

Randbedingungen bei der Bearbeitung kupferbasierter Werkstoffe

Dwuletzki, H. (1)

Zur Bearbeitung von Cu-basierten Werkstoffen werden alle klassischen Verfahren angewandt, von der ersten Erzeugung einer Form (Urformen), der Formveränderung unter Erhalt des Stoffzusammenhanges (Umformen), der Formveränderung unter Aufhebung des Stoffzusammenhanges (Trennen), dem Verbinden von getrennten Werkstücken (Fügen), dem vorwiegend elektrolytischen Aufbringen von Schichten (Beschichten) sowie der Einstellung gewünschter Stoffeigenschaften, z.B. durch Wärmebehandlung.

Klassische Einsatzgebiete für die Anwendung von Schmierstoffsystemen liegen in den Bereichen Urformen-Umformen-Trennen, während in den Verfahren Fügen-Beschichten und Veränderung von Stoffeigenschaften die Verwendung von Schmierstoffen eher eine Ausnahme darstellt. Neuerdings wird im Segment Beschichten vermehrt mit tribologisch aktiven Oberflächensystemen gearbeitet, die als Dry Lube, Gleitlack oder auch PreCoat exzellente Schmierseigenschaften aufweisen. Hierbei ist die Applikation vorzugsweise auf weniger duktile Eisenoberflächen bisher beschränkt.

Schmierstoffe für die Bearbeitung von kupferbasierten Werkstoffen

Der allgemeinen Beschreibung der Schmierstoffe für die Metallbearbeitung seien einige Begriffsbestimmungen vorangestellt:

Schmierstoff:

Ein flüssiges, plastisch-festes, festes oder gasförmiges Medium, das die Aufgabe hat, bei gleitendem oder rollendem Kontakt zweier sich aufeinander bewegenden Punkte, Linien oder Flächen Reibung und Verschleiß zu mindern. Nach DIN 51 502 werden die Schmierstoffe in verschiedene stofflich unterscheidbare Gruppen eingeteilt; hierbei enthält die Gruppe der Öle S die Medien der Metallbearbeitung.

Öle S: Kühlschmierstoff (KSS):

Die DIN 51 385 definiert diejenigen Stoffe als Kühlschmierstoffe, die zum Kühlen und Schmieren beim Trennen und teilweise beim Umformen von Werkstoffen, insbesondere von Metallen benutzt werden.

Aufgrund der teilweise schwammigen Definitionen werden z.Zt. die DIN 51 502 und die DIN 51 385 grundlegend überarbeitet. Als derzeitiger aktueller Stand (2009) kann die Aufteilung wie in Bild 1 festgehalten werden.

Die Systematik enthält die Gruppe der wassermischbaren und die Gruppe der nichtwasser-mischbaren Metallbearbeitungsmedien, die sich zwangsläufig in ihrem zugrundeliegenden Aufbau unterscheiden.

Schmierstoffe sind vereinfacht gesagt, Mischungen aus Grundfluid und Additiven, wobei unter Grundfluid die

mengenmäßig größte flüssige Komponente des Schmierstoffes verstanden wird, die zur Lösung oder Verteilung der Additive nötig ist. Grundsätzlich geeignet und eingesetzt werden:

- Mineralöl (natürliche Kohlenwasserstoffe),
- synthetische Kohlenwasserstoffe,
- Ester: native oder synthetische,
- Polyglykole,
- Wasser.

Additive:

Unter Additiven werden solche Inhaltsstoffe verstanden, die die physikalischen und/oder chemischen Eigenschaften des Grundfluids beeinflussen. Diese Definition erlaubt die Einteilung der sehr inhomogenen, unübersichtlichen Gruppe von Additiven nach ihrem bevorzugten Wirkort in die grundlegenden Klassen:

- Wirkort A: Das Grundfluid selbst,
- Wirkort B: Die Metalloberfläche des Werkstücks oder Werkzeugs.

Der Aufbau von Schmierstoffen für die Bearbeitung von Cu-basierten Werkstoffen muss zwingend berücksichtigen, welche Eigenschaften Kupfer als chemisches Element auszeichnet, um anforderungsgemäße Produkte entwickeln zu können.

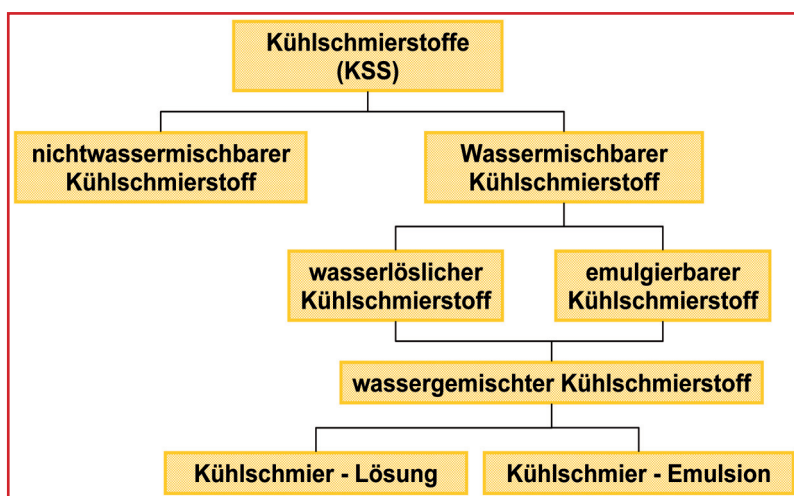


Bild 1: Einteilung der Kühlschmierstoffe

Eigenschaften von Kupfer:

Es seien hier nur exemplarisch die Eigenschaften des Metalls besprochen, die wesentlichen Einfluss auf den Bearbeitungsprozess haben:

a) Wärmeleitfähigkeit

Kupfer besitzt nach Silber die höchste Wärmeleitfähigkeit eines Metalls. Somit muss bei Bearbeitungsprozessen, die eine hohe Reibungsenergie erzeugen, auf eine sehr gute Wärmeabfuhr, d.h. Kühlung geachtet werden. Hier ist der Einsatz von wassergemischten Kühlschmierstoffen eindeutig präferiert.

b) Chemische Reaktionsfähigkeit

Aufgrund des positiven Normalpotenzials gehört Kupfer zu den edlen Metallen, d.h. es ist grundsätzlich reaktionsträge. Deshalb kommt es in der Natur sogar in elementarer Form vor. Aber wie bereits die Mengen der natürlichen Vorkommen lehren, besitzt Kupfer eine hohe Affinität zu Schwefel und Sauerstoff, die bevorzugt zu Kupfer-I-Oxid bzw. Sulfid reagieren.

Analog weisen Additive mit aktiven Schwefel- oder Sauerstoffzentren grundsätzlich ein hohes Maß an Reaktivität gegenüber Kupfer auf. Speziell Schwefel bildet sehr rasch feste, schwarze sulfidische Reaktionsschichten auf der Oberfläche, die eine Verwendung dieser reaktionsfähigen Additivsysteme sehr stark einschränken.

c) Elektrochemisches Verhalten

Kupfer gehört zu den Edelmetallen, d.h. es besitzt ein positives Normalpotenzial und kann somit in elektrolytisch verbundenen Systemen unedlere Metalle oxidativ auflösen. Hierauf ist in wässrigen Systemen zu achten, z.B. bei der Verwendung von Aluminiumbauteilen in Kupferbearbeitungsmaschinen und bei

einer Mixfertigung von Kupfer und unedleren Werkstoffen.

So führt die prinzipiell elegante Verfahrensweise, Kupfer- und Aluminiumdrähte mit derselben Zieh-emulsion durchzuführen, in der Praxis zu nicht unerheblichen Problemen.

Die Cu-basierten Legierungen weisen alle mehr oder weniger ähnliche Eigenschaften auf, so dass hier keine spezielle Diskussion notwendig ist.

Schmierstoffanforderungen an Hand von Fallbeispielen

Walzen

Herstellung von Walzdraht

Die Herstellung von Walzdraht kann nach verschiedenen Verfahren erfolgen; für den Einsatz von Schmierstoffen sind die Gieß-Walzverfahren wichtig. Hier wird aus der Schmelze in einem Schritt der Draht durch Gießen und Walzen erzeugt.

Ähnliche Bezeichnungen wie ContinuousCasting and Rolling (CCR) beschreiben den Produktionsverlauf.

Die bereits auf dem Gießband heruntergekühlte Schmelze wird auf den normalen Enddurchmesser von 8 mm heruntergewalzt.

Die Aufgaben des Schmierstoffs beim Walzen sind:

- Gezieltes, homogenes Abkühlen des Kupferbandes während des Walzprozesses,
- hohe thermische Stabilität des Schmierstoffs,
- optimale tribologische Trennung der Kupferoberfläche von den Walzwerkzeugen,
- exzellente Benetzung der Kupfer- und Walzenoberfläche,
- Verhinderung des Kupferaufbaus auf den Walzen,

- Reduzierung der Kupferoxidation,
- leichtes Entfernen des Kupferabriebs aus dem Schmierstoff.

Dieses Anforderungsprofil wird idealerweise erfüllt von wassergemischten, wasserlöslichen Walzlösungen:

■ Thermodynamisch:

- Wasser besitzt die besten Kühleigenschaften,
- Echte Lösungen sind hochstabile Systeme, da alle Inhaltsstoffe selbst wasserlöslich sind,
- Einfache Einstellung der Netzungsverhältnisse.

■ Tribologisch:

- Optimale Einstellung des Schmiereffektes möglich,
- Kontrollierter Walzenverschleiß.

■ Chemisch:

- Kupferinhibierung problemlos möglich,
- Unproblematische Zugabe von Reduktionsmitteln wie Alkoholen möglich.

■ Praxisgerecht:

- Sehr gute Filtrationseigenschaften,
- Relativ unkompliziertes Monitoring („KSS-analog“).

Walzen von Blechen und Bändern

Kupfer- und Messinghalbzeuge werden durch Warmwalzen, Fräsen und Kaltwalzen hergestellt. Prinzipiell sind die Anforderungen an den Schmierstoff ähnlich zu unten beschriebenen Kupferdrahtziehmedien mit dem Hauptunterschied des sehr speziellen Aufbaus des Emulgatorsystems der Walzemulsionen. Zur Erzielung des gewünschten Resultates während des Walzprozesses werden sogenannte metastabile Emulsionstypen eingesetzt, die im Walzspalt hohes Schmierungsvermögen aufweisen, die allerdings zu Lasten der Stabilität und des Spülvermögens gehen. Die Kunst der Formulierung besteht gerade darin, die Gradwanderung zwischen notwendiger Schmierung und Emulsionsstabilität zu beherrschen.

Drahtherstellung

Ausgehend vom Walzdraht mit 8 mm Enddurchmesser steht nun das Vormaterial zur Verfügung, um das klassische Verfahren des Kupfer- und auch Messingdrahtzuges zu betrachten.

Ziehverfahren	Drahtdurchmesser (mm)	
	Eingangsdurchmesser Ø _E	Ausgangsdurchmesser Ø _A
Grobzug	8,0	3,5 - 1,0
Mittelzug	3,5	0,4
Feinzug	2,1	0,1
Feinstzug	1,0	0,05
Superfeinstzug	0,4	0,01

Tabelle 1: Ziehstufen

Aufgrund der extremen Verformbarkeit von Kupfer ist es möglich, den Drahtdurchmesser von 8 mm bis auf ca. 50 µm zu reduzieren, wobei in den in Tabelle 1 dargestellten Stufen gezogen werden kann.

Als wesentliche technische Randbedingungen, die für den erfolgreichen Einsatz von Schmierstoffen wichtig sind, seien genannt:

- Hohe Ziehgeschwindigkeiten: max. bis zu 50 m/s; durchschnittlich 20-25 m/s,
- Mehrdrahtziehverfahren: max. bis zu 40 Drähte werden parallel in einer Maschine gezogen,
- Multiserielle tribologische Paarungen: Bis zu mehreren 100 Paarungen!
Tribosystem Draht-Ziehstein,
Tribosystem Draht-Ziehkone.

Diese Konstellationen definieren bereits den Anforderungskatalog der Ziehmedien, die sich aus der alten Definition der Kühlschmierstoffe herleiten:

Kühlen – Schmieren – Transportieren und Spülen

Aufgrund der überragenden Kühleigenschaften der wasserbasierten Ziehmedien, werden die thermodynamisch günstigsten Systeme Ziehemulsionen bzw. Ziehlösungen nahezu ausschließlich eingesetzt.

Die Anforderungen an das Umformmedium sind vielfältig:

- Entfernung der Umformwärme aus den Tribosystemen, damit Vermeidung von Überhitzungen der Diamant-Ziehsteine,
- Optimale tribologische Trennung der Kupferoberfläche von den Zieh-

werkzeugen; d.h. den Ziehsteinen und den Ziehringen/Ziehkoni,

- Exzellente Benetzung der Systemoberflächen zur Entfernung des Werkstoffabriebs: „Kupferfitter“,
- Freispülen der Ziehsteineinläufe,
- Leichte Entfernbarkeit des Kupferabriebs aus dem Schmierstoff: Sehr gute Filtrierbarkeit,
- Sehr große Toleranz gegenüber Leitfähigkeitsanstieg; d.h. hohe Stabilität des Emulsionssystems in Gegenwart von Cu-Ionen,
- Verhinderung der Oxidation der Drahtoberfläche,
- Keine negative Beeinflussung möglicher weiteren Prozess-Schritte: Glühprozesse; galvanische Beschichtungen; Lackierprozesse; Extrudierprozesse.

Kupferrohrherstellung:

Die Rohrherstellung erfolgt in einer Abfolge von Warm- und Kaltmassivumformschritten. Ein vorgewärmter Butzen (ca. 800-950 °C) wird zur Rohrluppe gepresst oder im directube®-Verfahren hergestellt und im kalten Zustand sukzessive weiter auf Pilgerwalzen und Trommelziehbänken im Durchmesser verjüngt.

Die schmierungstechnischen Anforderungen sind hier nur mit verschiedenen Schmierstoffsystemen zu erfüllen (Tabelle 2).

Fittingherstellung:

Die Produktionsabfolge der Kupferfittingproduktion ist ein exzellentes Bei-

spiel für die Anwendung intelligenter Umformverfahren in Kombination mit den hierzu notwendigen Spezial-Schmierstoffsystemen.

Ausgehend vom HCC oder OF-Kupferdraht wird auf Mehrstufenpressen im Zuge einer 5-stufigen Kaltfließpressfolge ein Billet (Rohrabschnitt) erzeugt, der im nächsten Schritt durch Innenhochdruck zum Fitting (z. B. T-Stück) umgeformt wird. Selbst der im ersten Schritt entstehende Kupferbutzen ist ein begehrtes Produkt, er wird in Münzanstalten zum Penny umgeprägt, wobei hier nichtwassermischbare Schmierstoffe eingesetzt werden:

Der Stadienplan für die Erzeugung des Billets umfasst:

- Abscheren und Vorstauchen,
- Vorformen,
- Vollrückwärtsfließpressen,
- Hohlvorwärtsfließpressen,
- Abstreckgleitziehen und Butzen auswerfen.

Diese Abfolge ist prinzipiell gleich zur Herstellung von massiv geformten Hohlteilen aus Stahl; so werden z.B. auch Kolbenbolzen gefertigt.

Entscheidend für die Schmierstoffauswahl im Fall der Billets sind jedoch die speziellen Werkstoffeigenschaften des Kupfers. Wie aufwändige Untersuchungen zeigen, ist die Leistungsfähigkeit der Presse davon abhängig, ob die auftretende Umformwärme schnell genug abgeführt werden kann, da die ungenügende Kühlung durch nichtwassermischbare Umformmedien speziell in der fünften Stufe zu hohen Schwierigkeiten beim Auswerfen führt. Erst der Einsatz wässriger, ex-

Parameter	Strangpressen	Kaltpilgern	Kaltziehen
Temperatur	ca. 800 °C	Raumtemperatur	Raumtemperatur
Anforderungen			
	Temperaturbeständigkeit	Kühlung für den Umformprozess	Kühlung für den Umformprozess
	Hohe Druckaufnahmefähigkeit	Exzellente Schmierung	Ausreichende Schmierung
	Werkzeugstandmenge	Hohes Spülvermögen	Geringste Rückstandsbindung
	Verbrauch		Einsatz zur Innen- und Außenschmierung
Medium			
	Feststoffsystem: Pigmentiert	Emulsion mit hohen Esteranteilen	Nicht wassermischbare Ziehmedien
	Hochviskos oder pastös		Hohe Bandbreite der Viskosität
	Neues System: Wässrig, pigmentfrei		Variable Additivierung

Tabelle 2: Aufgabenstellungen bei der Kupferrohrherstellung

	Umformmedium		
	Nichtwassermischbares Umformöl	Pigmentierte (carbonatbasierte) wässrige Umformlösung	Mineralölfreie Hochleistungsemulsion auf Esterbasis
Hubzahl (strokes / min)	ca. 30-50	ca. 70	max. 150 120-130 im Dauerbetrieb
Nachteile			
	Nur geringe Leistung möglich	Extreme Verschmutzung der Presse und des Umfeldes	Hoher Öleintrag aus der Bettbahnschmierung
	Starke Ölnebelbelastung		Erhöhter Pflegeaufwand des KSS
	Hohe Brandschutz und Versicherungsauflagen	Sehr häufiger Wechsel des Mediums	
	Aufwändige Teilereinigung		

Tabelle 3: Schmierstoffsysteme für die Umformung von Kupferwerkstoffen

zellant kühlender Schmierstoffsysteme kann dieses Problem lösen. Ältere Systeme verwenden zur Schmierung dispergierte Feststoffe, die aufgrund extremer Verschmutzungsprobleme heute obsolet sein dürften. Auf der Basis moderner Hochleistungsemulsionen ist es möglich, mittels intelligenter Auswahl des Additivpaketes trotz annähernder Verdopplung der Produktivität und kontinuierlicher Überwachung des Mediums eine Standzeit von mehreren Jahren zu erzielen (Tabelle 3).

Die elegante Ausnutzung der exzellenten Umformbarkeit von Kupfer erlaubt die Anwendung einer Innenhochdruckoperation zur Fertigung einer T-Verzweigung aus dem Billet: Die Anforderungen an das Schmierungssystem sind in diesem Falle zweigeteilt:

- a) Schmierung des Billets während der Umformung zur Reduktion der Reibung zwischen Werkzeug und Kupferrohroberfläche speziell während der Ausbildung des Doms.
- b) Einsatz eines Druckmediums für die Kraftübertragung innerhalb des Billets.

Idealerweise sollte es möglich sein, beide Anforderungen mit demselben Schmierstoff zu realisieren. Die überwiegenden Praxiserfahrungen zeigen jedoch, dass bessere Ergebnisse zu erzielen sind, wenn das Medium für Schritt a) eine auf die Kupferbearbeitung spezialisierte wassergemischte Emulsion darstellt, während für Schritt b) eher eine Druckflüssigkeit vom Typ HFA, also eine wassergemischte, schwerentflammbare Hyd-

raulikflüssigkeit zum Einsatz kommen sollte.

Auch in diesem Fall darf nicht unerwähnt bleiben, dass alle eingesetzten Schmierstoffe leicht abzureinigen sein müssen.

Herstellung von Umformteilen aus Kupfer-Zink-Legierungen

Kupfer-Zink-Legierungen besitzen bis zu einem Gehalt von ca. 37 % Zink ein sehr hohes Formänderungsvermögen. Diese Eigenschaft verbunden mit hoher Korrosionsbeständigkeit führt dazu, dass diese „Messinge“ exzellente Vormaterialien für die Warm- und Kaltmassivumformung darstellen, wobei die umgeformten Halbzeuge ebenfalls gut zerspanbar sind. Bestes Beispiel in diesem Zusammenhang ist die Herstellung von Armaturenteilen, Ventilen und Reglern.

Das Ausgangsmaterial Messingdraht wird unmittelbar vor dem Einlaufen in die Presse auf ca. 400 °C erwärmt und in mehreren Stufen in rotations-symmetrische Teile verpresst und die Endkonturen werden durch spanende Bearbeitung erzeugt.

Die Anforderungen an das Umformmedium sind vielfältig:

- Entfernung der Prozesswärme aus der Warmpresse,
- Sehr gute Trennung der Messingoberflächen von den Umformwerkzeugen; d.h. den Matrizen und den Stempeln,
- Sehr gute Kompatibilität mit den zwangsweise eingeschleppten Maschinenölen: Leichte Fremdölenfernung muss gegeben sein,
- Leichtes Entfernen des Messingabriebs aus dem Schmierstoff: Gute Filtrierbarkeit,

	Schmierstoff-Typ			
	Wasser-gelöste KSS (Lösungen)	Wasser-emulgierte KSS (Emulsionen)	Nichtwasser-mischbare KSS (Mineralöle, Ester)	Luft
Spezifische Wärmekapazität [kJ/kg • K]	3,75	3,15	1,89	1,0
Wärmeleit-fähigkeit [W/m • K]	≈ 0,6	≈ 0,35	≈ 0,13	≈ 0,02
Verdampfungswärme [kJ/kg]	2.260	1.000 ... 2.000	210	--
Bewertung der Kühlwirkung	sehr gut	sehr gut bis gut	gering	sehr gering

Tabelle 4: Schmierstoff-Typen für die Warmumformung

■ Verhinderung der Oxidation der umgeformten Oberflächen.

Auch für diesen Warmumformprozess gibt es keine Alternative zu den wassergemischten, sehr gut schmierenden Emulsionstypen, da die Frage nach der Wärmeabfuhr und dem Schmierungsverhalten zwangsläufig zu wässrigen Systemen führt.

Tabelle 4 veranschaulicht die thermodynamischen Zusammenhänge.

Zum Trennen der Werkzeuge von der heißen Werkstoffoberfläche finden nahezu ausschließlich sehr gut schmierende Emulsionstypen Verwendung.

Herstellung von Bronzestangen und -profilen

Klassische Bronzelegierungen, d.h. Cu-Sn-Zn basierte Systeme zeichnen sich durch eine durchweg gute Umformbarkeit aus. Durch geeignete Legierungsbestandteile wie Aluminium, Titan, Zirkon, etc. können Bronzen erzeugt werden, deren Umformbarkeit an die Grenzen der Metallbearbeitung stoßen.

Diese Legierungen lassen sich nur durch Warmumformung bearbeiten, sei es durch Schmieden oder durch Warmpressen der vorgewärmten Butzen. Analog zur Herstellung der Rohrluppen werden thermisch hochbeständige konsistente Schmierstoffe meist

auf Basis von Feststoffen eingesetzt, um den Bedingungen bei ca. 700 - 990 °C gerecht werden zu können.

Weitere Umformungen auf Ziehbänken werden nahezu ausschließlich mit nichtwassermischbaren Schmierstoffsystemen durchgeführt, wobei als allgemeine Faustformel gilt, dass bei niedrigem Endquerschnitt auch die Schmierstoffviskosität geringer sein sollte.

Zerspanung von kupferbasierten Werkstoffen

Schmierungstechnische Hinweise auf die Zerspanungsfähigkeit von kupferbasierten Legierungen sind literaturbekannt, speziell die Informationsdrucke des Deutschen Kupferinstitutes werden immer wieder als Musterbeispiel herangezogen, wenn es um die allgemeine Übersicht der Zerspanbarkeit dieser Werkstoffe geht.

Kritische Operationen

Immer wieder zeigt es sich, dass scheinbar gut beherrschbare Operationen, die tribologisch gut verstanden werden, durch den Wechsel des Werkstoffes ungeahnten Schwierigkeiten in der Praxis ergeben. Ein illustratives Beispiel hierfür stellt das Verfahren Tiefbohren dar:

Unter Tiefbohren werden solche Bohrvorgänge verstanden, bei denen die Länge des Bohrweges (L) mehr als das 10fache des Bohrungsdurchmessers (Ød) beträgt:

$$L > 10 \text{ } \varnothing d$$

Stahl- und Gusswerkstoffe lassen sich mit gutem Erfolg in diesem Sinne zerspanen, wohingegen das Tiefbohren von Reinstkupfer mit extremen Schwierigkeiten verbunden ist.

Hauptprobleme sind:

- Spanbildungsverhalten,
- Aufbauschneidenbildung,
- Adhäsion auf Diamant,
- Wärmeabfuhr,
- Bohrungsverlauf.

In diesem Zusammenhang werden z.Zt. Forschungsvorhaben durchgeführt, mit dem Ziel, Kupfervormaterialien wirtschaftlich tiefzubohren.

Ausblick

Kupferbasierte Werkstoffe haben ausgezeichnete Eigenschaften in verschiedenster Hinsicht und sind in vielen Anwendungsbereichen ohne echte Alternative.

Sie haben spezifische Eigenschaften, die schmierungstechnische Spezialitäten vorwiegend in der Umformung und zum Teil in der Zerspanung erfordern:

- Von überragender Bedeutung ist die Wärmeleitfähigkeit dieser Werkstoffe, die die Verwendung wasserbasierter Schmierstoffsysteme erfordert.
- Wässrige Schmierstoffe müssen den Eintrag von Schwermetallionen tolerieren, ohne Stabilitätsprobleme aufzuweisen.
- Die Werkstückoberflächen müssen vor dem oxidativen Angriff anforderungsgerecht durch den Schmierstoff geschützt werden.

Allgemein können die Bearbeitungsverfahren den jeweiligen Werkstoffen und den hierzu am häufigsten verwendeten Schmierstoffsystemen nach Tabelle 5 zugeordnet werden.

	Bearbeitung	Werkstoff		
		Cu	Cu-Zn	Cu-Sn
Umformung	Giessen			
	Druckgiessen			
	Schmieden	■	■	■
	Warmumformen	■	■	■
	Kaltmassivumformen	■	■	■
	Innenhochdruckumformen	■	■	■
	Walzen	■	■	■
	Ziehen (Draht)	■	■	■
	Ziehen (Profile)	■	■	■
Zerspanen	Drehen	■	■	■
	Bohren	■	■	■
	Fräsen	■	■	■
	Sägen	■	■	■
	Schleifen	■	■	■
	Räumen	■	■	■
	Tiefbohren	■	■	■

Tabelle 5: Zuordnung von Werkstoff und den am häufigsten verwendeten Schmierstoffsystemen - Blau: Wasserbasierte Schmierstoffsysteme, Emulsionen und Lösungen - Braun: Nichtwasserbasierte Schmierstoffsysteme, Mineralöl- oder Esterbasiert

(1) Heinz Dwuletzki, Dipl.-Chem., Dr. rer. nat, Carl Bechem GmbH