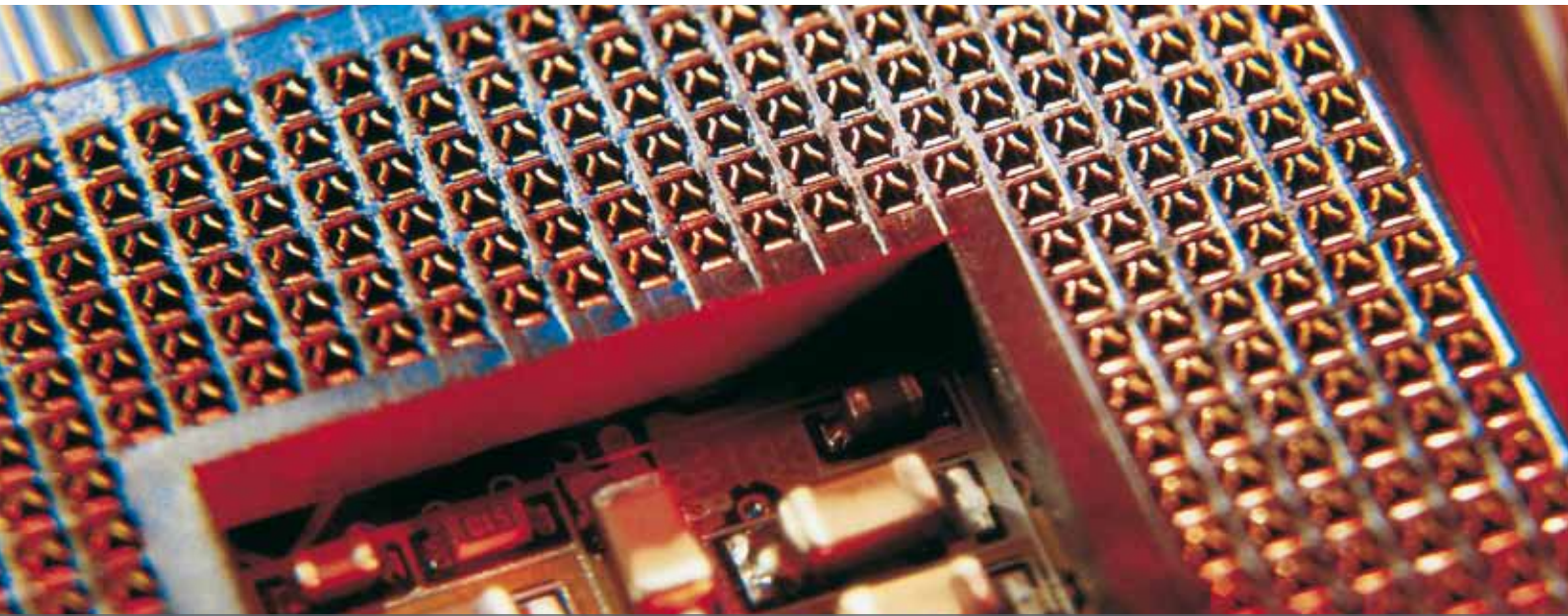




Deutsches
Kupferinstitut
Copper Alliance



Niedriglegierte Kupferwerkstoffe

Eigenschaften · Verarbeitung · Verwendung

PERFORMANCE MATTERS

Technologie Forum
Kupfer
Wissen · Verstehen · Anwenden





DKI-i8-2012

In der Reihe TechnologieForum Kupfer im Verlag des Deutschen Kupferinstituts erscheinen rein technisch ausgerichtete Broschüren.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
1.1	Einteilung	6
1.2	Genormte niedriglegierte Kupferwerkstoffe und ihre Anwendungen	7
2.	Werkstoffe mit sehr hoher Leitfähigkeit und guter Zerspanbarkeit	9
2.1	Kupfer-Tellur	9
2.2	Kupfer-Blei-Phosphor	10
2.3	Kupfer-Schwefel	11
3.	Werkstoffe mit sehr hoher Leitfähigkeit und hoher Entfestigungstemperatur	12
3.1	Kupfer-Silber	12
3.2	Kupfer-Zirkon	13
3.3	Kupfer-Zink	15
4.	Werkstoffe mit hoher bzw. mittlerer Leitfähigkeit und mittlerer Festigkeit	16
4.1	Kupfer-Magnesium	16
4.2	Kupfer-Eisen	17
4.3	Kupfer-Chrom	19
4.4	Kupfer-Chrom-Zirkon	20
4.5	Kupfer-Nickel-Phosphor	22
4.6	Kupfer-Zinn	24
5.	Werkstoffe mit mittlerer Leitfähigkeit und hoher Festigkeit	25
5.1	Kupfer-Beryllium	25
5.2	Kupfer-Kobalt-Beryllium / Kupfer-Nickel-Beryllium	26
5.3	Kupfer-Nickel-Silizium	27
5.4	Kupfer-Nickel-Zinn	29
6.	Werkstoffe ohne besondere Anforderung an die elektrische Leitfähigkeit	30
6.1	Kupfer-Mangan	30
6.2	Kupfer-Silizium und Kupfer-Silizium-Mangan	31
7.	Dispersionsgehärtete Legierungen	32
8.	Literatur / Normen	33

1. Einleitung

Kupfer ist ein Werkstoff mit sehr hoher Leitfähigkeit für Wärme und Elektrizität, ausgezeichneter Korrosionsbeständigkeit, mittlerer Festigkeit und guter Umformbarkeit. In manchen Fällen sind einzelne Eigenschaften des reinen Kupfers (**Tabelle 1**) für den Anwendungsfall nicht ausreichend. Diese Bedürfnisse waren Anlass zur Entwicklung einer Reihe von Werkstoffen auf Kupferbasis mit geringen Konzentrationen zulegerter Elemente [1, 20].

Durch verhältnismäßig geringe Zusätze anderer Elemente können eine oder mehrere Eigenschaften des reinen Kupfers – z. B. Festigkeit (**Bild 1**), Entfestigungstemperatur (**Bild 2**) und Zerspanbarkeit – erheblich verbessert werden, während andere charakteristische Eigenschaften wie elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit weitgehend erhalten bleiben.

Elemente dieser Art sind u. a. Beryllium, Chrom, Eisen, Kobalt, Magnesium, Mangan, Nickel, Phosphor, Schwefel, Silber, Silizium, Tellur, Titan, Zink, Zinn, Zirkon, und zwar allein oder in Kombinationen.

Einige Elemente wie z. B. Mangan und Silizium setzen die Leitfähigkeit zwar stärker herab (**Bild 3**), verbessern jedoch Warmfestigkeit, Schweißbeignung und Korrosionsbeständigkeit gegenüber bestimmten Medien.

Der Einfluss auf die Eigenschaften hängt auch weitgehend von der Menge der zugesetzten Elemente ab.

Symbol	Cu
Ordnungszahl	29
Relative Atommasse	63,546
Dichte	8,96 g/cm ²
Schmelzpunkt	1083,4 °C
Siedepunkt	2567 °C
Elektrische Leitfähigkeit bei 20 ° C	max. 60 MS/m (entsprechen 103,4 % IACS ¹)
Wärmeleitfähigkeit bei 20 ° C	ca. 395 W/mK
Temperatur-Koeffizient der el. Leitfähigkeit	0,0039 / K
Koeffizient der linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten	17x10 ⁶ / K (25 ° C bis 300 ° C)
Spezifische Wärme	0,38 J/gK (20 ° C bis 400 ° C)
Schmelzwärme	214 J/g
Kristallstruktur	kubisch flächenzentriert (kfz)

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften von Reinkupfer

¹Die elektrische Leitfähigkeit wird in MS/m oder IACS (International Annealed Copper Standard) angegeben: 100 % IACS entsprechen 58 MS/m (für gewöhnliche Güte Cu-ETP: 58 MS/m)

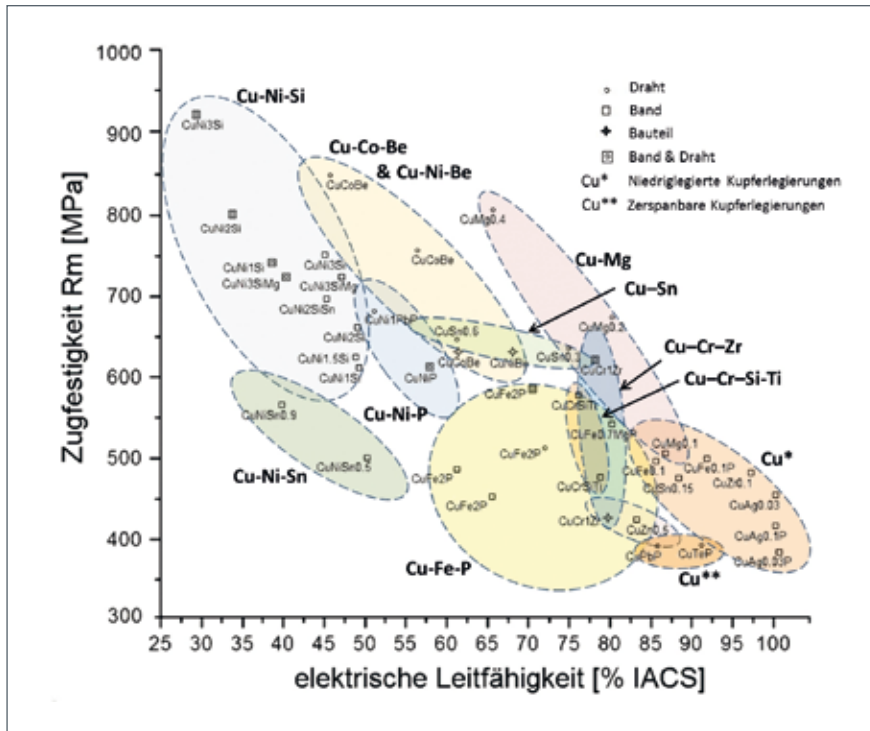


Bild 1: Eigenschaftsprofil niedriglegierter Kupferwerkstoffklassen , DKI 4501

Das Verhalten dieser Werkstoffe gegenüber Temperatureinflüssen ist bemerkenswert. Eine Versprödung tritt bei tieferen Temperaturen (bis -200°C) nicht ein.

Kupferlegierungen mit niedrigen Gehalten an den genannten Elementen bilden die Gruppe der „niedriglegierten Kupferwerkstoffe“. In den meisten Fällen bleibt dabei die Konzentration der einzelnen

Elemente unter 1 bis 2 % und in der Summe unter 5 % (s. Ausklapptabelle). Nicht berücksichtigt werden in dieser Werkstoffgruppe Kupferlegierungen wie CuZn_5 , CuSn_2 , CuSn_4 , CuSn_5 , CuAl_5As oder CuNi_2 , weil diese nach DIN CEN/TS 13388 üblicherweise den Kupfer-Zinn-, Kupfer-Zinn-, Kupfer-Nickel bzw. Kupfer-Aluminium-Legierungen zugeordnet werden.

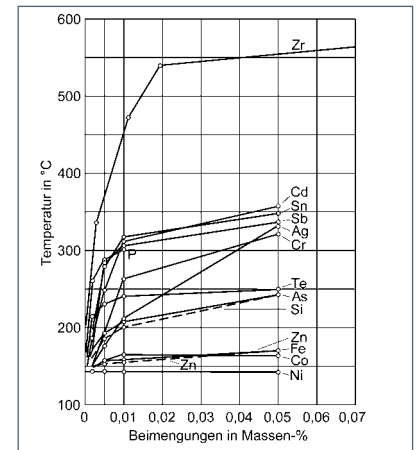


Bild 2: Erhöhung der Entfestigungstemperatur des Kupfers durch Legierungszusätze [1], DKI 3954

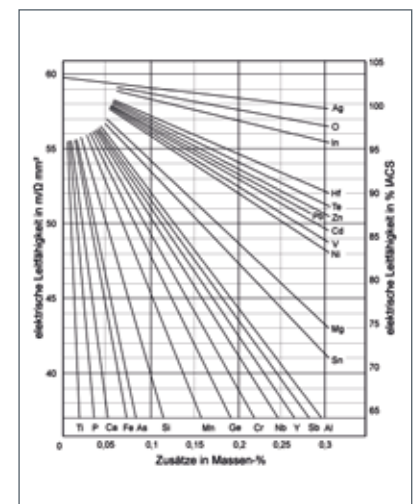


Bild 3: Einfluss von Zusätzen auf die elektrische Leitfähigkeit [2], DKI 3373

1.1 Einteilung

Es wird zwischen nicht aushärtbaren und aushärtbaren Legierungen unterschieden (Tabelle 2).

Zu den **nicht aushärtbaren** Legierungen werden jene gerechnet, bei denen sich die Festigkeit nur durch Kaltumformung verbessern lässt.

Bei den **aushärtbaren** Legierungen sind Verbesserungen der Festigkeitswerte neben dem Einfluss durch eine Kaltumformung vor allem durch geeignete Wärmebehandlungen zu erreichen.

Die Voraussetzungen für die Aushärtbarkeit sind:

1. Abnahme der Löslichkeit der Legierungszusätze bei sinkender Temperatur,
2. Einfrieren des homogenen übersättigten Gefügestandes,
3. Ausscheidung einer zweiten Phase bei mittleren Temperaturen und
4. verfestigende Eigenschaften der ausgeschiedenen Phase.

Die Einteilung in nicht aushärtbare und aushärtbare Legierungen wird im Folgenden nicht angewendet.

Um die Übersicht zu erleichtern, werden in den Abschnitten 1 bis 5 die niedriglegierten Kupferwerkstoffe nach ihren spezifischen Eigenschaften bzw. Anwendungsgebieten gegliedert.

Dabei sind Überschneidungen in Abhängigkeit von Produkt- bzw. Halbzeugform, Abmessung, Werkstoffzustand und vielen anderen Einflussgrößen nicht zu vermeiden.

Es werden auch einige niedriglegierte Kupferwerkstoffe berücksichtigt, die nicht genormt sind, sich jedoch im praktischen Einsatz bewährt haben.

Diese werden in der Ausklapptabelle als Sonderwerkstoffe bezeichnet.

Werkstoffbezeichnung

Kurzzeichen		EN Nummer	UNS Nummer
CuBe2		CW101C	C17200
CuCo1Ni1Be		CW103C	-
CuCo2Be		CW104C	C17500
CuCr1 / CuCr1-C		CW105C / CC140C	C18200/C81500
CuCr1Zr		CW106C	C18150
CuFe2P	Aushärtbare Legierungen	CW107C	C19400
CuNi1P		CW108C	C19000
CuNi1Si		CW109C	C19010
CuNi2Be		CW110C	C17510
CuNi2Si		CW111C	C70260
CuNi3Si1		CW112C	C70250
CuZr		CW120C	C15000
<hr/>			
CuAg0,1		CW013A	C11600
CuMg0,4		CW128C	C18665
CuPb1P		CW113C	C18700
CuSP		CW114C	C14700
CuSi1	Nicht aushärtbare Legierungen	CW115C	C65100
CuSi3Mn1		CW116C	C65500
CuSn0,15		CW117C	C14410
CuTeP		CW118C	C14500
CuZn0,5		CW119C	-

Tabelle 2: Einteilung der niedriglegierten Kupferlegierungen in aushärtbaren und nichtaushärtbaren Gruppen

1.2 Genormte niedriglegierte Kupferwerkstoffe und ihre Anwendungen

Die Zusammensetzung der niedriglegierten Kupferwerkstoffe ist in DIN CEN/TS 13388 festgelegt. Zur Bewertung der elektrischen Leitfähigkeit und der Zugfestigkeit ist ein Schlüssel angegeben (Tabelle 3).

In welchen Halbzeugformen die niedriglegierten Kupfer-Knetwerkstoffe hergestellt werden und in welchen Halbzeug- bzw. Produktnormen sie enthalten sind, ist aus Tabelle 10 der Norm DIN CEN/TS 13388 zu ersehen (Tabelle 4).

Von den Normen, die u. a. auch niedriglegierte Kupfer-Knetwerkstoffe berücksichtigen, sind jene der Luftfahrt (z. B.: LN 9421 Federdrähte aus Kupfer-Knetlegierungen, gezogen; Maße) und der **Elektrotechnik (Bild 3a)** unter CENELEC/TC 9X noch zu erwähnen.

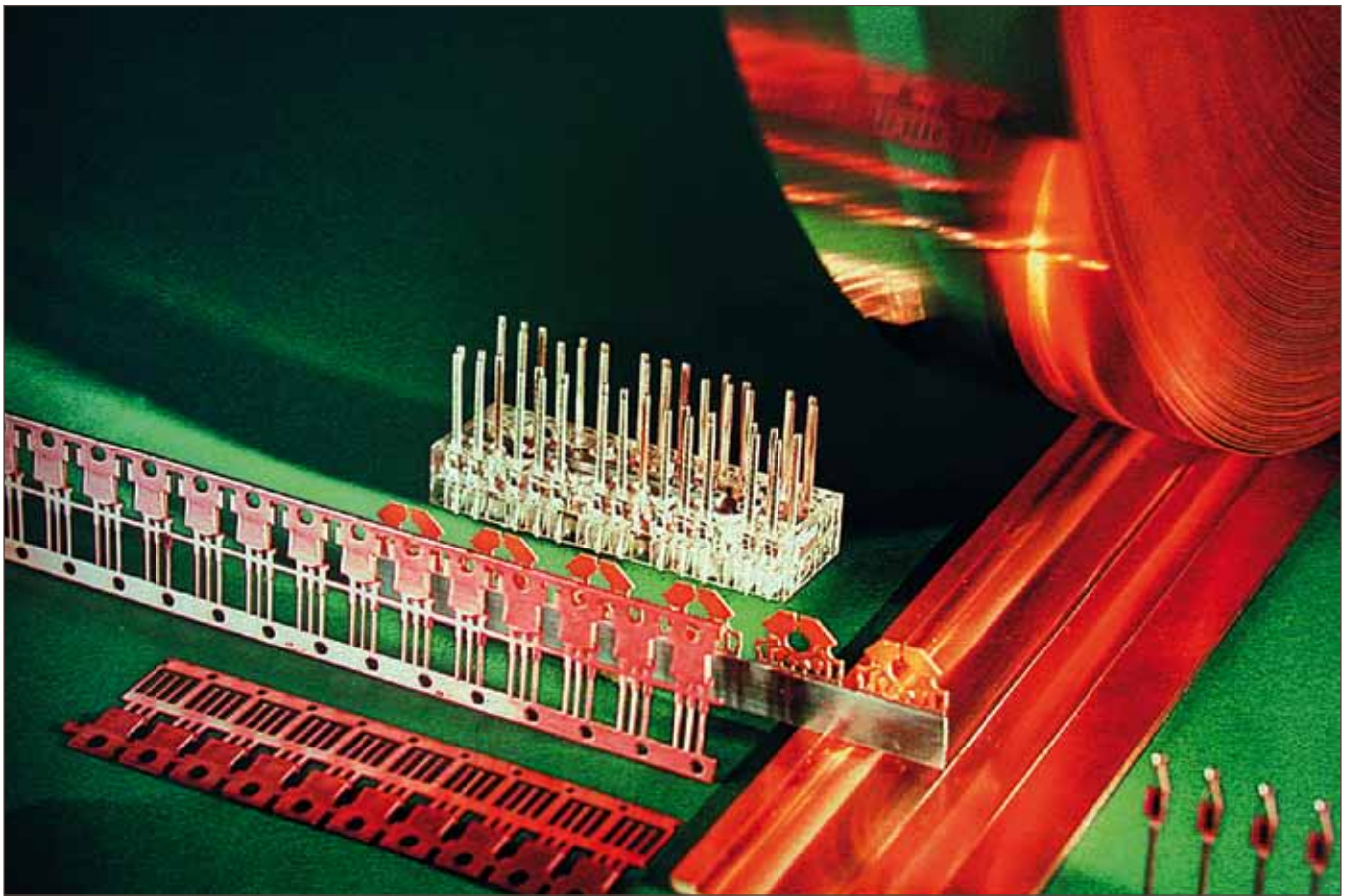


Bild 3a: Bauelemente für die Elektrotechnik (DKI 6231)

elektrische Leitfähigkeit MS/m	Bewertung	Zugfestigkeit (R_m) MPa	Bewertung
über 12 bis 36	mittlere	über 390 bis 590	mittlere
über 36 bis 48	hohe	über 590 bis 980	hohe
über 48	sehr hohe	über 980	sehr hohe

Tabelle 3: Einteilung der niedriglegierten Werkstoffe in Leitfähigkeits- und Festigkeitsklassen

Gussprodukte sind in der Norm DIN EN 1982 definiert.
Als niedriglegierter Kupfer-Gusswerkstoff ist nur Guss-Kupfer-Chrom (CuCr1-C) nach DIN EN 1982 genormt.

In der Norm sind unter anderem Zusammensetzung, mechanische Eigenschaften und elektrische Leitfähigkeit angegeben.

Die niedriglegierten Kupferwerkstoffe sind zum einen Werkstoffe mit hoher/mittlerer Leitfähigkeit, die vorzugsweise in der Elektrotechnik [3, 21] Verwendung finden (z. B. Kupfer-Silber, Kupfer-Chrom-Zirkon, Kupfer-Magnesium, usw.).

Zum anderen gehören dazu Werkstoffe ohne besondere Anforderung an die elektrische Leitfähigkeit, die vorzugsweise **im Apparatebau** eingesetzt werden (z. B. Kupfer-Silizium-Mangan, usw.).

Werkstoffbezeichnung		Produktformen und Verfügbare Werkstoffe															Schmiedevormaterial und Schmiedestücke	C*													
		Walzflacherzeugnisse						Rohre						Stangen, Profile, Drähte																	
Kurzzeichen	Nummer	EN 1172	EN 1652	EN 1653	EN 1654	EN 1758	EN 13148	EN 13599	EN 14436	EN 1057	EN 12449	EN 12450	EN 12451	EN 12452	EN 12735-1	EN 12735-2	EN 13348	EN 13349	EN 13600	EN 1977	EN 12163	EN 12164	EN 12166	EN 12167	EN 12168	EN 13601	EN 13602	EN 13605	EN 12165	EN 12420	EN 13604
CuAg0,10P	CW016A							x										x													
CuBe1,7	CW100C				x		x		x																						
CuBe2	CW101C		x		x		x		x													x		x						x	x
CuCo1Ni1Be	CW103C		x																			x		x						x	x
CuCo2Be	CW104C		x		x		x		x													x		x						x	x
CuCr1	CW105C																					x				x				x	x
CuCr1Zr	CW106C																					x			x					x	x
CuFe2P	CW107C					x	x	x		x																					
CuNi1P	CW108C																						x								
CuNi1Si	CW109C																						x							x	x
CuNi2Be	CW110C		x		x		x		x														x							x	x
CuNi2Si	CW111C		x		x		x		x														x							x	x
CuNi3Si1	CW112C																						x							x	x
CuPb1P	CW113C																														
CuSP	CW114C																														
CuSi1	CW115C																														
CuSi3Mn1	CW116C																														
CuSn0,15	CW117C						x	x		x																					
CuTeP	CW118C																														
CuZn0,5	CW119C		x	x				x		x																					
CuZr	CW120C																														

Tabelle 4: Produktformen für genormte niedriglegierte Kupferwerkstoffe in Anlehnung an DIN CEN/TS 13388 (Tab. 10)

*C: Platten, Bleche, Bänder, nahtlose Rohre, Stangen, Drähte und Profile für Elektronenröhren, Halbleiterbauelemente und für die Anwendung in der Vakuumtechnik

2. Werkstoffe mit hoher Leitfähigkeit und guter Zerspanbarkeit

Reines Kupfer hat zwar von den Gebrauchsmetallen die höchste elektrische Leitfähigkeit, lässt sich jedoch nur schwer auf Drehautomaten zerspanen (Bild 4). Die Zerspanbarkeit wird durch Zusätze von Tellur (Bild 5), Schwefel oder Blei verbessert.

Eine generelle Klassifizierung der Zerspanbarkeit dieser Legierungen ist nur unter Berücksichtigung der Zerspanungsverfahren möglich (siehe i018: Richtwerte für die spanende Bearbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen).

2.1 Kupfer-Tellur

Tellur ist im Kupfer nur in äußerst geringem Maße löslich und liegt in fein verteilter Form als Cu_2Te vor. In DIN CEN/TS 13388 ist mit CuTeP nur eine phosphordesoxidierte, sauerstofffreie Legierung genormt (Ausklapptabelle).

Die sauerstoffhaltige Legierung CuTe ist wegen der Anfälligkeit für Wasserstoffversprödung und des höheren Werkzeugverschleißes bei der spanabhebenden Bearbeitung in der Norm nicht berücksichtigt worden.

2.1.1 Eigenschaften von CuTeP

CuTeP ist eine gut zerspanbare Legierung mit hoher Leitfähigkeit (90-96 % IACS). Durch die tellurhaltigen Einschlüsse ist die Kerbschlagzähigkeit von CuTeP gegenüber derjenigen des Kupfers herabgesetzt. Sie beträgt etwa 39 bis 78 J/cm². Bei spanend gefertigten Schrauben, bei denen das maximale Drehmoment an den Schraubenköpfen begrenzt ist, ist das besonders zu

beachten. Eine wichtige Eigenschaft ist die gegenüber Kupfer erhöhte **Entfestigungstemperatur (ca. 350°C)** infolge der Löslichkeit geringer Mengen Tellur im Kupfer, die jedoch die elektrische Leitfähigkeit nur wenig beeinflussen. Die gute Korrosionsbeständigkeit des Kupfers wird durch die geringen Tellurzusätze nicht beeinträchtigt. Weitere mechanische und physikalische Eigenschaften von CuTeP sind der Ausklapptabelle zu entnehmen.

2.1.2 Verarbeitung

CuTeP lässt sich **kalt umformen** und durch Walzen und Ziehen zu Halbzeug verarbeiten. Das Formänderungsvermögen ist allerdings schlechter als dasjenige von Kupfer. Die zur Wiederherstellung der vollen Umformbarkeit erforderliche **Weichglühung** erfolgt im Temperaturbereich 425-650°C. Zwischen 750°C und 875°C ist CuTeP sehr gut **warmumformbar**. Deshalb ist dieser Werkstoff sehr gut geeignet für Schmiedestücke, die spanend zu bearbeiten sind. Lediglich beim Warmwalzen können sich bereits kleine Mengen Tellur schädlich auswirken.

Die gute Zerspanbarkeit ist neben der hohen Leitfähigkeit das herausragende Merkmal von CuTeP. Es bildet bei der Zerspanung kurze Späne und ist daher gut auf Automaten zu zerspanen. Die Zerspanbarkeit beträgt 80 % (auch **Zerspanbarkeitsindex** genannt) derjenigen des Automatenmessings **CuZn39Pb3**². Bei der Zerspanung sollten hartbeschichtete Werkzeuge verwendet werden, um den Verschleiß zu minimieren. Besonders gute Werkstückoberflächen erhält man bei einer Zerspanung mit leicht gefetteten Mineralölen niedriger Viskosität als Schmiermittel.



Bild 4: Spanbildung schwer zerspanbarer Werkstoff CuCr1Zr



Bild 5: Spanbildung gut zerspanbarer Werkstoff CuTeP

² CuZn39Pb3 gilt in Europa als Referenz für die Zerspanung (in den USA dagegen CuZn36Pb3) und hat einen Zerspanbarkeitsindex von 100%

Kurzzeichen	Warmumformung (weichgeglüht)	Kaltumformung (weichgeglüht)	Zerspanbarkeit	Verbindungsarbeiten					Oberflächenbehandlung			
				Weichlöten	Hartlöten	Gas-schweißen	Schutzgas-schweißen	Widerstandsschweißen	Mechanisches Polieren	Elektrochem. Polieren	Galvanisierbarkeit	Eignung für Tauchverzinnung
CuAg0.03	sehr gut	sehr gut	schlecht	gut	mittel	schlecht	schlecht	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut
CuAg0.10	gut	sehr gut	schlecht	gut	mittel	schlecht	schlecht	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut
CuAg0.10P	gut	sehr gut	schlecht	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut
CuMg0.4	gut	sehr gut	mittel	gut	gut	gut	gut	gut	sehr gut	gut	gut	gut
CuMg0.7	gut	sehr gut	mittel	gut	gut	gut	gut	gut	sehr gut	gut	gut	gut
CuMn2	gut	sehr gut	mittel	gut	gut	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	gut	gut	gut
CuMn5	gut	sehr gut	mittel	gut	gut	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	gut	gut	gut
CuSi2Mn	gut	sehr gut	schlecht	gut	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	gut	mittel	mittel	gut
CuSi3Mn1	gut	sehr gut	schlecht	mittel	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	gut	mittel	mittel	gut
CuSP	mittel	gut	sehr gut	gut	mittel	schlecht	schlecht	gut	gut	gut	gut	gut
CuTeP	sehr gut	gut	sehr gut	gut	gut	gut	gut	sehr gut	gut	gut	gut	gut
(CuZn0.7)	gut	sehr gut	mittel	sehr gut	sehr gut	gut	sehr gut	gut	gut	gut	gut	gut
(CuFe2P)	gut	gut	mittel	gut	mittel	sehr gut	sehr gut	gut	gut	gut	gut	gut
CuBE1.7	gut	gut	mittel	gut	gut	mittel	gut	gut	gut	gut	gut	gut
CuBe2	gut	gut	mittel	gut	gut	mittel	gut	gut	gut	gut	gut	gut
CuCo2Be	gut	gut	mittel	gut	gut	mittel	gut	gut	gut	gut	gut	gut
CuCr1	gut	sehr gut	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	gut	gut	mittel	gut	gut
CuCr1Zr	gut	gut	mittel	mittel	mittel	schlecht	mittel	gut	gut	mittel	gut	gut
CuNi1.5Si	gut	gut	mittel	gut	mittel	schlecht	mittel	gut	gut	gut	gut	gut
CuNi2Si	gut	gut	mittel	gut	mittel	schlecht	mittel	gut	gut	gut	gut	gut
CuNi3Si	gut	gut	mittel	gut	mittel	schlecht	mittel	gut	gut	gut	gut	gut
CuZr	gut	gut	mittel	mittel	mittel	schlecht	mittel	gut	gut	mittel	gut	gut
Gusslegierung nach DIN EN 1982												
CuCr1-C	-	-	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	gut	gut	mittel	gut	gut

Tabelle 5: Hinweise auf die Weiterverarbeitung der niedriglegierte Kupferwerkstoffe.

CuTeP ist sehr gut **wechlötbar** mit Blei-Zinn- und Zinn-Blei-Löten nach DIN EN ISO 9453 und DIN EN 1707-100. Flussmittel, z. B. vom Typ 2.1.2 nach DIN EN 29454-1, können verwendet werden. Zum **Hartlöten** eignen sich vor allem die niedrigschmelzenden Silberlote nach DIN EN ISO 17672, mit Flussmitteln vom Typ FH10 nach DIN EN 1045.

CuTe ist nur bedingt **schweißbar**. Die üblichen Verfahren der **Oberflächenbehandlung** lassen sich an Kupfer-Tellur gut durchführen (**Tabelle 5**). Wenn Kupfer-Tellur mit Silber plattiert werden soll, ist eine vorherige Verkupferung zu empfehlen.

2.1.3. Verwendung

CuTeP hat eine hohe elektrische Leitfähigkeit und wird insbesondere in der

Elektronik und Elektrotechnik verwendet, z. B. für Kontakte, aber auch für Schweißbrennerdüsen, Schrauben, Muttern, Teile für Verschraubungen, Armaturenteile u. a. Wenn eine gute Zerspanbarkeit neben hoher elektrischer Leitfähigkeit und erhöhter Entfestigungstemperatur gefordert wird, ist CuTeP ein geeigneter Werkstoff.

2.2. Kupfer-Blei-Phosphor

Die Legierung CuPb1 wird typischerweise mit Phosphor desoxidiert, wobei das Blei dem Kupfer die guten Zerspanungseigenschaften verleiht. Als einzige Variante ist die Legierung CuPb1P in DIN CEN/TS 13388 genormt.

2.2.1 Eigenschaften

Bleihaltiges zerspanbares Kupfer hat eine sehr hohe Leitfähigkeit von ca. 96 % IACS,

die im Vergleich zu Cu-ETP nur geringfügig tiefer ist und für die meisten stromführenden Anwendungen ausreicht.

Das Schmelzintervall liegt – abgesehen vom reinen Blei – zwischen 953°C und 1080°C.

Die mechanischen Eigenschaften der genormten Legierung CuPb1P in Stangenform (siehe DIN EN 12164) entsprechen denen von CuTeP (**Ausklapptabelle**).

2.2.2 Verarbeitung

Bleihaltiges Kupfer lässt sich gut kalt umformen. Üblicherweise werden für Zerspanungsanwendungen Stangen im harten Zustand verwendet, für Kaltumformungen werden weiche und halbharte Zustände bevorzugt.

Die zur Wiederherstellung der vollen Umformbarkeit erforderliche **Weichglühung** ist im Temperaturbereich zwischen 425°C und 650°C vorzunehmen. Zwischen 750°C und 875°C kann warmumgeformt werden; das wird jedoch aufgrund des Bleigehaltes nicht empfohlen.

Der Werkstoff **CuPb1P** lässt sich sehr gut **weichlöten** und gut **hartlöten**. Wegen des Bleigehaltes ist das Schweißen bedingt anwendbar.

Die Legierung ist aufgrund des Bleigehaltes sehr gut zerspanbar und hat einen Zerspanbarkeitsindex von ca. 80 %.

2.2.3 Verwendung

Aufgrund der guten Eigenschaften von CuPb1P gibt es eine Vielzahl von Anwendungen in der Herstellung von spanend bearbeiteten Teilen aus Stangen für tragende Elemente wie Fixierstifte, Schrauben und Nägel, die bei Raumtemperatur angewendet werden. Zudem werden aus Stangen Nägel mit gebohrtem Schaft gefertigt. Dieser Werkstoff wird ebenfalls für Feinstzerspanung verwendet. Für elektrische Stecker und diverse Motorteile findet diese Legierung breite Verwendung.

2.3. Kupfer-Schwefel

Die Löslichkeit von Schwefel im Kupfer ist gering. In DIN CEN/TS 13388 ist mit CuSP nur eine desoxidierte, sauerstofffreie Sorte genormt (**Ausklapptabelle**).

2.3.1 Eigenschaften

Bereits kleine Schwefelgehalte erhöhen die **Entfestigungstemperatur** des Kupfers auf etwa 300°C. Infolge der geringen Löslichkeit von Schwefel im Kupfer werden die **elektrische Leitfähigkeit** und **Wärmeleitfähigkeit** nur wenig beeinflusst. Die Korrosionsbeständigkeit von CuSP entspricht etwa derjenigen des unlegierten Kupfers.

2.3.2 Verarbeitung

CuSP ist **kalt-** und **warmumformbar**. Die Warmumformtemperatur liegt zwischen 700°C und 900°C. Sein Zerspanbarkeitsindex liegt bei 80 %. **Weichlöten** lässt sich CuSP mit Blei-Zinn und Zinn-Blei-Loten nach DIN EN ISO 9453 und DIN EN 1707-100 unter Verwendung eines Kupferflussmittels, z. B. 2.1.2 nach DIN EN 29454-1.

Hartlöten erfolgt am besten mit niedrigschmelzenden Silberloten nach DIN EN ISO 17672, mit Flussmittel FH10 nach DIN EN 1045. Die **Schweiß-eignung** von CuSP ist gering.

2.3.3 Verwendung

CuSP wird vorwiegend für Automaten-drehteile und Klemmen in der Elektronik verwendet. Außerdem kommt es z. B. für Düsen in Schweiß- und Schneidbrennern, für Motorenteile, Ventile, Fittings usw. in Frage.

3. Werkstoffe mit sehr hoher Leitfähigkeit und hoher Entfestigungstemperatur

Durch geeignete Legierungszusätze wie z. B. Silber oder Zirkon kann man die Entfestigungstemperatur des Kupfers erhöhen (vgl. Bild 2), ohne die elektrische Leitfähigkeit wesentlich zu beeinträchtigen (vgl. Bild 3). Dies ist in vielen Fällen der Elektrotechnik von Vorteil, z. B. für stromführende Teile, die bei höheren Temperaturen mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt sind oder die durch eine Weichlötung nicht entfestigen sollen (Kommutatorlamellen, Ankerwicklungen usw.).

3.1. Kupfer-Silber

Kupfer-Silber bildet ein eutektisches System mit einer maximalen Löslichkeit von 8 % Silber bei der eutektischen Temperatur von 779°C.

Die handelsüblichen Legierungen enthalten 0,03 % bis 0,12 % Ag und haben ein einphasiges Gefüge. In diesem Bereich bewirkt Silber höhere Entfestigungstemperaturen. Die Normen DIN EN 1976 und DIN EN 1977 enthalten Kupfer-Silber-Legierungen mit

verschiedenen Silbergehalten auf Basis von sauerstoffhaltigem, sauerstofffreiem oder phosphordesoxidiertem Kupfer.

3.1.1 Eigenschaften

Kupfer-Silber-Legierungen haben gegenüber reinem Kupfer den Vorteil, die durch Kaltumformung erreichte Kaltverfestigung auch bei relativ hohen Temperaturen nicht zu verlieren. Die Entfestigungstemperatur von CuAg0,10 liegt bei etwa 300°C.

Eine weitere hervorragende Eigenschaft dieser Werkstoffe ist die relativ hohe **Zeitstandfestigkeit** [4], die für Anwendungen von großer Bedeutung ist, in denen Belastungen bei erhöhten Temperaturen auftreten. Tabelle 6 lässt diese Vorteile am Beispiel der Legierungen CuAg0,04 und CuAg0,10 klar erkennen. Durch Silber werden die hohe **elektrische Leitfähigkeit** und **Wärmeleitfähigkeit** des Kupfers nur wenig beeinflusst (vgl. Bild 3).

3.1.2 Verarbeitung

Die silberlegierten Werkstoffe (CuAg) lassen sich wie Reinkupfer gut **kalt-** und **warmumformen**. Die Warmumformung erfolgt im Temperaturbereich zwischen 750°C und 900°C. Die Zerspanbarkeit entspricht etwa derjenigen des unlegierten Kupfers. Bei **Wärmebehandlungen** unter **reduzierender Atmosphäre** müssen die sauerstofffreien Werkstoffe CuAg(P) oder CuAg(OF) eingesetzt werden.

Bei vorsichtigem **Weichlöten** (max. 10s bei 360°C) ist es für viele Anwendungszwecke vorteilhaft, dass die mechanischen Eigenschaften des kaltumgeformten Werkstoffes erhalten bleiben.

Es kommen vorzugsweise Zinn-Blei-Lote nach DIN EN ISO 9543 und DIN EN 1707-100 mit 40 bis 60 % Sn zum Einsatz. Beim **Hartlöten** wird meist mit den niedrigschmelzenden Silberloten nach DIN EN ISO 17672 gearbeitet. Beim Schutzgasschweißen muss wegen der Gefahr der Werkstoffversprödung durch Wasserstoffkrankheit das sauerstofffreie CuAg(P) bzw. CuAg(OF) gewählt werden. CuAg(P) ist z. B. mit CuAg1 nach DIN EN ISO 24373 gut schweißbar und liefert mit diesem Zusatz Schweißnähte mit guter elektrischer Leitfähigkeit.

3.1.3 Verwendung

Als wesentliche Anwendungsbeispiele sind zu nennen: Fahrleitungsdrähte mit erhöhter Festigkeit (Hochgeschwindigkeitszüge), Kommutatorlamellen, Rotorwindungen in Elektromotoren, Transformatoren und Generatoren (Bild 6) mit erhöhter Temperaturbeanspruchung, Spulen für induktive Erhitzung, Elektroden zum Widerstandsschweißen von Aluminium.

Prüftemperatur (°C)	Werkstoffbezeichnung	Prüfbelastung [MPa]	Kriechdehnung (%) nach 5h	Prüfzeit bis zum Bruch (h)
130	Cu-ETP	55	0,10	1750
	CuAg0,1	55	0,03	1750
	Cu-ETP	96	0,36	1750
	CuAg0,1	96	0,06	1750
	Cu-ETP	138	0,15	1750
	CuAg0,1	138	0,15	1750
175	Cu-ETP	55	0,62	1100
	CuAg0,1	55	0,06	1100
	Cu-ETP	96	0,12	1100
	CuAg0,1	96	0,12	1100
	CuAg0,1	138	0,38	1100
200	Cu-ETP	124	-	40
	CuAg0,03	124	-	>1000
	Cu-ETP	138	-	10
	CuAg0,03	138	-	>1000
	Cu-ETP	154	-	2,5
	CuAg0,03	154	-	80
	Cu-ETP	165	-	0,5
	CuAg0,03	165	-	15

CuAg0,1 mit 0,086 % Ag, kaltverformt

CuAg0,03 mit 0,029 %Ag, weichgeglüht

Tabelle 6: Zeitstandverhalten von Kupfer-Silber im Vergleich zu Kupfer [5]

3.2 Kupfer-Zirkon

Zirkon ist im Kupfer bei 972°C bis etwa 0,17 % löslich [20]. Wegen der mit sinkender Temperatur abnehmenden Löslichkeit von Zirkon sind die Legierungen aushärtbar. In DIN CEN/TS 13388 ist nur ein Werkstoff mit 0,1 % Zr genormt. CuZr ist sauerstofffrei und deshalb auch unempfindlich gegenüber Wasserstoffversprödung.

3.2.1 Eigenschaften

CuZr verbindet hohe Leitfähigkeiten von ca. 54 MS/m (95 % IACS) mit Festigkeitswerte bis 480 MPa, die für Kupferwerkstoffe mit vergleichsweise niedrigem Legierungsgehalt unüblich sind. Darüber hinaus weist der Werkstoff eine sehr hohe Entfestigungstemperatur auf, was bei Lötprozessen von großem Vorteil ist (Bild 7).

Der eigentliche Aushärtungseffekt ist relativ gering und daher erst in Verbindung mit einer Kaltverfestigung von technologischem Nutzen. Deshalb ist der Werkstoff für die praktische Verwendung in der Regel lösungsgeglüht, kaltverfestigt und ausgehärtet oder wird ausgehärtet und anschließend kaltverfestigt. Der Aushärtungseffekt beginnt bei Temperaturen oberhalb 525°C zurückzugehen.

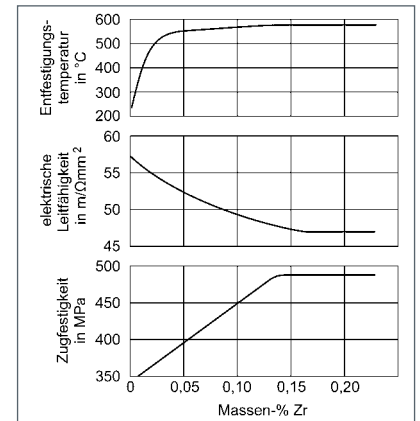


Bild 7: Einfluss des Zirkongehaltes auf einige Eigenschaften von CuZr-Legierungen [6], DKI 3967



Bild 6: Rotor für Turbogenerator mit CuAg-Läuferstäben

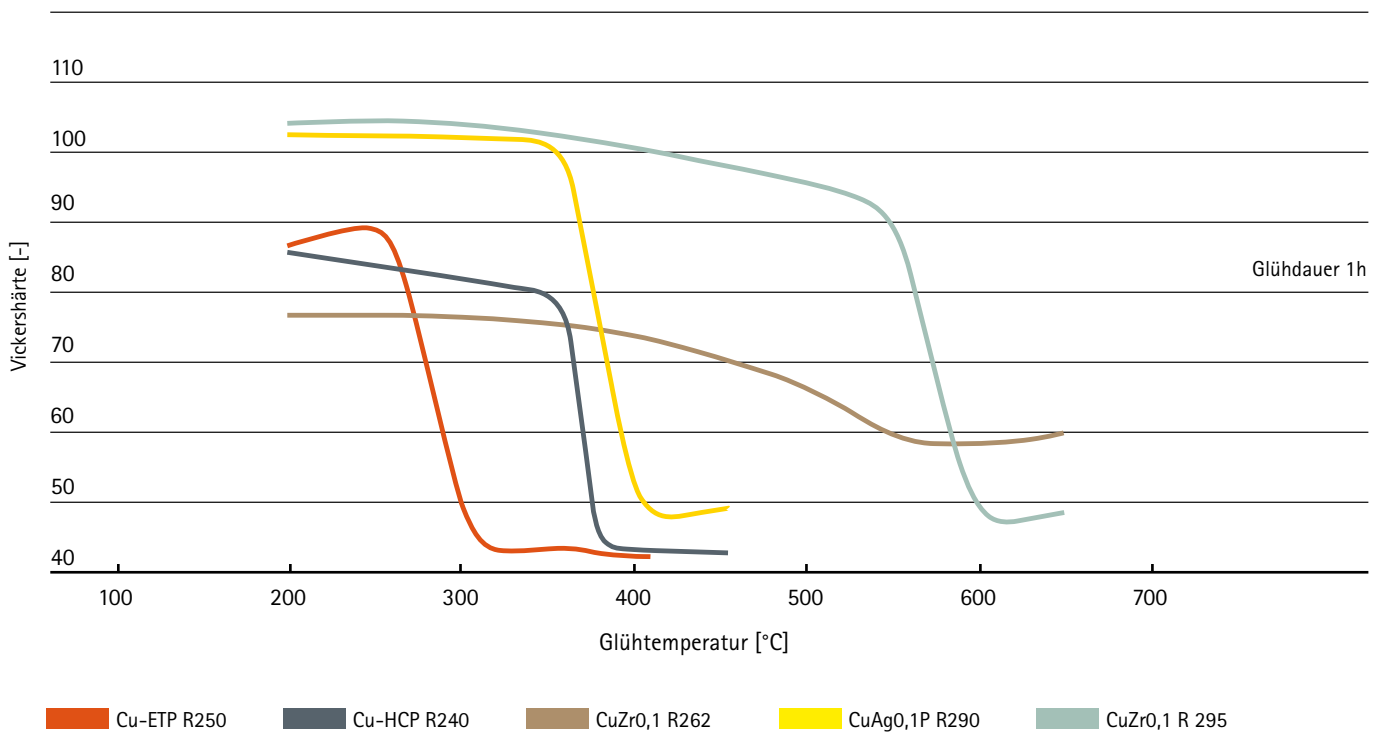


Bild 8: Verbesserung des Erweichungsverhaltens verschiedener hochleitfähiger Kupferwerkstoffe durch zulegieren von Phosphor, Silber und Zirkon, DKI 4502

Nach einer Glühung von z. B. etwa 1 h bei 425°C bleibt eine Verfestigung noch voll erhalten (Bild 8). Hervorzuheben ist ferner, dass Zirkon als Legierungsbestandteil die **Zeitstandfestigkeit** auch bei erhöhten Temperaturen deutlich steigert.

3.2.2 Verarbeitung

Das Gießen von Kupfer-Zirkon erfolgt wegen der hohen Affinität von Zirkon zu Sauerstoff bzw. Stickstoff unter Ausschluss von Luft, z. B. unter einer

Argon-Schutzgasatmosphäre. Bei der Verarbeitung von Kupfer-Zirkon ergeben sich infolge des Ausscheidungsgefüges kleine Unterschiede gegenüber Reinkupfer. Dies macht sich z. B. bei der spanlosen Formgebung bemerkbar. Kupfer-Zirkon lässt sich im lösungsgeglühten Zustand um mehr als 90 % ohne Zwischenglühlung kalt umformen. Zwischenglühungen sind bei Lösungsglüh-temperatur durchzuführen, falls der Werkstoff abschließend ausgehärtet

werden soll. Die **Zerspanbarkeit** ist im ausgehärteten Zustand etwas besser als diejenige des reinen Kupfers.

Beim Fügen unter Wärmezufuhr sind die Entfestigung und die hohe Affinität von Zirkon zum Sauerstoff zu berücksichtigen. Nur das **Weichlöten** erfordert keine zusätzlichen Maßnahmen; wegen der hohen Entfestigungstemperatur können höher schmelzende Weichlote verwendet werden.

Beim Verbinden mit **Hartloten**, deren Arbeitstemperatur über der Entfestigungstemperatur von Kupfer-Zirkon liegt, sind kurze Lötzeiten erforderlich, damit der ausgehärtete Zustand erhalten bleibt. Zum **Schweißen** ist das WIG-Verfahren unter Verwendung von CuAg1 nach DIN EN ISO 24373 als Zusatz am besten geeignet.

3.2.3 Verwendung

Kupfer-Zirkon wählt man in erster Linie für alle Anwendungen, bei denen höchste Leitfähigkeiten und hohe Entfestigungstemperatur gefordert werden. Hierzu zählen Stromschiene und hochleitfähige Steckverbinder. Kupfer-Zirkon ist aufgrund der hohen Entfestigungstemperatur und wegen der hohen Verschleißbeständigkeit für Kommutatorlamellen bei größeren Motoren gut geeignet.

Ferner wird CuZr als Elektrodenwerkstoff für Nahtschweißmaschinen, für Rotorwindungen in hochbelasteten Elektromotoren usw. verwendet.

3.3 Kupfer-Zink

Kupfer und Zink bilden bis zu Zinkgehalten von etwa 37 % homogene Legierungen. Die handelsüblichen, niedriglegierten Werkstoffe enthalten etwa 0,5 bis 0,9 % Zn. Phosphor ist nur in Spuren vorhanden. Wegen der desoxidierenden Wirkung des Zinks sind die Legierungen sauerstofffrei und demzufolge beständig gegen die Wasserstoffversprödung. In der DIN CEN/TS 13388 ist die Legierung CuZn0,5 genormt.

3.3.1 Eigenschaften

Je nach Kaltumformungsgrad liegt die Zugfestigkeit zwischen 220 MPa und 360 MPa. Kupfer-Zink erreicht zwar nicht die hohen **Entfestigungstemperaturen** von CuAg0,10 oder CuZr, entfestigt jedoch erst oberhalb 250°C. Die **Korrosionsbeständigkeit** ist mit der des unlegierten Kupfers vergleichbar. Die elektrische Leitfähigkeit von CuZn0,5 liegt bei etwa 83 % IACS und ist damit besser als die von Cu-DHP.

3.3.2 Verarbeitung

Durch **Kaltumformen** wie Biegen, Prägen, Bördeln, Ziehen, Tiefziehen lässt sich Kupfer-Zink gut verarbeiten. Besonders wichtig ist die gegenüber Cu-DHP, Cu-FRHC und Cu-ETP deutlich verbesserte Tiefziehfähigkeit. Auch die **Warmumformung** zwischen 750°C und 950°C bereitet keine Schwierigkeiten.

Bei Glühbehandlungen sind zu hohe Temperaturen zu vermeiden, da es zu Grobkornbildung kommen kann, welche die Kaltumformbarkeit beeinträchtigt. **Weich-** und **Hartlöten** können ebenfalls wie bei Kupfer mit den dafür gebräuchlichen Flussmitteln durchgeführt werden.

Schweißen ist nach den üblichen Verfahren möglich. Die Schweißbeignung entspricht der des unlegierten sauerstofffreien Kupfers.

3.3.3 Verwendung

Die verbesserte Tiefziehfähigkeit von Kupfer-Zink hat dazu geführt, dass heute anstelle von Bändern aus Cu-ETP weitgehend solche aus CuZn0,5 verwendet werden. Hergestellt werden Konstruktionsteile und Hohlwaren aller Art sowie Leiterbahnen, Halbleiterträger, Steckverbinder und Wärmeübertragerelemente.

4. Werkstoffe mit hoher bzw. mittlerer Leitfähigkeit und mittlerer Festigkeit

Reines Kupfer hat bei Raumtemperatur je nach Werkstoffzustand eine Zugfestigkeit von etwa 200 MPa bis über 400 MPa, die für manche Zwecke nicht ausreichend ist. Sie kann durch bestimmte Zusätze wie Magnesium, Chrom, Eisen, etc. erhöht werden. Dies ist z. B. für hochbelastete Elektroden zur Widerstandsschweißung und andere Zwecke mit hohen Festigkeitsanforderungen notwendig.

4.1 Kupfer-Magnesium

Entsprechend dem Zustandsschaubild Kupfer-Magnesium sind im Kupfer bei 722°C maximal 3,2 % Mg löslich, wobei jedoch die Löslichkeit des Magnesiums im Kupfermischkristall mit abnehmender Temperatur geringer wird. Technisch hergestellt werden in der Regel Legierungen mit max. 1 % Mg, welche bei Raumtemperatur noch ein homogenes Gefüge und bei Warmauslagerung keine Verfestigung aufweisen.

4.1.1 Eigenschaften

Gegenüber Kupfer weisen Kupfer-Magnesium-Legierungen eine höhere Festigkeit bei statischer und dynamischer Beanspruchung auch bei erhöhten Temperaturen auf. Das gute Verschleißverhalten, das sich in einer hervorragenden Abriebbeständigkeit auszeichnet, ist besonders hervorzuheben. Mit dem Magnesiumgehalt nimmt auch die Verfestigung durch Kaltumformung sehr stark zu (Tabelle 7).

Außerdem steigt die **Entfestigungstemperatur** auf etwa 350°C. Die elektrische **Leitfähigkeit** des Kupfers wird durch Magnesium etwas stärker als durch Silber herabgesetzt (vgl. Bild 3).

4.1.2 Verarbeitung

Kupfer-Magnesium-Legierungen bereiten wegen ihres großen Erstarrungsintervalls und der Neigung zur Bildung von Magnesiumoxidhäuten beim **Schmelzen** und **Gießen** einige Schwierigkeiten, die jedoch durch eine angepasste Metallurgie und Gießtechnik gemeistert werden können.

Wie unlegiertes Kupfer lassen sich Kupfer-Magnesium-Legierungen gut **warm-** und **kaltumformen** und werden wegen der gegenüber reinem Kupfer höheren Rekristallisationstemperatur bei etwa 650°C weichgeglüht. Die **Zerspanbarkeit**, **Lötbarkeit** und **Schweißbarkeit** entsprechen etwa denen des unlegierten Kupfers.

4.1.3 Verwendung

CuMg0,2 wird für dünne Litzen in Kabelbäumen (Bild 9) und Telefondraht verwendet. Die im Magnesiumgehalt höher legierten Qualitäten wie CuMg0,4, CuMg0,5 und CuMg0,7 werden im Wesentlichen für stromführende Freileitungen großer Spannweite und für Fahrdrähte von Schienenfahrzeugen eingesetzt (Bild 10).



Bild 9: Kabelbaum aus dünnen Litzen



Bild 10: Fahrleitungsdraht für Hochgeschwindigkeitszüge

Werkstoffzustand	0,2 % Dehngrenze [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [A %]
weich geglüht	80	270	50
hart gezogen (50 %)	410	450	5
hart gezogen (80 %)	510	550	4
hart gezogen (98 %)	640	695	2

Tabelle 7: Festigkeitswerte von Drähten aus CuMg0,7 [8]

4.2 Kupfer-Eisen

Eisen ist in Kupfer bei 1095°C bis 4,1 % löslich [20]. Wegen der mit sinkender Temperatur abnehmenden Löslichkeit des Eisens liegt prinzipiell ein aushärtbares Legierungssystem vor. Die mit der Ausscheidung verbundene Festigkeitssteigerung ist allerdings vernachlässigbar klein, so dass nur die gleichzeitige Erhöhung sowohl der elektrischen Leitfähigkeit als auch der Rekristallisationstemperatur technisch genutzt werden können.

Handelsüblich sind die Legierungen CuFe2P und CuFe0,1P. CuFe2P ist in DIN EN 1654 und DIN EN 1758 genormt. CuFe0,1P ist im UNS (Unified Numbering System) unter der Bezeichnung C19210 zu finden.

4.2.1 Eigenschaften

Kupfer-Eisen zeichnet sich durch eine hohe **thermische** und **elektrische Leitfähigkeit** aus. Je nach Zusammensetzung und Wärmebehandlung erhält man Werte bis 350 W/mK und 90 % IACS.

Durch Kaltumformung lässt sich bei CuFe2P eine Zugfestigkeit von über 500 MPa bei 74 % IACS erreichen. Die **Entfestigungstemperatur** bewegt sich je nach Ausgangszustand zwischen 400°C und 500°C.

In den **Bildern 11a** und **11b** sind jeweils das Entfestigungsverhalten von CuFe0,1P und CuFe2P zu sehen.

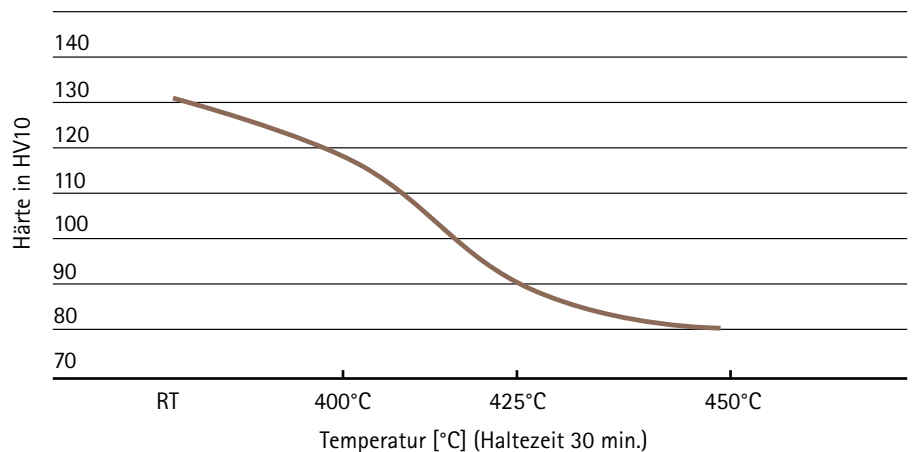


Bild 11a: Einfluss des Eisens auf das Entfestigungsverhalten von Kupfer (CuFe0,1P R360-430)

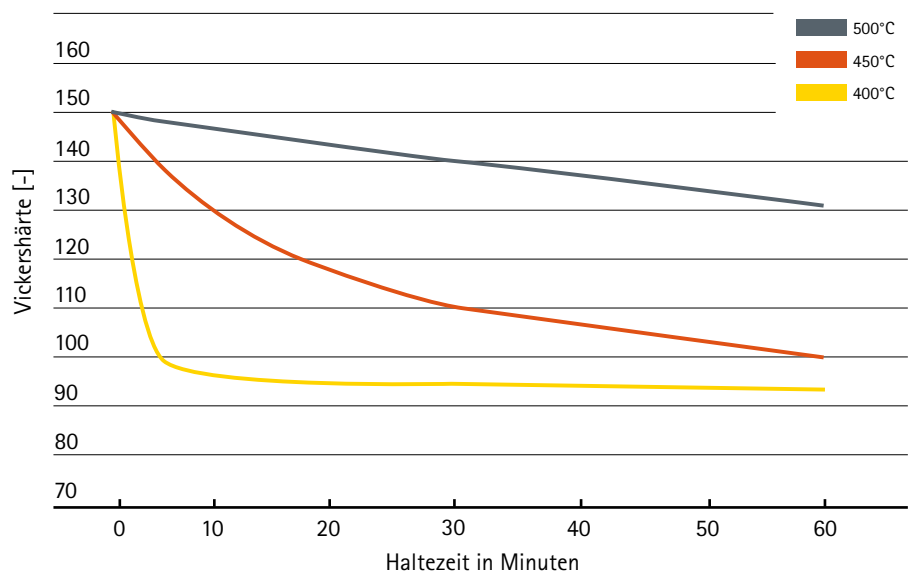


Bild 11b: Einfluss des Eisens auf das Entfestigungsverhalten von Kupfer (CuFe2P R470)

Die **Korrosionsbeständigkeit** der Kupfer-Eisen-Werkstoffe ist besser als diejenige von Reinkupfer. Besonders in salzhaltigem oder alkalischem Wasser bildet sich ein Schutzfilm aus Eisenhydroxid [23]. Diese Schutzschicht heilt bei Verletzungen sehr schnell aus. Hervorzuheben ist die gute Beständigkeit gegen Erosionskorrosion. Dadurch können in Rohrleitungen höhere Strömungsgeschwindigkeiten zugelassen werden als bei unlegiertem Kupfer. Kupfer-Eisen ist beständig gegen Spannungsrissskorrosion.

4.2.2 Verarbeitung

Die Kupfer-Eisen-Werkstoffe lassen sich sehr gut kalt und warm umformen sowie biegen.

Die **Schweiß- und Lötbarkeit** sind als gut einzustufen. Laser- und Widerstandsschweißen sind möglich. Der Zerspanbarkeitsindex wird mit 20 % angegeben.

4.2.3 Verwendung

Wegen ihrer im Vergleich zu unlegiertem Kupfer verbesserten mechanischen Eigenschaften sind Kupfer-Eisen-Werkstoffe in der Elektronik und Elektrotechnik weit verbreitet. Sie werden verwendet für Systemträger [Leadframes, LED=Light Emitting Diode (Leuchtdiode)] in der Halbleiterindustrie (**Bild 12a**), für Steckkontakte und Stanzgitter (**Bild 12b**) im Automobil sowie als Kontaktband (**Bild 13**). CuFe2P wird darüber hinaus als Band zum Schutz erdverlegter Telefonkabel und als Rohr für Bremsleitungen im Automobil eingesetzt.

Für den Einsatzbereich Kältetechnik werden außerdem Rohre und Fittings aus CuFe2P angeboten. Die gegenüber Reinkupfer verbesserten mechanischen Eigenschaften dieses niedriglegierten Kupferwerkstoffs ermöglichen die Realisierung von sehr hohen Betriebsdrücken in Kälteanlagen, die mit Kältemitteln wie beispielsweise CO₂ betrieben werden.

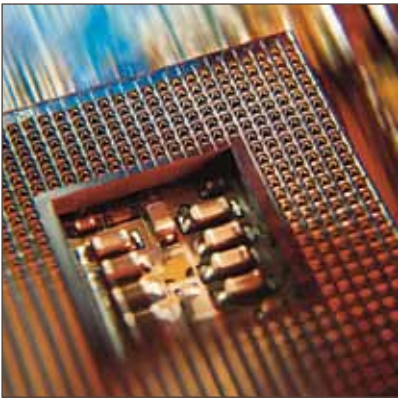


Bild 12a: Leadframe

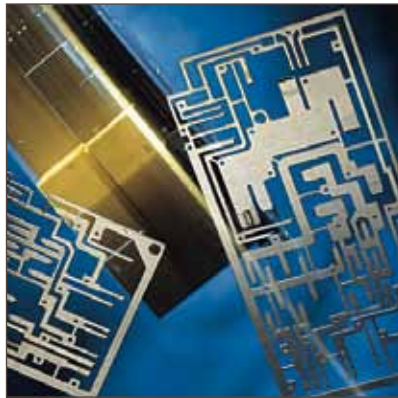


Bild 12b: Stanzgitter für Elektrische Systeme



Bild 13: Kontaktband aus Cu-Fe-P (CuFe0,1P)

4.3 Kupfer-Chrom

Die maximale Löslichkeit von Chrom im Kupfer ist mit 0,65 % Cr bei der eutektischen Temperatur von 1075°C sehr niedrig und fällt mit sinkender Temperatur weiter stark ab. Bei 400°C liegt das Lösungsvermögen für Chrom unter 0,03 %. Hierdurch ist die Grundlage für eine Ausscheidungs-fähigkeit gegeben, die Legierungen sind damit aushärtbar. In DIN EN 1982 ist mit CuCr1-C nur eine Legierung als Gusswerkstoff genormt (**Ausklapptabelle**). Eine Knetvariante CuCr1 gibt es ebenfalls in der Norm DIN CEN/TS 13388.

4.3.1 Eigenschaften

Durch die Aushärtung werden sowohl Festigkeit als auch elektrische Leitfähigkeit stark erhöht. Im vollständig ausgehärtetem Zustand verfügen CuCr-Legierungen über eine gute Beziehung von Festigkeit zur elektrischen Leitfähigkeit. **Bild 14** zeigt den Einfluss der Kaltumformung nach der Aushärtung auf Härte und elektrische Leitfähigkeit von CuCr1.

Ein gewisser Nachteil von CuCr1 ist allerdings in einigen Fällen die relativ hohe Kerbempfindlichkeit bei erhöhten Temperaturen, die z. B. bei CuZr nicht vorhanden ist [9]. Dies geht – im Vergleich zu anderen niedriglegierten Kupfer-Legierungen aus **Tabelle 8** hervor.

Die Festigkeitskennwerte sind insbesondere senkrecht zur Verformungs- bzw. Walzrichtung niedrig. Die Entfestigungbeständigkeit von CuCr1 ist sehr hoch (**Bild 15**). Bei Temperaturen oberhalb 475°C geht der Aushärtungseffekt jedoch in Folge der Wiederauflösung der ausgeschiedenen Chrompartikel wieder zurück.

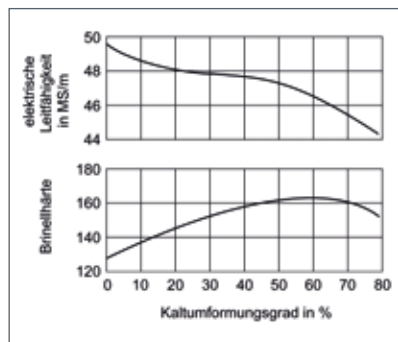


Bild 14: Härte und elektrische Leitfähigkeit von CuCr in Abhängigkeit von der Kaltumformung nach der Aushärtung [1], DKI 3913

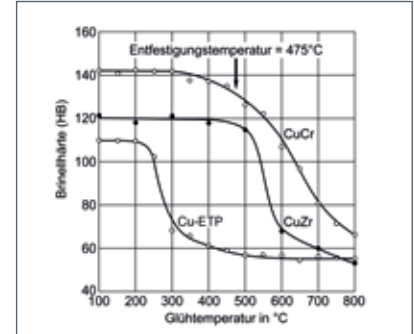


Bild 15: Anlassbeständigkeit der Härte von CuCr mit 0,6 % Cr (Lösungsgeglüht, 25 % kaltverformt und ausgelagert) im Vergleich zu CuZr mit 0,33 % Zr (Lösungsgeglüht, 60 % kaltverformt und ausgelagert) und Cu-ETP (kaltverformt). Auslagerungszeit je Temperatur 5h [10], DKI 4613

Werkstoff	Nach 100 h ohne Kerbe MPa	Nach 100 h gekerbt MPa	nach 500 h ohne Kerbe MPa	Nach 500 h gekerbt MPa
Proben zur Walzrichtung				
Kupfer-Zirkon	235	260	220	245
Kupfer-Chrom	250	195	225	160
Kupfer-Silber	120	110	70	
Proben ⊥ zur Walzrichtung				
Kupfer-Zirkon	260	285	250	265
Kupfer-Chrom	130	115	90	83
Kupfer-Silber	140	105	95	-

Tabelle 8: Festigkeit einiger niedriglegierter Werkstoffe hoher Leitfähigkeit nach langer Auslagerung bei 290°C [3]

4.3.2 Verarbeitung

Beim **Schmelzen** und **Gießen** von Kupfer-Chrom ist wegen der hohen Affinität von Chrom zum Sauerstoff der Zutritt von Luft zu vermeiden. Es besteht die Gefahr der Verschlackung des Chroms. **Die Warmumformungstemperatur** liegt zwischen 725°C und 900 °C.

Die Kaltumformung von CuCr1 findet günstigerweise im lösungsgeglühten Zustand statt. Ein breites Eigenschaftsfeld kann durch die Kombination von Kaltumformung und Warmaushärtung eingestellt werden. **Die Wärmebehandlung** von CuCr1 ist derart vorzunehmen, dass das Halbzeug einer Lösungsglühung bei etwa 1000°C (etwa 15 min auf Temperatur) unterworfen und in Wasser abgeschreckt wird. Darauf folgt für CuCr1 in der Regel eine Kaltumformung um etwa 40 bis 50 %.

Die abschließende Aushärtungsglühung ist zwischen 400°C und 500°C (je nach Temperatur 10 min bis 20 Stunden), üblicherweise bei 470 °C (4 h) durchzuführen. Es ist auch möglich, die Kaltumformung der Knetvariante CuCr1 im Anschluss an die Aushärtung vorzunehmen.

Die genannten Temperaturfenster und Zeiten für die Wärmebehandlung von CuCr1 gelten ebenfalls für die Gussvariante CuCr1-C (**Tabelle 8a**).

Wegen der Heterogenisierung des Gefüges durch die Chromausscheidung ist die **Zerspanbarkeit (Index 30 %)** von ausgehärtetem CuCr1 und CuCr1-C merklich besser als bei Reinkupfer.

Durch die Legierung mit Chrom wird die Rekristallisationstemperatur für CuCr1 mit ca. 600°C gegenüber reinem Kupfer deutlich erhöht.

CuCr1 und CuCr1-C lassen sich mit Blei-Zinn-Löten oder höher schmelzenden Sonderloten nach DIN EN ISO 9543 und DIN EN 1707-100 unter Verwendung von Flussmitteln **weichlöten**, ohne dass die Festigkeitskennwerte beeinflusst werden. Dies ist bei höheren Betriebstemperaturen, z. B. für elektrische Kontaktteile, von Bedeutung.

Zum **Hartlöten** werden vorzugsweise niedrigschmelzende Silberlote verwendet. Bei raschem Löten führt z. B. Ag 156 (nach DIN EN ISO 17672) nur zu einem relativ geringen Festigkeitsverlust. Das Schweißen von CuCr1 und CuCr1-C ist unter Beachtung besonderer Vorkehrungen möglich. Infrage kommt das WIG-Schweißen mit Zusatzdraht CuSn1 nach DIN EN ISO 24373.

Bei CuCr1-C kommen fast ausschließlich nur Reparaturschweißungen an Gussstücken vor. Zu beachten sind Änderungen der mechanischen Kennwerte durch das Rücklösen von ausgeschiedenen Chrompartikeln in Folge des Temperatureinflusses.

4.3.3 Verwendung

Kupfer-Chrom-Legierungen zeichnen sich durch hohe Festigkeit, hohe Leitfähigkeit für Elektrizität und Wärme sowie sehr gute Entfestigungsbeständigkeit aus [7]. Stromführende Federn und mechanisch höher belastete Kontakte werden vielfach aus CuCr1 hergestellt. CuCr1 eignet sich z. B. für Kommutatorlamellen und Stromschienen.

Gussteile aus CuCr1-C finden in der Elektrotechnik (**Bild 16**) vielseitige Anwendung; als Kokillenguss für Elektrodenhalter (z. B. für Punktschweißanlagen) und für Einblasdüsen sowie als stromführende Teile.



Bild 16: Kontaktffinger aus CuCr1-C-GM (Mittelspannungstechnik)

4.4 Kupfer-Chrom-Zirkon

Beim Kupfer-Chrom-Zirkon ist die durch Ausscheidung erreichbare Härtesteigerung etwas größer als beim binären Kupfer-Chrom. Die handelsüblichen Legierungen enthalten 0,4 bis 1,1 % Cr und 0,03 bis 0,3 % Zr (**Ausklapptabelle**), vgl. DIN CEN/TS 13388.

4.4.1 Eigenschaften

Die Vorzüge von CuZr bestehen in der hohen Entfestigungstemperatur und Zeitstandfestigkeit [4] sowie in der Kerbunempfindlichkeit auch bei erhöhten Temperaturen. Von Nachteil ist der geringe Aushärtungseffekt. CuCr hat andererseits in ausgehärtetem Zustand gute Festigkeitskennwerte. Nachteilig ist in gewissen Fällen seine relativ hohe Kerbempfindlichkeit bei erhöhten Temperaturen. In einer ternären Legierung Kupfer-Chrom-Zirkon (CuCrZr) lassen sich die günstigen Eigenschaften von CuCr und CuZr vereinen. Für CuCrZr ergeben sich damit folgende Merkmale:

- **hohe Festigkeit bei Raumtemperatur**,
- **hohe Entfestigungstemperatur** und
- **verbesserte Zeitstandfestigkeit**, auch bei erhöhten Temperaturen.

In diesen drei Punkten übertrifft CuCr1Zr die binären Legierungen CuCr und CuZr. Begründet wird dies mit der durch den Zirkonzusatz bedingten erhöhten Löslichkeit von Chrom im Kupfer bei hohen Temperaturen [7]. Unter Zeitstandsbeanspruchung zeigt auch CuCr1Zr oberhalb ca. 100°C eine gewisse Neigung zur Versprödung infolge der Bildung von Korngrenzenporen [4]. Das Aushärtungsverhalten von CuCr1Zr entspricht etwa dem von CuCr1.

Während jedoch bei CuCr1 selbst durch geschickte Kombination von Kaltverfestigung und Aushärtung Brinellhärten von über 160 HB kaum erreichbar sind, ist dies bei CuCr1Zr durchaus möglich (vgl. Bild 15). Auch die übrigen Festigkeitskennwerte von CuCr1Zr sind günstiger als die von CuCr1, insbesondere bei höheren Temperaturen (Tabelle 9) oberhalb 500°C beginnt der Aushärtungseffekt wieder zurückzugehen (Bild 17). Bild 18 zeigt das Kriechverhalten von CuCr1Zr im Vergleich zu zwei Kupfer-Zirkon-Legierungen. Von den untersuchten Legierungen besitzt CuCr1Zr die günstigsten Eigenschaften.

Die physikalischen Eigenschaften von CuCr1Zr entsprechen etwa denen von CuCr1 (Ausklapptabelle). Die elektrische Leitfähigkeit des voll ausgehärteten Werkstoffs liegt bei etwa 78 % bis 86 % IACS.

Kurzzeichen und Werkstoffnummer	0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$ (MPa)	Zugfestigkeit R_m (MPa)	Bruchdehnung A_5 %	Brinellhärte HB
Cu-C (CC040A) "Sorte A"	40	150	25	40
CuCr1-C (CC140C) "warmausgehärtet"	250	350	10	110

Tabelle 8a: Festigkeitswerte von Cu-C und CuCr1-C im Vergleich

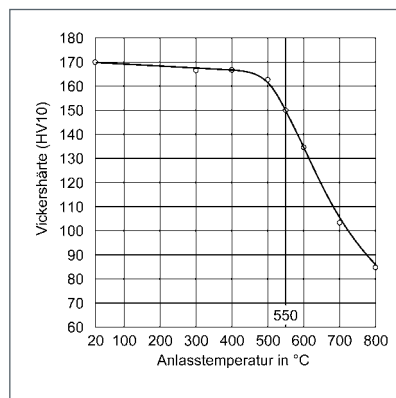


Bild 17: Anlasskurve für CuCrZr-Stangen mit einer Ausgangshärte HV10=170 (Zustand: lösungsgeglüht, kaltverformt, ausgehärtet); Glühzeit 30 min auf Temperatur

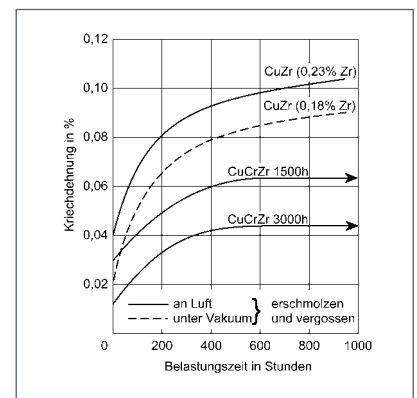


Bild 18: Kriechverhalten von CuCr1Zr im Vergleich zu CuZr, Prüftemperatur 230°C (250°C für die Kurve von 1500h) [1], DKI 3970

Werkstoffe	Probenform	20°C		200°C		300°C	
		R_m [MPa]	A [%]	R_m [MPa]	A [%]	R_m [MPa]	A [%]
CuCr1Zr Stange 9,5 mm Durchmesser	G	550	22	465	21	415	19
	K	600	20	490	17	450	13
CuCr1 Bandmaterial 6 x 76 mm	G	510	17	420	10	280	7
	K	445	13	415	10	355	7

Tabelle 9: Festigkeitskennwerte von CuCrZr im Vergleich zu CuCr bei verschiedenen Temperaturen, G = Glatte Probe, K = Probe mit Kerbe [3]

4.4.2 Verarbeitung

Die **Kaltumformbarkeit** ist besonders gut im weichgeglühten Zustand. Eine **Warmumformung** wird vorzugsweise zwischen 850°C und 950°C durchgeführt. Die **Zerspanbarkeit** entspricht im lösungsgeglühten Zustand etwa derjenigen des unlegierten Kupfers (Zerspanbarkeitsindex 20%) – sie ist jedoch im ausgehärteten Zustand merklich besser (Zerspanbarkeitsindex 30%). CuCr1Zr lässt sich wie Reinkupfer gut **wechlöten**, hierbei werden die Festigkeitskennwerte des Grundwerkstoffes kaum beeinflusst. **Hartlöten** und **Schweißen** lassen sich jedoch nur unter besonderen Vorkehrungen durchführen. Schweißen mittels Elektronenstrahl und Laser ist möglich.

4.4.3 Verwendung

CuCr1Zr wird z. B. für stromführende Federn und Kontakte, Elektroden für das Widerstandsschweißen, Tiegel (**Bild 19**), Kokillenrohre (**Bild 20**), Kokillenplatten (**Bild 21**) u.a. verwendet.

4.5 Kupfer-Nickel-Phosphor

Kupfer-Nickel-Phosphor-Werkstoffe können durch gezielte Einstellung des Gefüges mit kleinen, fein verteilten Teilchen von Nickel-Phosphiden ausgehärtet werden. Damit lassen sich die mechanischen und physikalischen Eigenschaften, Festigkeit, Härte, elektrische und thermische Leitfähigkeit steigern. Die handelsüblichen Legierungen enthalten 0,8 bis 1,2 % Ni und 0,15 bis 0,25 % P (**Ausklapptabelle**). Das optimale Massen-Gewichtsverhältnis Ni/P liegt zwischen 4,3 und 4,8 (**Bild 22**).

Kupfer und Nickel weisen eine vollständige Löslichkeit im flüssigen und festen Zustand auf. Mit zunehmendem Phosphoranteil nimmt die Löslichkeit der gebildeten Nickel-Phosphide im Kupfer-Mischkristall stark ab. Im Vergleich zu anderen niedriglegierten aushärtbaren Kupferlegierungen wie zum Beispiel Cu-Ni-Si oder Cu-Be ist die Löslichkeit von Nickel-Phosphiden im Kupfer-Mischkristall viel kleiner und führt nach der Aushärtung zu einer höheren elektrischen und thermischen Leitfähigkeit.

4.5.1 Eigenschaften

Das Kupfer-Nickel-Phosphor Legierungssystem begünstigt die Kombination von hoher elektrischer Leitfähigkeit und hoher Festigkeit. Die Bildung von feinen Nickel-Phosphid-Ausscheidungen und der Reinheitsgrad des Kupfers sind entscheidende Steuergrößen, um die Mikrostruktur und damit die Festigkeit und Leitfähigkeit positiv zu beeinflussen. Aufgrund ihrer hohen Festigkeit (**Ausklapptabelle**) im ausgehärteten Zustand von 550 MPa bis 700 MPa und ihrer relativ guten elektrischen Leitfähigkeit von 50 % bis 65 % IACS werden diese Legierungen häufig für die Herstellung von elektrischen Kontakten eingesetzt. Die optimalen Aushärteparameter hängen direkt von der vorausgegangenen Kaltverformung ab, welche die Ausscheidungskinetik stark beeinflusst. Durch die als Nebeneffekt entstandene Entspannung bei der Auslagerung kann die Bruchdehnung von 3 % bis auf 20 % erhöht werden. Die Temperatur für einen effizienten Aushärtungseffekt liegt zwischen 380°C und 420°C. Weiterhin zeichnet sich Cu-Ni-P durch gute Relaxationseigenschaften bei erhöhter Anwendungstemperatur aus (**Bild 23**).

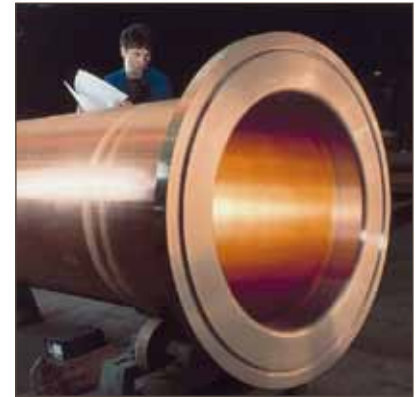


Bild 19: Tiegel aus CuCr1Zr



Bild 20: Kokillenrohre aus CuCr1Zr

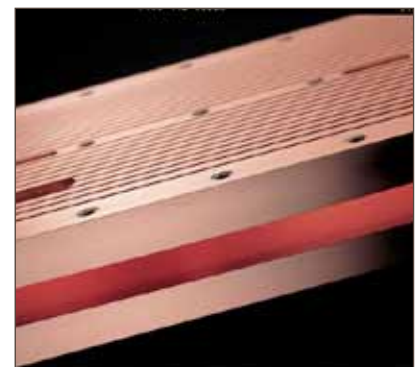


Bild 21: Kokillenplatte aus CuCr1Zr

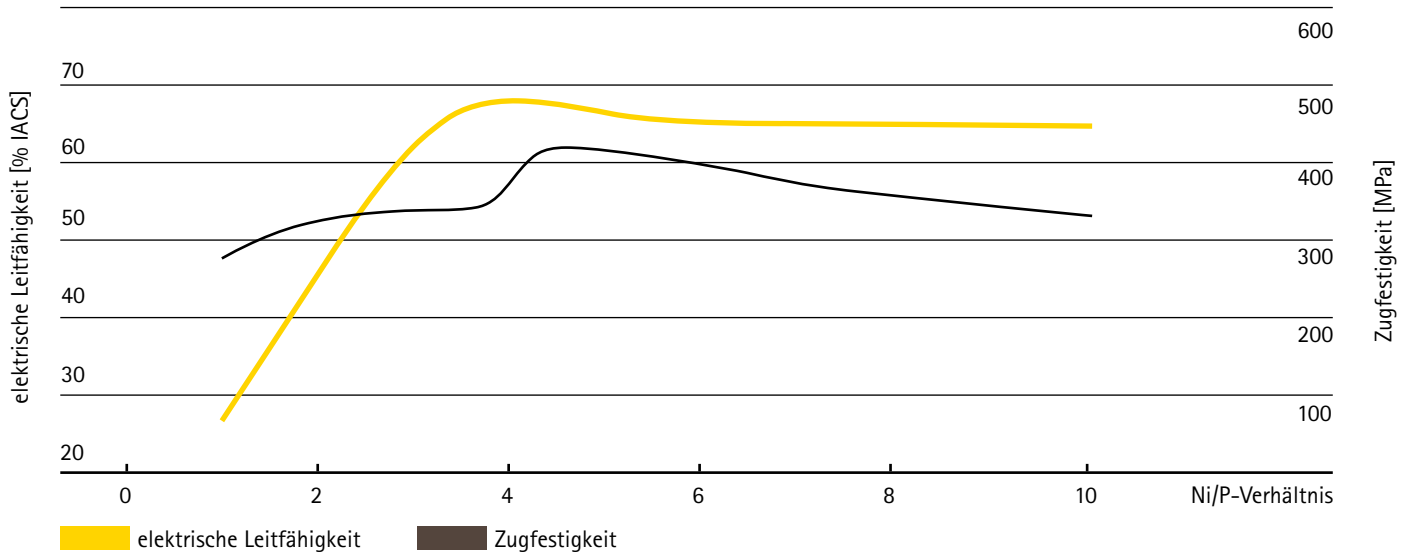


Bild 22: Einfluss von Ni/P Verhältnis auf die mechanischen Eigenschaften und auf die elektrische Leitfähigkeit (CuNi1P0,2 bei 450°C nach 24 Stunden ausgehärtet) [22], DKI 4503

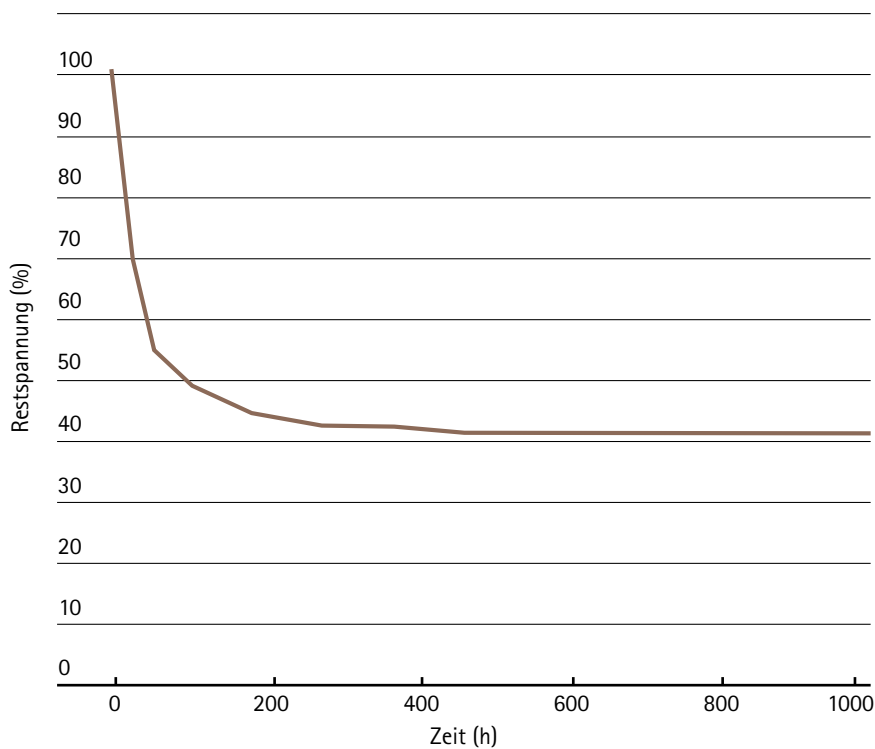


Bild 23: Thermische Relaxation (% Restspannung) der mechanischen Eigenschaften von Cu-Ni-P (C19000), Temperatur 250°C, 75%Rp0,2)

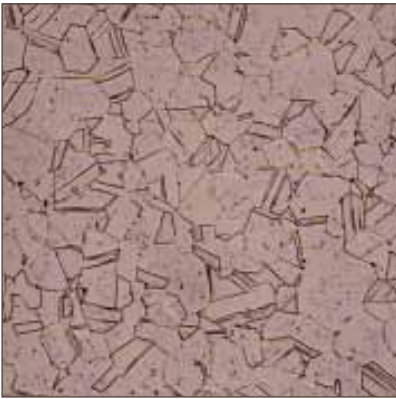


Bild 24: Gefüge der CuNi1P0,2Pb1 (C19160) Legierung im geglühten Zustand

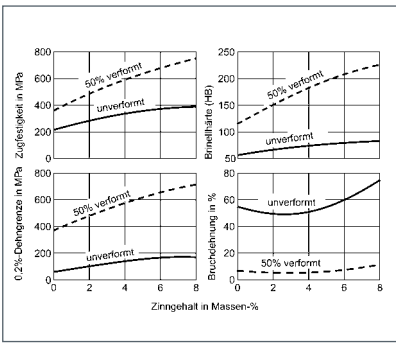


Bild 25: Verfestigungsverhalten von Kupfer-Zinn-Knetlegierungen in Abhängigkeit vom Zinngehalt [24], DKI 1557

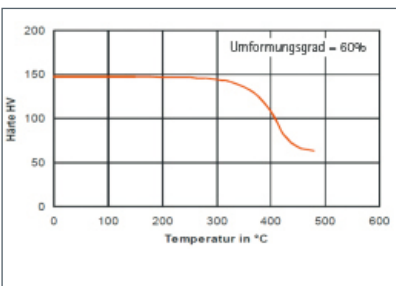


Bild 26: Entfestigungsverhalten von CuSn0,15 [25], DKI 4506

4.5.2 Verarbeitung

Cu-Ni-P kann im lösungsgeglühten Zustand sehr gut kaltverformt werden. Das System Cu-Ni-P hat folgende Merkmale:

- Phosphor wirkt in der Schmelze desoxidierend und dient zur Bildung der Nickel-Phosphid- Ausscheidungen beim Aushärten.
- Die Warmumformung und die Lösungs- glüfung erfolgen bei Temperaturen zwischen 700°C und 800°C.
- Die Zerspanung entspricht im lösungsge- glühten Zustand etwa derjenigen des unlegierten Kupfers. Zur Verbesserung der Zerspanbarkeit kann CuNi1P mit Blei bis 1 % legiert werden. (Bild 24).

4.5.3 Verwendung

Cu-Ni-P Legierungen werden für die Herstellung von Steckverbindern einge- setzt, wie z. B. bei der Fertigung von Kontaktelementen für Elektronik und Elektrotechnik (Kontaktstifte, Steckleisten, stromführende Federn) und anderen Komponenten von Steckverbindern. Aus Bändern werden Federn, Clips, Kontaktträger und Konnektoren hergestellt. Stangen und Hohlstangen werden zu Schweißzangen, Elektrodenhaltern, Kontaktbacken und Elektrodenrollen verarbeitet. Diese Elemente werden in Bereichen wie Informationstechnologie, Flugzeugindus- trie, Telekommunikation und Automobilin- dustrie eingesetzt.

4.6 Kupfer-Zinn

Kupfer-Zinn-Legierungen gehören zu den ältesten technisch verwerteten Kupfer- werkstoffen. Bereits geringe Zusätze von Zinn im Kupfer verbessern das Erwei- chungsverhalten gegenüber Reinkupfer deutlich, wobei bei Gehalten <1 % Zinn das Seigerungsverhalten, das ansonsten bei hochlegierten Bronzen beobachtet werden kann, noch nicht sehr stark ausgeprägt ist. Um eine Desoxidation der Kupfer-Zinn- Schmelze zu gewährleisten, kann der

Schmelze etwas Phosphor zulegiert werden. Damit die elektrische Leitfähigkeit nicht zu stark abgesenkt wird, weisen niedriglegierte CuSn Legierungen in der Regel bis 0,6 %Sn und maximal 0,01 % Phosphor auf. Daneben existieren auch Sauerstoff haltige Cu-Sn-Legierungen, dabei reagiert der Sauerstoff in der Schmelze zu Zinnoxid.

4.6.1 Eigenschaften

Gegenüber Kupfer haben die niedrig- legierten Kupfer-Zinn-Werkstoffe eine etwas höhere Festigkeit bei guter elektrischer Leitfähigkeit. Mit dem Zinngehalt nimmt die Verfestigung durch Kaltumformung zu (Bild 25). Außerdem steigt die **Entfestigungstemperatur** auf etwa 330°C (Bild 26). Die elektrische **Leitfähigkeit** des Kupfers wird durch Zinn etwas stärker als durch Magnesium herabgesetzt (vgl. Bild 3).

4.6.2 Verarbeitung

Kupfer-Zinn-Legierungen lassen sich besonders gut gießen und sind sehr gut **warm-** und **kaltumformbar**. Problemlos können sie zu Feindraht gezogen werden. Eine Weichglüfung erfolgt in der Regel bei 400°C.

4.6.3 Verwendung

Bevorzugte Anwendungen von CuSn0,15 sind Systemträger (DIN EN 1758), von CuSn0,3 dünne Litzen für Kabelbäume und Fahrleitungsdrähte.

5. Werkstoffe mit mittlerer Leitfähigkeit und hoher Festigkeit

Einige Zusätze zu Kupfer wie z. B. Beryllium (+ Kobalt bzw. Nickel), Nickel + Silizium, Nickel + Zinn oder Titan setzen zwar die elektrische Leitfähigkeit herab, bewirken jedoch eine deutliche Erhöhung von Dehngrenze, Zugfestigkeit und Härte.

5.1 Kupfer-Beryllium

Die Aushärtbarkeit der Kupfer-Beryllium-Legierungen ist auf die Löslichkeit von max. 2,1 % Be im Kupfer bei hohen Temperaturen und die abnehmende Löslichkeit bei fallenden Temperaturen zurückzuführen. In DIN CEN/TS 13388 sind u.a die Werkstoffe CuBe1,7, CuBe2, CuBe2Pb, CuCo1NiBe und CuCo2Be und CuNi2Be genormt (Ausklapptabelle).

5.1.1 Eigenschaften

Kupfer-Beryllium-Werkstoffe sind aushärtbar. Dies führt zu erheblichen Festigkeits- und Härtesteigerungen. Die elektrische Leitfähigkeit liegt dabei in der Größenordnung von 43 % IACS.

Im lösungsgeglühten Zustand weist das Material eine hohe Dehnung und **Tiefziehfähigkeit** auf. **Bild 27** zeigt den Verlauf der **Festigkeit** und **elektrischen Leitfähigkeit** bei der Aushärtung von CuBe2. Bei Temperaturen oberhalb etwa 350°C beginnt der **Aushärtungseffekt** zurückzugehen.

Die **Korrosionsbeständigkeit** entspricht derjenigen des desoxidierten Kupfers. Es besteht keine Empfindlichkeit gegenüber Spannungsrisskorrosion.

5.1.2 Verarbeitung

Kupfer-Beryllium-Legierungen lassen sich nach den meisten bekannten Verfahren gut **gießen**. Zu beachten ist jedoch, dass Berylliumdämpfe und -stäube giftig sind. Die Verarbeitungshinweise nach den

Vorgaben der Berufsgenossenschaften sind zu beachten. Die Gießtemperaturen liegen für CuBe1,7 bei 1040°C bis 1120°C und für CuBe2 bei etwa 1010°C bis 1120°C.

Die **Warmumformung** erfolgt zwischen 600°C und 800°C. Nach dem Lösungsglühen zwischen 780°C bis 810°C wird in Wasser abgeschreckt und eventuell kalt umgeformt.

Weichlöten z. B. mit S-Pb50Sn50E nach DIN EN ISO 9453 geschieht grundsätzlich nach der Aushärtungsbehandlung, weil die Fließtemperatur der Weichlote unter der Aushärtetemperatur liegt. Die Oberflächen müssen sauber und möglichst oxidfrei sein.

Hartlöten erfolgt fast ausnahmslos vor der Aushärtung. Dabei haben sich niedrig schmelzende Silberlote mit Arbeitstemperaturen zwischen 610°C und 650°C bewährt. Um den Aushärtungseffekt zu erhalten, muss das Werkstück schnell und gegebenenfalls unter Kühlung der Lötstellenumgebung erwärmt und nach dem Erstarren des Lotes eventuell in Wasser abgeschreckt werden. Bei Lötzeiten über 1 min wird die Aushärtbarkeit beeinträchtigt.

Schutzgas- und Widerstandsschweißverfahren sind für CuBe-Werkstoffe geeignet. Auch beim Schweißen sind die Vorgaben der Berufsgenossenschaften bezüglich der Berylliumdämpfe zu beachten. Es wird meist mit Kupfer-Beryllium-Schweißzusätzen an nicht ausgehärtetem Material geschweißt, dennoch lassen sich z. B. durch Punktschweißen sehr gute Kontakte auf ausgehärteten Federn aus Kupfer-Beryllium-Legierungen anbringen. Auf kurze Schweißzeiten ist zu achten.

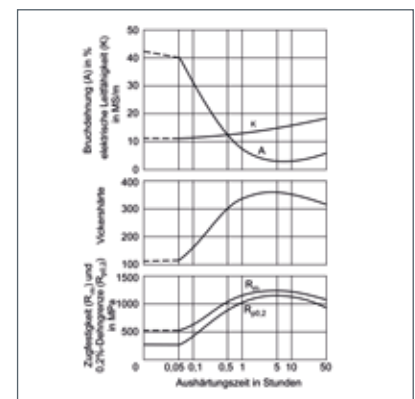


Bild 27: Aushärtung von CuBe2 weich bei 325°C [1], DKI 3962

5.1.3 Verwendung

Die hohe Härte und Verschleißbeständigkeit sowie das hohe E-Modul und die gute Dauerfestigkeit machen die Kupfer-Beryllium-Legierungen technisch vor allem als **Federwerkstoffe** interessant. Die Hauptanwendungsgebiete sind **Steckverbindungen, Kontakte, Federn** und **Schalter**.

Aus CuBe-Werkstoffen werden auch funksichere Werkzeuge für Arbeiten in der Erdölgewinnung und -verarbeitung hergestellt.

Feigussteile aus Kupfer-Beryllium zeichnen sich durch hohe Federkraft und Härte aus. Sie werden z. B. als Konstruktionsteile im Flugzeugbau verwendet.

Auch Formen für die Kunststoffverarbeitung werden aus Kupfer-Beryllium hergestellt. Gegossene Formen aus Kupfer-Beryllium haben sich wegen ihrer hohen Standzeiten und wirtschaftlichen Herstellbarkeit für Kokillen- und Druckgussformen, z. B. zum Gießen von Messing, gut bewährt.

5.2 Kupfer-Kobalt-Beryllium und Kupfer-Nickel-Beryllium

Durch Kobalt und Nickel wird die Entfestigungsbeständigkeit auf ca. 550°C verbessert. Die handelsübliche Legierung CuCo2Be enthält 2,0 bis 2,8 % Co und 0,4 bis 0,7 % Be. In dieser Zusammensetzung ist sie auch in DIN CEN/TS 13388 genormt (**Ausklapptabelle**). In CuCo2Be kann Kobalt durch Nickel ersetzt werden (CuCo1Ni1Be). Kupfer-Nickel-Kobalt-Beryllium ist in seinen Eigenschaften praktisch identisch mit Kupfer-Kobalt-Beryllium.

Desweiteren kann das Kobalt auch komplett durch Nickel ersetzt werden. CuNi2Be ist auch in der DIN CEN/TS 13388 genormt (**Ausklapptabelle**). Der Vorteil von CuNiBe liegt in einer leicht höheren Leitfähigkeit gegenüber CuCoBe.

5.2.1 Eigenschaften

Kupfer-Kobalt-Beryllium erreicht im Vergleich zu den unter 5.1 genannten Kupfer-Beryllium-Legierungen bei **etwas geringeren Härte und Festigkeitswerten eine höhere elektrische und thermische Leitfähigkeit**. Durch gezielte Kombination von Kaltumformung und Aushärtungsbehandlung lassen sich die Eigenschaften

des Werkstoffes an besonderen Anforderungen anpassen. **Bild 28** veranschaulicht die Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften von der Aushärtungsdauer bei einer bestimmten Aushärtungstemperatur. Oberhalb 500°C geht der **Aushärtungseffekt** wieder zurück.

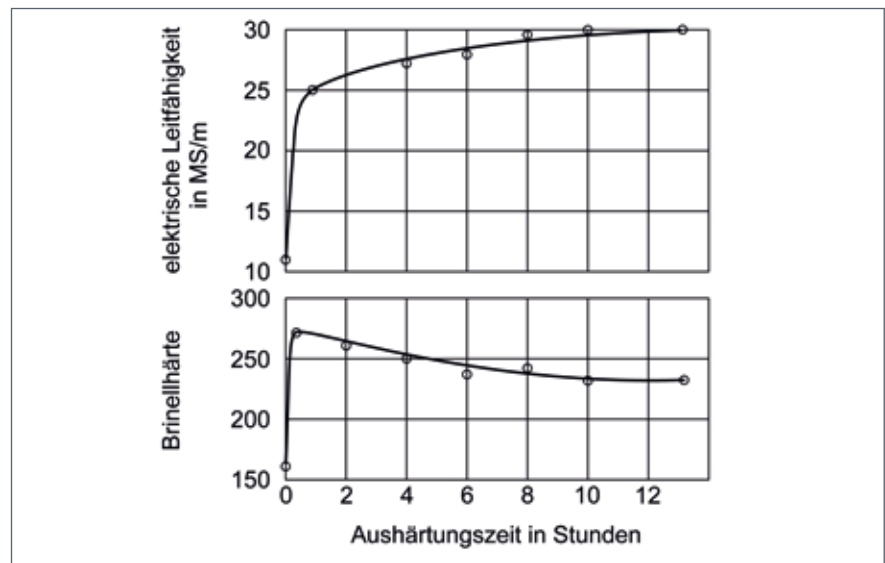


Bild 28: Härte und elektrische Leitfähigkeit von CuCo2Be in Abhängigkeit von der Aushärtungsdauer bei einer Temperatur von 480 °C [8], DKI 3963

5.2.2 Verarbeitung

CuCo2Be lässt sich nach den meisten bekannten Verfahren **gießen**. Wegen der Giftigkeit von Berylliumdämpfen ist beim Schmelzen, Gießen und auch beim Schweißen für ausreichende Absaugung zu sorgen. Die Vorgaben der Berufsgenossenschaften sind zu beachten. Die Gießtemperatur liegt zwischen 1100°C und 1180°C.

Die **Warmumformungstemperatur** liegt zwischen 750°C und 950°C. Nach der Lösungsglühung ist der Werkstoff gut **kaltumformbar**. Der **Lösungsglühung** bei etwa 920°C bis 960°C folgt Wasserabschreckung und evtl. Kaltumformung. Zwischenglühungen sind als erneute Lösungsglühungen durchzuführen. Zur **Zerspanung** wird der kaltumgeformte oder auch der ausgehärtete Zustand gewählt.

Weichlöten ist bei CuCo2Be ohne Schwierigkeiten durchführbar und es entstehen keine Einbußen der Eigenschaften des ausgehärteten Werkstoffes. Beim **Hartlöten** sind, wenn der ausgehärtete Zustand weitgehend erhalten bleiben soll, niedrigschmelzende Silberlote und kurze Lötzeiten erforderlich. **Schweißen** ist wie bei Kupfer möglich, doch wird die Festigkeit gegenüber dem Ausgangszustand beeinträchtigt.

5.2.3 Verwendung

Teile aus CuCo2Be werden insbesondere verwendet im Relais- und Schalterbau für hochbelastbare, stromführende Federn und für Wärmestrahler bei Halbleitern. Ferner wird die Legierung für Widerstandsschweißelektroden eingesetzt. Für Stempel zum Brennschneiden von Stahl ist CuCo2Be der bestgeeignete Werkstoff wegen seiner hohen Härte bei gleichzeitig guter Wärmeleitfähigkeit.

Ein besonders interessantes Anwendungsgebiet für CuCo2Be sind Teile von Membranen für Luftfahrzeuginstrumente. Hierfür wird CuCo2Be wegen seiner hohen Korrosionsbeständigkeit, Dauerfestigkeit und guter Formbarkeit im lösungsgeglühten Zustand sowie der ausgezeichneten Festigkeitskennwerte im ausscheidungsgehärteten Zustand und vor allem wegen seiner hervorragenden Federeigenschaften eingesetzt. CuNi2Be wird z. B. als Gießformenwerkstoff auf Grund seiner hohen Ermüdungsfestigkeit und Verschleißbeständigkeit eingesetzt.

5.3 Kupfer-Nickel-Silizium

Die hohe Löslichkeit von Silizium in Kupfer wird durch Zusätze von Nickel bei höheren Temperaturen stark herabgesetzt und sinkt mit der Temperatur weiter ab. Infolge der temperaturabhängigen Löslichkeit der intermetallischen Verbindungen Ni₂Si, Ni₅Si₂ (bzw. Ni₃₁Si₁₂) sind Kupfer-Nickel-Silizium-Legierungen aushärtbar. Die Kristallstrukturen der Silizide sind teilkohärent oder inkohärent zum Grundwerkstoff. In der DIN CEN/TS 13388 sind mit CuNi1,5Si, CuNi2Si und CuNi3Si drei Legierungen genormt (**Ausklapptabelle**).

5.3.1 Eigenschaften

Werkstoffe aus Kupfer-Nickel-Silizium-Legierungen zeichnen sich durch eine hohe Zugfestigkeit für z. B. dünne Bleche bis ca. 900 MPa, elektrische Leitfähigkeit bis 50 % IACS bei gleichzeitig guter Korrosionsbeständigkeit und gutem Umformvermögen aus. Wegen der ebenfalls sehr guten thermischen Stabilität eignen sich die höher nickelhaltigen Werkstoffe auch für die Konstruktion von Federelementen für Einsatztemperaturen über 150 °C. Geringe Zusätze von Magnesium verbessern die Beständigkeit gegen Spannungsrelaxation.

Eine teilweise Substitution von Nickel durch Kobalt erhöht die Festigkeit um bis 100 MPa.

Cu-Ni-Si-Legierungen sind im ausgehärteten Zustand gegen Spannungsrissskorrosion nahezu unempfindlich. Infolge ihrer hohen Härte weisen die Werkstoffe eine hohe Verschleißbeständigkeit auf.

5.3.2 Verarbeitung

Die **Warmumformung** wird zwischen 800 °C und 900 °C durchgeführt. Danach kann in Wasser abgeschreckt werden, um eine separate Lösungsglühung einzusparen. Lösungsglüht wird oberhalb 850 °C, wobei die Glühtemperatur vom Nickelgehalt der Legierung abhängt: Ni_5Si_2 wird bei höheren Temperaturen aufgelöst als Ni_2Si (**Bild 29**). Anschließend muss das Gefüge durch Abschrecken eingefroren werden.

Die **Kaltumformung** erfolgt im lösungsgeglühten Zustand. Je nach Anwendung sind Kaltumformgrade bis 70 % möglich. Die Werkstoffe härten zwischen 400 °C und 525 °C aus. Die **Zerspanung** wird in der Regel im ausgehärteten Zustand vorgenommen; die Zerspanbarkeit ist mit einem Index von 30 % besser als bei Kupfer. Cu-Ni-Si-Werkstoffe lassen sich auch mit bleifreien Loten gut **wechlöten**. Zum **Hartlöten** sind niedrig schmelzende Silberlote zu bevorzugen. Beim **Schweißen** ist darauf zu achten, dass der Wärmeeintrag das Gefüge in der Wärmeeinflusszone

nicht verändert. Bei zu hohem Wärmeeintrag erweichen oder verspröden die Werkstoffe lokal.

Die Werkstoffe sind mit Laser-, Elektronenstrahl und Schutzgasschweißverfahren gut schweißbar, weil der Wärmeeintrag gering ist. Gasschweißen ist weniger zu empfehlen.

5.3.3 Verwendung

Das gute Formänderungsvermögen erlaubt es, verschiedene Umformverfahren einzusetzen. Rollenböcke für die wartungsarme Stellbewegung von Eisenbahnweichen werden aus Cu-Ni-Si geschmiedet (**Bild 30a**), ebenso wie Klemmstücke für Stromverteiler und Fahrleitungsdrähte (**Bild 30b**); Schrauben, Stifte und elektromechanische Rundstecker werden durch Kaltstachen oder Kaltfließpressen aus Draht hergestellt. Bänder aus Cu-Ni-Si sind bewährte Halbfabrikate für die Konstruktion von gestanzten und kastenförmig gebogenen, elektromechanischen Steckverbindern (**Bild 30c**) oder Federelementen.

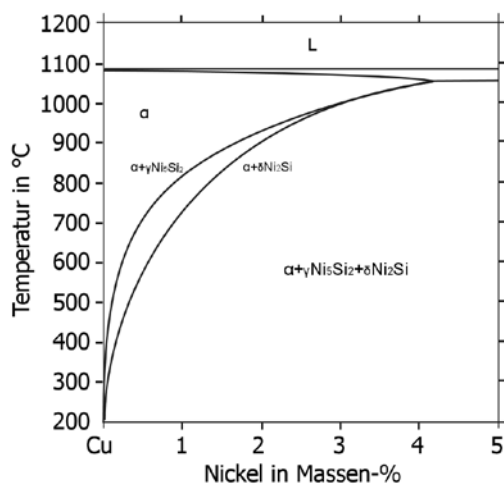


Bild 29: Lösungsglühtemperatur von Cu-Ni-Si als Funktion der chemischen Zusammensetzung [18], DKI 4507



Bild 30a: Rollenböcke für Eisenbahnweichen aus Cu-Ni-Si-Legierung



Bild 30b: Befestigungsarmatur für Fahrleitungsdrähte aus CuNi2Si1



Bild 30c: Steckverbinder

Dabei nutzt man aus, dass Kupfer-Nickel-Silizium-Werkstoffe nahezu scharfkantig gebogen werden können. Ferner ertragen sie hohe mechanische, Strom- und Temperaturbelastungen. In der Elektronik dienen sie als sogenannte Leiterrahmen (Leadframes) zur elektrischen Anbindung und passiven Kühlung von Halbleiter-Bauelementen. Für diesen Einsatz werden die Bänder teilweise galvanisch versilbert.

Die guten Gleiteigenschaften werden für hoch beanspruchte Buchsen, Druckscheiben und Gleitbahnen genutzt. Die gute Korrosionsbeständigkeit hat den Cu-Ni-Si-Legierungen viele Anwendungsgebiete im Schiff- und Schiffsmaschinen- sowie im Apparatebau erschlossen.

Diese Werkstoffklasse findet weiterhin Verwendung für hochfeste und korrosionsbeständige Schrauben und Muttern, für Drahtseile im elektrischen Oberleitungsbau, Wälzlagerkäfige und Ventilführungsbuchsen.

5.4 Kupfer-Nickel-Zinn

Beim Legieren des Systems Kupfer-Nickel-Zinn wird ein Teil des Nickels durch Zugabe von Phosphor in Nickel-Phosphid-Ausscheidungen umgewandelt. Diese Ausscheidungen werden durch eine geeignete Folge von Walz- und Glühvorgängen fein im Gefüge verteilt.

Dadurch lässt sich eine ausgezeichnete Kombination von elektrischer Leitfähigkeit und Festigkeit erzielen. Die Legierungen sind bisher noch nicht auf europäischer Ebene, aber in ASTM (B422, B888) genormt (z. B. CuNi1Sn0,9 als C19025).

5.4.1 Eigenschaften

Zusätzlich zu guten **Leitfähigkeits-** und **Festigkeitswerten** weisen die Legierungen auch eine hohe Beständigkeit gegen **Spannungsrelaxation** auf.

Die Werkstoffe eignen sich daher besonders für den Einsatz bei höheren Temperaturen (über 150 °C). Durch Kaltumformung lassen sich je nach Werkstoff bei kleineren Abmessungen Festigkeitswerte von über 540 MPa bei guter Biegebarkeit erzielen. Die Entfestigung beginnt bei 400°C bis 450°C. Die Materialien eignen sich besonders für kleine Teile im Elektro- und Elektronikbereich. Sie sind unempfindlich gegen Spannungsrissskorrosion.

5.4.2 Verarbeitung

Die Werkstoffe lassen sich gut kalt umformen. Sie sind gut schweiß- und lötbar. Die Oberfläche kann galvanisch beschichtet (verzinkt, vernickelt, versilbert, vergoldet) oder feuerverzinkt werden.

5.4.3 Verwendung

Kupfer-Nickel-Zinn-Legierungen werden eingesetzt für Steckverbinder/-kontakte (z. B. im Automobilbereich), Stanzgitter, Zentralelektriken, Relais, Schalter und Halbleiterträger.

6. Werkstoffe ohne besondere Anforderungen an die elektrische Leitfähigkeit für den Apparatebau

Abschließend sind noch einige, ebenfalls zur Gruppe der niedriglegierten Kupferlegierungen zählende Werkstoffe zu erwähnen, an die keine Anforderungen bezüglich der elektrischen Leitfähigkeit gestellt werden, die sich jedoch aufgrund ihrer hohen Korrosionsbeständigkeit und guten Verarbeitbarkeit z. B. durch Schweißen als hervorragende Werkstoffe für den Apparatebau bewährt haben. Diese Legierungen enthalten Zusätze von Arsen, Mangan oder Silizium + Mangan.

6.1 Kupfer-Mangan

Kupfer und Mangan bilden bei Gehalten bis etwa 20 % Mn homogene Legierungen. Diese Werkstoffe sind aufgrund der Desoxidationswirkung des Mangans sauerstofffrei und daher auch bei hohen Temperaturen gegenüber reduzierenden Gasen unempfindlich.

6.1.1 Eigenschaften

Die Manganzusätze erhöhen die Zugfestigkeit des Kupfers sowohl bei Raumtemperatur als auch bei höherer Temperatur (**Bild 31**). Die **Entfestigungstemperaturen** von CuMn2 und CuMn5 liegen bei etwa 400°C bis 450°C. Die **Leitfähigkeit** wird jedoch durch Mangan stark herabgesetzt (**vgl. Bild 3**). Diese Legierungen besitzen im Vergleich zu Kupfer eine erhöhte **Korrosionsbeständigkeit** gegenüber vielen Medien.

6.1.2 Verarbeitung

Kupfer-Mangan-Legierungen haben infolge der höheren Festigkeit auch einen höheren **Formänderungswiderstand** als unlegiertes Kupfer. Die **Zerspanbarkeit** ist mit einem Index von 20 % ähnlich der des Reinkupfers.

Die Werkstoffe lassen sich einwandfrei **weich-** und **hartlöten** und wegen ihrer Sauerstofffreiheit und geringen Wärmeleitfähigkeit auch sehr gut **schweißen** [11].

6.1.3 Verwendung

Cu-Mn Legierungen eignen sich infolge ihrer Temperatur- und Korrosionsbeständigkeit besonders gut als Werkstoffe für den allgemeinen und den chemischen **Apparatebau** und als Legierungen für Schiffskessel.

6.2 Kupfer-Silizium und Kupfer-Silizium-Mangan

Die Löslichkeit von Silizium im Kupfer beträgt max. 5,3 % bei 842°C und geht mit sinkender Temperatur zurück [7]. Die technischen Legierungen mit max. 3,6 % Si zeigen jedoch ein homogenes Gefüge. Sie enthalten im Allgemeinen außer 1,8 % bis 3,6 % Si noch 0,3 % bis 1,3 % Mn. Der Einfluss von Mangan auf die Löslichkeit des Siliziums ist gering. In DIN CEN/TS 13388 sind mit CuSi1 und CuSi3Mn zwei Legierungen genormt (**Ausklapptabelle**).

6.2.1 Eigenschaften

Silizium verbessert die mechanischen Eigenschaften von Kupfer erheblich (**Bild 32**). Ein Siliziumzusatz von 3 % bewirkt eine Festigkeitssteigerung des Kupfers wie vergleichsweise etwa 42 % Zn, 8 % Al oder 6 % Sn. Gleichzeitig verbessert Silizium das Umformungsvermögen. Im Vergleich zum Kupfer lassen sich diese Legierungen durch die Silizium- und Manganzusätze mittels **Kaltumformung** stärker verfestigen.

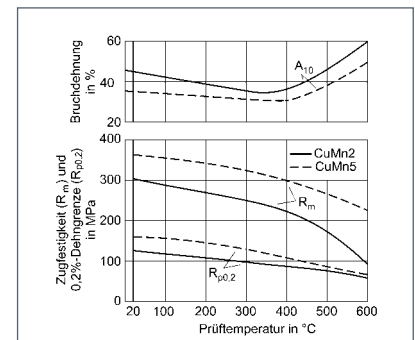


Bild 31: Festigkeitskennwerte von Kupfer-Mangan im weichgeglühten Zustand bei erhöhten Temperaturen [1], DK1 3959

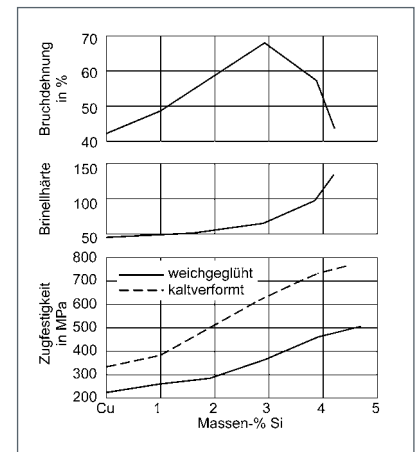


Bild 32: Festigkeitskennwerte von Kupfer-Silizium in Abhängigkeit vom Siliziumgehalt [8], DK1 3960

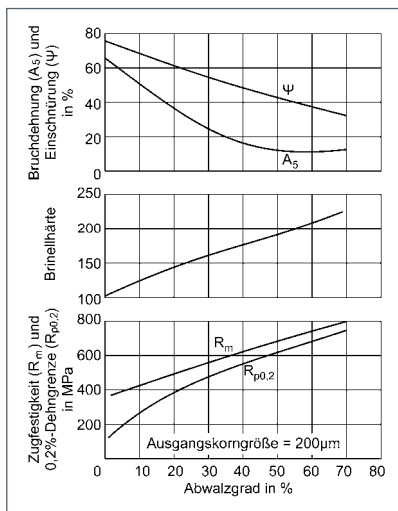


Bild 33: Einfluss der Kaltumformung auf die Festigkeitskennwerte von CuSi3Mn1 [8], DKI 3961

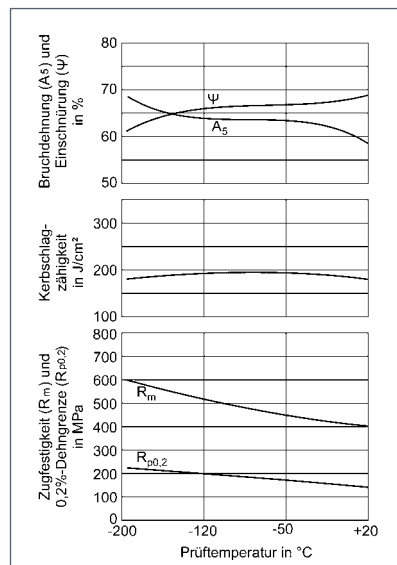


Bild 34: Tieftemperaturverhalten von CuSi3Mn1 [8], DKI 4622

Den Einfluss des Kaltumformungsgrades auf die Festigkeitskennwerte von CuSi3Mn1 zeigt Bild 33. Die **Entfestigungstemperatur** von CuSi3Mn1 liegt bei etwa 300°C. Der Verlauf von Festigkeitskennwerten und Kerbschlagzähigkeit von CuSi3Mn1 in Bild 34 zeigt, dass diese Werkstoffe auch für die Tieftemperaturtechnik geeignet sind. Die **elektrische Leitfähigkeit** beträgt nur etwa 5 bis 10 % des Kupfers. Die **Korrosionsbeständigkeit** ist besser als die des unlegierten Kupfers.

6.2.2 Verarbeitung

Kupfer-Silizium-Mangan-Legierungen lassen sich gut **kalt-** und zwischen 700°C bis 750°C **warmumformen**. Zu beachten sind Bereiche verminderten Formmände-

rungsvermögens um etwa 400°C und bei Temperaturen über 800°C. Die **Zerspanbarkeit** entspricht etwa derjenigen des Kupfers. Wegen der Möglichkeit harter Einschlüsse (Silizide) wird die Zerspannung mit Hartmetallen empfohlen.

Beim **Weichlöten** bereiten die sich bildenden SiO₂-haltigen Zunderschichten einige Schwierigkeiten. Zu empfehlen ist ein vorheriges Verzinnen und anschließendes Weichloten mit Blei-Zinn-Loten nach DIN EN ISO 9543 und DIN EN 1707-100. **Hartlöten** ist mit Messing- und Silberloten nach DIN EN ISO 17672 unter Verwendung von fluorhaltigen Flussmitteln durchführbar.

Die **Schweißbeignung** ist ausgezeichnet, denn die Gehalte an Silizium und Mangan bewirken eine ständige Desoxidation des Schweißbades und ergeben dichte, porenfreie Schweißnähte. Als Schweißzusatz dient CuSi3Mn1 nach DIN EN ISO 24373. Infolge der geringen Leitfähigkeit ist auch die Wärmeableitung der Schweißwärme in den Grundwerkstoff gering und somit ein Vorwärmen der zu verschweißenden Teile meist nicht erforderlich.

6.2.3 Verwendung

Wegen ihrer guten Schweißbeignung und Korrosionsbeständigkeit sind die Kupfer-Silizium-Mangan-Legierungen für den **Apparatebau** hervorragend geeignet.

7. Dispersionsgehärtete Werkstoffe

Die dispersionsgehärteten Werkstoffe enthalten u.a. 0,15 bis 0,6 Vol.-% feine Dispersoide wie z. B. Al_2O_3 -Partikel mit einer Größe von 3 bis 12 nm. Sie werden pulvermetallurgisch hergestellt und vereinen die hohe elektrische Leitfähigkeit des Kupfers mit der hohen Festigkeit des Verbundes. Wegen ihres Fertigungsweges sind die Dispersoid-Werkstoffe den Verbundwerkstoffen zuzuordnen – sie werden hier mehr der Vollständigkeit halber genannt.

Impressum

Herausgeber

Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e.V.
Am Bonneshof 5
40474 Düsseldorf
Telefon: +49 211 4796 300
Fax: +49 211 4796 310
info@copperalliance.de
www.kupferinstitut.de

Bildnachweis

Aurubis AG
Buntmetall Amstetten GmbH
Gebr. Kemper GmbH & Co. KG
LEONI Draht GmbH
KME Germany GmbH & Co. KG
Piel & Adey GmbH & Co. KG
Swissmetall AG

Überarbeitet durch

Dr. Alexander Lerch
Helge Lehmann
Dr. Uwe Hofmann
Dr. Michael Köhler
Ahmad Parsi
Dr. Dirk Rode
Vincent Runser
Dr. Jürgen Schmidt
Volker Tietz
Dr. Ladji Tikana
Dietmar Zenker

8. Literatur und Normen

- [1] Niedriglegierte Kupferlegierungen, Fachbuch; Deutsches Kupferinstitut, Berlin (1966)
- [2] F. Pawlek, K. Reichel: Der Einfluss von Verunreinigungen auf die elektrische Leitfähigkeit von Kupfer. Z. f. Metallkde. 47 (1956), S. 347-351
- [3] E. Tuschy: Kupferwerkstoffe für die Elektrotechnik. Metall 17 (1963), S. 1122-1133
- [4] A. Baukloh, K. Drefahl, U Heubner, M. Rühle: Zeitstanduntersuchungen an niedrig- und unlegierten Kupferwerkstoffen Metall 30 (1976), S. 19-26
- [5] Metals Handbook; Hrsg The American Society for Metals. Cleveland (1961)
- [6] Werkstoff-Handbuch Nichteisenmetalle; Teil 111 Cu. VDI-Verlag. Düsseldorf (1960)
- [7] K. Dies: Kupfer und Kupferlegierungen in der Technik. Springer Verlag. Berlin 1967
- [8] H. J. Wallbaum in Landolt-Bornstein: Zahlenwerte und Funktionen IV Bd., 2. Teil, Bandteil b, S. 639-690 Springer-Verlag, Berlin (1964) (neue Auflage - DKI)
- [9] H. Hübner: Kupfer in Motoren und Generatoren. Metall 26 (1972), S. 1172-1173
- [10] H. - G. Petri; H. Voßkühler: Kupfer-Chrom-Knetlegierungen als Werkstoffe für die Elektrotechnik ETZ-A 76 (1955), S. 360-385
- [11] H. Haseke, R Köcher: CuMn₂ – Herstellung Eigenschaften, schweißtechnische Verarbeitung und Anwendung, Metall 26 (1972), S. 333-241
- [12] M. G. Corson: "Copper Hardened by a New Method", Z. Metallkde 19 (1927), S. 370-371
- [13] S. A. Lockyer, F.M. Noble: "Precipitate Structure in a Cu-Ni-Si Alloy", J. Mater. Sci.29 (1994), S. 218
- [14] A. Bögel: „Spannungsrelaxation in Kupfer-Legierungen für Steckverbinder und Federelemente“ METALL 48 (1994), S. 872
- [15] J. Kinder, J. Fischer-Bühner: „Ausscheidungsuntersuchungen an höherfesten und höher leitfähigen CuNi₂Si-Legierungen“, METALL 59 (2005), S. 722
- [16] H.-A. Kuhn, A. Käufler, D. Ringhand, S. Theobald: „A New High Performance Copper Based Alloy for Electromechanical Connectors“, Mat.-Wiss. U. Werkstofftech. 38 (2007), S. 624
- [17] M. Bohsmann, S. Gross: „Understanding Stress Relaxation“, Matscience Techn. 2008, Pittsburgh /USA, Oct 5-9, 2008, Conf. Proceeding, p. 41
- [18] J. Kinder, D. Hüter: „TEM-Untersuchungen an höherfesten und elektrisch hoch leitfähigen CuNi₂Si-Legierungen“, METALL 63 (2009), S. 298
- [19] D. Ringhand: „Einflussgrößen bei der umformtechnischen Verarbeitung von Hochleistungs-Kupferwerkstoffen“, METALL 63 (2009), S. 304
- [20] J. R. Davis: Copper and Copper alloys, ASM International, (2001)
- [21] J. Günter, J. A. K. Kundig: Copper – Its trade, manufacture, use and environmental status, ASM International & ICA, (1999)
- [22] D.K. Crampton, H.L. Burghoff: The copper-rich alloys of the copper-nickel-phosphorus system, Trans AIME 137, (1940)
- [23] M. Jasner, http://www.copper.org/applications/cuni/txt_KME.html
- [24] Deutsches Kupferinstitut: Legierungen des Kupfers mit Zinn, Nickel, Blei und anderen Metallen, Berlin (1970)

Normen*

Grundnormen

DIN CEN/TS 13388 Übersicht über Zusammensetzungen und Produkte
DIN EN 1172 Bleche und Bänder für das Bauwesen
DIN EN 12163 Stangen zur allgemeinen Verwendung
DIN EN 12164 Stangen für die spanende Bearbeitung
DIN EN 12165 Vormaterial für Schmiedestücke
DIN EN 12166 Drähte zur allgemeinen Verwendung
DIN EN 12167 Profile und Rechteckstangen zur allgemeinen Verwendung
DIN EN 12168 Hohlstangen für die spanende Bearbeitung
DIN EN 12288 Industriearmaturen - Schieber aus Kupferlegierungen
DIN EN 12420 Schmiedestücke
DIN EN 12449 Nahtlose Rundrohre zur allgemeinen Verwendung
DIN EN 12450 Nahtlose, runde Kapillarrohre aus Kupfer
DIN EN 12451 Nahtlose Rundrohre für Wärmeaustauscher
DIN EN 12452 Nahtlose, gewalzte Rippenrohre für Wärmeaustauscher
DIN EN 13148 Feuerverzinnete Bänder

DIN EN 13599 Platten, Bleche und Bänder aus Kupfer für die Anwendung in der Elektrotechnik
DIN EN 13601 Stangen und Drähte aus Kupfer für die allgemeine Anwendung in der Elektrotechnik
DIN EN 1412 Europäisches Werkstoffnummernsystem
DIN EN 14436 Elektrolytisch verzinnete Bänder
DIN EN 1652 Platten, Bleche, Bänder, Streifen und Ronden zur allgemeinen Verwendung
DIN EN 1653 Platten, Bleche und Ronden für Kessel, Druckbehälter und Warmwasserspeicheranlagen
DIN EN 1654 Bänder für Federn und Steckverbinder
DIN EN 1758 Bänder für Systemträger
DIN EN 1982 Blockmetalle und Gussstücke

Verbindungsnormen

DIN EN 29453 Weichlote
DIN EN 1707-100 Weichlote
DIN EN 29454-1 Flussmittel zum Weichlöten
DIN EN 1045 Flussmittel zum Hartlöten
DIN EN ISO 17672 Hartlote
DIN EN ISO 24373 Schweißzusätze

*) Diese Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.
Gültig sind jeweils die neuesten Ausgaben der Normen.



**Deutsches
Kupferinstitut**
Copper Alliance

**Deutsches Kupferinstitut
Berufsverband e.V.**
Am Bonneshof 5
40474 Düsseldorf
Deutschland

Telefon 0211 47963-00
Telefax 0211 47963-10

info@copperalliance.de
www.kupferinstitut.de