimantelleitung • Flachleitung • Rohrdraht • Steuerleitung • Leuchtröhrenleitung • Pendelschnur • Leitungstrosse 	A M H B F R S L P T
Material für Isolierhüllen und Mäntel <ul style="list-style-type: none"> • Gummi • Silikongummi • PVC • halogenfreies Polymer • vernetztes halogenfreies Polymer • Ethylen-Tetrafluorethylen 	G 2G Y H HX 7Y
Abschirmung	C
Kennzeichnung besonderer Eigenschaften <ul style="list-style-type: none"> • schwere Ausführung • leichte Ausführung • witterungsbeständig • ölbeständig • flammwidrig • kaltebeständig 	S L W ö/Ö u/U K
Leitung mit grün-gelb gekennzeichnete Ader	-J
Leitung ohne grün-gelb gekennzeichnete Ader	-O

Tabelle 8: Kurzzeichen für Leitungen nach nationaler Norm DIN VDE 0250 (Auswahl)

Kriterium	Kennzeichen	Position im Kurztypenzeichen								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Kennzeichnung der Bestimmung <ul style="list-style-type: none"> • harmonisierte Bestimmung • anerkannter nationaler Typ 	H A	•								
Nennspannung U <ul style="list-style-type: none"> • 300/300 V • 300/500 V • 450/750 V 	03 05 07		•							
Isolierwerkstoff <ul style="list-style-type: none"> • PVC • Natur- und/oder synthetischer Kautschuk • Silikonkautschuk • vernetztes Polymer, im Brandfall raucharm und nicht korrosiv 	V R S Z			•						
Mantelwerkstoff <ul style="list-style-type: none"> • PVC • Natur- und/oder synthetischer Kautschuk • Chloroprenkautschuk • Glasfasergeflecht • Textilgeflecht • vernetztes Polymer, im Brandfall raucharm und nicht korrosiv 	V R N J T Z				•					
Besonderheiten im Aufbau <ul style="list-style-type: none"> • flache, aufteilbare Leitung • flache, nicht aufteilbare Leitung 	H H2					•				
Leiterart <ul style="list-style-type: none"> • eindräftig • mehrdräftig • feindräftig bei Leitung für feste Verlegung • feindräftig bei flexiblen Leitungen • feinstdräftig • Lahnlitze 	U R K F H Y						•			
Aderzahl									•	
Schutzleiter <ul style="list-style-type: none"> • ohne Schutzleiter • mit Schutzleiter 	X G								•	
Leiterquerschnitt in mm ²										•

Tabelle 9: Typenkurzzeichen für harmonisierte Leitungen

Farbe		Kurzzeichen alt nach DIN 47002	Kurzzeichen neu nach DIN VDE 0293
schwarz	black	sw	BK
braun	brown	br	BN
rot	red	rt	RD
orange	orange	or	OG
gelb	yellow	ge	YE
grün	green	gn	GN
blau	blue	bl	BU
violett	violet	vi	VT
grau	grey	gr	GY
weiß	white	ws	WH
rosa	pink	rs	PK
türkis	turquoise	tk	TQ

Tabelle 10: Kurzzeichen für Aderfarben

Kurzzeichen	Element
A-	Außenkabel
J-	Installationskabel
JE-	Installationskabel für Industrieelektronik
L-	Schlauchleitungen für Fernmeldeanlagen, Leitungen mit Litzenleiter $\geq 0,2 \text{ mm}^2$
S-	Schaltkabel für Fernmeldeanlagen
B	Bewehrung
C	Schirm aus Kupferdrahtgeflecht
(C)	Schirm oder Außenleiter aus Kupferdrahtgeflecht über einem Paar
F(L)SY	Kabelseele mit Petrolatfüllung und Schichtenmantel
H	Isolierhülle oder Mantel aus halogenfreiem Werkstoff
(L)2Y	Schichtenmantel aus Al-Band und PE
(ST)	statischer Schirm aus Metallband oder kunststoffkaschiertem Metallband
Y	Isolierhülle, Mantel oder Schutzhülle aus PVC
2Y	Isolierhülle, Mantel oder Schutzhülle aus PE
02YS	Isolierhülle aus verzelltem PE mit darüberliegender Schicht aus unverzelltem Material (foam skin)
2X	Isolierhülle, Mantel oder Schutzhülle aus VPE
(Z)	zugfestes Geflecht aus Stahldrähten
Bd	Bündelverseilung
...IMF	einzelne Verseilelemente in Metallfolie/-papier mit Beidraht (z. B. Paar: PiMF)
Lg	Lagenverseilung
St	Sternvierer mit Phantomkreis
St I	Sternvierer in Kabeln für größere Entfernungen (Bezirkskabel)
St III	Sternvierer im Teilnehmeranschlusskabel (Ortskabel)

Tabelle 11: Typenkurzzeichen für elektrische Nachrichtenkabel und -leitungen nach DIN VDE (Auszug)

Aderzahlen mit Zahlenaufdruck. Die Kennzeichnung sichert, dass die Monteure vor Ort die Adern richtig anschließen. Besonderer Aufmerksamkeit bedarf die verwechslungssichere Kennzeichnung des grün/gelb gekennzeichneten Schutzleiters. Die Zuordnung von Aderfarben ist derzeit im Zuge der weiteren internationalen Normung in Diskussion. Die Bezeichnung der Aderfarben hat sich im Zuge der Harmonisierung verändert und ist in Tabelle 10 dargestellt.

Die Typenkurzzeichen für elektrische Nachrichtenkabel und -leitungen setzen sich allgemein zusammen aus:

- Typenkennzeichen z. B. J- für Innenkabel
- Kennzeichen für die Art der Aufbauelemente z. B. 2Y(ST)Y für PE-Isolierung, statischen Schirm und PVC-Mantel
- Aderzahl und Abmessung z. B. 10 x 2 x 0,6
- Kennzeichen der Verseilelemente z. B. ST III Bd für Sternvierer, bündelverseilt

Beispiel: J- 2Y(ST)Y 10 x 2 x 0,6 ST III Bd

Eine Auswahl von Kurzzeichen zeigt Tabelle 11: Teilweise haben die aufgeführten Kurzzeichen weitere Bedeutungen.

Für eine sichere Montage erfolgt eine Kennzeichnung der Adern bzw. Paare durch Farben (Farbspiele) und ggf. durch zusätzliche Ringkennzeichnung sowie offene Wendel aus farbigen Bändern über ausgewählten Paaren oder Vierern.

Literaturhinweise

- [1] E. Peet:
Cambridge Ancient History,
2. Aufl. Bd. 1, S. 242, Cambridge 1924
- [2] F. Pawlek; K. Reichel:
Der Einfluss von Verunreinigungen auf die elektrische Leitfähigkeit von Kupfer,
Metallkunde 47 (1956), S. 247 bis 308
- [3] F. Pawlek; K. Viessmann; H. Wendt:
Der Einfluss von Beimengungen auf die elektrische Leitfähigkeit von Kupfer und Beeinflussung der elektrischen Leitfähigkeit von Kupfer durch mehrere metallische Verunreinigungen und durch Sauerstoff,
Metallkunde 47 (1956), S. 357 bis 363
- [4] Niedriglegierte Kupferlegierungen (Fachbuch),
Deutsches Kupfer-Institut e.V., Berlin 1966
- [5] Niedriglegierte Kupferwerkstoffe,
Informationsdruck i.08,
Deutsches Kupfer-Institut e.V., Berlin 1981
- [6] Kupfer (Fachbuch),
Deutsches Kupfer-Institut, Berlin 1982
- [7] M. E. G. Hadlow u. a.:
Superconductivity and its applications to power engineering,
IEE Reviews Bd. 119 (1972), S. 1003 bis 1032
- [8] High Conductivity Coppers TN 29,
Copper Development Association, London 1990
- [9] W. Bermann:
Werkstofftechnik Bd. 1,
Carl Hanser Verlag, München, Wien 1984
- [10] G. Grau:
Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Technologie,
G. Grau GmbH & Co, Pforzheim 1980
- [11] Copper for Busbars,
Copper Development Association Publication
No. 22, London 1984
- [12] Corrosion Resistant Materials Handbook,
New Jersey 1985
- [13] J. Colbus:
Probleme der Löttechnik,
Schweißen und Schneiden 6 (1954), S. 287 bis 296,
S. 140 bis 147
- [14] Lötten von Kupfer und Kupferlegierungen (Fachbuch),
Deutsches Kupfer-Institut e.V., Berlin 1969
- [15] J. Colbus:
Grundsätzliche Fragen zum Lötten und den Lötverbindungen,
Konstruktion 7 (1955), S. 419 bis 430
- [16] Schweißen von Kupfer,
DKI-Informationsdruck i.11,
Deutsches Kupfer-Institut e.V., Berlin 1991
- [17] Schweißen von Kupferlegierungen,
DKI-Informationsdruck i.12,
Deutsches Kupfer-Institut e.V., Berlin 1990
- [18] A. Stefanescu:
Einige praktische Erfahrungen mit Kaltschweißen von Kupfer- und Aluminium-Kupfer-Verbindungen,
Schweißen und Schneiden 25 (1973), S. 14 bis 17
- [19] A. Keil:
Werkstoffe für elektrische Kontakte,
Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1960
- [20] Steckverbinder,
Informationsbroschüre der Fa. Steckverbinder,
Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronik-industrie e.V., Nürnberg 4/86
- [21] Informationsdruck i.1
Energiesparpotentiale bei Motoren und Transformatoren
- [22] L. Heinhold; R. Stubbe:
Kabel und Leitungen für Starkstrom,
Erlangen/München 1999
- [23] S. Fassbinder:
Netzbelastungen durch Oberschwingungen,
DKI-Sonderdruck Nr. s.182, Düsseldorf 1998

- [24] Dr. Ing. D. Meurer:
VPE-isolierte Mittel- und Hochspannungskabel,
Draht 4/1999
- [25] S. Fassbinder:
Brandsichere Kabel und Leitungen,
ETZ 1/97
- [26] B. Deutsch; S. Mohr; A. Roller; H. Rost:
Elektrische Nachrichten-kabel,
Erlangen/München 1998

Weiterführende Literatur

- ISO Recommendation R 1337,
Wrought Coppers 1971
- W. Vieweger; H. Wever:
Der Einfluss des Sauerstoffes auf den Restwiderstand und „Size“-Effekt von reinem Kupfer,
Metallkunde 66 (1975), S. 639 bis 644
- F. Pawlek:
Die physikalischen Eigenschaften von reinem Kupfer,
Metall 13 (1959), S. 630 bis 637
- Lötten von Kupfer und Kupferlegierungen,
DKI-Informationsdruck i.3,
Deutsches Kupfer-Institut, Berlin 1987
- A. van't Hoen:
Die Entwicklung der neuen Flussmittel zum Weichlöten und die damit verbundene Problematik,
Metall 8 (1967), S. 795 bis 798
- W. Mahler; K. F. Zimmermann:
Hartlöten von Kupfer und seinen Legierungen,
Fachbuch-Reihe: Schweißtechnik, Bd. 49, Deutscher Verlag für Schweißtechnik GmbH, Düsseldorf 1966
- Fa. Dr.-Ing. G. Wazau:
Lötbarkeitsprüfung (Firmenprospekt)
- H. Rotter:
Die Anwendung der Schutzgasschweißung von Kupfer und seinen Legierungen,
Metall 23 (1969), S. 1163 bis 1166
- B. Küber:
Schutzgasschweißen von Kupfer und Kupferlegierungen,
Metall 28 (1974), S. 1156 bis 1159
- Copper Consumption – Wires and Cables, Japan, USA,
Western Europe 1989 - 1993,
ICA Copper Study, MARCO, Birmingham 4/92
- Kupfer, der Werkstoff der Zukunft für die Aufbau- und Verbindungstechnik elektronischer Bauelemente,
DKI-Sonderdruck s.189,
Deutsches Kupfer-Institut e.V., Berlin 1988
- Metallstatistik 77, Jahrgang 1979 bis 1989,
Metallgesellschaft AG, Frankfurt/Main 1990
- Electrical Cables Handbook,
London 1982, S. 29 bis 30
- W. Mantel:
Schweißen von Kupferwerkstoffen nach Sonderverfahren,
Maschinenmarkt 81 (1975), S. 1384 bis 1387
- O. v. Franqué; W. Horstmann:
Stand und Entwicklungstendenzen des Schweißens von Kupfer und seinen Legierungen,
Schweißen und Schneiden 27 (1975), S. 359 bis 361
- J. Ruge:
Handbuch Schweißtechnik,
2. Aufl., Bd. 1 Werkstoffe, Bd. 2 Verfahren und Fertigung,
Springer-Verlag, Berlin 1980
- D. Stöckel; H. J. Oberg:
Ultraschallschweißen von Werkstoffen,
Zeitschrift für Werkstofftechnik 6 (1975), S. 125 bis 132
- Kupfer (Teil D),
Gmelins Handbuch der anorganischen Chemie,
Verlag Chemie GmbH, 1963
- Lötten, DIN Taschenbuch 196,
Beuth Verlag GmbH, Berlin/Köln 1983
- VDE 100 und die Praxis (Fachbuch),
VDE-Verlag GmbH, Berlin/Offenbach 1987
- Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen (Fachbuch),
Deutsches Kupfer-Institut e.V., Berlin 1978

Schweißtechnik, DIN Taschenbuch 8,
Beuth Verlag GmbH, Berlin/Köln 1978 und 1980

D. Freudensprung:
Der Einsatz von Kupferwerkstoffen in der Nachrichten-kabeltechnik der DBP heute und in der Zukunft (Tagungs-band),
2. Symposium: Kupferwerkstoffe – Eigenschaften – Anwendung, Deutsches Kupfer-Institut e.V., Berlin 1988

Kabel und Leitungen,
Verlag Technik, Berlin 1989

J. Artbauer:
Kabel und Leitungen,
Verlag Technik, Berlin/Stuttgart 1961

Das Zeitalter der Elektrizität,
Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke mbH, Frankfurt/Main 1967

E. v. Rziha:
Starkstromtechnik, 8. Auflage, Bd. I und II,
Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1960

Harmonisierung der Starkstromkabel und -leitungen,
VDE-Verlag GmbH, VDE Schriftenreihe 31 (1976)

H. H. Blechschmidt:
Erfahrungen mit neueren Kabelisoliertstoffen,
Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke mbH, Frankfurt/Main 1980

E. Mills, BICC, United Kingdom:
Mineral insulated Metal Sheathed Cables,
Wire Ind, 43, May 1976

I. Sannes, Philips Intl, Eindhoven, Netherland:
Integrated Mineral Insulated Heaters for Unconventional Application,
Elektrowärme Intl, 43, February 1985

D. R. Allen, Alchem, Witchita, Kansas:
Composite Heater Cable Cuts Input-Output Power Ratio, Insulation/Circuits, 19. August 1973

B. K. Hay, BICC European Marketing Org., Brussels, Belgium:
Mineral Insulated Copper Sheathed Wiring Cables,
ATB Metallurgie 16, 1976

H. Heublein:
Störungsfreie Datenübertragung,
Erlangen/München 1996

VDEW-e.V:
Kabelhandbuch,
Frankfurt am Main 1997

E. Retzlaff:
Lexikon der Kurzzeichen für Kabel und isolierte Leitungen,
VDE Schriftenreihe Nr.29, Berlin/Offenbach 1997

W. Hoppmann:
Die bestimmungsgerechte Elektroinstallationspraxis,
München 1998

Frank Lübbe:
Halogenfreie Starkstromkabel und -leitungen für Gebäude-installation,
Elektrizitätswirtschaft 5/1997

K. Schwammborn:
Draht- und Kabelummantelungen,
Kunststoffe 7/1996

R. Greiner:
Kostendruck und Miniaturisierung – Kunststoffe in der Nachrichten- und Kommunikationstechnik,
Kunststoffe 4/1998

H. J. Mair:
Kunststoffe in der Kabeltechnik,
expert-Verlag, Ehningen bei Böblingen 1991

William Thue:
Electrical power cable engineering,
Marcel Dekker, Inc., New York, 1999

DKI-Sonderdrucke

Verhalten von Kupferoberflächen an der Atmosphäre (s. 131)

Konstruktive Gestaltung von Formgussstücken aus Kupferwerkstoffen (s. 133)

Dachdeckung und Außenwandbekleidung mit Kupfer (s. 145/149)

Dachentwässerung mit Kupfer (s. 146)

Die Korrosionsbeständigkeit metallischer Automobilbremsleitungen – Mängelhäufigkeit in Deutschland und Schweden (s. 161)

Emaillieren von Kupfer und Tombak (s. 163)

Schwermetall-Schleuder- und Stranggusstechnische und wirtschaftliche Möglichkeiten (s. 165)

Einsatz von Kupfer- und Kupferlegierungsdrähten für nicht-elektrische Anwendungen (s. 168)

Rohrwerkstoffe im Vergleich – Entscheidung mit Hilfe der Herstellkosten (s. 175)

Grundlegende korrosionschemische Eigenschaften von Kupferwerkstoffen (s. 176)

Korrosion und Korrosionsschäden an Kupfer und Kupferwerkstoffen in Trinkwasserinstallationen (s. 177)

Zeitstandeigenschaften und Bemessungskennwerte von Kupfer und Kupferlegierungen für den Apparatebau (s. 178)

Planung und Verlegung von Kupferrohr-Fußbodenheizungen (s. 179)

Kupferrohre im Heizungsbau (s. 181)

Netzbelastung durch Oberschwingungen (s. 182)

Fehlauslösungen von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (s. 184)

Wechselwirkungen von Blindstrom-Kompensationsanlagen mit Oberschwingungen (s. 185)

Vom Umgang mit Blitzschäden und anderen Betriebsstörungen (s. 186)

Wechselwirkung zwischen Kupfer und Umgebung (s. 187)

Kupferwerkstoffe (s. 188)

60 Jahre DKI (s. 190)

Ergänzende Zeitstandversuche an den beiden Apparatewerkstoffen SF-Cu und CuZn20Al2 (s. 191)

Kupfer-Zinn-Legierungen für die Herstellung von Gesenkschmiedestücken (s. 194)

Versickerung von Dachablaufwasser (s. 195)

Kupfer in kommunalen Abwässern und Klärschlamm (s. 197)

Sachbilanz einer Ökobilanz der Kupfererzeugung und -verarbeitung (s. 198)

Sachbilanz zur Kupfererzeugung unter Berücksichtigung der Endenergien (s. 199)

Einsatz CuNi10Fe1Mn plattierter Bleche für Schiffs- und Bootskörper
Use of Copper-Nickel Cladding on Ship and Boat Hulls (s. 201)

Kupfer-Nickel-Bekleidung für Offshore-Plattformen
Copper-Nickel Cladding for Offshore Structures (s. 202)

Werkstoffe für Seewasser-Rohrleitungssysteme
Materials for Seawater Pipeline Systems (s. 203)

Untersuchung zur Bleiabgabe der Messinglegierung CuZn39PB3 an Trinkwasser – Testverfahren nach British Standards BS 7766 and NSF Standard 61 (s. 200)

Ammoniakanlagen und Kupfer-Werkstoffe? (s. 210)

Kupferwerkstoffe in Ammoniakkälteanlagen (s. 211)

DKI-Informationsdrucke

Energiesparpotentiale bei Motoren und Transformatoren (i. 1)

Kupfer/Vorkommen, Gewinnung, Eigenschaften, Verarbeitung, Verwendung (i. 4)

Niedriglegierte Kupferwerkstoffe (i. 8)

Kupfer-Zinn-Legierungen (Messing und Sondermessing) (i. 5)

Kupfer-Nickel-Zinn-Legierungen (Neusilber) (i. 13)

Kupfer-Nickel-Legierungen (i. 14)

Kupfer-Zinn-Knetlegierungen (Zinnbronzen) (i. 15)

Kupfer-Aluminium-Legierungen (i. 6)

Kleben von Kupfer und Kupferlegierungen (i. 7)

Löten von Kupfer und Kupferlegierungen (i. 3)

Schweißen von Kupfer (i. 11)

Schweißen von Kupferlegierungen (i. 12)

Richtwerte für die spanende Bearbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen (i. 18)

Kupfer – Lebensmittel – Gesundheit (i. 19)

Kupferwerkstoffe im Automobilbau (i. 9)

Kupferwerkstoffe in der Elektrotechnik und Elektronik (i. 10)

Bänder und Drähte aus Kupferwerkstoffen für Bauelemente der Elektrotechnik und der Elektronik (i. 20)

Rohre aus Kupfer-Zinn-Legierungen (i. 21)

Bänder, Bleche, Streifen aus Kupfer-Zinn-Legierungen (i. 22)

Mechanische, chemische und elektrolytische Oberflächenvorbehandlung von Kupfer und Kupferlegierungen (i. 23)

Beschichten von Kupfer und Kupfer-Zinn-Legierungen mit farblosen Transparentlacken (i. 24)

Kupfer-Zinn-, Kupfer-Zinn-Zinn- und Kupfer-Blei-Zinn-Gusslegierungen (Guss-Zinnbronze, Rotguss und Guss-Zinn-Blei-bronze) (i. 25)

Kupfer im Trinkwasser (i. 26)

Recycling von Kupferwerkstoffen (i. 27)

Kupfer und Kupferwerkstoffe ein Beitrag zur öffentlichen Gesundheitsvorsorge (i. 28)

Gewichtstabellen für Kupfer und Kupferlegierungen (i. 29)

Durchführungsanleitungen für die Kupferrohrverarbeitung zum Rahmenlehrplan GWI 1/92 „Unlösbare Rohrverbindung und Rohrverarbeitung“ (i. 157)

Die fachgerechte Kupferrohrinstallation (i. 158)

Die fachgerechte Installation von thermischen Solaranlagen (i. 160)

DKI-Fachbücher* je DM 8,50

Kupfer

Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen

Chemische Färbungen von Kupfer und Kupferlegierungen

Treiben von Kupfer und Kupferlegierungen

Kupfer als Werkstoff für Wasserleitungen

Kupferrohre in der Heizungstechnik

Kupfer in der Landwirtschaft

Guss aus Kupfer und Kupferlegierungen – Technische Richtlinien

Kupferrohrnetzberechnungen (kostenlos)

Kupfer im Hochbau (Preis auf Anfrage)

Planungsleitfaden Kupfer – Messing – Bronze (Preis auf Anfrage)

Werkstoffdatenblätter

SF-Cu, E-Cu57, CuFe2P, CuCrZr, CuZn30, CuZn36, CuZn37, CuZn39Pb2, CuZn39Pb3, CuZn40Pb2, CuNi9Sn2, CuSn4, CuSn6, CuSn8, G-CuSn5ZnPb, GD-, GK-CuZn37Pb, G-, GZ-, GC-CuSn7ZnPb, G-, GK-, GZ-, GC-CuAl10Ni

Informationsbroschüren

Kupfer – der Nachhaltigkeit verpflichtet

Kupfer in der Elektrotechnik – Kabel und Leitungen

Dekorativer Innenausbau mit Kupferwerkstoffen

Kupfer in unserer Umwelt

Natürlich Kupfer – Kupfer ökologisch gesehen

Public Design mit Kupfer Messing Bronze

Kupferwerkstoffe in der Umweltgestaltung

Türgriffe: Eine Infektionsquelle in Krankenhäusern?

Doorknobs: a source of nosocomial infection?

Kupfer – lebenswichtiges Spurenelement

Wieviel Blei gelangt ins Trinkwasser?

Kupfer spart Energie

Messing – ästhetisch und beständig

Messing ja – Spannungsrisskorrosion muss nicht sein!

Ausschreibungsunterlagen für Klempnerarbeiten an Dach und Fassade

Lernprogramm

Die fachgerechte Kupferrohr-Installation DM 15,80***

Lehrhilfen

Kupferrohrinstallation

Foliensatz zum Lernprogramm DM 120,00***

Faltmuster für Falzarbeiten mit Kupfer

Muster für Ausbildungsvorlagen in der Klempnerarbeit DM 55,00

Werkstofftechnik – Herstellungsverfahren

2 Sammelmappen mit farbigen Klarsichtfolien und

Texterläuterungen

Band I DM 250,00**

Band II DM 200,00**

Filmdienst des DKI

Das Deutsche Kupfer-Institut verleiht kostenlos die nachstehend aufgeführten Filme und Videos:

„Kupfer in unserem Leben“

Videokassette, 20 Min. Schutzgebühr DM 42,50

Verleih kostenlos

„Fachgerechtes Verbinden von Kupferrohren“ Lehrfilm,

Videokassette, 15 Min. Schutzgebühr DM 20,00

Verleih kostenlos

„Kupfer in der Klempnerarbeit“ Lehrfilm,

Videokassette, 15 Min. Schutzgebühr DM 20,00

Verleih kostenlos

* Fachbücher des DKI sind über den Fachbuchhandel zu beziehen oder ebenso wie Sonderdrucke, Informationsdrucke und Informationsbroschüren direkt vom Deutschen Kupfer-Institut.

** Dozenten im Fach Werkstofftechnik an Hochschulen erhalten die Mappen kostenlos

*** Sonderkonditionen für Berufsschulen

Fordern Sie bitte unverbindlich das Dienstleistungs- und Verlagsverzeichnis des DKI an:

Deutsches Kupfer-Institut e.V.

Am Bonnheshof 5, 40474 Düsseldorf

Telefon (02 11) 4 79 63 00

Telefax (02 11) 4 79 63 10

E-mail: info@kupferinstitut.de

www.kupferinstitut.de