

3.8 Kupfer und Kupferlegierungen

Kupfer und Kupferlegierungen werden in der Elektrotechnik überwiegend wegen ihrer **guten elektrischen Leitfähigkeit** als elektrischer Leiter- und Kontaktwerkstoff eingesetzt. Daneben finden sie auch als Konstruktionswerkstoffe im Maschinenbau, im Apparatebau und im Bauwesen Verwendung.

3.8.1 Kupfergewinnung

Ausgangsstoff der Kupfergewinnung ist der im Roherz enthaltene **Kupferkies CuFeS_2** .

Verhüttung

Das Roherz wird am Fundort fein gemahlen und durch Schwimmauftrennung (Flotation) auf einen Kupfergehalt von rund 10% angereichert (**Bild**).

In einem Erz-Flammofen wird das Erz mit Zuschlägen aufgeschmolzen. Das entstehende Schmelzgut ist „Kupferstein“, ein Gemisch aus Kupfersulfid Cu_2S und Eisensulfid FeS sowie Schlacke.

Die Kupferstein-Schmelze wird in einen Konverter gefüllt und mit Preßluft durchgeblasen. Dabei wird das Eisensulfid **FeS oxidiert und als Fe_2O_3** in die Schlacke überführt. Ebenso verbindet sich der eingeblasene Luftsauerstoff mit dem Schwefel aus dem Kupfersulfid **Cu_2S zu SO_2** bei gleichzeitiger Reduktion des **Cu_2S zu Kupfer Cu** :



Das entstandene Rohkupfer enthält rund 97% Cu. Es wird dann in einem Raffinier-Flammofen nachgereinigt. Ihn verläßt das jetzt feuerrefinierte Kupfer mit rund 99% Kupferanteil. Es wird zu Platten vergossen.

Elektrolytische Raffination

Die elektrolytische Raffination dient der **weiteren Reinigung des Kupfers** (**Bild**, unterer Teil). Dazu werden die Platten aus feuerrefiniertem Kupfer in ein schwefelsaures Kupfersulfat-Elektrolysebad gehängt und als Anode (+) geschaltet. Sie lösen sich unter der Wirkung des elektrischen Stroms auf. Gleichzeitig wird das Kupfer in reiner Form an dünnen Kupferblechen abgeschieden, die als Kathode (-) geschaltet im Elektrolysebad hängen.

Dieses **Elektrolyse-Kupfer** besteht zu mehr als 99,90% aus Kupfer und ist der Ausgangsstoff der technischen Kupferwerkstoffe und Kupferlegierungen. Es wird zu Gußsträngen und Masseln vergossen, aus denen die Kupferhalbzeuge bzw. die Gußteile hergestellt werden.

Verarbeitung

Der überwiegende Teil des Kupfers wird durch Walzen, Strangpressen und Ziehen (Seite 59 bis 61) zu Halbzeugen, wie Drähten, Blechen, Stangen usw. geformt. Beim Endverarbeiter werden sie durch Umformen, Schneiden oder Spanen in ihre Endform gebracht und abschließend zum Bauteil montiert. Kompakte und kompliziert geformte Kupferbauteile, z. B. Kontaktblöcke oder Kühlkästen, werden aus Kupfer-Gußwerkstoffen gegossen.

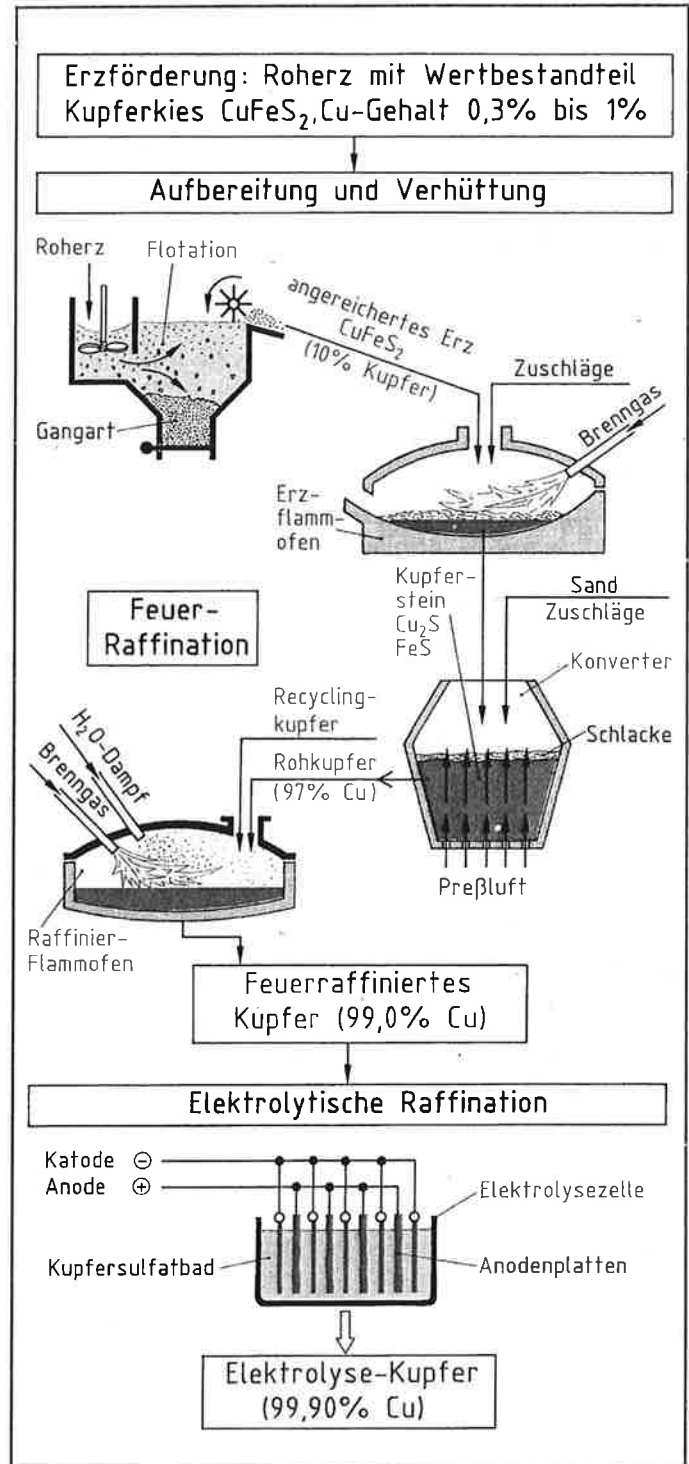


Bild: Kupfergewinnung

3.8.2 Allgemeine Eigenschaften und Verwendung

Kupfer ist ein Halbedelmetall mit einer an frischen Flächen metallisch glänzenden, lachsroten Farbe. Seine Dichte beträgt $8,94 \text{ kg/dm}^3$, der Schmelzpunkt liegt bei 1083°C .

Die **elektrische Leitfähigkeit** von hochreinem Kupfer (etwa 99,998 %) beträgt $60 \text{ m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$. Die in der Elektrotechnik eingesetzten Kupfersorten haben eine Leitfähigkeit von mindestens $57 \text{ m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$.

Verunreinigungen und Legierungsbestandteile setzen die elektrische Leitfähigkeit von Kupfer wesentlich herab.

Ein Vergleich der Werte der elektrischen Leitfähigkeit der Metalle lässt erkennen, warum Kupfer der wichtigste Leiterwerkstoff ist (**Tabelle 1**). Es hat fast dieselbe Leitfähigkeit wie das teurere Silber und leitet besser als Aluminium, das verwendet wird, wenn seine geringe Dichte gefragt ist.

Kupfer hat ebenso eine sehr gute **Wärmeleitfähigkeit**, die auf denselben atomistischen Vorgängen wie die elektrische Leitfähigkeit beruht (Seite 73).

Die **mechanischen Eigenschaften** von Kupfer sind mäßig. Es ist ein relativ weiches Metall mit geringer Festigkeit (**Tabelle 2**). Durch Kaltverformen kann seine Festigkeit und Härte wesentlich gesteigert werden, die Dehnbarkeit nimmt dabei stark ab. Kupfer hat ein günstiges **Korrosionsverhalten**. In trockenen Räumen oder Maschinengehäusen bildet sich auf der Kupferoberfläche eine dünne, schwarzbraune Kupferoxidschicht. Bei Bewitterung im Freien entsteht je nach Atmosphäre zuerst eine schwarzbraune, später grüne Deckschicht, die Patina. Sie schützt das Kupferbauteil vor weiterer Korrosion und gibt Kupfer sein typisches, dekoratives Aussehen.

Die **Verwendung** von Kupfer erfolgt aufgrund seiner besonderen Eigenschaften (**Bild**):

- Gute elektrische Leitfähigkeit
→ Leitungsdrähte, Wicklungen, Kabel, Stromschienen, elektrische Kontakte.
- Gute Wärmeleitfähigkeit
→ Lötkolbenspitzen, Wärmetauscher.
- Korrosionsbeständigkeit und Aussehen
→ Fassadenverkleidungen, Dachrinnen.
- Gute Legierbarkeit → Kupferbasislegierungen.

Tabelle 1: Elektrische Leitfähigkeit reiner Metalle

	Silber	Kupfer	Aluminium	Eisen
Leitfähigkeit $\text{m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$	~ 63	~ 60	~ 38	~ 10
Dichte kg/dm^3	10,5	8,94	2,70	7,87

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften

	Zugfestigkeit	Bruchdehnung
Kupfer, weichgeglüht	200 N/mm ²	50 %
Kupfer, kaltgereckt	400 N/mm ²	2 %

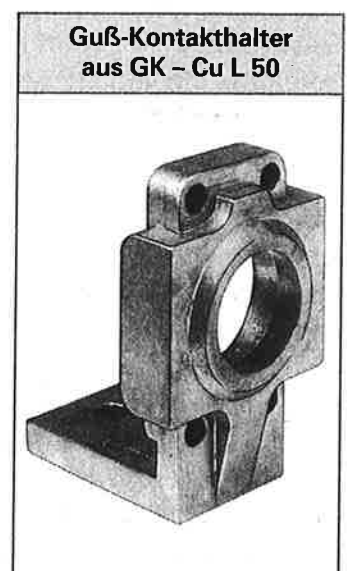
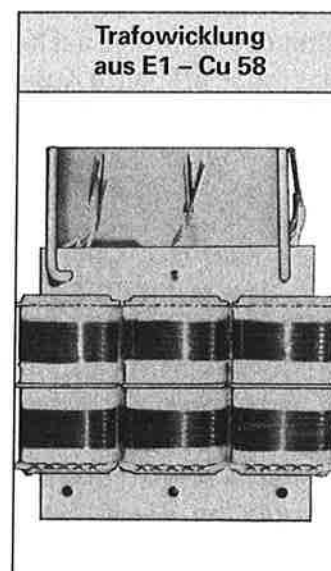


Bild: Anwendungsbeispiele für Kupfer

3.8.3 Kupfersorten

Guß-Kupfersorten

Die Guß-Kupfersorten enthalten bis zu 2 % Zusätze, welche die schlechte Gießbarkeit des reinen Kupfers verbessern. Sie besitzen eine verminderte elektrische Leitfähigkeit gegenüber reinem Kupfer (**Tabelle 3**). Die Sorten G-Cu L 50 und G-S Cu L 50 werden für Gußteile der Elektrotechnik verwendet (Bild). Die Sorte G-Cu L 35 wird zu Gußteilen mit Wärmeableitungsfunktion verarbeitet.

Tabelle 3: Guß-Kupfersorten (DIN 17655)

Kurzzeichen Werkstoff-Nr.	Elektr. Leitfähigkeit $\text{m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$	Hauptanwendung
G-Cu L 50	~ 50	Schaltbauteile, Kontaktbacken, Elektrodenarme und -halter
G-S Cu L 50	~ 50	
G-Cu L 35	~ 35	Kühlringe, Kühlkästen, Blasformen

Kupfersorten für Halbzeuge

Die **sauerstoffhaltigen Kupfersorten**, z. B. **E1-Cu 58**, haben eine besonders hohe elektrische Leitfähigkeit (**Tabelle 1**). Sie werden zu Leitungs- und Wicklungsdrähten verarbeitet (Bild, Seite 86).

Sie enthalten einen Restanteil Sauerstoff von 0,005 % bis 0,040 %. Beim Glühen, Schweißen oder Hartlöten nehmen diese Kupfersorten Wasserstoff aus der Luft auf und verspröden (Wasserstoffsprödigkeit). Sauerstoffhaltige Kupfersorten dürfen deshalb nicht geschweißt oder hartgelötet werden.

Die **sauerstofffreien, nicht desoxidierten Kupfersorten**, z. B. **OF-Cu**, haben eine gute elektrische Leitfähigkeit und sind wasserstoffbeständig, so daß sie löt- und schweißbar sind.

Die **sauerstofffreien, mit Phosphor desoxidierten Kupfersorten** sind wasserstoffbeständig und haben je nach Restphosphorgehalt eine unterschiedliche elektrische Leitfähigkeit. Die Kupfersorte **SE-Cu** ist als Leiterwerkstoff in der Elektrotechnik geeignet und wird zu Umform-Bauteilen verarbeitet, die geschweißt oder hartgelötet werden.

Die Sorten **SF-Cu** und **SW-Cu** sind wegen ihrer Wasserstoffbeständigkeit, der guten Umformbarkeit sowie der Schweiß- und Lötbarkeit die wichtigsten Kupferwerkstoffe für den Metallbau, das Bauwesen, den Apparatebau und für Rohrleitungen.

Tabelle 1: Kupfersorten für Halbzeuge (nach DIN 1708)		
Kurzzeichen	Elektr. Leitfähigkeit $m/(\Omega \cdot mm^2)$	Hauptanwendung
Sauerstoffhaltiges Kupfer		
E1-Cu 58	≥ 58	Elektrische Leiter und Wicklungen, Kommutatoren
Sauerstofffreies Kupfer, nicht desoxidiert		
OF-Cu	≥ 58	Elektrotechnik-Halbzeug, löt- und schweißbar
Sauerstofffreies, mit Phosphor desoxidiertes Kupfer		
SE-Cu	≥ 57	Elektrotechnik-Halbzeug, das wasserstoffbeständig, gut umformbar, löt- und schweißbar sein muß
SF-Cu	41 bis 52	Halbzeug für das Bauwesen und den Apparatebau, Rohrleitungen
SW-Cu	≈ 52	Halbzeug für den Apparatebau, gut umformbar, löt- und schweißbar

Nur die sauerstofffreien Kupfersorten dürfen hartgelötet und geschweißt werden.

3.8.4 Niedrig legierte Kupferwerkstoffe

Durch geringe Zusätze bestimmter Elemente können einige ungünstige Eigenschaften des reinen Kupfers, wie die geringe Festigkeit oder die schwierige Zerspanbarkeit, erheblich verbessert werden. Gleichzeitig bleiben die gute elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit sowie die gute Korrosionsbeständigkeit, weitgehend erhalten.

Legierungselemente, die dies bewirken, sind Arsen, Beryllium, Cadmium, Chrom, Eisen, Kobalt, Mangan, Nickel, Schwefel, Silber, Silicium, Tellur, Zink, Zinn, Zirkon; entweder allein oder in Kombination.

In den meisten Fällen bleibt die Konzentration der einzelnen Elemente bei 1 bis 2 Prozent.

Es gibt nicht aushärtbare sowie aushärtbare, niedrig legierte Kupferwerkstoffe (**Tabelle 2**). Ihre Hauptanwendungsgebiete sind Bauteile mit hoher Korrosionsbeständigkeit und Festigkeit (**Bild**).

Tabelle 2: Niedrig legierte Kupferwerkstoffe		
Kurzzeichen	Besondere Eigenschaften	Hauptanwendungsgebiete
Cu Cd 1 (nicht aushärtbar)	Hohe Kaltverfestigung. Gute elektrische Leitfähigkeit $\approx 50 m/(\Omega \cdot mm^2)$	elektrische Freileitungen, Fahrdrähte, Elektroden
Cu Ni 2 Si (aushärtbar)	auf hohe Festigkeit aushärtbar, korrosionsbeständig $\approx 17 m/(\Omega \cdot mm^2)$	Schrauben, Bolzen, Freileitungsteile, Schalterteile



Bild: Bauteile aus niedrig legierter Kupferlegierung

3.8.5 Kupfer-Zink-Legierungen (Messing)

Durch Legieren von Kupfer mit 5 % bis 45 % Zink (Zn) können Werkstoffe mit einer dekorativen, goldgelben Farbe hergestellt werden. Sie werden allgemein als Messing bezeichnet.

Kupfer-Zink-Legierungen (Messinge) haben deutlich verbesserte mechanische Eigenschaften und ein ähnlich gutes Korrosionsverhalten wie unlegiertes Kupfer.

Ihre elektrische Leitfähigkeit, die beträgt 10 bis 30 m/($\Omega \cdot \text{mm}^2$), und das Wärmeleitvermögen sind jedoch wesentlich schlechter als bei Kupfer.

Die Kupfer-Zink-Legierungen können aufgrund ihres Gefüges in zwei Gruppen unterteilt werden (**Bild 1**).

Legierungen mit bis zu 37 % Zink bestehen aus α -Messing, einem gut verformbaren Gefüge.

Zwischen 37% und 46% Zink enthalten die Legierungen neben dem α -Gefüge einen wachsenden Anteil an β -Gefüge, das wesentlich härter ist. Sie sind sehr hart und weniger gut verformbar.

Die mechanischen Eigenschaften und die elektrische Leitfähigkeit der Kupfer-Zink-Legierungen sind vom Zinkgehalt der Legierung abhängig (**Bild 2**). Mit steigendem Zinkgehalt nimmt die Festigkeit und die Verformbarkeit zu, um ab 35% Zink rasch abzufallen. Dies beruht auf den unterschiedlichen Gefügebestandteilen der verschiedenen Legierungen.

Die elektrische Leitfähigkeit fällt besonders bei niedrigen Zinkgehalten stark ab. Schon bei etwa 8% Zink ist nur noch die halbe Leitfähigkeit von reinem Kupfer vorhanden.

Kupfer-Zink-Knetlegierungen gibt es von 5 % Zink (CuZn 5) bis rund 44% Zink (CuZn 44). Zusätzlich können z. B. zur besseren Spanbarkeit noch geringe Anteile an Blei (Pb) sowie zur Verbesserung der Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit die Legierungsbestandteile Al, Si, Mn enthalten sein (**Tabelle**). Die Knetlegierungen werden zu Halbzeugen verarbeitet und daraus durch Spanen oder Formpressen die Fertigteile geformt (**Bild 1**, Seite 89).

Kupfer-Zink-Legierungen sind nicht aushärtbar. Unbehandelt sind sie je nach Zusammensetzung weich bis mittelhart, können aber durch Kaltverformen wesentlich verfestigt werden, z. B. von 300 N/mm² Zugfestigkeit auf über 600 N/mm². Bei Halbzeugen wird der Verfestigungsgrad durch eine angehängte Festigkeitskennzahl angegeben.

Beispiel: CuZn 40 Pb 2 F 61 ist eine Kupfer-Zink-Legierung mit rund 40 % Zink, 2 % Blei und einer durch Kaltverfestigung auf „federhart“ erzielten Mindestzugfestigkeit von 610 N/mm².

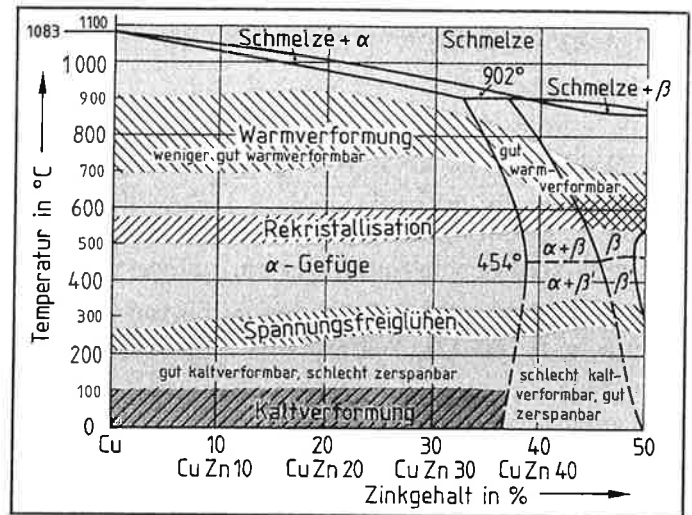


Bild 1: Zustandsschaubild Kupfer-Zink mit Gefügen und Wärmebehandlung

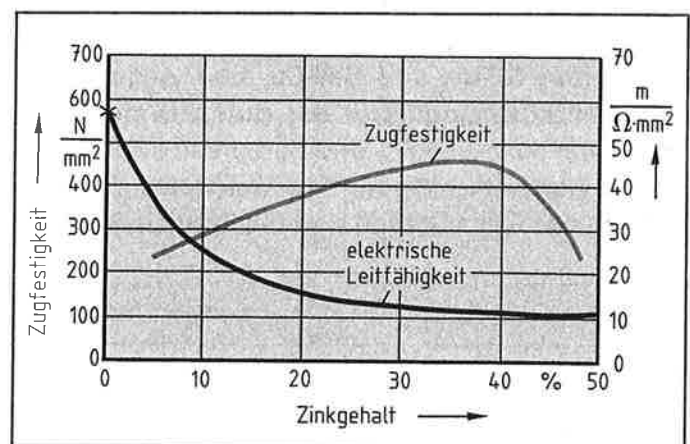


Bild 2: Zugfestigkeit und elektrische Leitfähigkeit von Kupfer-Zink-Legierungen

Tabelle: Kupfer-Zink-Legierungen für die Elektrotechnik und den Elektromaschinenbau

Werkstoff-kurzzeichen	Besondere Eigenschaften	Hauptanwendungen
Cu Zn 5	gute Leitfähigkeit, korrosionsbeständig, bestens umformbar	Installationsteile für die Elektrotechnik
Cu Zn 37	gut umformbar, korrosionsbeständig, gute Festigkeit	Glühlampenfassung, Kontaktfedern, Abspannklemmen
Cu Zn 39 Pb 0,5	warmumformbar, gut zerspanbar	Steckerstifte, Kondensatorplatten, Armaturenteile
Cu Zn 40 Al 2	gute Gleiteigenschaften, hochfest	Gleitlager, Führungen

Kupfer-Zink-Gußlegierungen gibt es mit 15 % bis 40 % Zinkgehalt sowie geringen Anteilen der Legierungselemente Pb, Al, Si, Ni. Eine gebräuchliche Kupfer-Zink-Gußlegierung für elektrotechnische Bauteile ist z. B. GK-CuZn 38 Al. Sie wird wegen ihrer guten Vergießbarkeit und Korrosionsbeständigkeit z. B. zu Kontaktstücken oder Bürstenhaltern verarbeitet (**Bild 1**).

Die **Verarbeitung** der Kupfer-Zink-Legierungen ist problemlos. Warmumformen ist bei Legierungen jeder Zusammensetzung gut durchführbar. Kaltumformbar sind Legierungen bis 37 % Zink (α -Messing). Dabei tritt eine Verfestigung ein, die durch Spannungsfreiglühen wieder rückgängig gemacht werden kann.

Gut spanbar sind die bleihaltigen Kupfer-Zink-Legierungen mit mehr als 37 % Zink.

Geschweißt werden kann mit dem Gasschmelz- sowie mit dem WIG-Schweißen. Bleihaltige Cu-Zn-Legierungen sind ebenfalls schweißbar. Auch Weich- und Hartlöten ist gut durchzuführen.

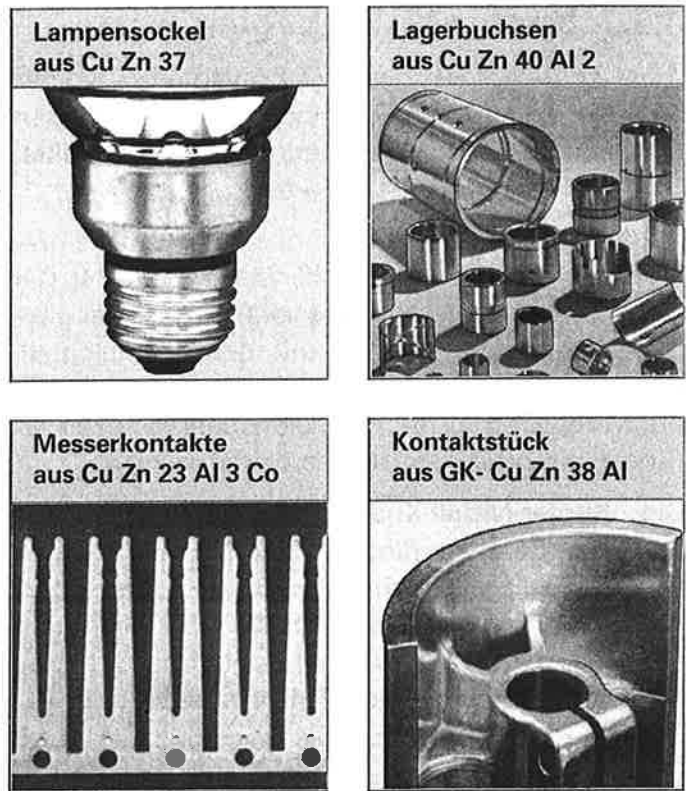


Bild 1: Bauteile aus Kupfer-Zink-Legierungen

3.8.6 Kupfer-Zinn-Legierungen

Kupferlegierungen, die kein oder nur wenig Zink enthalten, werden als **Bronzen** bezeichnet.

So nennt man Kupfer-Zinn-Legierungen **Zinnbronzen**, Kupfer-Aluminium-Legierungen **Aluminiumbronzen**.

Kupfer-Zinn-Legierungen (Zinnbronzen) enthalten bis 13 % Zinn (Sn) sowie teilweise geringe Zusätze der Legierungselemente Pb, Zn, Ni (**Tabelle**).

Die elektrische Leitfähigkeit nimmt mit dem Zinngehalt stark ab. So hat z. B. die Legierung CuSn 6 nur noch eine Leitfähigkeit von $9 \text{ m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$.

Ihre Festigkeit ist im weichen Zustand mittelmäßig ($\approx 300 \text{ N/mm}^2$), läßt sich durch Kaltverformen aber wesentlich steigern (bis 800 N/mm^2). In diesen Grenzen kann sie dem Verwendungszweck angepaßt werden: von weich gegläht bis federhart.

Kupfer-Zinn-Legierungen zählen zu den korrosionsbeständigsten Kupferwerkstoffen. Außerdem besitzen sie gute Gleiteigenschaften und Verschleißfestigkeit.

Die **Kupfer-Zinn-Knetlegierungen**, z. B. CuSn 6 oder CuSn 10, werden zu Bändern verarbeitet, aus denen die Halbfertigteile, z. B. federnde Kontakte oder Träger für integrierte Schaltungen, hergestellt werden (**Bild 2**).

Aus **Kupfer-Zinn-Gußlegierungen** fertigt man wegen der guten Gleiteigenschaften Gleitlagerschalen, Führungsbahnen, Schneckenräder usw.

Tabelle: Kupfer-Zinn-Legierungen		
Werkstoff-kurzzeichen	Besondere Eigenschaften	Hauptanwendungen
Cu Sn 6	gute elektrische Leitfähigkeit, gute Korrosionsbeständigkeit	Federnde Elektroteile, Systemträger, IC-Träger
Cu Sn 10		
GZ-Cu Sn 12 Pb	gute Gleitfähigkeit, korrosionsbeständig	Gleitlager, Führungen, Pumpenteile

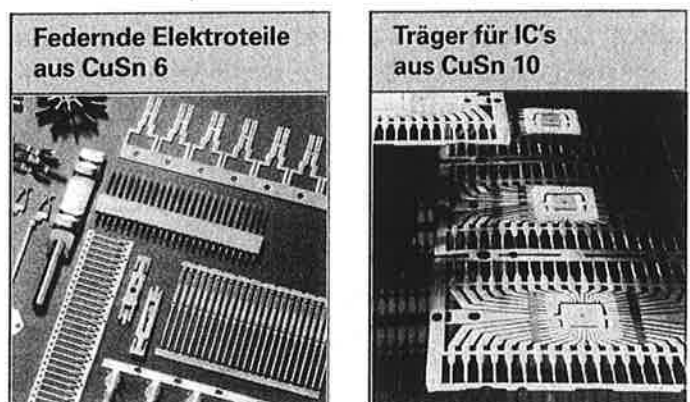


Bild 2: Teile aus Kupfer-Zinn-Legierungen

3.8.7 Kupfer-Nickel-Legierungen

Die Kupfer-Nickel-Legierungen bestehen aus über 50 % Cu, bis zu 45 % Nickel und teilweise geringen Gehalten an Zinn, Eisen und Mangan (**Tabelle**). Sie haben eine silberhelle Farbe.

Kupfer bildet mit Nickel im gesamten Konzentrationsbereich lückenlos Mischkristalle (Seite 74). Die Folge ist eine kontinuierliche Veränderung der physikalischen Eigenschaften mit dem Nickelanteil. Während mit steigendem Nickelgehalt sich die Zugfestigkeit und die Korrosionsbeständigkeit erhöhen, nimmt die elektrische Leitfähigkeit ab.

Die **Kupfer-Nickel-Knetlegierungen** werden in Form von Bändern, Blechen, Drähten und Stangen geliefert. Zu ihnen gehören z. B. die Legierungen CuNi9Sn2 und CuNi25 (**Tabelle**). Die Legierung CuNi9Sn2 wird auf „federhart“ kaltumgeformt und zu federnden Elektrobauteilen verarbeitet (**Bild 1**).

CuNi25 ist der Werkstoff für die „Silbermünzen“ 50 Pfennig, 1 DM, 2 DM und 5 DM.

Zu den **Widerstandslegierungen** gehören z. B. die Werkstoffe CuNi6 und CuNi44. Die Legierung CuNi44, auch **Konstantan** genannt, hat einen praktisch temperaturunabhängigen spezifischen Widerstand von $0,49 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$. Widerstandslegierungen werden zu elektrischen Widerständen jeglicher Art verarbeitet (**Bild 1**).

Kupfer-Nickel-Legierungen werden zu federnden Kontakten und zu Widerstandsdrähten verarbeitet.

Tabelle: Kupfer-Nickel-Legierung		
Werkstoffkurzzeichen	Besondere Eigenschaften	Hauptanwendungen
CuNi 9 Sn 2	Gut kaltumformbar auf „federhart“	Federnde Kontakte, Lötrahmen
CuNi 25	Silberhelle Farbe, verschleißfest	Werkstoff der „Silbermünzen“
CuNi 6	Temperaturkonstanter elektrischer Widerstand	Niedrigohmige elektrische Widerstände
G-CuNi 30	Beste Korrosionsbeständigkeit	Rührwerke, Pumpen, Leitungen

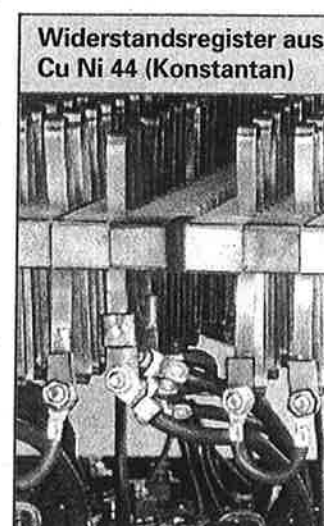
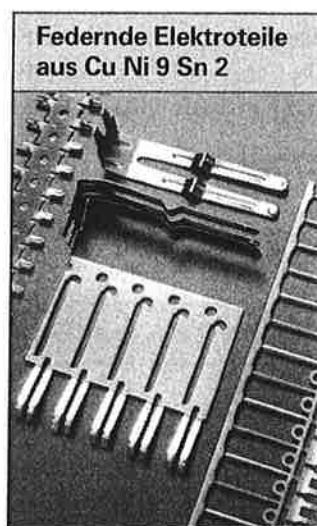


Bild 1: Bauteile aus Kupfer-Nickel-Legierung

3.8.8 Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen (Neusilber)

Die besondere Eigenschaft der Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen ist die silberähnliche Farbe sowie die Korrosions- und Anlaufbeständigkeit gegen Luft, Wasser und schwache Säuren. Außerdem haben sie gute Festigkeits- und Federungseigenschaften sowie ausreichende elektrische Leitfähigkeit. Die Legierung CuNi18Zn20 wird z. B. für federnde Kontakte in Schaltern, für Meßzeuge und für Sicherheitsschlüssel verwendet (**Bild 2**).

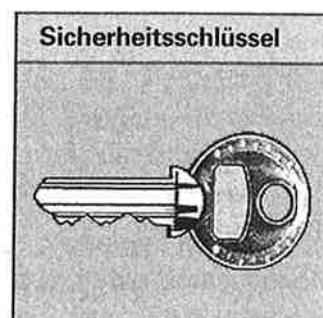
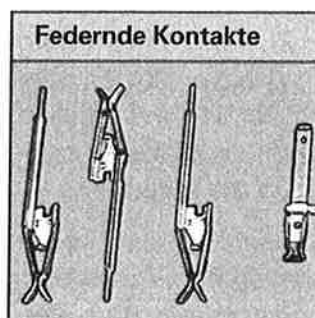


Bild 2: Teile aus Cu Ni 18 Zn 20

Wiederholungsfragen

- 1 Welche besonderen Eigenschaften hat Kupfer?
- 2 Welche Kupfersorten werden in der Elektrotechnik bevorzugt verwendet?
- 3 Was versteht man unter Messing, Bronze und Neusilber?
- 4 Wie ändern sich die Festigkeit und die Leitfähigkeit von Cu-Zn-Legierungen mit dem Zinkgehalt?
- 5 Wie lautet der Kurzname für eine Kupfer-Zinn-Legierung mit rund 10 % Zinn?
- 6 Woraus besteht Konstantan?