

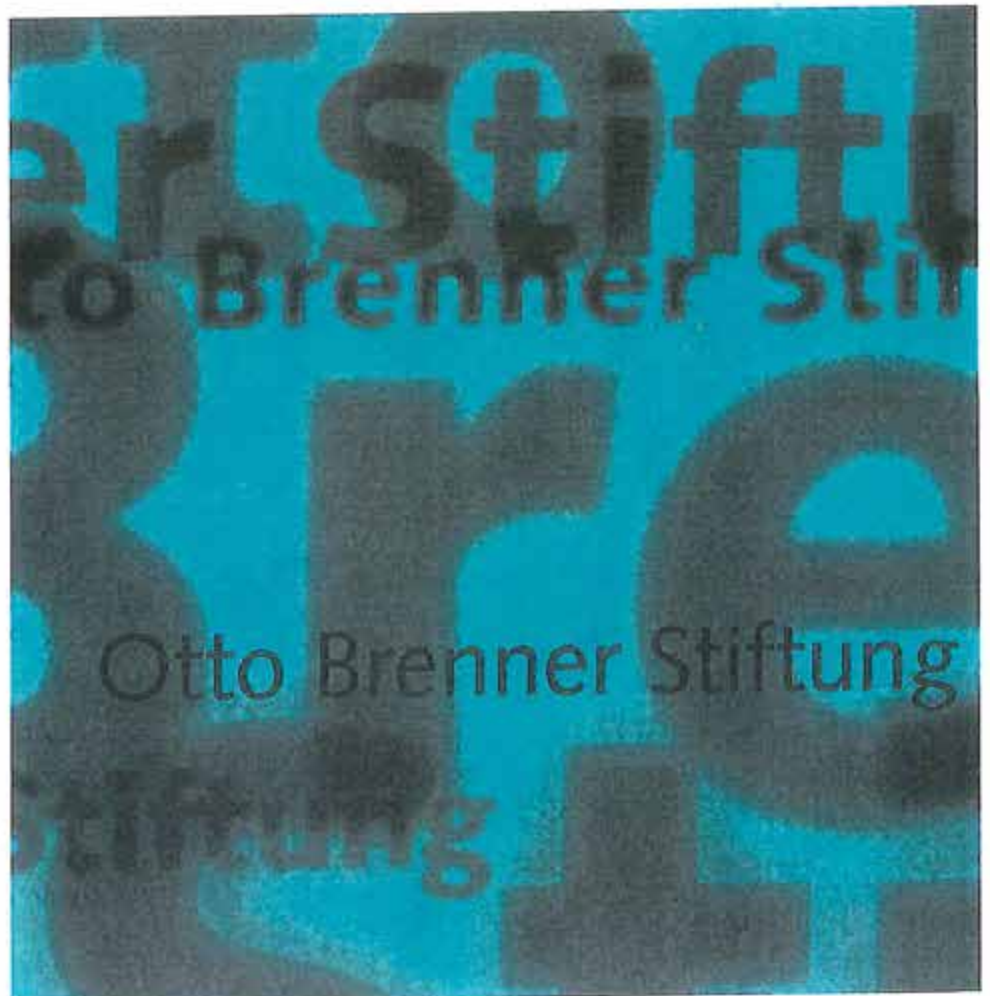


Dr. Emin Arpaci

Kupfer - Werkstoff der Zukunft Trends der Technologie- und Marktentwicklung

Eine Studie im Auftrag der Otto Brenner Stiftung

2. Auflage - Berlin, Juni 2000



Herausgeber:
Otto Brenner Stiftung
Heike Kauls
Alte Jakobstraße 149
10969 Berlin

Tel.: 030 / 25 39 60 0
Fax: 030 / 25 39 60 11

Redaktion:
Dr. Ermin Arpaci
Naumannstraße 81, H. 38
10829 Berlin

Zusammenfassung

Kupfer begleitet die menschliche Zivilisation bereits seit etwa 10.000 Jahren. Es blieb sehr lange das einzig genutzte Metall. Aufgrund seiner einzigartigen Eigenschaften, wie die sehr hohe thermische und elektrische Leitfähigkeit, gute Korrosionsbeständigkeit, einwandfreie Recyclbarkeit sowie Umformbarkeit, ist Kupfer heute unentbehrlich für unseren Technologie- und Lebensstandard. Neben ihren technischen und funktionalen Vorzügen weisen Kupferwerkstoffe eine große Farben- und Formenvielfalt auf. Ihre Anwendungsbereiche sind dementsprechend vielseitig.

So ist Kupfer heute nach wie vor **der** Werkstoff in der elektrotechnischen und elektronischen Industrie, wo es in Form von Kabeln, Drähten, Kontakten, Leitungen und Wicklungen sowie verschiedenen Stromleitsystemen und kupferkaschiertem Halbzeug verarbeitet wird. Im Bauwesen findet es u.a. als Rohr bei der Wasser-, Gas- und Heizungsinstallation sowie als Band und Blech bei Dachdeckung und Wandauskleidung Anwendung. Wegen seiner guten Umformbarkeit wird es im Maschinen-, Schiff-, Apparate- und Kraftfahrzeugbau eingesetzt. Außerdem wird es in der chemischen Industrie für Wärmeübertrager usw. verwendet. Weitere Anwendungsbereiche sind u.a. Tieftemperatur-, Kälte- und Klimatechnik, Transportwesen, Feinmechanik, Geräte- und Instrumentenbau sowie Nahrungsmittelindustrie.

Kupfer hat unsere Kulturgeschichte maßgeblich beeinflusst. Heute gilt seine pro Kopf verbrauchte Menge als Indikator des Fortschritts und Lebensstandards eines Landes oder einer Region. Derzeit kennen wir eine ganze Palette von Kupferlegierungen, die in der Lage sind, eine Vielzahl unterschiedlicher Anforderungen zu erfüllen. Die Hauptgruppen sind dabei reines Kupfer, niedriglegierte Kupferwerkstoffe, Kupfer-Zink-, Kupfer-Zinn-, Kupfer-Aluminium-, Kupfer-Nickel-, Kupfer-Nickel-Zink- sowie Kupfer-Blei- und Kupfer-Manganlegierungen.

Es gibt bekanntlich kein anderes Metall, für dessen Gewinnung so viele Verfahren erprobt bzw. vorgeschlagen wurden und heute verschiedentlich Anwendung finden wie bei Kupfer. Gegenwärtig stammen 80 % der primären Kupferproduktion aus sulfidischen Erzen, der Rest aus oxidischen Erzen, die konventionell getrennt aufbereitet werden. Durch einen neuen hydrometallurgischen Prozeß ist es jetzt aber möglich, sie gemeinsam in einem Verfahrensschritt aufzubereiten.

Bei der Gewinnung und Verarbeitung sind vorrangige Ziele vor allem die minimierte Beeinträchtigung der Umwelt sowie sparsamer Umgang mit den Ressourcen und niedriger Energieverbrauch. Daher werden künftig umweltschonende Techniken bevorzugt eingesetzt. So gibt es heute Kupferminen und Hütten, die auf die modernste Art geführt und gesteuert werden und mit sehr geringen Schadstoffemissionen arbeiten.

Bei der Halbzeugherstellung werden zunehmend kontinuierliche Verfahren favorisiert, die geringere Verbrauchswerte vorweisen können. In diesem Zusammenhang verdient die **MKM GmbH** besondere Anerkennung, da dort richtungsweisende Maßnahmen umgesetzt wurden. Mit Conti M und den Nachfolgeeinrichtungen wurde erstmalig in der Welt eine kontinuierliche Gießlinie zur Erzeugung von Kupferband installiert, die das klassische Warmwalzen überspringt.

In einem anderen Halbzeugwerk wurde eine revolutionäre Walzwerkautomatisierung eingeführt, die bei Bewährung gewiß in viele Herstellungsbereiche Einzug halten wird. Bei der neuen Technologie (die sog. „neuronalen Netze“) werden die vorgegebenen Basisparameter wie Banddicke und -temperatur sowie die Walzkraft praktisch im Laufe des Prozesses durch die Prozeßautomatisierung optimiert.

Das neu entwickelte Verfahren, sog. „Sprühkompaktieren“, erlaubt es, Kupferwerkstoffe mit schlechter Umformbarkeit durch Zerstäubung und anschließender Kompaktierung der Metallschmelze auf einem Substrat herzustellen.

Steigende Anforderungen führen zur Entwicklung von fortschrittlichen Produkten und Verarbeitungstechniken. So bieten die neuen hartgelöteten Cuprobrazo-Kühler gegenüber den konventionellen Kühlern für die Fahrzeugindustrie enorme Vorteile und sollen an die Marktreife herangeführt werden.

Ein anderes Beispiel kommt aus der Computerbranche, wo durch die Einführung der Kupfer-technologie (Kupferverdrahtung) die Wärmeverluste verringert und die Signalzeiten im Gegensatz zum Aluminium um den Faktor 6 reduziert werden konnten. Fast alle Hersteller von High-End-Produkten sind heute dabei, auf diese Fertigung umzusteigen.

Es gibt aber auch Bereiche, so wie der Kabelbaum, in denen die Einsatzmöglichkeiten durch andere Werkstoffe eingeschränkt werden.

Im Bereich bewährter Anwendungen wurden die Produkte weiter optimiert. So werden in der Kälte- und Klimatechnik immer kompliziertere Oberflächen durch Walz- und Ziehvorgänge erzeugt, um die Übertragungsleistungen zu steigern.

Weitere Entwicklungen sind die Einführung der halbharten Kupferrohre im deutschen Markt, die einfache Verbindungstechnik der Kupferrohre durch Verpressen und neue Werkstoffe im Bereich der Supraleiter, die künftig vielen neuen Anwendungen Vorschub leisten werden.

In nächster Zukunft dürften neue Anwendungen vor allem im Bereich der Elektronik und Elektrotechnik (Transformatoren mit höherem Kupfereinsatz), der Solartechnik (großer Aufholbedarf), der Architektur und des Innenausbaus (Renaissance der natürlichen Farbtöne) und der Verbundwerkstoffe mit Kupfermatrix (Eigenschaftenskombination der Materialien) zu erwarten sein.

In jedem Fall besitzt Kupfer reichlich innovatives Potential. Absehbar ist, daß uns das rote Metall noch sehr lange begleiten wird.

Die gute Umformbarkeit prädestiniert es für Maschinen-, Schiff-, Apparate- und Kraftfahrzeugbau.

Wegen der optimalen Kombination seiner guten Korrosionsbeständigkeit mit hoher Wärmeleitfähigkeit wird es in der chemischen Industrie für Wärmeübertrager, Destillierkolonnen und Rohrleitungen verwendet.

Seine hohen Festigkeitskennwerte auch bei tiefen Temperaturen qualifizieren diesen Werkstoff für Anwendungen in Tieftemperatur-, Kälte- und Klimatechnik.

Aber auch im Transportwesen, Feinmechanik, Geräte- und Instrumentenbau, in der Nahrungsmittelindustrie, im Bereich der Kurz-, Schmuck- und Metallwaren sowie in der Hütten- und Gießereiindustrie kommen Kupferwerkstoffe verstärkt zum Einsatz.

Nicht unerwähnt bleiben sollte bei so viel Technik, daß Kupfer ein essentielles Spurenelement darstellt und in dieser Eigenschaft für normales, gesundes Wachstum und die Fortpflanzung aller höheren Lebewesen unbedingt notwendig ist. In Pflanzen ist es beispielsweise an der Photosynthese, an der Lignifizierung (Verholzung), am Phenolstoffwechsel und an der Proteinsynthese beteiligt.

Bei Tieren und Menschen ist Kupfer unentbehrlich für die Funktion verschiedener Proteine und Enzyme. Zu seinen Aufgaben gehören z.B. die Synthese des roten Blutfarbstoffes „Hämoglobin“ sowie der Reifungsprozeß der roten Blutkörperchen (Verhinderung der Anämie), die Knochenbildung, die Funktion des Herz-Kreislauf-Systems sowie des zentralen Nervensystems und die biologische Energiegewinnung aller Körperzellen. Auch die Bereitstellung von Vitamin B1 ist eng an die Kupferbereitstellung gebunden.

Zur Gewährleistung dieser Aufgaben hat ein durchschnittlicher gesunder Erwachsener etwa 100 mg Kupfer in seinem Körper (das entspricht einem mittleren Gehalt von ca. 1,5 mg/kg Körpergewicht).

Da Kupfer – im Gegensatz zu toxischen Metallen wie z.B. Blei – nicht ein für alle Mal im Körper gespeichert, sondern laufend ausgeschieden wird, muß der Mensch eine bestimmte Menge Kupfer mit den Lebensmitteln zu sich nehmen, damit der Kupferhaushalt sichergestellt ist. So beträgt der tägliche Kupferbedarf für Erwachsene etwa 2-3 mg und für Kinder ca. 1 mg, welcher in der Nahrung aufzunehmen ist [3].

Darüber hinaus weisen Kupferwerkstoffe hygienisch-gesundheitliche Vorzüge auf, die bisher zwar wenig bewußt, aber stets vorhanden und mitunter nicht we-

niger wichtig sind. So können z. B. bei Türdrückern, Haltegriffen und Treppengeländern die bakteriziden Eigenschaften dieser Werkstoffe einer Übertragung von Bakterien entgegenwirken [2].

2. Kupfer als Maßstab der technologischen Entwicklung

Die pro Kopf verbrauchte Kupfermenge kann als ein Indikator des Fortschritts und des Lebensstandards eines Landes oder einer Region angesehen werden. So ist beispielsweise die Bundesrepublik Deutschland mit etwa 10 % (ca. 1 Mio. t/a) am Weltverbrauch beteiligt. Die prozentuale Aufteilung nach Anwendungsbranchen gibt **Abb. 2** [4] wieder. Es sind zentrale Bereiche, die unsere eigentliche Lebensqualität verkörpern.

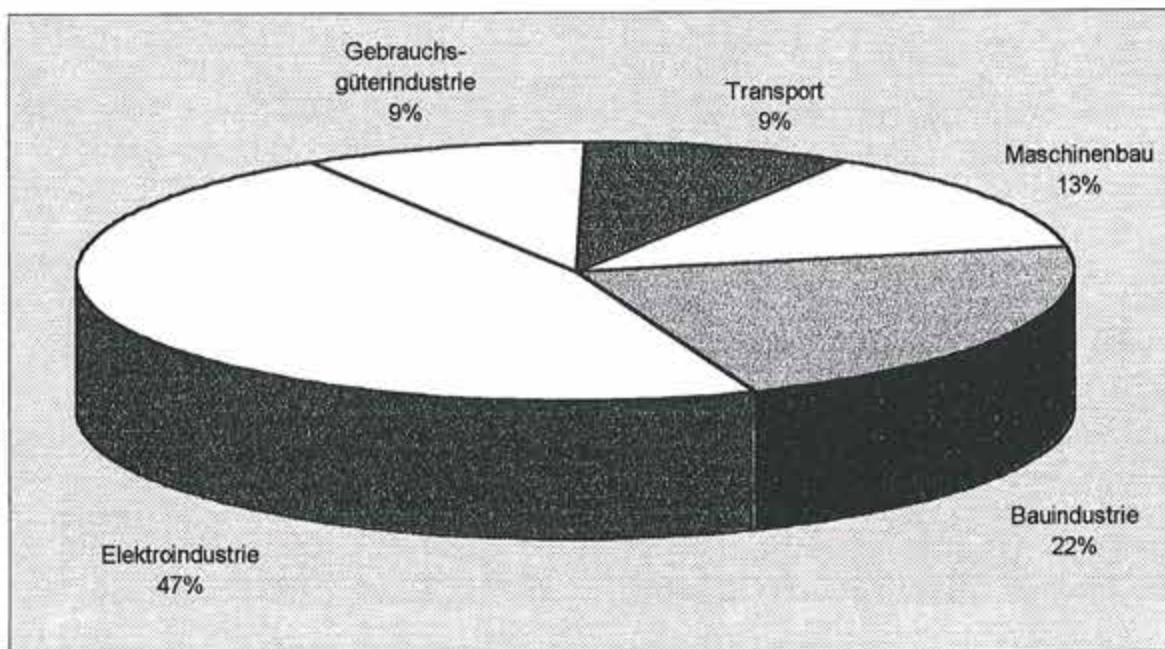


Abb. 2: Anwendungsbereiche für Kupferprodukte in Deutschland (MG, 1993)

Der Bedarf an Kupfer wird einerseits durch die Produktion aus seinen Erzen und andererseits durch Recycling gedeckt. Kupfer ist ohne Qualitätsverluste recycelbar. Bei der mengenmäßigen Betrachtung der Recyclingraten müssen die lange Lebensdauer der Kupferprodukte und die zum Zeitpunkt des ersten Einsatzes produzierten Mengen zugrunde gelegt werden. So stammen heute durch die gut ausgebaute und mittlerweile fest etablierte Infrastruktur zur Wiederverwendung über 75 % des in Rohren, Platten, Profilen verwendeten Kupfers aus dem Recyclingprozeß [4, 5].

2.1 Begleitung von technischen Errungenschaften

Kupfer blieb ein ständiger Begleiter unserer Kulturgeschichte und hat sie maßgeblich beeinflusst. Da es in der Natur auch gediegen vorkam, reicht die Bekanntschaft des Menschen mit dem Kupfer weit zurück. In der Frühzeit sind solche Kupferstücke als eine Art Stein angesehen worden.

Der Mensch erkannte, daß dieser Stein nicht splitterte, sondern durch Hämmern geformt werden konnte. Vermutlich entwickelte sich die Herstellungs- und Bearbeitungsgeschichte stufenweise [6]:

1. Der Mensch bearbeitete das Kupfer nur durch Hämmern, ohne es vorher zu erwärmen.
2. Er lernte, das gediegene Kupfer zu schmelzen, zu gießen und mechanisch zu verfestigen.
3. Er lernte, es aus seinen Erzen zu gewinnen.
4. Er lernte, Kupfer mit anderen Metallen zu legieren.

Die hierzu existierenden Zeitvorstellungen sind:

- Chalkolithikum (gediegene Metalle) vor etwa 50.000 bis 10.000 Jahren;
- Erstes Schmelzen von Kupfer etwa 4500 v. Chr.;
- Älteste Zinnbronze mit ca. 11 % Sn etwa 3500 v. Chr.

Nach heutigen Kenntnissen wurde Kupfer in der Frühsteinzeit im südlichen Anatolien schon vor etwa 10.000 Jahren verwendet und verbreitete sich erheblich später in andere Regionen der Welt. Etwa um 4800 v. Chr. wurden Gebrauchsgegenstände aus gediegenem Kupfer hergestellt. Bereits um 3900 v. Chr. sollen die Ägypter Kupfer aus Malachit erschmolzen haben. Von den sieben Weltwundern ist bis heute nur die vor ca. 6000 Jahren fertiggestellte Grabstätte des ägyptischen Pharaonen „die Cheopspyramide“ erhalten, deren 2.300 Kalksteinblöcke (je 2,5 t) mit kupfernen Werkzeugen bearbeitet wurden. Die Ägypter waren in Kupfergewinnung und -verwendung sehr erfahren und betrieben um 3200 bis etwa 1160 v. Chr. einen umfangreichen Kupferbergbau auf der Halbinsel Sinai. **Abb. 3** zeigt ein Stück aus einer etwa 400 m langen Wasserleitung, die um 2500 v. Chr. im Totentempel des Sahuré verlegt wurde [6]. Also schon damals bestanden die Trinkwasserinstallationsrohre aus Kupfer.

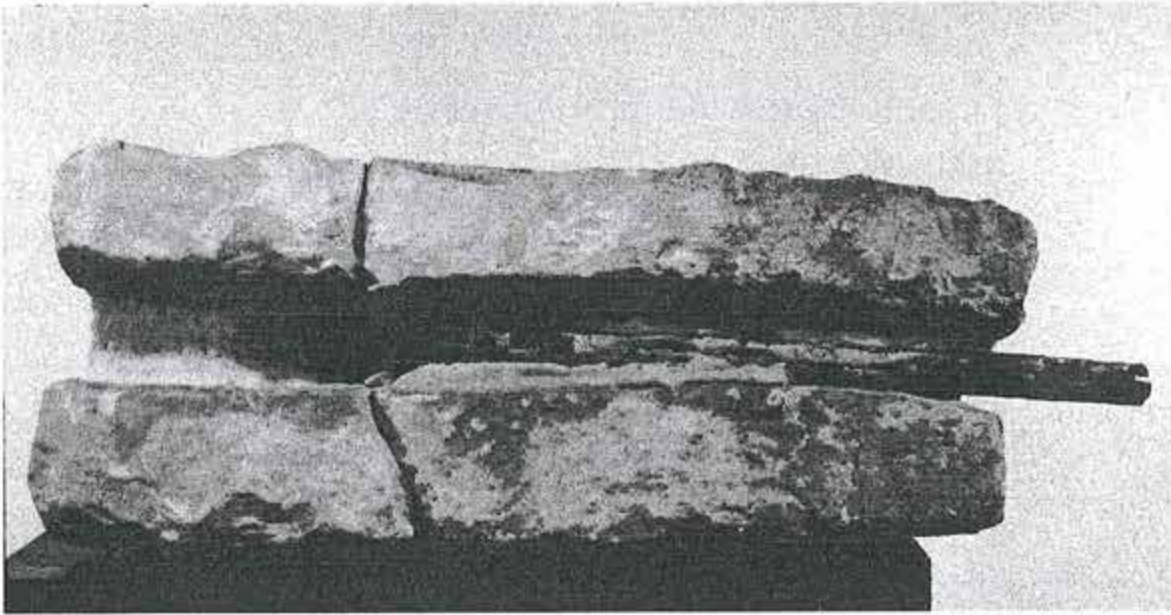


Abb. 3: Wasserleitungsrohr aus getriebenem Kupferblech in einer Steinrinne verlegt und mit Gips überdeckt (Staatl. Museen zu Berlin, Dia: DKI)

Nachdem Kupfer lange Zeit das einzige Gebrauchsmetall war, lernte also der Mensch das Mischen (Legieren) verschiedener Metalle, zunächst von Kupfer und Zinn. Die frühe Herstellung und Anwendung von Zinnbronze, die einem ganzen Zeitalter unserer Historie – der „Bronzezeit“ – ihren Namen gab, begann um 3500 v. Chr. Kupferlegierungen mit 20 bis 50 % Zinn wurden wegen ihres hohen Reflexionsvermögens zur Herstellung von Spiegeln herangezogen. Die ältesten Bronzegegenstände wurden vor allem seit etwa 2780 v. Chr. in Ägypten verwendet. Andere frühere Anwendungen sind aus dem heutigen Pakistan, aus dem Reich der Sumerer, aus China und aus Mitteleuropa bekannt. Selbst Messing war im 3. Jahrhundert v. Chr. in Babylonien und Assyrien bekannt [6].

Die Arbeiten der Meister der griechischen Antike bilden den Höhepunkt der metallhandwerklichen Kunst in vorchristlicher Zeit. Die um ca. 450 v. Chr. errichtete Statue des Olympischen Zeus, aus einem Holzgerüst bestehend, wurde mit gehämmertem Kupferblech überzogen. 150 Jahre später wurde die bekannte Statue des Sonnengottes Helios, „Koloß von Rhodos“, in gleicher Weise mit dünnen Bronzeblechen errichtet. Schon damals wurde die Kunst des Schmiedens „Techne“ genannt, ein Wortstamm, aus dem sich – allerdings in erweiterter Bedeutung – das Wort „Technik“ entwickelte. Die Römer nannten das Kupfer „aes cuprium“ (Erz aus Cypern), später „cuprum“. Wahrscheinlich geht der Name der kupferreichen Mittelmeerinsel auf das assyrische Wort „kipar“ zurück [6, 7]. Die ersten Glocken aus Zinnbronze wurden um etwa 600 n. Chr., die ersten Kanonenrohre aus Bronze zwischen 1345 und 1370 gegossen. Der Bronzeuß erlebte eine Blütezeit in der Renaissance.

In Mitteleuropa begann die Verhüttung der Kupfererze vor 700-800 Jahren. So kann heute der **Mansfelder Kupferschieferbergbau** auf seine **800-jährige Geschichte** zurückblicken. Lange Zeit erfolgten der Abbau und die Verhüttung in dieser Region auf primitive Weise. Erst Mitte des 14. Jahrhunderts waren die Voraussetzungen für Erneuerungen geschaffen. Der durch den 30-jährigen Krieg zum Erliegen gekommene Bergbau wurde ab 1671 wieder forciert vorangetrieben. Zum Anlegen tieferer Schächte kam es auf dem König-Friedrich-Schacht zum in Deutschland erstmaligen Einsatz einer **Dampfmaschine** für die Entwässerung der Stollen. Der in Mansfeld abgebaute kupferhaltige Schiefer wurde per Schmalspurbahn zu den Hütten in Eisleben und Helbra transportiert und zu „Rohstein“ verhüttet. Dieser wurde dann zu den Feinhütten in Hettstedt transportiert und zunächst zu „Schwarzkupfer“ verhüttet und durch Elektrolyse raffiniert und als „Mansfelder-Elektrolyt-Kathoden“ verkauft.

Fanden Kupferwerkstoffe zunächst als Werkzeuge und Gebrauchsgegenstände Anwendung, eröffnete die Nutzung des elektrischen Stroms (das Ohmsche Gesetz wurde 1826 entdeckt) für diese Werkstoffe völlig neue Perspektiven. So bestanden die ersten Telegrafleitungen, die Werner von Siemens 1847 verlegte, aus Kupferleitungen. Er erfand 1866 den Dynamo. Dadurch konnte Strom preiswert und ausreichend produziert werden und Industrie und Handwerk benötigte immer mehr Kupfer, infolgedessen steigerte sich die jährliche Kupfererzeugung der Welt in den darauffolgenden 100 Jahren von 100.000 auf ca. 7,8 Mio. t; heute beträgt sie über 11 Mio. t/a.

Inzwischen wird in der Elektrotechnik und Elektronik, den vielfältigen Anforderungen entsprechend, ein sehr breites Spektrum an Kupferwerkstoffen eingesetzt.

2.2 Vielfalt und Vorzüge der Kupferwerkstoffe

Neben der Leitung der elektrischen Energie erfüllen Kupferwerkstoffe eine Vielzahl unterschiedlicher Anforderungen. Durch Legierungszusätze können beispielsweise Festigkeitskennwerte verbessert, die Korrosionsbeständigkeit gesteigert oder aber unterschiedliche Farbtöne eingestellt werden. Auch die Herstellungs- bzw. Nachbehandlungsparameter können optimiert oder aber gemäß den Einsatzbedingungen abgestimmt werden.

Waren um die Jahrtausendwende außer Kupfer von den Kupferlegierungen nur Messing, Bronze und Neusilber bekannt, kennen wir heute eine ganze Palette von Kupferwerkstoffen mit teilweise ganz spezifischen Eigenschaften.

Der schon früher erstellte [8] und hier leicht modifizierte "Kupfer-Stammbaum" (Abb. 4) veranschaulicht in seinen Ästen und Verzweigungen die unterschiedlichen Legierungsgruppen mit ihren Legierungstypen. Da die Anforderungsprofile immer signifikanter werden, wächst die Anzahl der Kupferlegierungen durch Entwicklung neuerer Werkstoffe weiter.

2.2.1 Reinkupfer und niedriglegierte Kupferwerkstoffe

Bei den meisten elektrischen Anwendungen ist die Forderung nach einer sehr hohen Leitfähigkeit relevant. In diesen Fällen und bei weiteren Anforderungen (Festigkeit, Anlaufbeständigkeit, Federeigenschaften usw.) in Kombination mit der Leitfähigkeit werden vorwiegend das reine, unlegierte Kupfer und die niedriglegierten Kupferwerkstoffe eingesetzt.

In der Normung wird zwischen

- sauerstoffhaltigen,
- sauerstofffreien, nicht desoxidierten und
- sauerstofffreien, mit Phosphor desoxidierten

Kupfersorten unterschieden [7].

Die **sauerstoffhaltigen** Kupfersorten (mit 0,005 bis 0,040 % Sauerstoff) weisen eine hohe elektrische Leitfähigkeit auf und sind vor allem den elektrischen Anwendungen wie Kabel, Leitungen, Drähte und Stromschienen (Abb. 5) vorbehalten.

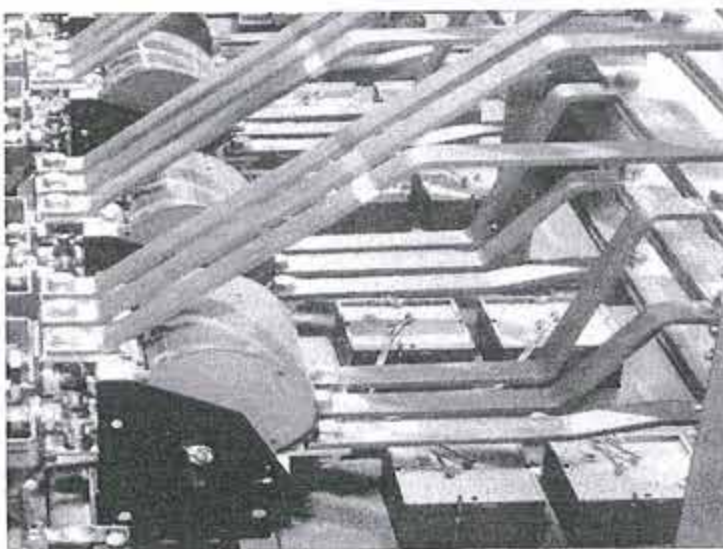


Abb. 5: Stromschienen in Schaltanlagen, hergestellt aus hochleitfähigem E-Cu (DKI)

Die **sauerstofffreien, nicht desoxidierten** Kupfersorten werden unter Ausschluß von Sauerstoff und Desoxidationsmittel erschmolzen. Sie haben ebenfalls eine hohe elektrische Leitfähigkeit und sind gut schweiß- und hartlötgeeignet. Für elektronische Tieftemperatur- und Vakuumanwendungen werden Sonderqualitäten hergestellt, die frei von im Vakuum verdampfenden Elementen sind. Sie finden Anwendung in der Vakuum- und Raumfahrttechnik.

Die **sauerstofffreien, desoxidierten** Kupfersorten sind mit einer hohen Leitfähigkeit lieferbar. Sie sind schweiß- und hartlötgeeignet und in einer Sonderqualität frei von ausdampfenden Elementen (Vakuumanwendungen) erhältlich. Diese Kupfersorten finden hauptsächlich im Apparatebau und Bauwesen Verwendung. Bekanntlich wird Kupfer wegen seiner Beständigkeit bereits seit Jahrhunderten zur Dachdeckung verwendet; schon Jahrzehnte ist es der Werkstoff für Kalt- und Warmwasser- bzw. Heizungsinstallationen sowie Gasleitungen. Als Beispiel wird in **Abb. 6** ein traditionell in Kupfer gedecktes Dach gezeigt.

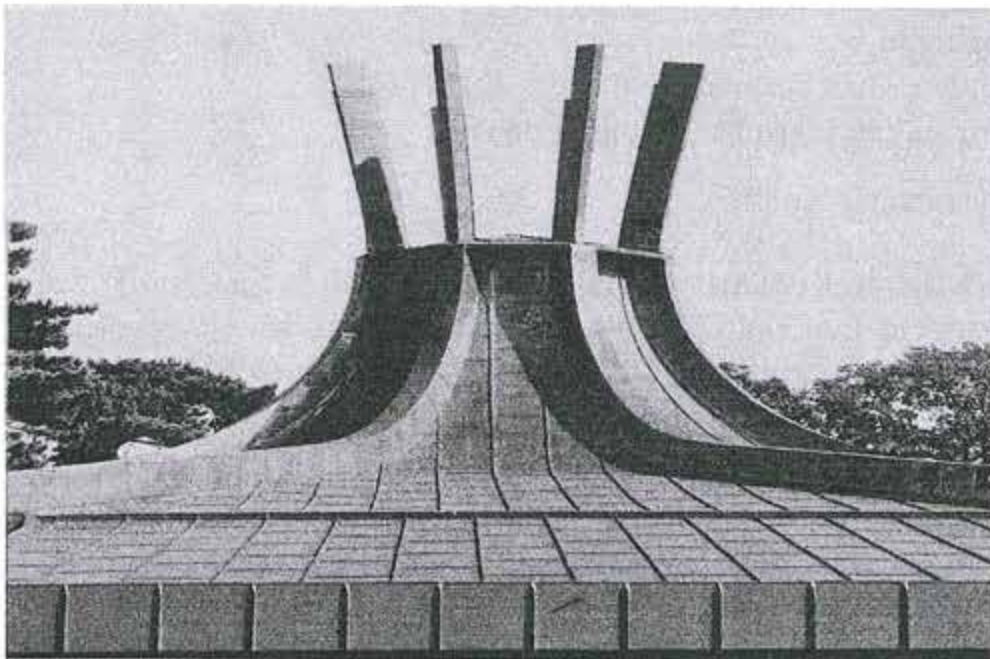


Abb. 6: Kupferdach des Sprachlaborgebäudes der Sleaford-Oberschule, Lincs (CDA)

Neben den aufgezählten Knetwerkstoffen ist reines Kupfer auch als Guß lieferbar, wobei je nach Werkstoff Mindestleitfähigkeiten von 35, 45 und 50 $m/(\Omega \cdot mm^2)$ eingehalten werden. So werden sie vor allem in der Hüttentechnik bei Blasformen, Sauerstoffanlagen und Kühlkästen (**Abb. 7**) eingesetzt.

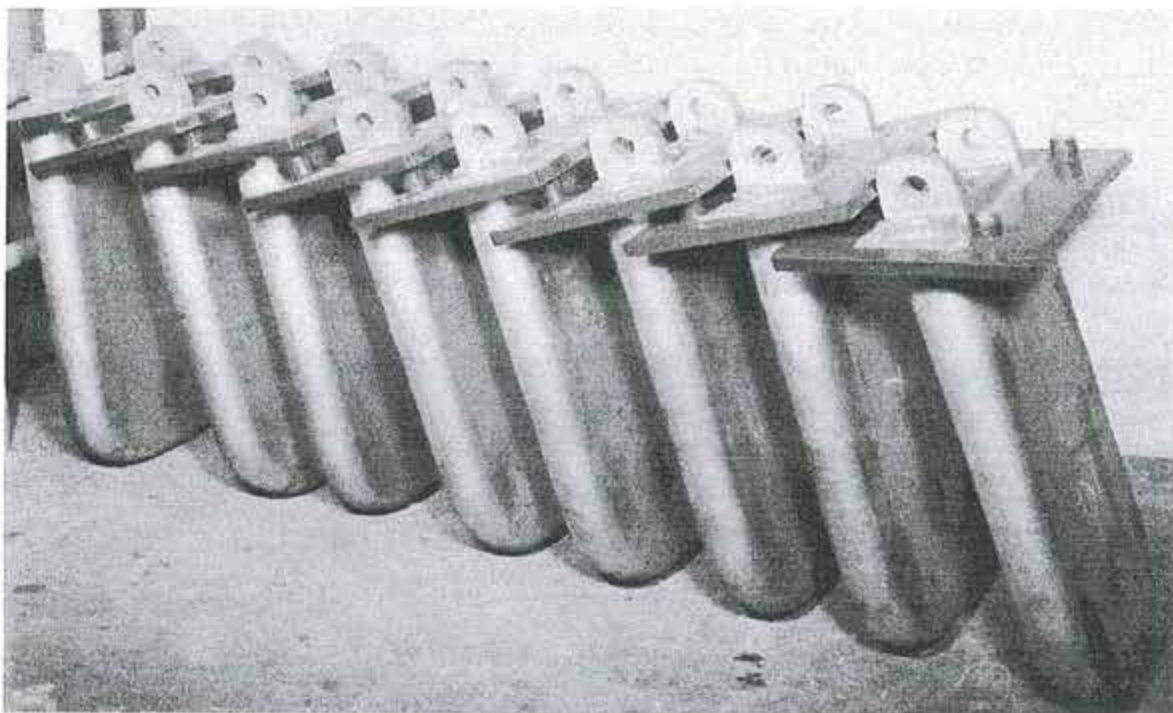


Abb. 7: Schachtkühlkästen aus G-CuL 35 für Hochöfen; Sandguß mit angeschweißten Stahlmanschetten aus St 37 (DKI)

Die Gußsorten mit der höheren Leitfähigkeit werden hauptsächlich in der Elektrotechnik verwendet, wobei diese auch in schweiß- und hartlötfähigen Varianten verfügbar sind.

Niedriglegierte Kupferwerkstoffe zeichnen sich durch Kombination verschiedener Werkstoffeigenschaften aus. Durch geringe Zusätze können bestimmte Eigenschaften des Kupfers, z.B. Festigkeit, Entfestigungs- und Zeitstandverhalten oder aber Anlaufbeständigkeit und Zerspanbarkeit verbessert werden, während die kupferspezifischen Vorzüge erhalten bleiben. Hierbei wird zwischen nicht aushärtbaren und aushärtbaren Legierungen unterschieden. Bei den nicht aushärtbaren (mit Zusätzen wie Ag, Mn, Te, S, Mg, Sn, Zn usw.) können Festigkeitseigenschaften nur durch Kaltumformung verbessert werden. Bei aushärtbaren (mit Zusätzen wie Be, Cr, Zr usw.) sind Verbesserungen neben Kaltumformung hauptsächlich durch geeignete Wärmebehandlungen, also Ausscheidungshärtung, zu erreichen.

Aus der Gruppe der niedriglegierten Kupferwerkstoffe seien hier stellvertretend nur einige genannt. Bekanntlich setzte sich im Laufe der 70er Jahre eine Technologie durch, bei der Halbleiterbauelemente auf Präzisionsstanzstreifen aus Kupferwerkstoffen, den „Leadframes“, montiert und in Kunststoffen gekapselt wurden. Diese Entwicklung verhalf zu einer automatisierten Serienproduktion von Halbleiterbauelementen wie integrierten Schaltkreisen. Die eingesetzten

Trägerwerkstoffe müssen außer ausreichender Festigkeit auch gutes Biege- und Stanzverhalten, sehr gute Galvanisier- und Lötbarkeit, gute Oxidationsbeständigkeit sowie hohe thermische und elektrische Leitfähigkeit haben, um z.B. die relativ hohe Verlustleistung von Leistungshalbleitern in Form von Wärme abführen zu können [9]. Gebräuchlich sind heute als Trägerwerkstoffe CuFe2P , CuSn0,15 und CuZn0,5 . **Abb. 8** zeigt Anwendungsbeispiele für Träger integrierter Schaltungen.

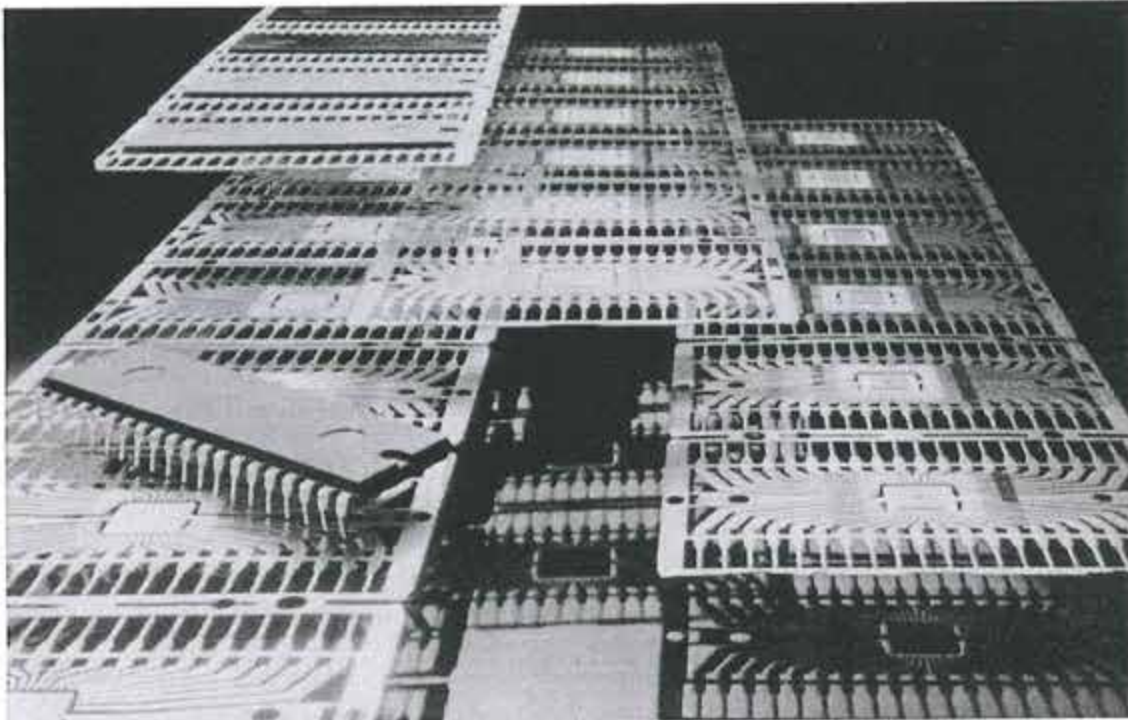


Abb. 8: Beispiele für Träger integrierter Schaltungen (DKI)

Die niedriglegierten Kupfer-Silber-Werkstoffe (Ag-Zusatz 0,03 bis 0,1 %) haben neben einer hohen Leitfähigkeit und Anlaufbeständigkeit eine hohe Entfestigungstemperatur (350°C) sowie gutes Zeitstandverhalten. Sie finden Anwendung hauptsächlich als Kommutatorwerkstoff. Die durch geringe Zusätze (ca. 0,5 %) an Te und S hergestellten Werkstoffe weisen neben der Erhöhung der Entfestigungstemperatur das Merkmal einer guten Zerspanbarkeit auf. So werden sie beispielsweise für Brennerdüsen, Verschraubungen und für Automaten-drehteile verwendet [10].

Bänder und Streifen für Blattfedern sowie Federdrähte werden bei erhöhten Anforderungen aus aushärtbaren Kupfer-Beryllium-Werkstoffen hergestellt, da sie eine sehr hohe Festigkeit und Härte, Verschleißfestigkeit, günstige Elastizität und Dauerfestigkeit haben.

2.2.2 Kupfer-Zink-Legierungen

Die Kupferwerkstoffe aus Kupfer-Zink-Legierungen werden in drei Gruppen aufgeteilt:

- Kupfer-Zink-Legierungen ohne weitere Legierungselemente (Messing),
- Kupfer-Zink-Legierungen mit Blei (bleihaltiges Messing) und
- Kupfer-Zink-Legierungen mit weiteren Legierungselementen (Sondermessing)

Auch bei den Gußlegierungen könnte eine entsprechende Zuordnung vorgenommen werden, von der jedoch in der Normung kein Gebrauch gemacht wird. Diese werden eher nach ihrer Eignung hinsichtlich der jeweiligen Gußverfahren, Lötverhalten und Festigkeitseigenschaften unterschieden.

Kupfer-Zink-Werkstoffe werden von allen Kupferlegierungen am meisten verwendet.

Bei binären Kupfer-Zink-Legierungen (meist 5 bis 45 % Zn) nehmen Zugfestigkeit und Brinellhärte mit steigendem Zinkgehalt zu. Die Bruchdehnung erreicht bei etwa 30 % Zn einen Höchstwert und ist daher am besten kaltumformbar. Aus wirtschaftlichen Gründen wird allerdings CuZn37 als Hauptlegierung für Kaltumformbarkeit verwendet (Abb. 9). Die Farbe ändert sich mit zunehmendem Zinkgehalt von Goldrot (CuZn5) bis Sattgelb (CuZn37).

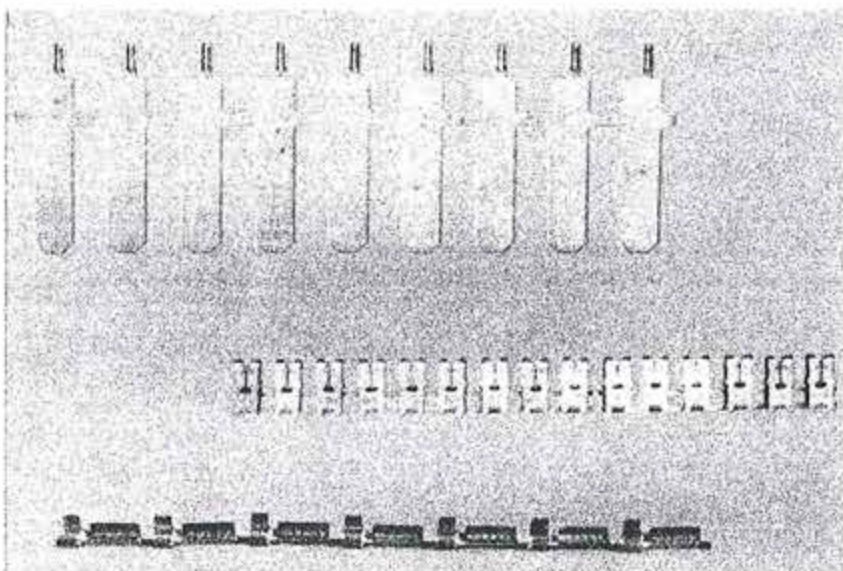


Abb. 9: Kontaktstecker aus CuZn37, Kontaktklemmen sowie Kabelklemmen aus CuZn30 (DKI)

Kupfer-Zink-Legierungen mit Bleizusatz weisen sehr gute Zerspanungseigenschaften (Blei als Spanbrecher) auf. Das gilt insbesondere für Legierungen mit ca. 3 % Pb, dem sogenannten Automatenmessing. Sie werden für spanabhebende Bearbeitung – vorwiegend auf Drehautomaten – anderen Werkstoffen vorgezogen. Außerdem können die Eigenschaften dieser Legierungen durch weitere Zusätze variiert werden; damit stehen für spezielle Anwendungen Werkstoffe mit unterschiedlichen Werkstoffkennwerten zur Verfügung. Die meisten Werkstoffe dieser Legierungsgruppe lassen sich leicht polieren, verchromen, versilbern oder aber vergolden. Darüber hinaus wird Messing wegen seines bakteriziden Verhaltens auch dort eingesetzt, wo es auf Hygiene und Keimfreiheit ankommt. Gemäß den allseitigen Eigenschaften werden diese Werkstoffe in vielen Bereichen verwendet [11].

Kupfer-Zink-Legierungen finden im Maschinen-, Apparate-, Kraftwerks- und Fahrzeugbau Anwendung für Lager und Lagergehäuse, Schaltgabeln, Synchronringe, Ventile, Drahtgewebe, Rohre, Turbinen, Schaufeln und Schaufelräder, Ölbehälter, Öl- und Schmierstoffleitungen, Rippenrohre für Wärmeübertragung, Kondensatorrohre und Kondensatorböden, als Teile von Wärmeaustauschern, Autokühler usw.

Im Schiffbau werden sie eingesetzt für Beschläge, Bootsnägel, Flansche, Gußteile aller Art, Kompaßarmaturen, Rohre für Meerwasserleitungen, meereswasserbeständige Kondensatorrohre und -platten, Meerwasserverdampfer, Schiffspeller, Schiffskühler, Stopfbuchsen, Pumpen, Pumpenteile u.a.

In der Elektrotechnik werden die Kupfer-Zink-Legierungen verwendet für Anschlußklemmen, Armaturen für Freileitungen, Federn, Gehäuseteile, Glühlampenfassungen, Installationsmaterial, Kontaktteile und -federn, Sicherungsfedern, Lötösen, Schalterteile, Steckverbindungen usw.

In der Feinmechanik, im Geräte- und im Instrumentenbau haben Kupfer-Zink-Legierungen für Armaturen, Brillenfassungen, chirurgische Instrumente, Steuer- und Regelgeräte, Faltenbälge, Schlauchrohre, Feldstechergehäuse, Harmonikabeschläge, Uhrengehäuse, Kameraverschlüsse, Manometerrohre, Musikinstrumente, nautische und optische Instrumente, Waagschalen, Geräteabdeckungen, Schilder, Schlagzeuge, Tachometer, Zahnräder für Uhren, Meß- und Zählwerke sowie Zifferblätter Eingang gefunden.

Unentbehrlich sind Kupfer-Zink-Legierungen im Bauwesen für Armaturen aller Art, Beleuchtungskörper, Fassadenprofile und -verkleidungen, Zierbleche, Fensterbeschläge, -gitter und -griffe, Firmenschilder, Fittings für die Kupferrohrinstallation, Fußbodenleisten, Handläufe für Geländer, Armaturen, Türbeschläge und -griffe.

Kupfer-Zinn-Legierungen begegnen uns im täglichen Leben als Haushalts-, Schmuck- und Bedarfsartikel wie Blumentöpfe, Etais, Gongs, Kannen und andere Tafelgeräte, kunstgewerbliche Gegenstände, Lampen, Schreibtischgarnituren, Teeglashalter und Wandteller. Auch Abzeichen, Kugelschreiberminen, Lippenstiftgehäuse und Reißverschlüsse (meist in gefärbter Ausführung) werden aus diesen Legierungen hergestellt. Sie finden auch Anwendung als Münzwerkstoffe, Lote und Sinterteile, die aus Messingpulver (Formteile z.B. für Büromaschinen und Filter) hergestellt werden.

2.2.3 Kupfer-Zinn-Legierungen

Angesprochen werden sollen hier nur die Kupfer-Zinn-Knetlegierungen, die Gußlegierungen finden unter 2.2.7 Erwähnung.

Obgleich die Kupfer-Zinn-Legierungen zu den ältesten Gebrauchslegierungen gehören, war deren Aufbau lange Zeit nur in groben Zügen klar. So wurde das Warmwalzen und Strangpressen dieser Legierungen erst nach dem ersten Weltkrieg eingeführt.

Den Kupfer-Zinn-Legierungen wird üblicherweise etwas Phosphor zugegeben, daher wurden sie früher als „Phosphorbronzen“ bezeichnet.

Die Eigenschaften dieser Legierungen werden vorrangig vom Zinngehalt (4 bis 8 %) und in zweiter Linie vom Zusatz weiterer Legierungselemente bestimmt. Sie können verschiedenen Verarbeitungen und Anwendungen angepaßt werden, daraus resultiert sich die große Anzahl der industriellen Einsatzbereiche. Besonders vorteilhaft ist die Verknüpfung zwischen guter Dauerschwingfestigkeit und hoher Korrosionsbeständigkeit. CuSn8P besitzt ausgezeichnete Gleiteigenschaften, ist verschleißfest und mechanisch hoch beanspruchbar [12].

Kupfer-Zinn-Legierungen werden im Bereich der Bänder zunehmend eingesetzt, da sie gute bis sehr gute Federeigenschaften, gute elektrische und thermische Belastbarkeit, geringe Spannungsrelaxation, eine gute Biegebarkeit und sehr gute Lötbarkeit aufweisen. Sie werden für hochwertige Federbänder und für Schneid-Klemm-Verbindungen eingesetzt. Stanzteile aus Kupfer-Zinn-Knetlegierungen werden in sehr großen Stückzahlen in hochwertigen Steckverbindern, Reihen-klemmen, Stecksockeln für Elektronikbaugruppen und Drucktastenschaltfeldern in nahezu allen Anwendungsgebieten der Elektronik (Relais- und Steckertechnik) sowie des Maschinen- bzw. Uhrenbaus verwendet. Hauptanwendungsgebiete von Bändern für Systemträger sind hauptsächlich Datentechnik, Nach-

richtentechnik, Meß-, Steuer- und Regeltechnik, Unterhaltungselektronik, Haushalt- und Freizeitelektronik sowie Kfz-Elektronik. Drähte aus diesen Legierungen werden meist in der „Wire-Wrap-Technik“ eingesetzt.

CuSn8P findet Anwendung für Lager aller Art bis zu Höchstbelastungen und Drehzahlen im Motoren- und Fahrzeugbau sowie Maschinenbau. Meerwasserbeanspruchte Teile (Bolzen, Schrauben, Rohre, Armaturen usw.) im Schiffbau werden aus Kupfer-Zinn-Legierungen gefertigt. Weitere Anwendungsbereiche sind chemische Industrie und Nahrungsmittelindustrie (Destillationsapparate, Autoklaven, Rührer u.a.). In der Papierproduktion, im Druckereiwesen und in der Textilindustrie bestehen viele Drahtgewebe (Abb. 10) für Siebe und Metalltücher aus Kupfer-Zinn-Legierungen.

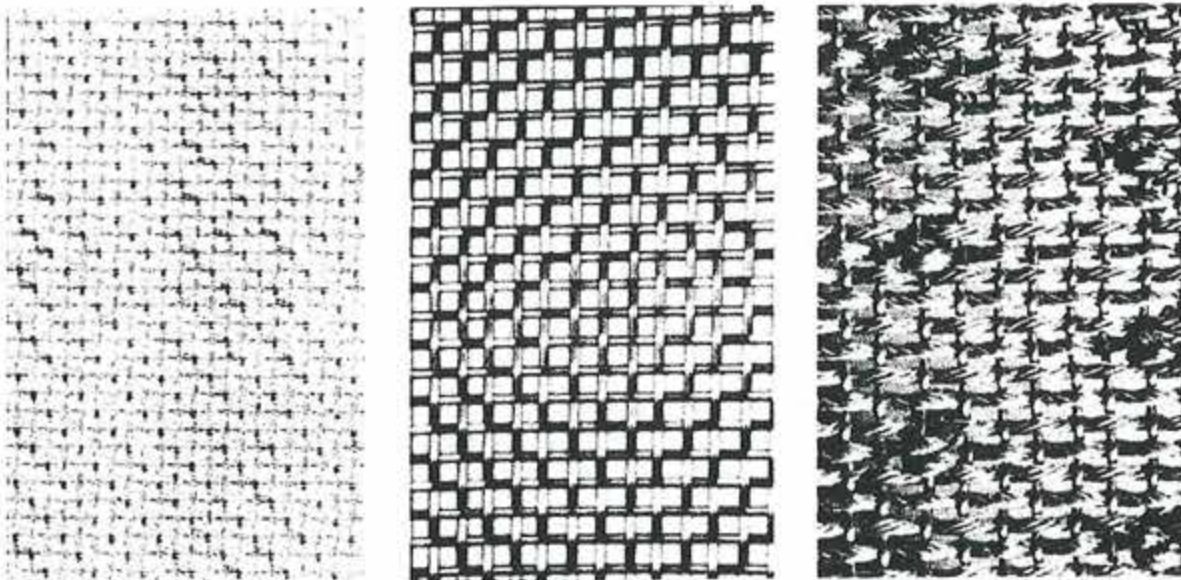


Abb. 10: Drahtgewebe für die Zellulose-, Karton- und Papierindustrie (DKI)

2.2.4 Kupfer-Aluminium-Legierungen

Kupfer-Aluminium-Legierungen sind gute Konstruktionswerkstoffe, die sehr gute Korrosionsbeständigkeit und Kavitationsfestigkeit besitzen. Unterschieden wird zwischen Zweistoff- und Mehrstofflegierungen. Die homogenen Zweistofflegierungen enthalten bis etwa 9 % Al. Die heterogenen Mehrstofflegierungen mit etwa 8 bis 14 % Al enthalten, zur Verbesserung bestimmter Eigenschaften, weitere Zusatzelemente, wie z.B. Eisen, Nickel und Mangan.

Gußstücke aus diesen Legierungen mit etwa 8 bis 11 % Al enthalten ebenso weitere Zusatzelemente (Fe, Ni oder Mn) und werden nicht knetend, sondern ausschließlich spanabhebend bearbeitet.

Maßgeblich für Anwendungen der Kupfer-Aluminium-Legierungen sind neben den oben genannten Eigenschaften geringe Dichte, geringe magnetische Kennwerte, gute Dauerschwing- und Zeitstandfestigkeit sowie Zunderbeständigkeit [13].

Der Werkzeug- und Maschinenbau verwendet Kupfer-Aluminium-Legierungen für hochbelastete Teile, vor allem bei hohen Flächenpressungen und niedrigen Gleitgeschwindigkeiten, Formen zur Glasherstellung, Pumpen- und Turbinenteile, Saugwalzen und Heißdampfarmaturen. Auch Gleitschuhe, Verschleißplatten und stoßbeanspruchte Gleitlager bestehen aus diesen Legierungen. Im Apparatebau werden sie für Rohre, Endplatten und Wärmeaustauscherteile verwendet. Die chemische Industrie setzt sie für Elemente der Beizanlagen (Pumpen, Zentrifugen und Rohre) ein. Sie finden ebenfalls Anwendung in der Petro- und Kalichemie, Erdgas- und Nahrungsmittelindustrie.

Im Schiffbau werden Kupfer-Aluminium-Legierungen für Maschinenarmaturen, Öl-, Wasser- sowie Meerwasserleitungen, Pumpen und insbesondere für Propellerteile verwendet. Schiffspropeller, wie in **Abb. 11** gezeigt wird, werden fast ausschließlich aus diesen Legierungen hergestellt.



Abb. 11: Schiffspropeller aus einer Cu-Al-Ni-Legierung, (DKI)

In den Entsalzungsanlagen und der Off-Shore-Technik werden sie für Verdampfungsanlagen und Meerwasserpumpen verwendet. Wegen Oxidationsbeständigkeit werden gegossene Teile für Kfz-Motoren aus Kupfer-Aluminium-Legierungen vorgezogen. Funkensichere Werkzeuge und Teile bestehen gleichfalls aus diesen Legierungen.

2.2.5 Kupfer-Nickel-Legierungen

Kupfer-Nickel-Legierungen enthalten als Hauptlegierungszusatz bis zu 45 % Ni. Die gebräuchlichen Legierungen enthalten außer Nickel, meist noch Mangan und Eisen, die Gußlegierungen zudem noch Zusätze von Silizium und Niob. Ab etwa 15 % Ni sind die Legierungen fast silberweiß, etwa ab 40 % Ni ist die polierte Oberfläche kaum noch von der des Silbers zu unterscheiden.

Bestimmend für Ihren Einsatz sind gute Verarbeitbarkeit, gute Korrosionsbeständigkeit und Verschleißfestigkeit, ausgezeichnete Festigkeitseigenschaften bei tiefen Temperaturen, gesteigerte Warmfestigkeit, hohe Entfestigungstemperaturen sowie hohe Sicherheit gegen Spannungsrißkorrosion und Ermüdung [14].

Ein besonderes Anwendungsgebiet für die binären Kupfer-Nickel-Legierungen sind wegen ihrer Anlaufbeständigkeit, ihrer Farbe und ihres Glanzes die Münzwerkstoffe. Ein weiteres Anwendungsgebiet der binären Legierungen ist die Elektrotechnik, in der z.B. Werkstoffe mit 2 bis 10 % Ni zur Herstellung von Heizkabeln mit niedriger Heizleitertemperatur für Dynamoschleifringe, Anoden für Fernsehröhren, niedrig-ohmige elektrische Widerstände u.a.m. verwendet werden. Die manganhaltigen Kupfer-Nickel-Legierungen werden vornehmlich als Werkstoffe für elektrische Widerstände benutzt; CuNi44 wird häufig eingesetzt, weil bei dieser Zusammensetzung der spezifische Widerstand einen Höchstwert und der zugehörige Temperaturkoeffizient einen Tiefstwert erreicht. Sie wird für Widerstände, deren Widerstandswert sich durch Temperaturschwankungen möglichst wenig ändern darf, verwendet.

CuNi9Sn2 wird für Relais, Schwachstromschalter und Steckverbinder eingesetzt. Im Schiffbau und in Hafenanlagen sind eisenhaltige Kupfer-Nickel-Legierungen die bevorzugten Rohrwerkstoffe für Meerwasser-, Brackwasser- und Deckdampfleitungen. Bleche aus CuNi10Fe1Mn bieten sich wegen ihrer bewuchsverhindernden Eigenschaften und guten Beständigkeit an der Wasser-Luft-Zone für Schiffs-Außenhautverkleidungen an.

In Meerwasserentsalzungsanlagen sind Kupfer-Nickel-Legierungen für Verdampferrohre und andere Teile sowie in Form von dünnen aufgepunkteten Blechen bei den Wasserkammern die gegebenen Werkstoffe. Rohre aus dieser Legierung werden für Automobilbremsleitungen eingesetzt. In der Off-Shore-Technik (Abb. 12), der chemischen Industrie u.a. finden sie gleichermaßen Anwendung.

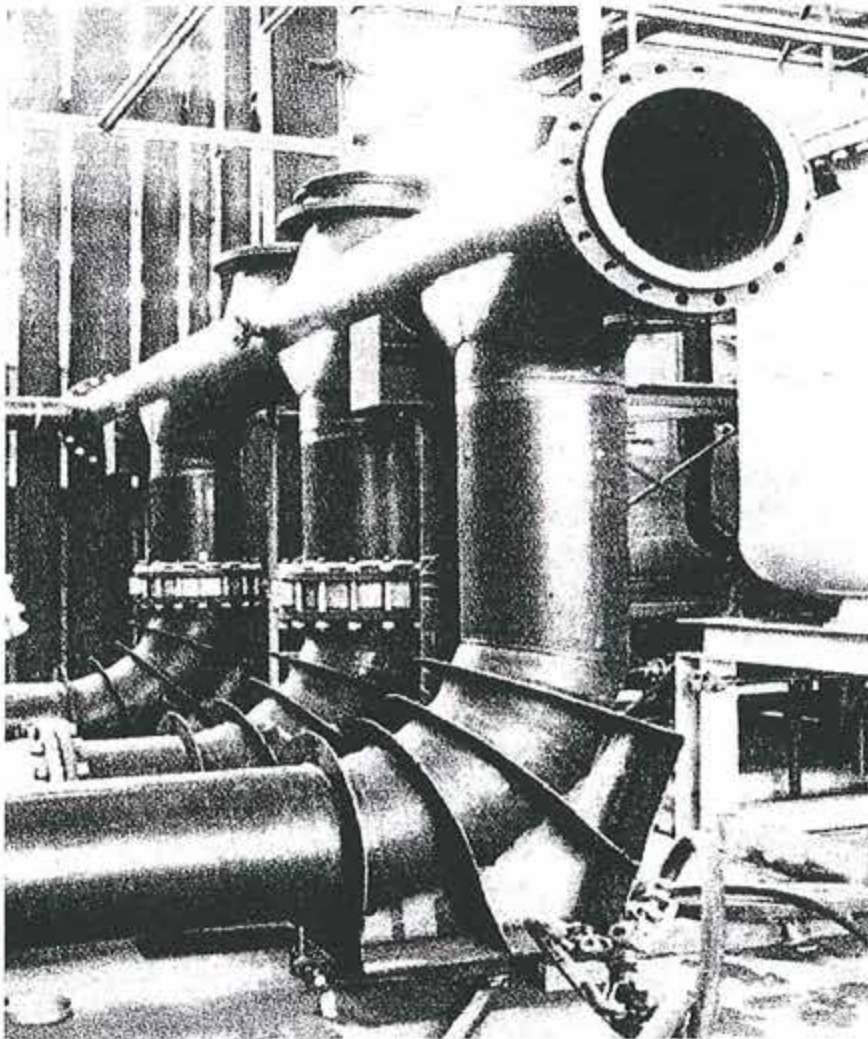


Abb. 12: Seewasser-Rohrleitungssystem aus CuNi10Fe1Mn auf der Plattform Texaco TARTAN A (DKI)

Die Kupfer-Nickel-Gußlegierungen werden wegen ihrer Beständigkeit gegenüber Meerwasser und anderen chloridhaltigen Lösungen und recht guter Schweißbarkeit für Pumpen und Ventile in Meerwasserkühlsystemen und Küstenkraftwerken sowie in der chemischen Industrie verwendet.

2.2.6 Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen

Die früher „Neusilber“ genannten Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen enthalten je nach Verwendungszweck neben Kupfer etwa 10 bis 25 % Ni und 15 bis 42 % Zn sowie ggf. weitere Zusatzelemente. Nickel verbessert die Anlaufbeständigkeit, die Korrosionsbeständigkeit und erhöht den Elastizitätsmodul. Zink trägt zur Verfestigung bei und verbessert die Warmumformbarkeit. Von Zusatzelementen macht Blei den Werkstoff spanbar, Mangan vermindert die Heißbrüchigkeit, wirkt desoxidierend und entschwefelnd. Zinn verbessert die Gießbarkeit, erhöht Festigkeit und Härte.

Diese Legierungen haben durch das Zusammenwirken von Nickel und Zink eine silberähnliche Farbe; zusätzliche dekorative Effekte lassen sich leicht durch geeignete Oberflächenbehandlungen erzielen. Aufgrund der erwähnten Eigenschaften und ihrer guten Festigkeits- und Federeigenschaften sowie der leichten Galvanisierbarkeit haben diese Legierungen viele spezifische Anwendungsgebiete gefunden [15].

In der Elektrotechnik und Elektronik werden sie für Federn, Membranen, Kontaktteile, Widerstandsdrähte und Manometerfederrohre verwendet. Zieh- und Stanzteile kommen u.a. für Lampensockel, Gehäuse und ähnliche, aus Blech oder Band herstellbare Armaturen vor.

In der Feinmechanik, im Geräte- und Instrumentenbau werden viele Kleinteile für optische Instrumente und für Meßgeräte aus Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen hergestellt. Für Brillenfassungen, die häufig mit Schweiß in Berührung kommen und daher dagegen unempfindlich sein müssen, Uhren und Teile für Zeichengeräte und Reißzeuge sind diese Werkstoffe bestens geeignet. Wegen ihrer Unempfindlichkeit gegen Handschweiß werden sie auch für Blasinstrumente (Ventile, Hebel, Klappen usw.) genutzt.

Das dekorative Aussehen der Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen wird im Bauwesen für den Innenausbau genutzt, z.B. für Wand- und Türverkleidungen, Treppengeländer, Vitrinen, Ausstattungsarmaturen für Badezimmer etc. Der Möbelbau verwendet mitunter Bleche aus Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen mit dessorierter Oberfläche als Auflage für Tische. In Restaurants werden Schanktische mit Neusilberblechen abgedeckt.

Die Metallwarenindustrie stellt Haushaltsbedarf vielfältiger Art wie z.B. Tafelgerät und Bestecke, Schalen, Vasen, Tablett aus Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen her, meist versilbert. Das hat den Vorteil, daß auch nach Abnutzung der Silberschicht das Aussehen nur unwesentlich beeinträchtigt wird, weil

das Grundmetall ebenfalls silberfarben ist. Auch in der Spielwarenindustrie (z.B. Schienen für elektrische Spielzeugeisenbahnen) werden sie eingesetzt.

2.2.7 Andere Kupferlegierungen

Nicht zuletzt seien hier Kupfer-Zinn-, Kupfer-Zinn-Zink- und Kupfer-Blei-Zinn-Gußlegierungen erwähnt.

Die gebräuchlichsten Kupfer-Zinn-Gußlegierungen enthalten etwa 9 bis 13 % Sn als Hauptlegierungselement. Sie werden auch „Guß-Zinnbronzen“ genannt; außerdem sind Legierungen mit ca. 20 % Sn als „Glockenbronzen“ bekannt. Kupfer-Zinn-Zink-Gußlegierungen enthalten etwa 1,5 bis 11 % Sn, 1 bis 9 % Zn und meist auch 2,5 bis 7 % Pb. Sie sind unter dem Namen „Rotguß“ bekannt. Kupfer-Blei-Zinn-Gußlegierungen enthalten 0,5 bis 11 % Sn und 4 bis 26 % Pb. Sie sind auch als „Guß-Zinn-Bleibronzen“ geläufig.

Diese zinnhaltigen Kupfer-Gußwerkstoffe weisen vielseitige Eigenschaften auf. Während viele korrosions- und meerwasserbeständig sind, gibt es eine ganze Reihe von Legierungen mit guten Gleit- und Notlaufeigenschaften sowie hoher Verschleißfestigkeit und Kavitationsbeständigkeit [16].

Im Maschinenbau und in der allgemeinen Technik bestehen Kälte-, Sauerstoff-, Heißdampf-, Hochdruck- und Säurearmaturen, Pumpenkörper und -ventile, Gleitlager, Kolbenstangen, Schnecken-, Schrauben- und Zahnräder vielfach aus Kupfer-Zinn-Gußlegierungen. Formteile aus Kupfer-Zinn-Zink-Gußlegierungen werden für allgemeine hydraulische Anlagen und ebenfalls für Sauerstoffarmaturen, Gleitlager sowie Zahnräder eingesetzt. Die Kupfer-Zinn-Zink-Gußlegierungen mit Bleizusatz kommen für Bohr- und Drehteile aller Art – auch zur Bearbeitung auf Automaten – in Frage.

In der chemischen Industrie und Nahrungsmittelindustrie kommen diese Legierungen für säurebeständige Ventile und Pumpenkörper zum Einsatz. In der Papierfabrikation, im Druckereiwesen und in der Textilindustrie bestehen korrosionsfeste Teile sowie Druckwalzen und -platten aus Kupfer-Zinn- und Kupfer-Zinn-Zink-Gußlegierungen. Die Kleinbauteile für die Elektronik sowie Fittings für die Rohrinstallation im Bauwesen bestehen ebenfalls aus zinnhaltigen Kupfer-Gußwerkstoffen. Auch im Kunsthandwerk finden sie für Statuen und Denkmäler Anwendung.

Schließlich sollen Kupfer-Mangan-Legierungen erwähnt werden, die eine erhöhte Rekristallisationstemperatur haben und auch bei hohen Temperaturen ge-

genüber reduzierenden Gasen beständig sind. Sie eignen sich als Werkstoffe für chemische Apparaturen, die für höhere Temperaturen und Dicken ausgelegt sind.

3. Technologie- und Markttrends

In diesem Kapitel wird kurz Bezug auf die konventionellen Verfahren oder Anwendungen genommen, um auf die Trends und an die innovativen Entwicklungen anknüpfen zu können. Es handelt sich dabei um eine individuelle Auswahl und wird daher kein Anspruch auf Vollständigkeit oder Gewichtung erhoben.

3.1 Tendenzen in der Technologie

Hier wird auf den allgemein erreichten technologischen Stand auch nur am Rande eingegangen. Hervorgehoben werden sollen neue Verfahren.

3.1.1 Neue Wege in der Herstellung

Die zur Gewinnung herangezogenen Fördererze haben geringe Kupfergehalte und enthalten meist nur ca. 0,5 bis 1 % Cu, in einigen großen Gruben sogar weit weniger. Die Rentabilitätsgrenze bzw. Abbauwürdigkeit der Erze und damit die wirtschaftlich relevanten Reserven hängen von der aktuellen Marktsituation ab.

Es gibt bekanntlich kein anderes Metall, für dessen Gewinnung so viele Verfahren erprobt bzw. vorgeschlagen wurden und heute verschiedentlich Anwendung finden wie bei Kupfer [6]. Daher sollen hier die üblichen primären Gewinnungsmethoden in einer schematischen Übersicht zusammengefaßt werden (**Abb. 13**).

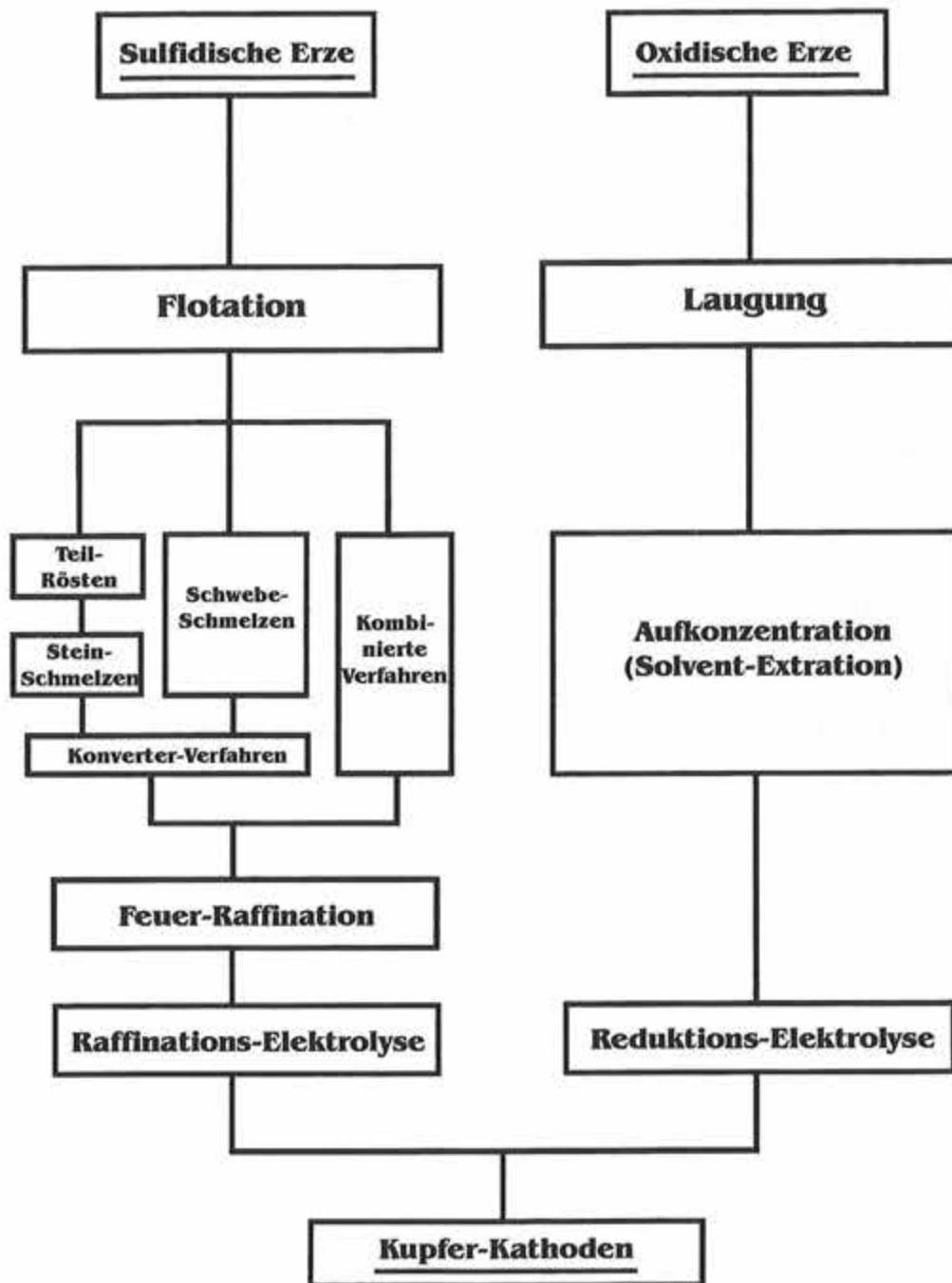


Abb. 13: Gewinnung von Kupfer aus seinen Erzen (schematische Darstellung)

So stammen heute mehr als 80 % der Weltkupferproduktion aus armen sulfidischen Erzen, während die restliche Erzeugung aus oxidischen Erzen erfolgt. Diese Verteilung gibt in etwa die Relation der Herstellungstechnologien wieder. Sulfidische Erze werden nach einer Flotation (Aufbereitung) durch pyrometallurgische (schmelzmetallurgische) Verfahren zum Rohkupfer verhüttet und mittels einer Raffination (Raffinationselektrolyse und/oder Feuerraffination) zum handelsüblichen Kupfer (vorwiegend Kupferkathoden) verarbeitet. Oxidische

Erze werden dagegen durch eine Laugung aufbereitet und mittels hydrometallurgischer (naßmetallurgischer) Verfahren, sog. Aufkonzentration, zu kupferhaltigen Lösungen angereichert, aus denen elektrolytisch (Reduktionselektrolyse) ebenfalls Kupferkathoden gewonnen werden.

Der Recyclingprozeß verläuft ähnlich wie die Gewinnung aus sulfidischen Kupfererzen, wobei die Flotation wegfällt und die Schrotte bzw. Restmaterialien direkt verhüttet werden. Die Hauptaggregate hierbei sind der Schachtofen, der Konverter und der Anodenofen.

Die Kupfergewinnung erfolgt heute teilweise auf eine sehr moderne Art und Weise. So weist ein weiterentwickelter hydrometallurgischer Prozeß, bei dem zur Aufbereitung von Kupfererzen zunächst eine Haufenlaugung, anschließend eine Extraktion mit Lösungsmitteln und als letztes eine Elektrogewinnung vorgenommen werden, technologische Verbesserungen auf. Der Vorteil des Verfahrens besteht darin, daß auch oxidische Kupfererze gelaugt werden können und die Bakterienaktivität angeregt wird, die für eine angemessene Laugung der enthaltenen Sulfide nötig ist. Auf diese Weise werden gemischte Erze mit höherem sulfidischen Anteil als früher in einem Verfahrensschritt aufbereitet [5].

Als eine der saubersten Kupferminen gilt heute Radomiro Tomic, die mitten in der chilenischen Atacamawüste in 3.000 m Höhe liegt. Dort wird mit neuester Technik Feinkupfer gewonnen. Der Erzabbau erfolgt nach einem rechnerüberwachten Förderplan, der sich nach dem Kupferanteil im Gestein richtet. Durch Abbau gleicher Konzentrationen wird eine optimale Verarbeitung gesichert, wobei die Bagger gemäß den Ergebnissen der Bodenproben dirigiert werden. Auch eine Positionierung und die Auslastung der Transporter wird automatisch vorgenommen. Das zermahlene Erz gelangt über Förderbänder zur Laugung; sowohl der Schaufelradbagger als auch die Maschine zur Erzaufschüttung werden per Satellitenortung navigiert. Das durch Auslaugung gelöste Kupfer wird über Ionenaustausch vom Gestein getrennt, alles erfolgt hier im geschlossenen Kreislauf. Schließlich gelangt der Elektrolyt in eine Elektrolysehalle, die voll computergesteuert funktioniert. Durch diese moderne Prozeßsteuerung entsteht nur eine geringe Schadstoffemission [17].

Vorrangiges Ziel der Prozeßentwicklungen sollten vor allem minimale Beeinträchtigung der Umwelt sowie sparsamer Umgang mit Ressourcen und niedriger Energieverbrauch sein. Daher werden künftig umweltschonende Verfahrenstechniken bevorzugt, die geringere Energie benötigen und gleichzeitig die Produktionsmengen erhöhen. Für Bergbau und Aufbereitung des Kupfers liegt heute der Bedarf an Primärenergie je Tonne im Konzentrat zwischen 35 und 45 GJ. Etwa ein Drittel davon entfällt auf den Bergbau, der Rest auf die Aufbereitung. Im weltweiten Durchschnitt wird der Primärenergieverbrauch zum Her-

stellen einer Tonne Kathoden aus dem Konzentrat mit etwa 23 GJ angegeben, während er in Deutschland bzw. in vergleichbaren Ländern bei 19 GJ/t liegt. Hier werden Bemühungen um Energieeinsparung, vor allem durch Prozeßentwicklungen und –optimierungen deutlich. Der Primärenergiebedarf für die Fertigung von Kathoden aus „sekundären Rohstoffen“ beträgt 18,2 GJ/t [4].

3.1.2 Trends in der Halbzeugverarbeitung

Für die Verarbeitung muß das Kupfer in jedem Fall geschmolzen und vergossen werden. Zur Herstellung von Gußformaten für die Weiterverarbeitung zu Halbzeug werden heute halbkontinuierliche und kontinuierliche Verfahren eingesetzt, wobei sich die letzteren in bestimmten Fällen energetisch günstiger erweisen und favorisiert werden. Liegt z.B. der mittlere Primärenergiebedarf für die Weiterverarbeitung zum Halbzeug etwa bei 15 bis 20 GJ, kann man heute den „Gießwalzdraht“ durch direkte Warmumformung mit einem Bedarf von 3,2 GJ/t aus Kathoden herstellen (gasbeheizte Schachtofen). Hier hat es die große Menge – Draht stellt etwa 50 % des Weltkupferbedarfs dar – erlaubt, ein Verfahren mit extrem niedrigem Energieverbrauch zu entwickeln [4].

Bei den schwerverformbaren Kupferlegierungen wie Bronze und bleihaltiges Neusilber gehört der horizontale Bandguß zu den Standardmethoden. Auf dem Gebiet der Walztechnik gehen Walzbreiten bei Kupferband heute bis auf ca. 1.250 mm. Das kontinuierliche Glühen und Beizen haben durch Modellierung, Einführung von Schutzgas- und Schwebebandglühöfen zur wirtschaftlichen und umweltschonenden Herstellung qualitativer Produkte beigetragen [18].

Zur Rohrherstellung wurde ein spezielles Gießwalzverfahren entwickelt (1987 von Outokumpu unter dem Namen „Cast and Roll“ eingeführt). Dieses kombiniert das kontinuierliche Gießen von Kupferrohren mit dem Verfahren des Schrägwalzens in einer Hitze. Die Umformung geschieht dabei unter Schutzgas [18].

Ein globales Anliegen der jetzigen und künftigen Entwicklung wird eine Halbzeugfertigung sein, die möglichst endabmessungsnahe Formate produziert und gleichzeitig sinnvolle Steigerung von Produktionsmengen ermöglicht. Die zur Zeit betriebenen halbkontinuierlichen und kontinuierlichen Gießanlagen für Bolzen und Platten für die üblichen Kupferlegierungen weisen bemerkenswerte Leistungen auf, sie liegen für Bolzen bei etwa 100 t Ausbringung pro Arbeitstag und Strang [18]. Der auch weltweit führende deutsche Kupferhersteller verfügt beispielsweise über eine Stranggußproduktion von mehr als 150.000 t und hat am europäischen Markt einen Anteil von ca. 35 %. Die Schmelzleistung der

Anlage beträgt bis zu 35 t/h und je Ofen. Das besondere ist die dort betriebene automatische Gießspiegelregelung „Variocast“. Hergestellt werden in 44 Kupferformaten insgesamt 34 Kupferwerkstoffe in 5 Werkstoffgruppen [19].

In diesem Zusammenhang verdient die **MKM GmbH** besondere Anerkennung, bei deren Modernisierung eine ganze Reihe von richtungsweisenden Maßnahmen umgesetzt bzw. weiterentwickelt wurden. Zur Zeit produziert MKM mit 1.100 Beschäftigten ca. 190.000 t Kupfer und Kupferlegierungen in Form von Drähten, Seilen, Rohren, Stangen, Blechen und Bändern. Der neue Eigentümer, die belgische Lamitreffgruppe, hat bis heute am Standort Hettstedt bereits 500 Mio. DM investiert. Mit der früher modernisierten Rohrfertigung und den jetzt getätigten Investitionen entstand eines der innovativsten Halbzeugwerke Europas. MKM verfügt heute über eine kontinuierliche Anodenfertigung (Contilanod) und eine moderne Draht-Gieß-Walzanlage (Contirod). Investiert wurde auch in Infrastruktur und Umwelt.

Der Löwenanteil der Investitionssumme wurde dabei für den Bereich Bleche und Bänder verwendet, der hier besonders hervorzuheben ist. Denn mit Conti M (Continuous Mansfeld) und den Nachfolgeeinrichtungen wurde erstmalig in der Welt eine **kontinuierliche Gießlinie** zur Erzeugung von **Kupferband** installiert, die das klassische Warmwalzen überspringt.

Eine schematische Darstellung zeigt **Abb. 14**. Hierbei werden die auf dem Lagerplatz bereitgestellten Rohstoffe (Kathoden, Schrotte) über einen Skip in den Schachtschmelzofen befördert. Das gewonnene flüssige Kupfer gelangt über einen Abschlackofen in den Trommelofen. Außerdem kann das Rücklaufmaterial (Späne aus dem Fräsprozeß) separat erschmolzen und über den Abschlackofen dem Trommelofen zugeführt werden. Mittels Gießofen wird über die Hazelttgießmaschine das Kupferband (32 bis 35 mm dick) gegossen. Das Band durchläuft dann einen Anwärmofofen, in dem es in einer reduzierenden Atmosphäre (zur Vermeidung von Verzunderungen) auf gleichmäßiger Temperatur gehalten wird. Nach Einstellung der Warmwalztemperatur kann das Gießband mit dem Walzwerk auf die erforderliche Dicke gebracht werden. Anschließend wird das gewalzte Band abgekühlt, gefräst, aufgewickelt und gelagert. Danach kommen die Coil's in ein Tandemkaltwalzwerk, wo die Dicke mindestens bis auf 0,5 mm herabgesetzt wird. Letztlich werden die Bänder zwischengelagert bzw. den Kundenspezifikationen entsprechend weiterverarbeitet. Weitere Kernstücke der neuen Linie sind vertikaler Durchlaufofen und kombinierte Längs- und Querteilanlage.

Die Anlagen sind so ausgelegt, daß Breiten von 600 bis 1.250 mm und Mindestdicken von 0,05 mm (bis 840 mm Breite) bzw. 0,3 mm (bis 1.250 mm Breite) erreicht werden.

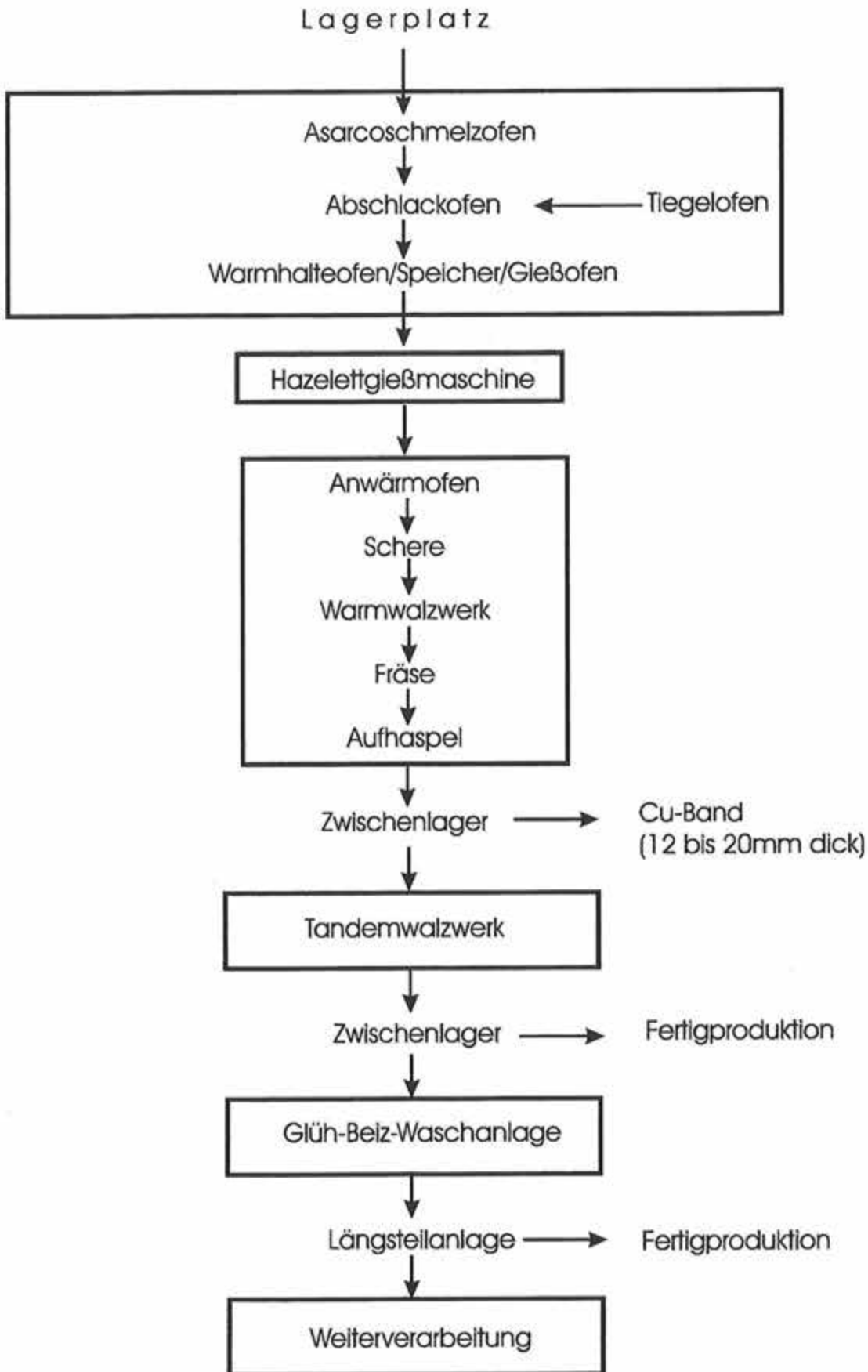


Abb. 14: Schematische Darstellung des neuen MKM-Bandwalzwerkes

Die bei den genannten Bandbreiten erreichten geringen Dicken sind beachtlich und für den Absatz von entscheidender Bedeutung, da neuerdings dünne Abmessungen insbesondere im Bereich der Elektro- und Automobilindustrie gefordert werden. Bei der Herstellung von Bändern aus Kupferwerkstoffen, welche kleinere Bandbreiten aufweisen, können heute auch dünnere Dicken produziert werden. Kürzlich wurde über die Inbetriebnahme eines Kaltwalzwerkes bei einem Halbzeugwerk berichtet, wo mit dem 12-Rollengerüst Banddicken von 0,02 mm bei Breiten bis 600 mm erreicht werden. Die mit hoher Geschwindigkeit (bis zu 1.000 m/min) arbeitende Anlage garantiert eine sichere Einhaltung von engsten Dickentoleranzen über die ganze Abmessung [20].

In einem anderen Halbzeugwerk wurde eine revolutionäre Walzwerkautomatisierung eingeführt, die bei Bewährung sicherlich in viele Herstellungsbereiche Einzug halten wird. Gemeint sind die sog. „**neuronalen Netze**“. Bekanntlich ist ein neuronales Netz ein mathematisches Gebilde, bestehend aus einer Vielzahl von gleichartigen Verarbeitungseinheiten, also den Neuronen, und ihren Verbindungen. Die Informationen aus der Umwelt werden von diesen verarbeitet, bis eine Antwort an die Umgebung zurückgegeben wird. Obgleich die Natur als Vorbild diente, liegen die hier angesprochenen künstlichen Netze derzeit in ihrer Komplexität noch um Größenordnungen hinter den biologischen [21]. Im Gegensatz zu herkömmlichen Systemen mit festen Funktionsprogrammen ist die neue Technologie in der Lage, ihr Verhalten selbständig zu erkennen und zu korrigieren. Beim Walzen sorgt sie zu Beginn für das Erhalten der vorgegebenen Zielwerte wie Banddicke und –temperatur sowie die Walzkraft. Die Prozeßautomatisierung erhält von der Basisautomatisierung Meßwerte, auf deren Grundlage sie Modelle und Koeffizienten adaptiert, um das nächste Band oder den nächsten Stich genauer berechnen zu können. Die Aufgabe wird mit Hilfe von Parallelrechnern bewältigt. Nachteilig ist, daß hier spezielle Software erforderlich ist [21].

Waren bisher der Gegenstand der Erläuterungen die gängigen Kupferwerkstoffe, so soll hier noch auf ein neues besonderes Umformverfahren eingegangen werden. Das sog. „**Sprühkompaktieren**“ erlaubt Kupferwerkstoffe mit schlechter Umformbarkeit herzustellen und eröffnet damit ganz neue Perspektiven bei der Entwicklung verschiedener Einsatzbereiche. Wenngleich damit hauptsächlich Bolzen produziert werden, sind auch Flachprodukte und Rohre herstellbar [22]. **Abb. 15 a** zeigt vereinfacht die Anlage.

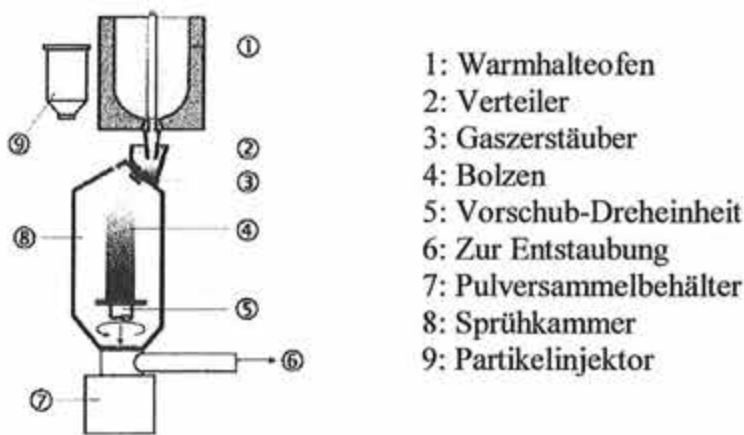


Abb. 15 a: Sprühkompaktieranlage (Wieland)

Im Unterschied zu klassischen Gießverfahren wird dabei durch Verdüsen eines inertem Gases in einen Tropfennebel zerstäubt. Vor der vollständigen Erstarrung trifft dieser auf ein Substrat und kompaktiert dort zu einem dichten Metallkörper. Der Substratteller wird in geeigneter Weise abgesenkt. Wegen hoher Abkühlungsgeschwindigkeit im Sprühstrahl bleiben die Entmischungsvorgänge nahezu aus. Das Material erstarrt homogen und feinkörnig und besitzt gute Umformeigenschaften. Durch Einblasen von Feststoffpartikeln (z.B. Graphit oder Al_2O_3) besteht die Möglichkeit, Werkstoffe mit besonderen Eigenschaften (z.B. Gleiteigenschaften, Zerspanbarkeit, Verschleißfestigkeit) herzustellen, die bisher nur pulvermetallurgisch herstellbar waren. Die dazugehörige und sehr günstige Temperaturverteilung zeigt **Abb. 15 b**; sie kann durch Variierung des Metallstromdurchsatzes oder des Schmelzeanteils der kompaktierenden Tropfen zusätzlich beeinflusst werden [22].

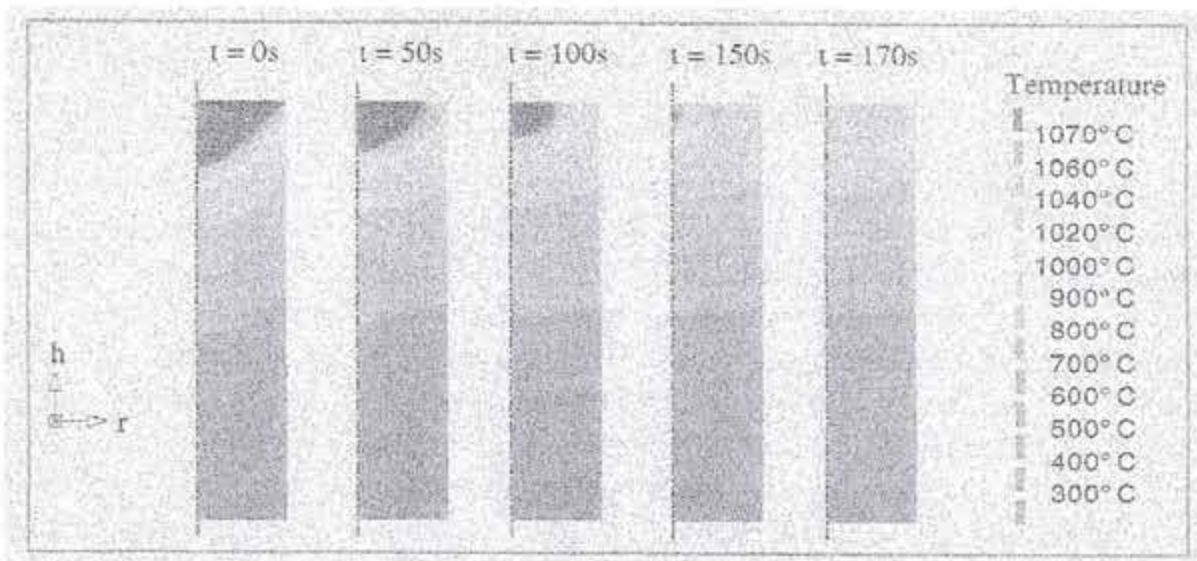


Abb. 15 b: Temperaturverteilung nach Beendigung des Sprühprozesses (Wieland)

Mit diesem Verfahren können zur Zeit Bolzen mit max. Längen von 2.200 mm und Durchmessern von 160 bis 500 mm hergestellt werden.

Von den innovativen Verfahren zur Bearbeitung von Kupferwerkstoffen soll nur ein im Labormaßstab erfolgreich erprobtes Verfahren erwähnt werden. Es handelt sich um Hochgeschwindigkeitsfräsen bzw. –spanen. Dieses Verfahren dürfte sich insbesondere bei der Bearbeitung von nicht bleihaltigem Messing als sehr günstig erweisen, fand bisher aber noch keine großtechnische Anwendung.

3.2 Trends in der Anwendung und im Markt

Die sich rasch ändernden Einsatzprofile und Entwicklungen, die gestiegenen Anforderungen an Abmessungen und Qualität sowie nicht zuletzt das verstärkte Umweltbewußtsein haben dazu geführt, daß in den letzten Jahren der Markt und der Produktwechsel schneller geworden sind. Aktuelle Bemühungen haben zur Verbesserung bestehender bzw. Entwicklung neuer Produkte geführt. Nachstehend sollen einige Beispiele aus dem Bereich Kupferwerkstoffe zusammengefaßt werden.

3.2.1 Substitution von und durch Kupfer

Beispielsweise wurden die früheren Kupfer/Messing-Kühler für PKW und Nutzfahrzeuge allein aufgrund der Investitionsentscheidungen zum größten Teil durch Aluminium abgelöst. Man ist aber heute wieder dabei eine neue Generation von Kupfer/Messing-Kühlern einzuführen, die mit ihrem Pendant Aluminium voll und ganz konkurrenzfähig ist.

Die neuen hartgelöteten **Cuprobrazee-Kühler** sind 35 bis 40 % leichter als die herkömmlichen nicht optimierten Kupfer/Messing-Kühler, daher liegen die Materialkosten niedriger. Prototypen der neuen Generation weisen eine enorme Lebensdauer auf, die einer Laufleistung von mehr als 800.000 Kilometern entspricht. Die neuen Kühler kosten etwa 10 % weniger als vergleichbare Aluminiumkühler. Wegen der geringeren Materialstärke können sie kleiner und leichter als die gegenwärtig im Markt befindlichen Aluminiumkühler produziert werden, was für den Fahrzeugbereich Platz- und Gewichtseinsparungen bedeutet. Gegenüber Aluminium-Kühlern haben sie außerdem einen um mind. 30 % geringeren luftseitigen Druckabfall, da ihre aus Kupfer und Messing bestehenden Komponenten viel dünner sind. Der Cuprobrazee-Prozeß arbeitet ohne Flußmittel (was

bei Aluminiumkühler nicht möglich ist) und soll die doppelte stündliche Durchsatzrate des Aluminiumprozesses (Nocolok-Verfahren) ermöglichen. Außerdem läßt das Cuprobrazo-Verfahren auch größere Toleranzen zu, weil die Hartlötung ca. 300°C unterhalb der Schmelztemperatur von Messing erfolgt, während die Differenz zwischen der Schmelz- und Löttemperatur von Aluminium bei nur 40°C liegt. Sie sind darüber hinaus in bereits vorhandenen Aluminium-Hartlötöfen herstellbar, d.h. die Hersteller müssen keine größeren Summen in neue Anlagen investieren. Solche Kühler würden also eine echte Alternative darstellen, da sie technisch und wirtschaftlich voll konkurrenzfähig sind und beim Recyceln entscheidende Vorzüge im Gegensatz zu ihren Aluminium-Gegenständen aufweisen. Außerdem lassen sich die Kupfer/Messing-Kühler so herstellen, daß sie die unterschiedlichsten Kühlanforderungen der Automobilhersteller in aller Welt erfüllen [23].

Zur Zeit werden die Ergebnisse durch ICA weltweit den Automobil- und Kühlerherstellern zur Verfügung gestellt, um eine Markteinführung zu erreichen und das verlorene Terrain zurückzuerobern.

Ein aktuelles Beispiel kommt aus der **Computerbranche**, wo die **Kupfertechologie** bereits ein Jahr nach ihrer Ankündigung in die Fertigung von High-End-Prozessoren Einzug gehalten hat. Mit dem Athlon von AMD kamen erste Chips aus Dresden auf mehr als ein GHz Taktfrequenz. INTEL reagierte ebenfalls auf diese Herausforderung mit der Errichtung einer neuen Halbleiterfabrik.

Der Hintergrund war, daß schon lange nach Möglichkeiten gesucht wurde, Aluminium zu ersetzen, das seit über 30 Jahren für die Verdrahtung von Halbleiterbauelementen verwendet wurde aber für die neuen Generationen von Hochleistungsprozessoren nicht mehr geeignet war. Denn bei kleinen Strukturen der Mikrochips wird aufgrund des spezifischen Widerstandes von Aluminium über die Hälfte der aufgenommenen Leistung in den Leitungen verheizt. Mit der Verkleinerung der Strukturen erhöht sich der Widerstand der Leitungen, die Signale laufen langsamer und die Verzögerungen auf der Leitung übersteigen die Schaltzeiten der Transistoren. Kupfer reduziert die Signalzeiten um den Faktor 6. Daher mußte Kupfer schon seit Jahren Aluminium beigemischt werden. Bei Strukturen kleiner als 0,25 µm ist jedoch die Grenze erreicht und Aluminium wird nun durch reines Kupfer ersetzt [24].

Bei Kupfer steht mehr Energie zur Verfügung, daher kann der Querschnitt der Leitungen dünner gestaltet werden. Das ist eine große Designfreiheit bei der Chipfertigung, wo Leitungen mit Verdrahtungslängen von mehreren Kilometern auf engstem Raum untergebracht sind. **Abb. 16** zeigt einen Ausschnitt eines in Kupfertechnologie gefertigten Prozessors. Deutlich zu sehen sind sowohl die dicken Leitungen für die Spannungsversorgung des Chips als auch die dünnen

Leitungen der logischen Signale; 200 Leitungen nebeneinander entsprechen gerade einmal der Dicke eines Haares [24].

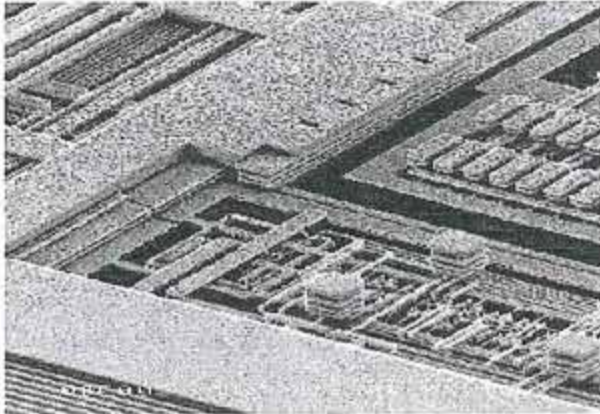


Abb. 16: Power PC-Prozessor in Kupfertechnologie [24]

Fast alle Hersteller von High-End-Produkten sind heute dabei, auf diese Technologie umzusteigen. Damit wird Kupfer die Halbleiterproduktion revolutionieren. Die eigentliche Herstellung der Verbindungen und Durchkontaktierungen ist preiswerter als bisher. Wer jedoch eine Preissenkung erwartet wird enttäuscht sein. Zunächst müssen die neuen Verfahren und Anlagen finanziert werden. Vor allem müssen die Fertigungsabläufe so ausgelagert werden, daß sie eine Verunreinigung der Siliziumscheiben sicherstellen, da ein jeglicher Kontakt des Kupfers mit diesem Halbleitermaterial seine elektrischen Eigenschaften gänzlich zerstören würde. Deshalb trennen neue Verfahren das Kupfer mit einer Isolationschicht vom Halbleitermaterial [24].

Es gibt jedoch auch Anwendungsbereiche, wo rückläufige Entwicklungen zu verzeichnen sind. So dürften vermutlich die konventionellen Kupferkabel keine guten Aussichten haben. Zwar wird der Kabelbaum nicht gefällt, aber zumindest stark gelichtet. Die technischen Entwicklungen können und sollten nicht aufgehalten werden. Zur Zeit lockt in diesem Bereich die Datenübertragung per Lichtwellenleiter mit hohen Transferraten. Hinzu kommt die Unempfindlichkeit gegen elektromagnetische Störungen. Auch beim elektrischen Leistungstransport können einzeln verlegte Kupferkabel teilweise durch andere Technologien ersetzt werden. So können bei der Technik der FPC (Flexible Printed Circuits) die Leiterbahnen auf Folien gebracht werden, wo Leitungen verknüpft und mit Bauelementen bestückt werden können. Das bedeutet Einsparungen von 40 % beim Gewicht sowie 70 % beim Platzbedarf. Durch die Technologie MID (Moulded Interconnected Devices) ist sogar beabsichtigt, die Leiterbahnen und elektronischen Bauelemente direkt auf Bauteile der Autos aufzubringen. So würden dann die elektrischen Verbindungen stehen, wenn die Fahrzeugteile am Fließband zusammengesetzt werden [25]. Tröstlich ist für den Kupferverbrauch

aber, daß die Autos immer mehr automatisiert werden. Elektrisch betätigte Scheiben oder Spiegeleinstellungen gehören schon zum Standard, das bedeutet Motoren und damit wieder Kupfer. Daher dürfte sich der reduzierte Verbrauch am Kabelbaum aufgrund des gestiegenen Kupfereinsatzes in anderen Anwendungen wieder gut kompensieren. Die neuen Entwicklungen folgen einer eigenen Dynamik.

Glaubte man noch vor kurzem, daß nur Glasfasern eine den Anforderungen der innovativen Telekommunikation genügende Bandbreite liefern könnten, so sieht es jetzt wieder anders aus. Die Bandbreite der Kupferkabel konnte soweit erweitert werden, daß keine elektromagnetischen Interferenzen entstehen und Stimmen, Daten und Bilder über das bestehende Telefonnetz übertragbar sind. Damit ist das Kupfer voll im Trend der Zeit.

3.2.2 Neue Produkte in bewährten Anwendungen

Zur Zeit konzentrieren sich aktuelle Bemühungen zur Verbesserung neuer Produkte vor allem auf Rohre für Sanitär- und Klimatechnik sowie auf Produkte für die Elektronik und Elektrotechnik. Erwähnt werden hier einige Beispiele.

Bei den **Rohren** im Bereich **Kälte- und Klimatechnik** werden immer kompliziertere Strukturen der Oberflächen durch Walz- und Ziehvorgänge erzeugt, um die Übertragungsleistungen zu steigern. Zur Verflüssigung oder Verdampfung werden unterschiedliche Varianten entwickelt. Die Leistungen der Produkte unterliegen ständigen Optimierungen, da der thermische Wirkungsgrad gesteigert, die Größe der Wärmetauscher verringert, das Kältemittelvolumen reduziert und die Gesamtkosten gesenkt werden sollen. **Abb. 17** zeigt die Innenoberflächen-Ansicht eines Rohres für die Klima- und Kältetechnik. Der entscheidende Schritt hierbei ist die Einführung einer besonderen Rillung der Innenoberfläche, um die wirksame Oberfläche deutlich zu vergrößern. Diese in enger Kooperation mit Anwendern entwickelten innen gerillten Rohre sind als optimierte High-Tech-Produkte anzusehen [26].

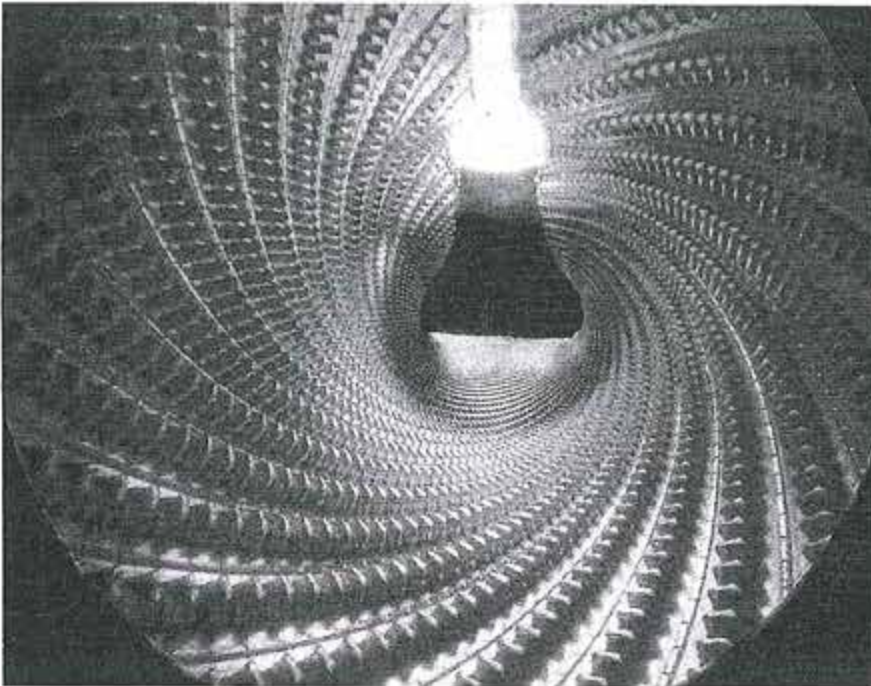


Abb. 17: Innenoberflächen-Ansicht eines Rohres für die Kälte- und Klimatechnik (KME)

Traditionell kannte man in Deutschland zwei Festigkeitszustände für Kupfer in der Rohrinstallation: weiches Rohr in Ringen (F22) bis zur Abmessung 22 mm und hartes Rohr in Stangen in allen Abmessungen. Bei der Harmonisierung der neuen europäischen Norm (DIN EN 1057) wurden auch **halbharte Rohre** aufgenommen, die in einigen europäischen Ländern bereits seit Jahren anstelle von harten Rohren erfolgreich eingesetzt werden. Inzwischen wurden diese bei der Angleichung deutscher Regelwerke auch hierzulande aufgenommen. Das neue Produkt weist grundsätzlich eine bessere Kaltbiegbarkeit auf – auch für einen erweiterten Abmessungsbereich gegenüber harten Rohren – und wird nunmehr von allen namhaften Rohrherstellern angeboten. Dadurch haben auch die deutschen Installateure die Chance, künftig halbharte Kupferrohre einsetzen zu können [27].

Erwähnt werden sollte noch die relativ neue **Verbindungstechnik** der Kupferrohre, gemeint ist das **Verpressen**. Die heute in verschiedenen Versionen angebotenen Preßverbinder aus Rotguß oder Kupfer haben durch ihre Vorteile breiten Absatz gefunden. Das Verpressen ist eine „kalte Verbindung“, bei der die Herstellung der Verbindung durch Verpressen der Fittings mit Werkzeugen erfolgt. Die Werkzeuge sind elektrisch gesteuert, so daß die Preßkraft gleichmäßig und allseitig aufgebracht wird. **Abb. 18 a und 18 b** zeigen zwei Ausführungsbeispiele.

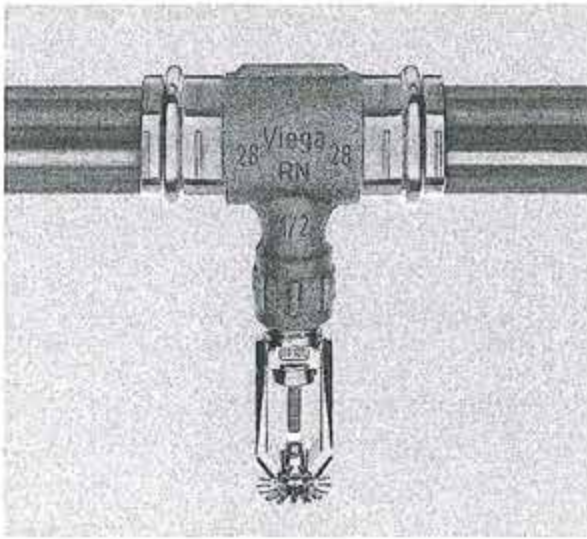


Abb. 18 a: Sprenkleranlage (Viega)

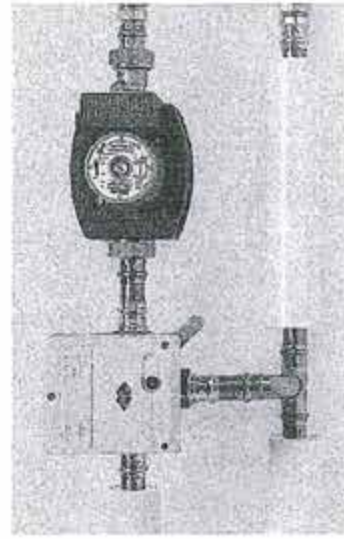


Abb. 18 b: Heizungsinstallation (Viega)

Der entscheidende Vorteil dieses Verfahrens ist, daß an der Baustelle nicht mehr mit offener Flamme gearbeitet wird. Der Verzicht auf Löten stellt außerdem einen maßgeblichen Beitrag zur Korrosionssicherheit, da die wärmebeeinflussten Zonen wegfallen.

Aus dem Bereich Elektrotechnik und Elektronik soll hier über die neuerliche Verbesserung im Bereich der **Supraleiter** berichtet werden. Durch die Entdeckung einer kupferhaltigen Oxid-Keramik ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$) mit einer Sprungtemperatur (T_c) von ca. 93 K war der Einsatz des Stickstoffs möglich. Es fehlten jedoch Theorien und Modelle, die den Transportmechanismus der Elektrizität erklärten und die Entwicklung stagnierte. Es mußten geeignete Fertigungsprozesse erarbeitet und Materialien entwickelt werden. Vor kurzem wurde hier der Durchbruch erreicht. Bei den komplexen Problemen der Darstellung von Drähten und Bändern scheint eine neue kupferhaltige Keramik ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$) in Sicht zu sein. Die neue Keramik, ummantelt mit Ag-Band und mit Hilfe der OPIT-Technik (Oxid Powder In Tube) hergestellt, dürfte ein passendes Basismaterial sein. Das könnte sicher in diesem Jahrhundert vielen neuen Anwendungen die Tür öffnen [28].

3.2.3 Innovative Einsatzbereiche

Hier sollen einige Beispiele aufgeführt werden, die zukunftsorientierte Entwicklungspotentiale erwarten lassen.

Im Bereich der Elektrotechnik und Elektronik können neben den bereits besprochenen Entwicklungen neue Produkte zum **Anstieg der Kupfernachfrage** führen. Das wären beispielsweise:

- werkmontierte Module für Stromerzeugung mit hohem thermischen Wirkungsgrad und geringen Emissionen,
- Kupfergitter in feststehenden Großbatterien, mit deren Hilfe in Windturbinengeneratoren gewonnene Energie gespeichert wird und die auch in herkömmlichen Versorgungsnetzen sowie zur Notstromspeicherung einsetzbar sind,
- neue Materialien (Verbundfolien) für Schaltkreise mit guten thermischen Eigenschaften, hoher Festigkeit und nichtmagnetischem Verhalten,
- Raumabschirmungen gegen elektromagnetische Felder [29].

Außerdem können mit **erhöhtem Kupfereinsatz in Transformatoren**, Motoren sowie Generatoren Energie und damit Kosten gespart werden. Die Untersuchungen haben am Beispiel des Einsatzes von Transformatoren gezeigt, daß enorme Kosteneinsparungen möglich sind, wenn nicht allein die Anschaffungskosten, sondern die gesamten Betriebskosten berücksichtigt werden. Beim Vergleich zweier äquivalenter Transformatoren wurde ermittelt, daß hinsichtlich der Betriebskosten der optimierte Transformator mit der längeren Lebensdauer der nach reinen Herstellungskosten ausgelegten Variante ökonomisch überlegen ist. Die Maßnahmen zum Einsatz von mehr Kupfer bringen Amortisierungsraten unter einem Jahr [30].

In der **Solarenergie** dürfte Kupfer verstärkter als bisher zum Einsatz kommen. Es wird geschätzt, daß jährliche Wachstumsraten von 30 % nicht unrealistisch sind. Im Nachbarland Österreich hat sich das Marktvolumen in einzelnen Jahren sogar verdoppelt. Hinsichtlich der installierten Kollektorfläche pro Einwohner ist auch die Schweiz bereits weiter als Deutschland. Die erforderliche Basistechnologie ist inzwischen ausgereift [30], die Sonnenkollektoren werden immer leistungsfähiger. Die Kupferindustrie bietet alle für die Installation von Solaranlagen notwendigen Leitungen und Kabel in einem Rohrbündel. Hier dürfte sich das Kupfer zunehmender Beliebtheit erfreuen.

Auch im Bereich der Architektur und im Innenausbau erleben Kupferwerkstoffe – vor allem Messing – eine Wiederentdeckung. Die warmen natürlichen Farbtöne des Kupfers sind erneut gefragt. Auch aufgrund der bakteriziden Eigenschaften dieser Werkstoffe dürften die bekannten Anwendungen ausgedehnt bzw. erweitert werden.

Es blieb bisher relativ unbekannt, daß im Bereich der **Verbundwerkstoffe mit Kupfermatrix** eine Reihe von Produkten und Entwicklungen existieren. Gleichwohl haben sich u.a. mit Kupfer plattierte Halbzeuge, Kontakt- und Thermobimetalle mit Kupferwerkstoffen, dispersionsgehärtete Kupferbasis-Verbundwerkstoffe sowie Substrate für Hybridwerkstoffe und Leistungselektronik weitgehend etabliert. Sprühkompaktierte (Verbund-) Werkstoffe und unterschiedliche Kontaktwerkstoffe sind bei der Einführung. Bekannt sind Aktivitäten mit zufriedenstellenden Ergebnissen bei CuTi oder CuTi/C-Werkstoffen, sowie verschiedenen Kupfer-Verbunddrähten und beim kohlefaserverstärkten Kupfer für die Elektronik. Anwendungsbereiche sind neben Elektrotechnik, Luft- und Raumfahrttechnik auch die Sportartikelindustrie. Demnächst dürften neue Einsatzfelder vor allem in konventionellen Bereichen wie der Automobilindustrie hinzukommen [30].

Neuerdings wird die Nutzung von Kupferwerkstoffen in modernen **Ammoniakkälteanlagen** angestrebt [30], wo der Einsatz neuer Kältemaschinenöle trockene NH₃-Kreisläufe erforderlich machten. Hierbei bieten die Kupferwerkstoffe aufgrund der kostengünstigen Verarbeitung erhebliche Vorteile und gute Stabilität. Daher werden sich in nächster Zukunft im Bereich der Kälteanlagen sicher neue Aspekte für Kupferwerkstoffe ergeben.

4. Ausblick

Die Ausführungen unterstreichen deutlich, daß Kupferwerkstoffe auch in Zukunft unverzichtbar bleiben werden. Aufgrund der hervorragenden Leitfähigkeit für die elektrische Energie gewinnt Kupfer immer mehr an Bedeutung, da vor dem Hintergrund des gestiegenen Umweltbewußtseins die Energieeinsparung und die Verringerung von Leistungsverlusten verstärkt in den Vordergrund rücken und über den jeweiligen Einsatz entscheiden. Nicht weniger wichtig sind in diesem Zusammenhang die Miniaturisierung und Sicherstellung der Funktion bzw. eines minimalen elektrischen Widerstandes. Die gute Wärmeleitfähigkeit in Kombination mit den guten Verarbeitungseigenschaften prädestiniert diesen Werkstoff für die Nutzung in Heiz- und Kühlsystemen. Aufgrund der technologischen Eigenschaften und der Korrosionsbeständigkeit werden die Kupferwerkstoffe überall dort eingesetzt, wo maßgeschneiderte Lösungen gefragt sind. Bei der Werkstoffauswahl ist heute die Recycelbarkeit ein fundamentales Kriterium, das Kupfer in optimaler Weise erfüllt.

Die Legierungsfähigkeit der Kupferwerkstoffe ist vielfältig; den modifizierten Anforderungen entsprechend werden neue Werkstoffe unterschiedlicher Zusammensetzung entwickelt. Darüber hinaus werden in Verbundwerkstoffen Materialien mit gegensätzlichen Eigenschaften derart kombiniert, daß das hergestellte Werkstück unterschiedliche Aufgaben erfüllen kann.

Hinzu kommt, daß eine Reihe von Verbesserungen in den Fertigungsabläufen vorgenommen und viele neue Verfahren entwickelt werden, um Kupferwerkstoffe energetisch, ökonomisch und technisch sinnvoll sowie umweltgerecht herstellen zu können. Bevorzugt werden dabei vorwiegend halbkontinuierliche und kontinuierliche Verfahren. Außerdem sind Methoden entwickelt worden, mit denen die bisher nicht zugänglichen Verarbeitungswege erschlossen werden.

In jedem Fall besitzt Kupfer reichlich innovatives Potential. Absehbar ist, daß uns das rote Metall noch sehr lange begleiten wird.

Literatur

- [1] W. T. Black: Copper-A colourful history and bright future. ASTM Standardization News, Philadelphia (Nov. 1987).
- [2] Kupfer und Kupferwerkstoffe – Ein Beitrag zur öffentlichen Gesundheitsfürsorge. DKI-Informationsdruck i.028, Deutsches Kupfer-Institut, 1997.
- [3] E. Arpaci: Kupfer in kommunalen Abwässern und Klärschlämmen. Teil 1, IKZ-Haustechnik, 12 (1995), S. 65-70.
- [4] E. Arpaci, M. Türke: Ökobilanz für Produkte aus Kupfer und Kupferlegierungen. SHT, 3, 1996, S. 128-132.
- [5] N. N.: Chilenisches Kupfer auf der Hannovermesse '99. Metall, 53 (1999) 4, S. 209-210.
- [6] E. Arpaci: Geschichte, Vorkommen und Gewinnung des Kupfers. PdN-Ch., 4 (1990) 39, S. 2-9.
- [7] Kupfer – Vorkommen, Gewinnung, Eigenschaften, Verarbeitung, Verwendung. DKI-Informationsdruck i.004, Deutsches Kupfer-Institut, 1997.
- [8] E. Arpaci, Th. Vendura: Recycling von Kupferwerkstoffen. VDI-Berichte Nr. 917 (1992), S. 595-616.
- [9] E. Arpaci: Kupferlegierungen als Trägerwerkstoffe für Halbleiterbauelemente. Deutscher Ingenieurkalender, 1988, VDI-Verlag, S. 157-62.
- [10] Niedriglegierte Kupferwerkstoffe – Eigenschaften, Verarbeitung, Verwendung. DKI-Informationsdruck i.008, Deutsches Kupfer-Institut.
- [11] Kupfer-Zink-Legierungen – Messing und Sondermessing. DKI-Informationsdruck i.005, Deutsches Kupfer-Institut.
- [12] Kupfer-Zinn-Knetlegierungen (Zinnbronzen). DKI-Informationsdruck i.015, Deutsches Kupfer-Institut.
- [13] Kupfer-Aluminium-Legierungen; Eigenschaften, Herstellung, Verarbeitung, Verwendung. DKI-Informationsdruck i.006, Deutsches Kupfer-Institut.
- [14] Kupfer-Nickel-Legierungen; Eigenschaften, Bearbeitung, Anwendung. DKI-Informationsdruck i.014, Deutsches Kupfer-Institut.
- [15] Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen (Neusilber); Eigenschaften, Verarbeitung, Verwendung. DKI-Informationsdruck i.013, Deutsches Kupfer-Institut.
- [16] Kupfer-Zinn-, Kupfer-Zinn-Zink- und Kupfer-Blei-Zinn-Gußlegierungen (Guß-Zinnbronze, Rotguß und Guß-Zinn-Bleibronze). DKI-Informationsdruck i.025, Deutsches Kupfer-Institut.

-
- [17] M. Krust: High-Tech-Kupfermine in der Wüste. Metall 53 (1999) 10, S. 541-43.
- [18] W. Dürschnabel: 50 Jahre Entwicklung der Kupferwerkstoffe. Metall 52 (1998) 3, S. 131-35.
- [19] N.N.: Kupfertechnologie aus Hamburg. Metall 53 (1999) 7 - 8, S. 419 - 420.
- [20] N.N.: Dünne Abmessungen bei individuellen Bandbreiten. Metall 53 (1999) 7, S. 421-22.
- [21] E. Bröese, M. Jansen: Neuronale Netze beim Walzen von Buntmetall. Metall 53 (1999) 4, S. 190-93
- [22] S. Hansmann: Neue Cu-Werkstoffe durch Sprühkompaktieren. Metall 53 (1999) 4, S. 182-86
- [23] N.N.: Kupferkühler als echte Alternative. Metall 53 (1999) 4, S. 187-89.
- [24] N.N.: Kupfer in der Halbleiterfertigung. <http://www.techchannel.de/hardware/259/index.html> (Stand: 02.05.2000).
- [25] G. Scholz: Kfz-Elektronik – Im Automobil hat das teure Kupferkabel keine Zukunft. VDI nachrichten, Nr. 51 (vom 25.12.1999) S. 15.
- [26] A. Baukloh: Innenprofilierte Kupferrohre; High-Tech-Produkte für die Kälte- und Klimatechnik. Metall 53 (1999) 10, S. 551-52.
- [27] N.N.: Halbharte Kupferrohre auch in Deutschland. Metall 53 (1999) 4, S. 194-95.
- [28] R. Garré: Anwendungen für das nächste Jahrtausend; Hochtemperatur-Supraleiter. Metall 53 (1999) 4, S. 206-8.
- [29] E. Arpaci, A. Bode: Kupferwerkstoffe – Eigenschaften und Anwendungen in der Elektrotechnik und Elektronik. Metall 46 (1992) 1, S. 22-31.
- [30] M. Türpe: Innovationen und Bewährtes – Kupferwerkstoffe für wichtige zukünftige Aufgaben. (wird demnächst in „Technische Rundschau“ veröffentlicht).