

NE-Metalle

Verkaufsorganisation

52070 Aachen
Grüner Weg 37
Telefon 0241 9127-0
Telefax 0241 9127-140

98554 Benshausen
Herzig + Marschall
Otto-Keiner-Straße 57
Telefon 036843 746-0
Telefax 036843 746-29

33647 Bielefeld
Artur-Ladebeck-Straße 114
Telefon 0521 1451-0
Telefax 0521 1451-488

38112 Braunschweig
Robert-Bosch-Straße 1
Telefon 0531 2132-0
Telefax 0531 2132-145

28259 Bremen
Obervieländer Straße 32
Telefon 0421 5727-0
Telefax 0421 5727-269

44147 Dortmund
Westererbenstraße 75
Telefon 0231 8593-0
Telefax 0231 8593-199

99089 Erfurt
Mittelhäuser Straße 80
Telefon 0361 7590-0
Telefax 0361 7590-259

45329 Essen
Johanniskirchstraße 63
Telefon 0201 8368-0
Telefax 0201 8368-344

70736 Fellbach
Ringstraße 45-69
Telefon 0711 5855-0
Telefax 0711 5855-439

60314 Frankfurt/Main
Franziusstraße 8-14
Telefon 069 4023-0
Telefax 069 4023-283

79108 Freiburg
Freiburger Stahlhandel
Auerstraße 3
Telefon 0761 5595-0
Telefax 0761 5595-359

22769 Hamburg
Waidmannstraße 26
Telefon 040 85340-0
Telefax 040 85340-469

30453 Hannover
Badenstedter Straße 52
Telefon 0511 9218-0
Telefax 0511 9218-271

34123 Kassel
Söhrestraße 5
Telefon 0561 5005-0
Telefax 0561 5005-400

56070 Koblenz
Zur Bergpflege 45
Telefon 0261 92780-0
Telefax 0261 92780-70

50825 Köln
Oskar-Jäger-Straße 192
Telefon 0221 5495-0
Telefax 0221 5495-191

04129 Leipzig
Zschortauer Straße 105
Telefon 0341 9174-5
Telefax 0341 9174-690

68219 Mannheim
Dortmunder Straße 2
Telefon 0621 8906-0
Telefax 0621 8906-320

32427 Minden
Ringstraße 73-75
Telefon 0571 39804-0
Telefax 0571 39804-30

81677 München
Truderinger Straße 41
Telefon 089 92002-0
Telefax 089 92002-258

90441 Nürnberg
Dieselstraße 55
Telefon 0911 6632-0
Telefax 0911 6632-266

49084 Osnabrück
Albert-Brickwedde-Straße 8
Telefon 0541 5844-0
Telefax 0541 5844-229

01445 Radebeul/Dresden
Kötitzer Straße 110
Telefon 0351 8367-0
Telefax 0351 8367-210

93055 Regensburg
Siemensstraße 8
Telefon 0941 6070-0
Telefax 0941 6070-179

48431 Rheine
Sprickmannstraße 77-87
Telefon 05971 47-0
Telefax 05971 47-280

18069 Rostock
Schmarler Damm 11
Telefon 0381 8086-0
Telefax 0381 8086-269

57076 Siegen
Industriestraße 19
Telefon 0271 7756-0
Telefax 0271 7756-139

89079 Ulm
Jacob Bek Stahlgroßhandel
Hohnerstraße 5-11
Telefon 0731 405-0
Telefax 0731 405-363

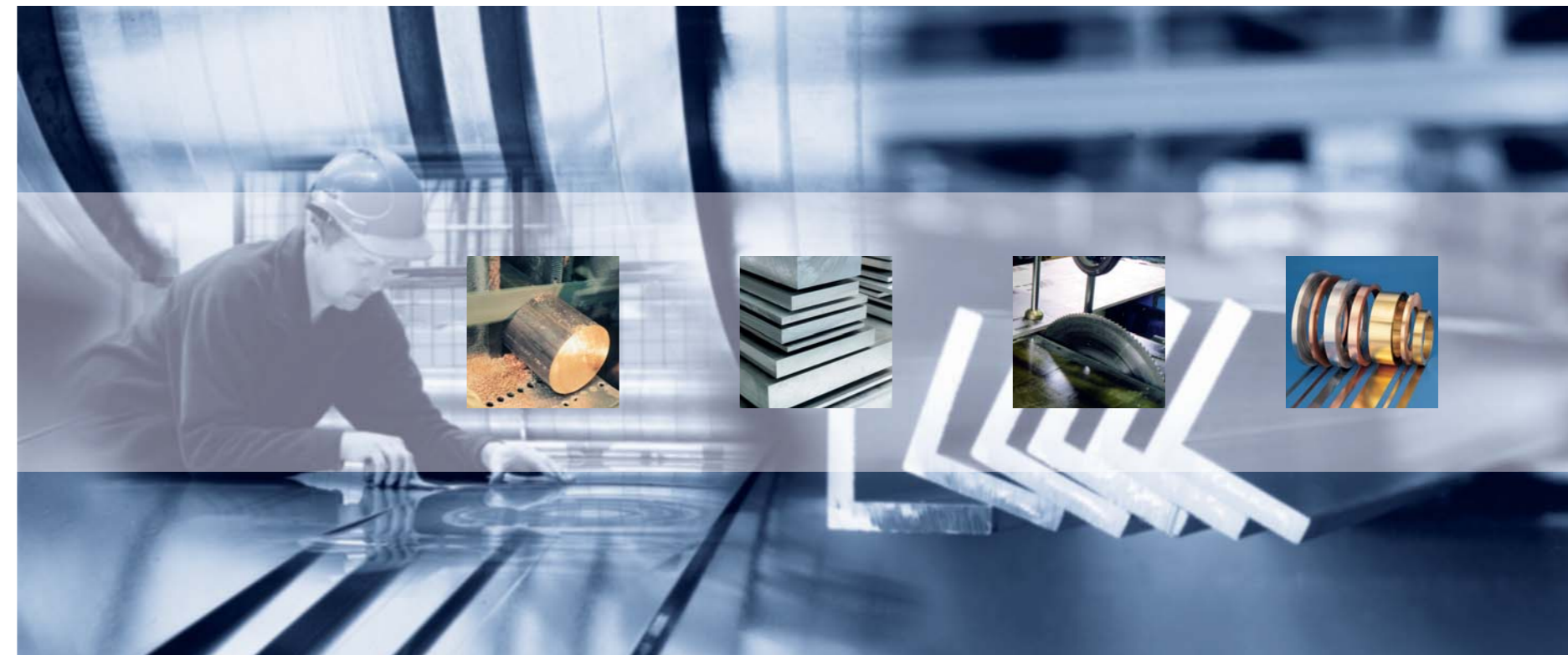
78056 VS-Schwenningen
Freiburger Stahlhandel
Lichtensteinstraße 6
Telefon 07720 855-0
Telefax 07720 855-229

66333 Völklingen
Uttersbergstraße 8
Telefon 06898 3000-0
Telefax 06898 3000-249

88250 Weingarten
Weltestraße 8
Telefon 0751 5097-0
Telefax 0751 5097-456

54516 Wittlich
Röntgenstraße 5
Telefon 06571 1474-0
Telefax 06571 1474-210

97080 Würzburg
Alfred-Nobel-Straße 20
Telefon 0931 20781-0
Telefax 0931 20781-19



www.thyssenkruppschulte.de

ThyssenKrupp Schulte



TKP 08/2008

ThyssenKrupp Schulte



ThyssenKrupp



Hochwertige Produktqualität und termin-gerechte Lieferungen haben seit jeher einen hohen Stellenwert bei uns. Diesen Anspruch dokumentiert auch das Qualitätsmanagement-System nach DIN EN ISO 9001:2000, das bereits vor vielen Jahren eingeführt wurde und seither kontinuierlich weiterentwickelt wird.

Mit unserem Qualitätsmanagement-System und den begleitenden Maßnahmen sorgen wir für reibungslose Arbeits- und Funktionsabläufe im Betrieb. Die Maßnahmen zur Erreichung unserer Qualitätsziele sind vielfältig und beinhalten u. a. detaillierte Qualitätsaufzeichnungen, Kennzeichnung und Rückverfolgbarkeit der Produkte. Auf Werkstoffprüfungen, wie z. B. Spektralanalyse, Härteprüfung, Messungen von Oberflächenrauigkeit, Schichtstärke und Wanddicke sowie eine exakte Kontrolle aller abgehenden Lieferungen legen wir ein besonderes Augenmerk.

Regelmäßige Überprüfung
Unser Qualitätsmanagement-System wird vom Germanischen Lloyd Certification überwacht und regelmäßig zertifiziert. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die kontinuierliche Weiterentwicklung mit ein. Den Leistungsstand unserer Lieferanten überprüfen wir durch ein standardisiertes Bewertungsprogramm.

Was wir tun, tun wir für Sie!
Darauf können Sie sich verlassen. Machen Sie den Test. Sie werden sehen, wir liefern Qualität – ganz nach Ihren Vorstellungen.



Aluminium

1.1	Vorkommen und Eigenschaften	4
1.2	Wirkung der Legierungselemente	5
1.3	Mechanische Eigenschaften gängiger Aluminiumlegierungen	6
1.4	Normenvergleich DIN EN – Übersicht der Aluminiumlegierungen	7
1.5	Verarbeitung	11
1.5.1	Umformen	11
1.5.2	Zerspanen von Aluminium	13
1.5.3	Mechanisches Fügen	13
1.5.4	Schneidverfahren	13
1.5.4.1	Laserbrennschneiden	13
1.5.4.2	Wasserstrahlschneiden	14
1.5.5	Schweißen	14
1.5.5.1	Schweißverfahren	14
1.5.5.2	Zusatzwerkstoffe für Aluminiumschweißen	15
1.5.6	Löten	17
1.5.7	Kleben	17
1.6	Oberflächenveredelung	18
1.6.1	Chemische Oberflächenbehandlung	18
1.6.2	Elektrolytische Oberflächenbehandlung	18
1.6.3	Bezeichnungssystem für die Vorbehandlung der Oberfläche	19
1.6.4	Standard-Farbfächer, Farbgrenzmuster	20
1.6.5	Mess- und Prüfverfahren	20
1.7	Werkstoffe für Luft- und Raumfahrt	21

Kupfer

2.1	Vorkommen und Eigenschaften	22
2.2	Wirkung der Legierungselemente	23
2.3	Mechanische Eigenschaften von ausgehärteten Kupferlegierungen	25
2.4	Normenvergleich DIN EN – Übersicht der Kupferlegierungen	26
2.5	Verarbeitung	30
2.5.1	Umformen	30
2.5.2	Zerspanen	30
2.5.3	Mechanisches Fügen	30
2.5.4	Schneidverfahren	31
2.5.4.1	Thermisches Schneiden	31
2.5.4.2	Wasserstrahlschneiden	31
2.5.5	Schweißen	31
2.5.5.1	Schweißverfahren	31
2.5.6	Löten	32
2.5.7	Kleben	32
2.6	Oberflächenveredelung	33
2.6.1	Oberflächenbehandlung von Kupfer und Kupferlegierungen	33
2.6.2	Grünfärbeverfahren	33
2.6.3	Schwarz- und Graufärbeverfahren	33
2.6.4	Braun- und Rotfärbeverfahren	33
2.7	Werkstoffe für Luft- und Raumfahrt	34

Titan

3.1	Vorkommen und Eigenschaften	35
3.2	Wirkung der Legierungselemente	35
3.3	Mechanische Eigenschaften von Titan	36
3.4	Normenvergleich DIN EN – Übersicht der Titanlegierungen	37
3.5	Verarbeitung	38
3.5.1	Umformen	38
3.5.2	Zerspanen	39
3.5.3	Mechanisches Fügen	39
3.5.4	Schneidverfahren	39
3.5.4.1	Thermisches Schneiden	39
3.5.4.2	Wasserstrahlschneiden	40
3.5.5	Schweißen	40
3.5.5.1	Schweißverfahren	41
3.5.5.2	Zusatzwerkstoffe für Titan	41
3.5.6	Löten	41
3.5.7	Kleben	41
3.6	Oberflächenveredelung	42
3.7	Werkstoffe für Luft- und Raumfahrt	42

1.1

Vorkommen und Eigenschaften

Aluminium ist nach Sauerstoff und Silizium das dritthäufigste Element und mit ca. 8 % am Aufbau der Erdkruste beteiligt. Trotz seines häufigen Vorkommens wurde es als Metall erst in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts entdeckt und kommt als technischer Werkstoff seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts zum Einsatz. Wegen seiner spezifischen Eigenschaften und der reichlichen Ressourcen ist Aluminium das Metall der Gegenwart.

Aluminium zeichnet sich durch ein geringes Gewicht (Dichte 2,70 g/cm³), sehr gute Wärmeleitfähigkeit und eine niedrige Schmelztemperatur aus und ist für den Menschen gesundheitlich unbedenklich. Aluminiumlegierungen können sehr weich bis sehr hart produziert werden, so dass sie aufgrund optimaler Bearbeitbarkeit in vielen Einsatzbereichen verwendet werden.

Das Metall findet vor allem Anwendung in der Verkehrstechnik (Herstellung von Flugzeugen, Automobilen, Lokomotiven und Schiffen), Verpackung, Hochbau, Maschinenbau sowie als metallisch dekorative Applikation in der Innenarchitektur und im Produktdesign.

Aluminium und seine Legierungen/Anwendungsfelder							
EN AW-1... Reinaluminium Al99,XX	EN AW-2... Legierungen mit Kupfer	EN AW-3... Legierungen mit Mangan AlMn [Mg]	EN AW-4... Legierungen mit Silizium AlSi	EN AW-5... Legierung mit Magnesium AlMg[Mn]	EN AW-6... Legierungen mit Magnesium + Silizium AlMgSi	EN AW-7... Legierungen mit Zink, Magnesium (Kupfer) AlZn[Mg,Cu]	EN AW-8... Legierungen mit Elementen AlFe, AlLi
nicht aushärtbar	aushärtbar	nicht aushärtbar		nicht aushärtbar	aushärtbar	aushärtbar	
Hohe Korrosionsbeständigkeit Apparate- und Behälterbau, chemische Industrie, Nahrungsmittelindustrie gute Verformbarkeit, Tiefziehen Profile für Dekoration und Architektur hoher Glanz durch chem. und elektrolytisches Polieren Reflektoren, Modeschmuck	Bohr-, Dreh- und Fräsqualität, Automatenlegierungen Luftfahrt, Transport und Verkehr höchste Isotropie der Aluminiumlegierungen	Hohe Korrosionsbeständigkeit, gut tiefziehgeeignet, Falzqualität Dachdeckung, Waschmaschinen, Spezialwerkstoff für Isolierungsabdichtungen	Üblicherweise nur für Gussteile	Gezogene und gedrückte Teile Möbel-, Metallbau, Apparate- und Behälterbau, Fahrzeug- und Schiffbau, Metallbau (Eloxalqualität), Verkehrsschilder, Tiefemperaturtechnik. Nichtaushärtbare Legierung höchste Festigkeit	Gute Korrosionsbeständigkeit und Schweißbarkeit, sehr gut zu polieren Fenster, Türen, Innenausstattung, Metallgestelle, Textilindustrie, Haushaltsartikel, Dekoration, Schrauben, Fernsehantennen, Stricknadeln, Nahrungsmittelindustrie, Fahrzeugbau	Legierungen für tragende Konstruktionen, gut schweißbar Fahrzeugbau, Transportgeräte hohe Festigkeiten Luftfahrt, Maschinenbau, Speziallegierungen für den Werkzeug-, Vorrichtung- und Formenbau	Sonderanwendungsgebiete, z. B. Luftfahrt, Tiefziehen

Physikalische und mechanische Eigenschaften von Aluminium		
Dichte	g/cm ³	2,70
Schmelztemperatur	°C	660
Elastizitätsmodul	N/mm ²	68.000–80.000
Ausdehnungskoeffizient	10 ⁻⁶ /K	20–24,2
elektrische Leitfähigkeit	m/(Ωmm ²)	11–38
Zugfestigkeit ¹	N/mm ²	35–465
Bruchdehnung ¹	%	1–35

¹ abhängig vom Behandlungszustand

Aluminium ist ein Metall, dessen Eigenschaften auch nach seiner Nutzung in einem Produkt nicht beeinträchtigt werden, so dass Aluminium beliebig oft ohne Qualitätsverlust wiederverwertet werden kann. Der Energieverbrauch bei der Herstellung von Recycling-Aluminium liegt bei nur 5–10 % des Wertes, der für die Herstellung von Primär-Aluminium benötigt wird. Daher ist das Recyceln von Aluminium sowohl ökonomisch als auch ökologisch sinnvoll. Aluminiumschrott trägt zu rund 25 % zur Deckung des Gesamtbedarfs bei.

1.2

Wirkung der Legierungselemente

Nicht aushärtbare Legierungen

Die nicht aushärtbaren (naturharten) Knetlegierungen des Aluminiums enthalten im Allgemeinen Magnesiumzusätze von 0,5 bis 7 % oder auch Manganzusätze bis 1,5 %.

Wirksam für die Festigkeitssteigerung bei den nicht aushärtbaren Legierungen sind hauptsächlich in Lösung befindliche Atome der genannten Elemente, die das Aluminiumgitter verspannen und dadurch verfestigen.

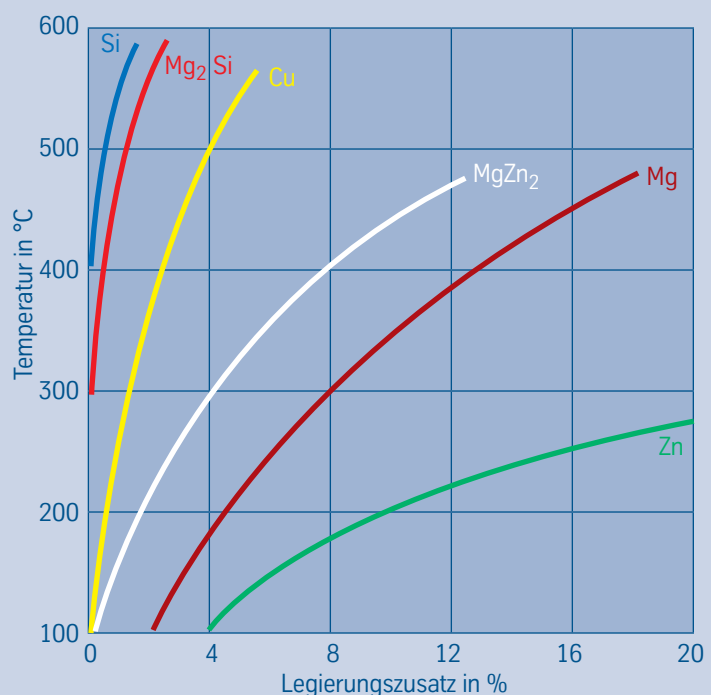
Aushärtbare Legierungen

Bei der Herstellung aushärtbarer Legierungen werden die Elemente Silizium, Kupfer, Zink oder Verbindungen dieser (Halb-)Metalle zulegiert (Bild 1), die bei höheren Temperaturen gelöst sind. Beim Abkühlen wird das Aluminium-Gefüge sich selbst überlassen (Auslagern).

Die Atome der Legierungsbestandteile versuchen nun, sich zu vereinigen und Ausscheidungen zu bilden. Auf ihrer Diffusion (Wanderung) zueinander bleiben sie unterwegs im Aluminium stecken und bewirken eine besonders starke Verspannung, die zur Festigkeitssteigerung führt.

Löslichkeit von Legierungszusätzen in Aluminium

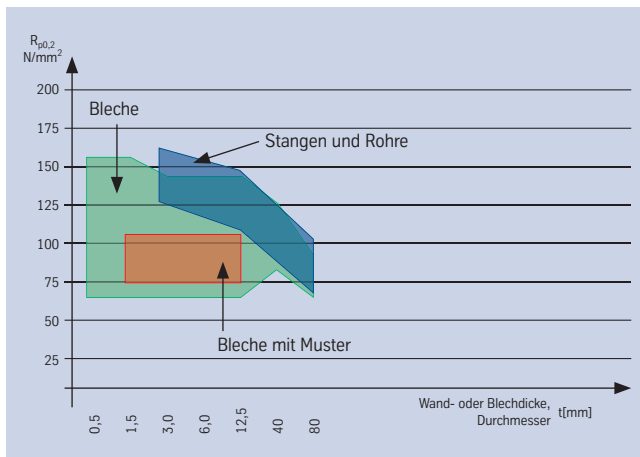
Bild 1



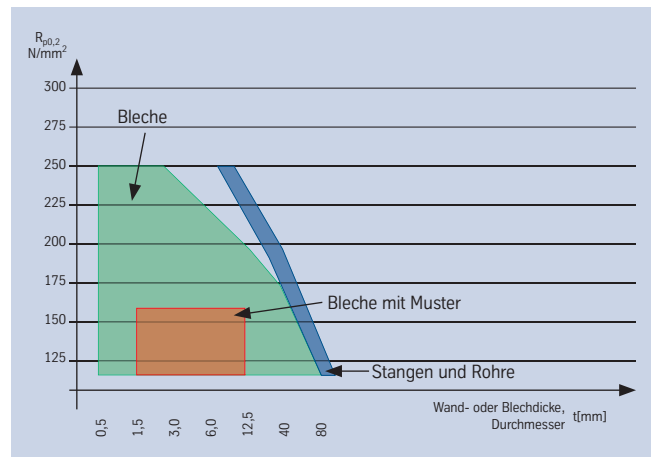
1.3

Mechanische Eigenschaften gängiger Aluminiumlegierungen

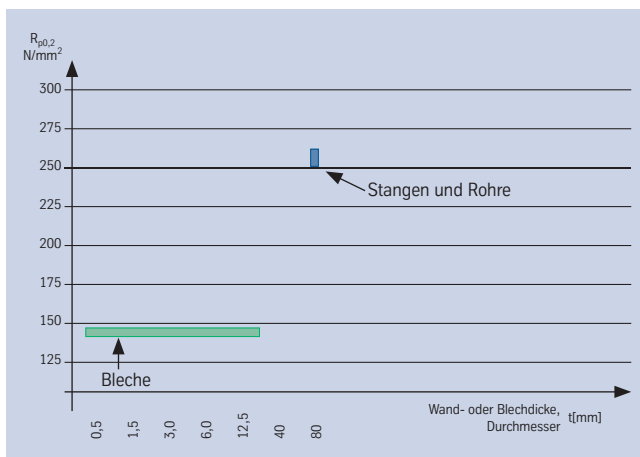
EN AW-1050A Aluminium – Reinaluminium



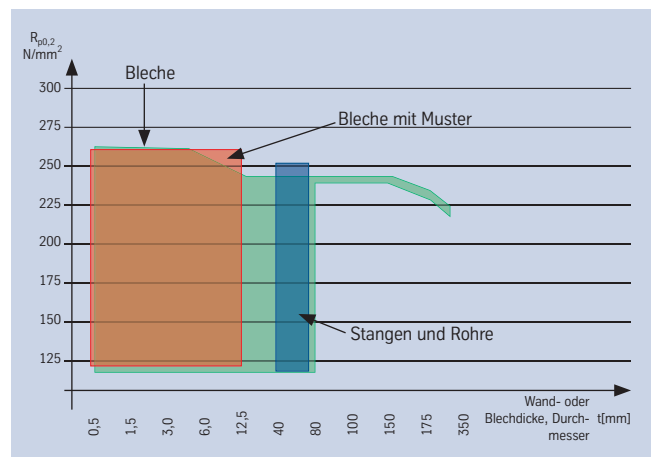
EN AW-5754 Aluminium – legiert mit Magnesium



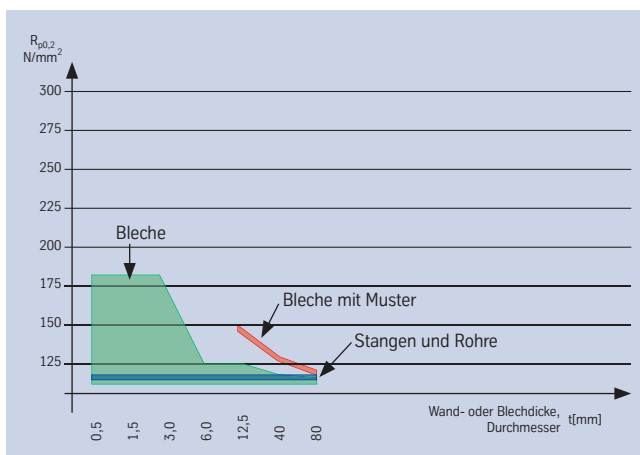
EN AW-2017A Aluminium – legiert mit Kupfer



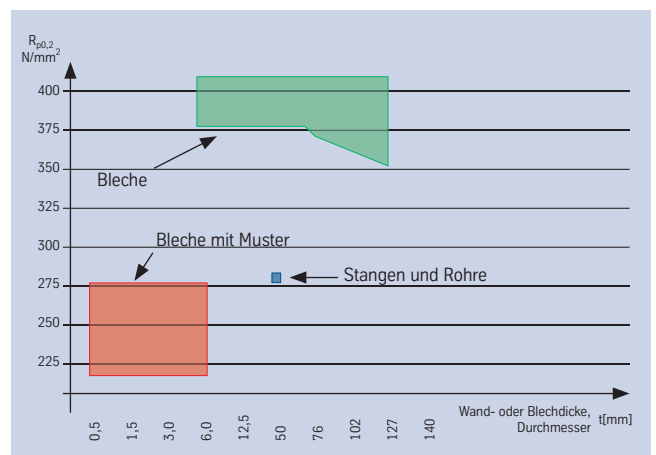
EN AW-6082 Aluminium – legiert mit Magnesium und Silizium



EN AW-3003 Aluminium – legiert mit Mangan

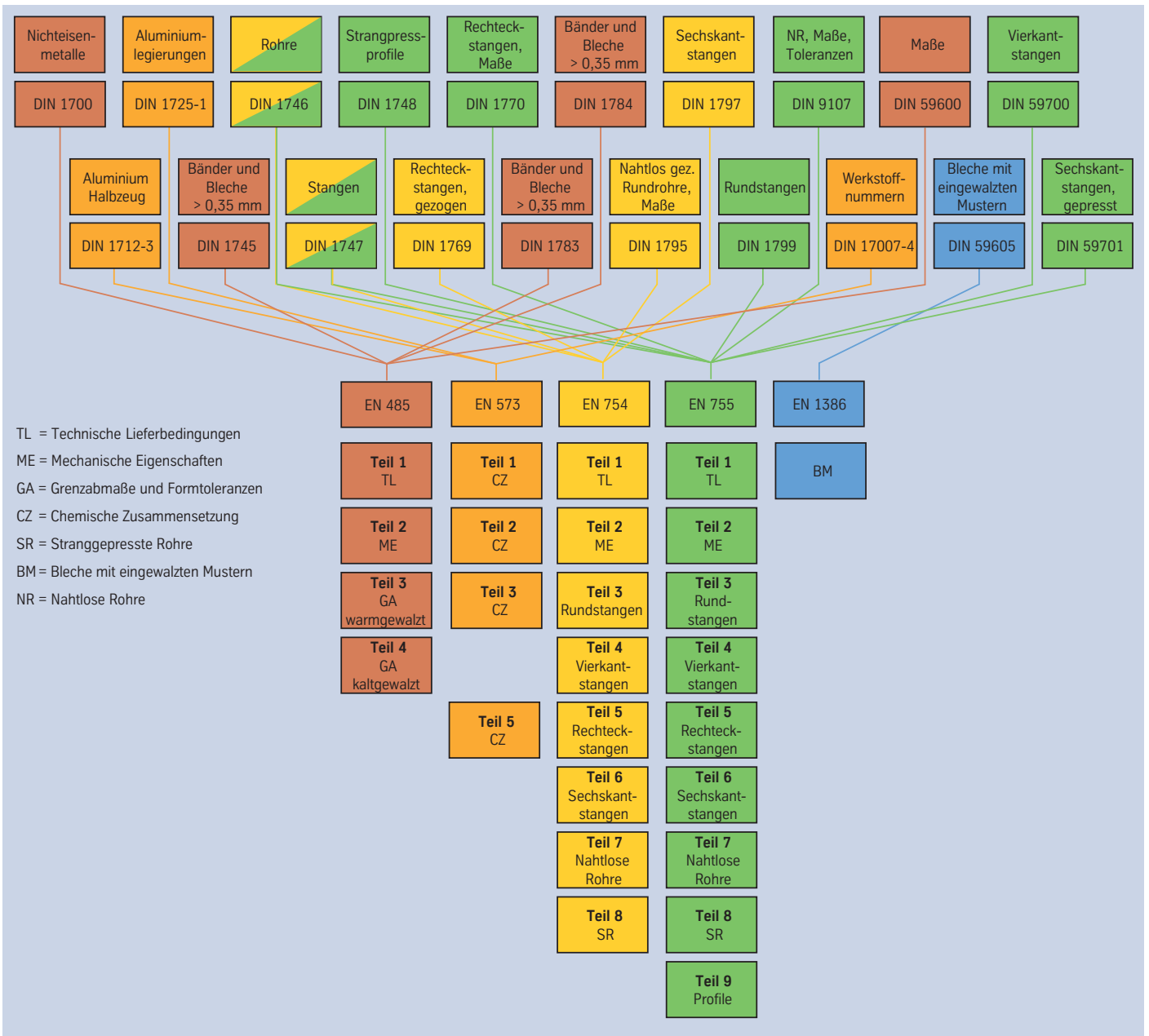


EN AW-7020 Aluminium – legiert mit Zink und Magnesium



1.4

Normenvergleich DIN EN – Übersicht der Aluminiumlegierungen



Aufbau der Werkstoffnummern

EN	A	W	1	0	5	0	A
1	2	3	4	5	6	7	8

- 1 = Präfix
- 2 = Bezeichnung für Aluminiumwerkstoff (A)
- 3 = Werkstoffform (hier W = Knetlegierung)
- 4 = Zahl zwischen 1–8 (Legierungsgruppe)

- 5–7 = Zahlen zwischen 111–999
(haben keine bestimmte Bedeutung)
- 8 = Buchstabe A–Z (Zusatz, wenn für die Benennung die Zahlenkombinationen nicht ausreichen)

DIN Bezeichnung Kurzzeichen	Werkstoff-Nr.	EN Bezeichnung Werkstoff-Nr.	Chemisches Symbol	Bänder, Bleche, Platten	Bleche mit eingewalzten Mustern	gezogene Stangen und Rohre	stranggepresste Stangen, Rohre und Profile	Vordraht	Schmiedestücke
				DIN EN 573-3 DIN EN 485-1 DIN 40501-1	DIN EN 573-3 DIN EN 1386 DIN EN 485-1	DIN EN 573-3 DIN EN 754-1 DIN 40501-2 DIN 40501-3	DIN EN 573-3 DIN EN 755-1 DIN 40501-2 DIN 40501-3	DIN EN 573-3 DIN EN 1715-1 DIN EN 1745-2 DIN 40501-4	DIN EN 573-3 DIN EN 586-1
Reinaluminium, nicht aushärtbar									
Al99,9	3.0305	–	–						
AlMg1,5	3.3316	–	–						
E-Al99,85MgSi	3.2307	–	–						
E-AlMgSi	3.2305	–	–						
Al99,5	3.0255	EN AW-1050A	EN AW-Al 99,5	●	●	●	●	●	
–	–	EN AW-1060	EN AW-Al 99,6						
Al99,7	3.0275	EN AW-1070A	EN AW-Al 99,7	●			●	●	
Al99,8	3.0285	EN AW-1080A	EN AW-Al 99,8(A)	●				●	
–	–	EN AW-1085	EN AW-Al 99,85						
–	–	EN AW-1090	EN AW-Al 99,90					●	
Al99,98R	3.0385	EN AW-1098	EN AW-Al 99,98					●	
–	–	EN AW-1100	EN AW-Al 99,0Cu						
–	–	EN AW-1198	EN AW-Al 99,98(A)						
–	–	EN AW-1199	EN AW-Al 99,99						
Al99	3.0205	EN AW-1200	EN AW-Al 99,0	●		●	●	●	
–	–	EN AW-1200A	EN AW-Al 99,0(A)						
–	–	EN AW-1235	EN AW-Al 99,35						
–	–	EN AW-1350	EN AW-EAl 99,5				●	●	
E-Al	3.0257	EN AW-1350A	EN AW-EAl 99,5(A)						
–	–	EN AW-1370	EN AW-EAl 99,7					●	
–	–	EN AW-1450	EN AW-Al 99,5Ti					●	
Legierungen mit Kupfer, aushärtbar									
–	–	EN AW-2001	EN AW-Al Cu5,5MgMn						
AlCuMgPb	3.1645	EN AW-2007	EN AW-Al Cu4PbMgMn			●	●		
AlCuBiPb	3.1655	EN AW-2011	EN AW-Al Cu6BiPb			●	●	●	●
–	–	EN AW-2011A	EN AW-Al Cu6BiPb(A)			●	●		
AlCuSiMn	3.1255	EN AW-2014	EN AW-Al Cu4SiMg	●		●	●		●
–	–	EN AW-2014A	EN AW-Al Cu4SiMg(A)	●		●	●	●	
AlCuMg1	3.1325	EN AW-2017A	EN AW-Al Cu4MgSi(A)	●		●	●	●	●
AlCuMg2	3.1355	EN AW-2024	EN AW-Al Cu4Mg1	●		●	●	●	●
–	–	EN AW-2030	EN AW-Al Cu4PbMg			●	●	●	
–	–	EN AW-2031	EN AW-Al Cu2,5NiMg						●
–	–	EN AW-2091	EN AW-Al Cu2Li2Mg1,5						
AlCu2,5Mg0,5	3.1305	EN AW-2117	EN AW-Al Cu2,5Mg					●	
–	–	EN AW-2124	EN AW-Al Cu4Mg1(A)						
–	–	EN AW-2214	EN AW-Al Cu4SiMg(B)						
–	–	EN AW-2219	EN AW-Al Cu6Mn						●
–	–	EN AW-2319	EN AW-Al Cu6Mn(A)					●	
–	–	EN AW-2618A	EN AW-Al Cu2Mg1,5Ni						●
Legierungen mit Mangan, nicht aushärtbar									
–	–	EN AW-3002	EN AW-Al Mn0,2Mg0,1						
AlMnCu	3.0517	EN AW-3003	EN AW-Al Mn1Cu	●	●	●	●	●	
AlMn1Mg1	3.0526	EN AW-3004	EN AW-Al Mn1Mg1	●					
AlMn1Mg0,5	3.0525	EN AW-3005	EN AW-Al Mn1Mg0,5	●					
–	–	EN AW-3005A	EN AW-Al Mn1Mg0,5(A)						
–	–	EN AW-3017	EN AW-Al Mn1Cu0,3						
–	–	EN AW-3102	EN AW-Al Mn0,2						
AlMn1	3.0515	EN AW-3103	EN AW-Al Mn1	●	●	●	●	●	

DIN Bezeichnung Kurzzeichen	Werkstoff-Nr.	EN Bezeichnung Werkstoff-Nr.	Chemisches Symbol	Bänder, Bleche, Platten	Bleche mit eingewalzten Mustern	gezogene Stangen und Rohre	stranggepresste Stangen, Rohre und Profile	Vordraht	Schmiedestücke
				DIN EN 573-3 DIN EN 485-1 DIN 40501-1	DIN EN 573-3 DIN EN 1386 DIN EN 485-1	DIN EN 573-3 DIN EN 754-1 DIN 40501-2 DIN 40501-3	DIN EN 573-3 DIN EN 755-1 DIN 40501-2 DIN 40501-3	DIN EN 573-3 DIN EN 1715-1 DIN EN 1745-2 DIN 40501-4	DIN EN 573-3 DIN EN 586-1
Legierungen mit Mangan, nicht aushärtbar									
–	–	EN AW-3103A	EN AW-AI Mn1(A)						
–	–	EN AW-3104	EN AW-AI Mn1Mg1Cu						
AlMn0,5Mg0,5	3.0505	EN AW-3105	EN AW-AI Mn0,5Mg0,5	●					
–	–	EN AW-3105A	EN AW-AI Mn0,5Mg0,5(A)						
–	–	EN AW-3105B	EN AW-AI Mn0,6Mg0,5						
AlMn0,6	3.0506	EN AW-3207	EN AW-AI Mn0,6						
–	–	EN AW-3207A	EN AW-AI Mn0,6(A)						
Legierungen mit Silizium									
–	–	EN AW-4004	EN AW-AI Si10Mg1,5						
–	–	EN AW-4006	EN AW-AI Si1Fe	●					
–	–	EN AW-4007	EN AW-AI Si1,5Mn	●					
–	–	EN AW-4014	EN AW-AI Si2						
–	–	EN AW-4015	EN AW-AI Si2Mn	●					
–	–	EN AW-4016	EN AW-AI Si2MnZn						
–	–	EN AW-4017	EN AW-AI SiMnMgCu						
–	–	EN AW-4018	EN AW-AI Si7Mg						
–	–	EN AW-4032	EN AW-AI Si12,5MgCuNi						●
–	–	EN AW-4043A	EN AW-AI Si5(A)					●	
–	–	EN AW-4045	EN AW-AI Si10					●	
–	–	EN AW-4046	EN AW-AI Si10Mg					●	
–	–	EN AW-4047A	EN AW-AI Si12(A)					●	
–	–	EN AW-4104	EN AW-AI Si10MgBi						
–	–	EN AW-4343	EN AW-AI Si7,5						
Legierungen mit Magnesium, nicht aushärtbar									
–	–	EN AW-5005	EN AW-AI Mg1(B)	●		●	●	●	
AlMg1	3.3315	EN AW-5005A	EN AW-AI Mg1(C)	●		●	●		
–	–	EN AW-5010	EN AW-AI Mg0,5Mn						
–	–	EN AW-5018	EN AW-AI Mg3Mn0,4					●	
AlMg5	3.3555	EN AW-5019	EN AW-AI Mg5			●	●	●	●
–	–	EN AW-5040	EN AW-AI Mg1,5Mn	●					
–	–	EN AW-5042	EN AW-AI Mg3,5Mn						
AlMg2Mn0,8	3.3527	EN AW-5049	EN AW-AI Mg2Mn0,8	●					
–	–	EN AW-5050	EN AW-AI Mg1,5(C)	●					
–	–	EN AW-5050A	EN AW-AI Mg1,5(D)						
AlMg1,8	3.3326	EN AW-5051A	EN AW-AI Mg2(B)				●	●	
AlMg2,5	3.3523	EN AW-5052	EN AW-AI Mg2,5	●	●	●	●	●	
AlMg5	3.3555	EN AW-5056A	EN AW-AI Mg5						
–	–	EN AW-5058	EN AW-AI Mg5Pb1,5						
AlMg4,5	3.3345	EN AW-5082	EN AW-AI Mg4,5					●	
AlMg4,5Mn	3.3547	EN AW-5083	EN AW-AI Mg4,5Mn0,7	●	●	●	●		●
AlMg4Mn	3.3545	EN AW-5086	EN AW-AI Mg4	●	●	●		●	
–	–	EN AW-5087	EN AW-AI Mg4,5MnZr					●	
Al99,85Mg0,5	3.3307	EN AW-5110	EN AW-AI 99,85Mg0,5					●	
–	–	EN AW-5119	EN AW-AI Mg5(A)					●	
–	–	EN AW-5119A	EN AW-AI Mg5(B)					●	
–	–	EN AW-5149	EN AW-AI Mg2Mn0,8(A)					●	
–	–	EN AW-5154A	EN AW-AI Mg3,5(A)	●		●	●	●	
–	–	EN AW-5154B	EN AW-AI Mg3,5Mn0,3						
AlMg5Mn	3.3549	EN AW-5182	EN AW-AI Mg4,5Mn0,4	●					
–	–	EN AW-5183	EN AW-AI Mg4,5Mn0,7(A)					●	
–	–	EN AW-5183A	EN AW-AI Mg4,5Mn0,7(C)						
–	–	EN AW-5186	EN AW-AI Mg4Mn0,4						
–	–	EN AW-5187	EN AW-AI Mg4,5MnZr(A)						
Al99,9Mg0,5	3.3308	EN AW-5210	EN AW-AI 99,9Mg0,5					●	
–	–	EN AW-5249	EN AW-AI Mg2Mn0,8Zr					●	
AlMg2Mn0,3	3.3525	EN AW-5251	EN AW-AI Mg2Mn0,3	●		●	●	●	
–	–	EN AW-5252	EN AW-AI Mg2,5(B)						
–	–	EN AW-5283A	EN AW-AI Mg4,5Mn0,7(B)						
Al99,85Mg1	3.3317	EN AW-5305	EN AW-AI 99,85Mg1					●	
AlRMg0,5	3.3309	EN AW-5310	EN AW-AI 99,98Mg0,5						
–	–	EN AW-5352	EN AW-AI Mg2,5(A)						
–	–	EN AW-5354	EN AW-AI Mg2,5MnZr					●	
–	–	EN AW-5356	EN AW-AI Mg5Cr(A)					●	
–	–	EN AW-5356A	EN AW-AI Mg5Cr(B)						
–	–	EN AW-5383	EN AW-AI Mg4,5Mn0,9	●					
–	–	EN AW-5449	EN AW-AI Mg2Mn0,8(B)	●					

DIN Bezeichnung Kurzzeichen	Werkstoff-Nr.	EN Bezeichnung Werkstoff-Nr.	Chemisches Symbol	Bänder, Bleche, Platten	Bleche mit eingewalzten Mustern	gezogene Stangen und Rohre	stranggepresste Stangen, Rohre und Profile	Vordraht	Schmiedestücke
				DIN EN 573-3 DIN EN 485-1 DIN 40501-1	DIN EN 573-3 DIN EN 1386 DIN EN 485-1	DIN EN 573-3 DIN EN 754-1 DIN 40501-2 DIN 40501-3	DIN EN 573-3 DIN EN 755-1 DIN 40501-2 DIN 40501-3	DIN EN 573-3 DIN EN 1715-1 DIN EN 1745-2 DIN 40501-4	DIN EN 573-3 DIN EN 586-1
Legierungen mit Magnesium, nicht aushärtbar									
AlMg _{2,7} Mn	3.3537	EN AW-5454	EN AW-Al Mg ₃ Mn	•			•		•
–	–	EN AW-5456A	EN AW-Al Mg ₅ Mn ₁ (A)					•	
–	–	EN AW-5456B	EN AW-Al Mg ₅ Mn ₁ (B)					•	
Al _{99,9} Mg ₁	3.3318	EN AW-5505	EN AW-Al 99,9Mg ₁					•	
–	–	EN AW-5554	EN AW-Al Mg ₃ Mn(A)					•	
AlMg ₅ Mn	3.3549	EN AW-5556A	EN AW-Al Mg ₅ Mn					•	
–	–	EN AW-5556B	EN AW-Al Mg ₅ Mn(A)					•	
–	–	EN AW-5605	EN AW-Al 99,98Mg ₁					•	
–	–	EN AW-5654	EN AW-Al Mg _{3,5} Cr					•	
–	–	EN AW-5654A	EN AW-Al Mg _{3,5} Cr(A)					•	
–	–	EN AW-5657	EN AW-Al 99,85Mg ₁ (A)					•	
AlMg ₃	3.3535	EN AW-5754	EN AW-Al Mg ₃	•	•	•	•	•	•
Legierungen mit Magnesium und Silizium, aushärtbar									
–	–	EN AW-6003	EN AW-Al Mg ₁ Si _{0,8}				•		
–	–	EN AW-6005	EN AW-Al SiMg				•		
AlMgSi _{0,7}	3.3210	EN AW-6005A	EN AW-Al SiMg(A)				•		
–	–	EN AW-6005B	EN AW-Al SiMg(B)				•		
–	–	EN AW-6008	EN AW-Al SiMgV				•		
–	–	EN AW-6011	EN AW-Al Mg _{0,9} Si _{0,9} Cu				•		
AlMgSiPb	3.0615	EN AW-6012	EN AW-Al MgSiPb			•	•	•	
–	–	EN AW-6013	EN AW-Al Mg ₁ Si _{0,8} CuMn				•		
–	–	EN AW-6015	EN AW-Al Mg ₁ Si _{0,3} Cu				•		
–	–	EN AW-6016	EN AW-Al Si _{1,2} Mg _{0,4}	•			•		
–	–	EN AW-6018	EN AW-Al Mg ₁ SiPbMn				•		
–	–	EN AW-6056	EN AW-Al Si ₁ MgCuMn				•		
AlMgSi _{0,5}	3.3206	EN AW-6060	EN AW-Al MgSi			•	•	•	
AlMg ₁ SiCu	3.3211	EN AW-6061	EN AW-Al Mg ₁ SiCu	•	•	•	•	•	
–	–	EN AW-6061A	EN AW-Al Mg ₁ SiCu(A)				•		
–	–	EN AW-6063	EN AW-Al Mg _{0,7} Si			•	•	•	
–	–	EN AW-6063A	EN AW-Al Mg _{0,7} Si(A)			•	•	•	
–	–	EN AW-6081	EN AW-Al Si _{0,9} MgMn				•		
AlMgSi ₁	3.2315	EN AW-6082	EN AW-Al Si ₁ MgMn	•	•	•	•	•	•
–	–	EN AW-6082A	EN AW-Al Si ₁ MgMn(A)				•		
–	–	EN AW-6101	EN AW-EAl MgSi				•		
–	–	EN AW-6101A	EN AW-EAl MgSi(A)				•		
E-AlMgSi _{0,5}	3.3207	EN AW-6101B	EN AW-EAl MgSi(B)				•		
–	–	EN AW-6106	EN AW-Al MgSiMn				•		
–	–	EN AW-6181	EN AW-Al Si ₁ Mg _{0,8}				•		
–	–	EN AW-6201	EN AW-EAl Mg _{0,7} Si				•		
–	–	EN AW-6261	EN AW-Al Mg ₁ SiCuMn				•		
–	–	EN AW-6262	EN AW-Al Mg ₁ SiPb			•	•		
–	–	EN AW-6351	EN AW-Al Si ₁ Mg _{0,5} Mn				•		
–	–	EN AW-6351A	EN AW-Al Si ₁ Mg _{0,5} Mn(A)				•		
Al _{99,9} MgSi	3.3208	EN AW-6401	EN AW-Al 99,9MgSi				•		
–	–	EN AW-6463	EN AW-Al Mg _{0,7} Si(B)				•		
–	–	EN AW-6951	EN AW-Al MgSi _{0,3} Cu				•		
Legierungen mit Zink, Magnesium (Kupfer), aushärtbar									
–	–	EN AW-7003	EN AW-Al Zn ₆ Mg _{0,8} Zr				•		
–	–	EN AW-7005	EN AW-Al Zn _{4,5} Mg _{1,5} Mn				•		
–	–	EN AW-7009	EN AW-Al Zn _{5,5} MgCuAg				•		
–	–	EN AW-7010	EN AW-Al Zn ₆ MgCu				•		•
–	–	EN AW-7012	EN AW-Al Zn ₆ Mg ₂ Cu				•		•
–	–	EN AW-7015	EN AW-Al Zn ₅ Mg _{1,5} CuZr				•		
–	–	EN AW-7016	EN AW-Al Zn _{4,5} Mg ₁ Cu				•		
AlZn _{4,5} Mg ₁	3.4335	EN AW-7020	EN AW-Al Zn _{4,5} Mg ₁	•	•	•	•		•
–	–	EN AW-7021	EN AW-Al Zn _{5,5} Mg _{1,5}	•			•		
AlZnMgCu _{0,5}	3.4345	EN AW-7022	EN AW-Al Zn ₅ Mg ₃ Cu	•		•	•		
–	–	EN AW-7026	EN AW-Al Zn ₅ Mg _{1,5} Cu				•		
–	–	EN AW-7029	EN AW-Al Zn _{4,5} Mg _{1,5} Cu				•		
–	–	EN AW-7030	EN AW-Al Zn _{5,5} Mg ₁ Cu				•		
–	–	EN AW-7039	EN AW-Al Zn ₄ Mg ₃				•		
–	–	EN AW-7049A	EN AW-Al Zn ₈ MgCu			•	•		
–	–	EN AW-7050	EN AW-Al Zn ₆ CuMgZr				•		
–	–	EN AW-7060	EN AW-Al Zn ₇ CuMg				•		
AlZn ₁	3.4415	EN AW-7072	EN AW-Al Zn ₁				•		
AlZnMgCu _{1,5}	3.4365	EN AW-7075	EN AW-Al Zn _{5,5} MgCu	•		•	•	•	•

DIN Bezeichnung Kurzzeichen	Werkstoff-Nr.	EN Bezeichnung Werkstoff-Nr.	Chemisches Symbol	Bänder, Bleche, Platten	Bleche mit eingewalzten Mustern	gezogene Stangen und Rohre	stranggepresste Stangen, Rohre und Profile	Vordraht	Schmiedestücke
				DIN EN 573-3 DIN EN 485-1 DIN 40501-1	DIN EN 573-3 DIN EN 1386 DIN EN 485-1	DIN EN 573-3 DIN EN 754-1 DIN 40501-2 DIN 40501-3	DIN EN 573-3 DIN EN 755-1 DIN 40501-2 DIN 40501-3	DIN EN 573-3 DIN EN 1715-1 DIN EN 1745-2 DIN 40501-4	DIN EN 573-3 DIN EN 586-1
Legierungen mit Zink, Magnesium (Kupfer), aushärtbar									
–	–	EN AW-7108	EN AW-Al Zn5Mg1Zr						
–	–	EN AW-7116	EN AW-Al Zn4,5Mg1Cu0,8						
–	–	EN AW-7129	EN AW-Al Zn4,5Mg1,5Cu(A)						
–	–	EN AW-7149	EN AW-Al Zn8MgCu(A)						
–	–	EN AW-7150	EN AW-Al Zn6CuMgZr(A)						
–	–	EN AW-7175	EN AW-Al Zn5,5MgCu(B)						
–	–	EN AW-7178	EN AW-Al Zn7MgCu						
–	–	EN AW-7475	EN AW-Al Zn5,5MgCu(A)						
Legierungen mit Elementen AlFe, AlLi									
–	–	EN AW-8006	EN AW-Al Fe1,5Mn						
–	–	EN AW-8008	EN AW-Al Fe1Mn0,8						
AlFeSi	3.0915	EN AW-8011A	EN AW-Al FeSi(A)	●					
–	–	EN AW-8014	EN AW-Al Fe1,5Mn0,4						
–	–	EN AW-8015	EN AW-Al FeMn0,3						
–	–	EN AW-8016	EN AW-Al Fe1Mn						
–	–	EN AW-8018	EN AW-Al FeSiCu						
–	–	EN AW-8021B	EN AW-Al Fe1,5						
–	–	EN AW-8079	EN AW-Al Fe1Si						
–	–	EN AW-8090	EN AW-Al Li2,5Cu1,5Mg1						
–	–	EN AW-8091	EN AW-Al Li2,5Cu2Mg1						
–	–	EN AW-8111	EN AW-Al FeSi(B)						
–	–	EN AW-8112	EN AW-Al 95						
–	–	EN AW-8211	EN AW-Al FeSi(C)						

1.5

Verarbeitung

1.5.1 Umformen

Das Umformen von Aluminium und seinen Legierungen setzt eine sach- und werkstoffgerechte Verarbeitung, unter Beachtung einiger Besonderheiten, voraus.

Die Werkstoffe sind relativ weich und kerbempfindlich. Die Eigenspannung der Halbzeuge sorgt für eine Rückfederung beim Biegen. Alle Aluminium-Werkstoffe sind gekennzeichnet durch große Wärmedehnung und hohe Wärmeleitfähigkeit.

Aluminium-Oberflächen sind sehr empfindlich. Verunreinigungen an Werkbänken, Arbeitstischen und Arbeitsböcken sind zu vermeiden. Die Kontaktflächen sollten mit einem Belag aus dickem Papier oder Platten aus Kunststoff bzw. Filz ausgerüstet werden.

Um der Kerbempfindlichkeit entgegenzuwirken, müssen die Arbeitsflächen glatt sein und ggf. sind Schmiermittel zu verwenden. Für Markierungen verwendet man Blei- oder Fettstifte. Beim Anreißen mit einer Reißnadel entstehen oft irreparable Kerben.

Kaltumformen

Die meisten Umformarbeiten werden kalt, d. h. bei Umgebungstemperatur durchgeführt. Schon ein Anwärmen kann bei dünnwandigen Profilen und Blechen zu Verwerfungen, bei dickwandigen Bauteilen zu Spannungen führen.

Für das Abkanten von Blechen sind in der folgenden Tabelle die Radien für das Oberwerkzeug zusammengestellt. Sie unterscheiden wegen der unterschiedlichen Bruchdehnungen verschiedene harte Legierungen und deren Behandlungszustand.

Richtwerte für erzielbare kleinste Biegeradien r (Abkanten), bei Aluminiumhalbzeug (90°-Biegung)														
Werkstoff- kurzzeichen	Bezeichnung EN AW	Werkstoffzustand	Dicke mm											
			> 0,5 - 0,8	> 0,8 - 1	> 1 - 1,5	> 1,5 - 2	> 2 - 3	> 3 - 4	> 4 - 5	> 5 - 6	> 6 - 7	> 7 - 8	> 8 - 10	> 10 - 12
Al99,8	EN AW-1080A	weich	0,3	0,4	0,6	0,8	1,3	2,0	2,5	3	4	5	6	8
bis	bis	halbhart	0,6	0,7	1,1	1,4	2,3	3,0	4,5	6	7	8	11	-
Al99	EN AW-1200(A)	hart	1,6	1,9	2,9	3,8	6,0	8,5	11,5	15	18	22	29	-
AlMn1	EN AW-3103	weich	0,5	0,6	1,0	1,3	2,0	3,0	4,0	5	6	8	10	-
AlMnCu	EN AW-3003	halbhart	1,0	1,2	1,8	2,4	3,8	5,5	7,5	9	11	14	18	-
AlMg1	EN AW-5005(A)	hart	2,6	3,2	4,8	6,4	10,0	-	-	-	-	-	-	-
AlMn1Mg1	EN AW-3004	weich	0,6	0,8	1,2	1,6	2,5	3,5	5,0	6	8	9	11	-
AlMg2Mn0,3	EN AW-5251	halbhart	1,3	1,6	2,4	3,2	5,0	7,0	10,0	12	15	18	24	-
AlMg2,5	EN AW-5052	hart	3,2	4,0	6,0	8,0	12,5	-	-	-	-	-	-	-
AlMg3	EN AW-5754	weich	1,0	1,2	1,8	2,4	3,8	5,5	7,0	9	12	14	18	23
		halbhart	1,6	2,0	3,0	4,0	6,3	9,0	12,0	15	19	23	30	-
		hart	3,5	4,5	7,0	9,0	14,5	-	-	-	-	-	-	-
AlMgMn0,8	EN AW-5049	weich	1,0	1,3	1,9	2,6	4,0	6,0	8,0	10	12	15	20	25
		halbhart	2,1	2,7	4,0	5,4	8,4	12,0	16,0	20	25	30	40	-
		hart	4,1	5,1	7,5	10,5	16,0	-	-	-	-	-	-	-
AlMg4Mn	EN AW-5086	weich	1,3	1,6	2,5	3,3	5,1	7,0	10,0	13	15	19	25	32
AlMg4,5Mn	EN AW-5083	halbhart (G)	-	-	4,5	6,0	9,0	13,0	17,5	-	-	-	-	-
AlMgSi0,5	EN AW-6060	kaltausgehärtet	1,5	1,9	2,9	3,8	6,0	9,0	11,5	15	18	22	29	37
AlMgSi0,7	EN AW-6005(A)	warmausgehärtet	1,9	2,5	3,7	5,0	7,8	11,0	15,0	19	23	28	38	47
AlMgSi1	EN AW-6082	weich	0,4	0,5	0,8	1,0	1,6	2,5	3,5	4	5	6	8	-
AlMg1SiCu	EN AW-6061	frisch abgeschreckt	0,6	0,7	1,1	1,4	2,3	3,5	4,5	6	7	8	11	14
		kaltausgehärtet	1,6	2,0	3,0	4,0	6,3	9,0	12,0	15	19	23	30	38
		warmausgehärtet	2,4	3,0	4,5	6,0	9,4	13,0	18,0	23	28	35	45	57
AlCuMg1	EN AW-2017(A)	weich	1,1	1,4	2,0	2,7	4,3	6,0	8,0	10	13	16	21	26
		kaltausgehärtet	2,1	2,7	4,0	5,4	8,4	12,0	16,0	20	25	30	40	51
AlZn4,5Mg1	EN AW-7020	weich	-	-	-	2,0	3,1	4,5	6,0	8	-	-	-	-
		nach Wärmestoß	1,0	1,2	1,8	2,4	3,8	5,5	7,5	9	12	14	18	23

Warmumformen

Ein Warmumformen von Aluminium und seinen Legierungen ist wegen der vielen Risiken, die in Gefügeveränderungen und damit Festigkeitsverlusten und Oberflächenveränderungen begründet sind, nicht besonders verbreitet.

Eine sorgfältige Temperaturkontrolle ist unerlässlich. Der Temperaturbereich ist 300–450 °C. Höhere Temperaturen führen zu Gefügeanomalien.

1.5.2 Zerspanen von Aluminium

Aluminium ist im Allgemeinen leicht spanbar. Gegenüber Stahl gleicher Festigkeit sind die erforderlichen Schnittkräfte wesentlich günstiger (ca. 30 % der von Stahl). Die Spanform ist wegen des verhältnismäßig großen möglichen Spanvolumens bei Aluminium ein wichtiges Kriterium. Sie hängt vom Werkstoff selbst, den Schneidbedingungen und zum Teil auch von der Werkzeuggeometrie ab. Die Standzeit differiert beim Zerspanen von Aluminium mitunter erheblich. Die entscheidende Verschleißgröße ist der Freiflächenverschleiß (annähernd gleichmäßiger Abtrag von Schneidstoff an der Schneidfläche des Werkzeugs). Kolkverschleiß (d. h. muldenförmiger Abtrag von Schneidstoff) tritt bei Aluminiumzerspanung nicht auf.

Aluminium-Knetlegierungen sind in der Gruppe N (Farbe: grün) der VDI Richtlinie 3323 aufgeführt.

Werkstoffuntergruppe	Zerspanungsgruppe
nicht aushärtbar	21
aushärtbar	22

1.5.3 Mechanisches Fügen

Das mechanische Fügen wird unterteilt in

- Fügen durch Umformen
 - Bördeln
 - Falzen
 - Clinchen
- Fügen durch Nieten
 - Blindnieten
 - Hohlنieten
 - Vollنieten
 - Stanzنieten (Voll- und Hohlنieten)
- Fügen durch Anpressen
 - Schrauben
 - Klemmen/Klammern
 - Klipsen

Die wichtigsten der aufgeführten Fügearten sind das Schrauben und speziell in der Luft- und Raumfahrt das Nieten. Schrauben aus Aluminium haben z. B. gegenüber Stahlschrauben einen werkstoffspezifischen Nachteil. Ihre Zugfestigkeit ist wesentlich geringer, deshalb müssen bei der Übertragung von Kräften größere Schraubendurchmesser angewendet werden. Aluminiumnieten werden kalt geschlagen, somit entfallen gegenüber Warmnieten die Zugspannungen, da kein Schrumpfen auftritt. Die Reibung der miteinander verbundenen Bauteile ist deshalb nicht groß, sodass sie keine größeren Kräfte übertragen können. Der Nietschaft wird somit auf Scheren und das Bauteil auf Lochleibung (Druck) beansprucht.

1.5.4 Schneidverfahren

1.5.4.1 Laserbrennschneiden

Voraussetzung für das Laserbrennschneiden ist wie bei allen metallischen Werkstoffen eine ausreichende Absorption der Laserstrahlung. Blanke Aluminium-Oberflächen reflektieren die Laserstrahlung sehr effektiv und Al-Werkstoffe sind gute Wärmeleiter. In der Regel haben sie jedoch eine dünne, fest anhaftende Oxidschicht auf der Oberfläche. Diese Oxidschicht vermindert die Reflexion der Laserstrahlung, besitzt aber eine hohe Schmelztemperatur. Um einen Schneidprozess mit Lasern zu ermöglichen, muss die Oxidationsschicht aufgebrochen und anschließend die Laserstrahlung an der entstehenden blanken Schmelzfront in der Schnittfuge absorbiert werden. Heutzutage stehen Strahlquellen mit hoher Intensität zur Verfügung.

1.5.4.2 Wasserstrahlschneiden

Dieses Verfahren setzt sich wegen seiner Vorteile zum Schneiden von Aluminium immer mehr durch:

- kaltes Trennverfahren, ohne Wärmeeinflusszone
- keine thermische Änderung des Gefüges
- gute Schnittqualität
- sehr geringe bzw. keine Gratbildung

Im Schneidkopf wird das komprimierte Wasser (max. 4.000 bar) mittels einer speziellen Wasserdüse (0,1–0,3 mm Durchmesser) von potenzieller in kinetische Energie umgesetzt und so der Schneidvorgang vollzogen.

1.5.5 Schweißen

Das Schweißen von Aluminium unterscheidet sich grundsätzlich vom Stahlschweißen. Die Schmelztemperatur von Stahl liegt bei etwa 1.500 °C, die von Aluminium bei 660 °C und die von Aluminiumlegierungen bei 570 bis 600 °C.

Wie alle passivierbaren Metalle hat Aluminium eine hochschmelzende Oxidschicht (die Schmelztemperatur beträgt etwa 2.040 °C), die ein Bauteil komplett einschließt und die das Schweißen stark behindert. Hinzu kommen noch weitere werkstoffspezifische Besonderheiten, die beim Schweißen berücksichtigt werden müssen:

- Aluminium hat aus Sicht des Schweißers keine oder nur eine kleine teigige Phase, die es erlauben würde, eine Schweißnaht zu formen.
- Die hohe Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes erfordert ein hohes Wärmeeinbringen.
- Anders als zum Beispiel bei Stahlwerkstoffen wandelt Aluminium nicht um, so dass beim Schweißen hauptsächlich auf gutes Ausgasen von Fremdpartikeln aus dem aufgebracht Schweißgut zu achten ist.
- Die hohe Wärmeausdehnung verursacht Spannungen und Verzug am geschweißten Bauteil.
- Die bereits erwähnte Oxidschicht muss durch mechanisches (Schleifen, Bürsten, oder Schaben) oder durch chemisches (Beizen) Entfernen beseitigt werden.

1.5.5.1 Schweißverfahren

Als Schweißverfahren kommen die WIG-Wechselstromschweißung, die WIG-Gleichstromschweißung, die MIG-Schweißung und die Elektrohandschweißung in Frage, die alle spezielle Besonderheiten aufweisen:

• WIG (Wolfram-Inert-Gas)-Wechselstromschweißung

Bei der WIG-Wechselstromschweißung von Aluminium zerstört die Plushalbwellen des Wechselstroms (AC = Alternating Current) die über dem reinen Material liegende Oxidschicht, um in der darauffolgenden Minusphase eine einwandfreie Aufschmelzung des Aluminiumgrundmaterials zu ermöglichen.

• WIG-Gleichstromschweißung

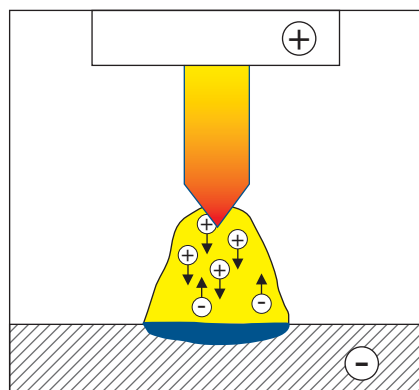
Ca. 70 % der Lichtbogenenergie sind bei diesem Verfahren auf das Werkstück konzentriert, so dass durch die hohe Wärmekonzentration ein dünnflüssiges Schmelzbad entsteht, aus dem die Oxide und Passivschicht durch Oberflächenspannung hinausgedrängt werden. Der Hauptvorteil von diesem Verfahren liegt in der hohen Schweißgeschwindigkeit und dem geringen Verzug des Werkstückes.

• MIG (Metall-Inert-Gas)-Schweißung

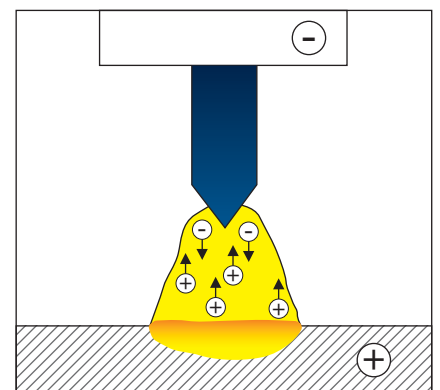
Hier kommt vorwiegend die Impulslichtbogentechnik zum Einsatz. Dabei wird genau ein Tropfen Zusatzdraht pro Impuls von der Drahtelektrode abgelöst. Der Hauptvorteil dieses Verfahrens liegt in einer nahezu spritzerfreien Schweißung begründet.

• **Elektrohandschweißung**

Das bei Aluminium erforderliche Flussmittel zur Beseitigung der Oxidschicht und lichtbogenstabilisierende Zusätze bildet die Umhüllung der Stabelektrode. Da von Hand hergestellte Nähte aufgrund des niedrigen Wärmeeinbringens sehr schnell erstarren und eine korrekte Ausgasung verhindern, hat die Verbindung im Allgemeinen eine schlechte Qualität und wird für Schweißkonstruktionen kaum eingesetzt. Lediglich für Reparaturzwecke kommt diesem Verfahren eine Bedeutung zu.



WIG-Wechselstromschweißung



WIG-Gleichstromschweißung

1.5.5.2 Zusatzwerkstoffe für Aluminiumschweißen

Gruppeneinteilung für Zusatzwerkstoffe			
Typ	Legierungsbezeichnung	Chemische Bezeichnung	Bemerkung
Typ 1	R-1450 R-1080A	Al99,5Ti Al99,8(A)	Ti vermindert die Bildung von Erstarrungsrissen im Schweißgut durch Maßnahmen zur Kornverfeinerung.
Typ 3	R-3103	AlMn1	
Typ 4	R-4043A R-4046 R-4047A R-4018	AlSi5(A) AlSi10Mg AlSi12(A) AlSi7Mg	Die Typ 4-Zusatzwerkstoffe oxidieren beim Anodisieren oder durch atmosphärische Einwirkungen und ergeben eine dunkelgraue Verfärbung, deren Intensität mit größerem Si-Gehalt zunimmt. Derartige Zusatzwerkstoffe ergeben keine gute Farbanpassung zum Grundwerkstoff aus Knetlegierungen. Diese Legierungen werden speziell angewendet, um der Bildung von Erstarrungsrissen in Verbindung mit hoher Aufmischung und starrer Einspannung vorzubeugen.
Typ 5	R-5249 R-5754	AlMg2Mn0,8Zr AlMg3	Wenn guter Korrosionswiderstand und die Farbanpassung als entscheidend anzusehen sind, dann sollte der Mg-Gehalt des Zusatzwerkstoffes dem des Grundwerkstoffes gleichen. Wenn eine hohe Dehngrenze und eine hohe Bruchfestigkeit des Schweißgutes als entscheidend anzusehen sind, sollte ein Zusatzwerkstoff mit einem Mg-Gehalt von 4,5 % bis 5 % verwendet werden.
	R-5556A R-5183 R-5087 R-5356	AlMg5Mn AlMg4,5Mn0,7(A) AlMg4,5MnZr AlMg5Cr(A)	Cr und Zr vermindern die Anfälligkeit zur Bildung von Erstarrungsrissen durch Maßnahmen zur Kornverstärkung. Zr vermindert die Gefahr von Heißrissen.

Anmerkung 1 Die Typnummern 1, 3, 4 und 5 stimmen mit der ersten Ziffer der Legierungsbezeichnung überein.

Anmerkung 2 Diese Tabelle ist zu verwenden, bis eine neue Norm für die Zusatzwerkstoffe existiert.

Auswahl der Zusatzwerkstoffe

Auswahl der Zusatzwerkstoffe innerhalb jedes Kastens
(die Ziffern beziehen sich auf die Typennummern aus der vorherigen Tabelle, Seite 15)

Erste Zeile: Optimale mechanische Eigenschaften

Zweite Zeile: Optimaler Korrosionswiderstand

Dritte Zeile: Optimale Schweißbeignung

Grundwerkstoff											
Al	4										
	1										
	4										
AlMn	4 o. 5	3 o. 4									
	1	3									
	4	4									
AlMg < 1 %	4 o.5	4	4								
	1	4	4								
	4	4	4								
AlMg 3 %	4 o. 5	5	5	5							
	5	5 o. 3	5	5							
	4 o. 5	4	4	5							
AlMg 5 %	5	5	5	5	5						
	5	5	5	5	5						
	5	5	5	5	5						
AlMgSi	4 o. 5	4 o. 5	4 o. 5	5	5	4 o. 5					
	5	5	5	5	5	5					
	4	4	4	4	4	4					
AlZnMg	5	5	5	5	5	5	5				
	5	5	5	5	5	5	5				
	5	5	5	5	5	5	5				
AlSiCu < 1 %	4	4	4	4	4	4	4	4			
	4	4	4	4	4	4	4	4			
	4	4	4	4	4	4	4	4			
AlSiMg	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
AlSiCu	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
AlCu							4	4	4	4	4
							4	4	4	4	4
							4	4	4	4	4
Grundwerkstoff	Al	AlMn	AlMg < 1 %	AlMg 3 %	AlMg 5 %	AlMgSi	AlZnMg	AlSiCu < 1 %	AlSiMg	AlSiCu	AlCu

1.5.6 Löten

Das Verbinden metallischer Werkstoffe mit Hilfe eines geschmolzenen Zusatzmetalls (Lotes) nennt man Löten. Die Berührungsstellen der Grundwerkstoffe müssen mit flüssigem Lot benetzt werden, es darf aber nicht anschmelzen!

Hartlöten

Die Festigkeit beim Hartlöten ist fast so gut wie bei Schweißverbindungen. Allerdings ist darauf zu achten, dass die Arbeitstemperatur nur wenig unterhalb bzw. oberhalb der Solidustemperatur – dem Trennpunkt zwischen fest und flüssig – liegt.

Die meisten Hartlötverbindungen lassen sich anodisch oxidieren, dabei tritt eine teilweise starke Verfärbung der Lötstellen ein, die das Aussehen, nicht aber die Schutzwirkung der anodischen Schicht beeinträchtigt.

Weichlöten

Im Vergleich zum Hartlöten sind die Festigkeit und die Korrosionsbeständigkeit beim Weichlöten wesentlich geringer. Zum Weichlöten sollte man niedrig schmelzende Schwermetalle nehmen. Bei Einfluss von Feuchtigkeit kann sich an den Berührungsstellen zwischen Leicht- und Schwermetallen ein elektrolytisches Element bilden, das zu Kontaktkorrosion führen kann. Daher sind in der Regel Weichlötverbindungen nur im Trockenen beständig bzw. dann, wenn sie entsprechend geschützt werden. Zum Beispiel durch Lackieren und Entfetten.

Weichgelötete Aluminiumteile können nicht anodisch oxidiert werden und sollten nicht längere Zeit über 100 °C erhitzt werden.

1.5.7 Kleben

Voraussetzung für eine einwandfreie Klebeverbindung ist die Vorbereitung bzw. Vorbehandlung der Aluminiumoberfläche. Abgesehen von der mechanischen Festigkeit des Klebstoffes selbst – das ist die Kohäsion –, ist die Bindefestigkeit zwischen Klebstoff und den zu klebenden Werkstoffen – das ist die Adhäsion –, für eine gute Klebeverbindung entscheidend.

Das Kriterium hierfür heißt

$$\text{Adhäsion} \geq \text{Kohäsion}$$

mit der Folge, dass bei optimaler Ausführung der Klebeverbindung eine Trennung in der Klebstoffschicht erfolgt.

Unabdingbare Voraussetzungen für eine befriedigende Adhäsion beim Kleben sind:

- die Oberfläche muss frei von Schmutz, Farbresten, Staub, Fett, Öl und dergleichen sein
- die Oberfläche muss trocken sein

Die Adhäsion des Klebstoffs beruht hauptsächlich auf den zwischenmolekularen Kräften (Van der Waals-Kräfte). Diese kommen aber nicht zustande, wenn ein Schmutz-, Fett-, Öl- oder Wasserfilm dazwischen liegt, auch wenn er für das Auge unsichtbar ist.

Die Adhäsion des Klebstoffs kann durch Oberflächenbehandlung der zu klebenden Flächen (Aufrauen) verstärkt werden, um den Klebstoff auch mechanisch zu verankern. Hierfür gibt es mehrere Alternativen:

- Mechanisches Aufrauen durch Bürsten, Schmirgeln oder Strahlen
- Chemische Vorbehandlung durch Beizen
- Haftgrundverstärkung durch chemische oder elektrolytische Oxidation

Die Auswahl von Klebstoffen ist auf Grund der vielen Angebote unterschiedlicher chemischer Mechanismen und Hersteller enorm; im Einzelfall ist eine Beratung durch den Hersteller des Klebstoffes sinnvoll.

1.6

Oberflächenveredelung

Aluminium und seine Legierungen sind durch ihre Oxidschicht, die sich unter Einwirkung des Luftsauerstoffs auf der Oberfläche ausbildet, für viele Anwendungsbereiche ausreichend gegen Korrosion geschützt. Durch zusätzliche Oberflächenbehandlungen kann diese Oxidschicht verstärkt oder chemisch verändert werden, um bestimmte Anforderungen zu erfüllen: z. B.

- verbesserte Korrosionsbeständigkeit
- erhöhter Verschleißschutz
- verbesserte Haftung nachfolgender Beschichtungen
- dekoratives Aussehen

Zur Oberflächenbehandlung werden bevorzugt chemische oder elektrolytische (anodische Oxidation) Verfahren angewendet.

1.6.1 Chemische Oberflächenbehandlung

Bei diesen Verfahren werden durch chemische Reaktionen Umwandlungsschichten (Konversions-schichten) an der Aluminium-Oberfläche erzeugt, um die Korrosionsbeständigkeit bei geringer korrosiver Belastung zu erhöhen, oder um die Haftfestigkeit von Beschichtungssystemen zu verbessern, wobei die gebildeten Schichten auch eine korrosionshemmende Wirkung zeigen.

Bei den chemischen Reaktionen wird der Grundwerkstoff mit in die Schichtbildung einbezogen, so dass eine ausgezeichnete Haftung entsteht. Folgende Verfahren werden eingesetzt:

- Chromatieren (Gelb-, Grün-, Transparentchromatierung)
- Phosphatieren
- Konversionsverfahren auf Basis komplexer Titan- oder Zirkoniumverbindungen

Voraussetzung für die gleichmäßige Ausbildung dieser Umwandlungsschichten ist das Entfetten und Beizen der Oberfläche. Die Behandlung kann durch Sprühen, Tauchen, Streichen oder im Walzenauftragsverfahren (Rollcoat) erfolgen.

1.6.2 Elektrolytische Oberflächenbehandlung

Da die an der Luft gebildete Oxidschicht mit einer Dicke von etwa $0,01\ \mu\text{m}$ nicht in allen Fällen eine ausreichende Korrosionsbeständigkeit aufweist, werden mit diesen Verfahren (anodische Oxidation, Anodisieren, elektrolytische Oxidation, Eloxieren) Oxidschichten erzeugt, die um ein Vielfaches dicker als die natürliche Oxidschicht sind und Dicken um $10\text{--}12\ \mu\text{m}$ für die Innenanwendung und um $20\ \mu\text{m}$ für die Außenanwendung erreichen.

Hierbei wird das zu anodisierende Aluminiumteil in eine Schwefelsäurelösung eingehängt und mit dem positiven Pol (Anode) einer Gleichspannungsquelle verbunden. Dabei werden die Aluminiumatome im Oberflächenbereich oxidiert, und die so erzeugten Oxidschichten sind daher mit dem Grundwerkstoff strukturell verbunden. In der Praxis finden unterschiedliche Verfahrensvarianten Anwendung, und durch die Wahl des Verfahrens lassen sich dekorative oder technisch funktionelle Oxidschichten herstellen.

Noch vorhandene Poren können durch eine geeignete Behandlung, z. B. in siedendem Wasser oder mit Wasserdampf, geschlossen werden. Durch die so verdichteten Schichten wird die Widerstandsfähigkeit der Aluminiumoberfläche gegen Korrosion an der Atmosphäre und in neutralen wässrigen Lösungen deutlich verbessert.

Im nicht verdichteten Zustand sind diese Schichten aufnahmefähig für verschiedene Stoffe und lassen sich einfärben, bedrucken und imprägnieren. Sie dienen als Träger für Farbstoffe, lichtempfindliche Stoffe und als Haftgrund für Beschichtungen und Klebstoffe.

Aluminiumoxidschichten sind hart, abriebfest und ermöglichen die mechanische Oberflächenbeanspruchung anodisch oxidierter Bauteile.

Darüber hinaus lassen sich hochverschleißfeste Oberflächen durch Hartanodisieren herstellen. Bei dieser speziellen Verfahrensvariante der anodischen Oxidation werden besonders harte und verschleißfeste Oxidschichten für technische Zwecke erzeugt, bei denen an das Aussehen dieser zumeist grauen Schichten keine dekorativen Ansprüche gestellt werden. Die Schichtdicken liegen werkstoffabhängig im Bereich von 25 µm bis 150 µm.

Die anodisch erzeugten Oxidschichten weisen vor allem im verdichteten Zustand eine hohe elektrische Isolationsfähigkeit auf. Anodisch oxidiertes Aluminium ist in medizinischer und lebensmittelrechtlicher Hinsicht unbedenklich.

Die Standardverfahren GS- und GSX-Verfahren (Gleichstrom-Schwefelsäure, Gleichstrom- Schwefelsäure-Oxalsäure) ergeben eine farblose, transparente Oxidschicht, welche das ursprüngliche Oberflächenaussehen weitgehend unverändert lässt. Der Grad der Transparenz richtet sich dabei nach der Oxidschichtdicke und der Werkstoffzusammensetzung. Geeignet für dekorative Ansprüche sind Reinaluminium und homogene, niedrig legierte AlMg- und AlMgSi- Werkstoffe in Eloxalqualität. Höhere Legierungsanteile bewirken, dass heterogene Bestandteile in der Oxidschicht auftreten, was zu einer optischen Beeinträchtigung durch Trübung und Färbung der Schicht führen kann.

Farbige Oxidschichten lassen sich zum einen durch Imprägnieren der verdichteten transparenten Schichten mit Farbstoffen herstellen und zum anderen elektrolytisch, indem in einem zweiten elektrolytischen Prozess über eine Metallsalzlösung mittels Wechselstrom Metallionen am Porengrund der Oxidschicht abgeschieden und eingelagert werden. Die erreichte Farbintensität richtet sich nach der abgeschiedenen Metallmenge. Es werden Metallsalze auf der Basis von Zinn (Sn), Kobalt (Co), Nickel (Ni) und Kupfer (Cu) verwendet.

1.6.3 Bezeichnungssystem für die Vorbehandlung der Oberfläche

Auszug aus der DIN 17611:2007-11		
Symbol	Art der Vorbehandlung	Anmerkung
E0	Entfetten und Desoxidieren	Oberflächenbehandlung vor dem Anodisieren, bei dem die Oberfläche ohne weitere Vorbehandlung entfettet und desoxidiert wird. Mechanische Oberflächenfehler, z. B. Eindrücke und Kratzer, bleiben sichtbar. Korrosionsstellen, die vor der Behandlung kaum wahrgenommen werden konnten, können nach der Behandlung sichtbar werden.
E1	Schleifen	Schleifen führt zu einem vergleichsweise einheitlichen, aber etwas stumpfmatten Aussehen. Alle vorhandenen Oberflächenfehler werden weitgehend beseitigt, aber in Abhängigkeit von der Schleifmittelkörnigkeit können Schleifriefen sichtbar bleiben.
E2	Bürsten	Mechanisches Bürsten bewirkt eine einheitliche glänzende Oberfläche mit sichtbaren Bürstenstrichen. Oberflächenfehler werden nur teilweise entfernt.
E3	Polieren	Mechanisches Polieren führt zu einer glänzenden, blanken Oberfläche, während Oberflächenfehler nur teilweise beseitigt werden.
E4	Schleifen und Bürsten	Durch Schleifen und Bürsten wird eine einheitlich glänzende Oberfläche erreicht; mechanische Oberflächenfehler werden beseitigt. Korrosionswirkungen, die bei den Behandlungen E0 oder E6 sichtbar werden können, werden beseitigt.
E5	Schleifen und Polieren	Durch Schleifen und Polieren wird ein glattes, glänzendes Erscheinungsbild erreicht; mechanische Oberflächenfehler werden beseitigt. Korrosionswirkungen, die bei den Behandlungen E0 oder E6 sichtbar werden können, werden beseitigt.
E6	Beizen	Nach dem Entfetten erhält die Oberfläche einen seidenmatten oder matten Glanz, indem sie in speziellen alkalischen Beizlösungen behandelt wird. Mechanische Oberflächenfehler werden ausgeglichen, jedoch nicht vollständig beseitigt. Korrosionseinwirkungen auf der Metalloberfläche können beim Beizen sichtbar werden. Eine mechanische Vorbehandlung vor dem Beizen kann diese Wirkungen beseitigen; es ist jedoch günstiger, das Metall so zu behandeln und zu lagern, dass Korrosion vermieden wird.

1.6.4 Standard-Farbfächer, Farbrenzmuster

Über das dekorative Aussehen und den Glanz sowie über den Farbton ist nach DIN 17611 mit dem Anodisierenden (Eloxalbetrieb) eine genaue Farbrenzmustervereinbarung zu treffen.

Für die elektrolytische Einfärbung (Zweistufenverfahren) und die Farbanodisation wird von der Europäischen Vereinigung der Anodiseure (EURAS) ein Standard-Farbfächer herausgegeben. Die Farbbezeichnung für die Tauchfärbung mit den Kurzbezeichnungen EV 1 bis EV 6 sind heute nicht mehr gebräuchlich.

Farbbezeichnung nach EURAS für elektrolytische Färbung C0 bis C35					
EURAS	C0	Farblos	vergleichbar	EV 1	Naturton
EURAS	C31	Leichtbronze	vergleichbar	EV 2	Neusilber hell
EURAS	C32	Hellbronze	vergleichbar	EV 3	Gold
EURAS	C33	Mittelbronze	vergleichbar	EV 4	Bronze mittel
EURAS	C34	Dunkelbronze	vergleichbar	EV 5	Bronze dunkel
EURAS	C35	Schwarz	vergleichbar	EV 6	Schwarz

Farbbezeichnungen nach EURAS für Farbanodisation C36 bis C38		
EURAS	C36	Hellgrau
EURAS	C37	Mittelgrau
EURAS	C38	Dunkelgrau

Der EURAS-Farbfächer ist über den Eloxalverband e. V., Nürnberg, zu beziehen.

1.6.5 Mess- und Prüfverfahren

Die Prüfung der Qualität anodisch erzeugter und verdichteter Oxidschichten wird entsprechend den in DIN 17611 aufgeführten Mess- und Prüfverfahren vorgenommen.

1.7

Werkstoffe für Luft- und Raumfahrt

Aluminium und Aluminiumlegierungen												
Werkstoffnummer DIN	Werkstoffnummer Luft- und Raumfahrt	Bleche	Bänder	Platten	gezogene Stangen	gepresste Stangen	Profile	Leitungsrohre	Innendruckrohre	Konstruktionsrohre	Gesenkschmiedestücke	Freiformschmiedestücke
EN AW-6061	3.1124											
EN AW-2214	3.1254										●	●
EN AW-2017A	3.1324											
–	3.1354	●	●	●	●	●	●			●		
–	3.1364	●	●	●			●					
–	3.1734											
–	3.1754											
–	3.1854											
EN AW-2618A	3.1924					●					●	●
–	3.2134											
–	3.2364											
–	3.2374											
–	3.2384											
EN AW-6061	3.3214	●		●	●	●	●		●	●	●	●
EN AW-5119	3.3354											
EN AW-5052	3.3524	●	●					●	●			
EN AW-7050	3.4144										●	●
EN AW-7175	3.4334				●	●	●				●	●
EN AW-7009	3.4354				●	●	●				●	●
EN AW-7075	3.4364	●	●								●	●
EN AW-7075	3.4374	●					●					
EN AW-7475	3.4377	●										
EN AW-7475	3.4384											
EN AW-7010	3.4394										●	●

Die Aluminiumwerkstoffe für die Deutsche Luft- und Raumfahrt sind im Teil 1 „Metallische Werkstoffe“, 2. Band „Leichtmetalle“ genormt. Sie sind hinsichtlich ihrer chemischen und mechanisch/technologischen Eigenschaften mit den gegenübergestellten Werkstoffen identisch, so dass die Angaben für die Behandlung in dieser Broschüre anwendbar sind.

2.1 Vorkommen und Eigenschaften

Kupfer und Bronze (Bronzen sind Kupfer-Zinn-Legierungen) wurden als die ersten metallischen Werkstoffe von den Menschen im Laufe ihrer geschichtlichen Entwicklung genutzt. Das Kupfer bot mit seiner geringen Festigkeit nur bescheidene Möglichkeiten. Bronzen, die etwa ab 2500 vor Christus in Anwendung kamen, ermöglichten der Menschheit eine sprunghafte Entwicklung. Deswegen bezeichnet man diese Epoche wegen ihrer Wichtigkeit als „Bronzezeitalter“.

Messinge sind Legierungen von Kupfer mit Zink. Bis ca. 37 % Zink (Zn) sind es einphasige, homogene Legierungen mit sehr guter spannloser Formgebungsmöglichkeit. Einsatz sind z. B. Hülsen für Lippenstifte und Feuerzeuge.

Bei zweiphasigen Legierungen >37 % Zn wird die spannabhebende Bearbeitung verbessert. Sie finden Einsatz in der Feinmechanik, der Uhrenindustrie und bei der Massenherstellung von Drehteilen, z. B. Kugelschreiber.

Kupfer ist das wirtschaftlich bedeutendste NE-Metall. Aufgrund seiner sehr guten elektrischen Leitfähigkeit ist die Bedeutung des Kupfers in der Elektronik, Informations- und Kommunikationstechnologie sehr groß. Kupfer ist in fast allen Bereichen des modernen Lebens zu Hause. Denn Oberflächen aus Kupfer haben nicht nur dekorative Zwecke, sondern wirken z. B. auch bakterizid.

Eine weitere wichtige Eigenschaft ist die gute Wärmeleitfähigkeit, die in Wärmeaustauschern für Verbrennungskraftmaschinen im Apparate- und Behälterbau genutzt wird.

Physikalische und mechanische Eigenschaften von Kupfer

Dichte	g/cm ³	8,90–8,96
Schmelztemperatur	°C	1.083
Elastizitätsmodul	N/mm ²	100.000–145.000
Ausdehnungskoeffizient	10 ⁻⁶ /K	15,4–17
elektrische Leitfähigkeit	m/(Ωmm ²)	35–58
Wärmeleitfähigkeit	W/(Km)	240–386
Zugfestigkeit ¹	N/mm ²	200–360
Bruchdehnung ¹	%	2–45

¹ abhängig vom Behandlungszustand

In neutralen und alkalischen (pH-Wert >7) wässrigen Lösungen ist Kupfer chemisch beständig. Von Säuren, insbesondere oxidierenden, wird Kupfer dagegen angegriffen. Das ermöglicht seine Verwendung, z. B. für Wasserleitungen und für Sudkessel in Brauereien. Für die Verarbeitung und Lagerung von Fruchtsäften sowie Weinen, also von Lebens- und Genussmitteln, die Säuren enthalten, ist es daher nicht geeignet. Es bildet sich giftiger Grünspan (Kupferacetat).

2.2

Wirkung der Legierungselemente

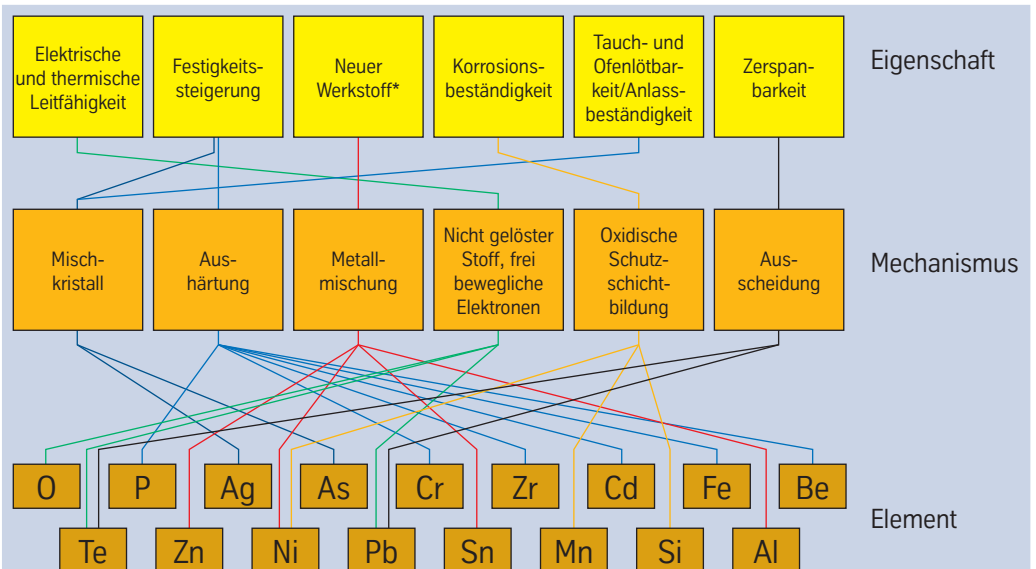
Die Festigkeit von Kupfer lässt sich durch geringe Legierungszusätze erheblich steigern. Das erfolgt durch Mischkristallbildung (Silber, Arsen) oder Aushärtung (Chrom, Zirkon, Kadmium, Eisen oder Phosphor).

Mehr als 37 % Zink in der Zusammensetzung von Kupfer-Zink-Legierungen (Messing) bewirken einen Abfall der Zähigkeit der Legierung bei gleichzeitig ansteigender Härte. Das ist für spanabhebende Verfahren günstig, da sich kürzere Späne bilden.

Kupfer-Zinn-Legierungen mit einem Zinn-Gehalt bis maximal 8,5 % werden als klassische Bronzen bezeichnet. Für Gusslegierungen erreicht man eine Festigkeitssteigerung durch einen Zinnzusatz bis 14 %. Für Gussteile, insbesondere im Maschinenbau, ist es erforderlich, den spröden Gefügestand mit seinen nachteiligen Auswirkungen auf die Zähigkeit des Werkstoffes durch eine Wärmebehandlung zu beseitigen.

Als Rotbronze bezeichnet werden Bronzen, die außer Zinn zusätzlich Zink und Blei enthalten. Sie werden für korrosionsbeanspruchte Maschinenteile und Apparaturen oder Lagerschalen verwendet.

Kupfer – Wirkung der Legierungselemente

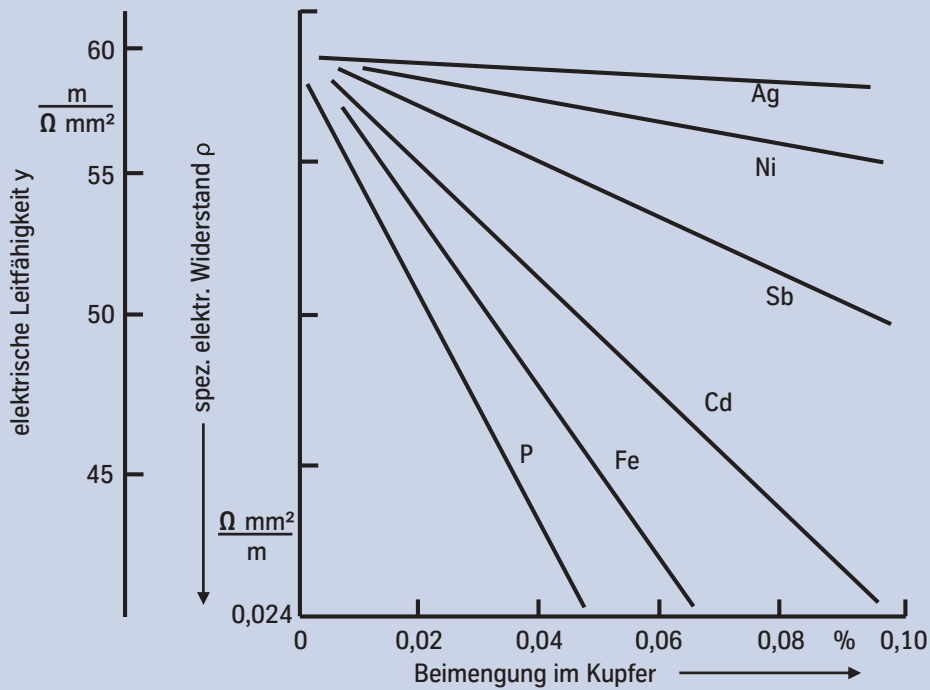


Raffinade- oder Elektrolytkupfer

Ag = Silber
 Al = Aluminium
 As = Arsen
 Be = Beryllium
 Cd = Kadmium
 Cr = Chrom
 Fe = Eisen
 Mn = Mangan
 Ni = Nickel
 *CuSn = Bronze
 *CuZn = Messing

O = Sauerstoff
 P = Phosphor
 Pb = Blei
 Si = Silizium
 Sn = Zinn
 Te = Tellur
 Zn = Zink
 Zr = Zirkonium

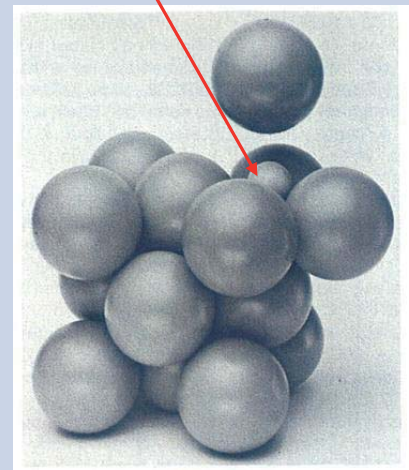
Einfluss von gelösten Beimengungen auf die Leitfähigkeit von Kupfer



Ag = Silber
 Cd = Kadmium
 Fe = Eisen
 Ni = Nickel
 P = Phosphor
 Sb = Antimon

Einfluss des Sauerstoffs

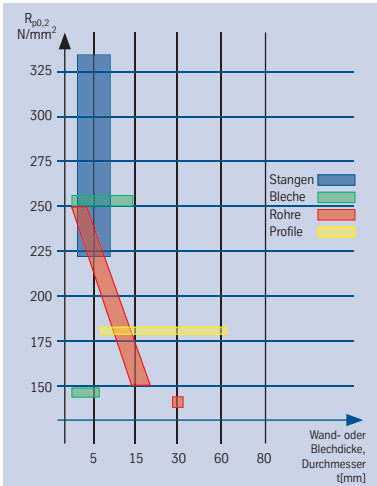
Die Beimengungen sind im Kupfer gelöst. Durch Sauerstoff entstehen Oxide, die nicht gelöst sind. Daher verbessert sich die Leitfähigkeit durch freie Bewegung der Elektronen.



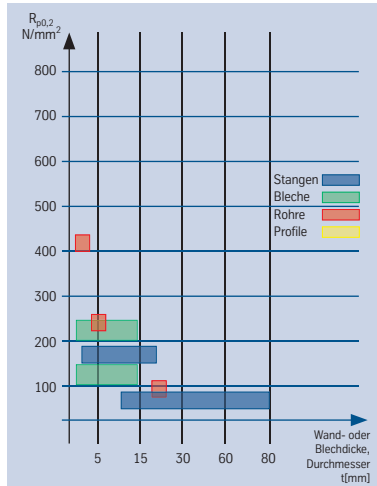
2.3

Mechanische Eigenschaften von ausgehärteten Kupferlegierungen

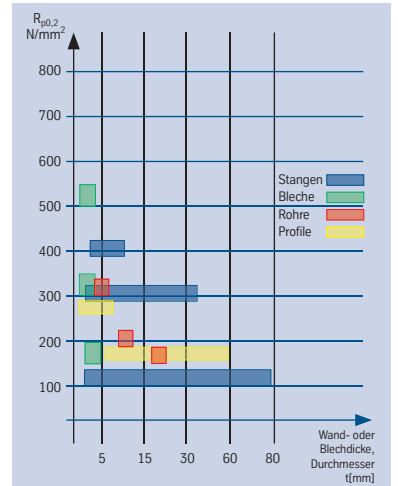
CW024A Kupfer – unlegiert



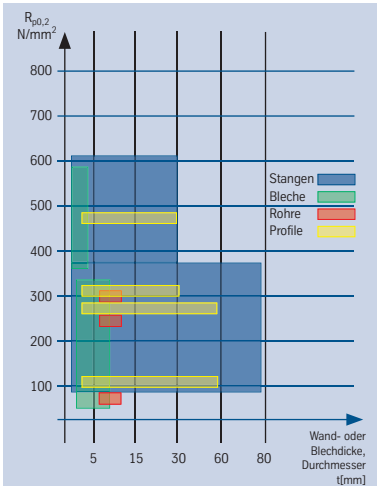
CW352H Kupfer – Nickel legiert



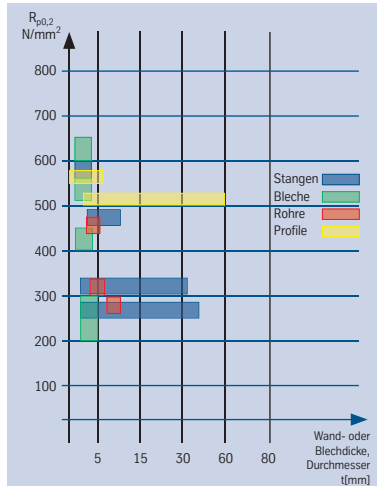
CW507L Kupfer – Zink legiert



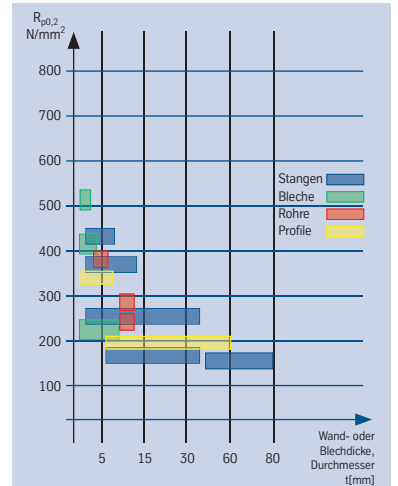
CW111C Kupfer – niedrig legiert



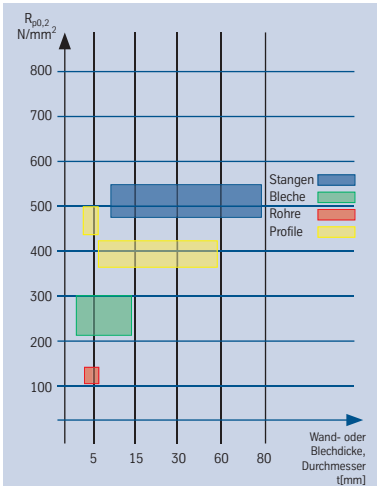
CW409J Kupfer – Nickel u. Zink leg.



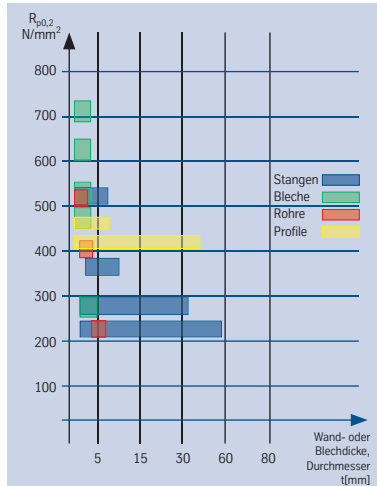
CW614N Kupfer – Zink u. Blei legiert



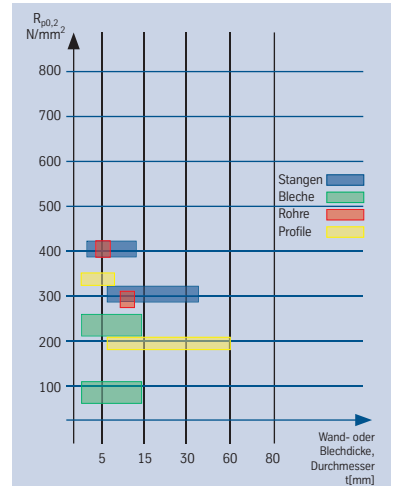
CW307G Kupfer – Aluminium legiert



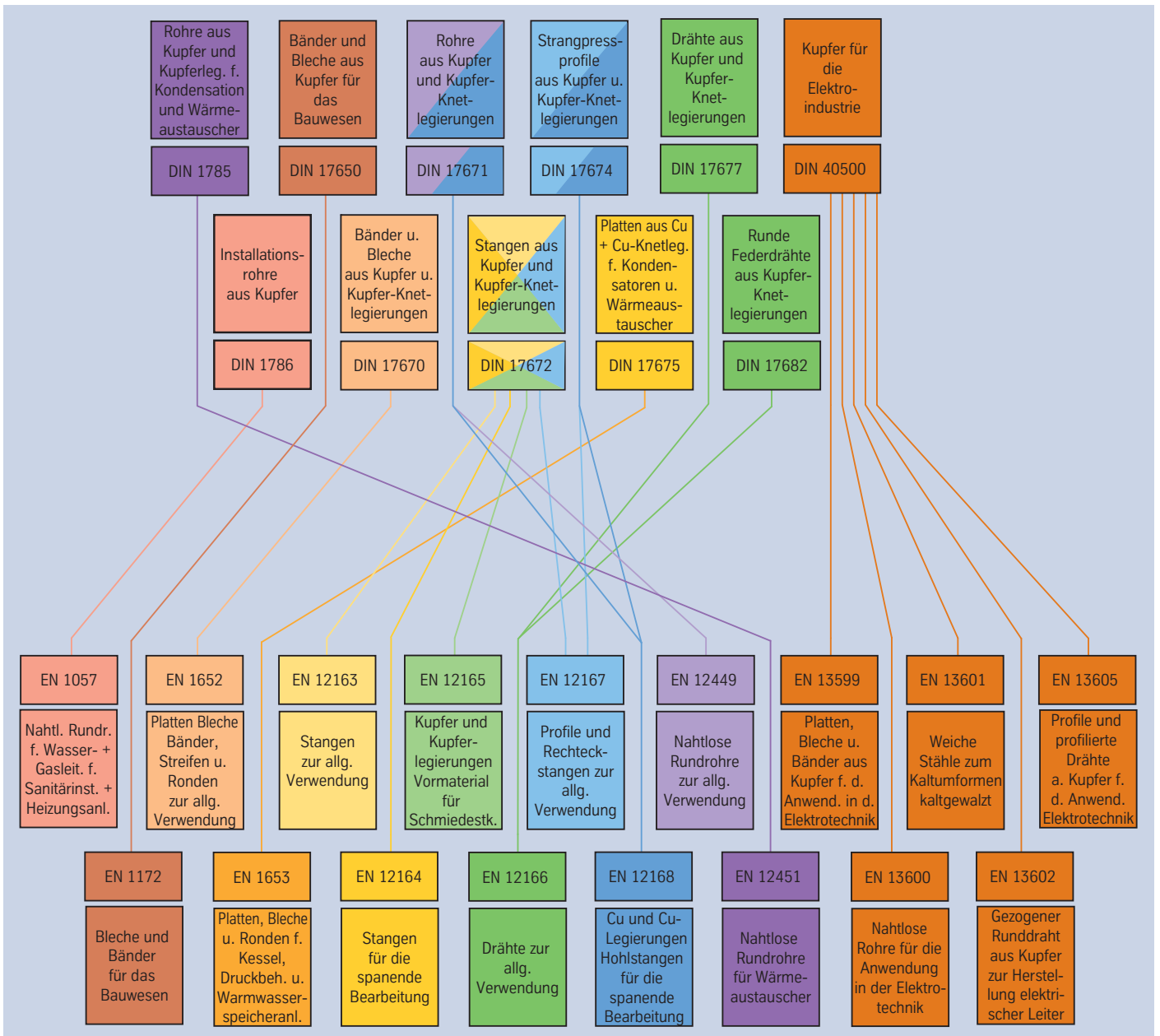
CW452K Kupfer – Zink legiert



CW710R Kupfer – Zink legiert



2.4 Normenvergleich DIN EN – Übersicht der Kupferlegierungen



Aufbau der Werkstoffnummern

C	W	0	0	3	A
1	2	3	4	5	6

- Position 1 = Bezeichnung für Kupferwerkstoff (C)
- Position 2 = Werkstoffform (hier W = Knetlegierung)
- Position 3–5 = Zahl zwischen 000–999 (haben keine bestimmte Bedeutung)
- Position 6 = Werkstoffgruppe (z.B. A für Kupfer, siehe erste Spalte)
- (1) Platten, Bleche und Bänder in der Elektrotechnik
 - (2) Platten, Bleche, Bänder, Streifen und Ronden zur allgemeinen Verwendung
 - (3) Platten, Bleche und Ronden für Kessel, Druckbehälter und Warmwasserspeicher
 - (4) Nahtlose Rohre für die Anwendung in der Elektronik
 - (5) Nahtlose Rohre zur allgemeinen Verwendung
 - (6) Nahtlose Rundrohre für Wärmeaustauscher
 - (7) Stangen zur allgemeinen Verwendung
 - (8) Stangen für die spanende Verwendung
 - (9) Stangen und Drähte für die allgemeine Anwendung in der Elektronik
 - (10) Profile und profilierte Drähte für die Anwendung in der Elektronik
 - (11) Drähte für die allgemeine Verwendung
 - (12) Gezogener Runddraht zur Herstellung elektrischer Leiter
 - (13) Profile und Rechteckstangen zur allgemeinen Verwendung

DIN Bezeichnung Kurzzeichen	Werkstoff-Nr.	EN Bezeichnung Werkstoff-Nr.	Chemisches Symbol	(1) EN 13599	(2) EN 1652	(3) EN 1653	(4) EN 13600	(5) EN 12449	(6) EN 12451	(7) EN 12163	(8) EN 12164	(9) EN 13601	(10) EN 13605	(11) EN 12166	(12) EN 13602	(13) EN 12167
Kupfer																
–	–	CW003A	Cu-ETP1													
E-Cu58	2.0065	CW004A	Cu-ETP	•	•		•					•	•		•	
E-Cu58	2.0065	CW005A	Cu-FRHC	•			•					•	•		•	
–	–	CW006A	Cu-FRTP		•					•						
–	–	CW007A	CuFe2P												•	
OF-Cu	2.0040	CW008A	Cu-OF	•	•		•					•	•		•	
–	–	CW009A	CuNi1Si													
–	–	CW011A	CuAg0,04									•	•			
–	–	CW012A	CuAg0,07									•	•			
CuAg0,1	2.1203	CW013A	CuAg0,10	•			•					•	•			
–	–	CW014A	CuAg0,04P									•	•			
–	–	CW015A	CuAg0,07P									•	•			
CuAg0,1P	2.1191	CW016A	CuAg0,10P	•			•					•	•			
–	–	CW017A	CuAg0,04(OF)									•	•			
–	–	CW018A	CuAg0,07(OF)									•	•			
–	–	CW019A	CuAg0,10(OF)	•			•					•	•			
SE-Cu	2.0070	CW020A	Cu-PHC	•			•					•	•			
SE-Cu	2.0070	CW021A	Cu-HCP	•			•					•	•			
SW-Cu	2.0076	CW023A	Cu-DLP		•	•				•						•
SF-Cu	2.0090	CW024A⁽¹⁾²⁾	Cu-DHP		•	•		•	•	•				•		•
Niedriglegierte Cu-Legierungen																
CuBe1,7	2.1245	CW100C	CuBe1,7													
CuBe2	2.1247	CW101C	CuBe2		•					•				•		•
CuBe2Pb	2.1248	CW102C	CuBe2Pb								•			•		
–	–	CW103C	CuCo1Ni1Be		•					•				•		•
CuCo2Be	2.1285	CW104C	CuCo2Be		•					•				•		•
–	–	CW105C	CuCr1							•						•
CuCrZr	2.1293	CW106C	CuCr1Zr					•		•				•		•
CuFe2P	2.1310	CW107C	CuFe2P					•								
–	–	CW108C	CuNiP							•						

DIN Bezeichnung Kurzzeichen	Werkstoff-Nr.	EN Bezeichnung Werkstoff-Nr.	Chemisches Symbol	(1) EN 13599	(2) EN 1652	(3) EN 1653	(4) EN 13600	(5) EN 12449	(6) EN 12451	(7) EN 12163	(8) EN 12164	(9) EN 13601	(10) EN 13605	(11) EN 12166	(12) EN 13602	(13) EN 12167
Niedriglegierte Cu-Legierungen																
◀ CuNi1,5Si	2.0853	CW109C	CuNi1Si							●				●		●
CuNi2Be	2.0850	CW110C	CuNi2Be		●					●				●		●
CuNi2Si	2.0855	CW111C	CuNi2Si		●			●		●				●		●
CuNi3Si	2.0857	CW112C	CuNi3Si							●						
CuPb1P	2.1160	CW113C	CuPb1P								●					
CuSP	2.1498	CW114C	CuSP								●					
–	–	CW115C	CuSi1											●		
–	–	CW116C	CuSi3Mn1							●				●		
–	–	CW117C	CuSn0,15													
CuTeP	2.1546	CW118C	CuTeP								●			●		
CuZn0,5	2.0205	CW119C ¹⁾	CuZn0,5		●											
CuZr	2.1580	CW120C	CuZr							●				●		●
CuAl-Legierungen																
CuAl5As	2.0918	CW300G	CuAl5As						●							
–	–	CW301G	CuAl6Si2Fe							●						●
–	–	CW302G	CuAl7Si2							●						●
CuAl8Fe3	2.0932	CW303G	CuAl8Fe3		●	●										
CuAl9Ni3Fe2	2.0971	CW304G	CuAl9Ni3Fe2			●										
–	–	CW305G	CuAl10Fe1							●						●
CuAl10Fe3Mn2	2.0936	CW306G	CuAl10Fe3Mn2							●						●
CuAl10Ni5Fe4	2.0966	CW307G	CuAl10Ni5Fe4			●				●						●
CuAl11Ni6Fe5	2.0978	CW308G	CuAl11Ni6Fe5							●						●
CuNi-Legierungen																
CuNi25	2.0830	CW350H	CuNi25		●											
CuNi9Sn2	2.0875	CW351H	CuNi9Sn2		●											
CuNi10Fe1Mn	2.0872	CW352H	CuNi10Fe1Mn		●	●		●	●	●						
CuNi30Fe2Mn2	2.0883	CW353H	CuNi30Fe2Mn2						●							
CuNi30Mn1Fe	2.0882	CW354H	CuNi30Mn1Fe		●	●		●	●	●						
CuNiZn-Legierungen																
–	–	CW400J	CuNi7Zn39Pb3Mn2								●			●		●
–	–	CW401J	CuNi10Zn27		●									●		
–	–	CW402J	CuNi10Zn42Pb2								●			●		●
CuNi12Zn24	2.0730	CW403J	CuNi12Zn24		●			●		●				●		●
–	–	CW404J	CuNi12Zn25Pb1		●											
–	–	CW405J	CuNi12Zn29													
CuNi12Zn30Pb1	2.0780	CW406J	CuNi12Zn30Pb1								●			●		●
–	–	CW407J	CuNi12Zn38Mn5Pb2													●
CuNi18Zn19Pb1	2.0790	CW408J	CuNi18Zn19Pb1								●			●		●
CuNi18Zn20	2.0740	CW409J	CuNi18Zn20		●			●		●				●		●
CuNi18Zn27	2.0742	CW410J	CuNi18Zn27		●											
CuSn-Legierungen																
CuSn4	2.1016	CW450K	CuSn4		●									●		
–	–	CW451K	CuSn5		●					●				●		
CuSn6	2.1020	CW452K	CuSn6		●			●		●				●		●
CuSn8	2.1030	CW453K	CuSn8		●			●		●				●		●
–	–	CW454K	CuSn3Zn9		●											
–	–	CW455K	CuSn4Pb2P					●			●					
–	–	CW456K	CuSn4Pb4Zn4								●					
–	–	CW457K	CuSn4Te1P								●					
–	–	CW458K	CuSn5Pb1								●					
CuSn8	2.1030	CW459K	CuSn8P					●		●						
–	–	CW460K	CuSn8PbP					●								
CuZn-/Zweistofflegierungen																
CuZn5	2.0220	CW500L	CuZn5		●			●		●						
CuZn10	2.0230	CW501L	CuZn10		●			●		●				●		▶

DIN Bezeichnung Kurzzzeichen	Werkstoff-Nr.	EN Bezeichnung Werkstoff-Nr.	Chemisches Symbol	(1) EN 13599	(2) EN 1652	(3) EN 1653	(4) EN 13600	(5) EN 12449	(6) EN 12451	(7) EN 12163	(8) EN 12164	(9) EN 13601	(10) EN 13605	(11) EN 12166	(12) EN 13602	(13) EN 12167
CuZn-/Zweistofflegierungen																
◀ CuZn15	2.0240	CW502L	CuZn15		•			•		•				•		
CuZn20	2.0250	CW503L	CuZn20		•			•		•				•		
CuZn28	2.0261	CW504L	CuZn28							•						
CuZn30	2.0265	CW505L	CuZn30		•			•		•				•		
CuZn33	2.0280	CW506L	CuZn33		•					•						
CuZn36	2.0335	CW507L	CuZn36		•			•		•				•		•
CuZn37	2.0321	CW508L	CuZn37		•			•		•				•		•
CuZn40	2.0360	CW509L	CuZn40		•			•		•						•
CuZnPb-Legierungen																
CuZn36Pb1,5	2.0331	CW600N	CuZn35Pb1		•			•		•				•		•
CuZn36Pb1,5	2.0331	CW601N	CuZn35Pb2					•		•				•		•
–	–	CW602N	CuZn36Pb2As					•		•						•
CuZn36Pb3	2.0375	CW603N	CuZn36Pb3					•		•				•		•
CuZn37Pb0,5	2.0332	CW604N	CuZn37Pb0,5		•			•								
–	–	CW605N	CuZn37Pb1					•								
–	–	CW606N	CuZn37Pb2		•					•				•		•
–	–	CW607N	CuZn38Pb1					•		•						•
–	–	CW608N	CuZn38Pb2		•			•		•				•		•
–	–	CW609N	CuZn38Pb4							•				•		•
CuZn39Pb0,5	2.0372	CW610N	CuZn39Pb0,5		•	•				•				•		•
–	–	CW611N	CuZn39Pb4							•						•
CuZn39Pb2	2.0380	CW612N	CuZn39Pb2		•					•				•		•
–	–	CW613N	CuZn39Pb2Sn							•						•
CuZn39Pb3	2.0401	CW614N	CuZn39Pb3					•		•				•		•
CuZn40Pb2	2.0402	CW617N	CuZn40Pb2					•		•				•		•
–	–	CW618N	CuZn40Pb2Al													•
–	–	CW619N	CuZn40Pb2Sn							•						•
–	–	CW620N	CuZn41Pb1Al													•
–	–	CW621N	CuZn42PbAl													•
–	–	CW622N	CuZn43Pb1Al													•
CuZn44Pb2	2.0410	CW623N	CuZn43Pb2							•						•
–	–	CW624N	CuZn43Pb2Al													•
CuZn-/Mehrstofflegierungen																
–	–	CW700R	CuZn13Al1NiSi1					•								
–	–	CW701R	CuZn19Sn											•		
CuZn20Al2	2.0460	CW702R	CuZn20Al2As		•	•		•	•							
–	–	CW703R	CuZn23Al3Co													
CuZn23Al6Mn4Fe3	2.0500	CW704R	CuZn23Al6Mn4Fe3Pb							•						
–	–	CW705R	CuZn25Al5Fe2Mn2Pb							•						
CuZn28Sn1	2.0470	CW706R	CuZn28Sn1As						•							
–	–	CW707R	CuZn30As						•							
CuZn31Si1	2.0490	CW708R	CuZn31Si1					•		•						
–	–	CW709R	CuZn32Pb2AsFeSi							•						
CuZn35Ni2	2.0540	CW710R	CuZn35Ni3Mn2AlPb					•		•						•
–	–	CW711R	CuZn36Pb2Sn1								•					
–	–	CW712R	CuZn36Sn1Pb							•				•		•
CuZn40Al2	2.0550	CW713R	CuZnMn3Al2PbSi					•		•						•
–	–	CW714R	CuZn37Pb1Sn1							•				•		•
CuZn38SnAl	2.0525	CW715R	CuZn38AlFeNiPbSn			•										
CuZn37Al1	2.0510	CW716R	CuZn38Mn1Al					•		•						
CuZn38Sn1	2.0530	CW717R	CuZn38Sn1As			•					•					
CuZn40Al1	2.0561	CW718R	CuZn39Mn1AlPbSi					•		•						•
CuZn38Sn1	2.0530	CW719R	CuZn39Sn1			•				•						•
CuZn40Mn1Pb	2.0580	CW720R	CuZn40Mn1Pb1								•			•		•
–	–	CW721R	CuZn40Mn1Pb1AlFeSn							•						•

DIN Bezeichnung Kurzzeichen	Werkstoff-Nr.	EN Bezeichnung Werkstoff-Nr.	Chemisches Symbol	(1) EN 13599	(2) EN 1652	(3) EN 1653	(4) EN 13600	(5) EN 12449	(6) EN 12451	(7) EN 12163	(8) EN 12164	(9) EN 13601	(10) EN 13605	(11) EN 12166	(12) EN 13602	(13) EN 12167
CuZn-/Mehrstofflegierungen																
–	–	CW722R	CuZn40Mn1Pb1FeSn								●					●
CuZn40Mn2	2.0572	CW723R	CuZn40Mn2Fe1					●		●						●

¹⁾ Auch für Bleche und Bänder für das Bauwesen nach DIN EN 1172

²⁾ Auch für nahtlose Rundrohre für Wasser- und Gasleitungen für Sanitärinstallationen und Heizungsanlagen nach DIN EN 1057

2.5

Verarbeitung

2.5.1 Umformen

Umformende Verfahren (spanlose Formgebung) für Kupferwerkstoffe lassen sich in der Regel gut warm- und/oder kaltumformen. Zu beachten ist, dass das Kaltumformvermögen mit zunehmender Verfestigung sinkt; es sind dann entsprechende Zwischenglühungen (Weichglühen) vorzusehen.

2.5.2 Zerspanen

Reines Kupfer ist aufgrund der großen Zähigkeit und hohen Verformbarkeit schlecht zerspanbar. Legierungen mit den Elementen Zn, Sn, Al und Si haben meist eine günstige Spanform. Legierungen mit den Elementen Pb, Se, Te sind vergleichbar mit der Zerspanbarkeit von Automatenstahl.

Im Vergleich zu vielen anderen metallischen Konstruktionswerkstoffen sind die Mehrzahl der legierten Kupferwerkstoffe leicht spanbare Werkstoffe. Für die Beurteilung der Spanbarkeit von Werkstoffen zur Fertigung von Form- und Fassondrehteilen aller Art wird oft CuZn39Pb3, das Automatenmessing, als Vergleichsmaßstab herangezogen. Die Kupferwerkstoffe sind für alle Spanungsverfahren geeignet. Die Spanbarkeit verschiedener Werkstoffgruppen auf Kupferbasis differieren jedoch deutlich. Die gut spanbaren Kupferwerkstoffe können mit hohen Schnittgeschwindigkeiten zerspannt werden.

Eine grobe Klassifizierung der Zerspanbarkeit erfolgt nach der Spanbildung beim Drehen und gemäß VDI Richtlinie 3323 in 3 Spanungsklassen (Gruppe N, Farbe grün):

Werkstoffuntergruppe	Zerspanungsgruppe
Automatenlegierungen, Pb > 1 %	26
CuZn, CuSnZn	27
CuSn, bleifreies Kupfer und Elektrolytkupfer	28

2.5.3 Mechanisches Fügen

Das mechanische Fügen von Bauteilen aus Kupfer kommt nur in speziellen Fällen vor, da diesen Verbindungen aufgrund der permanenten Spalte die wichtigste Eigenschaft des Kupfers, seine elektrische und thermische Leitfähigkeit, verloren geht.

2.5.4 Schneidverfahren

2.5.4.1 Thermisches Schneiden

Durch den hohen Reflexionsgrad und die große Wärmeleitfähigkeit des Kupfers und seiner Legierungen werden thermische Schneidverfahren nicht angewandt.

2.5.4.2 Wasserstrahlschneiden

Das Wasserstrahlschneiden setzt sich auch für diesen Werkstoff immer mehr durch. Auch hier überzeugen die Vorteile des Verfahrens:

- kaltes Trennverfahren ohne Wärmeeinflusszone, die die Leitfähigkeit beeinträchtigen würde
- keine Materialdeformation im Schnittbereich
- gute Schnittqualität
- sehr geringe bzw. keine Gratbildung

2.5.5 Schweißen

Das Schweißen von Kupfer gestaltet sich aus verschiedenen Gründen schwierig. Bei sauerstoffhaltigem Kupfer kann sich durch die Einwirkung von Wasserstoff aus Schweißgasen oder auch aus Schutzgasen ein irreparabler Zustand einstellen. Gelangen Wasserstoffatome und Kupfer-Sauerstoffverbindungen (Cu_2O) aneinander, kann bei hohen Temperaturen eine chemische Umsetzung zu Wasserdampf erfolgen, die sogenannte Wasserstoffkrankheit.

Außerdem sind folgende Verarbeitungsrichtlinien zu beachten:

- Wegen starker Wärmedehnung ist kein Heften möglich.
- Zwischen ca. 350 und 650 °C wird Kupfer spröde. Es besteht Rissgefahr.
- Durch das hohe Lösungsvermögen für Gase ist eine exakte Badabdeckung durch Schutzmittel erforderlich.
- Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit ist extrem hohes Vorwärmen bzw. Wärmeeinbringen erforderlich.

2.5.5.1 Schweißverfahren

Als Schweißverfahren kommen Gasschweißen, WIG-Schweißen und MIG-Schweißen infrage, die alle spezielle Besonderheiten aufweisen:

• Gasschweißen

Dieses Verfahren erfordert hohe Anforderungen an den Schweißer. Wegen der hohen Wärmedehnung werden die Werkstücke mit Klammern gehalten.

Beste Ergebnisse werden mit silberlegierten Schweißdrähten erzielt, die in allen Lagen verwendet werden können. Eine beschleunigte Abkühlung ergibt Feinkorn und damit eine Qualitätsverbesserung gegenüber Abkühlung an ruhender Luft.

• WIG (Wolfram-Inert-Gas)-Schweißen

Das WIG-Schutzgasschweißen ist bei Blechdicken von 2–5 mm Dicke wirtschaftlich. Gegenüber der Gasschweißung ist die Verwerfung und Rissgefahr sowie Porenbildung geringer. Geschweißt wird mit einer nichtabschmelzenden Wolframelektrode in Argon-Schutz-Gas. Das Gefüge der WIG-Schweißnaht ist feinkörniger als das der Gasschweißnaht.

• MIG (Metall-Inert-Gas)-Schweißen

Die höchsten Schweißleistungen werden mit dem MIG-Verfahren erreicht. Es kommt vor allem für Serienschweißungen und dicke Querschnitte in Frage. Als Zusatzwerkstoffe sind Typen zu verwenden, die hohe Strom- und Temperaturbelastungen einwandfrei vertragen.

2.5.6 Löten

Man unterscheidet Weich- und Hartlöten von Kupfer. Weichlöten erfolgt bei 200–350 °C, Hartlöten bei Arbeitstemperaturen von 600–900 °C.

Die Lötflächen sind mechanisch zu säubern und fettfrei zu machen. Die optimale Lötspaltbreite liegt im Bereich von 0,1–0,2 mm. Die Verbindungsstellen werden vor dem Zusammenbau mit Flussmittelpaste eingestrichen (Flussmittel = Zusatzstoffe, die den Schmelzvorgang erleichtern).

Beim Hartlöten kommen Silberhartlote und beim Weichlöten Zinn-Blei-Lote ggf. mit Zusätzen in Frage.

Wegen der vielen Hart- und Weichlote sowie deren Flussmitteln sollten im speziellen Anwendungsfall Lothersteller kontaktiert werden.

2.5.7 Kleben

Aufgrund seiner guten elektrischen Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit sind Verbindungen aus Kupfer durch Kleben nicht sinnvoll, da alle Klebstoffe wie Isolatoren wirken und die Vorteile der vorgenannten Leitfähigkeit nicht genutzt werden können.

Sollten diese Bedenken für spezielle Fälle nicht gelten, so ist die Voraussetzung für eine einwandfreie Klebeverbindung die Vorbereitung bzw. Vorbehandlung der Kupferoberfläche im Klebebereich.

Abgesehen von der mechanischen Festigkeit des Klebstoffes selbst – das ist die Kohäsion –, ist die Bindefestigkeit zwischen Klebstoff und den zu klebenden Werkstoffen – das ist die Adhäsion –, für eine gute Klebeverbindung entscheidend.

Das Kriterium hierfür heißt

$$\text{Adhäsion} \geq \text{Kohäsion}$$

mit der Folge, dass bei optimaler Ausführung der Klebeverbindung eine Trennung in der Klebstoffschicht erfolgt.

Unabdingbare Voraussetzungen für eine befriedigende Adhäsion beim Kleben sind:

- die Oberfläche muss frei von Schmutz, Farbresten, Staub, Fett, Öl und dergleichen sein
- die Oberfläche muss trocken sein

Die Adhäsion des Klebstoffs beruht hauptsächlich auf den zwischenmolekularen Kräften (Van der Waals-Kräfte). Diese kommen aber nicht zustande, wenn ein Schmutz-, Fett-, Öl- oder Wasserfilm dazwischen liegt, auch wenn er für das Auge unsichtbar ist.

Die Adhäsion des Klebstoffs kann durch Oberflächenbehandlung (Aufrauen) verstärkt werden, um diesen (Klebstoff) auch mechanisch zu verankern. Hierzu kommen mehrere Alternativen in Frage:

- Mechanisches Aufrauen durch Bürsten, Schmirgeln oder Strahlen,
- Chemische Vorbehandlung durch Beizen.

Die Auswahl von Klebstoffen ist auf Grund der vielen Angebote unterschiedlicher chemischer Mechanismen und Herstellern enorm; im Einzelfall ist eine Beratung sinnvoll.

2.6

Oberflächenveredelung

2.6.1 Oberflächenbehandlung von Kupfer und Kupferlegierungen

Bei Kupfer und Kupferlegierungen sind chemische Färbungen möglich. Eine sachgemäße Verarbeitung und Vorbehandlung der zu färbenden Metalloberflächen ist von absoluter Wichtigkeit. Eine metallisch reine sowie oxid- und fettfreie Oberfläche ist die Voraussetzung für eine gut haftende, gleichmäßig ausgebildete und fleckenfreie Färbung.

Die Behandlung der Oberfläche kann mechanisch durch Polieren, Strahlen und Sonderverfahren erfolgen. Eine chemische Behandlung kann durch Entfetten mit Fettlösemitteln oder elektrolytische Entfettung stattfinden.

Man unterscheidet Grünfärbeverfahren, Schwarz- und Graufärbeverfahren sowie Braun- und Rotfärbeverfahren.

2.6.2 Grünfärbeverfahren

Die natürliche grüne Patina ist eine Deckschicht auf Kupfer und Kupferlegierungen, die sich allmählich an der Atmosphäre bildet. Sie ist witterungsbeständig, fest haftend und nicht giftig. Die Zusammensetzung ist regional unterschiedlich und kann aus Kupfersulfat, aus basischem Kupferchlorid oder Kupferkarbonat bestehen.

Die Bildungsgeschwindigkeit kann bei sehr sauberer Atmosphäre bis zu 30 Jahren betragen.

In der Umgangssprache wird diese Deckschicht auch als Grünspan bezeichnet. Diese Bezeichnung ist falsch. Grünspan entsteht durch eine chemische Reaktion mit Essigsäure, ist wasserlöslich und giftig.

2.6.3 Schwarz- und Graufärbeverfahren

Im Wesentlichen wird mit Kupfernitrat oder Spezialbeize die Oberfläche chemisch in Richtung schwarz und grau verfärbt. Es gibt allerdings auch ein elektrolytisches Verfahren. Es erfordert viel Geschick und Erfahrung des Anwenders, um ein für das Auge gleichmäßiges Aussehen zu gewährleisten.

2.6.4 Braun- und Rotfärbeverfahren

Die Braun- und Rotfärbeverfahren durch Bildung von Kupfersulfid oder Beizen auf Basis von Kaliumpermanganat, Natrium oder Salzen erfordern ebenfalls ein großes handwerkliches Geschick, um ein gleichmäßiges und schönes Aussehen zu gewährleisten.

2.7

Werkstoffe für Luft- und Raumfahrt

Kupfer und Kupferlegierungen		Bleche	Bänder	Stangen	Gesenkpressteile	Freiformschmiedestücke	Draht	Rohre	Schmiedestücke, Pressteile
Werkstoffnummer DIN EN	Werkstoffnummer Luft- und Raumfahrt								
CW408J	2.0090	●	●						
–	2.1006								
–	2.1211								
CW617N	2.0402			●	●	●			
CW508L	2.0321	●	●				●		
CW713R	2.0550			●				●	
–	2.0598								
CW452K	2.1020		●				●		
CW453K	2.1030			●				●	
CW308G	2.0978			●				●	●
–	2.0980								
CW111C	2.0855			●				●	
CW101C	2.1247		●	●			●		

Die Kupferwerkstoffe für die Deutsche Luft- und Raumfahrt sind im Teil 1 „Metallische Werkstoffe“, 1. Band „Stahl und Nichteisenmetalle“ genormt und in der Tabelle aufgeführt. Sie sind hinsichtlich ihrer chemischen und mechanisch/technologischen Eigenschaften mit den gegenübergestellten EN-Werkstoffen identisch, so dass die Angaben für die Behandlung der Werkstoffe in dieser Broschüre anwendbar sind.

3.1

Vorkommen und Eigenschaften

Mit einem geschätzten Anteil von etwa 0,6 % ist Titan am Aufbau der Erdkrinde beteiligt und damit relativ weit verbreitet. Die Häufigkeit seines Vorkommens beträgt etwa das 60fache von Kupfer sowie Nickel und das 300fache von Molybdän. Wichtigste Ausgangsmaterialien für die Herstellung von Titan und Titanverbindungen sind die Mineralien Rutil (TiO_2) und Ilmenit (FeTiO_3).

Titan vereinigt hohe Festigkeit mit geringer Dichte und ausgezeichneter Korrosionsbeständigkeit. Diese Beständigkeit verdankt es einer äußerst dünnen Passivschicht aus TiO_2 (Titanoxid).

Trotz seines hohen Preises hat Titan eine ausgedehnte Verwendung auf technischen Spezialgebieten. Titanlegierungen findet man im Flugzeugbau, in Strahltriebwerken sowie Hochleistungsmotoren, unlegiertes und Palladiumlegiertes Titan im chemischen Apparatebau und in der Medizintechnik.

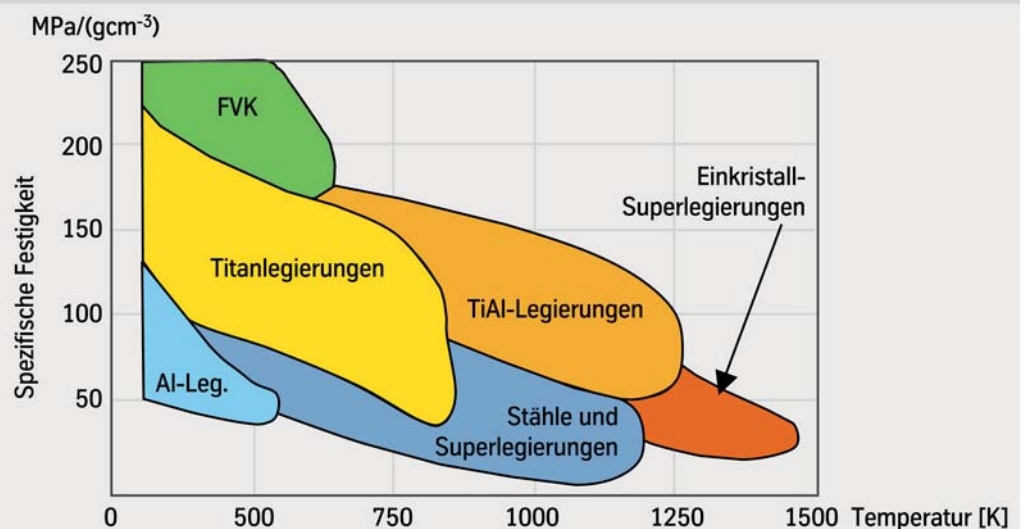
Physikalische Eigenschaften von Titan

Dichte	g/cm^3	4,5
Schmelztemperatur	$^{\circ}\text{C}$	1.670
Elastizitätsmodul	N/mm^2	110.000
Ausdehnungskoeffizient	$10^{-6}/\text{K}$	9

3.2

Wirkung der Legierungselemente

Spezifische Festigkeit über der Temperatur ausgewählter Strukturwerkstoffe im Vergleich mit Ti- und TiAl-Legierungen



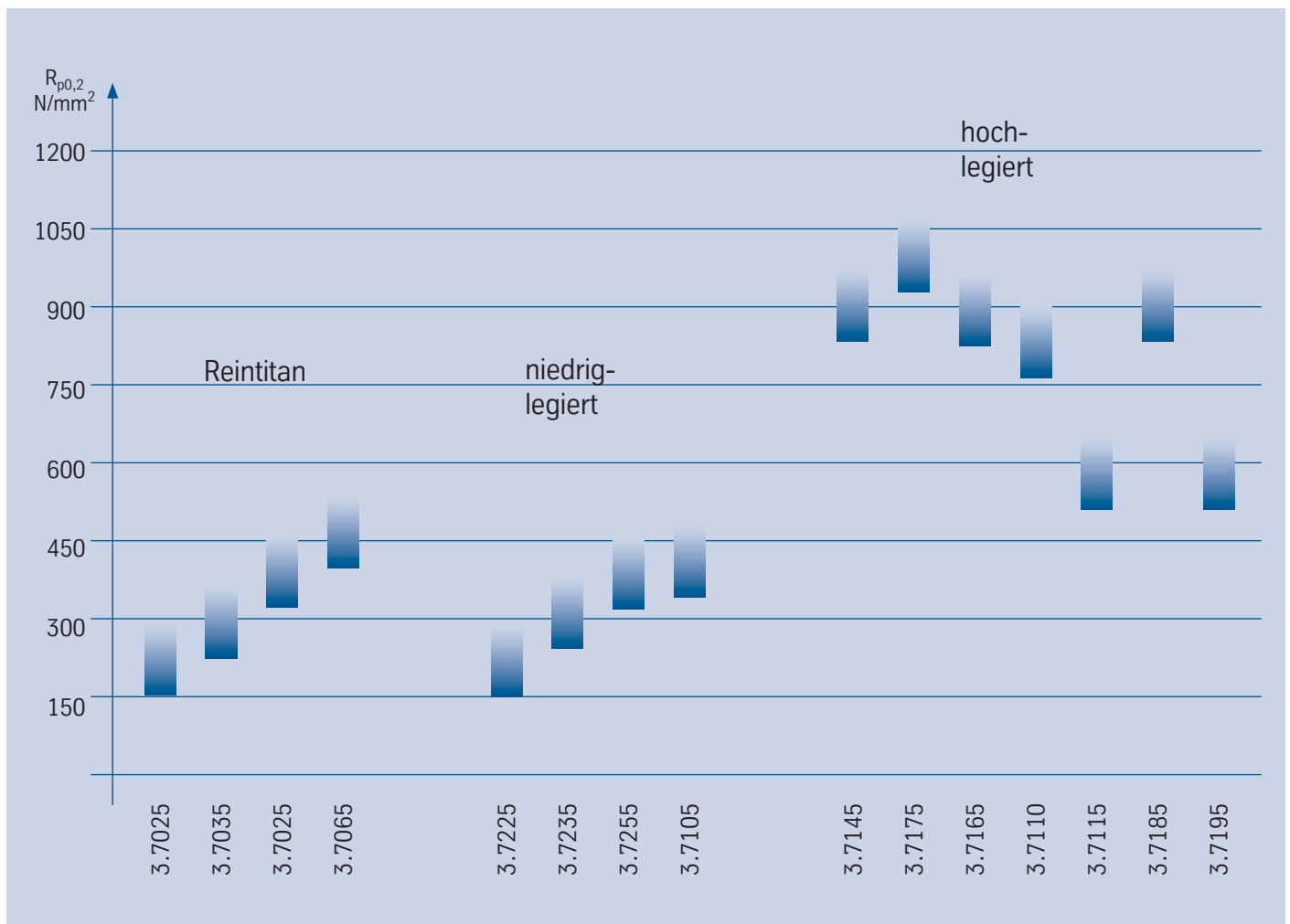
Bei den unlegierten und niedriglegierten Titansorten werden die unterschiedlichen Festigkeitseigenschaften ausschließlich durch die Gehalte an Sauerstoff und Eisen erreicht. Bei den niedriglegierten Sorten wird durch einen geringen Paladiumanteil eine erhöhte Korrosionsbeständigkeit unter kritischen Korrosionsbedingungen erzielt. Die Legierungselemente bei den hochlegierten Titansorten dienen ausschließlich der Festigkeitssteigerung. Es handelt sich dabei um:

- Aluminium
- Vanadium
- Zinn
- Zirkonium
- Molybdän
- Kupfer
- Silizium
- Eisen
- sowie Sauerstoff

Die Festigkeitssteigerung durch Metalle beruht auf gewöhnlicher Legierungsverfestigung, während die Festigkeitserhöhung durch Sauerstoff in der Eigenart des Titans begründet ist, hochsauerstoffhaltige Mischkristalle zu bilden.

3.3

Mechanische Eigenschaften von Titan



3.4

Normenvergleich DIN EN – Übersicht der Titanlegierungen

DIN Bezeichnung Werkstoff-Nr.	Kurzzeichen	EN Bezeichnung Werkstoff-Nr.	Kurzzeichen	Bänder und Bleche DIN 17860	nahtlose kreisförmige Rohre DIN 17861	geschweißte kreisförmige Rohre DIN 17866	Stangen DIN 17862	Drähte DIN 17863	Schmiedestücke DIN 17864
unlegiert									
3.7025	Ti1			●	●	●	●	●	●
3.7035	Ti2			●	●	●	●	●	●
3.7055	Ti3			●	●	●	●	●	●
3.7065	Ti4			●			●	●	●
niedriglegiert									
3.7105	TiNi0,8Mo0,3			●	●	●	●		●
3.7225	Ti1Pd		Titan ist in keiner Europäischen Norm genormt.	●	●	●	●		●
3.7235	Ti2Pd			●	●	●	●		●
3.7255	Ti3Pd			●	●	●	●		●
hochlegiert									
3.7110	TiAl5Fe2,5			●			●		●
3.7115	TiAl5Sn2,5			●			●		●
3.7145	TiAl6Sn2Zr4Mo2Si						●		●
3.7155	TiAl6ZrMo0,5Si								●
3.7165	TiAl6V4			●	●		●		●
3.7175	TiAl6V6Sn2			●	●		●		●
3.7185	TiAl4Mo4Sn2			●			●		●
3.7195	TiAl3V2,5				●		●		●

3.5

Verarbeitung

3.5.1 Umformen

Beim Umformen von Titan muss man, wie beim Schweißen, besondere Rücksicht auf die hohe Reaktivität gegenüber atmosphärischen Gasen nehmen.

Das Umformverhalten von ungeschweißtem Titan ist abhängig von der Festigkeit, Ausgangshärte, Wasserstoffbelastung der Oberfläche, Temperatur des Werkzeuges und der Temperatur des Werkstückes. Zusätzlich hat bei Titan die Umformgeschwindigkeit einen großen Einfluss. Bei geschweißten Bauteilen wird das Umformverhalten durch die Korngröße der Naht beeinflusst.

Titan neigt zur Kaltverfestigung und zur Rückfederung. Es besteht verstärkt die Gefahr der Rissbildung, die mit folgenden Einflussfaktoren steigt:

- mit steigender Festigkeit
- mit steigender Ausgangshärte
- mit steigendem Wasserstoffgehalt
- mit steigendem Umformgrad
- mit steigender Umformgeschwindigkeit

Das Formen von dünnwandigen Rohren, Mantelschüssen und großen gewölbten Böden stellt kein Problem dar. Beim stärkeren Umformen von dickwandigen Bauteilen, kleinen Rohrdurchmessern, Halbrohrrschlangen und abgekanteten Bauteilen sind folgende Handlungsweisungen zu beachten:

- Vorwiegend Titan der Gruppe 1 verwenden.
- Bei Blechen der Gruppe 2 möglichst nahe an der unteren Grenze von Zugfestigkeit und Dehngrenze arbeiten.
- Bei Umformgraden zwischen 2 und 5 % Titan ab der Gruppe 2 auf 200–500 °C vorwärmen.
- Die Biegeradien sollten 5 mal Blechdicke, bei Vorwärmen 3 mal Blechdicke nicht unterschreiten.
- Das Umformen sollte langsam und gleichmäßig erfolgen.

Falls Schweißnähte auch umgeformt werden müssen, so muss man beim Schweißen auf eine geringe Wärmeeinbringung achten, damit sich ein feinkörniges Gefüge bildet.

Kritische Umformbereiche (z. B. Krempen von gewölbten Böden) sollten nach dem Umformen sorgfältig einer Oberflächenrissprüfung unterzogen werden. Wenn man Titan über 5 % verformt, ist ein nachfolgendes Weichglühen bei 650–750 °C mit einer Haltezeit von ca. drei Minuten je mm Blechdicke, mindestens jedoch 15 Minuten und anschließender Luftabkühlung durchzuführen.

Bei größeren/stärkeren Verformungen sollte man dies durch Warmumformung oberhalb der Rekristallisationstemperatur von 500–800 °C durchführen.

Das Werkzeug muss ebenfalls angewärmt werden, weil Titan-Werkstücke aufgrund der geringen Wärmekapazität schnell auskühlen und sich so schnell Risse bilden können. Nach dem Warmumformen muss man das Werkstück weichglühen.

Wenn Titan der Gruppe 4 verwendet werden soll, muss man immer über 650 °C umformen.

Das Glühen ist unter Zufuhr von Edelgas/Schutzgas im Vakuum- oder Elektroofen durchzuführen. Falls dies zu aufwendig bzw. nicht möglich ist, kann auch ein gasbeheizter Ofen benutzt werden. Es ist allerdings eine neutrale bzw. leicht oxidierende Atmosphäre einzustellen oder eine zwischen oxidierend und reduzierend pendelnde Atmosphäre. Ansonsten kann es zur Wasserstoffaufnahme und somit zu Versprödung kommen. Öl, Fett und Schmiermittel sind vor der Wärmebehandlung zu entfernen!

Die Oxidschicht, die durch die Wärmebehandlung entsteht, kann durch Glasperlenstrahlen und anschließendem Beizen in einer wässrigen $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{F}_2$ -Beizlösung entfernt werden.

3.5.2 Zerspanen

Im Gegensatz zu den sonstigen Leichtmetallen nimmt Titan eine Sonderstellung hinsichtlich der Zerspanbarkeit ein, da es aufgrund seiner mechanischen und physikalischen Eigenschaften (z. B. geringe Wärmeleitfähigkeit, niedriges Elastizitätsmodul) zu den als schwer zerspanbar geltenden Werkstoffen zählt.

Die entstehende Wärme wird nur in einem geringen Umfang über die Späne abgeführt. Die Späne neigen dazu, an der Schneide festzukleben. Die Werkzeuge unterliegen einer periodischen Wechselbelastung durch die sich bildenden Lamellenspäne und die diskontinuierliche Spanbildung. Somit ist bei längeren Schnittzeiten mit Ermüdungsvorgängen (Ausbröckelungen, Freiflächenverschleiß) an der Werkzeugschneide zu rechnen. Auf Kühlschmierstoffe kann daher nicht verzichtet werden. Die Reaktionsfreudigkeit des Titans, z. B. mit Sauerstoff, kann zur Verpuffung bzw. Entzündung von Titanstaub führen.

Die Klassifizierung der Spanbarkeit gemäß VDI Richtlinie 3323 (Gruppe S: Farbe orange) zeigt die folgende Tabelle:

Werkstoffuntergruppe	Zerspanungsgruppe
Reintitan	36
Alpha- und Beta-Legierungen, ausgehärtet	37

3.5.3 Mechanisches Fügen

Das mechanische Fügen wird unterteilt in

- Fügen durch Umformen
 - Bördeln
 - Falzen
 - Clinchen
- Fügen durch Nieten
 - Blindnieten
 - Hohlنieten
 - Vollنieten
 - Stanzنieten (Voll- und Hohlنieten)
- Fügen durch Anpressen
 - Schrauben
 - Klemmen/Klammern
 - Klipsen

Titanwerkstoffe lassen sich mit allen Verfahren problemlos verbinden. Im chemischen Apparatebau, wo Titan wegen seiner ausgezeichneten Korrosionsbeständigkeit eingesetzt wird, kommt ausschließlich das Schweißen in Frage.

In der Luft- und Raumfahrt, wo vorzugsweise die hochfesten Titanwerkstoffe wegen ihres günstigen Festigkeits-/Gewichtsverhältnisses verwendet werden, wird überwiegend artgleich oder höherlegiert geschweißt.

3.5.4 Schneidverfahren

3.5.4.1 Thermisches Schneiden

Titan und seine Legierungen neigen beim Laserbrennschneiden zu exothermen Reaktionen. Brennschneiden mit Sauerstoff und Schmelzschnneiden mit Stickstoff führen zu unregelmäßigen Schnittkanten. In beiden Fällen kann unter ungünstigen Bedingungen eine unregelmäßige Reaktion des Werkstoffes mit Sauerstoff oder Stickstoff erfolgen. Titanwerkstoffe sind aber erfolgreich beim Schmelzschnneiden mit Laser unter Verwendung von Argon als Arbeitsgas bearbeitet worden.

Aufgrund der guten Wärmeleitung von Titanwerkstoffen sind zur Erzielung guter Schnittergebnisse Laser mit hoher Strahlqualität notwendig.

3.5.4.2 Wasserstrahlschneiden

Titan-Werkstoffe werden mit sehr unterschiedlichen Festigkeiten geliefert. Für weiches Titan kommt das Wasserstrahlschneiden in Frage. Für hochfestes Titan empfiehlt es sich, dem Hochgeschwindigkeitswasserstrahl Abrasive-Medien, wie z. B. Quarzsand, zuzusetzen.

Aufgrund der nachstehend aufgeführten Verfahrensvorteile ist das Wasserstrahlschneiden auch beim Werkstoff Titan auf dem Vormarsch:

- kaltes Trennverfahren, keine Wärmeeinflusszone
- staubfreie/gasfreie Trennung
- keine thermische Änderung des Gefüges
- keine Materialdeformation im Schnittbereich
- gute Schnittqualität
- sehr geringe bzw. keine Gratbildung
- hohe Flexibilität auch bei komplizierten Schneidgeometrien

3.5.5 Schweißen

Prinzipiell ist Titan aller Festigkeitsstufen verschweißbar. Die mechanischen Werte sowie die Korrosionsbeständigkeit der Schweißverbindung entsprechen etwa denen des Grundwerkstoffes. Bei Langzeitbeanspruchung ist für die Schweißverbindung jedoch mit reduzierten Festigkeiten zu rechnen.

Äußerst wichtig für alle Schweißverfahren sind folgende Punkte:

- absolute Sauberkeit der Schweißnahtbereiche
- absoluter Schutz vor Zutritt der Atmosphäre oder reaktiver Gase zu
 - dem Schmelzbad
 - der erhitzten Randzone
 - der abkühlenden Schweißnaht
 - der Nahtunterseite bei nachfolgenden Lagen
 - der Gegenseite von Kehlnähten

Das bedeutet, dass die Schweißkanten auf jeden Fall mechanisch angearbeitet werden müssen. Oxide von thermischen Schneidverfahren können zu Poren oder sogar zu Versprödungen führen. Nur gedrehte, gefräste, gehobelte, genibbelte, wasserstrahlgeschnittene Schweißkanten, glatte Scherenschnitte oder Stanzungen führen zu porenfreien Nähten. Unmittelbar vor dem Schweißen sind Schweißnahtbereich und Zusatzwerkstoff mit fettlösenden Mitteln zu reinigen, da Staub, Fett und sogar schon Handschweiß zu Poren oder gar Aufhärtungen führen können.

Beim Schweißen müssen das Schmelzbad, die erhitzte Randzone, die abkühlende Schweißnaht, die Wurzel bzw. die Nahtunterseite bei nachfolgenden Lagen und die Gegenseite von Kehlnähten ausreichend mit trockenem inertem Gas (im Allgemeinen Argon, möglichst mit 99,998 % Ar) gespült werden, um den Zutritt der Atmosphäre bis zu Temperaturen unterhalb von ca. 300–500 °C zu verhindern. Das Schweißen kleinerer Bauteile in einer Schutzgaskammer reduziert den Aufwand für Spülvorrichtungen.

Die Anzahl der Heftstellen ist möglichst gering zu halten, was aufgrund der relativ geringen Verzugseigung möglich ist. Beim Heften ist ebenfalls auf sorgfältiges Spülen zu achten. Bei Pd-legiertem Titan ist darauf zu achten, dass auch die Heftstellen mit dem artgleichen Zusatzwerkstoff geheftet werden, da sonst die Korrosionsbeständigkeit herabgesetzt werden kann.

Obwohl Titan als reines Metall einen ausgeprägten Schmelzpunkt und keinen Schmelzbereich besitzt, ist das Schmelzbad relativ dünnflüssig und gut zu modellieren. Die Nahtoberflächen zeigen bei gutem Schutzgaseinsatz ein sehr sauberes, glattflächiges und metallisch blankes Aussehen. Bereiche neben der Naht oder auf der Nahrückseite können trotz ausreichendem Gasschutz gelbliche bis leicht bläuliche Anlauffarben aufweisen, die jedoch auch vermieden werden sollten. Haben sich leichte Anlauffarben gebildet, so sind diese vor dem Schweißen der nächsten Lage durch Edelstahl-drahtbürsten zu entfernen.

Die Wärmeeinbringung sollte vor allem beim manuellen WIG-Schweißen in Grenzen gehalten werden, da sich sonst ein grobkörniges Schweißnahtgefüge einstellt, das zu Zähigkeitsverlusten führen kann.

Das Schweißen von Titan und seinen Legierungen mit Handelektroden ist nicht praktikabel, da die Umhüllung der Stabelektroden keine ausreichende Schutzabdeckung ermöglichen würde.

Das Verschweißen von Titan und seinen Legierungen mit anderen metallischen Werkstoffen ist wegen der Bildung von stark versprödenden intermetallischen Phasen nicht möglich.

3.5.5.1 Schweißverfahren

Als Schweißverfahren sind das WIG-, das MIG- und das Plasmaschweißen gut geeignet. In besonderen Fällen wird auch das Laser- oder Elektronenstrahlschweißen eingesetzt.

Das WIG-Schweißen ist für die Druckbehälterfertigung am weitesten verbreitet, insbesondere wenn die Bauteile keine Mechanisierung der Schweißung erlauben.

Das Plasmaschweißen eignet sich besonders gut für das Schweißen von Titan, da

- je nach Anlage bis zu 10 mm Blechdicke die Bauteile im I-Stoß verschweißt werden können, wodurch Scherenschnitte als Schweißkantenvorbereitung ausreichen
- nur etwa 5–10 % Zusatzwerkstoff benötigt werden
- die Schweißgeschwindigkeit hoch und die Wärmeeinbringung gering ist
- die Porengefahr relativ gering ist
- das Titan-Schweißgut wenig zum Durchsacken neigt (im Gegensatz zu Nickelbasislegierungen)

3.5.5.2 Zusatzwerkstoffe für Titan

Die Zusatzwerkstoffe für alle Titanwerkstoffe sind in der weltweit gültigen Norm DIN EN ISO 24034: Dez. 2005 aufgelistet. Für die hochlegierten Sorten stehen mehr Zusätze als Titansorten zur Verfügung, sodass auch höher legiert, analog Edelstahl Rostfrei, geschweißt werden kann. Durch die höhere Legierung wird der Nachteil der geringeren Korrosionsbeständigkeit der Gussstruktur der Schweißnaht kompensiert. Die Schweißzusätze für die un- und niedriglegierten Titanwerkstoffe sind auch in der DIN 1737 und im VdTÜV Kennblatt 7644.02 in Deutschland für den chemischen Apparatebau zusammengefasst. Für die 8 un- und niedriglegierten Titansorten gibt es in diesen Normen 3 Zusätze.

3.5.6 Löten

Wegen der großen Reaktionsfreudigkeit von Titan an der Luft ist das Löten von Titan nicht üblich.

3.5.7 Kleben

Voraussetzung für eine einwandfreie Klebeverbindung ist die Vorbereitung bzw. Vorbehandlung der Titanoberfläche. Abgesehen von der mechanischen Festigkeit des Klebstoffes selbst – das ist die Kohäsion –, ist die Bindefestigkeit zwischen Klebstoff und den zu klebenden Werkstoffen – das ist die Adhäsion –, für eine gute Klebeverbindung entscheidend.

Das Kriterium hierfür heißt

$$\text{Adhäsion} \geq \text{Kohäsion}$$

mit der Folge, dass bei optimaler Ausführung der Klebeverbindung eine Trennung in der Klebstoffschicht erfolgt.

Unabdingbare Voraussetzungen für eine befriedigende Adhäsion beim Kleben sind:

- die Oberfläche muss frei von Schmutz, Farbresten, Staub, Fett, Öl und dergleichen sein
- die Oberfläche muss trocken sein

Die Adhäsion des Klebstoffs beruht hauptsächlich auf den zwischenmolekularen Kräften (Van der Waals-Kräfte). Diese kommen aber nicht zustande, wenn ein Schmutz-, Fett-, Öl- oder Wasserfilm dazwischen liegt, auch wenn er für das Auge unsichtbar ist.

Die Adhäsion des Klebstoffs kann durch Oberflächenbehandlung (Aufrauen) verstärkt werden, um diesen (Klebstoff) auch mechanisch zu verankern. Hierzu kommen mehrere Alternativen in Frage:

- Mechanisches Aufrauen durch Bürsten, Schmirgeln oder Strahlen,
- Chemische Vorbehandlung durch Beizen.

Die Auswahl von Klebstoffen ist auf Grund der vielen Angebote unterschiedlicher chemischer Mechanismen und Herstellern enorm; im Einzelfall ist eine Beratung durch den Klebstoff-Hersteller sinnvoll.

3.6

Oberflächenveredelung

Titanlegierungen haben eine sehr gute Passivschicht, welche eine Oberflächenveredelung überflüssig macht.

3.7

Werkstoffe für Luft- und Raumfahrt

Titan						
Luft- und Raumfahrt Titan und Titanlegierungen						
Werkstoffnummer DIN	Werkstoffnummer Luft- und Raumfahrt	Bleche	Bänder	Platten	Stangen	Schweißzusatz Innendruckrohre
3.7025	3.7024	●				●
3.7035	3.7034	●			●	●
3.7065	3.7064	●			●	
-	3.7114	●	●	●	●	●
-	3.7124	●	●		●	●
3.7145	3.7144				●	
3.7155	3.7154				●	
3.7165	3.7164	●		●	●	●
3.7175	3.7174	●	●	●	●	
3.7855	3.7184			●	●	
3.7195	3.7194					● ●
-	3.7264					

Die Titanwerkstoffe für die Deutsche Luft- und Raumfahrt sind im Teil 1 „Metallische Werkstoffe“, 2. Band „Leichtmetalle“ genormt. Sie sind hinsichtlich ihrer chemischen und mechanisch/technologischen Eigenschaften mit den gegenübergestellten Werkstoffen identisch, so dass die Angaben für die Behandlung in dieser Broschüre anwendbar sind.

Wichtiger Hinweis: Die Aussagen dieser Broschüre sind in keiner Weise als Beratungsleistungen unseres Hauses aufzufassen, sondern sind nur beschreibender Natur, ohne eigenschaftsbezogene Beschaffenheiten zu garantieren bzw. zuzusagen. Eine Haftung auf Grundlage der Aussagen dieser Broschüre ist, sofern nicht zwingende gesetzliche Haftungstatbestände greifen, ausdrücklich ausgeschlossen.
Alle Angaben nach bester Prüfung, jedoch ohne Gewähr. Technische Änderungen vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Herausgebers.

Herausgeber: ThyssenKrupp Materials International GmbH, Technischer Verkauf, Essen

Stand: Oktober 2008