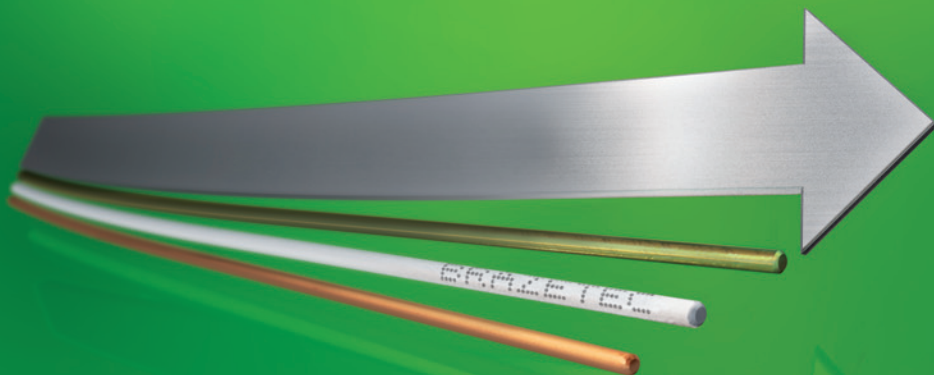
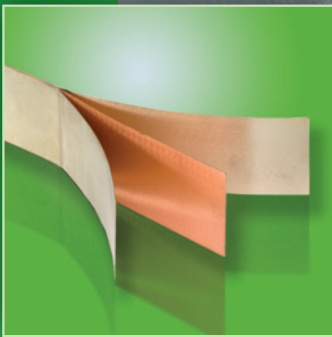
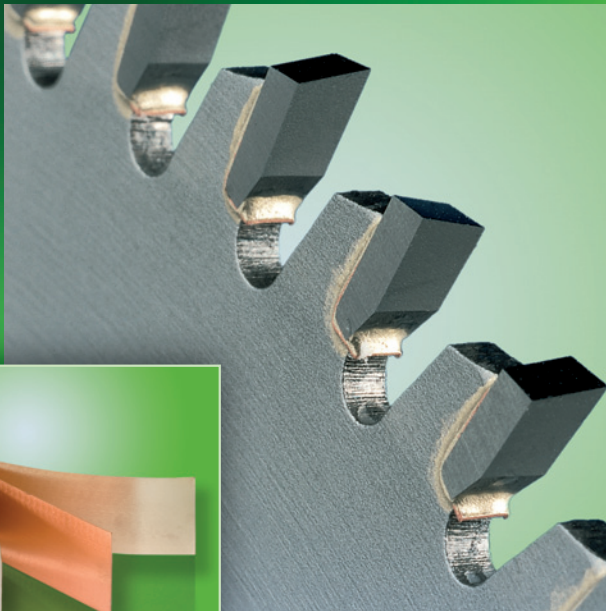


Löten in der Werkzeugindustrie



Brazing is BrazeTec 

Brazing is BrazeTec 

Löten in der Werkzeugindustrie

von

Dipl.-Ing. Max Schimpfermann

Dipl.-Ing. Daniel Schnee

Technical Materials

BrazeTec

Unsere Angaben über unsere Produkte und Geräte sowie über unsere Anlagen und Verfahren beruhen auf einer umfangreichen Forschungsarbeit und anwendungstechnischen Erfahrung. Wir vermitteln diese Ergebnisse, mit denen wir keine über den jeweiligen Einzelvertrag hinausgehende Haftung übernehmen, in Wort und Schrift nach bestem Wissen, behalten uns jedoch technische Änderungen im Zuge der Produktentwicklung vor. Darüber hinaus steht unser anwendungstechnischer Dienst auf Wunsch für weitergehende Beratungen sowie zur Mitwirkung bei der Lösung fertigungs- und anwendungstechnischer Probleme zur Verfügung.

Das entbindet den Benutzer jedoch nicht davon, unsere Angaben und Empfehlungen vor ihrer Verwendung für den eigenen Gebrauch selbstverantwortlich zu prüfen. Das gilt – besonders für Auslandslieferungen – auch hinsichtlich der Wahrung von Schutzrechten Dritter sowie für Anwendungen und Verfahrensweisen, die von uns nicht ausdrücklich schriftlich angegeben sind. Im Schadensfall beschränkt sich unsere Haftung auf Ersatzleistungen gleichen Umfangs, wie sie unsere Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen bei Qualitätsmängeln vorsehen.

1.	Einleitung	6
2.	Grundlagen zur Lötung von Werkzeugen	7
2.1	Schneidstoffe	7
2.2	Trägerwerkstoffe	9
2.3	Herausforderungen an das Fügen	9
3.	Lotwerkstoffe, Flussmittel und Erwärmungsmethoden	10
3.1	Lotwerkstoffe	11
3.1.1	Silberbasislote	11
3.1.2	Kupferbasislote	12
3.1.3	Nickelbasislote	12
3.1.4	Aktivlote	12
3.2	Flussmittel	13
3.3	Erwärmungsmethoden	13
3.3.1	Induktive Erwärmung	13
3.3.2	Erwärmung mit Flamme	14
3.3.3	Ofenerwärmung	14
4.	Löten verschiedener Schneidstoffe	15
4.1	Hartmetall	15
4.1.1	Löten von Hartmetall und Cermets	16
4.1.2	Thermische Effekte und Spannungszustände	17
4.1.3	Schichtlote	21
4.1.4	Besonderheiten durch spezielle Anwendungen	24
4.2	Diamant & Polikristalliner Diamant (PKD)	24
4.2.1	Löten von Diamanten & PKD	25
4.3	Kubisches Bornitrid & Polykristallines Bornitrid (PcBN)	26
4.3.1	Löten von kubischem Bornitrid	26
4.4	Löten von Keramiken	27
4.4.1	Lotwerkstoffe und Lötprozess	28
4.4.2	Thermische Effekte und Spannungszustände	28
4.5	Anwendungsbeispiele	29
5.	Prozessoptimierung	32
5.1	Prozessfehler beim Induktionslöten – Ursachen und Auswirkungen	33
5.2	Potenzielle Festigkeitsverluste bei der Verwendung von Kupferbasisloten	34
5.3	Optimierungen zur Temperatursteuerung mittels Pyrometermessung	34
5.4	Einfluss der Überhitzung von Diamantsegmenten mit hohem Binderanteil	35
5.5	Einfluss der Überhitzung von Schichtlot	36
5.6	Brüche in der Kupferzwischenschicht	36
5.7	Fehlerhafte Positionierung von Schichtloten	36
5.8	Fehlerhafte Ausformung des Sägenstammblasses	37
6.	Allgemeine Empfehlungen zur Lot- und Prozessauswahl	38
	Literatur	39

1. Einleitung

Werkzeuge werden eingesetzt, um aus den verschiedensten Materialien Werkstücke herzustellen. Neben Handwerkzeugen wie Hammer oder Feile und Formwerkzeugen für Schmiede- oder Gießprozesse machen Bearbeitungswerkzeuge zum Zerspanen oder Trennen einen Großteil der technisch eingesetzten Werkzeuge aus. Unterschieden werden z. B. Werkzeuge zum Fräsen, Bohren, Drehen und Schleifen.

Um die Lebensdauer und damit die Wirtschaftlichkeit eines Schneidwerkzeuges zu erhöhen, wird häufig auf einen Trägerwerkstoff ein harter und verschleißfester Schneidstoff aufgebracht. Als Schneidstoff stehen verschiedene Materialien zur Verfügung. Je nach Anwendungsfall und Einsatzgebiet kann dieser von einem Hartmetall über Diamanten

und kubisches Bornitrid bis hin zu Keramiken reichen. Die Güte der Verbindung zwischen Träger und Schneidstoff ist für die Qualität des Werkzeuges entscheidend. Eine der wichtigsten Verbindungstechniken stellt das Löten dar, da gute Verbindungen mit hoher Festigkeit erreicht werden können [1]. Die höchsten Festigkeiten beim Löten können mittels Hartlötverfahren erreicht werden, d. h. laut DIN ISO 857-2 mit Loten mit einer Liquidustemperatur $> 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Für das Hartlöten stehen verschiedene Hartlote, Flussmittel und auch Lötverfahren zur Verfügung. Nur der optimale Einsatz eben dieser Hilfsstoffe gewährleistet ein Endprodukt, das auch hohen qualitativen Ansprüchen genügt.

2. Grundlagen zur Lötung von Werkzeugen

Während des Fügeprozesses treten thermisch induzierte Spannungen im Fügeverbund auf, welche auf ein minimales Maß reduziert werden sollten.

2.1 Schneidstoffe

Unter Schneidstoffen versteht man im allgemeinen Stoffe, welche durch ihre Eigenschaften die zerteilende und spanabhebende Bearbeitung bestimmter Materialien ermöglichen. Ein idealer Hartstoff würde sich hinsichtlich seiner mechanischen Eigenschaften dadurch auszeichnen, dass er gleichzeitig eine hohe Härte und Duktilität aufweist. Wie **Abbildung 1** zeigt, ist bei den meisten Hartstoffen in der Realität allerdings eine hohe Härte mit einer geringen Duktilität verbunden. Je nach Einsatzgebiet ergeben sich so physikalische Grenzen, über welche hinaus ein bestimmter Hartstoff nicht mehr zum Einsatz in einem Werkzeug geeignet ist. Zum Beispiel sind Diamanten aufgrund ihrer enor-

men Härte in der Lage, jedes Material zu trennen. Ihre Sprödigkeit, die zu einer erhöhten Schlagbruchempfindlichkeit führt, würde den Einsatz beispielsweise bei der Holzbearbeitung jedoch stark limitieren. Die Diamanten würden z.B. durch eingewachsene Steine im Nassholzbereich, also bei Baumstämmen usw., zersplittern. Wesentlich geeigneter sind für diese Applikation Hartmetalle, die entwickelt wurden, um die jeweiligen positiven Eigenschaften der verwendeten Werkstoffkomponenten Carbide und Metall zu nutzen. So besitzt die Carbidgephase eine hohe Härte und sorgt somit für den Verschleißschutz, während die metallische Binderphase duktil wirkt und zähe Eigenschaften einbringt.

Abbildung 1 | Härte/Verschleißwiderstand und Duktilität einiger Hartstoffe [2]

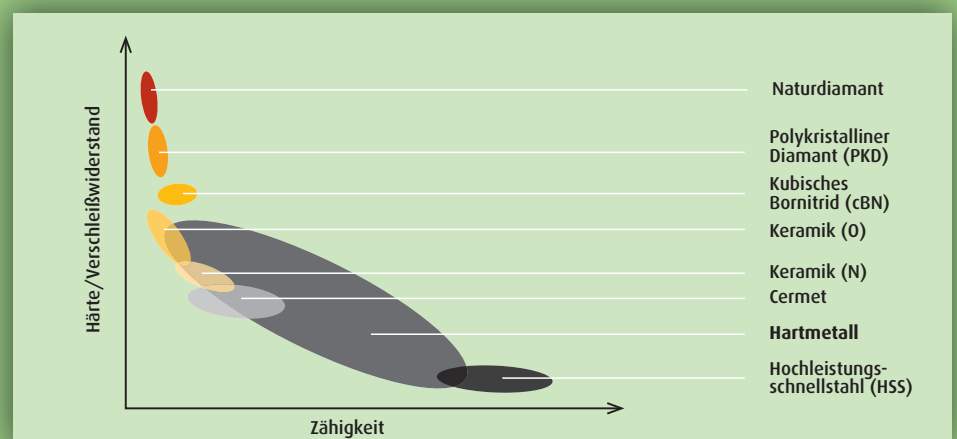


Tabelle 1 | Kennbuchstaben für die verschiedenen Werkstoffgruppen nach DIN ISO 513 [3]

Hartstoff	Kennbuchstaben	Werkstoffgruppe
Hartmetalle (Carbide)	HW	Unbeschichtetes Hartmetall, Hauptbestandteil Wolframcarbid (WC), Korngröße $\geq 1 \mu\text{m}$
	HF	Unbeschichtetes Hartmetall, Hauptbestandteil Wolframcarbid (WC), Korngröße $< 1 \mu\text{m}$
	HT (Cermets)	Unbeschichtetes Hartmetall, Hauptbestandteil Titancarbid (TiC) oder -nitrid (TiN) oder beide
	HC	Hartmetalle wie oben, jedoch beschichtet
Schneidkeramik	CA	Schneidkeramik, Hauptbestandteil Aluminiumoxid
	CR	Schneidkeramik, Hauptbestandteil Aluminiumoxid, verstärkt
	CM	Schneidkeramik, Hauptbestandteil Aluminiumoxid, zusammen mit anderen Bestandteilen aus Oxiden
	CN	Siliziumnitrid-Keramik, Hauptbestandteil Siliziumnitrid
	CC	Schneidkeramik wie oben, jedoch beschichtet
Diamant	DM	Monokristalliner Diamant
	DD	Polykristalliner Diamant ohne Bindemittel
	DP	Polykristalliner Diamant mit Bindemittel
Bornitrid	BL	Kubisch-kristallines Bornitrid mit niedrigem Bornitridgehalt
	BH	Kubisch-kristallines Bornitrid mit hohem Bornitridgehalt
	BC	Bornitrid wie oben, jedoch beschichtet

Tabelle 2 | Zusammensetzung ausgewählter Werkzeugstähle [4]

Werkzeugstahl	1.6582 (34CrNiMo6)		1.2003 (75Cr1)		1.2235 (80CrV)		1.8159 (51CrV4)	
	Hammerbohrer		Sägeblätter		Sägeblätter		Sägeblätter	
Element	min. in %	max. in %	min. in %	max. in %	min. in %	max. in %	min. in %	max. in %
Fe	Rest	Rest	Rest	Rest	Rest	Rest	Rest	Rest
C	0,30	0,38	0,70	0,80	0,75	0,85	0,47	0,55
Si	0,00	0,30	0,25	0,50	0,15	0,35	0,00	0,40
Mn	0,50	0,80	0,60	0,80	0,30	0,50	0,70	1,10
P	0,000	0,025	0,000	0,03	0,000	0,025	0,000	0,035
S	0,00	0,025	0,000	0,03	0,000	0,025	0,000	0,035
Cr	1,30	1,70	0,30	0,40	0,40	0,60	0,90	1,20
Ni	1,30	1,70	-	-	-	-	-	-
Mo	0,15	0,30	-	-	0,00	0,10	-	-
V	-	-	-	-	0,15	0,25	0,10	0,25

Eine Einteilung von Schneidstoffen, z. B. für die Metallzerspanung, nimmt unter anderen die Norm DIN ISO 513 [3] vor. Hier werden alle gängigen Hartstoffe durch einen Kennbuchstabencode eindeutig beschrieben.

Tabelle 1 gibt die Kennbuchstaben für Hartmetalle, Schneidkeramiken, Diamant und Bornitrid an. Für eine eindeutige Bezeichnung sieht die Norm zudem die Angabe der Zerspanungshauptgruppe (P: Stahl, M: Nichtrostender Stahl, K: Gusseisen, N: Nichteisenmetalle, S: Speziallegierungen und Titan, H: harte Werkstoffe) und der Anwendungsgruppe (01, 05, 10, ... 50 (01: hohe Verschleißfestigkeit, 50: hohe Zähigkeit) vor, z. B. HW-P10 oder HC-K20.

2.2 Trägerwerkstoffe

Die verschiedenen Schneidstoffe werden in der Regel auf Stähle verschiedener Qualitäten gelötet. Vier Beispiele für niedriglegierte Werkzeugstähle, wie sie unter anderem für hartmetallbestückte Sägeblätter eingesetzt werden, sind in **Tabelle 2** dargestellt. Anhand der allgemein eingesetzten Qualitäten

kann in der Regel davon ausgegangen werden, dass diese lötgeeignet sind. Sollten höher legierte Stahlsorten zum Einsatz kommen, kann das Benetzungsverhalten durch Anpassung des eingesetzten Flussmittels verbessert werden. Zu beachten ist, dass die Stähle im Vergleich zu den eingesetzten Schneidstoffen häufig eine höhere Zähigkeit aufweisen. Dies sowie die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten müssen bei der Auslegung des zu lötenen Bauteils sowie der Wahl des optimalen Lotwerkstoffes beachtet werden.

2.3 Herausforderungen an das Fügen

Eine Herausforderung beim Fügen von Schneidstoffen an Stählen sind thermisch induzierte Spannungen im Fügeverbund, die häufig für ein vorzeitiges Versagen verantwortlich sind. Grund dafür sind unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten der Fügepartner, wie in **Tabelle 3** dargestellt. Wenn das Lot erstarrt ist, sind beide Partner fest miteinander verbunden. Wenn

die Temperatur weiter sinkt, ziehen sich Stahl und Schneidstoff unterschiedlich stark zusammen, da sie aber aneinandergelötet sind, können sie nicht frei schrumpfen. Der Stahl wird somit daran gehindert, sich zusammenzuziehen, und es kommt in der Nähe des Fügebereichs zu inneren Zugspannungen im Stahl. Der sich nicht so stark zusammenziehende Schneidstoff hingegen wird gestaucht, was zu Druckspannungen führt. Zusätzlich tritt eine Biegebeanspruchung im Schneidstoff auf, die zu erhöhten Zugspannungen an der Oberfläche des Schneidstoffes führt und wodurch Risse entstehen können. Die Größe der thermisch induzierten Spannungen kann aus dem E-Modul, Wärmeausdehnungskoeffizienten, der Dicke der Werkstücke und der Solidustemperatur des Lotes rechnerisch für jede Werkstoffkombination bestimmt werden. Ein Beispiel ist im **Kapitel 4.1.2** aufgeführt [5].

Allgemein gilt, wie für jede Lötung, auch beim Löten von Werkzeugen, dass die zu fügenden Oberflächen möglichst oxid- und fettfrei sein sollten.

Tabelle 3 | Thermische Ausdehnungskoeffizienten verschiedener Werkzeugmaterialien

Werkzeugmaterial	Thermischer Ausdehnungskoeffizient [$10^{-6}K^{-1}$]
Hartmetall	5 – 7
Oxidkeramik	6 – 13
Cermet	7 – 10
Diamant	2 – 4
Bornitrid	5
Niedriglegierter Stahl	11 – 14

3. Lotwerkstoffe, Flussmittel und Erwärmungsmethoden

Lotwerkstoff, Flussmittel und Erwärmungsmethoden müssen passend zur Zusammensetzung und Geometrie des zu lötenden Werkzeugs sowie den späteren Einsatzbedingungen ausgewählt werden, um eine qualitativ hochwertige Lötverbindung zu erreichen.

Tabelle 4 | Hartlotgruppen mit Haupt- und Nebenlegierungselementen; hervorgehobene Hartlotgruppen werden für das Löten von Werkzeugen eingesetzt [6]

Hartlotgruppe	Hauptlegierungselemente	Nebenlegierungselemente
Silber	Ag, Cu, Zn, Sn	Mn, Ni, Si
Kupfer	Cu, Sn, Zn, Si, Mn, Ni	Ag, Cu ₂ O, Fe, P
Nickel	Ni, Cr, B, P, Si	C, Co, Cu, Fe, Mo, Nb, W
Aluminium	Al, Si, Cu, Zn	Bi, Fe, Mg, Ti
Magnesium	Mg	Be, Mn, Zn
Kupfer-Phosphor	Cu, P, Ag, Sn	Ni, Sb, Si
Kobalt	Co, Cr, Ni, Si	B, W
Palladium	Pd, Ag, Cu	Mn, Ni, Co
Gold	Au, Cu, Ni, Pd	Ag, Co, Fe

Abbildung 3 | Modell der Schichten
am Produkt BrazeTec 49/Cu



3.1 Lotwerkstoffe

Beim Löten von Werkzeugen werden aufgrund ihrer Festigkeit vor allem Hartlote eingesetzt. Die Liquidustemperatur dieser Lote liegt über 450 °C. Grundsätzlich stehen die verschiedensten Lotlegierungen zur Verfügung, deren Basis durch verschiedene metallische Elemente bestimmt ist. Definiert werden diese Gruppen durch die Norm DIN EN ISO 17672 [6]. In **Tabelle 4** sind die Haupt- und Nebenlegierungselemente der verschiedenen Hartlotgruppen aufgeführt. Die für das Löten von Werkzeugen eingesetzten Hartlotgruppen Silber, Kupfer und Nickel sind in der Tabelle hervorgehoben. Weiterhin kommen für das Löten von Werkzeugen, an

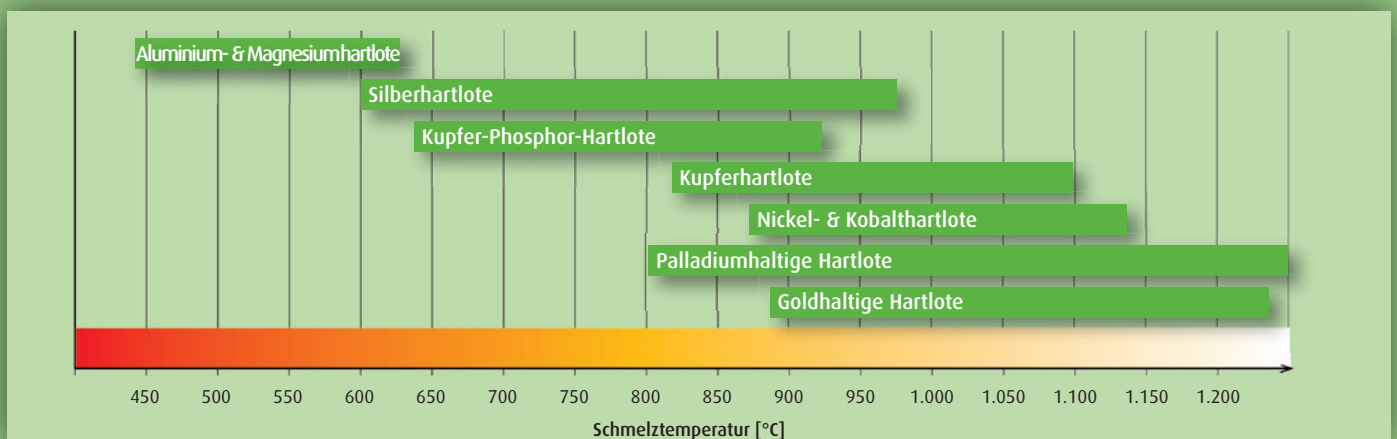
denen z. B. Keramiken, Diamanten oder kubisches Bornitrid (cBN) zu fügen sind, Aktivlote auf Silber-Kupfer-Basis mit Titan als Aktivelement zum Einsatz. In Abhängigkeit von der Zusammensetzung besitzen die einzelnen Hartlotgruppen, wie **Abbildung 2** zu entnehmen ist, verschiedene Liquidustemperaturen, die sowohl beim Lötprozess als auch für den Einsatz beachtet werden müssen.

3.1.1 Silberbasislote

Silberbasislote besitzen recht niedrige Schmelztemperaturen im Bereich zwischen 600 °C und 970 °C. Durch die so möglichen niedrigen Löttemperaturen werden die Grundwerkstoffe thermisch gering belastet und auch das Eigenspannungsniveau in dem

Bauteil ist niedriger. Silberhartlote enthalten neben Silber häufig Kupfer und Zink. Durch den Zusatz von Nickel und Mangan kann die Benetzung, u. a. von schwerbenetzbaren Carbiden, verbessert sowie die Festigkeit erhöht werden. Eine Sonderform der Silberbasislote sind die Schichtlote, die aus einer beidseitig mit Hartlot plattierten Kupferfolie bestehen (**Abbildung 3**). Durch die hohe Duktilität des Kupfers können beim Abkühlen entstehende Eigenspannungen durch plastische Verformung abgebaut werden [1]. Werkzeuglötungen mit Silberloten werden überwiegend an Luft, induktiv oder mit Flamme, unter dem Zusatz von Flussmitteln durchgeführt.

Abbildung 2 | Hartlotgruppen nach DIN EN ISO 17672 [7]



3.1.2 Kupferbasishartlote

Die Gruppe der Kupferhartlote, welche beim Löten von Werkzeugen zum Einsatz kommen, weist Schmelztemperaturen im Bereich zwischen ca. 970 °C und ca. 1.100 °C auf, also wesentlich höhere Temperaturen als Silberbasislote. Dementsprechend werden höhere thermisch induzierte Spannungen erzeugt, die die Festigkeit des Verbundes reduzieren können. Kupferhartlote werden meist im Ofen in reduzierenden Schutzgasen bzw. im Vakuum verwendet. Um die Festigkeit der Kupferhartlote zu erhöhen, wird Nickel hinzulegiert. Durch die weitere Zugabe von Mangan zu Kupfer kann die Löttemperatur gesenkt und die Benetzungseigenschaften auf Stählen positiv beeinflusst werden [8].

Weitverbreitet ist des Weiteren das Zulegieren von Phosphor (z. B. Kupfer-(Silber)-Phosphor-Hartlote). Diese Hartlote besitzen deutlich niedrigere Schmelztemperaturen im Vergleich zu den vorher beschriebenen Kupferbasishartloten im Bereich zwischen 645 °C und 920 °C. Zum Löten von z. B. eisen- oder nickelhaltigen Materialien, wie in der Werkzeugindustrie üblich, sollte von diesen phosphorlegierten Hartloten dringend Abstand genommen werden, da es während des Lötvorgangs durch Diffusionsvorgänge zu der

Ausbildung von Eisenphosphid-Phasen kommt. Diese bilden sich in der Regel in der Fügeebene nahe des eisenhaltigen Grundwerkstoffes aus. Diese Phasen sind spröde und verringern die Festigkeit in der Fügestelle drastisch.

3.1.3 Nickelbasislote

Wegen seiner hohen Schmelztemperatur wird reines Nickel nur selten zum Löten eingesetzt. Nickelbasislote, bei denen durch Zulegieren von Elementen wie Bor, Phosphor und Silizium zum Nickel niedrigschmelzende Hartlote erreicht werden, werden vielfältig eingesetzt. Nickelbasislote weisen, z. B. durch zusätzliche Elemente wie Chrom, eine hohe Festigkeit sowohl bei Raumtemperatur als auch bei hohen Temperaturen auf. Sie sind zudem oxidations- und korrosionsbeständig. Gelötet werden Nickelbasislote in trockenem Schutzgas oder im Vakuum. Die zulegierten Halbmetalle bilden zusammen mit Nickel und Chrom intermetallische Hartphasen, wodurch die Hartlote bzw. die damit hergestellten Lötverbindungen vergleichsweise spröde sind. Aus diesem Grund wird nach dem Lötprozess oft eine Wärmebehandlung der gelöteten Bauteile nachgeschaltet,

um durch Diffusion der Halbmetalle aus der Lötnaht hinaus eine höhere Zähigkeit der Verbindung zu erreichen [8]. Zudem verhindert die Sprödigkeit der Ausgangslegierung eine Applikation in Form von konventionellen Lotfolien, so dass Nickelbasislote vor allem in Pastenform eingesetzt werden.

3.1.4 Aktivlote

Aktivlote wurden entwickelt, um nichtmetallische, anorganische Werkstoffe, sprich Diamanten, cBN, Keramik o. ä., in einem einstufigen Verfahren, ohne vorherige Metallisierung, benetzen und damit löten zu können. Aktivlote basieren meist auf dem Silber-Kupfer-System und enthalten grenzflächenaktive Elemente wie Titan, Zirkonium, Niob oder Hafnium, wobei die Hartlote mit Titan industriell gesehen und speziell in der Werkzeugindustrie die gebräuchlichsten sind. Die grenzflächenaktiven Elemente reagieren mit dem nichtmetallischen Werkstoff, wodurch eine durch das restliche Hartlot benetzbare Reaktionsschicht entsteht. Damit diese Reaktion stattfinden kann, sind, selbst für vergleichsweise niedrigschmelzende Hartlote, Temperaturen von etwa 850 °C notwendig [9]. Je nach Fügepartner und

Tabelle 5 | BrazeTec-Flussmittel für die Werkzeugindustrie [18]

Flussmittel	DIN EN 1045	Farbe	Bemerkungen	Wirktemperaturbereich ca. [°C]
BrazeTec h 80	FH 10	weiß	Für große Flächen und kurze Lötzeiten; hervorragendes Fließverhalten	550 – 850
BrazeTec h 280	FH 10	weiß	Binderstabilisiert für automatische Applikation; für Co/Ni-beschichtete Hartmetalle.	520 – 850
BrazeTec spezial h	FH 12	braun	Paste; Universallflussmittel zum Löten von Hartmetallen; sehr lange Wirkdauer, gutes Fließverhalten	520 – 1.030
BrazeTec h 285	FH 12	braun	Binderstabilisiert für automatische Applikation	520 – 910
BrazeTec h 90	FH 12	braun	Pulver; chemisch aktiviert zum Löten von schwer benetzbaren Hartmetallen (TiC; TaC; geringer Metallgehalt)	520 – 850
BrazeTec h 900	FH 12	braun	Binderstabilisiert für automatische Applikation	520 – 850
BrazeTec spezial s	FH 20	braun	Paste; für höhere Löttemperaturen	650 – 1.050

verwendetem Aktivlot sind aber auch Löttemperaturen von ca. 1.050 °C nicht unüblich. Zu beachten ist, dass Aktivlote mit niedrigem Titangehalt kaum fließen, sondern den Grundwerkstoff in der Regel nur dort benetzen, wo sie als Folie oder Paste vor dem Lötprozess appliziert wurden.

3.2 Flussmittel

Hartlötlösungsmittel sind anorganische Salzmischungen, die die Aufgabe haben, vorhandene Oxidschichten von der Lötfläche zu entfernen und ihre Neubildung zu verhindern. Zu diesem Zweck müssen die Flussmittel bei relevanten Temperaturen flüssig sein, sich gut auf dem Grund- oder Lotwerkstoff verteilen und leicht vom flüssigen Lot verdrängt werden können. In der Norm DIN EN 1045 [10] sind die Flussmittel aufgeführt, die zum Hartlöten eingesetzt werden können. Es werden Flussmittel der Klasse FH, die zum Löten von Schwermetallen (Stähle, rostfreie Stähle, Kupfer und Kupferlegierungen, Nickel und Nickellegierungen, Edelmetalle, Molybdän und Wolfram) verwendet werden und Flussmittel der Klasse FL zum Löten von Aluminium und Aluminiumlegierungen unterschieden. Beim Einsatz der Flussmittel ist zu beachten, dass diese häufig Verbindungen

auf Bor- und Fluorbasis enthalten, die nach dem Löten entfernt werden müssen, da sie hygroskopisch sind und korrosiv wirken können. Die in **Tabelle 5** aufgeführten Flussmittel für das Löten von Schwermetallen, insbesondere Hartmetallen, wirken alle korrosiv. Bei dem Hartlöten von Werkzeugen kommt zusätzlich lediglich vereinzelt der Typ FH 21 zum Einsatz. Dieser ist im Allgemeinen nicht korrosiv und kann nach dem Löten auf dem Werkstück verbleiben. Braune Flussmittel der Gruppe FH 12 (z. B. BrazeTec spezial h) enthalten reines Bor, das insbesondere beim Löten von Hartmetallen vorteilhaft ist. Zur Automatisierung der Lotapplikation über Dispenser können binderstabilisierte Flussmittel, wie z. B. BrazeTec h 280 Paste, BrazeTec h 285 Paste und BrazeTec h 900 Paste eingesetzt werden.

3.3 Erwärmungsmethoden

Für das Löten von Werkzeugen kommen vor allem die drei Erwärmungsmethoden Induktion, Flamme und Ofen zum Einsatz. Die Auswahl der Erwärmungsmethoden kann nach verschiedenen Kriterien erfolgen, wie z. B. nach Erwärmungsgeschwindigkeit, Lokalität und Homogenität der Erwärmung sowie Einstellbarkeit des Temperaturprofils. Die Ge-

schwindigkeit der Erwärmung hängt u. a. von der Leistungsübertragung an das Bauteil ab. Diese ist je nach Erwärmungsart, wie in **Tabelle 6** dargestellt, sehr unterschiedlich.

3.3.1 Induktive Erwärmung

Beim Erwärmen mittels Induktion kann, wie **Tabelle 6** zu entnehmen ist, eine hohe Leistung berührungslos auf das Bauteil übertragen werden.

Vorteile des Verfahrens sind kurze Prozesszeiten, da die Wärme direkt im Werkstück erzeugt wird und nicht übertragen werden muss. Zudem kann die Erwärmung lokal erfolgen, so dass Verzug größerer Bauteile vermieden werden kann. Zu beachten ist, dass nur der Bereich, um den der Induktor liegt, auch erwärmt wird. Bei baugleichen Werkstücken ist das Verfahren sehr reproduzierbar. Beim Löten von Verbunden mit ungleichen Partnern, z. B. Stahl-Hartmetall-Verbunden, muss beachtet werden, dass die unterschiedlichen Werkstoffe im unterschiedlichen Ausmaß einkoppeln, was eine unterschiedlich starke Erwärmung selbiger zur Folge hat. Diesem Umstand muss durch entsprechende Anpassung des Prozesses (z. B. Induktorausbildung, Induktorpositionierung und Prozesszeit) Rechnung getragen werden.

Tabelle 6 | Möglicher Leistungsübertrag bei verschiedenen Erwärmungsarten [11]

Erwärmungsart	Möglicher Leistungsübertrag [W/cm²]
Konvektion	0,5
Strahlungswärme	8
Wärmeleitung	20
Brennerflamme	1.000
Induktionserwärmung	30.000
Laser (CO ₂)	100.000.000
Elektronenstrahl	10.000.000.000

Wie in **Abbildung 4** gezeigt, wird ein Induktor verwendet, um durch ein elektromagnetisches Wechselfeld im Bauteil hohe Wirbelströme I zu induzieren. Durch den elektrischen Widerstand R erwärmt sich das Bauteil in der Zeit t durch die entstehende Wärmemenge Q entsprechend des Jouleschen Gesetzes:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t$$

Der elektrische Widerstand R des Materials bestimmt dabei die Aufheizgeschwindigkeit.

Zu beachten ist weiterhin der Skin-Effekt, durch den Wechselströme höherer Frequenz hauptsächlich an der Oberfläche des leitenden Bauteils fließen. Der weitere Wärmetransport in die Mitte des Bauteils geschieht über Wärmetransport. Je höher die Frequenz des Wechselfeldes, desto schmaler ist der Oberflächenbereich, der erwärmt wird. Dies kann durch folgende Gleichung abgeschätzt werden:

$$d = V \cdot f^{-\frac{1}{2}}$$

Wobei gilt:

d : erwärmter Bereich

f : Frequenz in Hz

V : material- und temperaturabhängige Variable bzgl. der magnetischen Eigenschaften des Werkstoffes (z. B. $V = 0,17$ für kalten Stahl, $V = 6,0$ für heißen Stahl $> 800\text{ °C}$ und

$V = 1,8$ für ein Hartmetall WC-4Co) [12].

Beispiel:

Eine Stahlprobe wird bei 800 °C durch ein Wechselfeld mit einer Frequenz von 50 Hz noch bis in ca. 90 mm Tiefe erwärmt. Bei einer Frequenz von 1 MHz nur noch bis ca. $0,65\text{ mm}$ [12].

Wie in obiger Beziehung aufgezeigt, ändert sich der einzusetzende Faktor für Stahl (und auch andere ferromagnetische Stoffe wie Kobalt oder Nickel) beim Erhitzen über ca. 800 °C . Begründet ist dies durch die Curie-Temperatur, bei welcher der Übergang von dem ferromagnetischen Zustand des Grundwerkstoffes zum paramagnetischen Zustand stattfindet. Wird diese Temperatur überschritten, verhält sich der betreffende Werkstoff ausschließlich paramagnetisch.

3.3.2 Erwärmung mit Flamme

Beim Flammlöten wird eine neutrale oder eine leicht reduzierende Flamme [13] eingestellt, die innerhalb der Wirkdauer des Flussmittels die Fügefläche auf Löttemperatur bringen muss [7]. Bei größeren Bauteilen kann, auch um eine homogene Erwärmung zu gewährleisten, ein mehrflämmiger Brenner eingesetzt werden, der zudem noch bewegt wird [12]. Das Verfahren bietet Vorteile im Vergleich zum Induktionslöten von Stahl-Hartmetall-Verbunden, da das Hartmetall

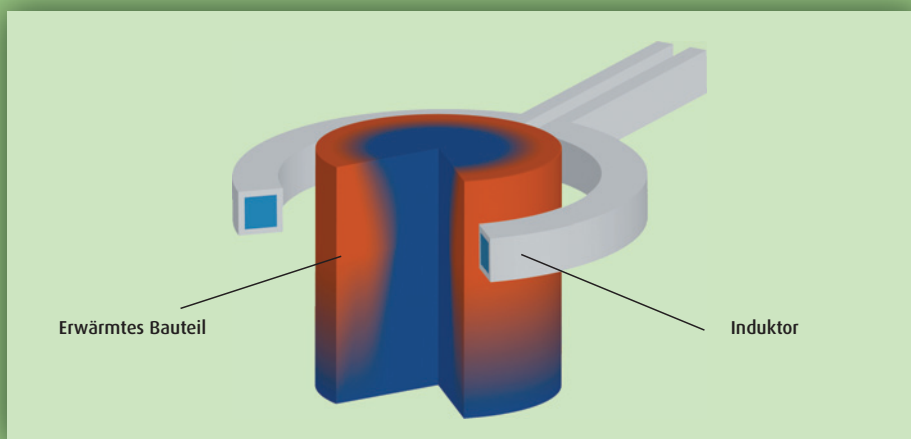
hier ebenfalls direkt und nicht nur indirekt durch Wärmeleitung vom metallischen Fügepartner erwärmt werden kann. Es ist im Vergleich zu Ofenlötungen schneller und kann ebenfalls lokal angewendet werden, wobei der Erwärmungsbereich größer als beim Induktionslöten ist.

3.3.3 Ofenerwärmung

Bei elektrisch beheizten Öfen werden die Bauteile vor allem durch Strahlungswärme, aber auch durch Konvektion und Wärmeleitung erwärmt. Im Vergleich zu einer offenen Flamme oder Induktion wird dabei, wie in **Tabelle 6** gezeigt, relativ wenig Leistung übertragen, so dass Ofenprozesse langsamer sind. Vorteilhaft beim Ofenlöten ist die homogene Temperaturverteilung, die sich durch die gleichmäßig angeordneten Heizelemente ergibt, sowie die Möglichkeit einer kontrollierten Atmosphäre, d. h. Vakuum oder Schutzgas. Zudem ist eine Kontrolle und Steuerung der Prozessparameter leicht möglich und in einem Lötprozess können eine Vielzahl von Werkzeugen gleichzeitig gefügt werden.

Zusätzlich muss darauf geachtet werden, dass sich einige Hartlotgruppen nicht für die Verwendung im Ofen eignen, da sich durch erhöhte Dampfdrücke der Legierungsbestandteile (z. B. Zink) Verunreinigungen im Ofen abscheiden können.

Abbildung 4 | Schematische Darstellung der Erwärmung mittels Induktion



4. Löten verschiedener Schneidstoffe

Hartmetalle, Cermets, Diamanten, kubisches Bornitrid oder Keramik haben entsprechend ihrer jeweiligen Beschaffenheit spezielle Anforderungen an den Fügeprozess und die Lotauswahl.

4.1 Hartmetall

Hartmetalle werden vielfältig als Schneidstoffe eingesetzt. Aufgrund ihrer Härte und Temperaturbeständigkeit eignen sie sich hervorragend zum Fräsen, Drehen, Bohren und Sägen von Metallen, Holz, Kunststoff und anderen Werkstoffen. Hartmetalle bestehen nicht, wie ihr Name vermuten lässt, aus besonders harten Metallen, sondern sie sind vielmehr ein Sinterwerkstoff, der aus einer Hartphase (meist Carbide) besteht, die in einem metallischen Binder eingebettet ist. Wie schon aus **Tabelle 1** erkennbar ist, wird vor allem Wolframcarbide als Hartphase eingesetzt. Als Bindermatrix kommt in der Regel Kobalt, aber auch Nickel und/oder Eisen zum Einsatz. Hartmetalle, bei denen ein Teil des Wolframcarbids durch Titan-, Tantal- und/oder Niobcarbiden ersetzt ist, werden als P-Hartmetall bezeichnet. Wird als Hartphase hauptsächlich ein Titancarbonitrid in eine metallische Matrix eingebettet,

werden diese Schneidstoffe Cermets genannt. Der Anteil der metallischen Matrix, d.h. der Binderanteil in einem Cermet liegt bei ca. 8 % – 15 %.

Die Leistung von Hartmetall-Schneiden hängt sehr stark von ihrer Zusammensetzung und Mikrostruktur, z. B. der eingesetzten Carbide, der Korngröße und dem Binderanteil, ab. Idealerweise sollte die Mikrostruktur eines Hartmetalls nur aus zwei Phasen bestehen, dem eckigen Carbide und dem Binder. Eine zu hohe Temperatur kann, unter Auflösung der ursprünglichen Carbide, zur Bildung verschiedener komplexer Carbide, unter anderem einer spröden η -Phase, führen. Um eine höhere Zähigkeit zu erreichen, wurden Carbide mit Korngrößen im Submikrometerbereich durch Zusatz von anderen Carbiden, wie z. B. Tantal- oder Niobcarbide, entwickelt. Der Bindermatrix können verschiedene Metalle zugesetzt werden (Kobalt, Nickel, Eisen,

Chrom), wobei Nickel und Chrom im Speziellen durch die Ausbildung einer passivierenden Oxidschicht auf der Oberfläche zu erhöhter Korrosions- und Oxidationsstabilität führen [12] [15] [16].

Der Einfluss des Kobaltgehaltes und der Korngröße des verwendeten Wolframcarbides ist in **Abbildung 5** exemplarisch zusammengefasst. Hierbei ist die Härte als der Widerstand definiert, den ein anderes Material aufbringen muss, um in die Probe einzudringen. Die Biegebruchfestigkeit beschreibt die Widerstandsfähigkeit des Materials gegenüber äußeren Belastungen und den damit verbundenen Spannungen und Dehnungen. Die Bruchzähigkeit eines Materials drückt den Widerstand gegen Rissausbreitung aus.

Die Korngrößen in gesinterten Hartmetallstrukturen liegen in der Regel zwischen 0,2 μm und 10 μm . Der Bindergehalt kann, je nach Sorte, von ca. 2 % bis 30 % variieren [1] [17].

Abbildung 5 | Eigenschaften von Hartmetallen in Abhängigkeit von Kobaltgehalt und Wolframcarbide-Korngröße [17]

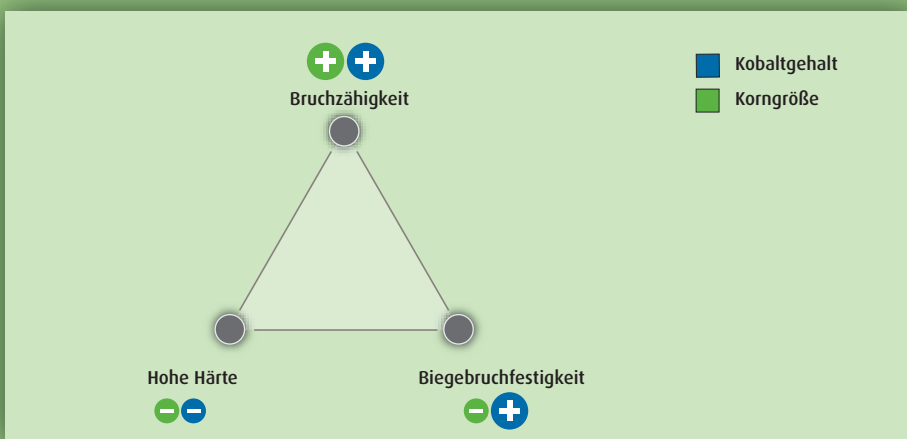




Abbildung 6 | Standardlieferformen für BrazeTec Silberbasislote

4.1.1 Löten von Hartmetallen und Cermets

Aufgrund ihres hohen nichtmetallischen Anteils sind Hartmetalle im Allgemeinen und Cermets im Besonderen mit konventionellen Hartloten schwer zu löten. Zudem müssen metallurgische Wechselwirkungen zwischen der metallischen Bindermatrix und dem Carbid sowie die Ausbildung thermisch induzierter Spannungen durch die Kontrolle des Lötprozesses reduziert werden. Um die Benetzung der Hartmetalloberfläche durch das Hartlot zu verbessern, werden diese in einigen Fällen durch Sandstrahlen bearbeitet. Zusätzlich kann die Benetzbarkeit von Hartmetallen durch eine galvanisch aufgebraute Kobalt- oder Nickelschicht deutlich verbessert werden.

Dies gilt insbesondere für Hartmetalle mit einem sehr geringen Metallbinderanteil. Die genannten Metallbeschichtungen haben noch einen weiteren wichtigen Effekt: Sie verhindern die Oxidation von Hartmetallen während der Aufheizphase im Lötprozess [18]. Als Hartlote werden vor allem Silberbasishartlote verwendet, die einen niedrigen Schmelzbereich aufweisen und ohne besondere Flussmittel bzw. Verfahren verarbeitet werden können. Durch Zugabe von Nickel und Mangan kann die Benetzung, insbesondere von schwer benetzbaren Carbiden wie Titancarbid, verbessert werden. Neben den Silberbasisloten werden auch einige Kupferhartlote eingesetzt [1] [12]. Beispiele sind in **Tabelle 7** aufgeführt. Eine Besonderheit sind Schichtlote, die aus einer mit Hartlot plattierten Kupferfolie bestehen.

Die Silberbasishartlote werden häufig mit Flussmittel mittels induktiver Erwärmung an Luft verarbeitet. Eingesetzt werden hier Universalflussmittel des Typs FH 10, aber je nach Fügeparameter auch spezielle Flussmittel des Typs FH 12 nach DIN EN 1045 [18]. Details können **Tabelle 5** entnommen werden. Flammlötungen sind eher selten. Von Ofenlötungen bei der Verwendung von Silberhartloten ist in der Regel abzuraten, da es durch die im Vergleich zum Induktionslöten langen Prozesszeiten zum Abdampfen des im Hartlot enthaltenen Zinks kommen kann. Geeignet ist hierfür hingegen das zinkfreie Spezialhartlot BrazeTec 6488. Lötverbindungen, die unter Verwendung von Silberbasishartloten hergestellt wurden, können je nach erreichter Qualität der Lötung Scherfestigkeiten von etwa 150 MPa – 300 MPa erreichen [22].

Tabelle 7 | Hartlote zum Hartmetalllöten; Löttemperatur und Zusammensetzung [29]

Hartlot	ISO 17672	Bemerkung	Schmelzbereich nach ISO 17672 etwa [°C]	Schmelzbereich nach DSC ¹⁾ etwa [°C]	Löttemp. etwa [°C]	Scherfestigkeit ²⁾ [MPa]	Zusammensetzung in Gew.-%					
							Ag	Cu	Zn	Mn	Ni	Andere
BrazeTec 6488	-	Zn-freies Lot; Geeignet für TiN-Beschichtungen und Edelstahl	-	730 – 780	770	> 150	64	26	-	2	2	6 In
BrazeTec 5081	Ag 450	Manganfreies Werkzeuglot	660 – 705	670 – 730	700	> 230	50	20	28	-	2	-
BrazeTec 4900	Ag 449	Meist benutztes Werkzeuglot, Universallot	680 – 705	680 – 705	690	> 250	49	16	23	7,5	4,5	-
BrazeTec 4900A	-	Breiterer Schmelzbereich als BrazeTec 4900	-	670 – 720	710	> 240	49	27,5	20,5	2,5	0,5	-
BrazeTec 2700	Ag 427	Geringer Ag-Gehalt, hohe Löttemperatur	680 – 830	690 – 850	800	> 250	27	38	20	9,5	5,5	-
BrazeTec 21/80	Cu 595	Zn-frei für Ofenlötung	965 – 1.000	970 – 1.005	990	> 200	86	-	12	2	-	-
BrazeTec 21/68	-	Zn-frei für Ofenlötung	-	980 – 1.020	1.020	> 200	87	-	10	-	-	3 Co

$$\Delta l_{St} = \alpha_{St} * L_{0,St} * \Delta T = 14 * 10^{-6} K^{-1} * 25 \text{ mm} * (680 - 20) K = 0,23 \text{ mm}$$

Formel 1 | Berechnung der Längenausdehnung im Stahl bei einer Lot-Solidustemperatur von 680 °C

$$\Delta l_{HM} = \alpha_{HM} * L_{0,HM} * \Delta T = 4,7 * 10^{-6} K^{-1} * 25 \text{ mm} * (680 - 20) K = 0,08 \text{ mm}$$

Formel 2 | Berechnung der Längenausdehnung im Hartmetall bei einer Lot-Solidustemperatur von 680 °C

Eine weitere Hartlotgruppe zum Löten von Hartmetallen bilden Kupfer-Mangan-Hartlote. Mit diesen Hartloten werden hohe Stückzahlen an Hammer- oder Schlagbohrern, Gesteinsmeißel und Gesteinsbohrer hergestellt. Gelötet wird hierbei bei ca. 1.000 °C. Die im Vergleich zu den Silberbasishartloten hohe Löttemperatur der Hartlote bedingt eine strenge Einhaltung der Lötprozessparameter, um die Bildung spröder Phasen und hohe thermisch induzierte Spannungen im Verbund zu vermeiden. Die Hartlote werden vornehmlich in Schutzgasöfen oder Vakuumöfen, aber auch induktiv verarbeitet.

4.1.2 Thermische Effekte und Spannungszustände

Wie schon in **Kapitel 2.3** erwähnt, treten beim Fügen von Schneidstoffen an Stahl

thermisch induzierte Spannungen auf. Grund dafür sind die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Fügepartner. Der Ausdehnungskoeffizient des Hartmetalls liegt zwischen 5 und $7 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ und des Stahls zwischen 11 und $14 \cdot 10^{-6} K^{-1}$. Das bedeutet, dass sich der Stahl mehr als zweimal so stark ausdehnt und zusammenzieht wie das Hartmetall. Berechnet werden kann die Ausdehnung über folgende Gleichung:

$$\Delta l = \alpha * l_0 * \Delta T$$

Wobei gilt:

Δl : Längenänderung

α : linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient

l_0 : Ausgangslänge des Bauteils

ΔT : Temperaturdifferenz

Beim Abkühlen eines Lötverbundes aus einem Stahl (1.8159) und einem Hartmetall (K10) mit der Kantenlänge von 25 mm berechnet sich bei 680 °C (Solidustemperatur des Silberbasishartlotes BrazeTec 4900) und damit der Temperatur, ab der die Fügepartner fest miteinander verbunden sind, jeweils folgende Maßänderung mit der **Formel 1** für Stahl und der **Formel 2** für Hartmetall.

Die Längendehnungen der genannten Werkstoffpaarung unter Verwendung verschiedener Hartlotsysteme, und somit Solidustemperaturen, sind **Tabelle 8** zu entnehmen.

Tabelle 8 | Längenausdehnung von Grundmaterialien während des Fügeprozesses

Material		Stahl: 1.8159	Hartmetall: K10	Unterschied zwischen Stahl und Hartmetall
Dimension bei Raumtemperatur	[mm]	25	25	0,0
Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient α (alpha)	[$10^{-6} K^{-1}$]	14	4,7	8,3
Dimension bei $T_{Sol. BrazeTec 4900} = 680 \text{ °C}$	[mm]	25,23	25,08	0,15
Dimension bei $T_{Sol. BrazeTec 21/68} = 980 \text{ °C}$	[mm]	25,34	25,11	0,23
Dimension bei $T_{Sol. E-Cu 58} = 1.083 \text{ °C}$	[mm]	25,37	25,13	0,24

$$\frac{1}{R} = \frac{(\alpha_{St} - \alpha_H) * \Delta T}{\frac{2}{h_{HM} + h_{St}} \frac{l_{HM}}{A_{HM}} \left(1 + \frac{l_{St} * E_{St}}{l_{HM} * E_{HM}}\right) \left(1 + \frac{A_{HM} * E_{HM}}{A_{St} * E_{St}}\right) + \frac{h_{HM} + h_{St}}{2}}$$

Formel 3 | Berechnung der Krümmung des Verbundes

Solange die Fügepartner nicht fest miteinander verbunden sind, wie in **Abbildung 7** ganz links dargestellt, können sie sich frei und spannungsfrei ausdehnen. Sobald das dazwischen deponierte Hartlot wieder erstarrt, können sich die Bauteile nicht mehr frei ausdehnen. Da das Hartmetall sich weniger stark zusammenzieht, werden durch eine Art Bimetalleffekt Zugspannungen durch den Stahl auf das Hartmetall übertragen. Da Hartmetalle empfindlich gegenüber Zugspannungen sind, kann es letztlich zu einer irreversiblen Schädigung des Hartmetalls kommen, welches sich durch Risse zeigt. Es wird entsprechend früher oder später zum Ausfall des Hartmetalls im Betrieb kommen [18]. Durch Simulation des Abkühlprozesses einer Stahl-Hartmetall-Probe, **Abbildung 7**,

rechts, konnte ebenfalls gezeigt werden, dass sich die größten Spannungen an der Oberseite des Hartmetalls ausbilden, wo auch in der Realität Risse im Hartmetall ihren Ausgangspunkt finden. Bereiche ohne Zugspannung sind dunkelblau dargestellt, hohe Spannungen werden orangerot dargestellt.

Die entstehenden Zug- bzw. Druckspannungen in einem solchen Verbund können quantitativ über entsprechende vereinfachende Gleichungen näherungsweise berechnet werden. Hierbei wird der Bimetalleffekt zweier fest miteinander verbundener Grundwerkstoffe zugrunde gelegt, unter der Annahme, dass sich diese ideal elastisch verhalten.

Nach **Abbildung 8** in Verbindung mit [20] und [21] ergibt sich die Krümmung des betrachteten Systems aus **Formel 3**.

Die Zug- bzw. Druckspannungen in den Schichten errechnen sich aus:

$$\frac{1}{R} = \frac{M_{HM}}{l_{HM} * E_{HM}} = \frac{M_{St}}{l_{St} * E_{St}}$$

und

$$F_{ax} = (M_{HM} + M_{St}) \frac{2}{h_{HM} + h_{St}}$$

zu

$$\sigma_{max/min; i} = \sigma_{ax, i} \pm \sigma_{b max, i}$$

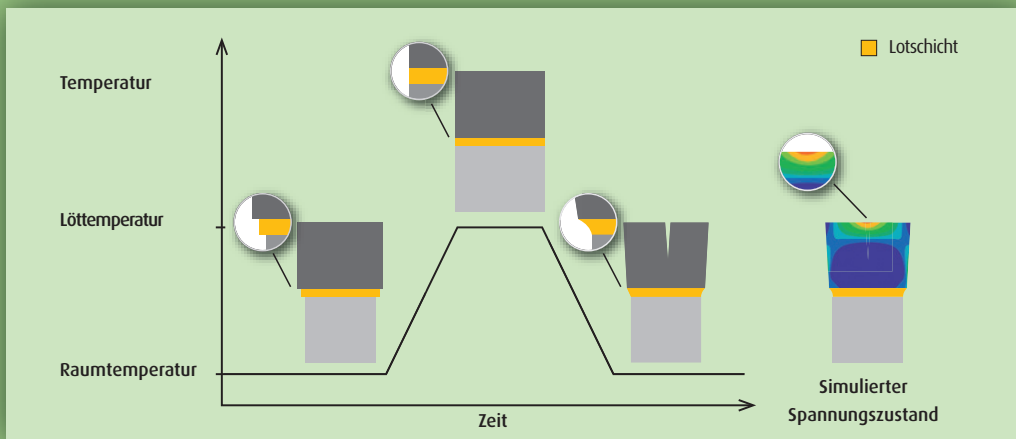
mit

$$\sigma_{ax, i} = \frac{F_{ax}}{A_i}$$

und

$$\sigma_{b max, i} = \frac{M_i h_i}{I_i 2}$$

Abbildung 7 | Schematische Darstellung zur Auswirkung unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten in einem Hartmetall-Stahl-Verbund, gelötet mit einem konventionellen Hartlot [18]



Für einen Verbund aus Stahl 1.8159 und Hartmetall K10 gilt:

$$\alpha_{HM} = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}; \alpha_{St} = 14 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

$$E_{HM} = 600 \text{ GPa}; E_{St} = 210 \text{ GPa}$$

$$L_0 = 1 \text{ mm}$$

$$h_{HM} = 1 \text{ mm}; h_{St} = 3 \text{ mm}$$

$$T_1 = \text{Solidustemperatur des Lotsystems}$$

$$T_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Unter den beschriebenen Randbedingungen errechnet sich für das niedrigschmelzende Silberhartlot BrazeTec 4900 (Solidustemperatur 680 °C) eine Zugspannung auf der Oberfläche des Hartmetalls von ca. 85 MPa.

Erhöht sich bei gleicher Grundwerkstoffpaarung die Solidustemperatur des Hartlotes auf 980 °C (BrazeTec 21/68), so steigt der Wert um ca. 50 % auf 120 MPa und bei 1.083 °C

(BrazeTec E-Cu 58) sogar um 60 % auf 135 MPa. Diesem Umstand der Zugspannungsänderung bei Veränderung des eingesetzten Hartlot-systems (**Abbildung 9**) muss in der Konstruktion Rechnung getragen werden.

Die aufgeführte Berechnung basiert auf einem Dickenverhältnis von 1 : 3 für Hartmetall : Stahl. Wird die Berechnung nach voriger Formel für weitere Dickenverhältnisse weitergeführt, so wird deutlich ersichtlich, dass dieses Verhältnis einen starken Einfluss darauf hat, ob auf der Oberfläche des Hartmetalls (im Falle eines Sägezahnes: auf die spanende Fläche) eine Zug- oder eine Druckspannung einwirkt (**Abbildung 9**).

Allgemein kann aus dem dargestellten Graphen näherungsweise abgeleitet werden, dass ein Dickenverhältnis von ca. 1 : 3 für Hartmetall : Stahl als ideal angesehen werden kann, da hier der Betrag der

Spannungen an der Hartmetalloberfläche nahe Null ist. Dem hingegen steht ein Zugspannungsmaximum bei einem Verhältnis von ca. 1 : 1. Dieses Verhältnis sollte somit unbedingt vermieden werden.

Ist ein Verbund durch solche thermisch induzierten Spannungen vorgespannt, reicht mitunter eine kleine Last von außen, um ein Versagen des Verbundes hervorzurufen. Deshalb sollte bei Stahl-Hartmetall-Verbunden darauf geachtet werden, ein Hartlot mit möglichst niedrigerer Löttemperatur einzusetzen, um das Niveau der thermisch induzierten Spannungen niedrig zu halten. Allgemein ist anzumerken, dass reale Zug- oder Druckspannungswerte im Betrag eher geringer ausfallen werden, da ein Teil der auftretenden Spannungen über das duktile Hartlot, das sich in der Verbindungsstelle befindet, abgebaut werden können.

Abbildung 8 | Darstellung des Bimetalleffekts von Stahl (unten) und Hartmetall (oben) unter thermischer Belastung [19]

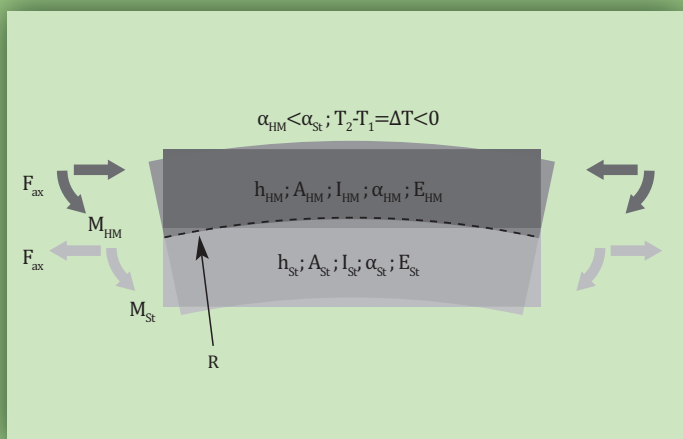
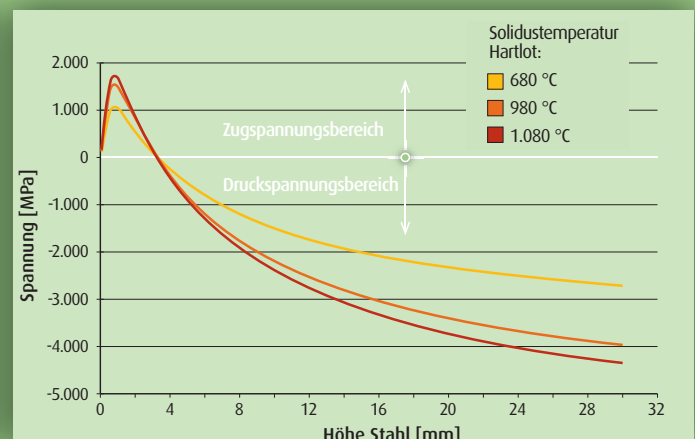


Abbildung 9 | Darstellung des Spannungszustandes in einer Hartmetalloberfläche bei einer Hartmetalldicke von 1 mm verbunden mit unterschiedlich hohen Stahlschichten



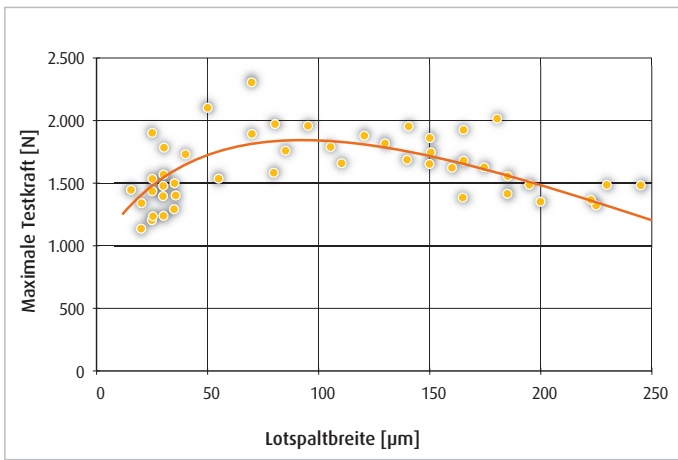


Abbildung 10 | Testkräfte in Abhängigkeit der Lotspaltbreite für das Hartlot BrazeTec 4900 [23]

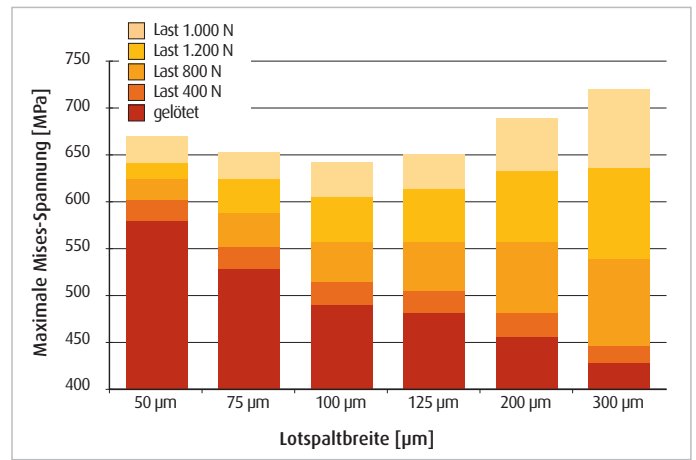


Abbildung 11 | Berechnete maximale Mises-Spannungen im Hartlot BrazeTec 4900 als Funktion der Testkraft und der Lotspaltbreite [23]

Wie bereits erwähnt, sollte zur Spannungsminimierung einerseits ein Hartlot mit möglichst geringer Solidustemperatur und andererseits eine breitere Lötnaht mit einem festen, gut verformbaren Hartlot verwendet werden, durch das die Spannungen durch plastische Verformung abgebaut werden können. Für zu lötende Flächen $< 100 \text{ mm}^2$ reichen Spaltbreiten zwischen $0,1 \text{ mm}$ bis $0,2 \text{ mm}$ aus [8] [5].

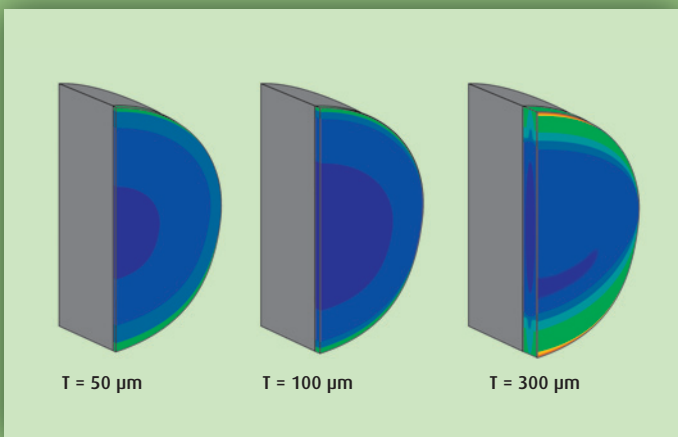
Untersuchungen mit dem Silberbasishartlot BrazeTec 4900 haben gezeigt, dass die maximalen Testkräfte mit einer vergleichsweise geringen Streuung bei Biegebeanspruchung

bei Spaltbreiten um 100 µm erreicht werden. Die Werte fallen bei Spaltbreiten $< 70 \text{ µm}$ bzw. $> 125 \text{ µm}$ ab (Abbildung 10). Dieser Verlauf ergibt sich aus den Spannungen, die im Hartlot vorliegen. Wie Abbildung 11, insbesondere die Berechnung für den reinen gelöteten Zustand, zeigt, nimmt die Spannung im Hartlot einerseits mit steigender Spaltbreite ab. Andererseits muss das Hartlot bei größerer Spaltbreite mehr Spannungen aufnehmen, wenn die Verbindung von außen belastet wird. So ergibt sich bei etwa 100 µm Spaltbreite ein Spannungsminimum, das mit den hohen Festigkeitswerten in Abbildung 10 korreliert. Auch in Abbildung 12 kann beob-

achtet werden, dass die Spannungen im Hartlot bei einer Belastung von 1500 N bei einer Spaltbreite von 100 µm am geringsten sind. Insbesondere bei einer Lötspaltbreite von 300 µm sieht man deutlich das höhere Spannungsniveau vor allem am Rand des Hartlotes.

Sollen größere Flächen gelötet werden, müssten deutlich größere Spaltbreiten eingestellt werden. Dies ist aufgrund des höheren Spannungsniveaus im Hartlot sowie der zu erwartenden unvollständigen Spaltfüllung durch die ungenügende Kapillarwirkung bei den Silberbasishartloten nicht mehr möglich.

Abbildung 12 | Berechnete maximale Mises-Spannungsverteilung im Hartlot Ag 449 bei 1500 N als Funktion der Lötspaltbreite [23]



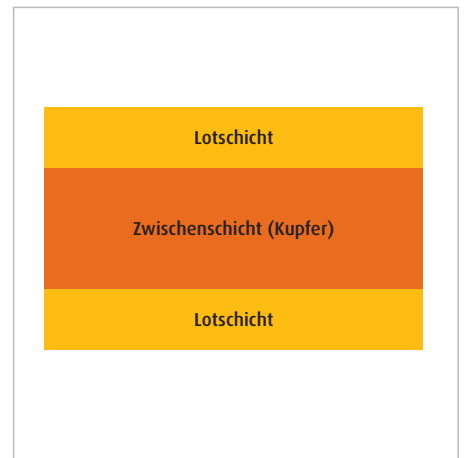


Abbildung 13 | Schematischer Querschnitt durch ein Schichtlot

Hier kann durch die Verwendung eines Schichtlotes Abhilfe geschaffen werden [8] [5].

4.1.3 Schichtlote

Schichtlote zeichnen sich, wie in **Abbildung 13** schematisch dargestellt, dadurch aus, dass sie wie ein Sandwich aufgebaut sind. Den Kern, der bei der Lötung nicht aufschmilzt, bildet eine Zwischenschicht, welche beidseitig mit Hartlot, meistens auf Silberbasis, plattiert ist. Standardmäßig wird hier ein Dickenverhältnis von $1 : 2 : 1$ – in Bezug

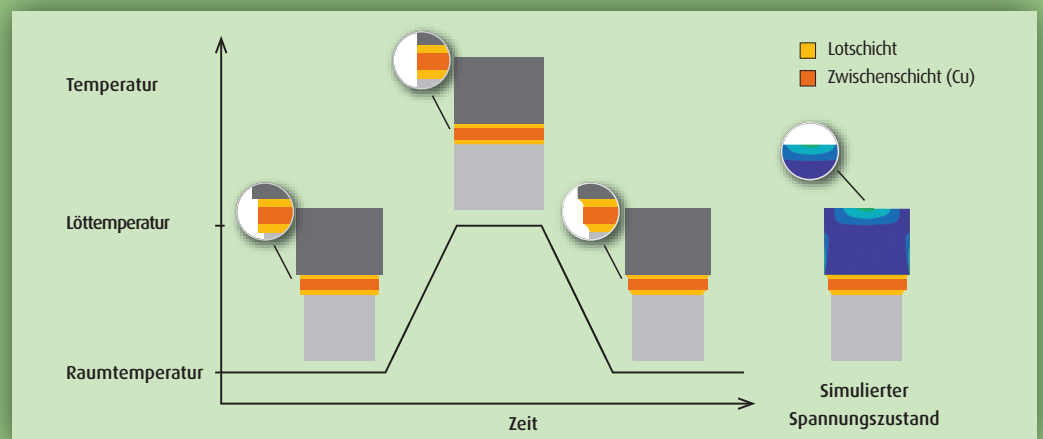
auf – Hartlot : Zwischenschicht : Hartlot – eingesetzt. Andere Dickenverhältnisse sind jedoch auch lieferbar.

Zwischenschichten aus Kupfer oder speziellen Legierungen erfüllen den Zweck, anfallende Spannungen beim Abkühlen aufzunehmen. Weiterhin können Nickelnetze als Abstandhalter für einen konstant großen und reproduzierbaren Spalt zwischen Stahl und Hartmetall eingesetzt werden.

In **Abbildung 14** rechts, (siehe Seite 18) ist der simulierte Spannungszustand im Hartme-

tall nach der Abkühlung eines Hartmetall-Stahl-Verbundes mit einem Schichtlot dargestellt. Bereiche ohne Zugspannung sind dunkelblau, hohe Spannungen orangerot dargestellt. Wie deutlich zu erkennen ist, bildet sich bei der Verwendung eines Schichtlotes im mittleren Bereich des Hartmetalls ein deutlich kleinerer Bereich mit geringerer Zugspannung aus, als im Vergleich mit dem konventionellen Hartlot (**Abbildung 7**). Weiterhin werden die seitlich am Hartmetall wirkenden Kräfte in gleicher Weise deutlich reduziert.

Abbildung 14 | Schematische Darstellung zur Auswirkung unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten in einem Hartmetall-Stahl-Verbund, gelötet mit einem Schichtlot [18]



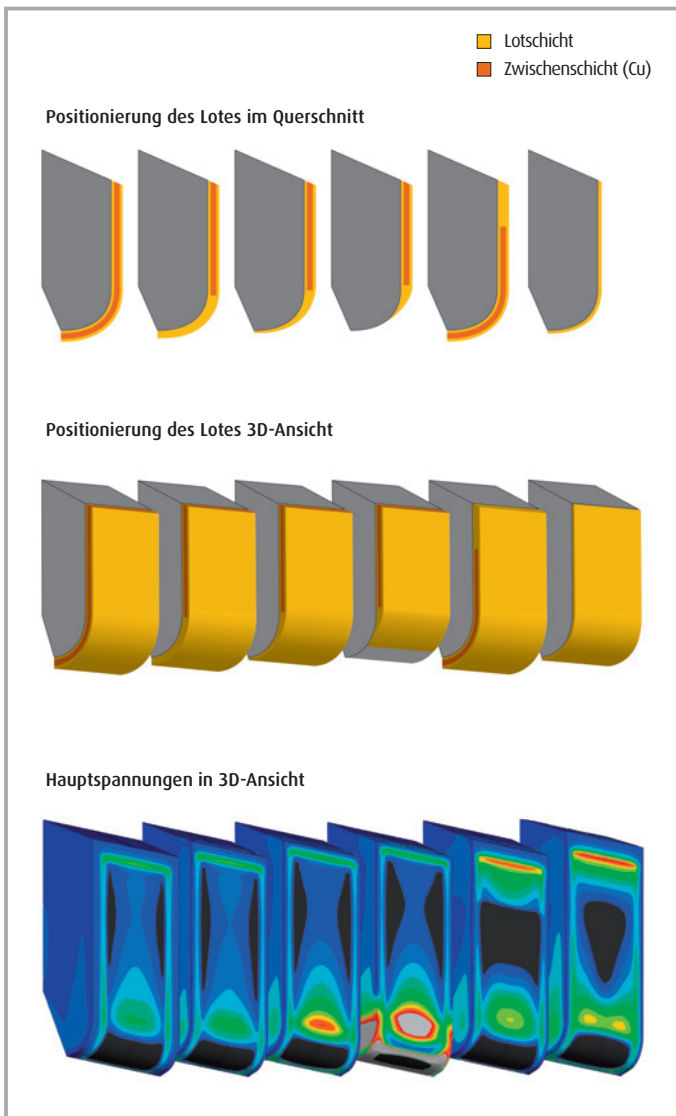


Abbildung 16 | oben: Probengeometrien mit unterschiedlicher Positionierung des Schichtlotes; unten: berechnete maximale Hauptspannungen in gelöteten Proben, Skala: 0 MPa – 250 MPa [24]

Die Scherfestigkeit des verlöteten Schichtlotes wird durch die Festigkeit der Zwischenschicht limitiert. Durch den Einsatz von speziellen Legierungszwischenschichten (z. B. BrazeTec 49/Cu^{plus}) konnte die Scherfestigkeit der Verbindung im Vergleich zu einer Standard-Kupferzwischenschicht (z. B. BrazeTec 49/Cu) von etwa 150 MPa auf ca. 180 MPa, d. h. um mehr als 25 %, erhöht werden. Auch die Ergebnisse eines 4-Punkt-Biegeversuchs (Abbildung 15) zeigen ein ca. 25 % höheres Kraftniveau bei Proben, welche mit BrazeTec 49/Cu^{plus} gelötet wurden.

Bei der Verwendung eines Schichtlotes müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden. Ein wichtiger Punkt ist die Positionierung des Schichtlotes. Wie Abbildung 16 zeigt, beeinflusst die Lage des Schichtlotes bzw. die Position der Mittelschicht deutlich die auftretenden Spannungen in einem aufgelöteten Hartmetall-Sägezahn.

Abbildung 15 | Testkräfte in Abhängigkeit der Lotspaltbreite für das Schichtlot [23]

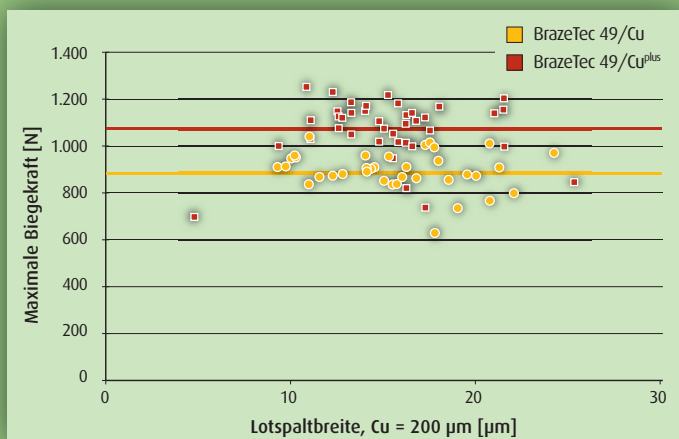
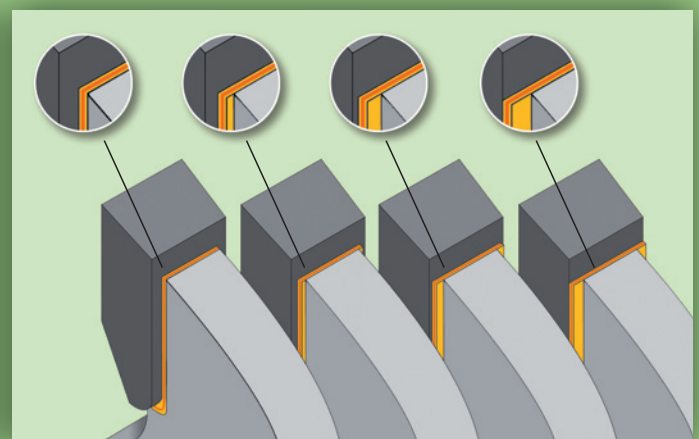


Abbildung 17 | Sägenstammbrett unter Verwendung verschiedener BrazeTec 49/Cu-Bandbreiten



Eine fehlende Zwischenschicht führt zum Ansteigen der Spannungen in diesen Bereichen. Verengt sich der Spalt in diesen Bereichen noch zusätzlich, erhöht sich das Spannungsniveau nochmals beträchtlich. Nur wenn das Schichtlot samt Mittelschicht komplett um den Zahn herumliegt (links), kann das angestrebte niedrige Spannungsniveau erreicht werden. Wenn das Lot den Zahn nicht komplett umschließt bzw. die Mittelschicht zu früh endet, entstehen große Spannungen auf der gelöteten Seite (Mitte und rechts) als auch auf den Spanflächen. Hierbei kann die Spannung, wie in **Abbildung 16** gezeigt, um ca. 60 % von 150 MPa auf 250 MPa ansteigen, was gleichzeitig eine Erhöhung der Bruchwahrscheinlichkeit (Berechnung nach Weibull-Theorie) um ca. 3.000 % mit sich bringt [24].

Auch die Breite des verwendeten Lotbandes (**Abbildung 17**) beeinflusst die Ausbildung

der Spannungen im gesamten Lötverbund [25]. Simuliert man die Spannungsverteilung in einem Sägestamtblatt (Werkstoff CrV4) mit einer Stärke von 3,5 mm und einem aufgelöteten Hartmetallzahn der Maße 10,5 x 5,3 x 3,0 mm (CERATIZIT KCR06), so wird ersichtlich, dass die Spannungen im Stahl mit höherer Bandbreite deutlich ansteigen, während das Lot bei einer Bandbreite von 4 mm ein Minimum der Hauptspannung und Dehnung aufweist. Die Spannung befindet sich aber für alle Lotbandbreiten im Vergleich zum Stahl auf einem ähnlichen Niveau. Die Spannung in der Kupfer-Zwischenschicht wird durch die Bandbreite nicht beeinflusst. Die Dehnung nimmt bei den breiteren Lotbändern allerdings ab (**Abbildung 18**). Im Lot nahe dem Hartmetall stellt sich für das angeführte Beispiel bei 4 mm Lotbandbreite ein Spannungsmaximum ein und bei den breitesten untersuchten Bändern ein Spannungsminimum.

Im Hartmetall steigt die Zugspannung wie im Stahl mit zunehmender Lotbandbreite an, bis es zu einem Spannungsmaximum an den Zahnflanken im Fußbereich kommt. Die Frontflächen des Hartmetallzahnes weisen keine wesentliche Spannungsänderung auf.

Im Ergebnis kann man festhalten, dass ein Kompromiss für die diversen Spannungszustände im Fügeverbund gefunden werden muss. Allgemein kann die Empfehlung ausgesprochen werden, dass das eingesetzte Schichtlot beidseitig am Sägeblatt jeweils um 0,25 mm überstehen sollte. Dies ermöglicht ein Optimum in der Spannungsverteilung der Fügepartner. Gleichzeitig wird eine höhere Prozesssicherheit ermöglicht, da auch bei etwaigem Verrutschen des Lotbandes sichergestellt ist, dass dieses in der Regel noch vollständig im Spalt vorhanden ist.

Abbildung 18 | Dehnungsniveaus in der Kupferzwischenschicht bei Lotbandbreiten von 3,5 bis 5,0 mm (0-max. 14 %) [25]

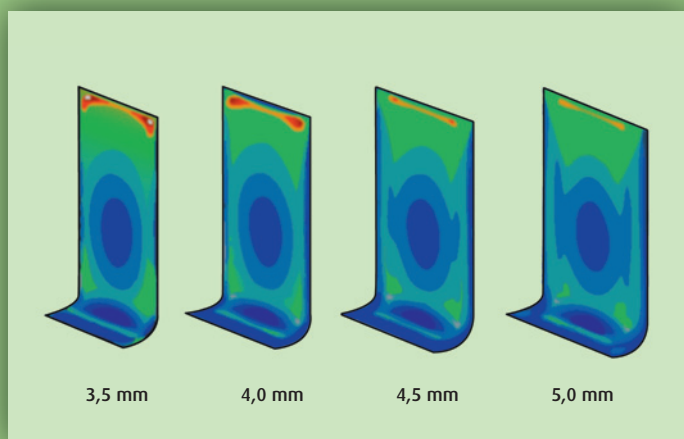
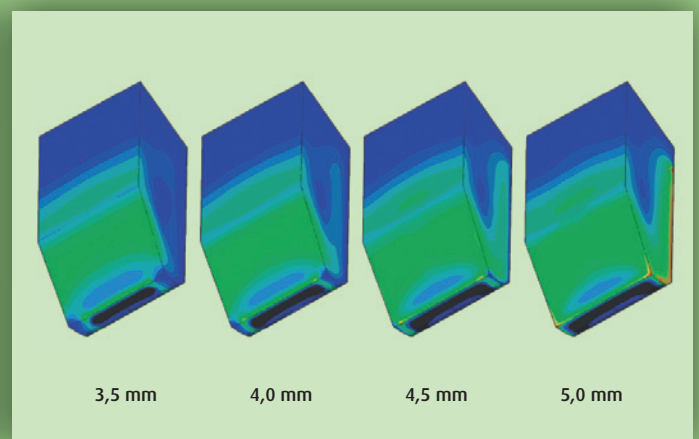


Abbildung 19 | Zugspannungen im Hartmetallzahn bei Verwendung verschiedener Lotbandbreiten [25]



Die Zusammensetzung verschiedener Schichtlote sowie die Löttemperatur sind in **Tabelle 9** dargestellt. Für Sonderanwendungen, beispielsweise in der Medizin- und Kunststofftechnik, werden Korrosionsanforderungen an die spannungsausgleichende Zwischenschicht gestellt, die von reinem Kupfer oft nicht erfüllt werden. Um dennoch Hartmetalle erfolgreich löten zu können, stehen Zwischenschichten aus Kupfer-Nickel-Eisen-Legierungen zur Verfügung (z. B. BrazeTec 49/CuNiFe).

4.1.4 Besonderheiten durch spezielle Anwendungen

Die Vielzahl der Aufgabenstellungen wird durch unterschiedliche Schneidstoffe, Schneidstoffmodifikationen oder zusätzliche Beschichtungen gelöst. Daraus ergeben sich möglicherweise Besonderheiten für das Löten.

Wird der Verschleißschutz von Hartmetallen durch das Abscheiden einer Hartstoffschicht aus der Dampfphase, beispielsweise Titan-carbid (TiC), Titanitrid (TiN) oder Titanaluminiumnitrid (TiAlN), verbessert, sind die Prozessbedingungen des Beschichtungsverfahrens PVD (Physical Vapor Deposition) zu bedenken. Liegen entsprechend hohe Prozesstemperaturen an, bei denen Legierungselemente des Hartlotes einen erhöhten Dampfdruck aufweisen oder wird im Vakuum

gearbeitet, ist das bei der Hartlotauswahl zu berücksichtigen. So besitzt Zink, ein typisches Legierungselement von niedrigschmelzenden silberhaltigen Hartloten, bereits bei ca. 200 °C einen Dampfdruck von ca. $1 \cdot 10^{-5}$ mbar.

Dieser liegt im Allgemeinen bereits oberhalb der Startdruckbedingungen für übliche PVD-Verfahren. Werden entsprechend höhere Temperaturen und niedrigere Drücke verwendet, steigt der Dampfdruck des Zinks entsprechend. Hierdurch ist mit einem negativen Einfluss auf die Beschichtungsqualität und auf die Festigkeit der Lötverbindung zu rechnen. Vor diesem Hintergrund empfiehlt es sich, Hartmetalle, die einem solchen Beschichtungsprozess zugeführt werden, mit einem zinkfreien Silberbasishartlot wie BrazeTec 6488 bzw. BrazeTec 64/Cu (**Tabelle 7** bzw. **Tabelle 9**) zu löten.

Eine exakte Temperaturführung beim Löten ist unerlässlich. Handelt es sich um recht kleine Hartmetalle mit aufgesinteter PKD-Schicht, wie sie typischerweise bei Dreh- und Fräswerkzeugen für die Holzbearbeitung zum Einsatz kommen, kann auf die Verwendung von Schichtlot, wie bereits beschrieben, verzichtet werden. Ist dies der Fall, kann alternativ das niedrigschmelzende Silberbasis-hartlot BrazeTec 5507 (**Tabelle 11**) eingesetzt werden. Die Löttemperatur liegt ca. 20 °C unterhalb der von BrazeTec 4900 [18].

4.2 Diamant & Polykristalliner Diamant (PKD)

Diamant ist das härteste bekannte Material. Es wird als Schleifmittel und als Schneidstoff eingesetzt. Während Diamanten im Allgemeinen beispielsweise im Kontakt mit anorganischen Säuren chemisch stabil sind, reagieren sie bei höheren Temperaturen schnell mit Carbidbildnern wie Eisen, Nickel, Kobalt, Wolfram und Chrom. Dies beschränkt die Einsetzbarkeit der mit Diamanten versehenen Werkzeuge auf Nichteisenmetalle, wie Aluminium und Kupfer sowie auf nichtmetallische Werkstoffe, wie z. B. Glas- und Carbonfasern, Hartmetalle und Steine.

Diamant wird in verschiedenen Varianten eingesetzt. Sie können z. B. als natürliche oder synthetisch erzeugte monokristalline Diamanten verwendet werden, die eine von der Belastungsrichtung abhängige Härte aufweisen. Weiterhin gibt es polykristalline Diamanten (PKD), die aus vielen zufällig orientierten Kristallen in einer metallischen bzw. keramischen Matrix (Binder) bestehen und so ein isotropes Verhalten aufweisen. Wie bei den Hartmetallen entscheidet z. B. das Verhältnis zwischen Hartstoff und Binder und die Korngröße über die Eigenschaften des polykristallinen Werkstoffes. PKD wird als kompaktierte Segmente, teils auf ein Hartmetallsubstrat aufgesintert, auf das Werkzeug aufgelötet. Des Weiteren können mittels CVD-Verfahren Diamantschichten abgeschieden werden.

Tabelle 9 | Schichtlote zum Hartmetalllöten [29]

Lot	Zwischenschicht	Schmelzbereich DSC ¹⁾ etwa [°C]	Löttemp. etwa [°C]	Scherfestigkeit ²⁾ [MPa]	Zusammensetzung des Lotes in Gew.-%					
					Ag	Cu	Zn	Mn	Ni	Andere
BrazeTec 49/Cu	Kupferzwischenschicht	670 – 720	710	> 150	49	27,5	20,5	2,5	0,5	–
BrazeTec 49/Cu ^{plus}	Verstärkte Kupfer-zwischenschicht	670 – 720	710	> 180	49	27,5	20,5	2,5	0,5	–
BrazeTec 49/CuNiFe	Korrosionsbeständigere Kupferzwischenschicht	670 – 720	710	> 150	49	27,5	20,5	2,5	0,5	–
BrazeTec 64/Cu	Kupferzwischenschicht, TiN beschichtbar	730 – 780	780	> 150	64	26	–	2	2	–
BrazeTec 49/NiN	Zwischenschicht aus Ni-Matrix, Spaltstabilisierung	670 – 720	710	> 150	49	49	20,5	2,5	0,5	6 In
BrazeTec Cu/NiN	Zwischenschicht aus Ni-Matrix, Spaltstabilisierung	1.085	1.100	> 200	–	100	–	–	–	–

Diamanten vereinen eine hohe Härte mit einer hohen thermischen Leitfähigkeit, so dass beim Trennen die entstehende Wärme direkt aus der Schneidfläche abgeleitet wird. Ein Nachteil der Diamanten ist ihre hohe Sprödhheit. Das Versagensverhalten kann allerdings in PKDs bzw. durch Defekte und sekundäre Phasen stark beeinflusst werden.

PKDs enthalten meist 5 – 10 Vol.-% Binder, wobei bei den PKDs aus synthetisch hergestellten Diamanten weitere Verunreinigungen durch Metalle und Graphit vorliegen können, die aus dem Synthetisierungsprozess stammen. Der metallische Binder, der meist auf den Korngrenzen sitzt, beeinflusst die Stabilität der Diamanten, da er die Umwandlung in Graphit unterstützt und durch den unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten beim Einsatz bei hohen Temperaturen zusätzliche Spannungen in den Werkstoff bringt. Um dies zu umgehen, kann der Binder von den Korngrenzen chemisch entfernt werden oder es können Materialien mit angepasstem Ausdehnungskoeffizienten, wie z. B. Siliziumcarbid, als Binder verwendet werden [15].

4.2.1 Löten von Diamanten & PKD

Werden Diamanten durch thermische Verfahren gefügt, muss man sich bewusst sein, dass Diamanten unter bestimmten Temperatur- und Druckbedingungen ein metastabiles

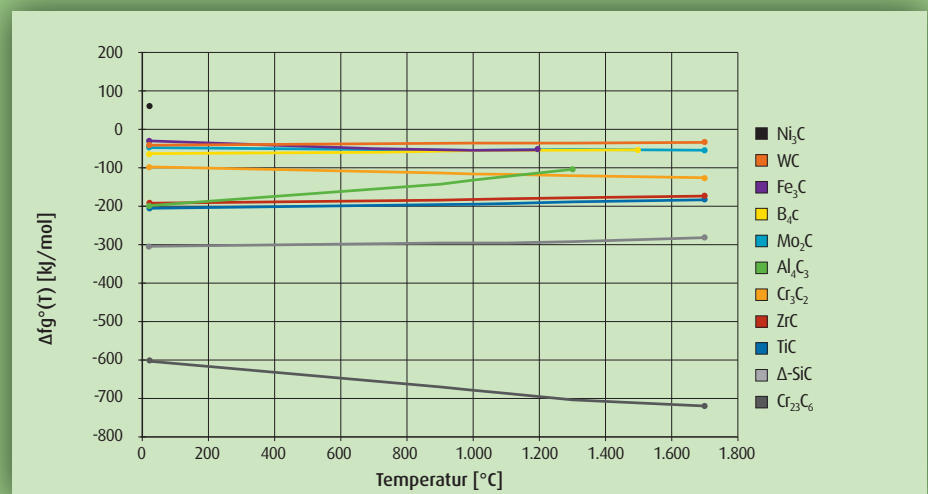
System darstellen und ihre Kristallstruktur ändern bzw. auch oxidieren. Diamanten reagieren beispielsweise bei Temperaturen über 600 °C mit dem Luftsauerstoff zu CO₂ und können sich bei höheren Temperaturen auch wieder zu Graphit umwandeln. Die Umwandlungstemperatur hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab, u. a. der Umgebungsatmosphäre. Ein natürlicher monokristalliner Diamant wandelt sich in reiner inerte Atmosphäre bei etwa 1.600 °C und im Vakuum (bei einem Druck von 5 · 10⁻⁴ mbar) bei etwa 1.500 °C in Graphit um. Unter atmosphärischen Bedingungen kann diese Temperatur auf 1.000 °C [12] [26] oder sogar, je nach Prozessbedingungen, bereits bei etwa 750 °C [15] einen deutlichen Anteil haben.

Die Benetzung von Diamant hängt stark mit der Art der Wechselwirkung zwischen Diamant und dem in Kontakt stehenden Werkstoff ab. Es werden zwei Arten von Hartloten zum Löten von Diamanten eingesetzt: Nickelbasislote mit einem Anteil an carbidbildenden Elementen wie Chrom, Bor und Silizium [12] [27] sowie sogenannte Aktivlote, die grenzflächenaktive Elemente wie Titan oder Zirkonium enthalten [12]. Diese Elemente können mit dem nichtmetallischen, anorganischen Werkstoff, z. B. Diamant oder Keramik, reagieren. Die sich bildende Reaktionsschicht kann von dem restlichen, aktivelementarmen Hartlot benetzt werden. Da die Aktivelemente sauerstoffaffin sind und ein frühzeitiges Abbinden

der Elemente durch die Reaktion mit Sauerstoff verhindert werden muss, findet der Prozess im Vakuum bei min. 5 · 10⁻⁴ mbar oder in inertem Schutzgas statt [26]. Um eine höhere Verschleißbeständigkeit von aufgelöteten Diamantkörnungen zu erreichen, eignen sich die Nickelbasislote [12]. Vorteile des Aktivlötens sind die im Vergleich zum Löten mit Nickellot niedrigeren Löttemperaturen um 900 °C und die höhere Duktilität der Aktivlote, die eine Reduktion der thermisch induzierten Spannungen erlauben. Aktivlote wie BrazeTec CB 4 werden häufig als Lotfolie eingesetzt, aber es gibt auch entsprechende Aktivlotpasten, die (teil)automatisiert mittels Dispenser und Siebdruck appliziert werden können.

Wie bereits eingangs erwähnt, werden zum Fügen von Diamanten Hartlote eingesetzt, die carbidbildende Elemente wie z. B. Titan, Zirkonium, Chrom, Bor und Silizium enthalten. Bei Kontakt mit dem Diamanten bildet sich eine Carbidschicht aus. Welche Carbide hierbei entstehen, kann anhand der freien Gibbs-Energien abgeschätzt werden, welche in **Abbildung 20** dargestellt sind. Je niedriger die Werte für die freie Gibbs-Energie für die Bildung eines Carbides sind, desto eher wird sich auch dieses Carbid bilden. In einem Nickelbasislot mit Chrom und Bor wird sich bei einer Löttemperatur von etwa 1.000 °C gemäß der freien Gibbs-Energien eher Cr₂₃C₂ statt Cr₃C₂, B₄C oder Ni-Carbid bilden.

Abbildung 20 | Freie Gibbs-Energie für die Bildung von Carbiden bei verschiedenen Temperaturen [15]



Es muss unterschieden werden, ob Diamantkörnungen oder kompakte PKD-Schichten aufgelötet werden sollen. Wenn Körnungen aufgelötet werden, können die in **Tabelle 10** genannten Lote uneingeschränkt eingesetzt werden. Beim Einsatz der reinen PKD-Schichten werden die aufgeführten Aktivlote verwendet.

PKD-Schichten können auch auf Hartmetalle aufgesintert werden. Dabei diffundiert beim Sinterprozess der Binder aus dem Hartmetall in den Diamantverbund und stellt auch hier eine Verbindung her. Allgemein ist ein Überhitzen der Diamantgeometrien zu vermeiden, da es ansonsten zur Umwandlung der Diamanten in Graphit kommt. Bei PKD-Schichten auf Hartmetall kann dies zum Ablösen der PKD-Schicht führen [28]. Aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten und der Sprödigkeit der Fügepartner wird eine langsame Abkühlung an Luft empfohlen, um ein vorzeitiges Versagen durch thermisch induzierte Spannungen zu vermeiden [16].

Die aufgesinterten PKD-Schichten werden mit dem Werkzeug durch Hartlote mit hohem Silberanteil mit Schmelzbereichen bis maximal 750 °C in Kombination mit geeigneten Flussmitteln verbunden. Die Benetzung der

Grundwerkstoffe kann durch Zugabe von Mangan verbessert werden [29]. In **Tabelle 11** sind einige der empfohlenen Hartlote aufgelistet. Nicht alle dieser Hartlote sind allerdings geeignet, um aufgesinterte PKD-Schichten an ein Werkzeug zu löten. Hier werden vor allem das höhersilberhaltige Hartlot BrazeTec 5507 und das Mangan und Nickel enthaltende Hartlot BrazeTec 4900 erfolgreich eingesetzt. Als Flussmittel kommen einige der in **Tabelle 5** aufgeführten Flussmittel zum Einsatz, insbesondere BrazeTec spezial h, BrazeTec h 80, BrazeTec h 90 und BrazeTec h 285. Die Erwärmung erfolgt, wie beim Löten von Hartmetallen, meist mittels Induktion.

Eine weitere Anwendung für Diamanten in Werkzeugen ist der Einsatz als Diamantsegment. Diese enthalten nur einen geringen Anteil an Diamant (etwa 10 %) und sind in eine Matrix aus Kobalt oder Bronze eingebettet. Somit besteht in diesem Fall die Fügeaufgabe darin, dass Metall der Matrix zu benetzen. Eingesetzt werden diese Segmente zum Beispiel als Bestückung für Trennscheiben. Hier müssen Lotauswahl und Lötprozess überdacht werden, um Verbindungen mit hoher Festigkeit reproduzierbar herstellen zu können, ohne den Binder der Diamantsegmente thermisch zu schädigen.

4.3 Kubisches Bornitrid & Polykristallines Bornitrid (PcBN)

Kubisches Bornitrid (cBN) und polykristallines kubisches Bornitrid (PcBN) sind halb so hart wie Diamant, aber doppelt so hart wie alle anderen Werkstoffe und stellen somit die zweithärtesten bekannten Werkstoffe dar. Der Einsatz von kubischem Bornitrid ähnelt dem von Diamanten. Bei Schlagbeanspruchung verhält sich cBN ebenfalls spröde. Das PcBN ist, wie ein PKD, ein Werkstoff mit zufälliger Kristallorientierung in einer metallischen Matrix, aber variantenreicher als das PKD, was die sekundären Phasen, Partikelgrößenverteilungen und die Partikelkonzentrationen angeht. PcBN wird, wie PKD, unter anderem aufgesintert auf ein Hartmetall gefügt.

cBN kann zur Bearbeitung von Eisen-, Nickel- und Kobaltlegierungen genutzt werden, da es eine sehr geringe Reaktivität gegenüber diesen Elementen aufweist. Allerdings reagiert es mit starken Nitrid- bzw. Boridbildnern wie Titan und Zirkonium.

Tabelle 10 | Hartlote zum Löten von ultraharten Materialien [22]

Nickelbasislot	ISO 17672	Bemerkung	Schmelzbereich ISO 17672 etwa [°C]	Löttemp. etwa [°C]	Zusammensetzung in Gew.-%				
					Ni	Cr	Fe	Si	B
BrazeTec 1002	Ni 620	Dispenser- und Siebdruckpaste	970 – 1.000	1.050	82,4	7	3	4,5	3,1
Aktivlote	ISO 17672	Bemerkung	Schmelzbereich etwa [°C]	Löttemp. etwa [°C]	Zusammensetzung in Gew.-%				
					Ag	Cu	Ti	-	-
BrazeTec CB 4	-	Universalaktivlotfolie	780 – 820	850 – 950	70,5	26,5	3	-	-
BrazeTec CB 10	-	Universalaktivlotpaste für Siebdruck und Dispenser	780 – 820	850 – 950	64,8	25,2	10	-	-

4.3.1 Löten von kubischem Bornitrid

Neben dem Auflöten von Körnungen können kompaktierte Segmente eingesetzt werden, häufig auf einem Hartmetallsubstrat, das aufgrund der hohen Steifigkeit und der geringeren Ausdehnung zu niedrigeren thermisch induzierten Spannungen im Verbund führt.

cBN ist gegenüber Oxidation und Umwandlung in hexagonales Bornitrid deutlich beständiger als Diamant. Bis 1.300 °C wird es durch eine Oxidschicht geschützt und erst bei höheren Temperaturen kommt es zur Umwandlung. Die Umwandlungstemperatur hängt dabei wieder von der Atmosphäre ab und variiert von 1.525 °C nach 12 Stunden Haltezeit in Stickstoff [26], bis 1.700 °C an Luft [15]. Bei PcBN haben auch die Binderphasen keinen Einfluss auf die thermische oder chemische Beständigkeit.

cBN ist chemisch sehr stabil und kann daher nicht direkt mit konventionellen Hartloten gefügt werden. In manchen Fällen wird cBN daher vor dem Löten mit nitrid- oder boridbildenden Materialien wie Nickel oder Titan beschichtet und anschließend mit konventionellen Hartloten gelötet.

Meistens wird es allerdings, wie auch Diamanten, mit Aktivloten, basierend auf dem Silber-Kupfer-Titan-System, gelötet.

Empfohlen werden hierbei die entsprechenden BrazeTec-Aktivlote, wie sie in **Tabelle 11** zusammengestellt sind.

Nickellote können hier nicht eingesetzt werden, da die Bildungsenthalpie für Chromnitrid mit -121 kJ/mol [30] deutlich höher als die Bildungsenthalpie für cBN mit -266,8 kJ/mol [31] und demnach energetisch ungünstiger ist. Resultierend aus diesem Umstand kann sich keine verbindende Reaktionsschicht ausbilden.

Beim Auflöten der auf Hartmetall gesinterten PcBN-Schichten können dieselben silberhaltigen Hartlote wie beim Auflöten der PKD-Hartmetall-Schichten bzw. wie auch beim Löten von Hartmetallen eingesetzt werden.

Lotempfehlungen für die einzusetzenden Hartlote sind entsprechend in **Tabelle 7** und **Tabelle 11** zu finden. Auch beim PcBN-Löten sollten die Löttemperaturen möglichst gering sein, um ein Ablösen des PcBN vom Hartmetallsubstrat zu vermeiden [26]. Vakuumlötprozesse werden gelegentlich verwendet.

4.4 Löten von Keramiken

Alle keramischen Werkzeuge werden aus keramischen Rohstoffen in Pulverform hergestellt. Dieses Pulver wird in die gewünschte Form gebracht, verdichtet und anschließend gebrannt. Je nach Keramik und Anwendungszweck können verschiedene Routen genutzt werden. Insbesondere das heißisostatische Pressen erlaubt dabei die Herstellung von dichten Bauteilen mit isotropen Eigenschaften. Als Schneidkeramiken für Werkzeuge werden, wie auch aus **Tabelle 1, Seite 8** ersichtlich ist, vor allem zwei Arten von Keramiken eingesetzt: Aluminiumoxid- und Siliziumnitrid-Keramiken. Al₂O₃ kann als monolithische Keramik mit einem Al₂O₃-Gehalt > 99 % oder als verstärkte Keramik, versetzt mit weiteren keramischen Stoffen wie Titan- oder Siliziumcarbid-Fasern, eingesetzt werden. Neben reinem Siliziumnitrid wird auch Sialon eingesetzt, eine Mischkeramik aus Si₃N₄ und Al₂O₃ oder Aluminiumnitrid. Auch der Einsatz von mit Metallcarbiden oder Fasern verstärktem Si₃N₄ ist möglich [15]. Allgemein konnte durch Zugabe von weiteren Oxiden, Carbiden bzw. Fasern sowie eine Anpassung der Herstellungsrouten die Leistungsfähigkeit der Werkstoffe deutlich gesteigert und die Bruch-eigenschaften verbessert werden [26].

Tabelle 11 | Hartlote zum Löten von aufgesinterten PKD-Schichten und diamanthaltigen Segmenten [29]

Hartlot	ISO 17672	PKD auf Hartmetall	Diamant-segmente	Bemerkung	Schmelzbereich ISO 17672 etwa [°C]	Schmelzbereich DSC ¹⁾ etwa [°C]	Löttemp. etwa [°C]	Zusammensetzung in Gew.-%					
								Ag	Cu	Zn	Mn	Ni	Sn
BrazeTec 5507	Ag 155	lötbar	lötbar	Sehr niedriger Schmelzpunkt	630 – 660	650 – 670	660	55	21	22	–	–	2
BrazeTec 4900	Ag 449	lötbar	lötbar	Gute Benetzung	680 – 705	680 – 705	690	49	16	23	7,5	4,5	–
BrazeTec 4404	Ag 244	–	lötbar	Sehr duktil und fest	675 – 735	675 – 735	730	44	30	26	–	–	–

1) Schnee, Wiehl, Starck 2014 [40]

Keramische Schneidstoffe weisen eine hohe Warmhärte, chemische Stabilität sowie Temperatur- und Verschleißbeständigkeit auf. Daraus ergeben sich Vorteile gegenüber konventionellen Werkzeugen, wenn Materialien bearbeitet werden müssen, die für die normalerweise verwendeten Werkzeuge zu hart sind, oder wenn durch eine Steigerung der Bearbeitungsgeschwindigkeit Temperaturen erreicht werden, die die Einsatzgrenzen anderer Schneidstoffe überschreiten. Weitere Vorteile sind die homogenen Schnittbedingungen, die auch die Einhaltung geringer Toleranzen zulassen.

Werkzeuge aus monolithischem bzw. mit TiC-verstärktem Aluminiumoxid werden zur Bearbeitung von gehärteten Stählen, Gusseisen und Nickelbasis-Superlegierungen verwendet, während die mit SiC-Fasern verstärkten Al₂O₃-Komponenten für gehärtete Stähle bis zu 65 HRC und Nickelbasis-Superlegierungen eingesetzt werden. Keramiken auf Siliziumnitridbasis sind aufgrund der Neigung zu chemischen Reaktionen mit den zu bearbeitenden Werkstoffen in ihrer Anwendung eingeschränkt und werden daher meist nur zum Trennen von Gusseisen und Nickelbasis-Superlegierungen verwendet. Durch Zulegieren von Aluminiumoxid sowie

die Beschichtung mit TiC-TiN- oder TiC-Al₂O₃-Systemen kann die chemische Beständigkeit verbessert werden [15].

Wie bei den anderen Schneidstoffen werden auch Keramiken meist nicht als komplette Bauteile, sondern im weitesten Sinne als Schneiden verwendet, die an einem metallischen Träger befestigt werden müssen. In einigen Fällen können Wendeplatten über Schrauben am Träger befestigt werden, aber für eine dauerhafte Verbindung bietet sich das Löten zur Befestigung der Keramikteile an.

4.4.1 Lotwerkstoffe und Lötprozess

Da keramische Werkstoffe aufgrund ihrer Bindungsstruktur nicht durch konventionelle Metalllote benetzt werden können, wird hier, wie beim Löten von Diamanten, auf das Aktivlöten gesetzt. Der Prozess ist in **Kapitel 4.2** genauer beschrieben, beruht aber auf der Reaktion der Keramik mit grenzflächenaktiven Elementen wie Titan. Als Hartlote kommen die in **Tabelle 10** genannten BrazeTec Silber-Kupfer-Titan-Aktivlote als Folie oder Paste zum Einsatz.

4.4.2 Thermische Effekte und Spannungszustände

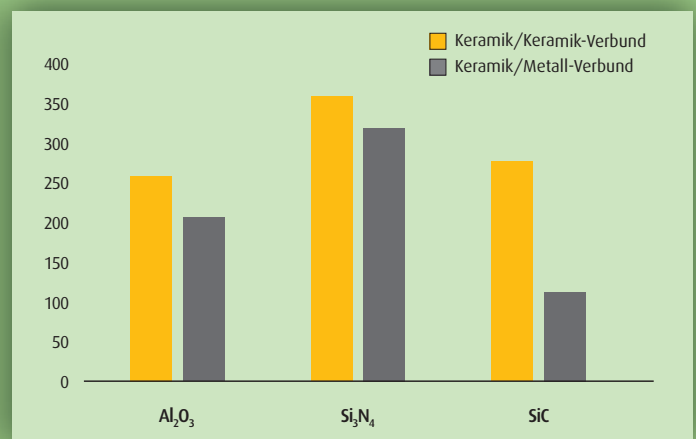
Wie speziell in **Kapitel 2.3** erwähnt, treten in Verbunden zwischen Schneidstoffen und Stählen häufig thermisch induzierte Spannungen auf, die durch den Unterschied der thermischen Ausdehnungskoeffizienten hervorgerufen werden. Dies trifft auch auf Keramik-Metall-Verbunde zu, da Keramiken, wie **Tabelle 12** zu entnehmen ist, deutlich geringere Ausdehnungskoeffizienten als die meisten Stähle aufweisen. Die Lötnaht, die meist im Verhältnis zum restlichen Bauteil schmal ausfällt, kann die bei der Abkühlung entstehenden Spannungen nicht mehr abbauen. Dies hat eine komplexe Verteilung von teils hohen Spannungen im gesamten Verbund zur Folge.

Folge des hohen Spannungsniveaus ist, dass Keramik-Metall-Verbunde eine niedrigere Festigkeit als reine Keramik-Keramik-Verbunde aufweisen, wie auch in **Abbildung 21** an einem Beispiel eines 4-Punkt-Biegeversuchs zu sehen. Bei Siliziumnitrid erreichen die Keramik-Metall-Verbunde eine um ca. 15 % und bei den SiC-Metall-Verbunden sogar eine 50 % niedrigere Biegefestigkeit als die Keramik-Keramik-Verbunde.

Tabelle 12 | Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient von verschiedenen keramischen und metallischen Werkstoffen

Keramischer Werkstoff	Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	Metallischer Werkstoff	Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁶ K ⁻¹]
Diamant	1,3	FeNiCo	5,9
SiC	4,6	FeNi	8,0
Si ₃ N ₄	3,0	C45	11,0
Al ₂ O ₃	8,0	C45	11,0
ZrO ₂	9,8	1.4301	16,0

Abbildung 21 | 4-Punkt-Biegefestigkeiten aktivgelöteter Keramik-Keramik- bzw. Keramik-Metall-Verbindungen [32]



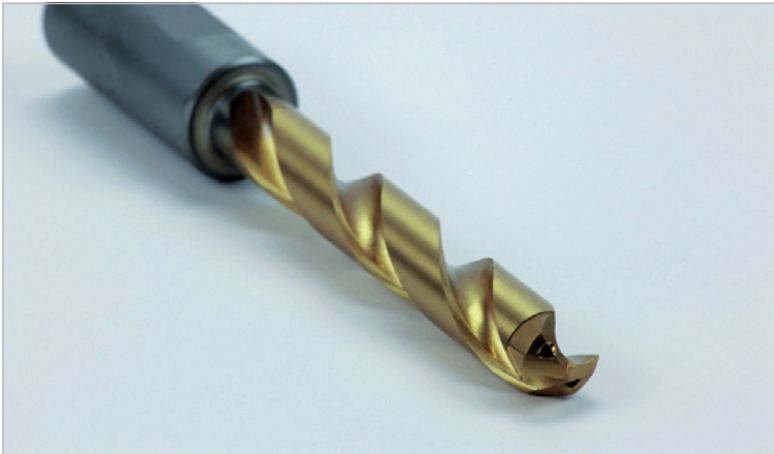
4.5. Anwendungsbeispiele

Sägeblatt



Material	Hartmetall (CoCr-Matrix) Stahl
Lot	BrazeTec 49/Cu
Flussmittel	BrazeTec h 285
Atmosphäre	Luft
Heizart	Induktion

Bohrer mit TiN-Beschichtung



Material	Hartmetall (Co-Matrix) Stahl
Lot	BrazeTec 6488
Flussmittel	BrazeTec h 285
Atmosphäre	Luft
Heizart	Induktion

Papiermesser



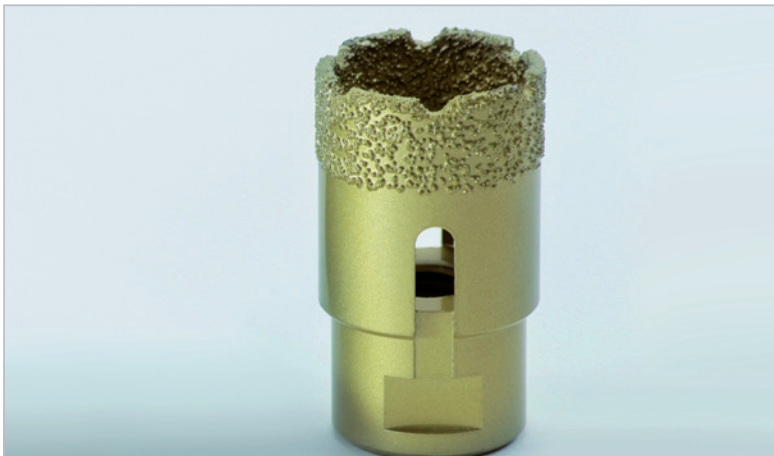
Material	Hartmetall (Co-Matrix) Stahl
Lot	BrazeTec 49/Cu
Flussmittel	BrazeTec h 285
Atmosphäre	Luft
Heizart	Induktion

Steinmeißel



Material	Hartmetall (Co-Matrix) Stahl
Lot	BrazeTec 21/68
Flussmittel	BrazeTec s
Atmosphäre	Stickstoff
Heizart	Induktion, Ofen

Kernbohrer



Material	Diamanten, Stahl
Lot	BrazeTec P 1002.1
Flussmittel	ohne
Atmosphäre	Argon 4.8, Vakuum <math>< 10^{-3}</math> mbar
Heizart	Ofen

Trennscheibe



Material	Diamantsegmente (Co-, Cu-, Fe-, Sn-Matrix) Stahl
Lot	BrazeTec 5507
Flussmittel	BrazeTec h 80
Atmosphäre	Luft
Heizart	Induktion

Schneidscheibe



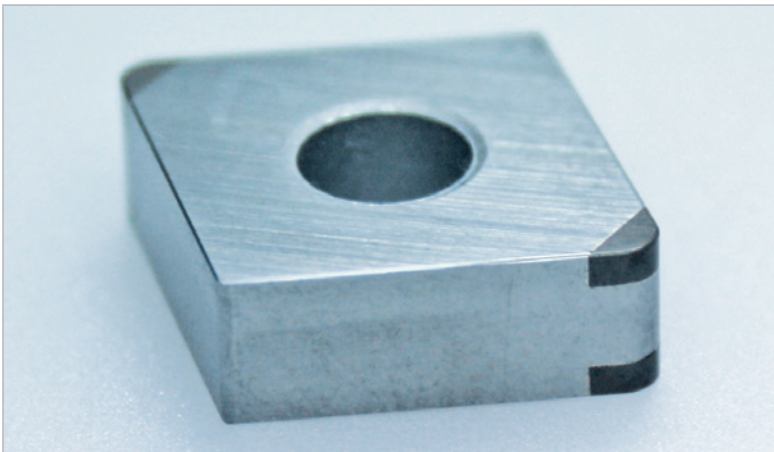
Material	Diamanten, Stahl
Lot	BrazeTec P 1002.1
Flussmittel	ohne
Atmosphäre	Argon 4.8, Vakuum <math>< 10^{-3}</math> mbar
Heizart	Ofen

Fräser



Material	PKD auf Hartmetall gesintert/Stahl
Hartlot	BrazeTec 4900
Flussmittel	BrazeTec spezial h Paste
Atmosphäre	Luft
Heizart	Induktion

Wendeplatte



Material	PcBN/Stahl
Lot	BrazeTec CB 10 Paste
Flussmittel	ohne
Atmosphäre	Argon 4.8, Vakuum <math>< 10^{-3}</math> mbar
Heizart	Ofen

5. Prozessoptimierung

Um zu beurteilen, ob es Verbesserungsbedarf bei einem Prozess gibt, müssen zunächst Qualitätskriterien bestimmt werden. Das können z. B. der Füllgrad des Lotspaltes, eine geringe Porosität in der Lotnaht, bestimmte, für die Anwendung relevante mechanische Eigenschaften oder eine gute Oberflächenqualität der Lotnaht sein.

Tabelle 13 | Fehler beim induktiven Löten – Ursachen und Beseitigung [11]

Auftretende Fehler	Ursache	Beseitigung
Das Lot ist nicht richtig geflossen	Die Aufheizung war durch falsche Induktorankopplung unterschiedlich.	Die Induktorankopplung ist durch Versuch zu ändern.
	Die Spaltgröße ist falsch bemessen oder der Spalt erweitert sich z. B. in Flussrichtung des Lotes.	Die Spaltgrößen sind einzuhalten.
	Falsches Flussmittel wurde verwendet.	Empfohlene BrazeTec-Flussmittel nach Tabelle 5, Seite 12 sind zu verwenden.
	Die Oberfläche der zu verlötenden Teile war stark fettig oder oxidiert, so dass das Flussmittel nicht voll wirksam werden konnte.	Die Werkstücke sind vor dem Lötprozess grundsätzlich zu entfetten.
	Die Oberfläche war nicht oxidfrei.	Durch Löten in reduzierender Atmosphäre (im Ofen) können Oxidschichten abgebaut werden.
	Der Grundwerkstoff (z.B. Hartmetall mit geringen Binderanteil) ist nur schwer zu benetzen.	Durch aufgebraute Kobalt- oder Nickelbeschichtungen kann die Benetzung verbessert werden.
Die Lötstelle zeigt keine genügende Festigkeit	Im Lot befinden sich Flussmitteleinschlüsse, da die zu lötenen Teile für die vorgenommene Lötung in der vorliegenden Form nicht geeignet sind. Zum Beispiel kann der Lötspalt zu eng sein, oder es sind in Flussrichtung des Lotes Querriefen im Lötspalt. Das Lot umfließt hierbei Flussmitteleinlagen.	Die Werkstücke sind lötgerechter zu gestalten.
	Durch falsches Anbringen des Lotes sind Gaseinschlüsse durch gasende Bestandteile des Flussmittels entstanden, die vor dem Erstarren nicht entweichen konnten.	Auf die richtige Löttemperatur ist besonders bei Löten mit Zink zu achten.
	Die Löttemperatur war zu hoch, so dass der Siedepunkt von Lotbestandteilen überschritten wurde. Lotbestandteile sind verdampft, und der Rest des Lotes bringt nicht mehr die gewünschte Festigkeit der Lotstelle.	Die Löttemperatur ist durch eine geringere HF-Energie bei Induktion oder durch bessere Anpassung des Induktors auf die richtige Höhe und die gleichmäßige Aufheizung des Werkstücks einzustellen.
	Es wurde versucht, das Werkstück nach dem Fließen des Lotes schneller abzukühlen. Im Lot sind Schrumpfrisse entstanden.	Die forcierte Abkühlung ist zu unterlassen.
	Die Wärmedehnung der zu lötenen Teile wurde nicht beachtet, der Lötspalt ist bei Erwärmung zu klein geworden. Das Lot konnte nicht richtig fließen.	Es sind die richtigen Lotspalte gemäß der thermischen Ausdehnungseffekte zu errechnen.
	Es wurde ein falsches Flussmittel benutzt. Das Lot ist nicht sauber geflossen.	Es sind Flussmittel nach BrazeTec-Empfehlung zu verwenden
	Die Lotspaltbreite stimmt nicht.	Die Spaltbreiten nach [14] sind zu beachten.
Lötstelle und Umgebung sind nach dem Löten stark oxidiert	Die Lötung erfolgte an freier Atmosphäre mit einem zu hochschmelzenden Lot.	Es ist ein niedrigschmelzendes Lot zu verwenden, oder der Lötprozess muss unter Schutzgas oder im Vakuum ablaufen.
	Die Heizzeit wurde unnötig lang ausgedehnt.	Die Verfahrenstechnik ist zu überarbeiten. Ist eine lange Heizzeit bei komplizierten Lötungen erforderlich, so sollte unter Schutzgas gelötet werden, u. U. mit mehr Flussmittel an den gefährdeten Stellen.

5.1 Prozessfehler beim Induktionslöten – Ursachen und Auswirkungen

Insbesondere bei der induktiven Erwärmung, welche häufig in der Werkzeugindustrie eingesetzt wird, kann es zu Anlaufschwierigkeiten kommen. **Tabelle 13** gibt Hinweise auf die Ursache einiger Fehler und bietet auch Lösungsansätze zur Behebung des Problems.

5.2 Potenzielle Festigkeitsverluste bei der Verwendung von Kupferbasishartloten

Wenn zum Löten von Hartmetall-Stahl-Verbindungen Kupferhartlote verwendet werden, kann es bei einer ungünstigen Wahl der Prozessparameter zu einem Abfall der Festigkeit

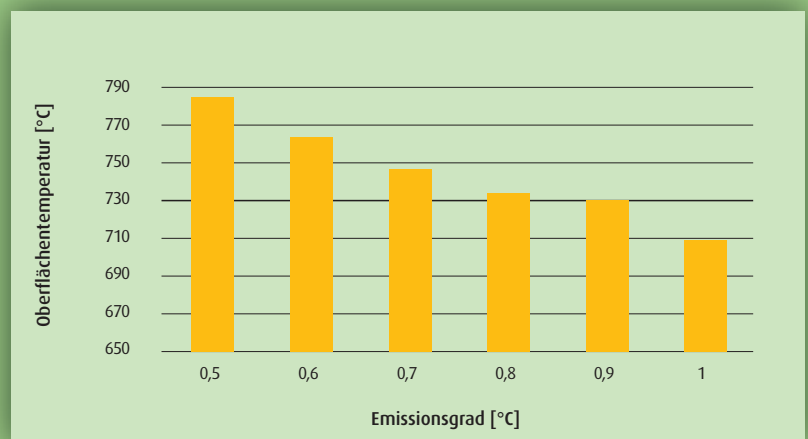
der gelöteten Verbindungen kommen. Bei Versuchen mit einem Kupfer-Nickel-Silizium-Hartlot sank die durchschnittliche Scherfestigkeit bei Verlängerung der Haltezeit von 5 Minuten auf 60 Minuten von etwa 300 MPa auf etwa 180 MPa. Bei Proben mit Kupfer-Mangan-Nickel-Hartlot sank die durchschnittliche Festigkeit von etwa 250 MPa bei 1.000 °C Löttemperatur auf unter 200 MPa bei 1.090 °C. In beiden Fällen ist der Grund für den Festigkeitsabfall die Bildung einer Eisen-Kobalt-Phase an der Grenzfläche des Hartmetalls, verbunden mit der Bildung einer spröden η -Karbidgephase im Hartmetall [1]. Zwischen dem Hartmetall und dem niedriglegierten Stahl besteht ein Kohlenstoffkonzentrationsgefälle, was die Diffusionsneigung des Kohlenstoffs in Richtung Stahl begünstigt. Das Kupferhartlot kann den Kohlenstoff zwar nicht lösen, aber über sich

bildende Eisen-Kobalt-Phasen entstehen Brücken zwischen Hartmetall und Stahl, über die der Kohlenstoff wandern kann [1] [33]. Das Hartmetall verliert Kohlenstoff, und es bilden sich durch die C-Verarmung spröde η -Karbidgephasen wie z. B. $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$, $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ und $\text{Co}_2\text{W}_4\text{C}$ [34], die die mechanische Belastbarkeit des Verbundes reduzieren. Diese drei Carbide sind strukturell eng verwandt, verhalten sich aber unterschiedlich. Unterhalb von 1.000 °C ist beispielsweise $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ nicht beständig und zerfällt in $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$, WC und Kobalt.

5.3 Optimierungen zur Temperatursteuerung mittels Pyrometermessung

Die Temperatur beim Induktionslöten von Hartmetallproben wird häufig mittels eines

Abbildung 22 | Temperatur in Abhängigkeit vom eingestellten Emissionsgrad bei einer Probe mit einer Oberflächentemperatur von 730 °C, gemessen mit Pyrometer [29]



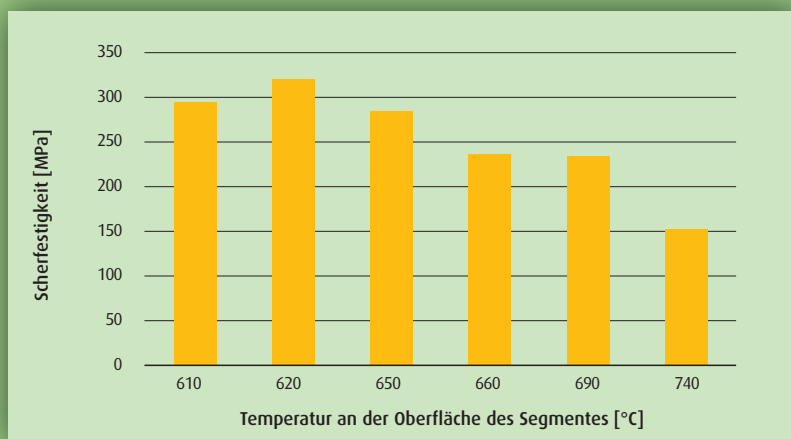
Pyrometers gemessen, da dies den Vorteil einer berührungslosen Messung bietet. Vor jeder Messung mit einem Pyrometer muss der Emissionsgrad eingestellt werden, der ein Maß für die Wärmeabstrahlungsfähigkeit eines Objektes ist. Damit wird die Messung auf das Messobjekt abgestimmt. Wenn dies nicht berücksichtigt wird, wird das Ergebnis verfälscht, wie in **Abbildung 22** gezeigt. Laut Temperaturfühler hatte die Oberfläche eine Temperatur von 730 °C, doch in Abhängigkeit des eingestellten Emissionsgrades variierte die durch das Pyrometer angezeigte Temperatur von 709 °C bis 785 °C. Zu beachten ist, dass der Emissionsgrad von der Oberfläche des Werkstücks abhängig sein kann und dass es bei der Erwärmung der Proben zu einer Farbveränderung der Bauteiloberfläche kommen kann, die das Messergebnis verändern kann.

5.4 Einfluss der Überhitzung von Diamantsegmenten mit hohem Binderanteil

Wie schon im **Kapitel 4.2.2** angesprochen, stellt das Auflöten von Diamantsegmenten mit hohem Binder-, aber geringem Kobaltanteil eine Herausforderung dar. Um die teils geringen Festigkeiten der gelöteten Verbunde zu erklären, wurden Segmente untersucht, deren Binder aus 40 % Cobalite HX und 60 % Bronze bestand und somit einen Co-Gehalt von unter 20 % aufwies [35]. Das Hartlot BrazeTec 4900 wurde zum Fügen von Diamantsegment-Stahl-Proben eingesetzt. Es zeigte sich, dass die Löttemperatur einen deutlichen Einfluss auf die Scherfestigkeit der Verbunde hat. Die Temperatur wurde

mittels Pyrometer auf der Oberfläche des Diamantsegments gemessen. Die höchsten Scherfestigkeiten wurden bei einer gemessenen Oberflächentemperatur von 620 °C erreicht, so dass zu erwarten ist, dass das Hartlot und die zu benetzenden Flächen die für das Hartlot optimale Löttemperatur von 690 °C aufwies. Eine weitere Steigerung der Temperatur führte zu Proben mit niedrigeren Festigkeitswerten (**Abbildung 23**). Grund dafür war die Überhitzung des Hartlotes, was unter anderem zu einer starken Diffusion von Mangan und Nickel aus dem Hartlot in den Grundwerkstoff führte.

Abbildung 23 | Scherfestigkeit eines mit BrazeTec 4900 gelöteten Diamantsegment-Stahl-Verbundes in Abhängigkeit der an der Oberfläche des Segmentes gemessene Temperatur [35]



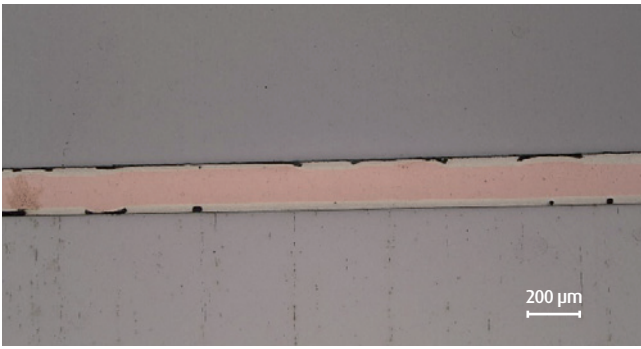


Abbildung 24 | Lötung von BrazeTec 49/Cu bei 750 °C und 10 Sekunden

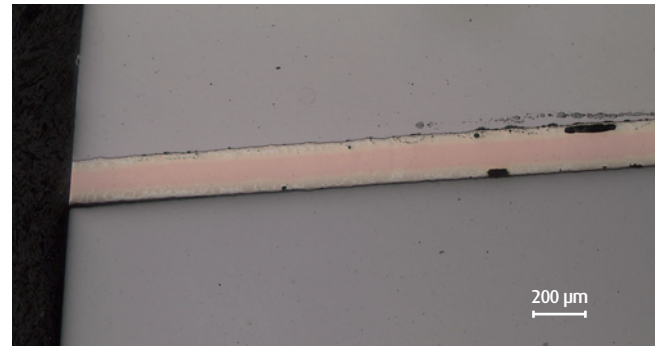


Abbildung 25 | Lötung von BrazeTec 49/Cu bei 950 °C und 600 Sekunden

5.5 Einfluss der Überhitzung von Schichtlot

Bei einem Schichtlot, wie dem BrazeTec 49/Cu oder 64/Cu, handelt es sich um Hartlot, das in der Mitte eine Kupferschicht besitzt. Da sich das plattierte Silberhartlot während des Lötvorgangs in schmelzflüssiger Form befindet, besteht die Gefahr, dass unter bestimmten Prozessbedingungen die Kupferschicht in das Hartlot legiert, sprich „verschwindet“ [36].

Nach internen Untersuchungen tritt dies nur bei starker Überhitzung des Hartlotsystems oder einer langen Lötzeit auf. Geht man davon aus, dass ein Bauteil induktiv gelötet wird, so ist eine Lötzeit im Sekundenbereich anzunehmen. Dort wird keine Schädigung auftreten (Abbildung 24). Es konnte festgestellt werden, dass bis zu einer Temperatur von 950 °C und einer Lötzeit von 10 Minuten kein wesentliches Einlegieren der Kupferzwischen-schicht in das Hartlot stattfand

(Abbildung 25). Bei einer höheren Löttemperatur von 1.100 °C war schon nach 3 Minuten ein deutlicher Effekt zu erkennen (Abbildung 26). Überträgt man diese Erkenntnis auf das Hartlot BrazeTec 64/Cu, welches auch in Ofenlötungen eingesetzt wird, wo es zu längeren Lötzeiten kommen kann, sollte man speziell hier die Löttemperatur so niedrig wie möglich wählen, um die beschriebenen Lösungseffekte zu verhindern.

5.6 Brüche in der Cu-Zwischenschicht

Kommt es im Einsatz eines Werkzeuges, welches mit Schichtlot gelötet wurde, zu einem Versagen der Lötstelle, wird dies in der Regel durch das Versagen der Kupferzwischen-schicht geschehen. Vergleicht man die Festigkeiten der verwendeten Grundwerkstoffe im Fügebereich, so wird man feststellen, dass die verwendete Kupferschicht die geringste Festigkeit aufweist. Dies ist not-

wendig, da die Zwischenschicht durch ihre Eigenduktilität anfallende thermisch induzierte Spannungen während des Lötens aufnehmen muss. Durch die vergleichsweise geringe Festigkeit der Zwischenschicht handelt es sich um eine Sollbruchstelle in der Fügezone. Die beschriebenen Abrisse können mehrere Gründe haben, die von der Lötung als solche bis hin zur Endanwendung reichen (Überlast im Betrieb). Abbildung 27 zeigt ein Beispiel für einen Bruch in der Kupferzwischen-schicht. Dieser wurde durch Überlast, welche an dem Hartmetall-Sägezahn anlag, hervorgerufen.

5.7 Fehlerhafte Positionierung von Schichtloten

Wie bereits im Kapitel 4.1 dargestellt, werden durch die Verlotung von Hartmetall mit Stahl sowohl thermisch als auch mechanisch induzierte Kräfte direkt in die beiden Grundwerkstoffe übertragen. Um im Speziellen

Abbildung 28 | Hartmetall-Sägezahn gelötet mit komplett eingelegetem BrazeTec 49/Cu [37]



Abbildung 29 | Hartmetall-Sägezahn gelötet mit BrazeTec 49/Cu in direktem Kontakt mit Stahlsitz [38]





Abbildung 26 | Lötung von BrazeTec 49/Cu bei 1.100 °C und 180 Sekunden



Abbildung 27 | Hartmetall-Sägezahn gelötet mit BrazeTec 49/Cu. Bruch der Fügeverbindung in der Kupferzwischen-schicht [37]

die thermischen Spannungen abzuleiten, wurde aufgezeigt, dass ein Schichtlot eingesetzt werden sollte, welches idealerweise auch den kompletten Fügebereich abdeckt, siehe auch **Abbildung 28**. Fehlt zwischen Hartmetall und Stahl das Hartlot bzw. die Kupferzwischen-schicht, sprich die Fügepartner stehen in direktem Kontakt zueinander (**Abbildung 29**), können Spannungen nicht im nötigen Maß abgebaut werden. Wird dieser Verbund im Späteren weiterer Last ausgesetzt, kann das Segment ab einer bestimmten Grenzlast versagen bzw. vom Träger abfallen.

Abbildung 30 zeigt ein weiteres Beispiel für einen Komplettausfall eines Hartmetall-Sägezahn. Hier wurde das Schichtlot zu kurz geschnitten und in doppelter Stärke nur auf einer Seite des Zahnsitzes eingelegt. Die Rückseite des Zahnes besaß somit keine spannungsabbauende Kupferzwischen-schicht in dem Lötbereich. Zudem war dort der Spalt

extrem schmal und wurde nur mit etwas Silberhartlot aus dem Schichtlot verfüllt. In Übereinstimmung mit den Spannungszuständen, wie sie in der **Abbildung 16** dargestellt sind, entstehen an der Rückseite des Hartmetallzahnes ungünstige Spannungsverhältnisse, da der Spannungsabbau eingeschränkt ist. Durch die Aufbringung vergleichsweise geringer Scherkräfte führte dies zu einem Bruch im Hartmetall. Abhilfe kann hier geschaffen werden, indem überwacht wird, dass das Schichtlot in voller Länge den Fügebereich ausfüllt.

5.8 Fehlerhafte Ausformung des Sägenstammblasses

Je nach Geometrie des eingesetzten Hartmetalls sollte auch das Stammbblatt einer Säge entsprechend angepasst werden [39]. Der stahlseitige Sitz sollte hierbei der Ausformung des Hartmetalls entsprechend folgen. Die Fügeflächen sollten planparallel zueinan-

der verlaufen. Unregelmäßigkeiten oder auch Defekte können zu einer Verminderung der Qualität in der Fügefläche führen. Kritisch ist hier insbesondere die richtige Ausformung des Radiuses am Fuß des Hartmetallsitzes (**Abbildung 31**). Bei einer fehlerhaften Ausformung, wie gezeigt, entsteht im Radius ein Hohlraum. Obwohl vor dem Löten im gesamten Bereich Lotband eingelegt wurde, besteht das Risiko, dass die Lotmenge nicht ausreicht um den Hohlraum zu füllen bzw., dass das Hartlot Flussmittel oder Gas einschließt. Vergleicht man die Flächenverhältnisse von Hohlraum und Spalt, so sieht man, dass der Anteil des Hohlraums schnell einen hohen prozentualen Anteil annehmen kann. Im Resultat kann die angebundene Fläche im Lötspalt sinken, was zu einer Verringerung der Festigkeiten im Verbund führen kann.

Abbildung 30 | Hartmetall-Sägezahn gelötet mit BrazeTec 49/Cu. Zerstörtes Hartmetall durch falsch eingelegtes Schichtlotband [37]

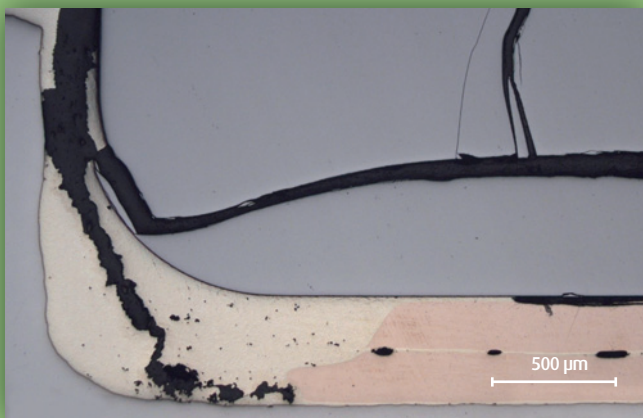


Abbildung 31 | Fehlerhaft ausgeformtes Sägenstammbblatt



6. Allgemeine Empfehlungen

Tabelle 14 | Zusammenstellung der Lötprozesse anhand von eingesetztem Hartstoff

Hartstoff	Anwendung	Lot	Flussmittel	Verfahren	Atmosphäre	Bemerkung
Hartmetall	Bohrer	BrazeTec 4900	BrazeTec spezial h Paste	Induktion, Flamme	Luft	-
Hartmetall	Sägeblatt, Papiermesser	BrazeTec 49/Cu BrazeTec 49/Cu ^{plus}	BrazeTec h 285	Induktion, Flamme	Luft	-
Hartmetall	Chirurgisches Besteck	BrazeTec 49/CuNiFe	BrazeTec h 285	Induktion	Luft	Korrosionsbeständigere Mittelschicht
Hartmetall	TiN-beschichtete Werkzeuge	BrazeTec 6488	BrazeTec h 285	Induktion, Flamme	Luft	-
Hartmetall	Steinmeißel	BrazeTec 21/80	BrazeTec s Paste	Induktion, Ofen	Stickstoff	-
Hartmetall, wenig Binder	Fräser, Sägeblätter, Bohrer, Hammerbohrer	BrazeTec 4900 BrazeTec 49/Cu BrazeTec 21/80	BrazeTec h 900	Induktion, Flamme	Luft	Flussmittel zum Aktivieren der Hartmetalloberfläche
Cermet	Sägeblätter, Fräser	BrazeTec 49/Cu BrazeTec 4900	BrazeTec h 900	-	-	Flussmittel zum Aktivieren der Hartmetalloberfläche
Diamant	Kernbohrer, Schneidscheiben	BrazeTec P 1002.1	-	Ofen	Argon 4.8, Vakuum	-
PKD / PcBN	Wendeschneidplatten	BrazeTec CB 4	-	Ofen	Argon 4.8, Vakuum	-
PKD / PcBN auf Hartmetall gesintert	Fräser	BrazeTec 5507 BrazeTec 4900	BrazeTec spezial h	Induktion	Luft	-
Diamantsegmente	Trennscheiben	BrazeTec 5507	BrazeTec h 80	Induktion	Luft	-
Keramik	Keramikschnelden	BrazeTec CB 10	-	Ofen	Argon 4.8, Vakuum	-

Tabelle 15 | Allgemeine Empfehlung zum Löten von Hartstoffen

Hartstoff	Hartlotssysteme nach DIN EN ISO 17672: 2010				Lötverfahren		
	Silberbasis-hartlote	Kupferbasis-hartlote	Aktivlote	Nickelbasis-hartlote	Induktion	Flamme	Ofen
Hartmetall	•	•	-	-	•	•	•
Cermet	•	-	-	-	•	•	•
Diamant							
- rein	-	-	•	•	-	-	•
- in metallischer Matrix (Diamantsegmente)	•	-	-	-	•	•	-
Polykristalliner Diamant (PKD)							
- rein	-	-	•	-	-	-	•
- auf Hartmetall gesintert	•	-	-	-	•	-	-
Kubisches Bornitrid (cBN)	-	-	•	-	-	-	•
PcBN (PcBN auf Hartmetall gesintert)	•	-	-	-	•	-	-

Literatur

- [1] Weise, W., Koschlig, M., Herzog, H., Beuers, J.: Einsatz innovativer Lote in der Schneidtechnik; Tagungsband „Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen“, DVS-Berichte Band 192, S. 62 – 67 (1998)
- [2] CERATIZIT: Hartmetall für die Holzbearbeitung
http://www.ceratizit.com/services/downloads/?fileid=20&lang=en_file&rcHash=3145b211f0464caa43895c07e598bd72
- [3] DIN ISO 513:2014: Klassifizierung und Anwendung von harten Schneidstoffen für die Metallzerspanung mit geometrisch bestimmten Schneiden – Bezeichnung der Hauptgruppen und Anwendungsgruppen
- [4] Stahlschlüssel, Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH (2013)
- [5] Mahler, M., Zimmermann, K. F.: Löten von Hartmetallen, Technik die verbindet, Band 30, S. 238, Degussa AG (1975)
- [6] DIN EN ISO 17672:2010-11, Hartlöten – Lote
- [7] Schnee, D.: BrazeTec Präsentation „Grundlagen des Lötens“, Hartlötseminar, Technische Akademie Esslingen (2014)
- [8] Müller, W., Müller, J.U.: Löttechnik: Leitfaden für die Praxis, S. 128 – 131 für Mg- und Ag-Lote, S. 167 – 174 für Ni-Basislote, S. 197 – 199 Hartmetalle, DVS Verlag GmbH (1995)
- [9] DVS Merkblatt 3102: Herstellen von Keramik: Keramik- und Keramik- Metall-Verbindungen durch Aktivlöten, Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS Verlag GmbH (2005)
- [10] DIN EN 1045:1997-08: Flussmittel zum Hartlöten – Einteilung und technische Lieferbedingungen
- [11] Benkowsky, G.: Induktionserwärmung, Verlag Technik GmbH, S. 11 – 23, (1990)
- [12] AWS C3 committee: Brazing Handbook, S. 409 – 434 Löten von Cermets und Hartmetallen, S. 430/31 Induktion, S. 623 – 635 Löten von Diamanten, American Welding Society (2007)
- [13] DVS Merkblatt 2602: Hartlöten mit der Flamme, Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS Verlag GmbH, (2001)
- [14] Schnee, D.: Grundlagen des Lötens 2. Auflage (2013)
- [15] Davis, J. R.: Tool Materials, S. 42 – 53 über Hartmetalle, S. 67 – 76 Keramiken, S. 77 – 84 Beschichtungen für Schneidstoffe, S. 85 – 100 Diamant und CBN, S. 101 – 109 Schleifanwendungen, S. 381 – 382 Löten, ASM International (1998)
- [16] Roberts, P.M.: Industrial Brazing Practice, CRC Press LLC (2004)
- [17] Raßbach, S.: Hartmetall – ein moderner Hochleistungswerkstoff und seine Perspektiven, Vortrag, Ceratizit (2002)
- [18] Schimpfermann, M., Bronny, M.: Hartlöten von HW-Schneidwerkzeugen, HOB – Die Holzbearbeitung, Ausgabe Mai (2011)
- [19] Öry, H.: Leichtbau I, II, Umdruck zur Vorlesung an der RWTH Aachen, S. 256 – 257, (1985)
- [20] Timoshenko, S.P., Boodier, J.N.: Theory of Elasticity, McGraw-Hill (1987)
- [21] Timoshenko, S.P.: Analysis of Bi-Metal Thermostats, J. Opt. Soc. Am. 11, S. 233 – 255, (1925)
- [22] Lieferprogramm BrazeTec (2013)
- [23] Schnee, D., Zenk, C., Magin, M., Rassbach, S., Hafner, T., Meyer, U.: Optimized Brazing Gap Width for Cemented Carbide Tipped Saw Blades, Proceedings of the 5th International Brazing and Soldering Conference, IBSC 2012 USA, S. 149 – 155, (2002)
- [24] Magin, M., Rassbach, S.: Stress Analysis on Brazed Hardmetal Saw Teeth, 17. Plansee Seminar, Reutte (2009)
- [25] Schnee, D., Zenk, C., Magin, M., Rassbach, S., Hafner, T., Meyer, U.: Einfluss der Bandbreite von Schichtloten auf die Festigkeit der Verbindung von Hartmetall und Stahl bei Sägeblättern, Tagungsband „Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen“, DVS-Berichte Band 263, S. 226 – S. 229, (2010)
- [26] Sekulic, D. P.: Advances in brazing – Science, technology and application, Woodhead Publishing Limited, S. 160 – 191 CBN; S. 423 – 467 Löten von Schneidstoffen, (2013)
- [27] Peaslee, R. L.: Brazing Footprints: Case Studies in High-Temperature Brazing, Wall Colmonoy Cooperation, S. 204 – 207, (2003)
- [28] Bex, P. A., Shafto, G. R.: Einfluss von Temperatur und Wärmebelastungsdauer auf das Einsatzverhalten von PKD-Werkzeugen, Diamant-Information M 38, Ademant-Seminar, S. 12 – 18, (1984)
- [29] Schimpfermann, M.: BrazeTec Präsentation „Löten in der Werkzeugindustrie“, DGM Seminar „Löten – Grundlagen und Anwendungen“, RWTH Aachen (2014)
- [30] Juza, R.: Nitrides of Metals of the First Transition Series, Advances in inorganic chemistry and radiochemistry, Vol. 9, Academic Press New York, S. 81 – 131, (1966)
- [31] Gavrichen, K. S., Solozhenko, V. L., Gorbunov, V. E., Golushina, L. N., Totrova, G. A., Lazarev, V. B.: Low-temperature heat capacity and thermodynamic properties of four boron nitride modifications, Thermochimica Acta, 217, S. 77 – 89, (1993)
- [32] N.N.: BrazeTec Präsentation „Aktivlöten“ (2014)
- [33] Lugscheider, E.: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben: Hartlöten von hartmetallbestückten Bauteilen und Werkzeugen (2002)
- [34] Etmayer, E., Suchentrunk, E.: Über die thermische Stabilität der Eta-Carbide, Monatshefte für Chemie, 101, S. 1098 – 1103, (1970)
- [35] Schnee, D.: Technical report, BT-BC-2009-12-18-Sn (2009)
- [36] Starck, S.: Technical report, BT-BC-2011-08-20-Sk (2011)
- [37] Schimpfermann, S.: Batch card, LK-2013-0088 (2013)
- [38] Ries, H.: Batch card, LK-2014-0006 (2014)
- [39] Schimpfermann, S.: Batch card, LK-2014-0083 (2014)
- [40] Schnee, D., Wiehl, G., Starck, S.: Development of Ag-Cu-Zn-Sn brazing filler metals with a 10 weight-% reduction of silver and same liquidus temperature, 2014 International conference on Brazing, ..., Beijing (2014)