

**Laserstrahllöten von Stahl und Hartmetall
für zerspanende Werkzeuge mit definierter Schneide**

Der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Christian Stahlhut

geboren am 29.12.1977 in Rinteln

2011

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. P. Wriggers

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. med. h.c. H. Haferkamp

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Fr.-W. Bach

Tag der Promotion: 14.12.2011

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Laser Zentrum Hannover e. V. (LZH).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.Ing. E.h. mult. Dr. med. h.c. H. Haferkamp, dem ehemaligen Direktor des Institutes für Werkstoffkunde der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover und ehemaligen Vorstandsmitglied des Laser Zentrums Hannover e. V., für die Aufgabenstellung und die wohlwollende Unterstützung, ohne die die Durchführung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Fr.-W. Bach, dem Leiter des Institutes für Werkstoffkunde der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, danke ich für die Übernahme des Koreferates.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. P. Wriggers, dem Leiter des Institutes für Kontinuumsmechanik der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, gilt mein Dank für die freundliche Prüfungsleitung.

Des Weiteren gilt mein herzlicher Dank meinen Kollegen der Abteilung „Werkstoff- und Prozesstechnik“ und insbesondere der Fachgruppe „Fügen und Trennen von Metallen“ sowie den technischen Angestellten des Laser Zentrums Hannover e. V. für die stets kooperative Zusammenarbeit und die fruchtbaren Diskussionen.

Teile der vorliegenden Arbeit wurden im Rahmen des durch die Stiftung Industrieforschung (SIF) geförderten Projektes „Verbesserung der Fertigungsqualität von Kreissägeblättern durch diodenlasergestützte Bestückung mit Hartmetallschneiden“, sowie im Rahmen des durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e. V. (AiF) geförderten Projektes „Laserstrahllöten von Hartmetallen an Schneidwerkzeugen – Charakterisierung der Prozessgrößen und Festigkeitseigenschaften“ durchgeführt. Der SIF und der AIF seien an dieser Stelle herzlich für diese Förderung gedankt. Den beteiligten Industriepartnern gilt mein herzlicher Dank für die Bereitstellung von Werkstoffen, Versuchstechnik und Prüfergebnissen.

Hannover, im Dezember 2011

Christian Stahlhut

Abstrakt

Kreissägeblätter aus hochkohlenstoffhaltigem Werkzeugstahl gehören zu den am stärksten belasteten Zerspanwerkzeugen. Die steigenden Anforderungen an erreichbare Zeitspanvolumina, verringerte Sägeblattstärken und Erhöhungen der Umfangsgeschwindigkeiten erfordern eine Weiterentwicklung des Konzepts zum Fügen der Werkstoffpaarung Stahl und Hartmetall. Das in dieser Arbeit erstmalig auf die automatisierte Fertigung von Kreissägeblättern angewendete Laserstrahl-Lötverfahren kann nicht nur die mechanischen Eigenschaften der Sägeblätter verbessern, sondern auch durch eine gezieltere Wärmeeinbringung und -führung die beim induktiven Löten auftretenden Beeinflussungen des Stahlgrundwerkstoffs reduzieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurden neben grundlegenden Untersuchungen hinsichtlich der Eignung verschiedener am Markt verfügbarer Typen von Laserstrahlquellen sowie des Einflusses der laserseitigen Parameter auch die Integration des Verfahrens in eine automatisierte Lötmaschine umgesetzt. Neben dem entwickelten Prozess wurden durch metallographische und mechanisch-technologische Untersuchungen die Grundwerkstoffe sowie die Zusatzwerkstoffe für das Laserstrahl-Löten qualifiziert. Der Einsatz der lasergelöteten Sägeblätter im Dauerschnittversuch dokumentiert die Erfüllung der gestellten Anforderungen.

Neben dem Nachweis der grundsätzlichen Anwendbarkeit des Verfahrens konnte gezeigt werden, dass das Laserstrahl-Löten geeignet ist, eine Steigerung der Verbindungsfestigkeiten zwischen dem Stammblatt und den Schneidwerkstoffen – bei gleichzeitiger Reduktion der Fügezeit und Erhöhung der Wirtschaftlichkeit – zu erzielen.

Schlagwörter: Laser, Löten, Aufhärtungen, Verbindungseigenschaften, hartmetallbestückte Sägeblätter

Abstract

Circular saw blades made of tool steel with high carbon content are among the highly stressed cutting tools. The increasing requirements concerning high material removal rates, reduced saw blade thickness and uprating the circumferential speed require a development of the joining technology for steel and carbide materials. The laser brazing process, the first time used for the production of circular saw blades, can improve the mechanical properties of saw blades and also reduce the influences of inductive soldering on the basic material, due to targeted heat input and heat conduction. In the course of this work, the influence of laser parameters and the integration of the process in an automated soldering machine were investigated, apart from fundamental investigations concerning the suitability of using different kinds of laser sources available on the market. Besides the developed process, the base materials as well as the filler materials for laser brazing were qualified using metallographic and mechanical-technological investigations. The permanent tests with laser brazed saw blades in a cutting device demonstrate the fulfilment of the previously explained requirements on the components.

Apart from proving fundamental applicability of the process laser brazing has shown to be the suitable for increasing the connection strengths while reducing the joining time by increasing the economic efficiency.

Keywords: laser, brazing, hardness increasing, connection properties, carbide tipped saw blade

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	VI
1 Einleitung	1
2 Stand von Wissenschaft und Technik	3
2.1 Fertigung von Kreissägeblättern	4
2.1.1 Schneidstoffe	5
2.1.2 Stahlwerkstoffe der Stammblätter	8
2.2 Mechanisches und adhäsives Fügen in der Sägenfertigung.....	9
2.2.1 Klemmen der Schneiden	9
2.2.2 Nieten von Schneidensegmenten	9
2.2.3 Kleben	10
2.3 Thermisches Fügen in der Sägenfertigung.....	10
2.3.1 Schweißen	10
2.3.2 Laserstrahlschweißen	11
2.3.3 Löten	11
2.3.4 Laserstrahllöten.....	29
2.3.5 Induktionslöten	33
3 Ausgangssituation und Zielsetzung.....	37
3.1 Ausgangssituation	37
3.2 Zielsetzung	38
4 Lösungskonzept	39
5 Versuchswerkstoffe und Probengeometrien.....	41
5.1 Probengeometrien	41
5.1.1 Blechmaterial	42
5.1.2 Hartmetalle.....	43
5.2 Lötzusätze	43
5.3 Löthilfsstoffe.....	44
6 Versuchsaufbau und Prozessentwicklung.....	45
6.1 Methoden der Strahleinkopplung / Erwärmung der Lötzone	45
6.2 Laserstrahlquellen	48
6.3 Versuchsanlage für die Machbarkeitsstudie	48
6.4 Aufbau einer automatisierten Laserlötmaschine	50

6.5	Prozessbeobachtung und -regelung	53
6.6	Äußere Lötnahtbewertung	55
6.7	Statische und dynamische Prüftechnik	56
6.7.1	Metallographie und Härteprüfung	56
6.7.2	Abscherversuche	57
6.7.3	Schneidversuche	59
7	Versuchsdurchführung und Verfahrensablauf	60
8	Ergebnisse und Diskussion	63
8.1	Einfluss der Strahlparameter auf das Temperaturregime der Lötzone	64
8.2	Bewertung der Löt eignung unterschiedlicher Erwärmkonzepte	65
8.2.1	Löt eignung des Lasers bei Bestrahlung der Spanfläche	65
8.2.2	Veränderung der Löt ergebnisse bei seitlicher Bestrahlung	69
8.2.3	Veränderung der Ergebnisse bei Bestrahlung der Hauptfreifläche ..	74
8.2.4	Auswahl der Einstrahlvariante	75
8.3	Einfluss der Temperaturregelung auf den Lötprozess	77
8.3.1	Einfluss des Parameters Solltemperatur auf das Löt ergebnis	79
8.3.2	Einfluss der Laserleistung auf den geregelten Lötprozess	85
8.4	Beeinflussung der Hartmetallschneide durch Laserstrahlung	85
8.4.1	Strahlprofilanalyse und Intensitätsverteilung des Laserstrahls	87
8.4.2	Elementanalyse der Schneidenoberfläche	88
8.5	Erarbeitetes Prozessfenster für automatisierte Lötungen	89
8.6	Metallographische Untersuchungen des Mikrogefüges	91
8.7	Statische Festigkeitsuntersuchungen	97
8.7.1	Bewertung der Gefügehärte	97
8.7.2	Abscherversuche zur Ermittlung der Verbundfestigkeit	101
8.8	Dynamische Festigkeitsuntersuchungen	104
8.9	Simulation der Wärmeverteilung beim Laser- und Induktivlöten	106
9	Folgerungen und Ausblick: Bedeutung für die Praxis	114
9.1	Wirtschaftliche Aspekte	114
9.2	Technologische Aspekte	119
10	Zusammenfassung	122
11	Literaturverzeichnis	125
12	Lebenslauf	136

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
A	mm ²	Querschnittsfläche
A _{GW}	-	Bewegungsrichtung Grundwerkstoffe
A _{Lot}	-	Bewegungsrichtung Lotwerkstoffe
A _G	%	Absorptionsgrad
[B]	-	Vektor der integrierten Normfunktion
b	mm	Spaltbreite
b _s	mm	Schneidenbreite
D	mm	Durchmesser des Sägeblattes
DZ	mm	Diffusionszone
DZ _{GW}	mm	Diffusionszone im Grundwerkstoff
DZ _L	mm	Diffusionszone im Lotwerkstoffanteil
D _{GW}	m ² /s	Diffusionskoeffizient Grundwerkstoff
D _L	m ² /s	Diffusionskoeffizient Lot
D _k	m ² /s	Diffusionskoeffizient
[D _w]	-	Wärmestromdichtevektor
D ₀	m ² /s	stoffabhängige Diffusionskonstante
D ₁	m ² /s	Diffusionskoeffizient im schmelzflüssigen Zustand
D ₂	m ² /s	Diffusionskoeffizient im festen Zustand
D _{2KV}	m ² /s	Diffusionskoeffizient im festen Zustand an den Gitterfehlern Korngrenze und Versetzung
d	mm	Dicke
d _B	mm	Brennfleckdurchmesser
d _L	µm	Durchmesser der Lichtleitfaser
E	N/mm ²	Elastizitätsmodul
e	-	Euler'sche Zahl
F _A	N	Andrückkraft
F _S	N	Spannkraft
f	mm	Brennweite
f _i	Hz	Induktionsfrequenz

f_{Mt}	Hz	Messtakt
G	-	Grenze (-fläche) zwischen Grundwerkstoff und Lot
h	mm	Höhe
H_i	mm	Elementhöhe
$I_{\sim Primär}$	A	Wechselstrom, der die Primärspule durchfließt
$I_{\sim Ind}$	A	Wechselstrom, der in die Sekundärspule induziert wird
J	A/m^{-2}	Stromdichte
K	-	Strahlpropagationsfaktor
K_A	€	Abschreibungskosten
K_E	€	Energiekosten
K_{EIN}	€	Einstellkosten
K_F	€	Fertigungskostensatz
K_H	€	Kosten für Hilfs- und Betriebsstoffe
K_I	€	Instandhaltungskosten
K_P	€	Programmierkosten
K_{MH}	€/h	Maschinenstundensatz
K_R	€	Raumkosten
K_W	€	Werkzeugkosten
K_Z	€	Zinskosten
Kl_c	$N/mm^{3/2}$	Zähigkeit (Bruchzähigkeit)
L	mm	Länge der Schneiden
l	mm	Länge
L_K	€	Lohnkosten
L_{NK}	€	Lohnnebenkosten
L_S	mm	Länge der Schneiden
N	-	Formfunktion
P_k	N/m^2	kapillarer Fülldruck
P_L	kW	Laserleistung
Q	J/m	Aktivierungsenergie
Q_G	l/min	Gasvolumenstrom
$q''(x)$	W/m^2	Wärmestromdichte
q_{St}	mm·mrad	Strahlparameterprodukt

q_0	W	beaufschlagter Wärmestrom
R	J/kg·K	universelle Gaskonstante
RT	°C	Raumtemperatur
$R_{p0,2}$	N/mm ²	Dehngrenze
R_m	N/mm ²	Zugfestigkeit
R_x	€	Restfertigungskosten
r	mm	Radius
s	mm	Blechdicke / Stammblattdicke
t_D	s	Diffusionszeit
t_L	s	Dauer der Laserbestrahlung
$t_{Löt}$	s	Lötzeit
t_N	h	Lastlaufzeit
t_P	s	Prozessdauer
T	°C	Temperatur
T(x)	°K/m	Temperaturverlauf
T_A	°C	Arbeitstemperatur
T_L	°C	Liquidustemperatur
T_r	%	Transmission
T_S	°C	Solidustemperatur
T_W	°C	Wirktemperatur des Flussmittels
U	1/min	Anzahl der Umdrehungen pro Minute
V	mm ²	Volumen der Elemente
v_c	m/s	Schnittgeschwindigkeit
v_f	mm/min	Verfahrensgeschwindigkeit
v_{fy}	mm/min	Verfahrensgeschwindigkeit über dem Lötspalt in y-Richtung
v_{fz}	mm/min	Verfahrensgeschwindigkeit über dem Lötspalt in z-Richtung
WBW	€	Wiederbeschaffungswert
X	mm	mittlerer Diffusionsweg
X_{GW}	-	Diffusionszone Grundwerkstoff
X_L	-	Diffusionszone Lot

α	K^{-1}	Wärmeausdehnungskoeffizient
α_{EW}	$^{\circ}$	Einstrahlwinkel des Laserstrahls
α_{TR}	$^{\circ}$	Winkel der Totalreflexion an der Grenzfläche
Δl	mm	Scherdehnung
δ	mm	Stromeindringtiefe
η	m^2/s	dynamische Viskosität
θ	$^{\circ}$	Benetzungswinkel
ϑ	$^{\circ}$	gemessene Löttemperatur
λ	nm	Laserwellenlänge
λ_{th}	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
μ_r	-	magnetische Permeabilität
π	W/mm^2	Energiepotenzial
π_i	W/mm^2	inneres Energiepotenzial
π_{ie}	W/mm^2	inneres Energiepotenzial des einzelnen Elementes
π_a	W/mm^2	äußeres Energiepotenzial
π_{ae}	W/mm^2	äußeres Energiepotenzial des einzelnen Elementes
π_{ak}	W/mm^2	Energiepotenzial an den Elementknoten
ρ	g/cm^3	Dichte
ρ_w	$\Omega mm^2/m$	spezifischer elektrischer Widerstand
σ	N/mm^2	Spannung
σ_{12}	N/mm^2	Oberflächenspannung des Lotes gegenüber dem Umgebungsmedium
σ_{13}	N/mm^2	Oberflächenspannung des Grundwerkstoffes geg. dem Umgebungsmedium
σ_{23}	N/mm^2	Oberflächenspannung zw. Lot und Grundwerkstoff
Φ_{\sim}	Wb	zeitlich veränderlicher magnetischer Fluss

Abkürzungen

Ag	Silber
Al	Aluminium
Al-Si	Aluminium-Silizium
B	Bor

BwB	Betriebswirtschaftsblatt
C	Kohlenstoff
°C	Grad Celsius
CBN	kubisch kristallines Bornitrid (Mehrschichten-Schneidstoff)
CCD	Charged Coupled Device
Cd	Cadmium
Cermet	Verbundwerkstoff (Schneidstoff) aus keramischem Werkstoff in einer metallischen Matrix (zusammengesetzt aus engl. ceramic und metal)
CNC	Computer Numerical Control
Co	Kobalt
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
CVD	Chemical Vapour Deposition
cw	continuous wave
bzw.	beziehungsweise
DIN	Deutsches Institut für Normung
DP	polykristalliner Diamant (Schneidstoff)
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EN	Europäische Norm
EsV	Einstrahlvariante
F	Feinstkornhartmetall
FEM	Finite Elemente Methode
Fe	Eisen
FH12	Flussmittel
FL	Flussmittel
geg.	gegenüber
GW	Grundwerkstoff
GJ	Gusseisen
GS	Stahlguss
HB	Härte Brinell

HM	Hartmetall
HRC	Härte Rockwell (cone)
HSS	Hochleistungsschnellarbeitsstahl
HV	Härte Vickers
ISO	International Standardisation Organisation
i. d. R.	in der Regel
K01F	Schneidstoff
K01UF	Schneidstoff
K10F	Schneidstoff
l _{fm}	laufender Meter
LWL	Lichtwellenleiter
MK	Mischkristall
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
NbC	Niobkarbid
Nd:YAG	Neodym-dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat
NEM	Nicht-Eisen-Metalle
Ni	Nickel
O ₂	Sauerstoff
P	Phosphor
PID-Regler	Proportional-Integral-Differential-Regler
PKD	polykristalliner Diamant (Schneidstoff)
PM-HSS	Schnellarbeitsstahl, im Pulvermetallurgie-Verfahren hergestellt
Pyro	Pyrometer
P25	Schneidstoff
REM	Rasterelektronenmikroskop
S	Schwefel
St	Stahl
Si	Silizium
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TaC	Tantalkarbid
TiC	Titankarbid

UF	Ultrafeinstkornhartmetall
V	Vanadium
VC	Vanadiumkarbid
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
W	Wolfram
W_A	Adhäsionsenergie
WC	Wolframkarbid
WEZ	Wärmeeinflusszone
Yb:YAG	Ytterbium-dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat
Zn	Zink
Zr	Zirkonium
ZTU	Zeit-Temperatur-Umwandlungs(-Schaubild)

1 Einleitung

Kreissägeblätter sind rotationssymmetrische Werkzeuge mit definierter Schneide zum Trennen von Holz, Naturstein, Metall, Kunststoff und anderen festen Materialien. Dabei werden einteilige Kreissägeblätter und Verbundkreissägeblätter unterschieden. Einteilige Kreissägeblätter bestehen aus einem Stück Stahl, aus dem sie herausgestanzt werden, um anschließend durch spanende Verfahren mit der gewünschten Zahnform versehen zu werden. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Verbundkreissägeblätter bestehen aus einem hochkohlenstoffhaltigen Werkzeugstahl (Stammbblatt), auf den zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit gegenüber einteiligen Kreissägeblättern Schneiden aus Hartmetallen gelötet werden. Dabei ist derzeit das induktive Löten das einzige Fügeverfahren, um ausreichende Verbindungseigenschaften zu erreichen. Eine für das Induktionslöten typische, großflächige thermische Belastung des Stammbblatts im Bereich der Hartmetallschneide hat Aufhärtungen des Werkzeugstahls und damit eine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften zur Folge. Die maximal mögliche Festigkeit der Lötverbindung wird auf Grund nicht optimal einstellbarer Lötparameter in der Regel nicht erreicht [1].

Um thermische Schädigungen im Stammbblatt zu begrenzen, wird ein für die Lötverbindung ungünstiges Temperatur-Zeit-Regime verwendet, was eine verringerte Benetzung der Anbindungsflächen mit Lot sowie eine verringerte Verbindungsfestigkeit zur Folge hat [2,3,4,5]. Diese geringere Festigkeit kann im späteren Betrieb zum Versagen durch schlagartige Belastung führen. Für verschiedene Zahn- bzw. Schneidengeometrien muss zudem die Größe und Form der Induktorschleife individuell angepasst werden. Hinsichtlich der optimalen Induktionsschleifenform zur Maximierung der Energieeinbringung gibt es jedoch nach wie vor keine gesicherten Erkenntnisse [6,7].

Kreissägeblätter gehören auf Grund ihrer geometrischen Dimensionen und hoher erreichbarer Zeitspanvolumina zu den am stärksten belasteten Werkzeugen. Wachsende Anforderungen an die Zeitspanvolumina der Kreissägeblätter durch Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeiten führen zudem zu einer weiter verstärkten Belastung der Fügezonen zwischen den Schneidstoffen und dem Stammbblatt infolge größerer Fliehkräfte und Scherkräfte. Die Forderung der Holzverarbeitenden Industrie nach Minimierung des Sägeverschnitts bedingt außerdem immer dünner werdende Stammbblätter. Dies führt zu einer Verkleinerung der Fügezonen und setzt eine erhöhte Festigkeit der Lötverbindung voraus, in gesteigertem Maß auch hinsichtlich radial angreifender Kräfte, um ein Ablösen der Schneiden während des Betriebes zu verhindern.

Dieser Zielkonflikt bzgl. der Erhöhung der Werkzeuganforderungen bei nicht erreichbarer maximaler Verbindungsfestigkeit erfordert neuartige Fügeverfahren, welche sich durch eine präzise einstellbare einzubringende Wärmemenge sowie deren exakt lokal zu positionierende Wirkzone auszeichnet. Prädestiniert für diese Aufgabe ist das bisher noch nicht für die automatisierte Fertigung von Kreissägeblättern ange-

wendete Laserstrahllöten, welches auch die weiteren Anforderungen im Hinblick auf eine Minimierung des Stammblattverzugs, hohe Verfahrensflexibilität und variable Anpassung an verschiedene Zahn- bzw. Schneidstoffgeometrien sowie Automatisierungseigenschaften erfüllt.

Nicht zuletzt erhöht sich durch eine Steigerung der Verbindungsfestigkeit die Arbeitssicherheit bei der Handhabung der Werkzeuge, da die Gefährdung des Bedieners durch abplatzende Hartmetallschneiden minimiert wird. Dieses hohe Gefährdungspotenzial ist durch langjährige Erfahrungen aus der Sägenindustrie bekannt [8,9].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden ausgehend von dieser Problemstellung grundlegende Erkenntnisse zur Verbesserung der Lötnahteigenschaften von Stahl-Hartmetallwerkstoffpaarungen erarbeitet. Beginnend mit einer Untersuchung zur Eignung der verschiedenen Laserstrahlquellen Nd:YAG-, CO₂-, und Diodenlaser werden anschließend verschiedene Erwärmkonzepte der Fügezone entwickelt und wissenschaftlich untersucht. Die Versuchsergebnisse werden anhand von metallographischen Schliffen der Fügezone, Härtemessungen sowie Scherversuchen zur Charakterisierung der Verbindungsfestigkeit dokumentiert. Die erzielten Erkenntnisse fließen in den Umbau eines Induktionslötautomaten zum automatisierten Laserstrahllöten ein. Weiterhin bilden sie die Grundlage zur Fertigung lasergelöteter Kreissägeblätter, die anschließend im praktischen Sägeversuch getestet werden. Diese breite Datenbasis ermöglicht die technologische und wirtschaftliche Bewertung der Ergebnisse zur Erhöhung der Verbundfestigkeiten zwischen Stahl und Hartmetall im Hinblick auf einen späteren industriellen Einsatz.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

Bei der spanenden Bearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide [10] werden die höchsten Leistungswerte hinsichtlich des Zeitspanvolumens bei Kreissägen erreicht, da sie im Vergleich zu Band- oder Bügelsägen die höchste Werkzeugsteifigkeit besitzen. Zur Erhöhung ihrer Verschleißbeständigkeit werden die Kreissägeblätter mit Schneidstoffen aus Hartmetall bestückt. Für besondere Anwendungsfälle, wie z. B. die Hartbearbeitung oder das Hochgeschwindigkeitsfräsen, werden Sägeblätter neben Hartmetallen mit Kobaltbinder auch mit Cermets (Hartmetalle ohne freie Wolframkarbide), Schneidkeramik, kubisch kristallinem Bornitrid (CBN) oder polykristallinem Diamant (PKD) bestückt [11]. Diese Schneidstoffe zeichnen sich durch zunehmende Härte, aber wesentlich geringere Zähigkeit aus, wobei für sie auf Grund der bei der Hartbearbeitung auftretenden hohen Zerspankräfte nur stoffschlüssige Verbindungen sinnvoll sind [12].

In der Regel werden die Schneiden durch induktive Verfahren aufgelötet, wobei eine hohe thermische Belastung im Zahnrücken, d.h. an der Verbindungsfläche des Zahns zum Basiswerkstoff, stattfindet. Die dadurch entstehenden Festigkeitsverluste initiieren potenzielle Fehlstellen, welche dazu führen, dass die Zähne durch häufig auftretende schlagartige Belastungen während des Sägens abreißen [13]. Wird eine bestimmte Sägeblatt- und damit Schneidengröße unterschritten, ist die Schneide unter Umständen während der Lötung ganz von der Spannvorrichtung verdeckt, und die Prozesswärme wird vollständig über das Stammbblattmaterial eingebracht bzw. eingekoppelt. Die so verursachten Werkstoffschädigungen limitieren die Belastbarkeit der Kreissäge, da erhöhte Beanspruchungen auch ohne schlagartige Belastung zum Ausbrechen ganzer Sägezähne durch die Beanspruchungen im Schneidprozess führen können [3].

Durch die thermische Beeinflussung werden Eigenspannungen in das Stammbblatt induziert, welche die vorab durch das Richten und Spannen eingestellte Vorspannung und damit auch die Eigenfrequenz des Sägeblattes verändern können. Dadurch kann es im Sägebetrieb zu Resonanzschwingungen kommen, was vor allem eine verringerte Schnittqualität zur Folge hat [14,15,16,17]. Die thermische Belastung führt weiterhin zu einem Verzug des Sägeblattes sowie zu Schwärzungen der Sägezähne, woraus ein erhöhter Nachbearbeitungsaufwand in Form von Richten sowie Sandstrahlen (finishing) nach dem Löten resultiert [18,19].

Die stetig gestiegenen Anforderungen an die Zerspanwerkzeuge bedingen jedoch eine fehlerfreie Anbindung. Eine Verkleinerung der Fügezonen, die infolge der Reduktion der Stammblattdicke zur Minimierung des Verschnitts z. B. hochwertiger Hölzer führen, erfordert eine gesteigerte Festigkeit der Lötverbindung. Neuerungen hinsichtlich der Auslegung des Werkzeugs Kreissägeblatt erhöhen zusätzlich die radial angreifenden Kräfte [20,21]. Zusätzlich wird die Lötverbindung zwischen Stammbblatt und Schneidstoff durch gesteigerte Fliehkräfte beansprucht. Diese stehen im direkten kausalen Zusammenhang mit der Umfangsgeschwindigkeit des

Werkzeugs und der Forderung nach gesteigerten Zeitspannvolumina je Werkzeug und Zeiteinheit [19,22,23].

In der Praxis wird versucht, Wärmeeinflüsse dadurch zu reduzieren, dass zunächst nur jeder zweite bis vierte Zahn gelötet wird, und in einem anschließenden Umlauf die noch verbleibenden Zähne gefügt werden. Diese Vorgehensweise verringert geringfügig den Sägeblattverzug, erhöht jedoch die Fertigungszeit erheblich und kann eine Aufhärtung des Zahnrückens unterhalb der Hartmetallschneide nicht vermeiden.

2.1 Fertigung von Kreissägeblättern

Die Fertigung von Kreissägeblättern lässt sich vom Blech bis zum Endprodukt in sieben Bereiche gliedern [18]:

1. Produzieren des Ausgangsmaterials (Stahl-Blechwerkstoffe / Schneidstoffe),
2. Ausschneiden der Kontur des Stammblattes aus dem Stahl-Blechwerkstoff (Ronde),
3. Wärmebehandeln der Ronden,
4. Behandlung der Sägenoberfläche durch Schleifen des Zahnsitzes,
5. Richten und Spannen des Grundkörpers (Stammblatt),
6. Einlöten der Zähne (Schneidstoffe) sowie
7. Fertigstellung und Finish.

Als Stammblattwerkstoff werden verschiedene Chromstähle wie z. B. 75 Cr 1 (Werkstoff-Nr. 1.2003), 80 CrV 2 (Werkstoff-Nr. 1.2235) verwendet, die nach einem Warmwalzvorgang als schwarze, verzünderte Bleche vorliegen. Das kostenintensivere Warmwalzen wird dem Kaltwalzen vorgezogen, um Textureinflüsse des Bleches zu verringern, welche bei einem rotationssymmetrischen Körper zu einem anisotropen Verhalten führen können, das durch spätere Bearbeitungsschritte nicht mehr kompensiert werden kann.

Während der Herstellung eines Sägeblattes entsteht aus der quadratischen Blechplatte eine Ronde. Hierbei finden zum Ausschneiden und Lochen der Ronde thermische Schneidverfahren Anwendung, wobei vor allem das Laserstrahlschneiden zur Anwendung kommt. Weiterhin wird dieses Verfahren auch zum Erzeugen der kompletten Außenkontur (Zahnung inklusive der Passsitze für die Aufnahme der Schneiden) genutzt. Bei dünneren Blechen wird die Zahnung häufig auch ausgestanzt, und der Passsitz wird später geschliffen oder gefräst.

Im nächsten Schritt erfolgt eine Wärmebehandlung der Ronden im Ofen, welche die Blätter zunächst bei 850°C härtet und nachgeschaltet bei 500°C anlässt. Die Grundhärte wird hierdurch auf 42 bis 46 HRC eingestellt. Die durch das Warmwalzen und die Wärmebehandlung verzünderte Oberfläche wird anschließend zumeist blank geschliffen.

Da sich die Ronden auf Grund der starken thermischen und mechanischen Belastung während der beschriebenen Arbeitsgänge stark verformen, werden sie in einem weiteren – für die Qualität des Sägeblattes entscheidenden – Schritt gerichtet [24,25,26]. Durch das durchschnittliche Durchmesser-Dicken-Verhältnis von $D/s = 200$ weisen Kreissägeblätter zwar eine hohe radiale und tangential, jedoch nur eine geringe axiale Steifigkeit auf. Aus diesem Grund muss diese durch so genanntes „Vorspannen“ erhöht werden [27,28]. Dieser Prozess erfolgt durch plastische Verformung während des Richtens und kann auf Grund unterschiedlicher Sägeblattdurchmesser und Deformationsgrade schlecht reproduzierbar maschinell durchgeführt werden. Deswegen erfolgt das Richten und Vorspannen per Hand durch gezielte Schläge mit Hämmern unterschiedlicher Form und Masse, wobei die Komplexität dieses Vorganges durch die Kombination von Diagnose und Bearbeitung des Stammblattes zustande kommt und daher nur von sehr erfahrenem und qualifiziertem Personal durchgeführt werden kann. Diese sogenannten „Sägenrichter“ bewerten und bearbeiten das Werkzeug sowohl nach bestmöglicher Planheit als auch nach optimaler Vorspannung. Da somit die Qualität des Endproduktes von der Erfahrung des Facharbeiters abhängig und schwierig zu planen und zu reproduzieren ist, stellt der Richt- und Spannvorgang in der Fertigungsfolge einen Engpass in der Fertigungskapazität dar, der sich negativ auf die Flexibilität und Produktivität von Unternehmen auswirken kann. Untersuchungen zum Vorspannen und Richten per Laserstrahl zeigen, dass es technologisch realisierbar ist, die Bearbeitung mit dem Hammer durch einen rechnerunterstützten Laserprozess zu ersetzen [18]. Da die Einführung eines solchen Fertigungsprozesses für klein- und mittelständische Unternehmen mit sehr hohen Investitionskosten verbunden ist, werden Sägeblätter bislang von Hand gerichtet und vorgespannt [29,30,31,32].

Zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit werden im Folgenden die Stammblätter mit Schneiden bestückt, deren Härte- und Festigkeitswerte die der Stammblattmaterialien weit übertreffen. Je härter die Schneiden sind, desto höher ist ihr Widerstand gegen abrasiven und adhäsiven Verschleiß [33]. Das aus zähem Werkzeugstahl bestehende Stammblatt ist in der Lage, die über die Schneiden eingeleiteten und von den Sägeparametern abhängenden Zerspankräfte aufzunehmen. Auf Basis dieser Aufgabenstellung werden Sägeblätter mit hohen Standzeiten hergestellt [34,35,36,37].

2.1.1 Schneidstoffe

Damit die Schneidstoffe den Belastungen standhalten können, müssen sie einen bestmöglichen Kompromiss aus den im Folgenden genannten Eigenschaften besitzen.

Die Eigenschaftsanforderungen an die Schneidstoffe sind dabei teilweise gegensätzlich. So besitzt beispielsweise ein Schneidstoff mit hoher Zähigkeit keine hohe Härte. Auch ist ein Schneidstoff mit zunehmender Verschleißfestigkeit empfindlicher hinsichtlich einer schlagartigen Belastung. Hartmetalle stellen hierbei

einen guten Kompromiss dieser vielfältigen Anforderungen dar. Ein ideales Hartmetall, wie im Bild 2-1 dargestellt, vereint die gegensätzlichen Eigenschaften einer hohen Härte mit gleichzeitig hoher Biegebruchfestigkeit (Zähigkeit) [31,32,34,35,36].

Hartmetalle werden als zwei- oder mehrphasige, pulvermetallurgisch hergestellte Legierungen aus einem die Zähigkeit bestimmenden Bindemetall (β -Phase) und Metallkarbiden oder -karbonitriden als Härte-träger definiert [12]. Als Hartstoffe werden Wolframkarbid (WC, α -Phase), Titan-, Tantal-, Vanadium- und Niobkarbid (TiC, TaC, VC, NbC; γ -Phase) oder Titankarbonnitrid und andere Titanmischkarbide verwendet. Dieser Aufbau hilft den für Schneidstoffe kennzeichnenden und zugleich begrenzenden Widerspruch – hohe Härte und Verschleißfestigkeit oder hohe Biegefestigkeit und Zähigkeit zu besitzen – zu umgehen. Seine vor allem hohe Druckfestigkeit macht Hartmetall zum dominierenden Werkstoff für Zerspanungsoperationen mit geometrisch bestimmter Schneide [38,39,49].

Die Weiterentwicklung der Hartmetalle und der Herstellungstechnik führt zu neuen feinkörnigen Hartmetallsorten hoher Härte ohne Rückgang der Zähigkeitseigenschaften. So stehen derzeit Hartmetalle mit unterschiedlichsten Eigenschaften am Markt zur Verfügung. Im Bild 2-1 sind die verschiedenen verfügbaren Hartmetalle hinsichtlich ihrer Festigkeit gegenüber der Zähigkeit dargestellt.

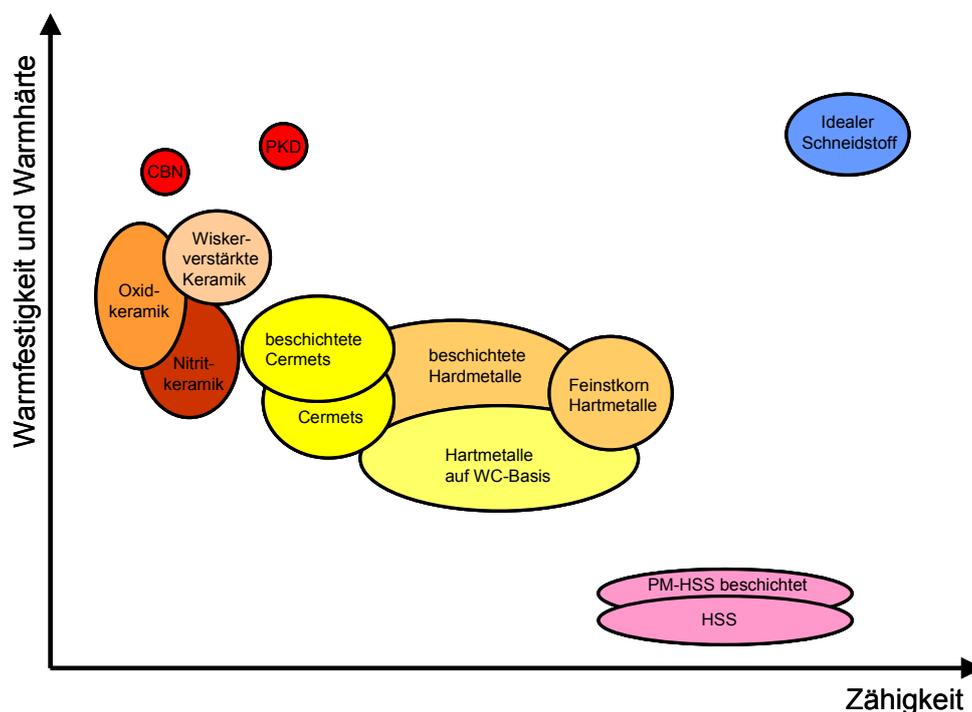


Bild 2-1: Hartmetalle in Abhängigkeit von Warmfestigkeit / Warmhärte und Zähigkeit [12,40]

Viele Hartmetalle, insbesondere auch die mit höchster Verschleißfestigkeit und Zähigkeit, bestehen fast ausschließlich aus Wolframkarbid mit Kobalt als Bindemetall. Zähle Hartmetalle enthalten bis zu 40 Vol.% Kobalt, bei verschleißfesten dagegen ist der Anteil annähernd auf 0% reduziert und diese Hartmetalle werden als

„binderarm“ bezeichnet. Die Zähigkeit verhält sich bei Reduktion des Kobaltbinders genau gegenläufig zur Härte [41,42].

Gemäß DIN ISO 513 [43] werden Hartmetalle in drei Zerspanungs-Anwendungshauptgruppen (P, K und M) eingeteilt. Die P-Gruppe (plastisch) umfasst dabei die Hartmetalle zur Bearbeitung lang spanender Eisenwerkstoffe wie Stahl und Stahlguss. Die weitgehend TiC- / TaC-freien WC-Co-Legierungen der K-Gruppe (kurz spanend) werden für die Zerspanung von NE-Metallen, Grauguss, Al-Si-Legierungen oder auch Kunststoffen und Holz verwendet. Den Übergang zwischen der P- und K-Gruppe bilden die Hartmetalle der M-Gruppe (Mischgruppe), die für legierte austenitische bzw. ferritische Stähle und legierten Grauguss eingesetzt werden [33,43]. Die Hauptgruppen sind jeweils in Anwendungsgruppen mit Kennzahlen von 01 bis 50 unterteilt. Bei zunehmender Kennzahl wächst die Zähigkeit und mit ihr die Eignung für grobe Beanspruchungen. Mit abnehmender Kennzahl dagegen nimmt die Härte und damit die Verschleißfestigkeit zu (vgl. Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Einteilung der Hartmetalle nach Zerspanungs-Anwendungsgruppen [43]

Anwendung	Hauptgruppe	Schneidstoffbezeichnung	Einsatzfelder der Schneidstoffe	
			hinsichtlich des Werkstoffs	hinsichtlich der Bearbeitungsform
↑ Zunahme an: Härte bzw. Verschleißfestigkeit des Schneidstoffs, der Schnittgeschwindigkeit und Spanlänge ↓ Zunahme an: Zähigkeit des Schneidstoffs, der Vorschubrate und Schneidenbelastung	P	P01	Stahl (St), Stahlguss (GSt)	Feinbearbeitung
		P10	St, GSt, langspanender	Drehen, Fräsen, Gewindebohren
		P20	Temperguss	Drehen, Fräsen
		P30	St, GSt mit Lunkern	Schruppen
		P40	St, GSt, Automatenstahl	ungünstige Bearbeitungsfälle
	M	M10	St, GSt, Gusseisen (GJ), Manganhartstahl	Drehen, hohe Schnittgeschwindigkeit
		M20	St, GSt, G, Austenitischer-Stahl	Drehen, Fräsen
		M30	St, GJ, hochwarmfester St	Schlicht-Schruppen
		M40	Automatenstahl, NE-Metalle (NEM), Leichtmetalle	Drehen, Abstechen
	K	K01	hartes GJ, Duroplaste, AlSi-Legierungen	Drehen, Fräsen, Schälldrehen, Schaben
		K10	GJ (HB ≥ 220), harter Stahl, Gestein, Keramik	Drehen, Fräsen, Bohren, Räumen, Schaben, Innendrehen
		K20	GJ (HB ≤ 220), NEM	Drehen, Fräsen, Innendrehen
		K30	Stahl, GJ (HB < 220)	Drehen, Fräsen, Nutenfräsen
		K40	NEM, Holz	bei großem Spanwinkel

Neuentwicklungen wie Feinst- und Ultrafeinstkornhartmetalle (Kennzeichnung F, bzw. UF in der Schneidstoffbenennung) mit WC-Korngrößen von $< 0,7 \mu\text{m}$ bzw. $< 0,5 \mu\text{m}$ zielen verstärkt auf gleichzeitige Steigerung der Härte und der Biegebruchfestigkeit von Hartmetalllegierungen. Durch diese Leistungssteigerung ist es hartmetallbestückten Werkzeugen möglich, neue Anwendungsgebiete z. B. im Bereich der Hartbearbeitung zu erschließen [41,49].

Cermets gehören ihrem Aufbau nach zu den Hartmetallen, da sie aus in Bindemetall (vor allem Nickel) eingebetteten Hartstoffen bestehen. Da als Hartstoffe vornehmlich Titankarbid und Titanitrid und nur geringfügig Wolframkarbid Verwendung finden, haben Cermets eine geringere Dichte, eine kleinere Wärmeleitfähigkeit und eine

größere Wärmedehnung als Wolfram-Hartmetall. Eingesetzt werden diese Schneidstoffe für Feinbearbeitungen durch Drehen sowie bei der Fräsbearbeitung von Stahlwerkstoffen. Für eine grobe Bearbeitung mit wechselnden Schnitttiefen sind Cermets nicht geeignet. Der große Vorteil dieses Schneidstoffs liegt in der weltweiten Verfügbarkeit der Rohstoffe Titan und Nickel [12].

CVD- (Chemical Vapour Deposition) Diamant-Werkzeuge werden in der DIN ISO 513 [43] nicht behandelt. Sie werden hinsichtlich Herstellung und Charakterisierung in der VDI-Richtlinie 2841 beschrieben [44]. Die Hartmetallgrundkörper dieser Schneidstoffe werden zur weiteren Steigerung der Verschleißfestigkeit mittels chemischer Gasphasenabscheidung (Chemical Vapour Deposition - CVD) mit polykristallinem Diamant beschichtet [44].

Polykristalliner Diamant, so genannter DP- oder PKD-Schneidstoff, wird durch polykristallines Versintern von Diamantpulver gefertigt. Die Härte dieses Schneidstoffs ist mit der Härte von Naturdiamanten vergleichbar, jedoch ohne den Nachteil der Schlagempfindlichkeit. Die sehr hohen Härten dieser polykristallinen Diamanten werden abweichend mittels der so genannten Knoop-Härteprüfung – einer Sonderform der Vickers-Härteprüfung – gemessen. Die in der Vickers-Prüfung gleichseitige Diamantspitze verfügt in der Knoop-Prüfung über eine rhombische Form. Die Spitzenwinkel betragen $172,5^\circ$ für die lange und 130° für die kurze Seite. Es wird nur die lange Diagonale des Eindrucks ausgemessen. Knoop-Prüfungen eignen sich am besten für kleine Prüfbereiche oder für spröde Materialien, da im Bereich der kurzen Diagonale nur minimale Materialverformungen auftreten.

Geeignet ist der DP-Schneidstoff für die Grob- und Feinbearbeitung von Aluminium-, Kupfer- und Zinklegierungen sowie für Nichtmetalle wie faserverstärkte Kunststoffe, Hartgummi, Keramik und Holzfaserprodukte. Diese Schneidstoffe sind als Sonderschneidstoffhauptgruppe („DP“) ebenso wie spezielle Schneidstoffe für Titan nicht in Tabelle 2-1 aufgeführt [12].

2.1.2 Stahlwerkstoffe der Stammbblätter

Die Stahlwerkstoffe fallen hinsichtlich ihrer Löteignung nach Norm DIN 8514-1 [45] in die Gruppe der im Allgemeinen gut lötbaren Werkstoffe. Auch Stahl mit mehr als 0,25 % Kohlenstoff, wie er typischerweise als Stammbblattwerkstoff verwendet wird, ist noch gut lötbar, wohingegen ein Schweißverfahren i. d. R. nur mit vorheriger Wärmebehandlung und kontrollierter Abkühlgeschwindigkeit angewendet werden kann. Der hohe Kohlenstoffanteil (i. d. R. 0,7 bis 0,8 %) würde bei einer großflächigen Erwärmung die Bildung von martensitischen Phasen begünstigen, die zu einem Verlust der Zähigkeit des Stammbblattes führen [46].

Hartlötverbindungen (detailliert im Kapitel 2.3.3 dargelegt) von Stahlblechen können die gleichen Festigkeiten wie Schweißungen erreichen. Die Auswahl des Lotwerkstoffes richtet sich nach dem angewandten Lötverfahren, den späteren Einsatzbedingungen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Die hauptsächlich verwendeten Zusatzwerkstoffe sind Kupfer-, Messing-, Neusilber- oder Silberlote

sowie Lote auf Nickelbasis und weisen Arbeitstemperaturen zwischen 450°C und 1100°C auf [32,47].

2.2 Mechanisches und adhäsives Fügen in der Sägenfertigung

2.2.1 Klemmen der Schneiden

Bei der mechanischen Klemmung der Schneiden werden diese durch eine Presspassung als rein kraftschlüssige Verbindung in einem vorbereiteten Passsitz fixiert. Diese Sitze werden zunächst unter Berücksichtigung des für die Anwendung benötigten Spanwinkels auf das Passmaß geschliffen und die Schneiden anschließend eingepresst. Bei diesem recht einfachen Verfahren ist das Einsatzspektrum der Sägeblätter durch die mangelnde Festigkeit der Pressverbindung allerdings auf Bearbeitungen mit geringen Zerspankräften eingeschränkt.

Das Klemmen mit beweglichen Klemm- bzw. Spannvorrichtungen ist vor allem aus der Dreh- und Fräsbearbeitung bekannt. Hierbei werden Wendeschneidplatten mit Klemmhaltern und -fingern formschlüssig fixiert und mit Spannpratzen oder Spannschrauben kraftschlüssig festgeklemmt. Dies stellt das Optimum hinsichtlich der Verbindungsfestigkeit bei gleichzeitiger Möglichkeit des schnellen Schneidenwechsels dar. Aus Mangel an Bauraum, der aus der für hohe Schnittqualitäten und –geschwindigkeiten erforderlichen hohen Schneidenanzahl je Sägeblatt resultiert, hat diese Art der Verbindung für Sägeblätter jedoch keine Bedeutung.

2.2.2 Nieten von Schneidensegmenten

Für eine Nietverbindung wird der Rand des i. d. R. aus Schnellarbeitsstahl bestehenden Stammblattes zu einem Steg gefräst, welcher in die Nut der Schneidensegmente greift. Diese formschlüssige Verbindung erhält ihre Festigkeit durch je einen Stegniet pro Schneidensegment, das i. d. R. aus vier Schneiden besteht (siehe Bild 2-2).

Die Vorteile dieser aufwändig zu fertigenden Verbindung liegen zum einen in der flexiblen Bestückung, da ein einziger Stammblatttyp mit Segmenten unterschiedlicher Schneidengeometrie versehen werden kann. Dies ermöglicht die einfache Herstellung verschiedener Sägeblattvarianten für unterschiedliche Anwendungen. Zum anderen können verschlissene oder beschädigte Sägeblätter am Arbeitsort schnell durch Auswechseln der beschädigten Einzelsegmente repariert werden.

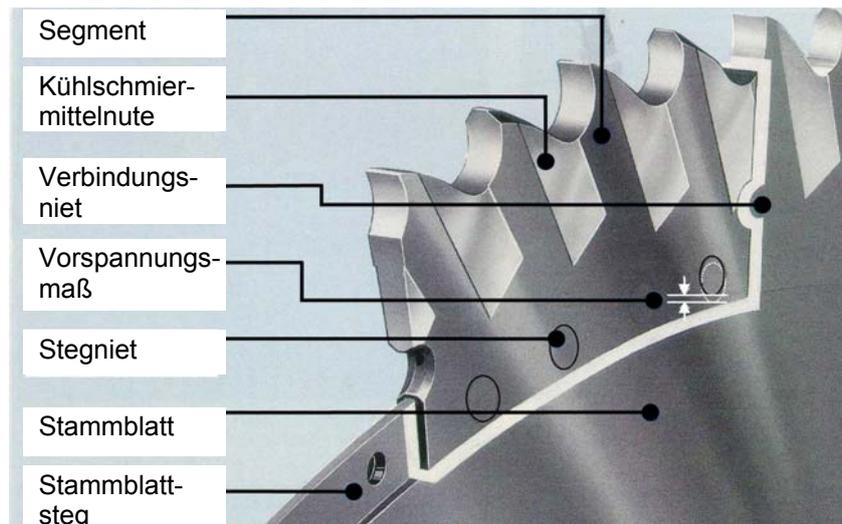


Bild 2-2: Segmentkreissägeblatt [48]

2.2.3 Kleben

Als Alternative zu den mechanischen kraft- und formschlüssigen Fügeverfahren bietet sich das Klebeverfahren an. Bei diesem für begrenzte mechanische und thermische Belastungen der Fügestellen geeignete Verfahren werden vor allem Kunststoffkleber auf Epoxidharzbasis angewendet. Eine Begrenzung erfährt die Klebetechnik jedoch vor allem dort, wo Arbeitstemperaturen oberhalb 150°C vorliegen oder Entlastungsschocks mit hoher Pulsenergie auftreten [49,50]. Die im Rahmen des AIF-Forschungsprojekts Nr. 12792N durchgeführten Versuche belegen für wassergekühlte langsam laufende Gesteinssägen, dass die anliegenden Prozesskräfte von der Klebeverbindung schadlos aufgenommen werden können [50]. Ein positiver Nebeneffekt ist, dass die Dämpfungseigenschaften der Klebefuge bei thermisch nicht belasteten Schleifwerkzeugen besser sind als die einer Löt-fuge. Noch ungeklärt ist die Nachbestückung verschlissener Schleifsegmente, welche im Rahmen von Instandhaltungsarbeiten aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten erfolgen muss. Problematisch hierbei ist das Lösen der Fügestellen. Es zeigte sich, dass ein mechanisches Lösen der Segmente auf Grund der Stammblattbelastung nahezu ausgeschlossen ist. Das thermische Lösen erfordert hingegen Temperaturbereiche, die mittels induktiver Energieeinbringung erzeugt werden können, allerdings infolge der großen Wärmeeinflusszone zum Verzug des Stammblattes führen und dadurch eine aufwendige Neuspannung erfordern. Die technologischen und wirtschaftlichen Vorteile der wärmearmen Füge-technik mittels Kleben werden auf diese Weise aufgehoben [50].

2.3 Thermisches Fügen in der Sägenfertigung

2.3.1 Schweißen

Abhängig von den verwendeten Werkstoffen und den Abmessungen der Hartmetallschneiden sowie für Sonderanwendungen kommen derzeit Verfahren wie das Widerstandspressschweißen [51], das Elektronenstrahlschweißen [31] oder für

Sonderanwendungen des Laserstrahlschweißens [29,52,53,54] zum Einsatz (s.u.). Die beiden erstgenannten eignen sich zum Bestücken von Band-, Bügel-, oder Stichsäge mit kleinen Hartmetallsegmenten mit Abmessungen von 1,5 mm x 1,2 mm x 0,7 mm, wobei durch zuverlässige Prozessregelungen hohe Festigkeiten sichergestellt werden können. Werden die geschweißten Querschnitte größer als 10 mm², kann es beim Schweißen jedoch zu unvollständigen Verbindungen oder zu Poren- und Rissbildung kommen. Weiterhin entstehen auf Grund der artfremden Grundwerkstoffe komplexe Gefüge in der Schmelzzone, deren mechanische Eigenschaften nicht abgesichert werden können. Der hohe Energieeintrag beim Schweißen in Verbindung mit den kurzen Abkühlzeiten führt im Stammbaum zu einem hohen Anteil an Martensit [55] in der Wärmeeinflusszone und kann später zum Ausbrechen des Zahnrückens führen [29].

2.3.2 Laserstrahlschweißen

Beim Laserstrahlschweißen von z. B. Stahl-Hartmetallwerkstoffpaarungen nach DIN 1919-100 [56] dient der Laserstrahl als hoch konzentrierte Energiequelle, die zum lokalen Aufschmelzen der Fügekanten über das Werkstück bewegt wird. Die in der Industrie am weitesten verbreiteten Lasertypen sind aktuell neben dem CO₂-Laser, der Dioden-, der Yb:YAG- und der Nd:YAG-Laser [57,58]. Die drei letztgenannten Typen sind Festkörperlaser, bei denen es auf Grund der Emissionswellenlänge von $\lambda = 1064$ nm ermöglichen, das emittierte monochromatische Licht in einer Lichtleitfaser auch über weite Strecken nahezu verlustfrei zum Bearbeitungsort zu leiten. Der CO₂-Laser mit einer Wellenlänge von 10,6 nm muss hingegen über Spiegelsysteme geführt werden [59,60,61].

Die Schweißnaht wird während der Bearbeitung in der Regel durch ein Schutzgas vor Reaktionen mit dem Sauerstoff der Umgebungsluft geschützt. Angepasste Arbeitsgase unterstützen und steuern den Schweißprozess und verhindern unerwünschte Anlassfarben der Werkstoffoberfläche [62,63,64].

2.3.3 Löten

Das Löten stellt derzeit das am weitesten verbreitete Fügeverfahren zur Bestückung von Kreissägen mit einem im Vergleich zu den Schweißverfahren deutlich reduzierten Wärmeeintrag und einem Nichtaufschmelzen der zu verbindenden Komponenten dar. Auch in anderen Anwendungsgebieten – wie z. B. dem Automobilbau, dem Anlagenbau oder der Medizintechnik – bietet es zudem entscheidende Vorteile hinsichtlich der Festigkeit, Zuverlässigkeit und Korrosionsbeständigkeit gegenüber Klemm-, Schraub- oder Klebeverbindungen.

2.3.3.1 Einteilung und Begriffe in der Löttechnik

Löten ist nach DIN 857-2 [65] ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen und Beschichten von Werkstoffen, wobei eine flüssige Phase durch Schmelzen eines Lotes (Schmelzlöten) erzeugt wird. Erfolgt ein Fügen ohne schmelzflüssige Phase,

so entsteht die Verbindung über Diffusion an den Grenzflächen (Diffusionslötungen) [66,67].

Als Lote sind alle Werkstoffe geeignet, welche die zu verbindenden Grundwerkstoffe benetzen, auf ihnen fließen sowie durch Legierungsbildung und Diffusion in der Grenzschicht eine stoffschlüssige Verbindung herstellen können. Dieser Vorgang kann durch Zuhilfenahme von Flussmitteln und / oder Lötenschutzgasen unterstützt werden [68].

Lote können in Form von Draht, Stab, Blech, Formteilen, Schnitzeln, Körnern, Pulvern usw. zur Anwendung kommen. Eine Kombination mit Flussmitteln in Form von Lötmassen, Lötpasten und Kombinationsdrähten ist ebenfalls möglich [68].

Unter der Arbeitstemperatur eines Lotes ist diejenige Temperatur zu verstehen, die an der Berührungsfläche zwischen Lot und Grundwerkstoff herrschen muss, damit das Lot fließt, benetzt und diffundiert. Die Arbeitstemperatur des Lotes liegt immer unterhalb der Schmelztemperatur der Grundwerkstoffe, worin der wesentliche Unterschied zum Schweißen besteht. Beim Schweißen sind in der Regel die beiden Fügepartner und der Zusatzwerkstoff gleich oder zumindest artgleich, wohingegen das Lötens das stoffschlüssige Verbinden artfremder Werkstoffe als Hauptanwendungsgebiet hat. Neben der Schmelztemperatur der Grundwerkstoffe begrenzt auch die maximale Löttemperatur den Prozess. Oberhalb dieser Temperatur verbrennt bzw. verdampft das Lot. Es kommt unter anderem zu Gaseinschlüssen in der Lötverbindung, die somit mangelhaft wäre [66].

Flussmittel sind nach DIN EN 29454 [69] und DIN EN 1045 [70] nichtmetallische Stoffe, die an den vorgereinigten Lötflächen die noch vorhandenen Oberflächenfilme (z. B. Fettschichten oder Oxidschichten) beseitigen können sowie die erneute Bildung von Oberflächenfilmen verhindern sollen, damit das Lot eine metallisch reine Fügefläche benetzen kann. Weiterhin schützt das Flussmittel auch das Lot vor Oxidationsvorgängen. Zunderschichten oder größere Mengen Fett auf den Oberflächen müssen allerdings durch Sandstrahlen bzw. entfettende Mittel entfernt werden. Die DIN EN 1045 [70] unterscheidet die Flussmittel für Hartlötungen (Löttemperatur zwischen von 450°C und 900°C) von Stahl und Hartmetallwerkstoffen in verschiedene Typen:

- Typ FH10 bis FH20 sowie FH40: Flussmittel auf Basis hygroscopischer Chloride und Fluoride, vor allem Borverbindungen, deren Rückstände korrosiv sind und durch Waschen oder Beizen entfernt werden müssen,
- Typ FH21 bis FH30: Flussmittel auf Basis nichthygroscopischer Borverbindungen, deren Rückstände nichtkorrosiv sind.

Der jeweilige Anwendungsfall entscheidet über die spezielle Auslegung der Flussmittel. Entscheidende Faktoren stellen die Eigenschaften der Werkstoffe, die Art der Aufbringung, die Umgebungstemperatur, die Oberflächenbeschaffenheit, die Luftfeuchtigkeit und die gesamte Zykluszeit des Lötens dar.

Es wird ein Flussmittelschmelzpunkt von 50 K unterhalb des Schmelzpunktes des Lotes empfohlen, wobei die Arbeitstemperatur des Lotes im Wirkungsbereich des Flussmittels liegen sollte [71].

Lötschutzgase sind Gase, die beim Aufheizen Werkstück und Lot vor Oxidation schützen und die in einigen Fällen die Oxidbeläge von Werkstück und Lot vor dem Erreichen der Arbeitstemperatur reduzieren.

Die Festigkeiten von Lötverbindungen können diejenigen von Schweißverbindungen erreichen oder sie sogar übertreffen. Lötverbindungen können durch Erhitzen getrennt werden, ähnlich wie Metallklebeverbindungen, bei denen allerdings zum Ablösen keine oder nur eine geringe Wärmeeinbringung erforderlich ist. Da dafür aber die Arbeitstemperatur des Lotes überschritten werden müsste, bezeichnet man Lötverbindungen ebenso wie Schweißverbindungen als unlösbar [72,73].

Die Einteilung der Lötverfahren erfolgt gemäß DIN 857-2 [65] nach den Gesichtspunkten Schmelztemperatur (Liquidustemperatur) der Lote, die Art des Wärme- (Energie-) eintrags sowie Art der Lötstelle.

Entsprechend den Liquidustemperaturen (T_L) der Lote unterscheidet man zwischen

- Weichlöten und
- Hartlöten.

Beim Weichlöten liegen die T_L -Werte der Lote unterhalb von 450°C, so dass nur eine geringe Wärmeeinbringung in die zu fügenden Teile erfolgt. Da jedoch die erreichbare Festigkeit der Verbindung – insbesondere bei hohen Temperaturen – vergleichsweise gering ist, wird das Weichlöten in erster Linie für dichtende oder elektrisch leitende Verbindungen angewendet. Dabei kommen hauptsächlich Lote auf Zinn- oder Bleibasis unter Verwendung von Flussmitteln zum Einsatz [74].

Das Hartlöten erfolgt bei Temperaturen zwischen von 450°C und 900°C, wobei Verbindungsfestigkeiten erreichbar sind, die im Bereich der Grundwerkstofffestigkeiten liegen. Dies bedingt die hervorragende Eignung für kraftübertragende Verbindungen. Die Lote bestehen aus kupfer- und / oder edelmetallhaltigen Nichteisenlegierungen und werden üblicherweise zusammen mit Flussmitteln angewendet [74].

Ein weiteres Unterscheidungskriterium nach DIN ISO 857 [65] stellt die Art des (Wärme-) Energieträgers dar (siehe Bild 2-3):

Feste Körper als Energieträger sind LötKolben oder -pinzetten (Kolbenlöten), Heizplatten (Blocklöten) oder belotete Rollen (Rollenlöten).

Flüssigkeiten können nicht nur als Energieträger, sondern auch gleichzeitig als Flussmittel – wie beim Salzbadlöten – oder als Lot – wie beim Lotbadlöten – fungieren [75].

Gas kann auf zwei Arten zum Energieträger werden; entweder als elektrisch beheizter Luftstrom (Warmgaslöten) oder als Flamme, die durch Verbrennung üblicher Brenngas-Sauerstoffgemische entsteht (Flammlöten).

Als Strahl kann eine große Energiemenge in kurzer Zeit auf sehr kleinem Raum eingebracht werden. Licht- und Laserstrahlen als elektromagnetische Strahlen werden durch Linsen oder Spiegel auf die zu erwärmenden Stellen fokussiert. Das Lichtstrahllöten wird nur zum Weichlöten eingesetzt, weil mit dem z. B. durch Quarzlampen erzeugten, natürlichen Licht keine ausreichend hohen Leistungsdichten für Hart- und Hochtemperaturlötungen erzielbar sind. Beim Elektronenstrahllöten dienen beschleunigte und gebündelte Elektronen als Energieträger [65].

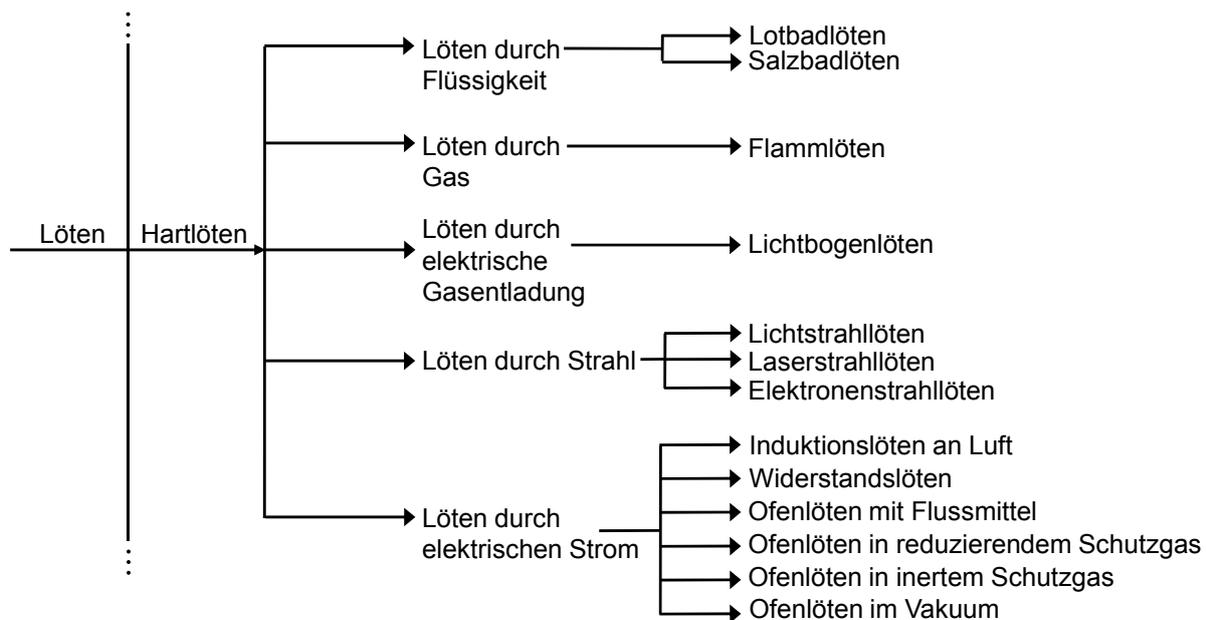


Bild 2-3: Einteilung der Lötverfahren (in Auszügen) nach DIN 857, Teil 2 [65]

Durch elektrischen Strom entsteht beim Widerstandslöten Joule'sche Wärme, wobei der Strom direkt über die Lötstelle oder nur durch eines der zu fügenden Teile fließen kann. Erfolgt die Erwärmung in einem elektrisch beheizten Ofen, spricht man vom Ofenlöten. Beim Induktionslöten wird die Wärme durch Wirbelströme im Werkstück erzeugt.

Beim Lichtbogenlöten brennt zwischen einer Elektrode und dem zu fügenden Werkstück eine elektrische Gasentladung als Wärmequelle.

Die Lötverfahren werden darüber hinaus nach Art der Oxidbeseitigung eingeteilt in:

- a) Löten mit Flussmitteln,
- b) Löten mit reduzierenden Schutzgasen,
- c) Löten in inertem Schutzgasen sowie
- d) Löten im Vakuum.

Im Gegensatz zu den beiden erstgenannten Verfahren werden beim Löten in inertem Schutzgas keine Oxidhäute entfernt, sondern lediglich deren Neubildung verhindert. Sie müssen vor dem Lötprozess entfernt werden. Als Schutzgase werden vorwiegend Argon, Helium oder Stickstoff eingesetzt [74].

Fremdschichten, wie z. B. Oxide, können in Abhängigkeit des Werkstoffs auch durch entsprechende Untergasdrücke zwischen 50 und $1 \cdot 10^{-6}$ mbar entfernt werden. Die Schutzwirkung des Hochvakuums übertrifft die der reinsten erhältlichen Schutzgase, so dass dieses Verfahren auch für reaktive Sondermetalle eingesetzt werden kann.

Eine weitere Unterscheidung erfolgt nach Art der Lötstelle in Auftragslöten und Verbindungslöten. Das Beschichten durch Löten bietet eine Ergänzung zu den etablierten Beschichtungsverfahren wie dem Auftragsschweißen, dem thermischen Spritzen oder den galvanischen und thermochemischen Verfahren. Verbünde unterschiedlicher Werkstoffe, die mit anderen Beschichtungsarten nur schwer oder gar nicht herstellbar sind, lassen sich durch Auftragslöten realisieren, wie z. B. in Spiralbohrer eingelötete PKD-Schneiden [73].

Das Verbindungslöten wird weiter unterteilt in das

- a) Spaltlöten,
- b) Fugenlöten sowie
- c) Löten mit Lotformteilen in Spaltform.

Grundlage für alle drei Arten des Verbindungslötens ist die lötgerechte Konstruktion, welche entscheidend den Ablauf des Lötvorgangs, die Güte der Lötverbindung und die Kosten des Lötprozesses beeinflusst [72]. Die aktuell in der Kreissägenfertigung am häufigsten vorkommende Verbindungsform ist das Löten mit Lotformteilen in Spaltform. In Abhängigkeit der Geometrie der Fügepartner Stammblatt und Schneide, wird hierbei der zumeist bandförmige Lotwerkstoff mechanisch an die Form des Fügspaltes angepasst.

2.3.3.2 Lötgerechte Konstruktion

Beim Spalt- und Fugenlöten erfordert die geometrische Gestaltung der Verbindung neben metallisch reinen Fügeflächen die fachgerechte Ausbildung der Lötspalte, um ein Fließen des Lotes mit vollständiger Füllung der Fugen und Spalte zu gewährleisten. Während beim Fugenlöten eine breite Stoßfuge durch Schwerkraft mit Lot gefüllt wird, kommt beim Spaltlöten der Einfluss des kapillaren Fülldruck zum Tragen.

Durch den kapillaren Fülldruck kann flüssiges Lot in engen Spalten auch entgegen der Schwerkraft fließen. Voraussetzung hierfür ist eine ausreichende Benetzung der Spaltfläche. Im Kapitel 2.3.3.3 wird dieser Mechanismus detailliert dargelegt. Entsprechend den Diagrammen im Bild 2-4 steigt der kapillare Fülldruck im Fügspalt in Abhängigkeit von der Breite des Fügspaltes.

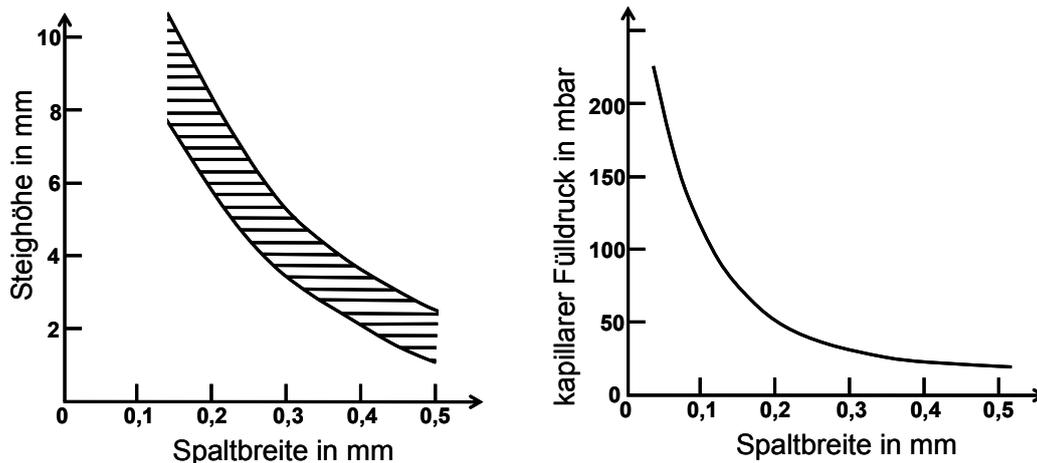


Bild 2-4: Abhängigkeit der Steighöhe des Lotes sowie des kapillaren Fülldrucks von der Spaltbreite [nach 73]

Beim Spalt- und Fugenlötungen kann die Zuführung des Lotes durch Anlegen von Lotdrähten, -ringen oder – wie häufig in der Sägeblattfertigung angewendet – durch Formteile erfolgen. Alternativ kann auch eine stechende Lotdrahtzufuhr maschinell oder per Hand vorgenommen werden.

Zur Erreichung hoher Scherfestigkeiten der Lötverbindungen werden auf Zug belastete Bauteile wie Bleche vorwiegend im Überlappstoß verbunden. Das Verhältnis zwischen Überlappbreite b und Blechdicke d sollte zwischen 3 : 1 und 6 : 1 liegen [73]. Stangen oder Profile können auch im Schrägstoß gelötet werden (siehe Bild 2-5).

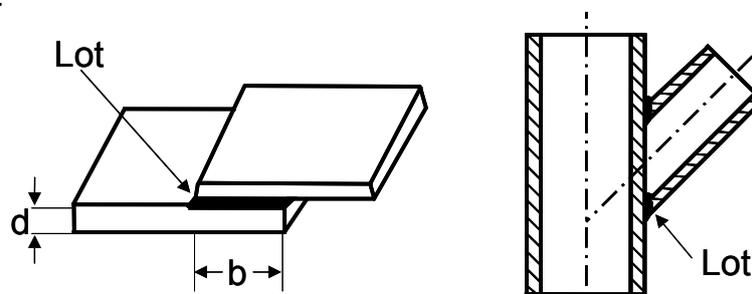


Bild 2-5: Überlapp- und Schrägstoß

Als günstigste Spaltbreite haben sich Werte zwischen 0,05 mm und 0,2 mm erwiesen. Werden die Spaltbreiten größer, kann es auf Grund des abnehmenden kapillaren Fülldrucks zur unvollständigen Füllung des Spaltes kommen. Bei größeren Spaltbreiten sinkt die Festigkeit auch bei vollständig gefüllten Spalten. Grund dafür ist, dass bei engen Spalten unter Zugbelastung die Querdehnung des Lotes durch den benachbarten Grundwerkstoff behindert wird. Der Grundwerkstoff übt einen aus der Zugspannung resultierenden zweiachsigen Spannungszustand als Stützwirkung auf das Lot aus. Diese Stützwirkung geht nicht nur bei breiteren Lötspalten, sondern auch bei Fügepartnern mit stark unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten verloren.

Werden die Spalte zu klein, reicht oft die zur Verfügung stehende Flussmittelmenge in diesem Lötspalt nicht aus um ein vorbereiten der Fügezone durch z.B. Reduktion

der Fügekanten zu gewährleisten. Zudem können frühzeitig erstarrte Kristallite den Spalt vor dem nachfließenden Lot versperren (siehe Bild 2-6) [72].

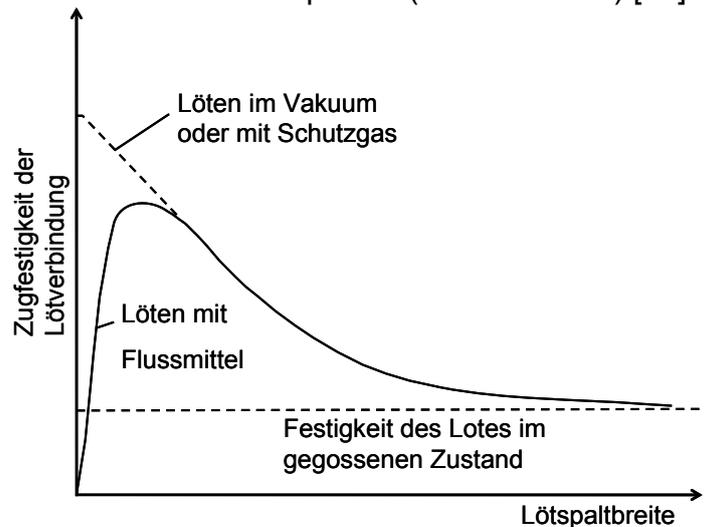


Bild 2-6: Festigkeit einer Lötverbindung in Abhängigkeit von der Spaltbreite [nach 73]

Um letzteres zu vermeiden, sollte möglichst die Erwärmung des Lotes nicht direkt, sondern indirekt über das Bauteil erfolgen, damit die Temperatur des Lotes während des gesamten Prozesses nie unterhalb der Arbeitstemperatur liegt (siehe Bild 2-7).

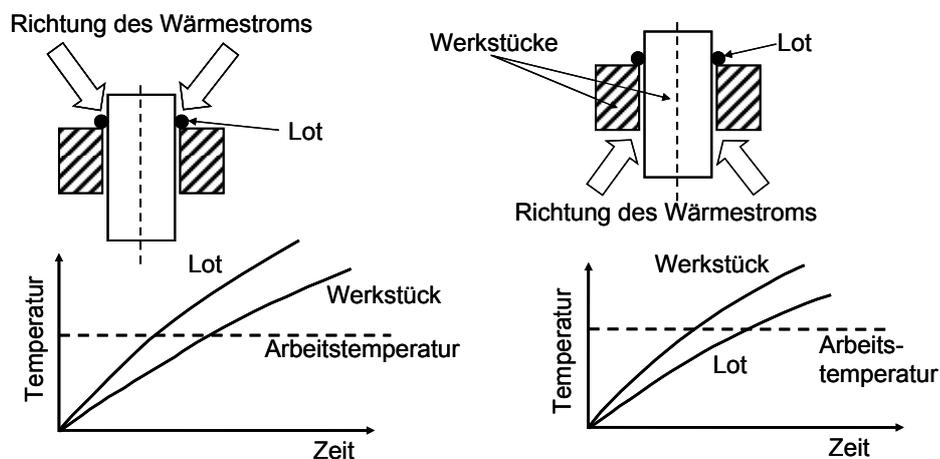


Bild 2-7: Lötgerechte Erwärmung, links ungünstig, rechts günstig [nach 73]

Haben die Bereiche des Grundwerkstoffes, über die das Lot fließt, immer mindestens die Arbeitstemperatur des Lotes, ist neben der Sauberkeit der Fügepartner die wichtigste Voraussetzung für eine gute Benetzung erfüllt.

Das Bauteil sollte möglichst gleichmäßig erwärmt werden, damit nicht durch ungleichmäßige Wärmedehnungen Eigenspannungen induziert werden, die eventuell eine Vorbelastung der Lötstelle darstellen.

Unvollständig gefüllte Spalte sind unbedingt zu vermeiden, da sie auf Grund einer Kerbwirkung die Betriebsfestigkeit von Verbindungen stark herabsetzen und auch Ausgangspunkt für korrosiven Angriff sein können [74].

Weiterhin ist die Größe des zu füllenden Spaltvolumens zu berechnen oder abzuschätzen, um zu vermeiden, dass durch Wahl z. B. eines zu kleinen Lotdrahringes zu wenig Lot für die vollständige Spaltfüllung zur Verfügung steht. Wenn die Spaltgröße konstruktionsbedingt nicht konstant ist, muss das Lot so zugeführt werden, dass der Spalt in Flussrichtung des Lotes enger und nicht breiter wird (siehe Bild 2-8). Überdies ist es ratsam, bei der Konstruktion Möglichkeiten zur Qualitätskontrolle vorzusehen. So sollten Spalte z. B. eine zweite Öffnung haben, aus der überschüssiges Lot austritt, nachdem der Spalt gefüllt ist.

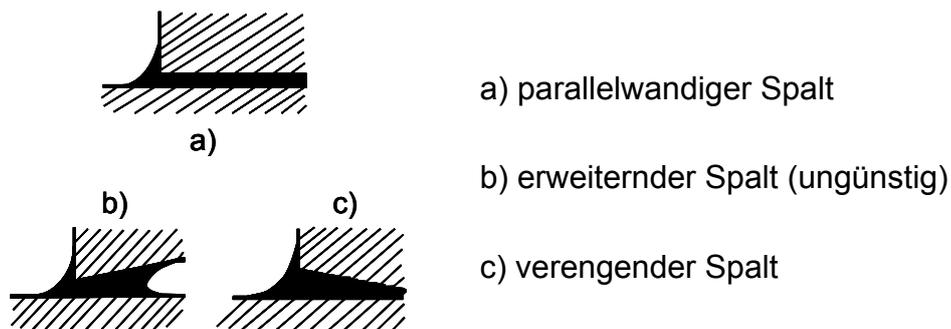


Bild 2-8: Konstruktionsbedingte Spaltgeometrien [nach 73]

Die Problematik der Spaltfüllung kann bei einfachen und flächigen Verbindungen durch den Einsatz von Lotformteilen in Form des Spaltes bzw. der Lötfläche umgangen werden. Unter Lotformteilen werden aus Lotwerkstoff hergestellte, genau auf die Lötstelle in Form und Menge abgestimmte Teile wie Abschnitte, Ringe, Biegeelemente aus Lotdraht oder Stanzteile aus Lotblech in eine der jeweiligen Lötstelle angepassten Form verstanden [72]. Hat das Lotformteil nun genau die Größe und Form der zu fügenden Fläche, kann der Lötvorgang vollständig ohne Fließen des Lotes ablaufen. Dieses Verfahren wird in der Kreissägenherstellung favorisiert. Die Fügeflächen des Stammblattes und des Hartmetalls werden mit dem dazwischen befindlichen Lotformteil während des gesamten Aufheiz- und Abkühlzyklusses aneinandergedrückt, wobei das Lot nach Erreichen der Liquidustemperatur anfängt, den Grundwerkstoff zu benetzen.

Unter der Berücksichtigung, dass die fertige Lötstelle eine optimale Schichtdicke von 0,1 mm bis 0,2 mm aufweisen soll, hat das einzulegende Lotblech eine Stärke von ca. 0,4 mm. Durch den Anpressdruck, welcher notwendig ist, um eine schnelle und gleichmäßige Benetzung zu gewährleisten, wird das überschüssige Lot aus der Fügezone herausgedrückt. An dem Rand der Fügezone bildet das Lot Flächen aus, die winklig zueinander stehen (Hohlkehlen) und die Festigkeit der Verbindung durch Herabsetzen der Kerbwirkung erhöhen. Ist keine Hohlkehle erforderlich oder erwünscht, kann das Lotformblech auch so ausgelegt werden, dass seine Fläche vor der Erwärmung nur ca. zwei Drittel der zu fügenden Fläche beträgt [72].

2.3.3.3 Ablauf des Lötvorgangs

Unter Vakuumbedingungen weist die durch das Flussmittel gereinigte Metalloberfläche ungesättigte Bindungsstellen auf. Wird das Metall der Luft ausgesetzt, so lagern sich infolge dieser nicht abgesättigten Bindungsstellen

Gasmoleküle – insbesondere Sauerstoff – an der Metalloberfläche an. Diese zunächst nur absorbierten Gasmoleküle können mit der Metalloberfläche reagieren und eine Oxidhaut bilden. Durch diesen Mechanismus geht die Aktivität der Oberfläche verloren, da die gebildete Deckschicht beim Löten einen vollständigen Kontakt zwischen Metalloberfläche und Lotschmelze verhindern würde. Um diese Schicht zu entfernen, werden wie oben bereits beschrieben beim Löten an der Atmosphäre Flussmittel verwendet, welche die Oxide benetzen und chemisch beseitigen sowie eine Neubildung verhindern [73].

Infolge einer durch das Flussmittel gesteuerten Redox-Reaktion tritt wieder eine Erhöhung der Oberflächenenergie ein [76]. Damit diese Reaktion bis zum Beginn der Benetzung mit Lot vollständig abgeschlossen ist, sollte der Temperaturbereich, in welchem das Flussmittel wirkt, tiefer als die Arbeitstemperatur des verwendeten Lotes liegen. Das Flussmittel sollte dabei eine hohe Oxidlösegeschwindigkeit aufweisen und die Werkstoffoberfläche solange schützend bedecken, bis es vom benetzenden Lot verdrängt wird bzw. verdampft [72,77]. Die Oberflächenspannung des flüssigen Lotes wird ebenfalls durch das Flussmittel verringert, so dass die Benetzung des Grundwerkstoffes gefördert wird.

Der Vorgang der Benetzung ist am besten anhand der Ausbreitung eines Lottropfens auf einer Metalloberfläche zu beschreiben und zu überprüfen, wobei die drei Phasen Lot, Grundwerkstoff und Umgebungsmedium (Flussmittel, Schutzgas oder Vakuum) aufeinander treffen. Das Gleichgewicht der Vektoren der Oberflächenspannungen im Schnittpunkt der drei Phasen verdeutlicht Bild 2-9.

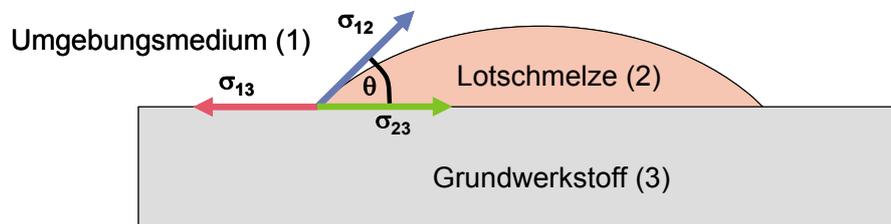


Bild 2-9: Oberflächenspannungen und Benetzungswinkel eines Lottropfens [78]

Die Variablen bedeuten:

σ_{12} = Oberflächenspannung des Lotes gegenüber dem Umgebungsmedium

σ_{13} = Oberflächenspannung des Grundwerkstoffes geg. dem Umgebungsmedium

σ_{23} = Oberflächenspannung zwischen Lot und Grundwerkstoff

θ = Benetzungswinkel

Das Gleichgewicht wird durch das Youngsche Theorem

$$\sigma_{13} = \sigma_{23} + \sigma_{12} \cos \theta \quad (1)$$

beschrieben. Der Ausdruck

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{13} - \sigma_{23}}{\sigma_{12}} \quad (2)$$

stellt ein Maß für die Benetzungsfähigkeit dar.

Die Benetzung ist umso besser, je kleiner der Winkel θ ist. Dies wird erfüllt, je größer die Oberflächenspannung des Grundwerkstoffes σ_{13} und je kleiner die Oberflächenspannung des Lotes σ_{12} sowie die Grenzflächenspannung zwischen Lot und Grundwerkstoff σ_{23} ist.

σ_{12} hängt stark von der Legierungszusammensetzung und dem umgebenden Medium ab. Außerdem fällt σ_{12} mit zunehmender Temperatur. So beträgt der Wert bei Kupfer im festen Zustand 1,67 N/m und im geschmolzenen Zustand 1,26 N/m. Bei Silber verringert sich der Wert sogar von 1,14 N/m auf 0,035 N/m. Je nach Anwendungsfall wird dieses Verhalten durch das gewählte Flussmittel unterstützt [76].

σ_{13} wird durch absorbierte Fremdschichten oder Oxide stark vermindert, so dass die Benetzungsfähigkeit abnimmt [76].

σ_{23} wird vermindert, wenn Lot und Grundwerkstoff vollständig oder teilweise in festem Zustand ineinander löslich sind (z. B. Cu in Ni und Fe) oder intermetallische Verbindungen miteinander bilden (z. B. Zn und Cd mit Cu und Ni). Metallpaarungen ohne jede gegenseitige Löslichkeit benetzen dagegen im Allgemeinen schlecht. Kleine Zusätze von Metallen, die Mischkristalle bilden, können die Benetzungsfähigkeit hingegen stark verbessern [73].

Bei Benetzungswinkeln, $\theta \leq 30^\circ$ ist eine ausreichende Benetzungsfähigkeit gegeben. Bei vollkommener Unbenetzbarkeit, das heißt, wenn der Benetzungswinkel gegen 180° geht, spricht man vom Perlen oder Aufkugeln des Lotes [79].

Voraussetzung für die Benetzung ist die Adhäsion, die Haftung zwischen flüssiger und fester Phase. Ein Maß für diese Haftung ist die Adhäsionsenergie. Sie gibt den flächenspezifischen Arbeitsaufwand in J/m^2 an, der zum reversiblen Abheben der Flüssigkeit vom Festkörper notwendig wäre. Die Dimension $\text{J/m}^2 = \text{Nm/m}^2 = \text{N/m}$ entspricht derjenigen einer Oberflächenspannung. Dementsprechend sind auch die Zahlenwerte von Oberflächenenergie und Oberflächenspannung identisch. Bei einem Trennvorgang entstehen zwei neue Oberflächen, so dass eine Oberflächenenergie vom Betrag $\sigma_{13} + \sigma_{12}$ aufzubringen ist. An der Grenzflächenschicht zwischen Lot und Grundwerkstoff verschwinden durch die Benetzung die Oberflächen, hierdurch wird die Oberflächenenergie σ_{23} frei. Die Adhäsionsenergie ergibt sich in Folge zu

$$W_A = \sigma_{12} + \sigma_{13} - \sigma_{23}. \quad (3)$$

Als treibende Kraft für die Benetzung kann auch die Differenz $(\sigma_{13} - \sigma_{23})$, die als Haftspannung bezeichnet wird, betrachtet werden [10].

Hieraus folgt mit Gleichung (1)

$$W_A = \sigma_{12} (1 + \cos \theta), \quad (4)$$

wodurch die Adhäsionsenergie nur durch Kenntnis der Oberflächenspannung des Lotes und des Benetzungswinkels berechnet werden kann. Eine Abhängigkeit dieser beiden Größen voneinander ist bedingt gegeben und sehr komplex, was anhand des Beispiels eines Zinn-Blei-Lotes verdeutlicht wird [80]. Die Oberflächenspannung

dieser Legierung nimmt bei einer Erhöhung des Zinngehaltes von 60% auf 80% linear ab. Dabei bleibt der Benetzungswinkel auf einem Stahl des Typs C15 ungefähr konstant.

Mit Erhöhung der Löttemperatur bleibt bei reinem Zinn der Benetzungswinkel konstant. Bei einer eutektischen Zinn-Blei-Legierung wächst er jedoch, wobei die Löttemperatur aber nicht um mehr als 40°C bis 50°C überschritten werden sollte. Eine solche Überhitzung des Lotes hat häufig ein verringertes Fließverhalten oder auch ein Ausdampfen von Legierungsbestandteilen zur Folge, was durch verstärkte Reaktionen zwischen Lot, Flussmittel, Grundwerkstoff und umgebender Atmosphäre hervorgerufen wird.

Die nach obigen Gleichungen berechneten Werte für die Adhäsionsenergie ermöglichen jedoch keine quantitative Aussage für das Haftungsvermögen im festen Zustand (Verbindungsfestigkeit). Die Ursache liegt einerseits in der Vernachlässigung möglicher physikalischer oder chemischer Grenzflächenreaktionen, wie z. B. Lösungsvorgänge oder der Bildung intermetallischer Phasen. Andererseits können auch unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten zwischen Lot- und Grundwerkstoff festigkeitsmindernde Spannungen an der Grenzfläche verursachen.

Somit ist eine gute Benetzung eine zwar notwendige, doch nicht immer hinreichende Bedingung zur Gewährleistung hoher Haftfestigkeit [81].

Die adhäsive Haftung (ohne Diffusionsvorgänge) von Metallpaarungen kann recht gute Festigkeitswerte erreichen, da auch im festen Zustand nahezu ineinander unlösliche Metalle eine Verbindung zulassen, wie z. B. unter Vakuumbedingungen Stahl mit Bleilot [80].

Bei einer rein adhäsiven Anbindung haben keine Diffusionsvorgänge stattgefunden. Dafür kann es zwei Gründe geben:

- Die Arbeitstemperatur des Lotes wird nur für kurze Zeit gehalten. Diese Zeit reicht lediglich aus, um den Grundwerkstoff zu benetzen, aber nicht mehr für den Ablauf der Diffusion.
- Die Arbeitstemperatur des Lotes wird auch nach erfolgter Benetzung aufrechterhalten. Die dadurch eingebrachte Energie reicht jedoch nicht aus, um eine Diffusion einzuleiten.

Man spricht vom „diffusionsfreien Löten“ [80], was besagt, dass keine atomare Durchdringung von Lot- und Grundwerkstoff vorliegt. Die freien Bindungskräfte werden durch Nebervalenzen wie z. B. Van-der-Waals-Bindungen oder Bindungen zwischen Molekülen über kurzzeitige Dipole gesättigt [82]. Lötungen auf Basis von Adhäsion erreichen in Zugversuchen eine Festigkeit, die lediglich 25% der Festigkeit des Lot- bzw. Grundwerkstoffes beträgt [66].

Haftfestigkeiten können durch größere Rauheiten der Fügeflächen erhöht werden, was auf mechanische Verklammerungen im submikroskopischen Bereich zurückzuführen ist.

Verbindungsfestigkeiten im Bereich der Festigkeiten der einzelnen Fügepartner lassen sich nur durch so genanntes Lösungs-Diffusionslöten erzielen.

Diffusion ist die thermisch aktivierte Wanderung (Platzwechselfvorgänge) von Teilchen, wie z. B. Atomen, Ionen oder niedermolekularen Verbänden, in Richtung des Konzentrationsgradienten. Sie ist ein entscheidender Mechanismus für den Massetransport im festen sowie flüssigen Zustand und bedarf eines Eutektikums oder Mischkristalls zwischen mindestens einem Grundwerkstoff und dem Lot.

Nach dem 2. Fick'schen Gesetz wird der mittlere Diffusionsweg X beschrieben durch

$$X^2 = 2 \cdot D_k \cdot t_D \quad (5)$$

mit t_D als Diffusionszeit und D_k als Diffusionskoeffizient, der die Beweglichkeit der Teilchen und damit die Geschwindigkeit des Diffusionsvorganges kennzeichnet. Der Diffusionskoeffizient ergibt sich nach [72] zu

$$D_k = D_0 \cdot \exp(-Q/R \cdot T) \quad (6)$$

mit D_0 = stoffabhängige Konstante,

Q = Aktivierungsenergie, abhängig vom Gitter und seiner Fehlerdichte,

R = universelle Gaskonstante,

T = absolute Temperatur.

D_0 und Q charakterisieren somit eine bestimmte Lot-Grundwerkstoff-Kombination. An der Grenze G zwischen Grundwerkstoff und Lot wird die unterschiedliche Bewegungsrichtung der Elemente A_{Lot} (Bewegungsrichtung der Lotwerkstoffteilchen in den Grundwerkstoff) und A_{GW} (Bewegungsrichtung der Grundwerkstoffteilchen in den Lotwerkstoff) unterschieden. Die Bewegungsrichtung und die Tiefe der Diffusion sind ausschlaggebend für die Breite der Legierungszone. Durch Abnahme der Legierungszonenbreite kann die Versagenswahrscheinlichkeit reduziert werden.

Beim Lösungs-Diffusionslöten diffundieren sowohl Elemente des Lotes in den Grundwerkstoff als auch Elemente des Grundwerkstoffes in das Lot (siehe Bild 2-10 rechts).

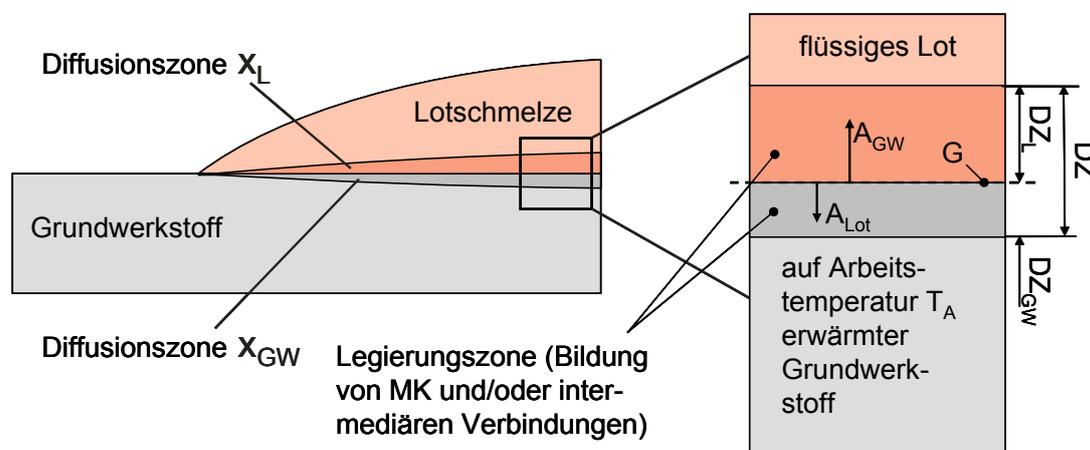


Bild 2-10: Ausbildung der Diffusionszonen im Lot bzw. Grundwerkstoff [72,83]

Die Höhe der gewählten Löttemperatur beeinflusst dabei im Wesentlichen die Dicke der Diffusionszonen. Sie ist umso größer, je höher die Arbeitstemperatur des Lotes im Verhältnis zur Schmelztemperatur des Grundwerkstoffes liegt. Es entstehen je nach Arbeitstemperatur T_A der Lote Legierungszonen mit einer Breite von $0,5 \mu\text{m}$ bis zu $20 \mu\text{m}$. Die größte Festigkeit ist gegeben, wenn die Legierungszone aus Primärkristallen oder aus Mischkristallen besteht. Primärkristalle sind die in unter- oder übereutektischen Legierungen nach Abkühlung unter die Liquidustemperatur vor der Erstarrung des Eutektikums entstandene Kristalle. Die Haltezeit der Temperatur bestimmt, ob es an der Grenzfläche zu einem dynamischen Gleichgewicht, das heißt zum Konzentrationsausgleich zwischen den beiden Stoffen, kommt. Die Haltezeit ist hierbei die Zeit, in der die Fügepartner auf Arbeitstemperatur des Lotes gehalten werden [72].

Untersuchungen über die Atombeweglichkeit in Metallen im Bereich der Schmelztemperatur haben ergeben, dass der Diffusionskoeffizient im schmelzflüssigen Zustand bei $D_1 = 10^{-4}$ bis $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$, im festen Zustand dagegen nur bei $D_2 = 10^{-8}$ bis $10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ liegt. Demnach ist entsprechend dem 2. Fick'schen Gesetz die Dicke der Diffusionszonen im Verhältnis

$$\frac{x_L}{x_{GW}} = \sqrt{\frac{D_1}{D_2}} \approx 100 \quad (7)$$

zu erwarten [73]. Empirische Untersuchungen beim Löten von Messing mit Silberlot L Ag 45 und einer Diffusionsdauer von 10 bis 20 s bei etwa 640°C ergaben einen Diffusionsweg von 7 bis $10 \mu\text{m}$ im Lot und von 1,5 bis $2 \mu\text{m}$ im Grundwerkstoff, was einem Verhältnis von 5 : 1 entspricht.

Dieses kann mit Hilfe der unterschiedlichen Diffusionsmechanismen in kristallinen Stoffen erklärt werden:

Diffusion über Zwischengitterplätze	}	Gitterdiffusion
Diffusion über Leerstellen		
Diffusion über Korngrenzen	}	schnelle Diffusionswege
Diffusion über Versetzungen		

Die Gitterdiffusion ist verantwortlich für die Bildung von Einlagerungs- und Substitutionsmischkristallen in der Diffusionszone. Werte für den Diffusionskoeffizienten liegen hierbei um $D_2 = 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$.

Korngrenzen und Versetzungen stellen als linienförmige Gitterfehler Kanäle dar, in die flüssiges Lot eindringen kann. Durch den sehr geringen theoretischen Kapillardurchmesser dieser Kanäle, ist der kapillare Fülldruck besonders hoch. Durch eine somit rasche Infiltration liegen Diffusionskoeffizienten für diesen Diffusionsmechanismus in der Größenordnung von $D_{2KV} = 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$. Ein Mittelwert zwischen D_2 und D_{2KV} unter Berücksichtigung von mittlerer Korngröße und Versetzungsdichte im Grundwerkstoff würde bei der Bestimmung von X_L / X_{GW} Werte liefern, die im Bereich der praktisch ermittelten Messwerte liegen.

Durch Korngrenzendiffusion entstehen verdickte Korngrenzen, die unter Einwirkung von Zugspannungen aufreißen können. Die Anfälligkeit für diese so genannte Lotbrüchigkeit hängt von der Kombination von Lot und Grundwerkstoff ab.

2.3.3.4 Gefügeausbildung und Festigkeit der Lötverbindung

Von ihrem Grundaufbau ist die durch den Lötvorgang entstehende Verbindung in ihrem makroskopischen Aufbau und ihrer Beschaffenheit inhomogen. Es bilden sich Zonen unvermischten Lotes, Übergangsbereiche mit Diffusionszonen sowie thermisch beeinflusste Bereiche des Grundwerkstoffes [77].

Durch die Diffusion kann es neben der Mischkristallbildung auch zur Bildung intermetallischer Phasen kommen. Dieses trifft auf Lot-Grundwerkstoff-Kombinationen zu, deren Zustandsdiagramm eine intermetallische Verbindung aufweist. Diese Verbindungen sind durch ein bestimmtes stöchiometrisches Gewichtsverhältnis der Bestandteile gekennzeichnet, bilden zumeist komplizierte Raumgitter und sind äußerst spröde. Bei ungünstigen Lötbedingungen können sich mikroskopisch sichtbare Zwischenschichten im μm -Bereich ausbilden, welche die Festigkeit der Lötverbindung insbesondere gegenüber schlagartiger Beanspruchung herabsetzen. Sofern sich die Bildung solcher Zwischenschichten durch eine entsprechende Wahl des Lot-Grundwerkstoff-Systems nicht von vornherein ausschließen lässt, sind solche Lötbedingungen zu wählen, die nur zu geringem Schichtwachstum führen. Die Möglichkeit, beim Löten entstandene intermetallische Phasen durch eine nachfolgende Glühbehandlung abzubauen, wird häufig beim Hochtemperaturlöten und Nickelbasislöten genutzt.

Die Zugfestigkeit einer Lötverbindung nimmt mit der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffes zu, wenn ansonsten die gleichen Bedingungen gewählt sind (Lot, Spaltbreite). Dieser Zusammenhang zwischen Festigkeit der Lötverbindung und Festigkeit des Grundwerkstoffes hat folgende Gründe:

Wenn die Festigkeit des Grundwerkstoffes höher als die des Lotes ist, wird die im Kapitel 2.3.3.2 beschriebene Stützwirkung wirksam [73].

Während des Lötprozesses diffundieren aus dem Grundwerkstoff Atome in den Lotwerkstoff. Diese Legierungsbildung führt ebenfalls zu einer Festigkeitssteigerung, die abhängig vom Grundwerkstoff ist [73].

Im Gegensatz hierzu steht die Annahme, dass die Festigkeit des Grundwerkstoffes nur dann eine Rolle spielt, wenn die Lötspalte so klein werden, dass nicht das eigentliche Lotmaterial, sondern die Legierungsschicht zwischen Lot- und Grundwerkstoff als tragende Festigkeitsverbindung zum Einsatz kommt [72].

Während die Festigkeit des Grundwerkstoffes auf die Zugfestigkeit einer Lötverbindung einen gewissen Einfluss hat, ist der Einfluss auf die Scherfestigkeit unbedeutend. Die Festigkeitseigenschaften von Lötverbindungen für Kreissägeblätter werden aber zu einem großen Teil über die Scherfestigkeit charakterisiert, da dies eine Hauptbelastung im Sägebetrieb darstellt. Konstruktive Maßnahmen zur

Beeinflussung der Scherfestigkeit fußen auf den bereits dargelegten Grundlagen der lötgerechten Konstruktion (siehe Abschnitt 2.3.3.2) [84].

2.3.3.5 Besonderheiten beim Löten von Hartmetallen

Zur Realisierung von Verbindungen zwischen Hartmetall und Stahl werden das Flammlöten, das Ofenlöten, das Widerstandslöten, das Induktionslöten und das Laserstrahllöten als Hart- bzw. Hochtemperaturlötverfahren eingesetzt. Dabei kommen niedrig schmelzende Silberlote, Kupfer- oder Nickellote sowie Edelmetalllote zum Einsatz. Das Löten von Hartmetall-Stahl-Verbindungen ist durch zwei grundlegende Aspekte gekennzeichnet:

1. Die Benetzung der Hartmetalle und der einzelnen enthaltenen Phasen sowie
2. das Auftreten von Spannungen auf Grund unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten.

Grundlagenuntersuchungen ergaben, dass die Benetzungsfähigkeit von Hartmetallen von verschiedenen Faktoren abhängt [85]:

Die Oberflächenreinheit beeinflusst maßgeblich die Benetzungsfähigkeit. Negativ wirken sich Verunreinigungen durch den Herstellungsprozess der Hartmetalle aus. Werden Hartmetallschneiden z. B. während des Sintervorganges in Korundpulver eingebettet, können die Oberflächen mit Al_2O_3 , ZrO_2 und ZrW_2O_8 verunreinigt sein. Zu einem überhöhten Kohlenstoffanteil der Hartmetalloberfläche kann es bei der Verwendung von Grafitstintertellern kommen.

Die Benetzbarkeit der Hartmetalle wird von der Benetzbarkeit der einzelnen enthaltenen Phasen (α -, β -, γ -Phase) beeinflusst (vgl. Abschnitt 2.1.1). Eine gute Benetzung durch herkömmliche Universalhartlote erfolgt nur bei der aus Kobalt bestehenden β -Phase, wohingegen die α - und γ -Phase nicht benetzt werden. Der Grund dafür besteht in den unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften von metallischem Lot und karbidischen Hartstoffen [77]. Bei der metallischen Bindung sind die Valenzelektronen frei beweglich und umgeben die Atomrümpfe als Elektronengas. In Karbiden liegen dagegen stabile kovalente Bindungen vor, die durch gemeinsame Benutzung eines Elektronenpaares durch jeweils zwei verbundene Atome gekennzeichnet sind [82]. So kommt es beim Kontakt zwischen einer metallischen Lotschmelze und einer Karbidoberfläche zu einer Diskontinuität in der Elektronenkonfiguration, die eine Benetzung der Karbidoberfläche verhindert [77].

Durch Einlegieren bestimmter Zusätze, wie z. B. Mangan, Nickel oder Kobalt in das Lot wird die Reaktionsbereitschaft und damit die Benetzbarkeit der Hartmetallkarbide erfolgreich erhöht. Auf den Einsatz solcher Hartmetallspeziallote, welche in der Regel nicht ohne Flussmittel verwendet werden können, kann bei Hartmetallen mit einem Kobaltanteil von $> 12\%$ unter Umständen verzichtet werden.

Um die gute Benetzbarkeit von Kobalt ungeachtet des Lotes aber trotzdem voll auszuschöpfen, können Hartmetalle an der Fügefläche entweder geschliffen oder

geätzt werden. Mittels elektrolytischem Ätzen ist eine selektive Auflösung der α -Phase möglich, ohne die β -Phase anzugreifen.

Im unbehandelten Zustand zeigt die Oberfläche bedeutende Unebenheiten durch hervorstehende Wolframkarbidkörner, was häufig auf ein Abdampfen von Kobalt beim Sintern im Vakuumofen zurückzuführen ist. Durch Abschleifen dieser Unebenheiten werden Kobaltspuren zwischen den Körnern sichtbar und somit der Werkstoff für das Lot besser benetzbar. Die elektrolytische Ätzung bewirkt eine zusätzliche Erhöhung der Oberflächenanteile des Kobalts durch eine Auflösung von Wolframkarbiden. Der Kobaltgehalt an der Oberfläche des Hartmetalls hängt bei diesem Verfahren linear von der zeitlichen Dauer der Ätzung ab [85].

Die Wärmeausdehnungskoeffizienten von Hartmetallen (5 bis $7 \cdot 10^{-6}$ 1/K) und Trägerstählen (11 bis $14 \cdot 10^{-6}$ 1/K) stehen zueinander im Verhältnis von $1 : 2$.

Der bei Löttemperatur spannungsfreie Verbund der beiden Fügepartner erfährt durch die doppelt so starke Schrumpfung des Stahls während der Abkühlung unter die Solidustemperatur des Lotes einen Aufbau von Spannungen in beiden Fügepartnern. Im Trägerstahl entstehen dabei Zugspannungen, da er am Schrumpfen gehindert wird. Auf der anderen Seite der Lötnaht wird das Hartmetall auf Grund seiner geringeren Schrumpfung gestaucht, wodurch dort Druckspannungen entstehen. Diese Druckspannungen wiederum induzieren Biegemomente mit der typischen Umkehr von Druck- in Zugspannungen auf der anderen Seite der neutralen Faser. Weil diese Zugspannungen in der Randzone der Hartmetalle am größten sind, kann es dort zu Anrissen kommen (siehe Bild 2-11), da Hartmetalle sehr geringe Dehnungen bei Zug- und Biegebeanspruchung aufweisen. Das Auftreten solcher Anrisse kann schnell zu einem spröden Bruch der Hartmetall-Schneide führen und ist daher auf jeden Fall zu vermeiden.

Im Bild 2-11 sind die beschriebene Rissbildung im Hartmetall sowie die spannungsabbauenden Zwischenschichten zur Erläuterung dargestellt.

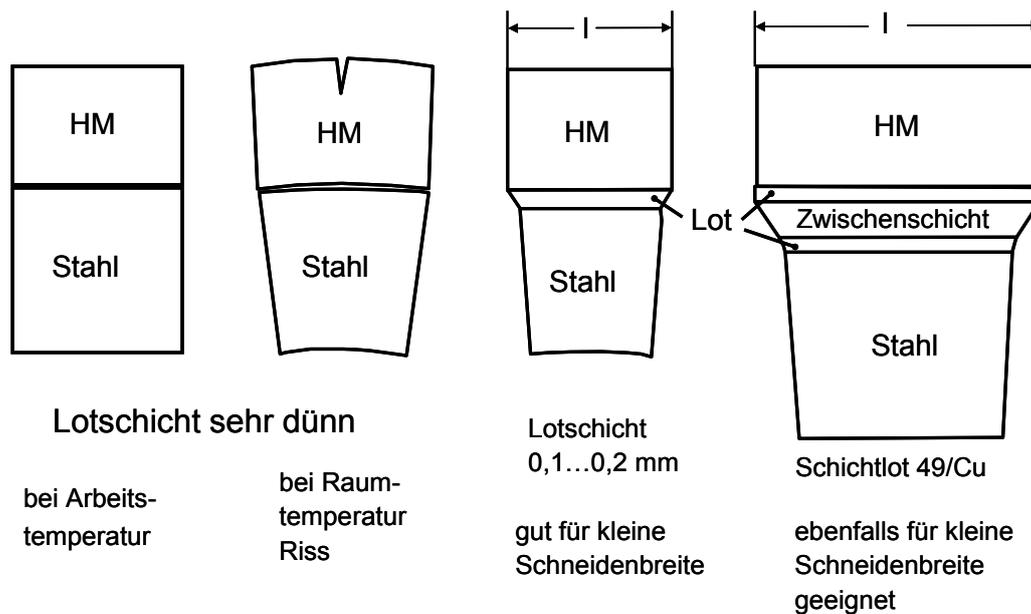


Bild 2-11: Rissbildung und Lotschichten zum Ausgleich von Abkühlspannungen bei Hartmetall-Stahl-Verbindungen [nach 68]

Die Zugspannung σ in der Randschicht des auf Biegung beanspruchten Hartmetalls kann näherungsweise mit der folgenden Gleichung (8) abgeschätzt werden [7]:

$$\sigma = E_H \cdot \frac{\frac{1 + \alpha_{St} \cdot T_S}{1 + \alpha_H \cdot T_S} - 1}{\frac{E_H \cdot d_H}{E_{St} \cdot d_{St}} + 1} \quad (8)$$

mit E = Elastizitätsmodul

α = Wärmeausdehnungskoeffizient

d = Dicke senkrecht zur Fügefläche

T_S = Solidustemperatur des Lotes

Indices: H für Hartmetall, St für Stahl

Am Beispiel eines Verbundes des Hartmetalls P 25 mit dem Trägerstahl Ck 60 wurden in [7] Werte für diese Zugspannungen rechnerisch ermittelt, die der Tabelle 2-2 zu entnehmen sind. Die Gültigkeit dieser Ergebnisse besteht nur im Rahmen stark vereinfachender Annahmen, z. B. dass die Lötspaltbreite vernachlässigbar klein gegenüber den Dicken der Fügepartner ist und dass keinerlei plastische Deformationen auftreten. Das Dickenverhältnis Hartmetall zu Stahl wurde mit 1 : 3 gewählt. Da die rechnerisch ermittelten Werte die Zugfestigkeit der Hartmetalle erheblich überschreiten können, bestätigt diese Abschätzung die Gefahr der Rissbildung im Hartmetall. Daher müssen geeignete Maßnahmen zur Reduzierung der Abkühlspannungen bei Hartmetall-Stahl-Verbindungen getroffen werden.

Die Wahl eines Hartlotes mit niedrigerer Solidustemperatur führt nach Tabelle 2-2 bereits zu einer deutlicheren Verringerung dieser Spannungen.

Tabelle 2-2: Werte zur rechnerischen Ermittlung der Zugspannungen im Randbereich von Hartmetallschneiden

Eigenschaft	Dimension	Hartmetall	Stahl
Zugfestigkeit	N/mm ²	1200 ... 1500	850
Bruchdehnung	%	1...3·10 ⁻¹	12
Druckfestigkeit	N/mm ²	3000...5000	2500...2700
Elastizitätsmodul	N/mm ²	5...6·10 ⁵	2,1·10 ⁵
Wärmeausdehnungskoeffizient	1/K	5...7·10 ⁻⁶	11...14·10 ⁻⁶
Lot	Solidustemperatur des Lotes	rechnerische Zugspannungen	
Kupferlot (Cu)	1083 °C	ca. 1900 N/mm ²	
Degussa 49/Cu	625 °C	ca. 1100 N/mm ²	

Als effektiv erwiesen sich auch Verbreiterungen des Lötspaltes auf über 0,2 mm. Werden solche Spalte mit einem zwar festen, aber gut plastisch verformbaren Lot gefüllt, werden die während des Abkühlens auftretenden Spannungen durch plastisches Nachgeben der breiten Lötnaht vermindert. Bei Spaltbreiten über 0,4 mm und Fügeflächen von über 60 mm² empfiehlt sich die Verwendung von als Schichtlot aufgebauten Lotformteilen. Dabei handelt es sich um eine 0,1 bis 0,4 mm dicke Kupferschicht die beidseitig mit Lot plattiert ist. Die Schichtdicke der eigentlichen Lotflächen beträgt auf der Ober- bzw. Unterseite des Dreischichtlotes jeweils ca. 0,07 mm. In der Sägenfertigung wird dieses Lotformteil vor dem Lötprozess unter Verwendung von Flussmittel zwischen die Fügepartner geklemmt, wobei im Anschluss erst die Erwärmung erfolgt. Mit dieser Methode können bis zu 0,5 mm breite Spalte sicher ausgefüllt werden. Hierbei ist die weiche Kupferzwischenschicht in der Lage, die auftretenden Spannungen abzubauen. Zu beachten ist allerdings, dass bei zu hohen Löttemperaturen oder zu langen Haltezeiten die Gefahr der Auflösung der Kupferschicht besteht [68].

Der Einfluss von Lötspaltbreite und -füllung auf die mechanischen Eigenschaften wie Scherfestigkeit und Scherdehnung wurde anhand von Verbindungen des Hartmetalls K 10 mit dem Trägerstahl C 45 untersucht [84]. Die Fügefläche betrug ca. 60 mm². Unter Verwendung des Lotes LMN7 und eines Flussmittels aus entwässerten Pulvern aus Borax und Borsäure wurde induktiv gelötet. Um die Lötspaltbreite definiert und gleichmäßig einzustellen, wurden Geflechte aus Nickeldraht mit unterschiedlicher Dicke zwischen die Fügepartner gelegt. Die höchste Scherfestigkeit trat bei Spaltbreiten von 0,35 mm auf. Die Scherdehnung Δl nahm linear mit steigender Spaltbreite zu.

2.3.4 Laserstrahllöten

Das Löten mit dem Laserstrahl gehört nach DIN 857-2 [65] zur Verfahrensvariante Löten durch Strahl. Der Laserstrahl stellt ein berührungslos arbeitendes, thermisches Werkzeug dar, das es ermöglicht, zahlreiche Werkstoffe mit unterschiedlichen Werkstückkonfigurationen auch in schwer zugänglichen Bereichen zu verbinden. Die hochenergetische Laserstrahlung ist monochromatisch, so dass sie durch strahlführende Optiken wie Spiegel (zu meist bei CO₂-Lasern) oder Linsen (zu meist bei Festkörper-Lasern) sehr gut fokussiert werden kann. Durch Abbildung eines fokussierten Laserstrahls auf die Oberfläche des zu bearbeitenden Werkstücks können dort hohe Energiedichten erzeugt werden. Beim Auftreffen auf ein Medium teilt sich der Strahl in einen absorbierten, einen transmittierten und einen reflektierten Anteil. Der absorbierte Anteil der einfallenden Strahlung steht dem Bearbeitungsprozess als konzentrierte, örtlich und zeitlich präzise zu steuernde Wärmeenergie zur Verfügung [86,87,88,89]. Diese ist Voraussetzung dafür, dass der Fügezone exakt so viel Energie zugeführt werden kann, wie nötig ist, um eine vollständige Benetzung und Anbindung der Fügepartner zu erzielen. Der Anteil der adsorbierten Laserstrahlung ist jedoch abhängig von der Laserwellenlänge: So zeigen Festkörperlaser im Vergleich zum CO₂-Laser eine doppelt so hohe Absorptionsrate auf Stahloberflächen (vgl. Bild 2-12).

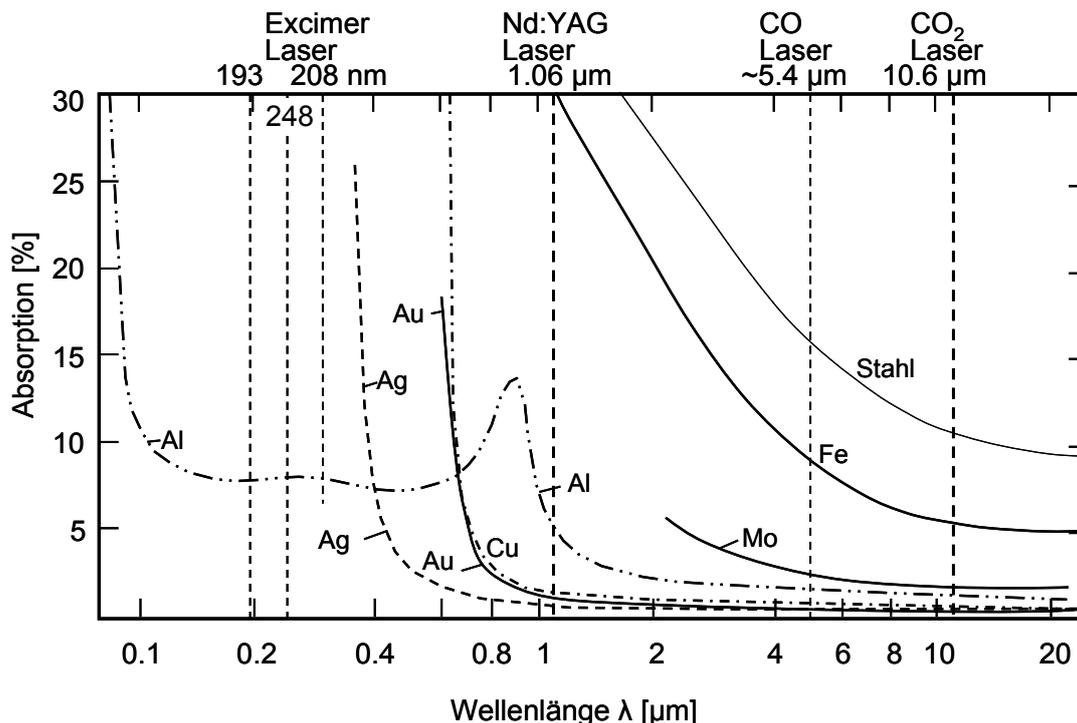


Bild 2-12: Absorptionsrate von Laserstrahlung für verschiedene Werkstoffe in Abhängigkeit von der Wellenlänge [90]

Durch Variation der Ausgangsleistung des Lasers ist er zum Weich- und Hartlöten gleichermaßen geeignet. Beim Laserstrahllöten wird generell mit geringen Intensitäten (defokussierter Strahl, große Faser, aufweitendes Abbildungsverhältnis) gearbeitet, um zu vermeiden, dass es durch zu hohe Energiedichten zu örtlichen Überhitzungen und damit z. B. zum Verdampfen des Lotes oder zum Aufschmelzen

des Grundwerkstoffes kommt. Ein genaues Einhalten der Arbeitstemperatur über die gesamte Fügezone kann durch eine Temperaturregelung mit pyrometrischer Temperaturdetektion und –regelung erfolgen [91,92,93].

Bei Verwendung großer Brennflecke (> 10 mm), geringer Leistung (< 300 W) und langen Strahleinwirkzeiten (> 30 s) bestehen hinsichtlich des klassischen Ablaufes des Lötvorganges kaum Unterschiede zwischen dem Laserstrahllöten und konventionellen Lötverfahren. Die Vorteile des Laserlötens kommen insbesondere dann zum Tragen, wenn bei einem Lötprozess nur sehr kurze Strahl-Stoff-Wechselwirkungszonen gefordert sind. Dabei wird die notwendige Arbeitstemperatur durch kurzzeitiges Einbringen einer hohen Energiemenge in die Fügestelle oder auch nur einen Teil der Fügestelle erreicht.

Daraus resultierend müssen bei der Auslegung eines Laserstrahl­lötprozesses bestimmte Voraussetzungen beachtet werden. Bei der Auswahl der laserstrahlgerechten Lotlegierungen werden die folgenden Anforderungen gestellt:

- Ausreichendes Fließvermögen, um auch bei kurzen Arbeitstemperaturintervallen die Lötspalte vollständig auszufüllen,
- Verwendung von Legierungsbestandteilen mit niedrigem Dampfdruck, um Abdampferscheinungen (= Poren) zu vermeiden,
- geringes Schmelzintervall, um ein sicheres Aufschmelzen der Lote bei den kurzen Strahleinwirkzeiten zu erzielen,
- niedrige Lotliquidustemperaturen im Vergleich zum Grundwerkstoff, um Anschmelzungen des Grundwerkstoffes zu vermeiden sowie

Zur Umgehung dieser Lot-Anforderungen wurde der Vorschlag des Einsatzes von vorgeheiztem Lot und / oder Pulverlot sowie eines Wurzelschutzes gemacht [94].

Alternativ wurden in [95,96] geeignete Lote auf Ti-, Al-, Cu- und Ni-Basis entwickelt. Silberlote und silberhaltige Lote eignen sich für die Verarbeitung mit dem Laser in besonderem Maße [97,98].

Da eine kontinuierliche Zuführung des Lotes für eine Automatisierung des Laserstrahl­lötprozesses erforderlich ist, wird beim Herstellen von langen Löt­nähten, z. B. in der Blechverarbeitung, häufig mit einem kontinuierlich geförderten Lotdraht gearbeitet [99,100]. Eine festgelegte Art der Lotzufuhr besteht auf Grund der hohen Flexibilität hinsichtlich Strahlführung und Energieeinkopplung beim Laserstrahl­löten nicht. Die hohe Flexibilität des Lasers als Energiequelle wird anhand weiterer Anwendungsbeispiele deutlich, bei denen u. a. Leichtmetalle, keramische Verbindungen sowie Superlegierungen auf Nickelbasis gelötet wurden [101].

Die für das Laserstrahl­löten relevanten und geeigneten Applikationen zeichnen sich dadurch aus, dass eine auf die Fügezone begrenzte und keine integrale Bauteilerwärmung stattfindet [102]. Hieraus lassen sich die wesentlichen Charakteristika und Vorteile ableiten, die das Laserstrahl­löten als ein Strahlverfahren von den anderen Lötverfahren abgrenzt [103,104,105,106,107]:

- Vermeidung von thermischen Überbelastungen,
- gezielte Temperaturführung zur Vermeidung unerwünschter Gefügeumwandlungen,
- gute mechanische Kennwerte und hohe Qualität der Lötverbindungen,
- Vermeidung von Wärmeverzug sowie
- Verringerung der Lötzeiten.

So lassen sich durch Laserstrahlhartlöten verzugsarme Lötverbindungen mit nur geringfügig ausgedehnten versprödenden Diffusionszonen und reduzierter Grobkornbildung herstellen [77]. Letzteres ist auf hohe Abkühlraten in der durch Laserstrahlung lokal erwärmten Fügezone zurückzuführen.

Auf Grund der kurzen Aufheiz- und Haltezeit im Bereich der Arbeitstemperatur ist der Prozess durch hohe Temperaturgradienten gekennzeichnet. Die Diffusionsvorgänge werden dahin gehend beeinflusst, dass es zu keinem Konzentrationsausgleich in den Diffusionszonen kommt. Aus dem vorliegenden dynamischen Ungleichgewichtszustand erfolgt ein unmittelbarer Übergang in die Kristallisation [77]. Die grobkörnigen Gefüge und spröden Phasen haben daher nur wenig Zeit sich auszubilden [108,109]. Kleine Diffusionszonen sind beim Löten mit Laserstrahlung folglich charakteristisch, wobei diese teilweise unterhalb der Nachweisgrenze liegen bzw. nur bis zu 2 μm stark sind [94]. Festigkeitseinbußen auf Grund geringer stofflicher Durchdringung der Fügepartner durch fehlenden Konzentrationsausgleich konnten jedoch nicht nachgewiesen werden.

Nachteile hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Produktivität können sich bei Bauteilen ergeben, die an mehreren Fügestellen gleichzeitig gelötet werden. So kann bei bestimmten Anwendungen das Laserstrahllöten wegen der sequenziellen Ausführung simultan arbeitenden Lötverfahren, wie z. B. dem Ofenlöten, unterlegen sein [77].

Bezüglich der Wirtschaftlichkeit erfolgt ein differenzierter Vergleich des Laserstrahllöten mit anderen – auch in der Sägeblattfertigung häufig angewandten – Verfahren in Tabelle 2-3.

Tabelle 2-3: Vergleich der spezifischen Merkmale verschiedener Lötverfahren nach Bewertungskriterien [77]

Kriterium	Flamm-löten	Widerstands-löten	Ofen-löten	Induktions-löten	Laserstrahl-löten
Investitionskosten	++	o	+	+	--
Portabilität	++	+	--	o	-
Lötzeiten	o	-	--	+	++
Energiedichte	-	o	--	+	++
Flexibilität	+	o	o	o	+
Prozesskomplexität	o	+	++	-	--
Automationsgrad	+	+	o	o	++
Fügequalität	o	o	++	+	++
Aufwand für Personalqualifikation	-	+	+	+	--
Lötmöglichkeit großer Bauteile					
Blechbauteil	-	o	o	-	++
Massivbauteil	o	-	++	o	o
Wirtschaftlichkeit beim Löten kleiner bzw. großer Blechbauteile					
Einzelfertigung	o	+	+	-	--
Serienfertigung	+	+	+	o	++
Wirtschaftlichkeit beim Löten kleiner bzw. großer Massivbauteile					
Einzelfertigung	+	+	+	-	-
Serienfertigung	o	+	++	o	o

Legende ++ : sehr gut + : gut o : mittel - : mäßig -- : schlecht

Erfolgreiche Lötresultate wurden beim Laserstrahlhohlöten anhand von Blechen aus DC04 (St 1403) mit einer Dicke von 1 mm mit einem 2 kW Nd:YAG-Laser im Stumpfstoß erzielt [97]. Es wurde mit einer kontinuierlichen, stechenden Lotdrahtzufuhr des Lotes L-Cu Zn 40 gearbeitet, wobei die Lötgeschwindigkeiten 1,2 m/min betragen. Mit dem Silberlot L-Ag 55 Sn sind sogar Geschwindigkeiten von 2,9 m/min erreicht worden. Dreidimensionale Nahtgeometrien konnten an der C-Säule eines PKW gelötet werden. Der Laserstrahl wurde über Lichtleitfasern zum Bearbeitungskopf geführt, welcher durch einen sechs-Achs-Gelenkarmroboter geführt wurde.

Hauptanwendungsfelder des Laserstrahlhohlötvorgangs stellen heute Anwendungen dar, in denen eine gute Steuer- und Regelbarkeit sowie die Erzeugung hoher Temperaturgradienten gewünscht wird. Das größte Anwendungsfeld dieses Verfahrens ist die Automobilindustrie, wo vor allem Karosseriebauteile mittels Laserstrahlhohlöten gefügt werden [110,111,112,113].

Für Kupplungsscheiben wurden erste Erfolg versprechende Laserstrahlhohlötverbindungen von Stahl-Keramik-Verbindungen erzielt [114]. Die geforderten Verbindungsfestigkeiten der Lötverbindungen konnten im Rahmen dieser Untersuchungen jedoch nur mit titanhaltigen Lotwerkstoffen erreicht werden.

2.3.5 Induktionslöten

Das Induktionslöten ist ein Verfahren, welches nach DIN Norm 857 [65] durch den Energieträger elektrischer Strom die Lötzone erwärmt. Grundlage dieser Erwärmung ist das physikalische Induktionsgesetz. Ein zeitlich veränderliches Magnetfeld (Φ_{\sim}), das durch eine mit Wechselstrom ($I_{\sim\text{Primär}}$) durchflossene Primärspule im sogenannten Arbeitskreis erzeugt wird, induziert in einer Sekundärspule eine Spannung, die wiederum einen Wechselstromfluss ($I_{\sim\text{Ind}}$) zur Folge hat. Dieser induzierte Stromfluss ($I_{\sim\text{Ind}}$) führt in der Sekundärspule zur Jouleschen Wärmeentwicklung. Bei der Induktionserwärmung bzw. beim Induktionslöten entspricht der Induktor einer Primärspule, während das elektrisch leitfähige und zu verlötende Bauteil eine Sekundärspule darstellt. Die elektrische Leitung innerhalb des Bauteils schließt die induzierten Ströme kurz, weshalb diese Ströme Wirbelströme genannt werden. Diese führen zu einer tiefgreifenden Erwärmung des Bauteils, so dass im Gegensatz zum Transformator eine möglichst vollständige Energieumwandlung in Joule'sche Wärme angestrebt wird [115,116,117]. Im Bild 2-13 ist das Wirkprinzip der induktiven Erwärmung schematisch dargestellt.

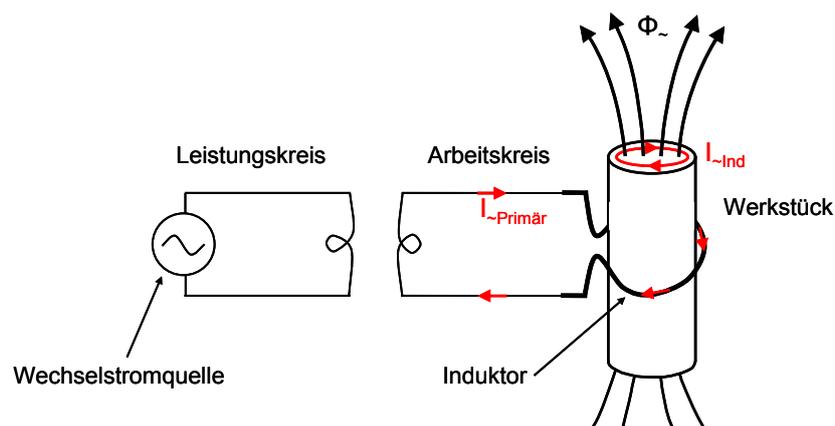


Bild 2-13: Prinzipskizze der induktiven Erwärmung [118]

Zusätzlich kommt bei ferromagnetischen Werkstoffen unterhalb der Curie-Temperatur ein Erwärmungsanteil auf Grund von Ummagnetisierungs- bzw. Hystereseverlusten hinzu [119]. Bei einer Induktionsfrequenz von < 70 kHz stellen diese Hystereseverluste, bei > 70 kHz die Joule'schen Wärmeverluste den größten Anteil am Wärmeeintrag. Der Prozess der Induktionserwärmung ist verfahrensseitig vor allem dadurch gekennzeichnet, dass die Wärme berührungslos direkt im Werkstück erzeugt wird. Daraus folgt, dass die induktive Erwärmung im Vergleich zu anderen konventionellen Erwärmungsverfahren mit Abstand die größte Leistungsübertragung ermöglicht [120]. Vergleichende Werte werden in der Tabelle 2-4 vorgestellt.

Tabelle 2-4: Leistungsübertragung als Funktion der Erwärmungsart [115]

Erwärmungsart	mögliche Leistungsübertragung in W/cm ²
Konvektionserwärmung	0,5
Strahlungswärme Muffelofen	8
Wärmeleitung, Heiztisch	20
Brennerflamme	1.000
Induktionserwärmung	30.000

Abhängig ist die Intensität der induktiven Erwärmung von der Stärke des elektromagnetischen Feldes, vom Werkstückwiderstand sowie der magnetischen Kopplung des Induktors zum Werkstück. Diese Kopplung bezieht sich zum einen auf die Anordnung von Werkstück und Induktor. Da ein Werkstück im Innenfeld des Induktors einen besseren Übertragungswirkungsgrad als ein Werkstück im Außenbereich hat, lässt sich eine Welle deutlich besser erwärmen als eine Bohrung. Zum anderen sinken Übertragungsverluste mit abnehmendem Spalt zwischen Induktorspule und Werkstückoberfläche und der Übertragungswirkungsgrad steigt. Hieraus folgt, dass die Induktorgeometrie auf das jeweilige Werkstück bzw. die jeweilige Sägeblattgeometrie sowie das geforderte Erwärmungsprofil individuell anzupassen ist. Im Bild 2-14 ist die Anordnung der Induktionsschleifen als Beispiel für Lötungen von Rundbauteilen dargestellt.

Analoge Aussagen sind auch für Lötungen in der Kreissägenfertigung zu treffen. Die Induktionsschleifen müssen für eine optimale Erwärmung der Fügezone möglichst nah positioniert werden. Weiterhin ist ein gleichmäßiger Abstand zwischen Werkstück und Induktionsschleifen einzustellen. Ein ungleichmäßiger Abstand würde durch eine unterschiedliche magnetische Kopplung zu einer ungleichmäßigen Wärmeverteilung im Werkstück führen.

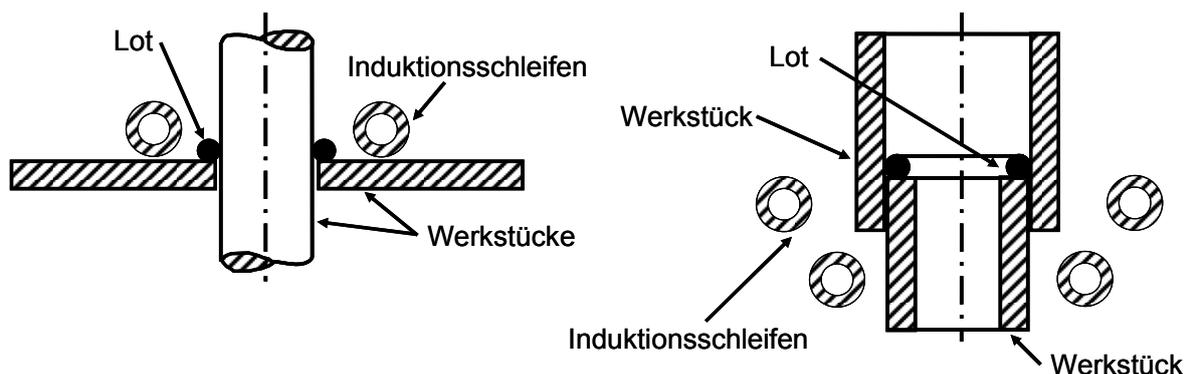


Bild 2-14: Anordnung der Induktionsschleifen [73]

Induktoren werden zum Teil mit einer Spulenwindung, überwiegend jedoch mit mehreren Spulenwindungen ausgeführt und sind vor allem bei hohen Stromstärken wassergekühlt [116].

Durch eine Veränderung der Induktionsfrequenz kann das im Bauteil erzielbare Wärmefeld eingestellt werden. Unterschieden wird hierbei zwischen den drei Frequenzbereichen Niederfrequenz bei 0,05 bis 0,5 kHz, Mittelfrequenz bei 0,5 bis 50 kHz und Hochfrequenz bei 50 bis 10.000 kHz.

Eine Erhöhung der Induktionsfrequenz führt zu einer Konzentration des Stromflusses vor allem in oberflächennahen Bereichen des zu verlötenden Bauteils. Die Wärmeenergie wird im oberflächennahen Bereich gestaut und fließt nur durch Wärmeleitung ins Innere ab. Dieses Phänomen wird als „Skin-Effekt“ bezeichnet. Der induzierte Strom fällt von seinem Maximum direkt an der Werkstückoberfläche einer e-Funktion folgend zur Bauteilmitte hin ab. Die Distanz, an welcher der Strom auf das 1/e-fache (ca. 37 %) seines Oberflächenwertes abgesunken ist, wird als Stromeindringtiefe δ bezeichnet. In dieser Schicht werden ca. 86,4 % der ins Bauteil eingekoppelten Energie in Wärme umgesetzt.

Für die Praxis leitet sich daraus ab, dass kleine Fügeteile mit hochfrequenten Induktionsanlagen und große Bauteile, bei denen eine Erwärmung in der Tiefe (oder eine Durchwärmung) gewünscht wird, mit niederfrequenten Induktionsanlagen erwärmt werden.

Nach dem Induktionsgesetz lässt sich die Stromeindringtiefe wie folgt berechnen [115]:

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\rho_w \cdot 10^7}{\mu_r \cdot f_I}} \approx 503 \sqrt{\frac{\rho_w}{\mu_r \cdot f_I}} \quad [\text{mm}] \quad (9)$$

mit ρ_w = spezifischer elektrischer Widerstand $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$,
 μ_r = magnetische Permeabilität dimensionslos,
 f_I = Induktionsfrequenz Hz.

Grundsätzlich lassen sich alle elektrisch leitenden Werkstoffe induktiv erwärmen. Als Anhaltswerte für die Stromeindringtiefen bei verschiedenen Werkstoffen, Frequenzen und Temperaturen sind in Tabelle 2-5 exemplarisch einige Werte angegeben.

Tabelle 2-5: Stromeindringtiefe in Abhängigkeit von Werkstoff, Frequenz und Temperatur [73,121,122]

Werkstoff	spezifischer elektrischer Widerstand ρ in $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	Wirktiefe δ in mm für	
		f=10 kHz	f=350 kHz
Stahl, 200°C	0,13	0,13	0,02
Stahl, 1000°C	1,2	5,51	0,93
Kupfer, 200°C	0,016	0,64	0,11
Kupfer, 700°C	0,07	1,33	0,22

WC-Co-Hartmetalle sind gekennzeichnet durch eine ferro-magnetische Bindepase, jedoch ist ihre magnetische Permeabilität (μ_r) relativ niedrig. Sie steigt mit dem Kobaltgehalt, bei einem typischen Wertebereich von 2 bis etwa 12, wenn der Vaku-umwert gleich 1 ist. Für den spezifischen elektrischen Widerstand (ρ_w) wird in der Literatur ein Wertebereich von 0,16 bis 0,2 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ genannt [123].

Speziell beim induktiven Löten der Kreissägeblätter wird hierdurch der größte Energieanteil in den Werkzeugstahl eingekoppelt. Das Hartmetall und Lot erwärmt sich verzögert und erhält einen wesentlichen Energieanteil nur durch Wärmeleitung.

Auch durch Anpassung der Induktionsfrequenz können hierbei die unterschiedlichen Ortstemperaturen im Sägeblatt nicht vollständig verhindert werden. Das aus diesem Grund festzulegende Energie-Zeitprofil muss sicherstellen, dass es auf der einen Seite nicht zu örtlichen Überhitzungen des Lotes kommt (Ausgasungen, Porenbildung, Haltbarkeit des Flussmittels), und andererseits der gesamte Fügebereich die Arbeitstemperatur des Lotes erreicht (Benetzung und Diffusion des Lotes) [124].

3 Ausgangssituation und Zielsetzung

3.1 Ausgangssituation

In der Serienfertigung von Werkzeugen hat sich aktuell das Induktionslöten als gut automatisierbarer und für die meisten Anwendungen schneller Prozess bei ausreichend genauer Erwärmung der Bauteile durchgesetzt. Die Wärme wird in elektrisch leitenden Werkstoffen unmittelbar erzeugt und ermöglicht weitaus schnellere Aufwärmzeiten als alternative Lötverfahren, welche die Lötstelle über Wärmeleitung oder Wärmestrahlung erhitzen.

Durch die unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften erfolgt jedoch im Stahlwerkstoff des Stammblasses im Vergleich zum Hartmetall der Sägezähne eine deutlich stärkere Umsetzung der Induktionsleistung in Wärme. Die Wärmeenergie wird folglich zum größten Teil im Stammbblatt gestaut und fließt nur durch Wärmeleitung in die Fügezone und das Hartmetall ab. Die resultierende großflächige thermische Beeinflussung des Stammblasses führt zu erheblicher Härtesteigerung um den Bereich der Lötnaht, die in der Regel mit einer entsprechenden Verringerung der Zähigkeit einhergeht. Derartig gegenüber dem Grundwerkstoff veränderte Eigenschaften des Stammblasses stellen eine metallurgische Kerbe dar, so dass die Bauteileigenschaften negativ beeinflusst werden. Bei einer schlagartigen Beanspruchung erfolgt häufig ein Ablösen von Sägezähnen durch einen Bruch im Stammbblattanteil der Lötverbindung. Der erhöhte Wärmeeintrag verursacht zudem einen unerwünschten Bauteilverzug sowie eine optische Beeinträchtigung des Sägeblattes, wodurch nachgeschaltete Arbeitsschritte erforderlich werden.

Die im Stand der Technik dargelegten deutlich gesteigerten Anforderungen an die Festigkeit der Lötverbindung bei gleichzeitiger Verkleinerung der Fügezone erfordern auch im normalen Einsatz Werkzeuge mit verbesserten mechanischen Eigenschaften. Die Qualität und Festigkeit der Kreissägeblätter muss folglich gesteigert werden, um das Potenzial dieses Werkzeugkonzeptes vollständig ausschöpfen zu können.

Dies erfordert jedoch eine geeignete Fügetechnik, welche die aktuellen Limitationen des induktiven Lötens überwindet. Diesen hohen Anforderungen soll das hauptsächlich aus dem Automobilbau bekannte Laserstrahllöten insbesondere in Bezug auf eine zeitlich und örtlich sehr gut steuerbare geringe Wärmezufuhr gerecht werden. Begünstigt wird der Einsatz dieses Verfahrens weiterhin durch seine hohe Verfahrensflexibilität, gute Automatisierungseigenschaften und damit wirtschaftlichen Einsatz.

Auf Grund der werkstoffkundlich und thermisch abweichenden Randbedingungen sind umfangreiche Untersuchungen zur Qualifizierung der verschiedenen Laserstrahlquellen sowie die Kenntnis optimaler Prozessbedingungen erforderlich, um das Verfahren für den anvisierten Einsatz in der Fertigung von Kreissägeblättern bestmöglich nutzbar zu machen.

3.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Technologie für das Hochgeschwindigkeitslöten von Hartmetall-Stahl-Verbindungen, so dass das Verfahren im Werkzeugbau angewendet werden kann. Dabei soll die Festigkeit der Lötverbindungen durch den Einsatz einer laserbasierten Prozesstechnik erhöht und durch eine Verkürzung der Prozesszeiten auch die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens gesteigert werden.

Ausgehend von konventionellen Hartmetall-Stahl-Verbindungen soll das Laserlötverfahren mittels verschiedener Laserstrahlquellen und Strahlführungssysteme entwickelt und qualifiziert werden. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse soll eine Laserstrahlführung als Substitution des Induktors in einen Lötautomaten eingebaut und das Laserstrahllöten verschiedener Sägeblattgeometrien und Durchmesser unter Berücksichtigung realer, automatisierter Fertigungsbedingungen und minimaler Taktzeiten untersucht werden. Bei den Endanwendern dieser zu entwickelnden Technologie kommen vorwiegend Stammbblätter mit einer möglichst dünnen Blattstärke zum Einsatz. Vor diesem Hintergrund sollen die dünnen modernen Sägewerkzeuge für die automatisierten Lötungen schwerpunktmäßig untersucht werden. Die Belastung der Lötverbindung wird bei diesen Werkzeugen auf Grund der verkleinerten Anbindungsfläche größer, weswegen ein Maximum an Verbindungsfestigkeit erforderlich ist. Die thermische Schädigung des Zahnrückens bzw. der Hartmetallschneide soll durch den Einsatz einer Temperaturführung vermieden bzw. die Wärmeeinflusszone im Stahl auf einen möglichst geringen Bereich nahe der Lötstelle begrenzt werden. Der thermische Verzug des Stammblasses soll selbst bei kurzen Taktzeiten vermieden werden, um einen anschließenden erneuten Richtvorgang einzusparen. Die Entstehung von Anlauffarben und Schwärzungen soll z. B. durch eine gezielte Prozessführung und / oder Schutzgasabdeckung der Fügezone verhindert werden, um den Fertigungsaufwand für die abschließende Endbearbeitung signifikant zu vermindern. Die Eigenschaften (u. a. die Scherfestigkeit) dünner Sägeblätter sollen verbessert werden, so dass ihre Standzeit und / oder Belastbarkeit (z. B. durch höhere Schnittgeschwindigkeiten) erhöht wird. Anhand ausgewählter Sägeblattgeometrien sollen die eng mit den technologischen Vorteilen verbundene Wirtschaftlichkeit des Laserstrahlötens durch Reduktion der Fertigungszeiten und Optimierung des Fertigungsprozesses (z. B. Einsparung von kostenintensiven Fertigungsabläufen) im Vergleich zu etablierten Induktionslötens nachgewiesen werden.

Die erarbeiteten Erkenntnisse sollen in praxisgerechten Handlungsempfehlungen für das Laserstrahllöten in der Kreissägenfertigung münden. Potenziellen Anwendern soll das für die jeweilige Aufgabenstellung am besten technologisch und wirtschaftlich geeignete Verfahren nachvollziehbar aufgezeigt werden.

4 Lösungskonzept

Zur Erreichung des Zieles dieser Arbeit wird die in Bild 4-1 dargestellte und im Folgenden erläuterte Versuchssystematik verwendet.

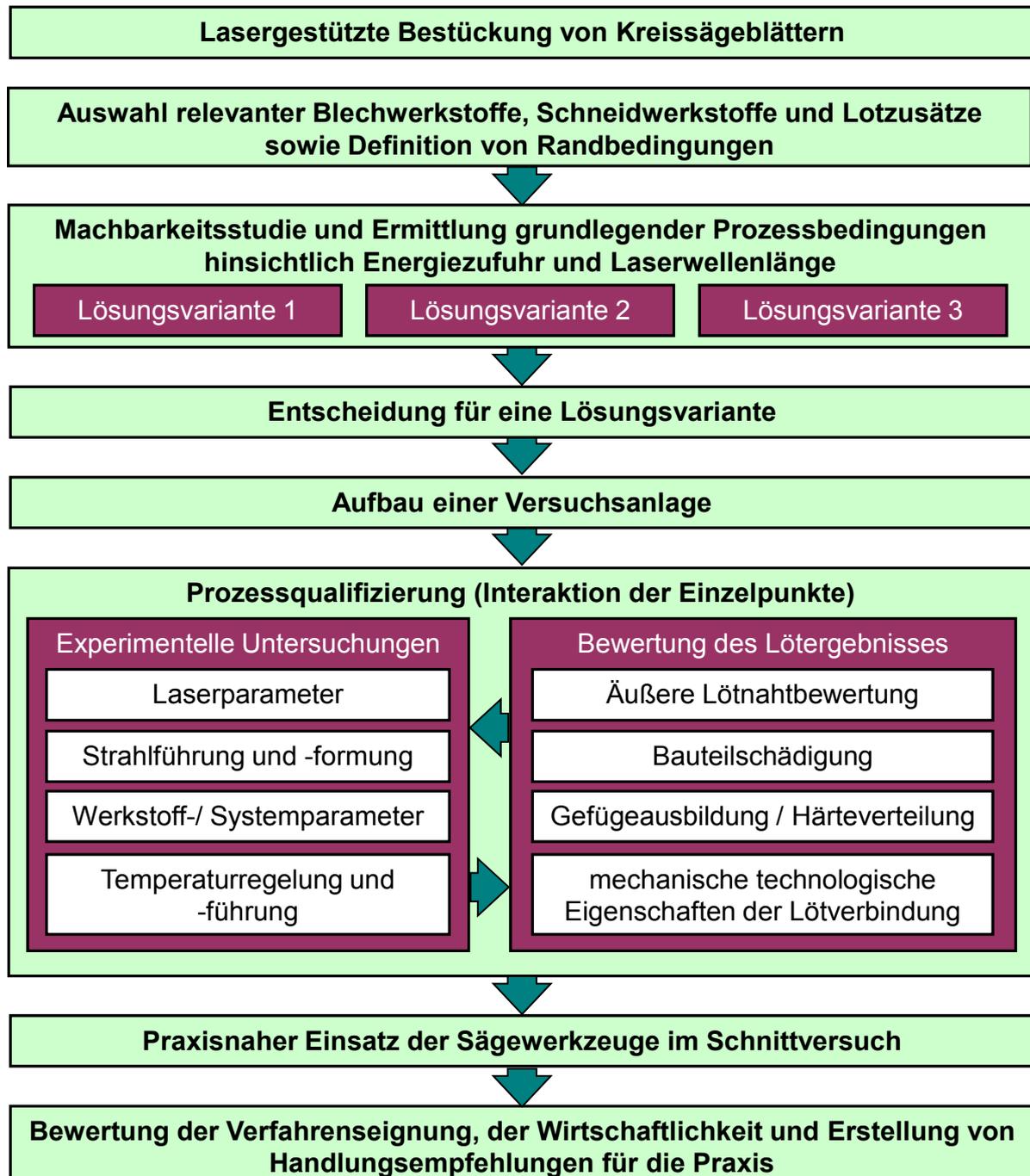


Bild 4-1: Versuchssystematik zur Erarbeitung des Zieles dieser Arbeit

Diese hierarchisch aufgebaute Versuchssystematik beginnt mit der Auswahl der Schneidwerkstoffe, die aktuell und zukünftig zur Fertigung von Kreissägeblättern verwendet werden. Ausgehend von den Schneidstoffen werden die Stahlwerkstoffe des Stammblasses definiert. Die resultierende Werkstoffpaarung aus Schneidstoff und Stammbblatt beeinflusst die Art und die Applikation der Lote und Lothilfsstoffe. Durch

die Wahl verschiedener geometrischer Größen von Sägeblättern ergeben sich die Randbedingungen zum Aufbau der Versuchstechnik.

Als Ausgangspunkt für vertiefende Untersuchungen erfolgt zunächst die Durchführung einer Machbarkeitsstudie für verschiedene zu erarbeitende Lösungsvariante und die Ermittlung grundlegender Prozessparameter. Die hierfür aufzubauende Versuchstechnik und die zu konstruierenden Bauteile müssen die Adaption an die verschiedenen Laserstrahlquellen (Nd:YAG-, CO₂- und Diodenlaser) ermöglichen. Auf Basis der ermittelten Daten wird die Entscheidung für eine Lösungsvariante und damit für eine Laserwellenlänge bzw. Laserstrahlquelle getroffen. Nach dieser Festlegung wird eine vollautomatisierte Maschine für die lasergestützte Fertigung von Kreissägeblättern auf der Plattform eines Induktionslötautomaten konstruiert und gebaut.

Die Erarbeitung und Qualifizierung des Laserstrahlverfahrens zur Bestückung von Kreissägewerkzeugen mit Hartmetallschneidstoffen ist der zweite Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Eingangsgrößen der experimentellen Untersuchungen sind die Art und Betriebszustände der Laserstrahlquelle, die Strahlführung und Strahlformung, Werkstoff- und Systemparameter sowie die Temperaturführung in der Lötzone. Die Bewertungskriterien der nicht zerstörenden Prüfung umfasst die Sichtprüfung der Lötung auf Erfüllung der Normanforderungen. Die für weitere Untersuchungen vorgesehenen Prüfstücke werden durch metallographische Schliffbilderstellung und Härteprüfung auf das Verhalten des Lotes, die Ausbildung der Diffusionszonen und hinsichtlich der Ausprägung des Stammblatt-Stahlgefüges bewertet.

Die Untersuchung erstreckt sich auch auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Verbindungen. Die ermittelten Daten werden mit der Grundwerkstoffkonfiguration sowie mit den geforderten Verbindungsfestigkeiten verglichen und die Veränderungen bei Variation der Eingangsparameter bewertet, gewichtet und dokumentiert. Das systematisch aufgebaute Lösungskonzept ermöglicht eine gezielte Variation der Eingangsgrößen zur Lösung der Aufgabenstellung bei einer Reduktion der nötigen Iterationsschleifen. Um das Potenzial des entwickelten Laserlötverfahrens aufzuzeigen, werden die verschiedenen gefertigten Sägeblattkonfigurationen im Sägewerk unter industriellen Bedingungen getestet. Bewertet werden hierbei die Festigkeit der Lötverbindung sowie mögliche Einflüsse der Laserstrahlung auf das Verschleißverhalten der Schneidstoffe.

Alle gewonnenen Erkenntnisse werden abschließend mit den ermittelten Ergebnissen der Prozessqualifizierung zusammengeführt und ein Prozessablauf, eine Handlungsempfehlung und eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung gegenüber dem herkömmlichen Induktionslötverfahren ausgearbeitet. Diese Datenbasis soll unter Beachtung der jeweiligen technologischen und wirtschaftlichen Gegebenheiten eine Einschätzung über das Einsatzpotenzial des neuen Verfahrens für die Sägeblattfertigung liefern. Eine FEM-Simulation des Lötprozesses soll die Betrachtung der Ergebnisse abrunden und die Unterschiede der beiden Verfahren hinsichtlich der Wärmeverteilung noch einmal gegenüber stellen.

5 Versuchswerkstoffe und Probengeometrien

5.1 Probengeometrien

In Abhängigkeit vom Einsatz der Kreissägeblätter unterscheiden sich nicht nur die angegebenen Maße der Stammbblätter, sondern auch die Schneiden bzw. Sägeblattgeometrien sowie die Größe des so genannten Spanraumes. Die für diese Arbeit verwendeten Kreissägeblätter entsprechen der Prinzipskizze in Bild 5-1. Weiterhin sind in dieser Darstellung auch die im Folgenden verwendeten Begriffe definiert.

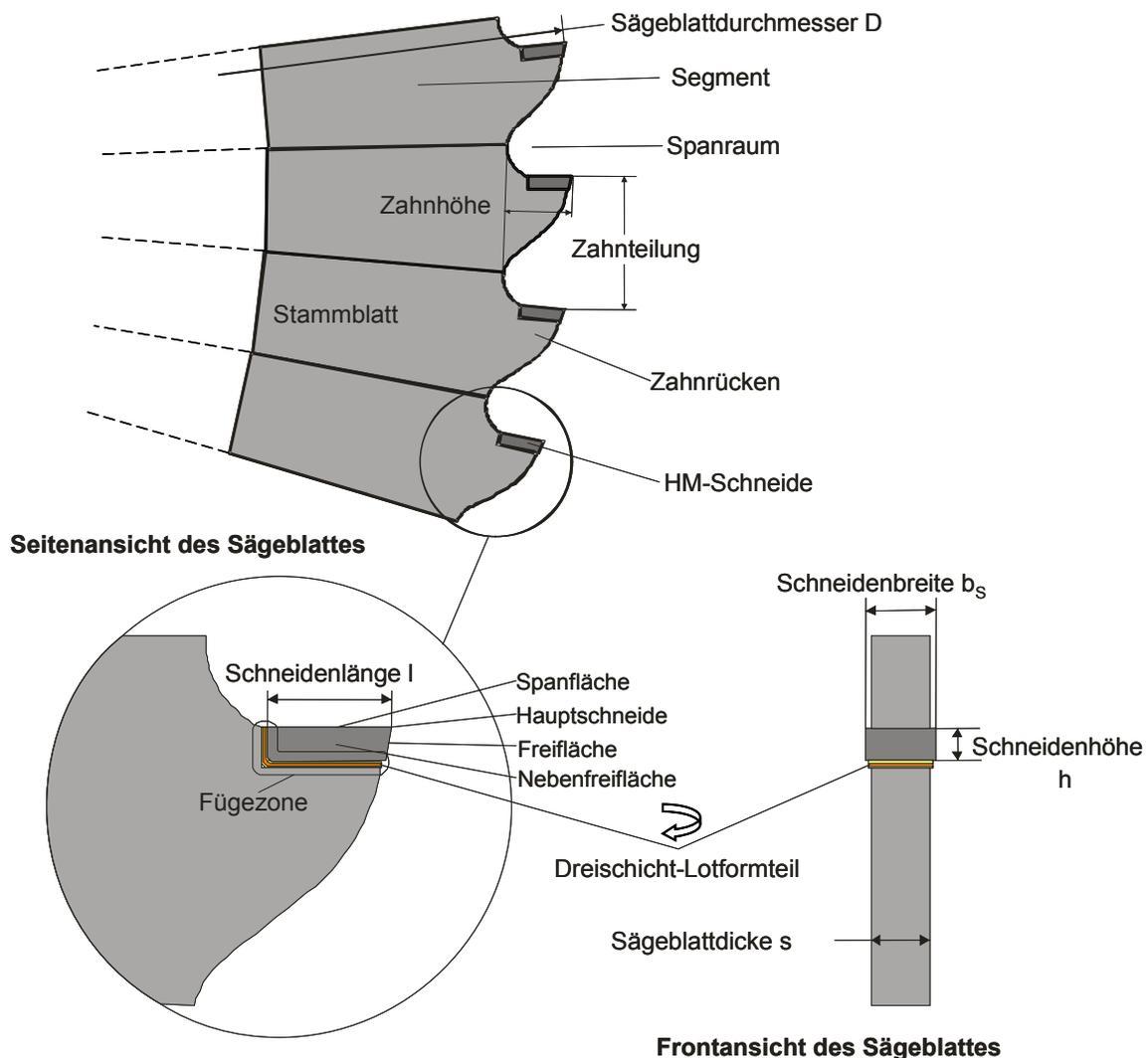


Bild 5-1: Geometrie der Sägeblätter und Hartmetallschneiden

Nach dem Ausschneiden der Stammbblätter aus dem Blechgrundwerkstoff erfolgt in einem weiteren Schritt die Versuchsträgervorbereitung, der auch bei kommerziell erhältlichen Sägeblättern erforderliche Fräsvorgang des Hartmetallschneidensitzes. Dieser muss präzise der Form von Hartmetallschneide und Lotformteil hinsichtlich Größe und Planheit angepasst sein. Lediglich im Bereich der Breite weist die Hartmetallschneide ein größeres Maß im Vergleich zum Stammbblatt auf, da die Schneide im Zuge des Lötvorganges auf Grund von Fertigungs- und Lagetoleranzen

nicht immer genau mittig zum Stammblatt positioniert werden kann. Im Verlauf der weiteren Bearbeitung des Sägeblattes, insbesondere beim Schärfvorgang, erfolgt das Schleifen der Hartmetallschneiden auf die endgültige Schneidenbreite. Die geometrischen Maße der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Versuchsträger fasst die Tabelle 5-1 geordnet nach dem Durchmesser der Sägeblätter zusammen. Die Auswahl erfolgte aufgrund der aktuellen Industrierelevanz dieser Sägeblatttypen.

Tabelle 5-1: Geometrien der Kreissägeblätter

lfd. Nr.	Stammblatt-durchmesser	Schneidstoff Länge x Breite x Höhe	Schneiden Stück	Verwendung der Sägeblätter
1	220 mm	K01F 5,5 x 2 x 1,7 mm	32	Holz Dünnschnitt
2	400 mm	P25 12 x 5,6 x 4 mm	44	Stahl
3	400 mm	K01F 13 x 6,5 x 4 mm	36	Holz
4	400 mm	K10F 13 x 6,5 x 4 mm	36	Holz
5	400 mm	K01UF 12,5 x 6,5 x 4 mm	36	Holz
6	400 mm	K01UF 10,5 x 4,8 x 2,5 mm	36	Holz
7	400 mm	DP 6 x 5,5 x 1,6 mm	36	Holz
8	460 mm	K01UF 10,5 x 4,8 x 2,5 mm	36	Holz
9	1150 mm	P25 15 x 8,0 x 4,0 mm	100	Holz

5.1.1 Blechmaterial

Der Stammblattwerkstoff dieser Versuchsträger besteht aus marktüblichem Kaltarbeitsstahl. Die Blechdicken werden entsprechend den typischen Anwendungen ausgewählt. Die Stammblätter der lfd. Nr. 1 und 9 der Tabelle 5-1 werden aus dem Werkstoff 75Cr1 und die übrigen Stammblätter aus 80CrV2 gefertigt. Diese beiden Stahlwerkstoffe stellen in der Industrie die hauptsächlich verwendeten Stammblattwerkstoffe dar. Die Legierungsbestandteile sowie die wesentlichen mechanischen Kennwerte dieser nach DIN 4957 [125] genormten Werkstoffe sind in der Tabelle 5-2 aufgeführt.

Tabelle 5-2: Legierungszusammensetzung und mechanische Kennwerte der verwendeten Blechwerkstoffe

Werkstoff	Werkstoff-Nr.	R _m N/mm ²	Legierungselemente in %						
			C	Si	Mn	P	S	Cr	V
75Cr1 vergütet	1.2003	1550- 1750	0,74 - 0,80	0,25 - 0,50	0,65 - 0,80	< 0,025	< 0,01	0,30 - 0,45	-
80CrV2 vergütet	1.2235	1200- 1800	0,75 - 0,85	0,25 - 0,40	0,30 - 0,50	< 0,03	< 0,03	0,40 - 0,70	0,15 - 0,25

5.1.2 Hartmetalle

Für die Versuche werden die in Tabelle 5-3 aufgeführten Schneidstoffe eingesetzt, die einen Querschnitt durch die aktuellen Industrieanwendungen darstellen. Alle Schneidstoffe wurden für das Induktionslöten entwickelt, so dass eine grundsätzliche Eignung für das Laserstrahllöten mit einer großflächigen und kontinuierlichen Erwärmung angenommen werden kann. Abweichend vom Induktionslöten sind aber das Verhalten der Schneidstoffoberfläche in der Laserstrahl-Werkstoff-Wechselwirkungszone sowie das Schneidstoffverhalten bei sehr kurzen Aufheiz- und Abkühlzeiten zu untersuchen.

Tabelle 5-3: Schneidstoffe, Zusammensetzung und mechanische Kennwerte

Schneidstoff	Schneidstoff-hauptgruppe	WC %	TiC+TaC +NbC %	Co %	Härte HV 30 / Knoop-Härte	Biege- festigkeit N/mm ²	Druck- festigkeit N/mm ²
P25	P	70	20	10	1.450	1.750	4.900
K01F	K	96	-	4	1.810	2.050	7.400
K10F	K	94,4	-	5,6	1.730	2.300	7.000
K01UF	K	97,6	-	2,4	2.200	3.500	12.500
DP010	DP	Diamantpulver			8.000	900	7.600

5.2 Lötzusätze

Für alle experimentellen Untersuchungen wird das unter dem Handelsnamen BrazeTec 49/Cu vertriebene und nach DIN EN 1044 [126] genormte Lot B-Ag49ZnCuMnNi-625/705 verwendet. Dieses in der Sägenfertigung am häufigsten verwendete Schichtlot besteht aus einer Kupfermittellage mit 0,2 mm Stärke, die beidseitig mit dem eigentlichen Lot (mit je 0,07 mm Schichtdicke) plattiert ist. In Abhängigkeit von der Schneidenbreite ist dieses Lot in verschiedenen Breiten in Bandform erhältlich. Die Legierungszusammensetzung sowie die mechanischen und thermischen Kennwerte sind in der Tabelle 5-4 dargestellt. In der Machbarkeitsstudie, in der die grundlegenden Erkenntnisse erarbeitet werden, werden Lotabschnitte von Hand in Anlehnung an die entsprechende Schneidenbreite vom Band abgetrennt. In einem zweiten Schritt werden diese Abschnitte zu einer L-Form, dem so genannten Lotformteil, gebogen. Diese Umformung ist erforderlich, um an beiden Flächen der Fügezone zwischen Schneide und dem Stammblatt Lot zu

applizieren. Nach dem Aufbau der Versuchsanlage werden diese zwei Schritte vom Lötautomaten durchgeführt.

Tabelle 5-4: Legierungszusammensetzung sowie mechanische und thermische Kennwerte des Lotes BrazeTec 49/Cu

Ag %	Zn %	Cu %	Mn %	Ni %	Scherfestigkeit N/mm ²	Schmelzintervall °C	Arbeitstemperatur °C
49	23	16	7,5	4,5	150 - 300	625 bis 705	690

5.3 Löthilfsstoffe

In Abhängigkeit von der Schneiden-Stamdblatt-Werkstoffpaarung sowie dem verwendeten Lot wurde das unter dem Handelsnamen „BrazeTec spezial h“ erhältliche Flussmittel ausgesucht und im Folgenden verwendet. Dieses pulverförmige – oder wie im Rahmen dieser Arbeit pastenförmig applizierte – Flussmittel ist unter der Bezeichnung „FH12“ nach EN 1045 [70] genormt. Die Zusammensetzung von „FH12“ besteht nach der Norm aus Borverbindungen, elementarem Bor und einfachen komplexen Fluoriden. Die Anwendungsfelder dieses Flussmittels sind Lötverbindungen von rostfreien und anderen hoch legierten Stählen sowie von Hartmetallen. Der Wirktemperaturbereich dieses Flussmittels beträgt 550 – 850°C. Die nach dem Löten verbleibenden Rückstände sind korrosiv und müssen durch Abwaschen, Abbeizen oder Sandstrahlen entfernt werden.

Als Lötenschutzgas wird Argon 4.6 mit einem Volumenstrom von 12 l/min schleppend zugeführt, welches das Auftreten von Anlassfarben verhindern soll. In Vorversuchen konnte keine Veränderung des Lötergebnisses bei Austausch des Schutzgases Argon gegen Helium festgestellt werden. Aus wirtschaftlichen Gründen wurde daher für die weiteren Versuche Argon zum Schutz der Lötzone gewählt.

6 Versuchsaufbau und Prozessentwicklung

Die Versuchsdurchführung gliedert sich in zwei Abschnitte. Anhand von grundlegenden Untersuchungen soll erarbeitet werden, inwieweit die verschiedenen Laserstrahlquellen Nd:YAG-, CO₂- und Diodenlaser für Hartlötungen von Stahlstammlättern mit Hartmetallschneiden geeignet sind. Dies wird untersucht, indem relevante Parameter der Wärmeübertragung, wie z. B. der Wärmefluss im Bauteil, mittels Variation der Laserenergieeinkopplung in die Fügezone gezielt beeinflusst werden. Aus den Ergebnissen der anschließenden Lötnahtbewertung und der Analyse der Fügepartnerbeeinflussung lassen sich die Randbedingungen für den zweiten Schritt, die Erarbeitung der Technologie zur Umrüstung einer Industrieanlage und Fertigung automatisiert hergestellter Sägeblätter, identifizieren.

6.1 Methoden der Strahleinkopplung / Erwärmung der Lötzone

Drei grundsätzliche Möglichkeiten die Laserstrahlenergie, bei möglichst geringer thermischer Belastung des Stahlwerkstoffs, in die Fügezone einzukoppeln, sind im Bild 6-1 dargestellt.

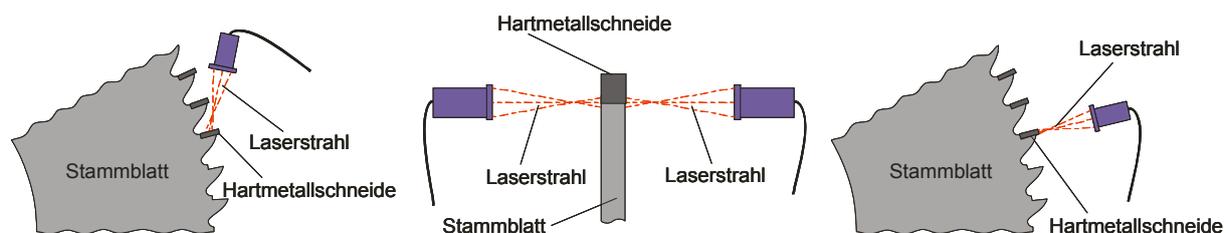


Bild 6-1: Einstrahlvarianten 1 - 3 (von links nach rechts) der Strahleinkopplung

Lösungsvariante 1:

Diesem Lösungsansatz liegt eine Einstrahlvariante (EsV) zugrunde, bei der ein defokussierter Laserstrahl über einen entsprechend ausgelegten Strahlengang und eine Bearbeitungsoptik auf der Spanfläche der Hartmetallschneide positioniert oder verfahren wird (vgl. Bild 6-1 links). Bei der Einkopplung der Laserstrahlleistung ausschließlich über die Hartmetallschneide erfolgt der Wärmefluss – unter Annahme einer vorwiegend eindimensionalen Wärmeleitung – senkrecht zur Fügeebene. Der Weg vom Ort der Leistungseinkopplung bis zur Fügezone beträgt je nach Höhe der Schneide 2 bis 4 mm. Diese Methode lässt erwarten, dass eine durchgehende und homogene Anbindung der Fügepartner im gesamten Bereich der Fügezone erzielt werden kann. Wichtig bei Anwendung dieser Variante ist eine gute Anlage der Fügepartner und des Lotformteiles, um einen ausreichenden Wärmeübergang und Wärmefluss vom Hartmetall über das Lotformteil zum Werkzeugstahl zu gewährleisten. Bei mangelhafter Anlage kann es zum Wärmestau und Zerfließen des Lotes kommen und eine Anbindung an den Werkzeugstahl erschwert oder gar verhindert werden. Weitere Probleme könnten bei dieser Variante auftreten, wenn das Laserstrahlprofil Inhomogenitäten (Leistungsspitzen) aufweist, welche bei der Erwärmung des Hartmetalls durch stark erhöhte Temperaturen, die deutlich oberhalb der Arbeitstemperatur des Lotes von 690°C liegen, zum lokalen Aufschmelzen der

eutektoiden Wolframkarbid-Kobalt-Verbindung (Schmelzpunkt ca. 1400 °C) führen. Dabei kann es zu Veränderungen der thermophysikalischen und mechanischen Eigenschaften kommen. Dieser Effekt kann durch ein homogenes, stark defokussiertes Strahlprofil und / oder eine Prozessregelung vermieden werden.

Lösungsvariante 2:

Bei dieser Einstrahlvariante wird der Laserstrahl mit einem Strahlteiler geteilt und auf beiden Seiten der Fügezone auf der Schneidenebenfreifläche und / oder auf dem Werkzeugstahl defokussiert abgebildet oder ebenfalls verfahren (vgl. Bild 6-1 Mitte).

Bei der Einkopplung der Laserstrahlleistung durch seitliche Einstrahlung findet der Wärmefluss parallel zur Fügeebene und senkrecht zur gewünschten Wärmediffusionsrichtung statt. Vorteil dieser Variante im Vergleich zur ersten ist, dass hier eine gleichzeitige Erwärmung des Sägeblattsegmentes und Hartmetalls durch Teilpositionierung der Laserstrahlung auf Hartmetall und Sägeblattsegment realisiert wird, und infolge die Anbindung von Lot und Fügepartner (temperaturabhängig) durch Erwärmung aller Fügepartner unterstützt werden kann. Da der Wärmefluss von den Seiten der Hartmetallschneide zur Mitte der Fügefläche eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt, müssen Bestrahlzeit und Strahlleistung aufeinander abgestimmt sein.

Bei dieser Variante kristallisieren sich drei signifikante Untervarianten der Fügepartnererwärmung heraus:

a) Die zu verbindenden Fügepartner werden in einer Spannvorrichtung fixiert. Mittels eines einzelnen Laserstrahls wird zunächst die eine Seite der Fügeverbindung verlötet. Anschließend wird die Probe in der Spannvorrichtung gedreht und danach die gegenüberliegende Seite gefügt.

b) Es wird unter einem je nach Länge der langen Achse des Lötspaltes angepassten Einstrahlwinkel α_{EW} (typisch 60° bis 70°) ohne Verfahrensbewegung eingestrahlt. Auf Grund des großen Einstrahlwinkels ist der Brennfleck stark elliptisch und hat die geeigneten Abmessungen, um fast die gesamte Fügezone abzudecken. Lediglich ein Teil der kurzen Achse des Lötspaltes wird nicht, oder nur indirekt durch Wärmeleitung auf Löttemperatur erwärmt.

c) Mit Brennfleckdurchmessern von ca. 3 bis 4 mm und einem Einstrahlwinkel α_{EW} von je 90° zum Stammbblatt wird L-förmig entlang des Lötspaltes verfahren. Der hierbei mögliche Verfahrensweg des Brennfleckes entlang der Fügezone ist in Bild 6-2 dargestellt.

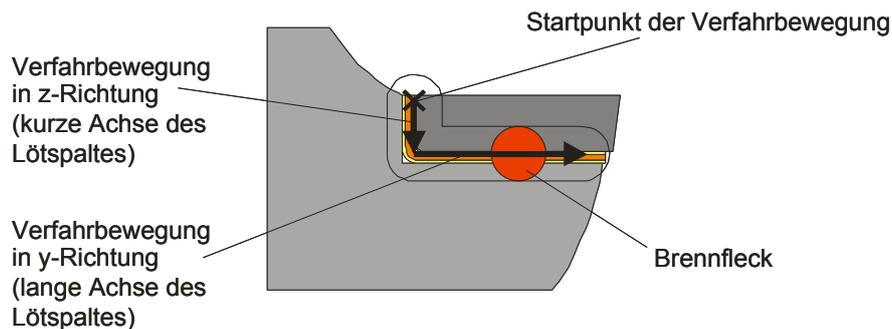


Bild 6-2: Verfahrbewegung des Brennflecks (Einstrahlvariante 2c)

Lösungsvariante 3:

Diese Einstrahlvariante ist gekennzeichnet durch eine Abbildung des defokussierten Laserstrahls auf der Freifläche der Hartmetallschneide (vgl. Bild 6-1 rechts). Auch in diesem Fall erfolgt analog zur Einstrahlvariante 1 die Einkopplung der Laserstrahlung ausschließlich über die Hartmetallschneide. Abweichend zur Variante 1 ist hier der Weg des Wärmeflusses vom Ort der Leistungseinkopplung bis zur Fügezone, speziell bis zur kurzen Achse des Lötspaltes, deutlich länger. In Abhängigkeit der Schneidenlänge kann diese Strecke 15 mm und mehr betragen.

Bei allen Varianten muss die Arbeitstemperatur in den zwei Fügepartnern, dem Lot und auf der gesamten Fügefläche erreicht werden, damit das Lot sowohl in das Hartmetall als auch in den Werkzeugstahl diffundiert. Da das Verhältnis zwischen Höhe (h) und Breite (b) der Hartmetallschneide in den meisten Fällen ca. 1 : 2 beträgt, ist der zum Erreichen der gesamten Fügezone vom Wärmefluss zurückzulegende Weg bei der Variante 2 etwa genauso groß wie bei Variante 1 (siehe Bild 6-3 links).

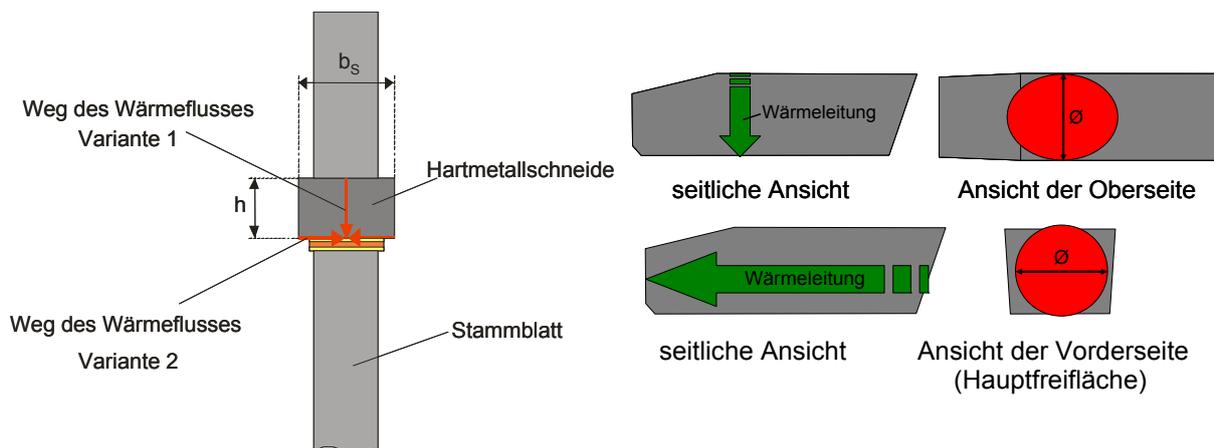


Bild 6-3: Wege des Wärmeflusses bei den Einstrahlvarianten 1 und 2c der Strahleinkopplung (links)
 Vergleich Strahldurchmesser zur Wärmeleitungsstrecke, Bild 1 und 2
 Einstrahlvariante 1 (rechts oben), Bild 3 und 4 Einstrahlvariante 3 (rechts unten)

Die Einstrahlvariante 3 ähnelt verfahrenstechnisch der Einstrahlvariante 1. Der Laserstrahl wird durch Defokussierung an die jeweilige Schneidenbreite bzw. -höhe angepasst und als Unterscheidungskriterium auf der Hauptfreifläche abgebildet.

Auch in diesem Fall wird die gesamte durch den Laserprozess zugeführte Energie über Wärmeleitung innerhalb des Schneidstoffs der Lötzone zur Verfügung gestellt, jedoch ist diese Wärmeleitungsstrecke deutlich länger, speziell bis zur kurzen Achse des Lötspaltes. In Abhängigkeit der Schneidenlänge kann diese Strecke bis zu 15 mm (vgl. lfd. Nr. 8 nach Tabelle 5-1) betragen.

Wird die maximale Größe des Brennfleckdurchmessers der Einstrahlvariante 1 (kleine Halbachse der Ellipse) und Einstrahlvariante 3 ins Verhältnis zur Wärmeleitungsstrecke gesetzt, so zeigt sich, dass bereits bei kleinen Schneiden (Länge x Breite x Höhe = 5,5 x 2 x 1,7 mm) eine Steigerung dieses Wertes um den Faktor 3,2 gegeben ist (vgl. Bild 6-3 rechts):

$$\text{Schneidenlänge} / \varnothing \text{ Brennfleck EsV. 3 zu Schneidhöhe} / \varnothing \text{ Brennfleck EsV. 1} \\ \Rightarrow 5,5 / 2 \text{ zu } 1,7 / 2 \Rightarrow 3,2 \text{ zu } 1.$$

6.2 Laserstrahlquellen

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen werden die in der Tabelle 6-1 aufgeführten Laserstrahlquellen verwendet.

Tabelle 6-1: Technische Daten der verwendeten Lasersysteme

Hersteller / Produktbezeichnung	Wegmann-Basel Triagon 6000	Rofin-Sinar CW 020	Rofin-Sinar DL 015	Laserline LDF 400-650
laseraktives Medium	CO ₂	Nd:YAG	Dioden	Dioden
maximale Ausgangsleistung	6000 W	2000 W	1200 W	670 W
Wellenlänge	10600 nm	1064 nm	808 nm	940 und 980 nm
Faserdurchmesser	Rohstrahl 22 cm, keine Faserkopplung	600 µm	-	400 µm
Kollimierbrennweite	-	120 mm	-	80 mm
Fokussierbrennweite	200 mm	120 mm	100 mm	240 mm

Die Laserstrahlquelle der Firma Wegmann-Basel ist ein hochfrequenzangeregter, axial schnellgeströmter Gaslaser. Bei den weiteren drei Strahlquellen handelt es sich entsprechend dem jeweiligen laseraktiven Medium um Festkörperlaser. Die beiden Diodenlaser unterscheiden sich primär durch ihre unterschiedlichen Strahlqualitäten, die jedoch bei Defokussierung auf den gleichen Brennfleckdurchmesser eine untergeordnete Bedeutung haben. Der Diodenlaser LDF 400-650 wird im Zuge dieser Arbeit für die Integration in einen Lötautomaten verwendet. Der hierfür benötigte lange Strahlweg ist mit dem hinsichtlich der Ausgangsleistung stärkeren, aber mit der schlechteren Strahlqualität behafteten, Diodenlaser DL 015 nicht umsetzbar. Weiterhin ist bei dem Diodenlaser LDF 400-650 die Laserstrahlung bauartbedingt durch eine Lichtleitfaser von der Strahlerzeugung zum Ort der Bearbeitung führbar.

6.3 Versuchsanlage für die Machbarkeitsstudie

Im den Grundlagenuntersuchungen dieser Arbeit wird neben der Art der Laserstrahlquelle und der Wärmeführung auch die Variante der Leistungseinkopplung für

die im zweiten Teil der Arbeit aufzubauende automatisierte Anlage festgelegt. Die hierfür zu fertigende und auf eine CNC-Verfahreinheit zu montierende Spannvorrichtung gewährleistet für alle Varianten der Leistungseinkopplung sowie für alle Laserstrahlquellen die optische Zugänglichkeit der Fügezone. Der unmittelbar angrenzende Bereich der Fügepartner soll in möglichst geringem Kontakt mit der Spannvorrichtung stehen, um Wärmeverluste zu minimieren. Eine Vorspannung der Fügeflächen soll einen definierten Lötspalt und ausreichenden Wärmefluss zwischen den Fügepartnern gewährleisten.

Die Spannkraft (F_S) wird, wie im rechten Teil im Bild 6-4 dargestellt, mit einem Gewindestift aufgebracht. Die grünen Pfeile verdeutlichen die Spannkraft. Der durch die Spannung entstehende Spanndruck wirkt auf beide Fügeflächen (kurze und lange Achse des Lötspaltes). Entsprechend stellt der Richtungsvektor der Spannkraft eine Resultierende aus zwei Kraftanteilen dar. Der Passstift dient als Anschlag gegen das Verdrehen.

Im linken und mittleren Teil im Bild 6-4 ist die Spannvorrichtung mit eingespannter Probe abgebildet. Im rechten Teil ist dieser Spannvorrichtung exemplarisch dargestellt.

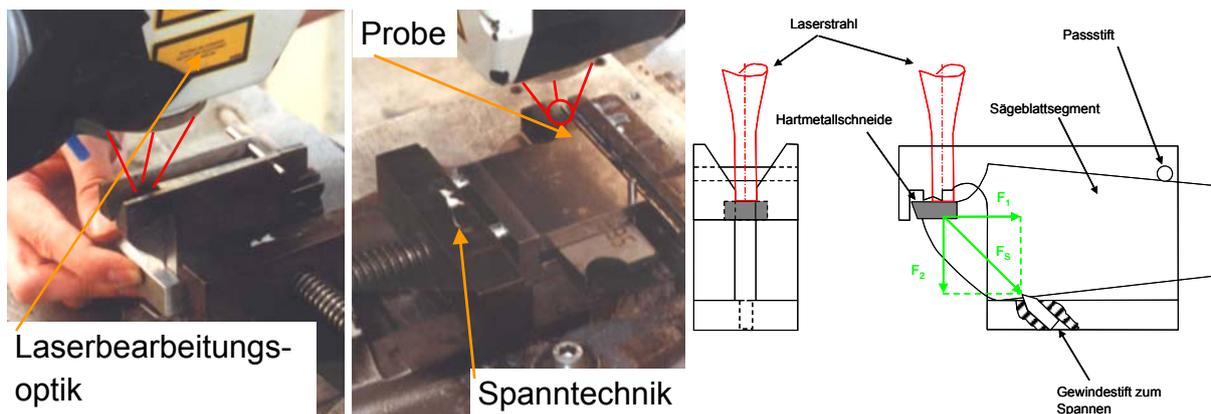


Bild 6-4: Spannvorrichtung
links: Einstrahlvariante 1
Mitte: Einstrahlvariante 2a
rechts: Skizze der Spannvorrichtung

Lötungen mit der Einstrahlvariante 2b und 2c erfordern eine gleichzeitige Bestrahlung von beiden Seiten der Fügezone. Hierzu wird der über die Lichtleitfaser vom Laser zur Bearbeitungsstation geleitete Laserstrahl mit einem Strahlteiler in zwei Anteile gleicher Leistung aufgeteilt.

Im Bild 6-5 links ist ein Sägeblatt entsprechend der lfd. Nr. 8 aus Tabelle 5-1 eingespannt. Der Strahlteiler befindet sich hierbei in der Ausgangsposition. Nach dem Vorbereiten der Fügestelle werden die Fügepartner positioniert und eine Andrückvorrichtung zum Vorspannen aufgesetzt (vgl. Bild 6-5 rechts oben). Das dargestellte Kupferröhrchen führt der Lötstelle Schutzgas zu. Im Anschluss wird der Strahlteiler in den Startpunkt der Bearbeitung verfahren und der Lötprozess gestartet. Die Positionierung des Strahlteilers zum Stammblatt ist im Bild 6-5 rechts unten dargestellt.

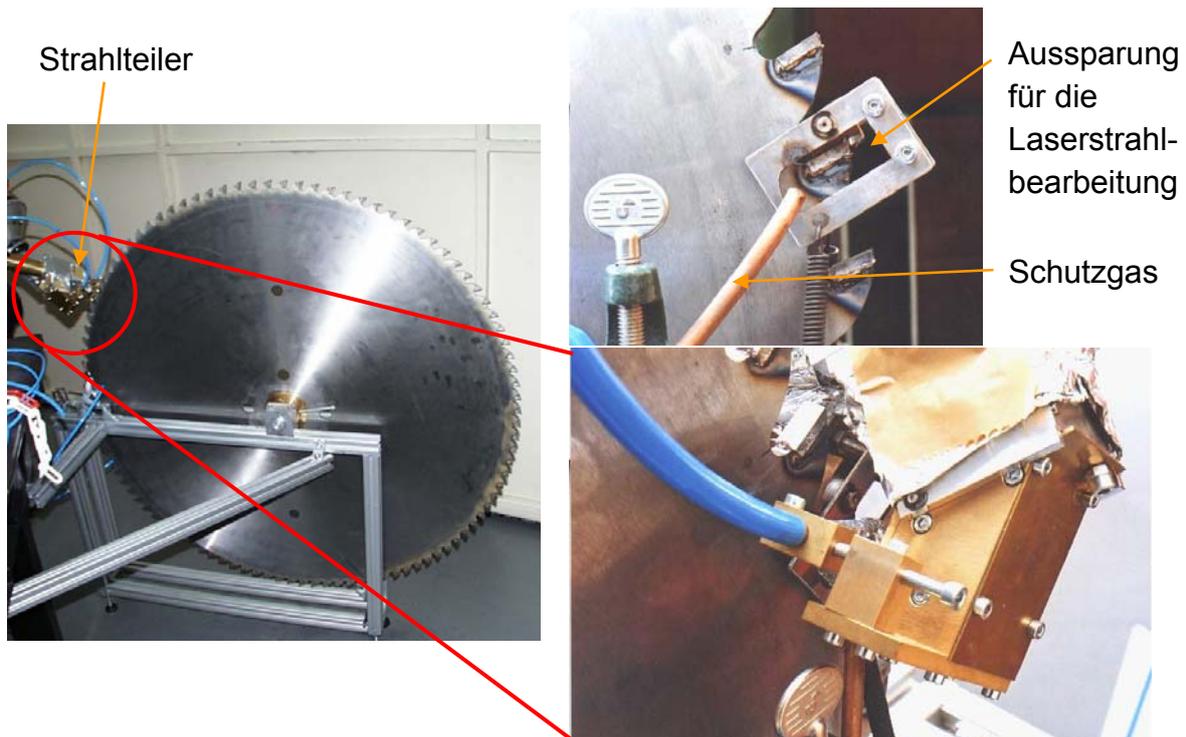


Bild 6-5: Sägeblatthalterung, Spanntechnik und Strahlteiler in der Bearbeitungsposition

6.4 Aufbau einer automatisierten Laserlötmaschine

Als Basis zum Aufbau einer voll automatisierten Laserlötmaschine ausgehend von der Einstrahlvariante 1 wird ein konventioneller, seit Jahren in der Industrie eingesetzter und bewährter Induktionslötautomat verwendet. Diese Einstrahlvariante wurde auf Basis der im Kapitel 8.2.4 dargelegten Ergebnisse gewählt. Die hierbei nötigen Maßnahmen zur Integration eines lasergestützten Prozesses erfordern das Rückrüsten des in der Maschine eingebauten Induktors, die Auslegung des Strahlenganges (in einem 3D-Konstruktionsprogramm), die Positionierung des Laserbearbeitungskopfes und der Umlenkspiegel sowie eine Anpassung der Spannvorrichtung zur Fixierung der Hartmetallschneiden während des Lötprozesses.

Der zum Laserstrahllöten umgerüstete Automat sowie das 3D-Konstruktionsmodell – angefertigt mit dem kommerziell verfügbaren Programm Solid Edge® – der gewählten Laserstrahlführung innerhalb der Maschine sind im Bild 6-6 dargestellt. Das gesamte Lösungskonzept der Strahlführung umfasst die Auskopplung des Laserstrahls aus einer kompakten Laseroptik (der 1-Zoll-Bauröße), die Umlenkung des Laserstrahls über einen Spiegel und die Fokussierung auf die Unterseite der Hartmetallschneide. Besondere Bedeutung kommt hierbei der Zugänglichkeit der Schneide zu. Hierfür wurde die Klemmvorrichtung der Schneide umkonstruiert, so dass sie eine Zugänglichkeit für den Laserstrahl bietet. Deutlich erkennbar ist zudem die enge Laserstrahlführung vorbei an Komponenten des Lötautomaten und am eingespannten Stammbblatt, welches durch den kleinen Spanraum nicht viel Freiraum für die Zugänglichkeit zur Schneide bietet.

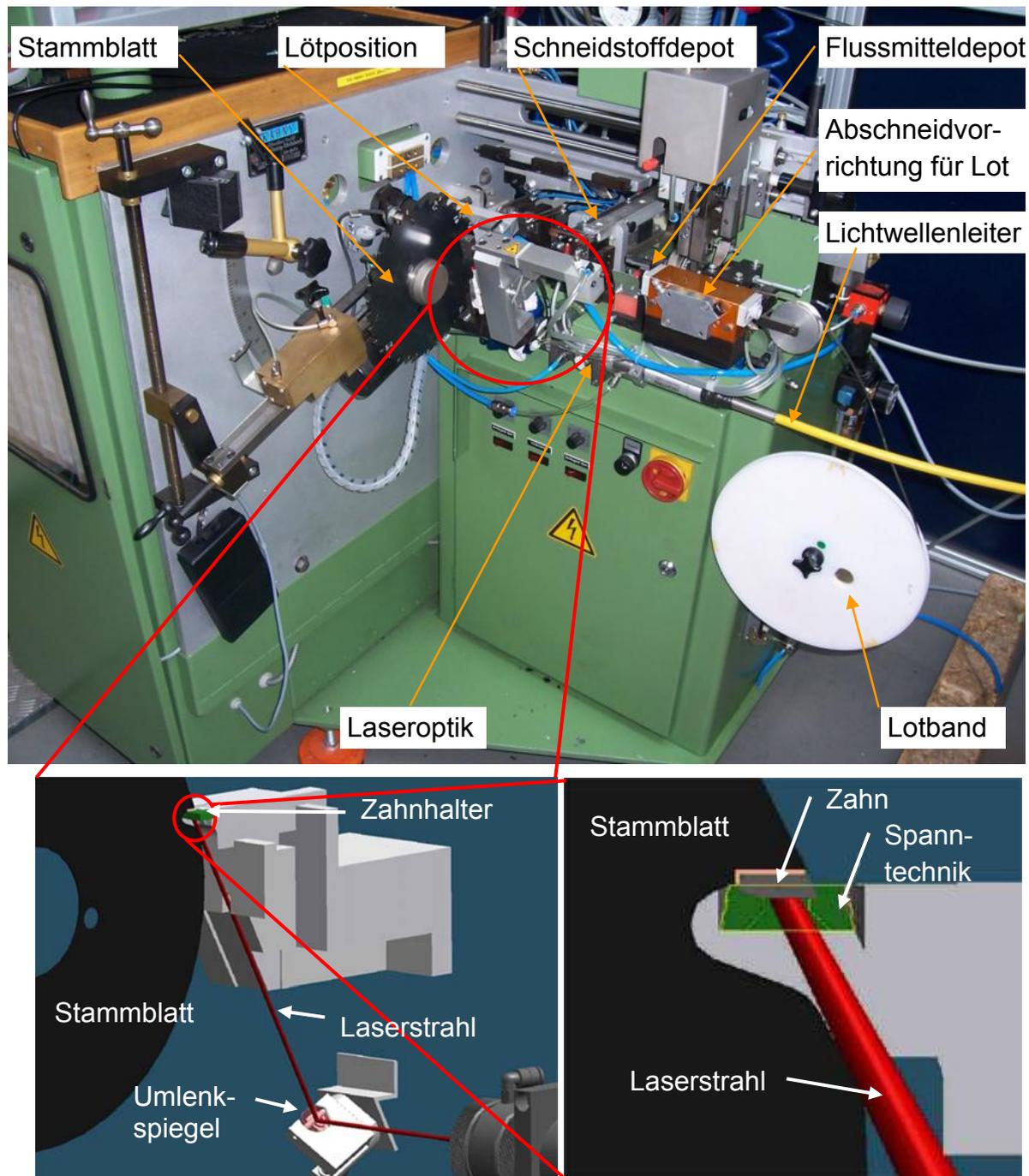


Bild 6-6: Zum Laserstrahllöten umgerüsteter Automat und Laserstrahlführung im Automaten

Durch die gezielte Verkippung des Umlenkspiegels wird ein ovales Profil des runden Brennfleckes eingestellt, um eine möglichst großflächige Bestrahlung der Hartmetallschneide zu erreichen. Die Kollimierbrennweite dieser im Lötautomaten unter einer zusätzlichen Abdeckplatte geschützten Optik beträgt 80 mm und die Fokussierbrennweite 250 mm. Mit einer 400 μm Lichtleitfaser, die den Lötautomaten mit der Laserstrahlquelle verbindet, ergibt sich rechnerisch ein Spotdurchmesser von 1,875 mm im Fokus. Dieser kann durch eine gezielte Defokussierung mittels linearen Verschiebens der Laseroptik in der Halterung an die jeweilige Größe der zu verlötenden Schneidenkontur angepasst werden.

Der durch einen Druckluftquerstrom (Crossjet) vor Verschmutzung geschützte Umlenkspiegel wird über ein Winkelstück und eine Spiegelhalterung der Firma Thorlabs zur wiederholbar präzisen Einstellbarkeit am Gehäuse des Lötautomaten befestigt. Der zu fertigende 1-Zoll-Spiegel verfügt entsprechend dem Bild 6-7 rechts über eine maximale Reflexion im Bereich der Festkörperwellenlängen (940 bis 1150 nm).

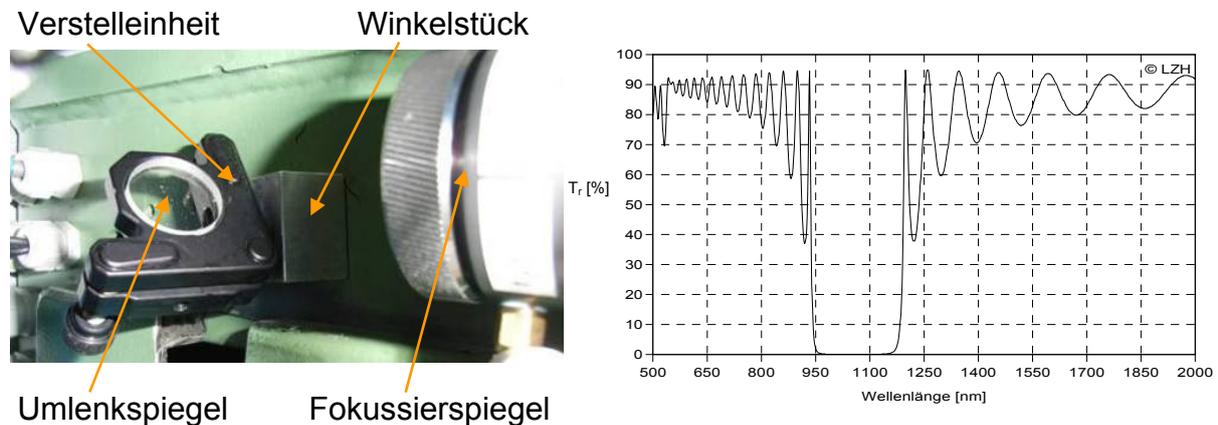


Bild 6-7: Spiegelhalterung im eingebauten Zustand (links) und Reflexionscharakteristik des Umlenkspiegels bei 45° Einstrahlung (rechts)

Die schematische Darstellung der Bestrahlung der Hartmetallschneide, deren Laserbestrahlung und die Funktion der Halteplatten ist im Bild 6-8 verdeutlicht. Weitere Anforderungen an die Zahnhalterung sind der exakte und feste Sitz des Zahnes durch seitliche Kräfte der Spanntechnik sowie eine geeignete Wärmeabführung und niedriger Verschleiß.

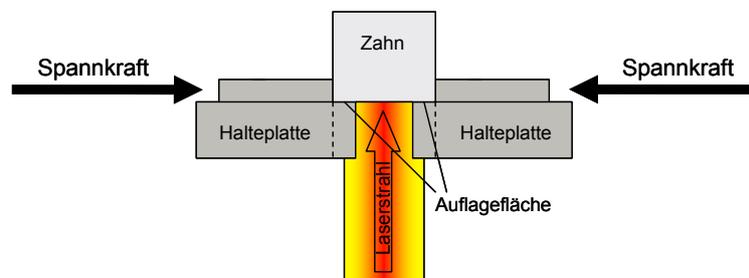


Bild 6-8: Haltevorrichtung mit aufliegender Hartmetallschneide

Das Material der Halteplatten wurde als Hartmetall ausgeführt. Die Vorteile dieses gewählten Hartmetalls sind eine sehr geringe Benetzbarkeit mit Lot, eine hohe Temperaturstabilität sowie geringer Verschleiß.

Die weiteren erforderlichen Anpassungen am Lötautomaten sehen eine Einbindung der Laserstrahloptik in den Kühlkreislauf des Automaten sowie eine Ansteuerung der Laserstrahlquelle durch den Automaten vor. Ferner wurde ein zusätzlicher Sicherheitsschalter in das Bedientableau integriert, der die maschinenseitige Ansteuerung des Laserprozessverschlusses erst nach expliziter Freigabe durch den Anlagenbediener ermöglicht.

6.5 Prozessbeobachtung und -regelung

Die Bestimmung der während des Lötens und beim Abkühlen vorliegenden Temperatur-Zeit-Verläufe erfolgt durch berührungslose Temperaturmessung mittels Pyrometrie. Hierbei kommen Quotientenpyrometer der Firma Maurer zum Einsatz. Ein Quotientenpyrometer erfasst die Intensität der Wärmestrahlung bei zwei diskreten Wellenlängen und bildet aus den Messwerten einen Quotienten. Ein werkstoff- und temperaturabhängiger Emissionskoeffizient wird dadurch weitgehend eliminiert, so dass innerhalb des angegebenen Temperaturbereiches nach einmaligem Abgleichen keine Kalibrierung mehr erforderlich ist. Das Ausgangssignal dieser Pyrometer ändert sich nicht, wenn Störeinflüsse wie Rauch (bsp. verdampfendes Flussmittel), Schwebstoffe etc. auftreten [127].

Das Pyrometer in Messposition A detektiert bei allen Varianten der Lasereinkopplung die Temperatur ($\vartheta_1(t)$) im Übergangsbereich zwischen dem Stammblatt, dem Lot und der Schneidenfreifläche (vgl. Bild 6-9). Das Pyrometer in Messposition B detektiert die Temperatur ($\vartheta_2(t)$) im jeweiligen Laserauftreffpunkt. Hierzu wird bei der Einstrahlvariante 1 über einen Umlenkspiegel stationär die laserbestrahlte Oberseite des Sägezahn und bei der Einstrahlvariante 2c der seitliche Laserauftreffpunkt durch Mitbewegen des Messpunktes pyrometrisch erfasst. Bei der Einstrahlvariante 3 fallen die Messpunkte der beiden Pyrometer fast zusammen, so dass in diesem Fall nur das Pyrometer in Messposition A verwendet wird.

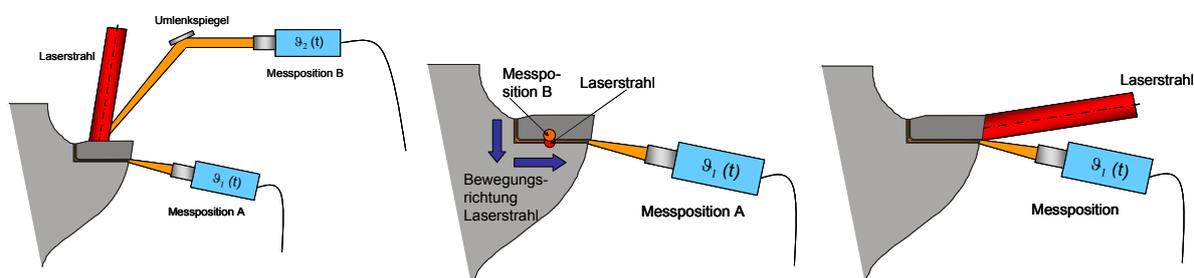


Bild 6-9: Prinzipskizze der Temperaturerfassung und -regelung der Einstrahlvarianten 1, 2c und 3 (von links nach rechts)

Es wird erwartet, dass an der Messposition A während des Lötprozesses ein Wärmestau auftritt, da hier die Energie nicht in das Bauteil abfließen kann. Dieser Messpunkt wird somit anlagenseitig als Regelpunkt zur Steuerung des Lötprozesses verwendet.

Im direkten Laserauftreffpunkt erweist sich die Temperaturmessung für die Einstrahlvariante 2c nur unter Tolerierung größerer Messwertschwankungen ($\pm 100^\circ\text{C}$) als durchführbar. Ursächlich für dieses Verhalten werden inkonstante Messbedingungen erachtet. Im Laserauftreffpunkt verläuft die Schmelzlinie des Lotes, und es entstehen ständige Änderungen des Adsorptionsgrades für Laserstrahlung. Neben der Änderung des Aggregatzustandes treten hier auch ein Verlaufen von Lot und Flussmittel sowie ein Verdampfen des Wasseranteils im pastösen Flussmittel auf, was sich allerdings durch die Verwendung des Quotientenpyrometers nicht auf das Messergebnis auswirken sollte. Eine Verlagerung des

Pyrometermessfleckes um einige Millimeter auf die Schneidoberfläche (ca. 4/5 des Messfleckdurchmessers), wie bereits in der mittleren Darstellung im Bild 6-9 zu sehen, verhindert die beschriebene Symptomatik der Messwertschwankung. Die Messpunktverlagerung hat auf die Regelgeschwindigkeit keinen messbaren Einfluss.

Bei dem im Rahmen dieser Arbeit gebauten Laserlötautomaten detektiert das Pyrometer in der Messposition B über einen weiteren fest am Lötautomaten montierten Spiegel das Temperaturverhalten im Auftreffpunkt des Laserstrahls auf der Hartmetallschneide. Der Umlenkspiegel wird durch einen Crossjet und ein Schutzglas vor Verschmutzung geschützt. Werden optische Elemente, wie z. B. Umlenkspiegel, die eine Schwächung des Signals hervorrufen, im Messstrahlengang positioniert, so muss auch das Quotientenpyrometer kalibriert werden. Da die optischen Elemente unterschiedlich große Anteile der beiden Messwellenlängen reflektieren, ergibt sich daraus ein Messfehler. Um dem vorzubeugen, erfolgt die Kalibrierung mit dem verwendeten optischen System auch unter Berücksichtigung der vorhandenen Winkel. Der daraus bestimmte Korrekturfaktor wird anschließend zur Umrechnung der Messwerte in Realtemperaturen eingesetzt.

Die eingesetzten Pyrometer verfügen über unterschiedliche Messbereiche, so dass am Messpunkt A der Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und 900°C sowie am Messpunkt B der Temperaturbereich von 600 bis 1600°C detektiert werden kann.

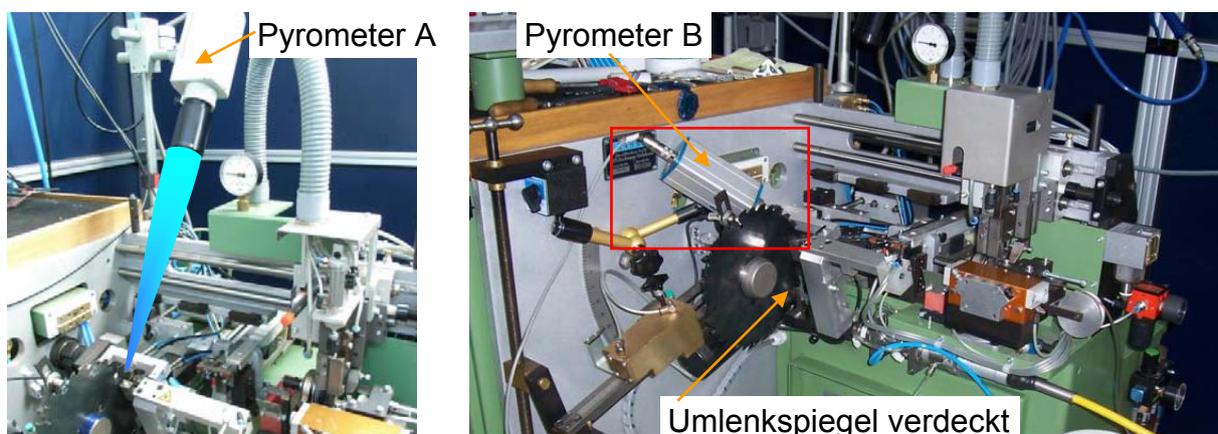


Bild 6-10: Temperaturerfassung im Bereich der Lötzone an der vorderen Kante des Sägeblattes (links, Messposition A) und Temperaturerfassung am Auftreffpunkt des Lasers (rechts, Messposition B)

Beide Pyrometer verfügen über eine Varioptik mit Laserpilotlichtjustierung. Die Varioptik ist in einem Brennweitenbereich zwischen 180 mm und 250 mm einstellbar, wobei der Messfleck einen Durchmesser von etwa 3 bis 5 mm aufweist. Für die Temperaturregelung im Messpunkt A wird der gemessene Temperaturwert als Signal an einen Prozessrechner mit integrierter Mess- und Regelsoftware TemCon[®] mit einem Messtakt von $f_{Mt} = 1$ kHz übergeben. Aus einem Vergleich der gemessenen Ist-Temperatur mit der eingestellten Soll-Temperatur ergibt sich eine Regelabweichung, welche während der gesamten Prozessdauer möglichst nahe Null sein soll. Um die ermittelte Regelabweichung zu kompensieren, wird vom Software-

PID-Regler ein Stellsignal in Form einer Spannung abgegeben, welches die Laserleistung als Stellgröße regelt.

6.6 Äußere Lötnahtbewertung

Im Anschluss an jede Lötung werden die Verbindungen und der angrenzende Grundwerkstoff einer optischen Analyse gemäß DIN EN 12799 [128] Abschnitt 4 (Sichtprüfung) unterzogen, um unmittelbar Erkenntnisse über das Optimierungspotenzial zu erlangen. Dieses grundlegendste und allgemein gebräuchlichste Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung betrifft die äußerlichen Qualitätskriterien der von Flussmitteln und Flussmittelrückständen gereinigten Verbindungen. Visuell erfasst werden hierbei die Form und Ausbildung sowie die Fehlerfreiheit der Lötzone. Die Tabelle 6-2 fasst die sich aus der Norm ergebenden Prüfpunkte und die zur Erfüllung der Fügeaufgabe gesetzten Kriterien zusammen.

Tabelle 6-2: Prüfpunkte nach DIN EN 12799 Abschnitt 4 [128]

Prüfpunkt	Bewertungskriterium
nicht geschmolzener Zusatzwerkstoff	nicht zulässig
geschmolzener, aber nicht eingeflossener Zusatzwerkstoff	nicht zulässig
nicht vollständig gefüllte / unvollständige Kehle (Kehlnaht)	nicht zulässig
Überschuss an Zusatzwerkstoff	zulässig
Riss im Zusatzwerkstoff	nicht zulässig
Riss im Grundwerkstoff (Grenzflächenriss)	nicht zulässig
Riss in der Übergangszone	nicht zulässig
Querrisse in der Hartlötverbindung	nicht zulässig
Oberflächenporen	nicht zulässig
Flussmitteleinschlüsse, die oberflächlich erkennbar sind	nicht zulässig
fehlerhafte Positionierung der Fügeteile	nicht zulässig

Aufschluss über die Wärmeverteilung im Stammblatt kann als weiterer Prüfpunkt die Ausbildung von Anlassfarben geben. Sind diese bei einem blanken – d. h. nicht verzünderten oder brünierten – Stammblatt nicht zu erkennen, kann dies ein Hinweis auf eine zu geringe Arbeitstemperatur sein. Ist die Wärmeeinflusszone nur im vorderen Teil des Passsitzes ausgeprägt, deutet dies auf eine nicht ausreichende Wärmeleitung im Bereich der kleinen Achse des Lötspaltes bzw. im Eckbereich der großen und kleinen Achse des Lötspaltes hin. Ein großflächiges Verlaufen von Lot auf dem Stammblatt sowie eine Kupferfärbung des Lotes durch Aufschmelzen der Lotzwischenlage kann als ein Indiz für zu hohe Temperaturen und / oder eine zu lange Lötzeit gesehen werden. Die Spaltfüllung und die Ausbildung einer Hohlkehle gibt Aufschluss über den richtigen Lötspalt und eine korrekte Andrückkraft.

Anhand einer Lötung der Sägeblattgeometrie der lfd. Nr. 1 nach Tabelle 5-1 mit einem gutem Lötergebnis sollen einige Auffälligkeiten näher beschrieben und einige Charakteristika der Lötnaht diskutiert werden. Die Probe wurde mit einer Laserleistung von $P_L = 200 \text{ W}$ gelötet, wobei die Lötzeit $t_{L\text{öt}} = 2,0 \text{ Sekunden}$ betrug. Im Bild 6-11 ist diese Lötnaht von beiden Seiten dargestellt, und die Nahtunterseite wird in einer Vergrößerung hervorgehoben.

Das Lot ist vollständig verlaufen und bildet eine symmetrisch ausgeformte Naht, die einer vollständig gefüllten Hohlkehle entspricht. Zudem benetzt das Lot Übergänge zwischen den Fügepartnern. Es sind visuell keine Stellen erkennbar, die auf Bindefehler schließen lassen. Das überflüssige Lot ist zu einem geringen Teil über den Rand der Fügekontur gelaufen. Diese optische Auffälligkeit stellt jedoch keinen Mangel dar, da diese Flächen im nachgeschalteten Schärffprozess geschliffen werden.

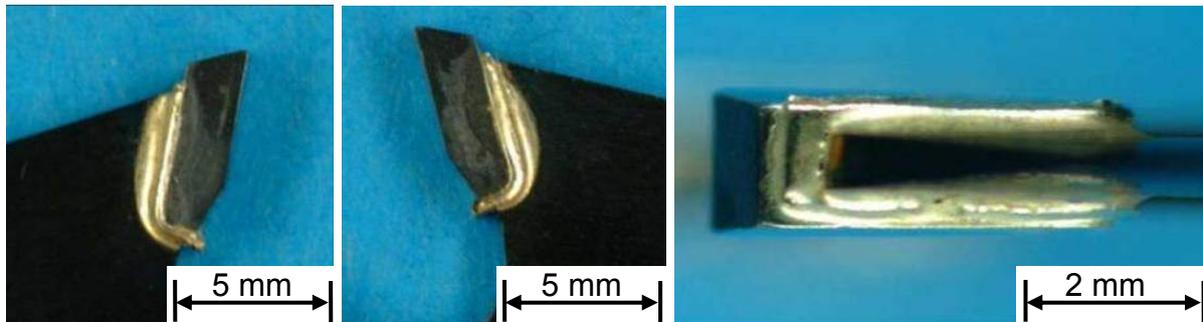


Bild 6-11: gereinigte Lötstelle von links, rechts und von unten; 2,0 Sekunden Lötzeit bei 200 W Diodenlaserleistung, Einstrahlvariante 1

Diese Ausbildung der Lötzone stellt das Ziel bei der Ermittlung prozessesseitiger Bestparameter dar.

6.7 Statische und dynamische Prüftechnik

6.7.1 Metallographie und Härteprüfung

Die metallographischen Untersuchungen erfolgen an polierten Querschliffen, welche mit zweiprozentiger Salpetersäure angeätzt werden. Durch diese Anätzung ist es möglich, das Gefüge zu charakterisieren sowie die Grenzen von Wärmeeinflusszone und Grundwerkstoff zu bestimmen. Anhand dieser präparierten Proben erfolgt ergänzend zur DIN EN 12799 eine Prüfung nach DIN EN ISO 18279, Bewertungsgruppe C [129]. Die Tabelle 6-3 stellt – geordnet nach den jeweiligen Prüfpunkten und in Abhängigkeit von der mittleren bzw. höchsten Bewertungsgruppe, die zulässigen Grenzen zusammen.

Tabelle 6-3: Prüfpunkte nach DIN EN ISO 18279 [129]

Benennung der Unregelmäßigkeit	Bewertungsgrenzen der Bewertungsgruppen	
	Mittlere B	Höchste C
Riss	nicht zulässig	nicht zulässig
Gaseinschluss, Gaspore, große Gasnester	maximal 30% der projizierten Fläche	maximal 20% der projizierten Fläche
Oberflächenpore	maximal 20% der projizierten Fläche zulässig, wo die Funktion der Verbindung nicht nachteilig beeinflusst wird	nicht zulässig
Oberflächenblase	zulässig	nicht zulässig
Feststoffeinschluss	maximal 30% der projizierten Fläche	maximal 20% der projizierten Fläche
Bindefehler	maximal 15% der nominell hartgelöteten Fläche, und die Funktion der Verbindung wird nicht nachteilig beeinflusst	maximal 10% der nominell hartgelöteten Fläche, und die Funktion der Verbindung wird nicht nachteilig beeinflusst
Füllfehler	70% und mehr der projizierten Fläche sind mit Lötgut gefüllt, und die Funktion der Verbindung wird nicht nachteilig beeinflusst	80% und mehr der projizierten Fläche sind mit Lötgut gefüllt, und die Funktion der Verbindung wird nicht nachteilig beeinflusst
unvollständiger Durchfluss	zulässig, wo die Funktion der Verbindung nicht nachteilig beeinflusst wird	nicht zulässig
Lötgutüberlauf	zulässig	nicht zulässig
Kantenversatz, Winkelversatz, Verzug	zulässig, wo die Funktion der Verbindung nicht nachteilig beeinflusst wird	zulässig, wo die Funktion der Verbindung nicht nachteilig beeinflusst wird
lokales Aufschmelzen	nicht zulässig	nicht zulässig
Anschmelzen der Oberfläche des Grundwerkstoffs	nicht zulässig	nicht zulässig
Anlösen	die nominelle Werkstoffdicke ist um nicht mehr als 15% reduziert	die nominelle Werkstoffdicke ist um nicht mehr als 10% reduziert
eingefallenes Lötgut/ Hohlkehle	zulässig, wo die Funktion der Verbindung nicht nachteilig beeinflusst wird	zulässig, wo die Funktion der Verbindung nicht nachteilig beeinflusst wird
raue Oberfläche	zulässig	nicht zulässig
unzureichende Hohlkehle	zulässig, wo die Funktion der Verbindung nicht nachteilig beeinflusst wird	nicht zulässig
unregelmäßige Hohlkehle	zulässig, wo die Funktion der Verbindung nicht nachteilig beeinflusst wird	nicht zulässig
Ausblüfung	zulässig, wo die Funktion der Verbindung nicht nachteilig beeinflusst wird	nicht zulässig
Spritzer	zulässig, wo die Funktion der Verbindung nicht nachteilig beeinflusst wird	zulässig, wo die Funktion der Verbindung nicht nachteilig beeinflusst wird
Verfärbung/ Oxidation	zulässig	zulässig, verfärbte Zonen müssen jedoch entfernt werden

Ergänzend hierzu wird die Härteprüfung zur Bewertung der Verbindungseigenschaften herangezogen. Da die Laserlötung gegenüber konventionellen Lötungen nur geringe Abmessungen der Wärmeeinflusszonen besitzt, wird die Härteprüfung nach Vickers mit einer niedrigen Prüflast von $0,2 \text{ N/mm}^2$ angewendet ($HV_{0,2}$). Auf diese Weise kann im Querschliff der Abstand der Härteeindrücke zueinander auf bis zu $0,2 \text{ mm}$ abgesenkt werden. Es werden jeweils mehrere Prüflinien abgefahren, welche durch unterschiedlichen Abstand zum Passsitz der Hartmetallschneiden gekennzeichnet sind.

6.7.2 Abscherversuche

Das wesentliche Maß für die Güte einer Lötverbindung ist ihre Scherfestigkeit, da nur sie – eventuell in Verbindung mit der ermittelten Scherdehnung – Aussagen über das

Verhalten gelöteter Bauteile unter Belastung geben kann. Die Scherfestigkeit ergibt sich aus der Scherkraft bezogen auf den Anbindungsquerschnitt, der bei allen Proben je Sägeblatt und Schneidentyp gleich ist. Für die Abscherversuche werden die gelöteten Stammbblätter in eine ihrer Kontur angepasste Abschervorrichtung eingespannt (Bild 6-12, Mitte). Mit Hilfe der Universalprüfmaschine Testa U10 (Bild 6-12, links) der Firma Wolpert Ludwigshafen, Typ 440.0008, Baujahr 1971, mit einer Höchstkraft von 100 kN, wird die Prüfkraft durch einen Abscherdorn aufgebracht (Bild 6-12, rechts). Dieser Dorn wird speziell für die Kontur der verwendeten Zähne angefertigt und ermöglicht das Aufbringen der Scherkraft senkrecht auf die gesamte Nebenfreifläche der Hartmetallschneide. Die Scherkraft wird so lange gesteigert, bis die Hartmetallschneide aus dem Plattensitz abschert oder ein Bruch auftritt. Über eine zu der Universalprüfmaschine gehörende Steuer- und Auswerteinheit (DOLI, München) werden die aufgebrachte Kraft sowie der dazugehörige (Scher)-Weg aufgezeichnet. Diese Messdaten zeigen die maximale Belastbarkeit der Fügestelle an. Die Ergebnisse sind ein Indikator für die Summe aller Einflüsse des Designs der Fügepartner sowie des Lötprozesses und sind dadurch geeignet, die Lötqualität quantitativ darzustellen.

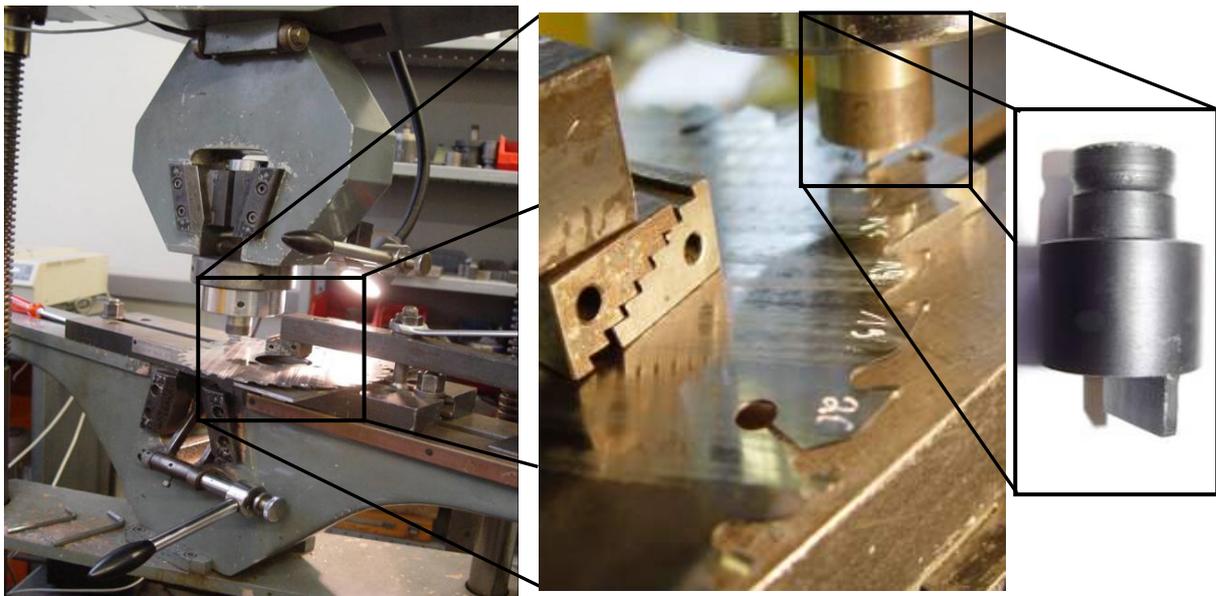


Bild 6-12: links: Gesamtansicht des Abscherverprüfstandes
 Mitte: eingespanntes Sägeblatt während der Prüfung
 rechts: angepasster Abscherdorn

Das Kraft-(Scher-)weg-Diagramm ermöglicht die Ermittlung der benötigten Kennwerte. Für eine weitere Begutachtung der Bruchfläche wurden die abgescherten Hartmetallzähne gesammelt und registriert. Die Begutachtung der abgescherten Zähne und deren Bruchflächen lassen weitere Aussagen über die Qualität der Lötstellen zu. Ein Bruch in der Kupferzwischen-schicht des Lotes gilt als perfekt ausgeführte Lötung, da das Kupfer die geringste Festigkeit aller Komponenten des Werkstoffverbundes aufweist. Brüche an den Werkstoffübergängen, oder im Stammbblatt oder im Schneidenwerkstoff hingegen deuten auf fehlerbehaftete Lötungen hin.

6.7.3 Schneidversuche

Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit werden verschiedene Sätze von lasergelöteten Kreissägeblättern mit Hilfe einer automatischen Kreissägemaschine der Firma Altendorf in einem nicht genormten Verfahren auf ihre Praxistauglichkeit getestet. Bei diesem Verfahren werden von einem Zerspanwerkstoff kontinuierlich dünne Streifen abgeschnitten. Die technischen Daten der hierfür genutzten Maschine sind in der Tabelle 6-4 zusammengefasst. Die Maschine ermöglicht neben den Einstellung von Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit auch die Vorwahl der durchzuführenden Schnitte, so dass je nach Länge der Zerspanwerkstoffe die Anzahl der so genannten laufenden Meter Schnittlänge (lfm) eingestellt werden kann.

Tabelle 6-4: Technische Daten der Versuchsmaschine für Schneiduntersuchungen

Type:	Altendorf F-90
Drehzahl:	300 U/min bis 7.000 U/min stufenlos regelbar
Vorschubgeschwindigkeit:	5 m/min bis 30 m/min stufenlos regelbar
Werkzeugdurchmesser:	200-400 mm
Schnitthöhe:	40 mm
Antriebsleistung:	5,5 kW

Als Zerspanwerkstoffe werden Versuchsholzplatten mit einer Dicke von 20 mm und einer Kantenlänge von 800 mm eingesetzt. Sie bestehen für die erste Versuchsserie aus Eichevollholz und für die zweite Serie aus beidseitig melaminbeschichteter Spanplatte. Die Spanplatte zeigt keinen erkennbar erhöhten Sandanteil. Von diesen Platten werden stets 2 mm breite Streifen abgesägt. Die genannten Zerspanwerkstoffe sind übliche Testwerkstoffe zur Untersuchung neuer Schneidstoffe, aber auch bei der Qualitätssicherung für Kreissägeblätter aus der Serienfertigung.

Sägeblätter mit einem Durchmesser größer 400 mm können in der betrachteten Maschine nicht getestet werden. Die lasergelöteten Sägewerkzeuge mit einem Durchmesser von 1150 mm werden alternativ in der Produktion direkt im Sägewerk getestet.

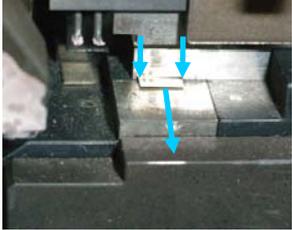
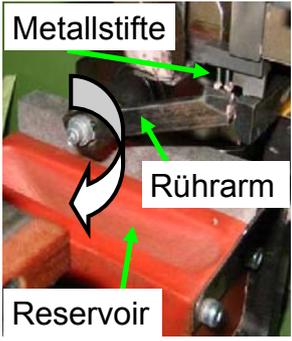
7 Versuchsdurchführung und Verfahrensablauf

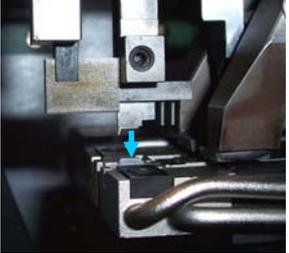
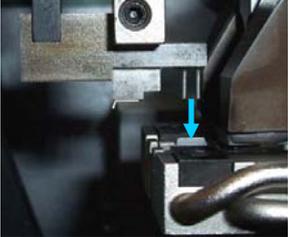
Für die Lötversuche werden Stammbblätter mit den Geometrien nach Tabelle 5-1 verwendet. Die Konturen der Stammbblätter werden mit einer Laserschneidanlage aus den Blechwerkstoffen ausgeschnitten. Anschließend werden die Passsitze für die Hartmetallschneiden durch Fräsen auf die Endkontur nachgearbeitet. Die hierbei vereinzelt entstehenden Grate werden vor Beginn der Lötungen mittels Schlichten entfernt, da sie zu undefinierten und eventuell vergrößerten Fügespalten führen bzw. die Flächenberührung der Fügepartner verhindern. Keine oder nur fehlerhafte Anbindungen können hieraus resultieren.

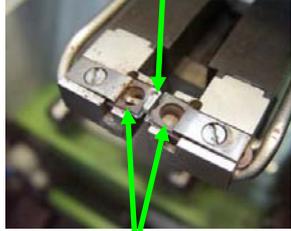
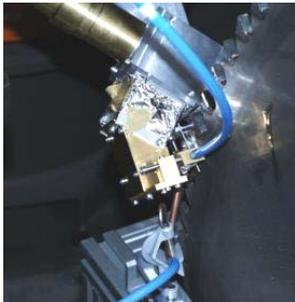
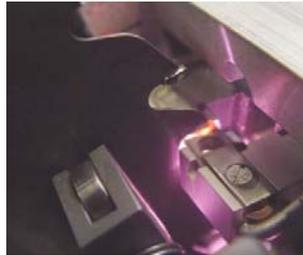
Um die Stammbblätter vor Korrosion zu schützen, werden sie analog zur Serienfertigung eingefettet und in der Folge im Bereich der Fügestelle kurz vor Beginn der Lötversuche mit Aceton gereinigt, um die für den Lötprozess erforderliche fettfreie Oberfläche zu gewährleisten. Ebenfalls werden die Lotformteile und Hartmetallschneiden mit Aceton gereinigt.

In der Tabelle 7-1 sind die Arbeitsschritte des für die Machbarkeitsstudie angewendeten Handlötens (linker Teil der Tabelle) und des im Automaten umgesetzten automatisierten Lötens (rechter Teil der Tabelle) gegenüber gestellt. Die unbeschrifteten Pfeile in den Abbildungen der rechten Tabellenspalte verdeutlichen die Bewegungsrichtung der einzelnen Maschinenkomponenten.

Tabelle 7-1: Beschreibung und Darstellung der Arbeitsschritte zur Verbindung einer Stahl-Hartmetall-Werkstoffpaarung (links: Handlötens, rechts: maschinelles Lötens mit dem umgerüsteten Automaten)

Beschreibung der Fertigungsschritte	Abbildung - Handlötung	Beschreibung der Fertigungsschritte	Abbildung – automatisiertes Lötens
<ul style="list-style-type: none"> - Entfernen von Graten - Reinigen der Fügepartner mittels Aceton 		<ul style="list-style-type: none"> - Bauteil reinigen und entgraten - Abscheren eines Stückes des Lotbandes 	
<ul style="list-style-type: none"> - dünnes und gleichmäßiges Bestreichen des Passsitzes am Stammbblatt mit Flussmittel 		<ul style="list-style-type: none"> - Aufnehmen von Flussmittel aus dem Reservoir und Übertragen des Flussmittels auf Metallstifte 	

Beschreibung der Fertigungsschritte	Abbildung – Handlötung	Beschreibung der Fertigungsschritte	Abbildung – automatisiertes Löten
<ul style="list-style-type: none"> - Abtrennen und präzises Ablängen eines Stückes des Lotbandes - Formen einer L-Kontur aus dem Lotband entsprechend der Fügekontur - Auflegen des Lotformteiles auf den mit Flussmittel bestrichenen Passsitz 		<ul style="list-style-type: none"> - Abwinkeln des Lotblattes - Greifen des Zahnes aus dem Förderband - Ablegen in der Spannvorrichtung und Benetzen des Zahnes mit Flussmittel 	
<ul style="list-style-type: none"> - dünnes und gleichmäßiges Bestreichen des Lotformteiles mit Flussmittel 		<ul style="list-style-type: none"> - Ablegen des Lotblattes auf der Hartmetallschneide 	
<ul style="list-style-type: none"> - Reinigen der Hartmetallschneide mittels Aceton - Auflegen der Hartmetallschneide auf das mit Flussmittel bestrichene Lotformteil 		<ul style="list-style-type: none"> - Benetzen der Hartmetallschneide mit Flussmittel 	

Beschreibung der Fertigungsschritte	Abbildung – Handlötung	Beschreibung der Fertigungsschritte	Abbildung – automatisiertes Löten
<ul style="list-style-type: none"> - Ausrichten der Hartmetallschneide mittig auf dem Stammbblatt - Aufsetzen der Spannvorrichtung zum Aneinanderdrücken der Fügekomponenten - Ausrichten der Lötenschutzgaszuführung 		<p>Positionieren der Spannvorrichtung mit fixierter Hartmetallschneide, des Lotblattes und des Flussmittels zum Stammbblatt</p>	<p>Hartmetallschneide</p>  <p>Spanntechnik</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Positionierung der Laseroptik zur Fügestelle - Einschalten der Laserstrahlquelle - Verfahren des Laserstrahls entlang der Fügekontur mittels CNC-Programmablauf (hier dargestellt Löten nach Variante 2a) 		<ul style="list-style-type: none"> - Starten des Laserlötvorganges (hier dargestellt: im Automaten umgesetzte Variante 1 der Strahleinkopplung) 	

Nach Abschluss des Lötvorganges befinden sich Rückstände von ausgetretenem und reagiertem Flussmittel an der Lötstelle. Diese Rückstände sind hygroskopisch und können Korrosionsschäden hervorrufen. Dementsprechend wird als letzter Fertigungsschritt bei beiden Verfahren die Fügestelle durch Abbürsten oder Sandstrahlen gereinigt.

8 Ergebnisse und Diskussion

Die Einflussgrößen auf den Laserstrahl­lötprozess können in

- Strahl- und Prozessparameter,
- Werkstückparameter sowie
- Werkstoffparameter

eingeteilt werden. Während die beiden letzteren durch die in Tabelle 5-1 gegebenen und verwendeten Fügepartner festgelegt sind, ist die Wahl geeigneter Strahl- und Prozessparameter Ausgangspunkt zur Beeinflussung der Lötzone und ihrer mechanisch-technologischen Eigenschaften.

Die für den Laserstrahl­lötprozess relevanten Strahl- und Prozessparameter stellen sich wie folgt dar:

- Laserleistung,
- Wellenlänge,
- Fokussierung,
- Brennweite,
- Fokusslage (Grad der Defokussierung),
- Einstrahlwinkel,
- Lötgeschwindigkeit sowie
- Flussmittel (Art, Applikation, Menge).

Die Strahleigenschaften hinsichtlich Strahlqualität und Polarisation haben für das Laserstrahl­löten eine untergeordnete Bedeutung, da wesentlich geringere Energiedichten in der Strahl-Stoff-Wechselwirkungszone als z. B. beim Schweißen benötigt werden. Vorteilhaft ist aber eine Glättung des Intensitätsprofils, damit zu hohe Energiedichten oder Leistungsspitzen im Laserauftreffpunkt vermieden werden.

Den verschiedenen Wellenlängen können hinsichtlich ihrer Absorption am Werkstoff unterschiedliche Laserlöteignungen attestiert werden. Fundierte Kenntnisse über den Einfluss dieses Parameters auf das Lötergebnis sind Grundbedingung für die Auswahl der Laserstrahlquelle hinsichtlich der Verwendung in einer automatisierten Anlage.

Von zentraler Bedeutung für die Ausbildung einer kraftübertragenden Lötverbindung ist das Erreichen und definierte Halten der Lot- und Flussmittelarbeitstemperatur über den gesamten Bereich der Lötzone. Zur Festlegung dieses Parameters werden detaillierte thermographische und pyrometrische Untersuchungen zur Bestimmung des Temperaturregimes in dieser Zone durchgeführt.

8.1 Einfluss der Strahlparameter auf das Temperaturregime der Lötzone

Mittels einer auf den Emissionskoeffizienten von Hartmetall kalibrierten thermographischen Kamera (ThermCAM 1000) werden verschiedene Laserstrahlauftreffpunkte auf der Schneidenoberfläche untersucht. Ziel ist es, den Einfluss auf den Prozess der durch den Laser in einem sehr kurzen Zeitintervall verursachten hohen Temperaturgradienten zu bestimmen. Entscheidend für ein fundiertes Prozessverständnis ist die Kenntnis der Temperaturverteilung an der Oberfläche des Schneidstoffes sowie der Wärmeleitung innerhalb des Schneidstoffes bis zur Fügezone. Diese Parameter in Kombination mit dem schmelzenden Zusatzwerkstoff lassen dem Laserauftreffpunkt und der Brennfleckgeometrie eine hohe Bedeutung zukommen. Nach Auswertung der mittels Wärmebildkamera aufgenommenen Videosequenzen und der daraus ableitbaren Temperaturverteilungen kann der Ort der Wärmeeinbringung in Relation zur Brennfleckgeometrie für die weiteren Versuche festgelegt werden.

Die zu untersuchenden Lötungen der Einstrahlvariante 1 werden mit einem stehenden und durch Defokussierung an die Größe der Schneidenoberfläche von ca. 3 mm Durchmesser angepassten Nd:YAG-Laserstrahlbrennfleck durchgeführt. Hierbei kann festgestellt werden, dass bei der Einstrahlvariante 1 bei einer Positionierung des Lasers auf das vordere Drittel der Schneide (vgl. Bild 8-1, linkes Bild) ein Wärmestau in diesem Bereich verursacht wird. Die Temperatur des hinteren Schneidendrittels liegt dabei unterhalb der Arbeitstemperatur des Lotes (690°C). Folglich lässt dieser Bereich keine kraftübertragende Verbindung zwischen Stahl und Hartmetall erwarten. Ein analoges Ergebnis liefert die Positionierung des Laserstrahls auf der Mitte der Schneide (vgl. Bild 8-1 zweites Bild von Links). Im hinteren Teil des Sägezahns wird ebenfalls in Folge des höheren Wärmeabflusses durch die zusätzliche Stammbblattkontaktfläche der kurzen Achse des Lötspaltes die Arbeitstemperatur nicht erreicht.

Die Positionierung des Laserstrahls auf das hintere Drittel der Schneide erzielt die gewünschte gleichmäßige Wärmeverteilung über die gesamte Fügegeometrie. Dargestellt ist im Bild 8-1 (zweites Bild von rechts) die Wärmeverteilung 0,1 Sekunden nach Einschalten der Laserstrahlquelle sowie im rechten Bild die Wärmeverteilung 0,5 Sekunden später. Deutlich erkennbar ist eine ausreichende Lötwärme im gesamten Bereich der Fügezone sowie eine gleichmäßige Erwärmung nahezu in der gesamten Schneide. Dieser Laserauftreffpunkt wurde für die weiteren in dieser Arbeit verlöteten Schneidengeometrien verifiziert und wird in der Folge für die gesamten Lötungen in Einstrahlvariante 1 genutzt.

Lediglich im direkten Laserauftreffpunkt ist zum Erreichen der für die gesamte Lötverbindung benötigten Temperatur ein Überhitzen der Oberfläche unumgänglich. Im Rahmen der weiteren Untersuchungen ist daher festzustellen, bis zu welchem Grad dies ohne nennenswerte Beeinträchtigung der Schneidstoffeigenschaften toleriert werden kann.

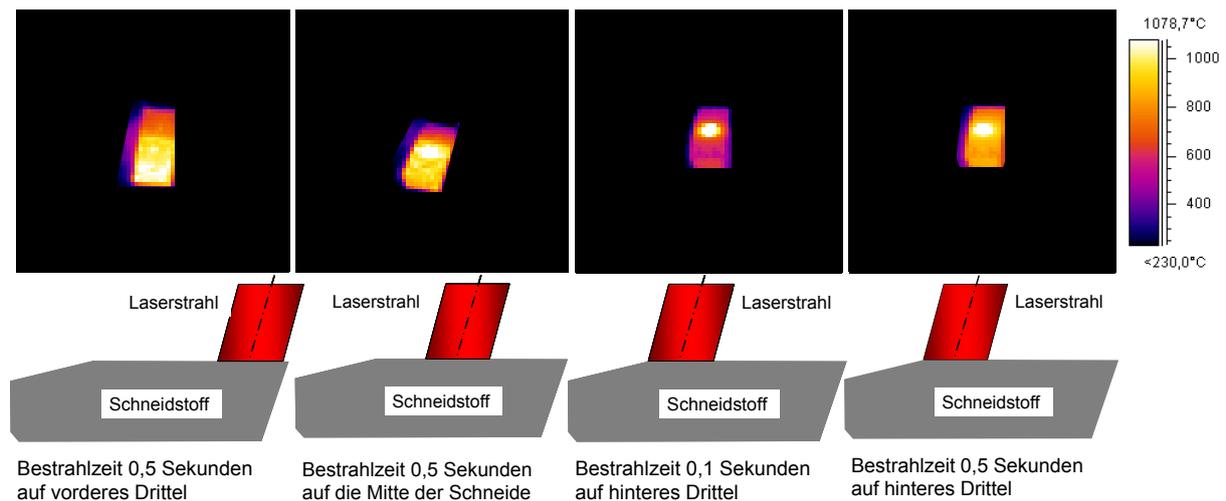


Bild 8-1: Thermographie des Erwärmungsvorganges bei verschiedenen Laserauftreffpunkten nach Einstrahlvariante 1

Die thermographische Untersuchung der Einstrahlvariante 2 ergibt ein ähnliches Ergebnis. Durch die Bewegung des Laserstrahls über der Fügekontur wird im Gegensatz zur Einstrahlvariante 1 der wärmste Bereich entlang des Lötspaltes geführt. Im Bereich des Laserauftreffpunktes kommt es jedoch ebenfalls zu leichten lokalen Überhitzungen in der direkten Laserstrahl-Werkstoff-Wechselwirkungszone.

Besonders ausgeprägt sind die Überhitzungen bei der Einstrahlvariante 3, ähnlich der linken Abbildung im Bild 8-1. Thermographisch erfasst werden hierbei kurzzeitige Erwärmungen der gesamten Schneidenspitze bis über 1200°C .

8.2 Bewertung der Löteignung unterschiedlicher Erwärmkonzepte

Im Rahmen dieser Untersuchungen wird die Eignung der unterschiedlichen Einstrahlvarianten und damit einhergehenden Erwärmkonzepte unter Berücksichtigung der Variation der Laserstrahlquelle bewertet.

Auf Basis der Ergebnisse wird schließlich die Wahl des Konzeptes für den Aufbau des Laserlötautomaten zum vollständig automatisierten Löten durchgeführt (vgl. Kapitel 8.2.4). Mit diesem zu bauenden Laserlötautomaten werden ab Kapitel 8.3 alle weiteren dargestellten Untersuchungen durchgeführt.

8.2.1 Löteignung des Lasers bei Bestrahlung der Spanfläche

Gestützt durch die im Folgenden dargelegten experimentellen Ergebnisse kann dem der Einstrahlvariante 1 zugrunde liegenden Erwärmkonzept für jede der verwendeten Laserstrahlquellen eine Eignung zum Löten von Stahl und Hartmetall attestiert werden. Grundlegende Unterschiede sind im Bereich der Grundwerkstoffbeeinflussung und zugeführten Laserleistung sowie der erforderlichen Lötzeit zu verzeichnen. Im Bild 8-2 sind die Lötresultate der Bestparameter (Ausbildung einer fehlerfreien Lötzone hinsichtlich DIN EN ISO 18279, Bewertungsgruppe C [129], und der DIN EN 12799, Abschnitt 4 [128], beim Einsatz der jeweils geringsten Laserleistung und minimalsten Lötzeit) gegenübergestellt. Prüfpunkte der ver-

gleichenden Darstellung in Abhängigkeit von der verwendeten Laserstrahlquelle stellen hierbei mögliche Lötunregelmäßigkeiten wie z. B. Risse, Oberflächenporen und Bindefehler sowie die Ausbildung der Lötnaht, die Ausdehnung der Wärmeeinflusszone im Stammbblatt und die thermische Beeinflussung der Fügekomponenten dar.

Im Anschluss an jede Lötung werden die Proben mit einer weichen Bürste gereinigt, um nicht – wie bei einem sonst üblichen Sandstrahlprozess – die Farbgebungen der Wärmeeinflusszonen zu entfernen. Hierdurch bleiben jedoch Reste des reagierten Flussmittels auf den Proben zurück, die sich durch lokale dunkle Farbschattierungen zeigen.

Alle dargestellten Proben zeichnen sich durch die Ausbildung einer lokal eng begrenzten Wärmeeinflusszone im Bereich des gesamten Lötspaltes aus. Insbesondere der Eckbereich des Lötspaltes ist durch eine ausreichende Wärmezufuhr gekennzeichnet. Das Lot ist in alle Bereiche des Lötspaltes vollständig geflossen und bildet am Übergang vom Hartmetall zum Stammbblatt die geforderte Hohlkehlkontur. Die Farbgebung des Lotes lässt auf eine dem Werkstoff und insbesondere der Kupferzwischenlage angepasste Temperatur schließen, da keine kupferartige Verfärbung durch Aufschmelzen der Zwischenlage erkennbar ist. Im Hartmetall der Schneide sind mittels Lichtmikroskop visuell keine Risse oder Ausbrüche feststellbar. Lediglich in der direkten Laserstrahl-Schneidstoff-Wechselwirkungszone sind Veränderungen der Oberflächenstruktur und eine bläuliche Farbgebung zu beobachten. Eine bläuliche Verfärbung der Schneidstoffoberfläche kann auf das Austreten von elementarem Kobalt hinweisen. Letzteres sowie die Veränderungen der Oberflächenstruktur sind im weiteren Verlauf differenzierter zu untersuchen bzw. zu minimieren, um mögliche Beschädigungen des Schneidstoffes auszuschließen.

Die Auswertung und Beurteilung der mittels CO₂-Laser gelöteten Versuchsträger (Ifd. Nr. 8 nach Tabelle 5-1) deutet abweichend zu den Ergebnissen für die anderen Strahlquellen auf einen hohen Anteil an reflektierter Laserstrahlung hin.

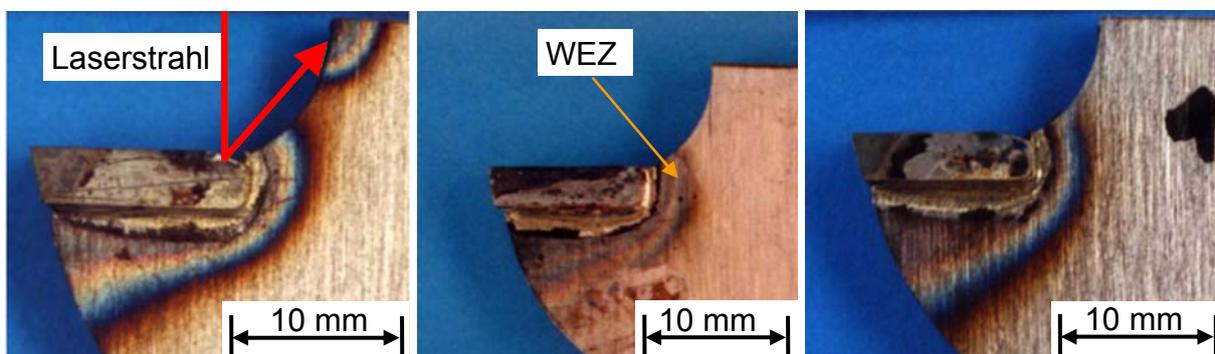


Bild 8-2: Seitliche Ansicht der Fügezonen mittels Einstrahlvariante 1 gelötet
 links: CO₂-Laser (Triagon 6000), $P_L = 1500 \text{ W}$; $t_{L\dot{o}t} = 15 \text{ s}$
 Mitte: Dioden-Laser (DL 015), $P_L = 600 \text{ W}$; $t_{L\dot{o}t} = 15 \text{ s}$
 rechts: Nd:YAG-Laser (CW 020), $P_L = 690 \text{ W}$; $t_{L\dot{o}t} = 15 \text{ s}$

Für die Festkörperlaser in der Gegenüberstellung zum CO₂-Laser zeichnet sich eine um mehr als die Hälfte geringere benötigte Wärmemenge, errechnet aus Laserleistung (P_L) und Lötzeit ($t_{Löt}$), ab. Ursächlich hierfür scheint ein signifikant besserer Absorptionsgrad des Hartmetalls für die kurzwelligen Festkörperlaser zu sein. Gestützt wird dies auch durch die Ausbildung einer zweiten Wärmeeinflusszone oberhalb des Schneidstoffes im Spanraum des Stammblattes lokalisiert. Die rote Pfeildarstellung soll den Weg der reflektierten Laserstrahlung erkennbar machen. Die Winkelverschiebung zwischen in diesem Fall senkrechter Einstrahlung und schräger Reflexion wird durch die Kontur der Schneidstoffoberfläche begründet (Abschrägung im hinteren Drittel der Schneide). Eine ähnlich starke Reflexion kann bei den Festkörperlasern nicht beobachtet werden. Der bei diesen Lasern geringere Teil an reflektierter Strahlung führt zu keinen erkennbaren Bauteilbeeinflussungen durch reflektierte Laserstrahlung.

In Folge der Laserstrahleinwirkung treten in der Laserstrahl-Werkstoff-Wechselwirkungszone visuell erkennbare Beeinflussungen des Schneidstoffes auf. Resultierend aus den thermographischen Untersuchungen kann nachgewiesen werden, dass diese durch lokale Überhitzungen induziert werden. Zu beobachten ist dieser Effekt bei allen verwendeten Laserstrahlquellen. Im Bild 8-3 sind mit den jeweiligen Bestparametern mittels Variante 1 laserstrahlgelötete Schneidenoberflächen der verschiedenen Laser gegenübergestellt. In diesem direkten Vergleich zeigt sich eine signifikante Abhängigkeit der Schädigungsneigung in Bezug auf das jeweilige Lasersystem. In allen Fällen wurde der Brennfleckdurchmesser durch Defokussierung der Schneidenbreite von 8 mm (vgl. lfd. Nr. 8 nach Tabelle 5-1) angepasst. Diese Breite stellt hinsichtlich der im Rahmen dieser Arbeit verlöteten Schneiden die Geometrie dar, bei welcher der Laser am weitesten defokussiert und in der Folge die Leistungsdichte pro Fläche am stärksten abgesenkt werden kann.

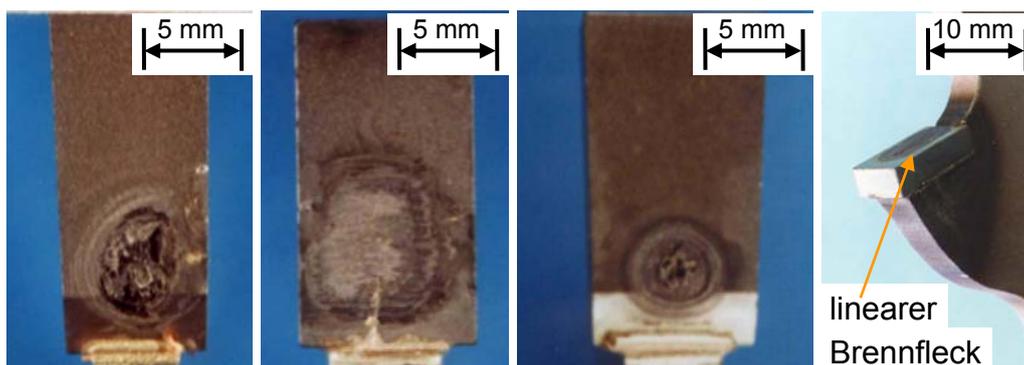


Bild 8-3: 1) Laserauftreffpunkt CO₂-Laser, $P_L = 1500 \text{ W}$; $t_{Löt} = 15 \text{ s}$
 2) Laserauftreffpunkt Dioden-Laser, $P_L = 690 \text{ W}$; $t_{Löt} = 15 \text{ s}$
 3) Laserauftreffpunkt Nd:YAG-Laser, $P_L = 600 \text{ W}$; $t_{Löt} = 15 \text{ s}$
 4) Laserauftreffpunkt Nd:YAG gescannt, $P_L = 850 \text{ W}$; $t_{Löt} = 15 \text{ s}$

Die laserinduzierte Veränderung der Hartmetallschneide ist insgesamt bei den diodenlaserstrahlgefügteten Versuchsträgern im Vergleich zum CO₂- und Nd:Yag-Laser geringer (vgl. Bild 8-3). Weiterhin erscheint das Strahlprofil des Diodenlasers

besser an die Schneidengeometrie, insbesondere die Schneidenbreite, anpassbar. Obwohl vor Versuchsbeginn der jeweilige Laserstrahlsystemtypische Brennfleckdurchmesser mittels Indikatorkarten durch Defokussierung an die Schneidenbreite angepasst wurde, ist visuell beim Diodenlaser eine vergrößerte, aber oberflächlichere Strahl-Schneidstoff-Wechselwirkungszone erkennbar.

Zur Minimierung der beschriebenen Beeinflussung werden weitere Untersuchungen zur Reduktion der Leistungsdichte durchgeführt. Hierfür werden zwei Lösungsansätze gewählt. Beiden Ansätzen gemeinsam ist, dass die für jedes Lasersystem erarbeiteten Parametersätze (Laserleistung und Lötzeit) konstant gehalten werden können.

Der erste Ansatz verformt den Laserstrahlbrennfleck in Richtung einer Ellipse durch Einstrahlung des Lasers unter verschiedenen Winkeln. Die kurze Halbachse der entstehenden Ellipse ist hierbei exakt an die Schneidenbreite angepasst. Die lange Halbachse hingegen wird iterativ über Variation des Einstrahlwinkels an die Schneidenlänge adaptiert. Experimentell bewiesen werden kann, dass unter lichtmikroskopischer Betrachtung die Beeinflussung der Schneidenoberfläche im Einstrahlwinkelbereich von 0° bis 35° geringfügig abnimmt. Oberhalb eines Winkels von 35° treten bei Konstanthaltung der Strahlparameter Anbindungsfehler im Eckbereich der großen und kleinen Achse des Lötspaltes auf, die auf eine zu geringe Löttemperatur in diesem Bereich hindeuten. Gestützt wird diese Aussage zudem durch fehlende Anlauffarben und eine im Schliff nicht erkennbare Wärmeeinflusszone sowie eine fehlende Benetzung des Stammsblattes mit Lot (vgl. Bild 8-4).

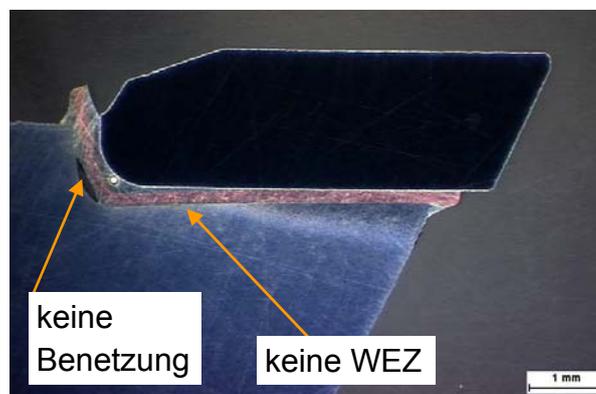


Bild 8-4: Anbindungsfehler im Eckbereich durch zu geringe Löttemperatur, EsV-1

Bei einer Steigerung der Laserleistung kann die Problematik der zu geringen Wärmezufuhr im Eckbereich des Lötspaltes verhindert werden. Die laserinduzierte Beeinflussung der Schneidenoberfläche steigt jedoch dadurch wieder an und es kommt ähnlich dem linken Teil im Bild 8-1 zu lokalen Überhitzungen im Bereich der Schneidenspitze.

Der zweite Ansatz zielt ebenfalls auf eine einachsige Strahlaufweitung. Mittels eines Scannersystems wird der Laserstrahlbrennfleck in Richtung der Schneidenlänge durch Pendeln elliptisch verzerrt und an die Schneidenlänge angepasst. Die experimentellen Untersuchungen zeigen jedoch auch in diesem Fall analoge

Ergebnisse zum zuvor beschriebenen winkligen Einstrahlen. Im rechten Teil im Bild 8-3 sind diese Schneidstoffbeeinflussung und die im vorderen Bereich des Stammblasses großflächigere Wärmeeinflusszone zu erkennen. Der Einsatz eines Scannersystems zum Löten der kreissägebälterttypischen Fügegeometrien erscheint demzufolge nicht vorteilhaft.

8.2.2 Veränderung der Lötresultate bei seitlicher Bestrahlung

Im Zuge der Untersuchungen bei einer seitlichen Laserbestrahlung der Fügezone werden verschiedene Strahl- und Prozessparameter validiert:

- a) sequenzielles (d. h. erst eine, dann die zweite Seite) Löten der Fügekontur ohne Strahlteiler (Einstrahlvariante 2a),
- b) beidseitiges Bestrahlen der Fügezone mittels Strahlteiler unter einem Winkel von ca. 60° (Einstrahlvariante 2b) sowie
- c) beidseitiges Bestrahlen der Fügezone mittels Strahlteiler unter einem senkrechten Winkel. Der Laserstrahl wird hierbei entlang der Fügekontur verfahren (Einstrahlvariante 2c). Durch die Positionierung des Laserstrahls auf dem Versuchsträger kann hierbei die initiale Erwärmung von
 - Stammbblatt und Lot,
 - Hartmetall und Lot
 - bzw. ausschließlich Hartmetall eingestellt werden.

Die resultierende Erwärmung der nicht bestrahlten Fügekontur erfolgt durch Wärmeleitung. Eine ausschließliche Erwärmung des Lotes ist mit keinem Strahl- und Prozessparameter umsetzbar, da dies eine Fokussierung des Laserstrahls auf einen Brennfleck, welcher der Dicke des Lotformteils (ca. 0,4 mm) entspricht, erfordert. Die resultierende hohe Energiedichte in diesem Punkt führt zu einem unerwünschten Aufschmelzen der Kupferzwischenschicht.

a) Die sequenzielle Lötung ohne Strahlteiler durch aufeinander folgende Bestrahlung erst von einer Seite der Lötzone und im Anschluss von der anderen Seite (Einstrahlvariante 2a) führt mit allen Laserstrahlquellen zum Ausbilden einer Verbindung. Visuell erkennbar sind bei diesen Lötungen teilweise sehr stark ausgeprägte Werkstoffbeeinflussungen. Eine Bewegung des defokussierten Laserstrahls auf den Fügepartnern führt zu einer geringen Reduktion dieser Beeinflussungen. In der Folge treten bei der Wahl der Strahlage auf dem Stahl des Stammblasses in diesem Bereich nicht tolerierbare Anschmelzungen der Oberfläche auf. Diese Anschmelzungen können bei gesteigerten Streckenenergien die Ausbildung von unerwünschten Wärmeleitungsschweißnähten verursachen.

Die Strahlagenwahl auf dem Schneidstoff führt zu geringeren Wärmeeinflusszonen im Stammbblatt, die den Lötungen der Variante 1 mit einer Strahleinkopplung im Bereich der Schneidoberfläche entsprechen. In Abhängigkeit der zugeführten Leistung entsteht jedoch eine lokale Verbrennung der Schneidstoffoberfläche. Im Bild 8-5 sind, nach der Laserstrahlquelle geordnet, mit den jeweiligen Bestparametern

gelötete und mittels Sandstrahlen gereinigte Versuchsträger dargestellt. Die Reinigung durch Sandstrahlen entfernt oberflächlich die Wärmeeinflusszonen, lässt im Gegenzug aber die Bauteilbeeinflussungen deutlicher hervortreten. Im Bild 8-5 rechts sind die Nachteile dieser sequenziellen Lötungen erkennbar. Zu sehen sind die Schädigungen des Hartmetalls, welche visuell erkennbar beim Nd:YAG-Laser am stärksten ausgeprägt sind.

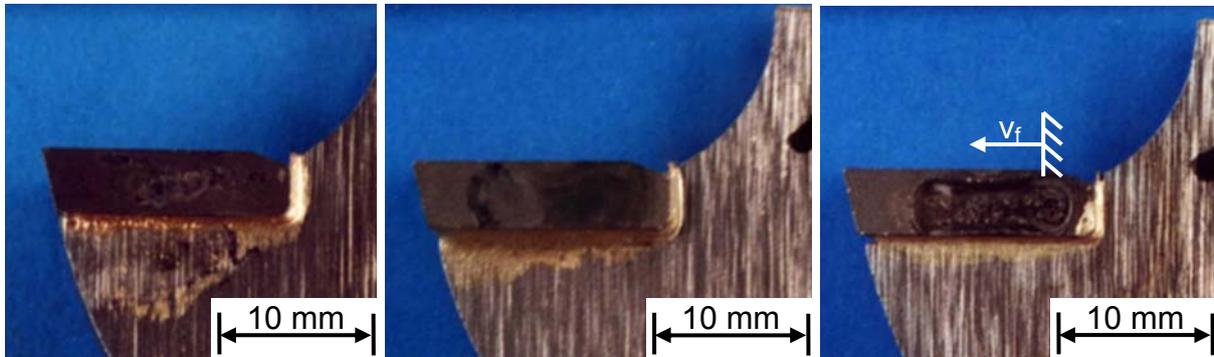


Bild 8-5: Seitliche Ansicht sequenziell mittels Strahlbewegung und unterschiedlicher Laser gelötet, EsV-2a, Einstrahlzone auf Hartmetall,
links: Lötzone CO₂-Laser (Triagon6000), $P_L = 1600 \text{ W}$; $t_{L\ddot{o}t} = 20 \text{ s}$
Mitte: Lötzone Dioden-Laser (DL 015), $P_L = 560 \text{ W}$; $t_{L\ddot{o}t} = 18 \text{ s}$
rechts: Lötzone Nd:Yag-Laser (CW 020), $P_L = 560 \text{ W}$; $t_{L\ddot{o}t} = 20 \text{ s}$

Unabhängig von der verwendeten Laserstrahlquelle treten bei dieser Variante auch bei einer nicht direkten Bestrahlung und nur indirekten Erwärmung des Lotes Aufschmelzungen der Kupferzwischenlage auf. Ursächlich hierfür ist eine verfahrensbedingt erforderliche gesteigerte Wärmezufuhr: Für die Lötung der zweiten Seite muss der in der Mitte der Fügezone befindliche Teil der Lötung wieder geschmolzen werden, damit ein homogener Übergang zwischen den beiden Erstarrungsfronten des Lotes erzielt werden kann. Weiterhin wird bei der ersten Erwärmung der Fügekontur auch im noch nicht gelöteten Teil der Verbindung das Flussmittel entweder schon aktiviert oder unterhalb der Aktivierungstemperatur das pastöse Mittel ausgetrocknet. Resultierend werden für die zweite Lötung nicht optimale Verhältnisse geschaffen, die eine Benetzung der Grundwerkstoffe mit Lot erschweren. Weiterhin muss nahezu die gesamte Fügekontur zweimal erwärmt werden, wodurch erhöhte Prozesszeiten bzw. erhöhte Laserleistungen unabdingbar werden.

Zusammengefasst kann dem sequenziellen Verfahren eine Löttauglichkeit attestiert werden. Dieses Verfahren ist jedoch durch erhöhte Prozesszeiten und Bauteilbeeinflussungen gekennzeichnet.

b) Das beidseitige Bestrahlen der Fügezone mittels Strahlteiler unter einem Winkel von 60° (Einstrahlvariante 2b) basiert auf den bereits gewonnenen Ergebnissen über die Löttauglichkeit der unterschiedlichen Strahlquellen: Da der CO₂-Laser bei der sequenziellen Lötung signifikant erhöhte Laserleistungen benötigt und eine Bauteilschädigung bewirkt, wird der entwickelte und gebaute Strahlteiler ausschließlich für Festkörperlaser ausgelegt. Die beiden Brennfleckdurchmesser der

Teilstrahlen werden mittels Defokussierung auf einen Durchmesser von ca. 5 mm eingestellt. Durch Anordnung der beiden Laserauftreffpunkte in einer Achse quer zum Stammbblatt (d. h. auf beiden Seiten ist die horizontale und vertikale Lage der Einzelfoki identisch) wird eine exakt gleiche Erwärmung der Fügepartner auf beiden Bauteilseiten gewährleistet. Unter dem gewählten Einstrahlwinkel von 60° (Variante 2b) ergibt sich ein stark elliptischer Brennfleck (ca. 5×9 mm für die Sägeblattgeometrie, lfd. Nr. 8 nach Tabelle 5-1), der gezielt kürzer als die lange Achse des Lötspaltes eingestellt wird, um eine Überhitzung der vorderen Ecke des Zahns bzw. des hier befindlichen Stammbblattanteils zu verhindern.

Die Positionierung dieses elliptischen Brennflecks auf dem Stammbblattwerkstoff erzeugt analog zu den Versuchen mit sequenzieller Lötung oberflächliche Anschmelzungen des Stammbblattes. Durch die Wahl der Brennflecklage im Schneidstoffbereich und im Übergangsbereich Lot / Stammbblatt ist eine Vermeidung der Stahlbeeinflussung umsetzbar. Auf Grund der besseren Wärmeleitungs-eigenschaften des Hartmetalls (ca. 80 W/(mK)) gegenüber dem Stammbblattstahl ($14 - 60 \text{ W/(mK)}$) findet ein Aufheizen der Hartmetallschneide über das gesamte Volumen statt, wodurch die Wärme besser über die Lötzone verteilt wird.

Während dieser Lötungen kann nach ungefähr der Hälfte der Lötzeit in dem vom Brennfleck überdeckten Teil der Hartmetallschneide ein schwaches Glühen verzeichnet werden. Dieses Glühen wird bis zum Ende der Lötzeit stetig heller und dehnt sich aus, wobei es jedoch nicht die gesamte Schneide erfasst. An den Stellen, wo während des Lötprozesses kein Glühen zu erkennen ist, ist bei der anschließenden Sichtkontrolle kein verlaufenes Lot festzustellen. Es kann davon ausgegangen werden, dass an diesen unvollständig benetzten Stellen die Arbeitstemperatur nicht erreicht worden ist (vgl. Bild 8-6 links).

Längere Lötzeiten und / oder erhöhte Laserleistungen können dieses Problem beheben, führen jedoch zu lokal begrenzten Einbränden in die Hartmetallschneide. Der Ort der Einbrände ist hierbei in dem Bereich erkennbar, wo sich durch das schräge Einstrahlen der Abstand zwischen Laserauftreffpunkt und Laseroptik verkürzt. Die Begründung hierfür ist, dass dort durch das Abbildungsverhältnis mehr Laserleistung je Fläche zur Verfügung steht. Teilweise werden jedoch auch bei erhöhter Energiezufuhr einzelne Bereiche mit nicht vollständiger Anbindung detektiert (vgl. Bild 8-6 rechts).

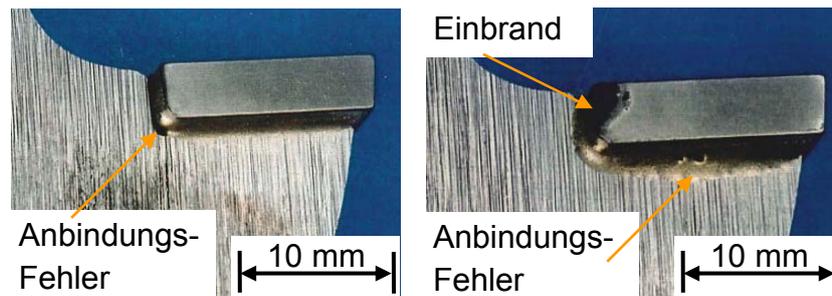


Bild 8-6: Seitliche Ansicht mittels Strahlteiler und 60° Winkel gelötet, EsV-2b, Bauteilreinigung mittels Sandstrahlen
 links: Lötzone Nd:YAG-Laser (CW 020), $P_L = 900 \text{ W}$; $t_{L\ddot{o}t} = 7 \text{ s}$
 rechts: Lötzone Nd:YAG-Laser (CW 020), $P_L = 900 \text{ W}$; $t_{L\ddot{o}t} = 20 \text{ s}$

Als ursächlich für diesen bei gleichen Parametersätzen zufällig auftretenden Effekt werden Bauteiltoleranzen bzw. Lagetoleranzen sowie erhöhter Flussmittelauftrag angesehen, die bei dieser Einstrahlvariante einen ausreichenden Wärmefluss in den entsprechenden Teil des Fügespalt erschweren und in der Folge der lasertypisch kurzen Lötzeit zu nicht ausreichendem Fließen des Lotes führen.

Der mit dieser Einstrahlvariante erarbeitete Parametersatz kann folglich als instabiler Prozess angesehen werden.

c) Bei dem beidseitigen Bestrahlen der Fügezone mittels Strahlteiler und Bewegen der Fokusse über der Fügekontur (Einstrahlvariante 2c) können Lötverbindungen erstellt werden, welche die Anforderungen der Sichtprüfung erfüllen. Die im Bild 8-7 dargestellten Versuchsträger (Sägeblattgeometrie 8 nach Tabelle 5-1) wurden mittels einer Laserleistung von $P_L = 560 \text{ W}$ und einer Lötzeit von $t_{L\ddot{o}t} = 11 \text{ s}$ als Bestparameter gefügt.

Hierbei wird mit dem auf ca. 4 mm (aufgrund der kleineren Schneiden) aufgeweiteten Fokus – beginnend mit der oberen Ecke der Fügekontur – die gesamte Lötzone abgefahren (vgl. Bild 6-2). Die kurze Achse des Lötspaltes stellt hierbei den z-Anteil und die lange Achse des Lötspaltes den y-Anteil der Fügekontur dar. Die Strahlauffreffpunkte werden so eingestellt, dass sich die Mittelpunkte der Brennflecke direkt über dem Lot befinden. Die Bahngeschwindigkeiten innerhalb des z- bzw. des y-Anteils werden konstant gehalten. Die angegebenen Lötzeiten entsprechen der gesamten Verweilzeit des Laserstrahls auf der Fügekontur und dienen dem Vergleich zu den Verfahren mit einem stationären bzw. unbewegten Brennfleck.

Im Zuge der Versuche wurde ermittelt, dass die Vorschubgeschwindigkeiten in z-Richtung um etwa den Faktor 3 niedriger als in y-Richtung sein müssen, damit ein gleichmäßiges Verlaufen des Lotes in der gesamten Fügezone erreicht wird. Als Ursache wird ein während des Prozesses stattfindender Wärmefluss aus der Lötzone in den umgebenden Werkstoff angesehen. Zu Beginn der Lötung, wenn das Werkstück noch kalt ist, fließt ein großer Teil der eingebrachten Energie in das umgebende Stammblattmaterial. In der Folge wird die Arbeitstemperatur nur dann erreicht, wenn durch geringe Vorschubgeschwindigkeiten die eingebrachte Energiemenge groß genug ist. Im weiteren Verlauf des Lötprozesses wärmt sich der

Bereich um die Fügezone zunehmend auf. Daher wird der Verlust durch die Wärmeleitung geringer, so dass die Arbeitstemperatur auch bei schnelleren Vorschüben noch erreicht wird.

Je näher der Brennfleck beim Verfahren in den Bereich der Zahnspitze kommt, desto geringer wird das Volumen des umgebenden Stammblattmaterials. Somit kann die eingebrachte Energie nicht mehr abfließen, wodurch ein Wärmestau in der Zahnspitze entsteht. Resultierend entstehen unerwünscht hohe Temperaturen und großflächigere Wärmeeinflusszonen unterhalb der Zahnspitze im Stammblattbereich. Zudem werden in der Hartmetallschneide Temperaturen von ca. 1200°C erreicht und erzeugen ein Glühen während des Lötprozesses im Bereich der Strahl-Stoff-Wechselwirkungszone, wobei das Auftreten von Temperaturspitzen in der Zahnspitze durch ein helleres Prozessleuchten zu beobachten ist. Um eine starke Überhitzung der Fügezone zu vermeiden, wird daher nur bis 3 mm vor Ende der Zahnspitze verfahren. Die Energie und der Wärmefluss sind ausreichend, um trotzdem eine vollständige Anbindung der Fügepartner zu erzielen.

Eine Veränderung des Schneidstoffes ist bei einer Brennflecklage auf dem Schneidstoff oder mittig über dem Lot nur oberflächlich zu erkennen und entspricht visuell erfassbar dem Aussehen der bei Variante 1 auftretenden Beeinflussungen. Wird die Lage der Brennflecke zu mehr als der Hälfte auf dem Stammblattwerkstoff eingestellt, sind zudem Anschmelzungen des Stammblattstahles erkennbar.

Anhand der Sichtprüfung können den mittels Bestparameter gefügten und im Bild 8-7 dargestellten Versuchsträgern Lötnahtqualitäten attestiert werden, die bis auf lokal begrenzte Anschmelzungen der Kupferzwischenlage den Anforderungen gemäß DIN EN 12799 genügen.

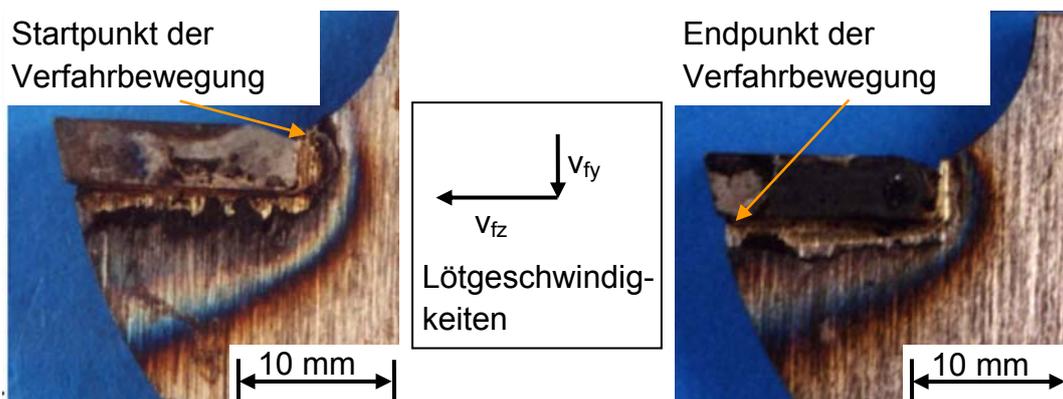


Bild 8-7: Seitliche Ansicht der Lötzone mittels Verfahren des Strahlteilers (EsV-2c) und zwei verschiedenen Lasern gelötet, Strahlzone auf Hartmetall und Lot
 Links: Lötzone Dioden-Laser (DL 015), $P_L = 1400 \text{ W}$; $t_{Löt} = 11 \text{ s}$;
 $v_{fz} = 38 \text{ mm/min}$; $v_{fy} = 130 \text{ mm/min}$
 Rechts: Lötzone Nd:YAG-Laser (CW 020), $P_L = 1400 \text{ W}$; $t_{Löt} = 11 \text{ s}$;
 $v_{fz} = 38 \text{ mm/min}$; $v_{fy} = 130 \text{ mm/min}$

Eine Steigerung der Laserleistung bei Erhöhung des Vorschubs (\approx Konstanthaltung der Streckenenergie) verkleinert die auf der Oberfläche des Stammblattes auftretenden Anlassfarben und Wärmeeinflusszonen im Stahlgefüge, bedingt durch

die kürzeren Lötzeiten. Die der Fügezone zugeführte Energiemenge (bei konstanter Streckenenergie) kann in Folge der werkstoffspezifischen Wärmeleitung bei verkürzter Prozesszeit nicht so weit in das Stamblattgefüge vordringen. Resultierend steht der Lötzone ein vergrößerter Anteil an Energie zur Verfügung, der erhöhte Prozesstemperaturen im laserbestrahlten Bereich bewirkt. Diese Temperatursteigerung führt neben einer verstärkten Anschmelzung der Kupferzwischenlage auch zu einer verringerten Hohlkehlenbildung der Lötnaht. Als ursächlich wird neben einer Verdampfung des Lotes auch eine durch die verfahrensbedingte direkte Erwärmung des Flussmittels von bis zu 500°C oberhalb des vom Hersteller definierten Arbeitsbereichs angesehen. Hierdurch wird die Reaktionsfähigkeit des Flussmittels beeinträchtigt.

Bei der Verfahrensvariante 2c sind Verbindungseigenschaften erzielbar, die den Lötverbindungen der Verfahrensvariante 1 entsprechen. Im Gegensatz hierzu ist allerdings in dem vorderen Bereich des unterhalb des Schneidensitzes befindlichen Stamblattanteils eine vergrößerte Wärmeeinflusszone erkennbar. Außerdem benötigt dieses Verfahren zwar eine geringere Lötzeit, jedoch deutlich erhöhte Laserleistungen. Dies ist vermutlich auf die erhöhte Reflektion von Laserstrahlung durch den Kupferanteil im Lot sowie Verluste an den optischen Komponenten des Strahlteilers, insbesondere der Strahlteilerplatte, zurückzuführen. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist für die Umsetzung dieser Variante im Lötautomaten eine deutlich höhere Investition für die Anlagentechnik erforderlich: Zum einen werden Laserstrahlquellen benötigt, die fast die doppelte Laserausgangsleistung aufweisen, und zum anderen ist in Folge der Verwendung eines Strahlteilers in signifikant aufwendigerer optischer Aufbau erforderlich. Weiterhin benötigt der Laserstrahl eine direkte Zugänglichkeit zur Lötzone und die Komponenten des Strahlteilers nehmen hierbei einen großen Bauraum ein.

8.2.3 Veränderung der Ergebnisse bei Bestrahlung der Hauptfreifläche

Im Bild 8-8 sind mit der Einstrahlvariante 3 gelötete Versuchsträger einander gegenübergestellt. Gekennzeichnet ist diese Einstrahlvariante durch eine ebenfalls präzise einstellbare Menge der zugeführten Energie. Im linken Teil des Bildes ist eine seitliche Ansicht einer Fügezone dargestellt, die mit einer Laserleistung von $P_L = 200 \text{ W}$ in einer Zeit von $t_{\text{Löt}} = 4 \text{ Sekunden}$ gelötet wurde. Im Bereich der kleinen Achse des Lötspaltes ist visuell eine nicht der DIN EN 12799 entsprechende Ausbildung der Fügezone gegeben. Auf Grund zu geringer Wärme kann in diesem Bereich keine ausreichende Benetzung des Stamblattwerkstoffes mit Lot erzielt werden. Eine Steigerung der zugeführten Laserleistung um 100 W bei konstanter Lötzeit führt zur Ausbildung einer Verbindung im gesamten Bereich der Lötzone (vgl. Bild 8-8 Mitte).

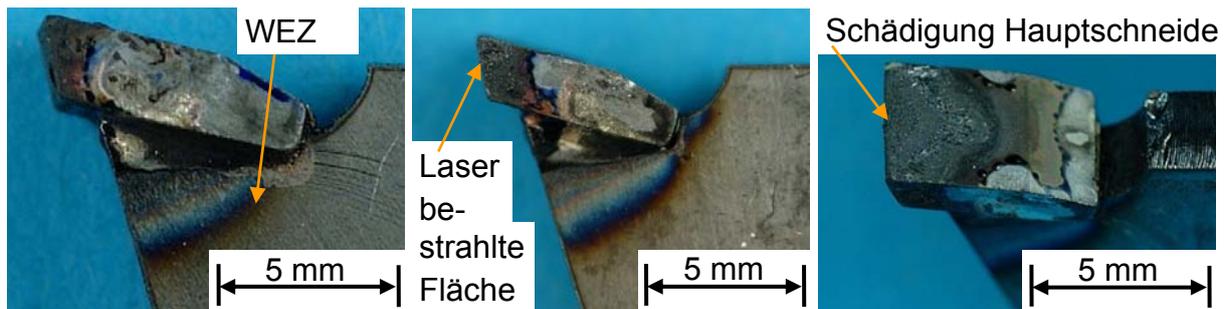


Bild 8-8: Seitliche Ansicht der Fügezonen mittels Variante 3 und Dioden-Laser (LDF 400-650) bei unterschiedlichen Laserleistungen gelötet

Links: Lötzone $P_L = 200 \text{ W}$; $t_{L\dot{o}t} = 4 \text{ s}$

Mitte: Lötzone $P_L = 300 \text{ W}$; $t_{L\dot{o}t} = 4 \text{ s}$

Rechts: Schädigung der Hauptschneide $P_L = 200 \text{ W}$; $t_{L\dot{o}t} = 4 \text{ s}$

Bereits bei der durch nicht genügende Wärmezufuhr gekennzeichneten Probe (200 W, 4 Sekunden) kann im Bereich des unterhalb der vorderen Schneidenspitze befindlichen Stammblattanteils eine gegenüber der Einstrahlvariante 1 und 2c vergrößerte Wärmeeinflusszone visuell erfasst werden.

Außerdem führt der Einsatz des Diodenlasers, welcher sich bei den vorhergehenden Untersuchungen als Laserstrahlquelle mit der geringsten Schneidstoffschädigung qualifiziert hat, bereits zu deutlichen Materialverbrennungen. In der Folge treten bei allen Versuchsträgern ausgeprägte thermische Beschädigungen der so genannten Hauptschneide auf. Auf Grund der Laserbestrahlung werden hier lokale Schneidstoffausbrüche beobachtet. Dieser Bereich des Sägezahns stellt jedoch den im Zerspanprozess am höchsten belasteten Bereich dar und disqualifiziert diese Einstrahlvariante zur Herstellung von lasergelöteten Sägeblättern.

8.2.4 Auswahl der Einstrahlvariante

Die Auswahl der dem Aufbau der voll automatisierten Laserlötmaschine zu Grunde gelegten Einstrahlvariante erfolgt auf Basis der in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Ergebnisse.

Zentrales Ausschlusskriterium für die Anwendung einer Variante ist eine hohe Schädigung des Schneidstoffes, wie sie bei der Einstrahlvariante 3 zu verzeichnen ist. Ebenso ist es erforderlich, dass die Lötnahte den Anforderungen der Analyse gemäß DIN EN 12799 Abschnitt 4, und DIN EN ISO 18279, Bewertungsgruppe C, genügen. Die Varianten 2b und 3 erfüllen diese Anforderungen durch Anbindungsfehler nicht bzw. nicht reproduzierbar.

Im Bild 8-9 sind die Bestparameter (Laserleistung und Lötzeit) in Abhängigkeit von der Einstrahlvariante und der Laserstrahlquelle dargestellt. Die benötigte Laserleistung und die Lötzeit sind hierbei als Produkt zu dem Wert der zugeführten Energie zusammengefasst, um eine direkte Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Einstrahlvarianten zu gewährleisten.

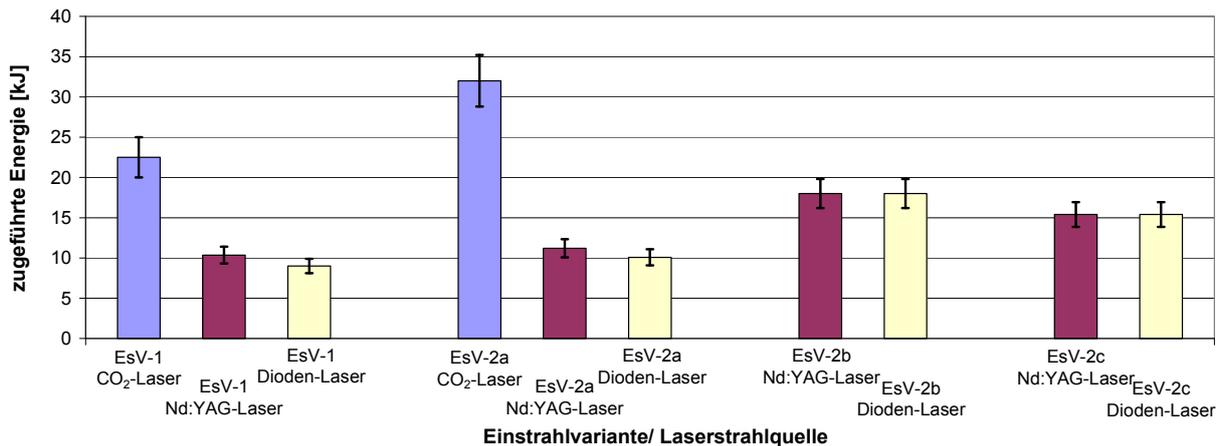


Bild 8-9: Benötigte Energie in Abhängigkeit von der Laserstrahlquelle und der Einstrahlvariante

Die Einstrahlvariante 1 zeichnet sich hierbei neben der bereits im Kapitel 8.2.1 dargestellten geringsten Beeinflussung der Fügepartner (Wärmeeinflusszone und Schädigung des Schneidstoffes) durch die höchste Lötgeschwindigkeit bei geringster benötigter Laserleistung unter Anwendung des Diodenlasers aus.

Weiterhin werden gegenüber den Varianten mit Strahlteiler weniger optische Komponenten benötigt, wodurch der finanzielle Aufwand zum Aufbau der automatisierten Maschine reduziert, und wie – im Kapitel 9.1 dargelegt – die Wirtschaftlichkeit erhöht wird. Die Tabelle 8-1 fasst diese technologischen Unterscheidungskriterien zusammen.

Tabelle 8-1: Technologischer Vergleich der Einstrahlvarianten

Kenngröße / Charakteristik	Einstrahlvariante				
	1	2a	2b	2c	3
Lötgeschwindigkeit	hoch	hoch	hoch	mittel	mittel
Laserleistung	gering	gering	mittel	mittel	mittel
Freiheitsgrad der Wärmezufuhr	gering	gering	gering	gering	gering
Wärmebeeinflussung des Stammbblattwerkstoffes	gering	mittel	mittel	mittel	mittel
Beeinflussung / Schäden des Schneidstoffes	gering	gering	hoch	gering	sehr hoch
Sichtprüfung nach DIN EN 12799 Abschnitt 4 und DIN EN ISO 18279 Bewertungsgruppe C	erfüllt	erfüllt	nicht zulässig	erfüllt	nicht zulässig
Variabilität und Anpassung des Prozesses an weitere Sägeblattgeometrien	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Erforderlicher Schutz der Optikkomponenten vor Prozessemissionen	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Baugröße der optischen Komponenten	gering	gering	hoch	hoch	gering
Umfang / Kosten der benötigten optischen Komponenten	gering	mittel	hoch	hoch	gering

Da der Diodenlaser beim direkten Vergleich die beste Lötlegung zeigt, kommt dieser in der Lötmaschine zum Einsatz. Durch die Wahl des Lasers LDF 400-650 wird ein faserführbarer Diodenlaser für die Kopplung mit der automatisierten Laserlötmaschine verwendet. Die Führung der Laserstrahlung in einer Lichtleitfaser ermöglicht eine getrennte Aufstellung von Lötmaschine und Laserstrahlquelle.

Weiterhin ist die Führung der Laserstrahlung in einem Lichtwellenleiter technisch einfacher realisierbar als über Spiegelsysteme. Hierdurch entfallen der Schutz des Strahlengangs und des Spiegelsystems vor Verschmutzung sowie aufwendige Justierarbeiten der Spiegeleinheiten.

Auf der Basis der geringsten benötigten Energie und der geringsten Bauteilschädigung bei gleichzeitiger Erfüllung aller gestellten Anforderungen an die Lötverbindung wird für den Aufbau der automatisierten Laserlötmaschine die Einstrahlvariante 1 mit dem Diodenlaser gewählt.

8.3 Einfluss der Temperaturregelung auf den Lötprozess

Zur Optimierung des Wärmeflusses wird der Lötprozess mit zwei Pyrometern überwacht und geregelt (vgl. Abschnitt 6.5). Als Solltemperatur am Regelpunkt (Messposition A) wird 690°C , gemäß den Herstellerspezifikationen des Lotarbeitspunktes, eingestellt. Als Einstellung der Auswertungssoftware Temcon[®] wird ein proportionaler Anteil der Verstärkung (P-Anteil = 0,012) mit geringer zeitlicher Integration der Regelabweichung (I-Anteil = 0,1) und geringer Differenzierung (D-Anteil = 0,025) als Parametersatz mit den optimalen Regeleigenschaften bestimmt. Der Regelbeginn wird 25°C unterhalb der Solltemperatur gesetzt, um eine möglichst gleichmäßige Temperatur am Regelpunkt zu erzielen.

Als Temperaturobergrenze am Laserauftreffpunkt (Messposition B) wird 1000°C gewählt, da diese Temperatur unterhalb der maximal im Spanprozess an der Schneide lokal auftretenden Temperaturen (1100°C bis 1200°C) liegt [41, 42] und folglich vom Schneidstoff toleriert wird.

In einem unregelmäßigen Prozess wird nach dem Einschalten der Laserstrahlquelle zunächst die Schneidoberfläche durch Laserstrahlung lokal erhitzt. Durch Wärmeleitung verteilt sich die zugeführte Energie schnell über die gesamte Schneide. Bei dem im Bild 8-10 exemplarisch für die Einstrahlvariante 1 dargestellten Temperaturverlauf ist dieser 0,5 Sekunden dauernde Prozess nicht erkennbar, da das Pyrometer bzw. der nachgeschaltete Auswertungsrechner an der Messposition A erst nach einer Temperaturerhöhung an dieser Stelle mit der Datenaufnahme beginnt.

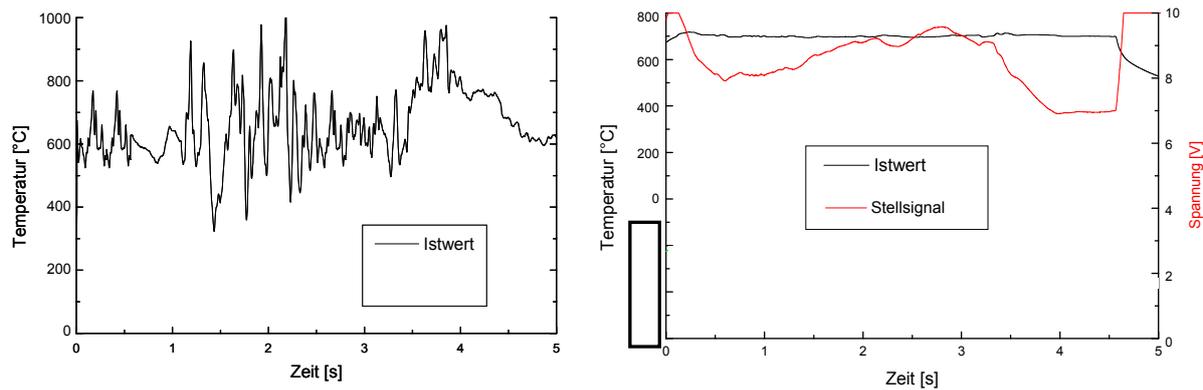


Bild 8-10: Temperaturverlauf eines unregulierten Prozesses, Dioden-Laser (DL 015) $P_L = 600 \text{ W}$; $t_{L\ddot{o}t} = 5 \text{ s}$ (links) und eines geregelten Prozesses Dioden-Laser (DL 015) $P_L = 700 \text{ W}$, Solltemperatur 690°C ; $t_{L\ddot{o}t} = 4,5 \text{ s}$ (rechts)

Bei unverändert intensiver Laserbestrahlung gewinnt in der zweiten Phase des Lötvorganges die Wärmeleitung aus der Schneide über die Lötzone in tiefer gelegene Bauteilbereiche größere Bedeutung. Insbesondere durch Verdampfen des Flussmittels und Schmelzen des Lotes ist hierbei aber ein schwankender Temperaturverlauf im Messschrieb (im Bild 8-10 links) zu verzeichnen. Im letzten Teil des Lötprozesses, in diesem Beispiel ab ca. 4 Sekunden, ist das Flussmittel verdampft und das Lot vollständig geschmolzen, so dass sich die Lötwärme gleichmäßig im Bauteil ausbreiten kann und die Diffusionsvorgänge stattfinden können. In dieser Phase verläuft die Temperaturkurve ziemlich gleichmäßig. Nach Abschalten der Laserstrahlung kühlt die Fügekontur nahezu linear auf Raumtemperatur ab.

Im direkten Vergleich zeigt der Temperaturverlauf eines geregelten Lötvorganges einen gleichmäßigeren Verlauf. Nach Erreichen des Grundstellwertes, im Bild 8-10 rechts bei 665°C , beginnt der Regelprozess. Die Regelsoftware steuert die Laserstrahlquelle über das Stellsignal, um die gewählte Solltemperatur von 690°C zu erzielen. Der resultierende Temperaturverlauf bzw. die -abweichung vom Sollwert ist hierbei im Vergleich zu einem unregulierten Prozess sehr gleichmäßig bzw. gering. Störgrößen wie verdampfendes Flussmittel oder schmelzendes Lot haben nur einen geringen Einfluss auf das Temperaturverhalten. Nach dem Abschalten der Laserstrahlquelle erfolgt ein Abkühlen auf Raumtemperatur. Durch die erhöhte zur Verfügung stehende Laserleistung und den gleichmäßigeren Temperaturverlauf kann die Lötzeit in diesem Beispiel um 0,5 Sekunden reduziert werden.

Im Gegensatz zu den unregulierten Lötprozessen, bei denen gegen Ende der Löt-dauer die Hartmetallschneide im vorderen Bereich glüht, wird mit Temperaturregelung nur ein schwaches Glühen beobachtet. Insbesondere bei Lötprozessen großer Schneiden, welche ebenfalls nur geringen Temperaturschwankungen unterliegen, ist nach Einsetzen der Regelung bis zum Ende der Löt-dauer ein sehr gleichmäßig schwaches, dunkelrotes Glühen der Hartmetallschneide zu beobachten.

8.3.1 Einfluss des Parameters Solltemperatur auf das Lötergebnis

Der Parameter mit dem größten Einfluss auf das Lötergebnis ist die Solltemperatur. Unter diesem Aspekt werden mit der aufgebauten Steuerungshardware und –software die im Folgenden dargestellten Versuche durchgeführt, um die optimale Arbeitstemperatur für den Lötprozess zu ermitteln. Bei einer Solltemperatur von 650°C kann keine vollständige und bei 600°C überhaupt keine Anbindung mehr zwischen den Fügepartnern erzielt werden.

Abweichend von den Vorgaben des Löt Herstellers wird die Lötprozesssolltemperatur schrittweise unter der Prämisse einer nahezu identischen Lötnaht hinsichtlich Wärmeeinflusszone und Fließen des geschmolzenen Lotes erhöht. In allen Fällen kann dabei eine vollständige Verbindungsbildung erzielt werden. Graphisch ausgewertet zeigen die Messwerte den im Bild 8-11 dargestellten Werteverlauf. Der Diodenlaser-Prozess (Sägeblattgeometrie lfd. Nr. 1 nach Tabelle 5-1) mit einer Solltemperatur von 690°C benötigt eine Lötzeit von 2,0 Sekunden. Bei einer Erhöhung dieser Temperatur bis ca. 850°C sinkt die benötigte Zeit, wobei zwischen 850°C und 900°C nur ein geringes Absinken messbar ist. Ab ca. 900°C kann die Lötzeit nicht weiter gesenkt werden. Die zur Ausbildung der Lötzone erforderlichen Diffusionsprozesse benötigen für diese Bauteilgeometrie und Laserleistung die entsprechende Mindestzeit.

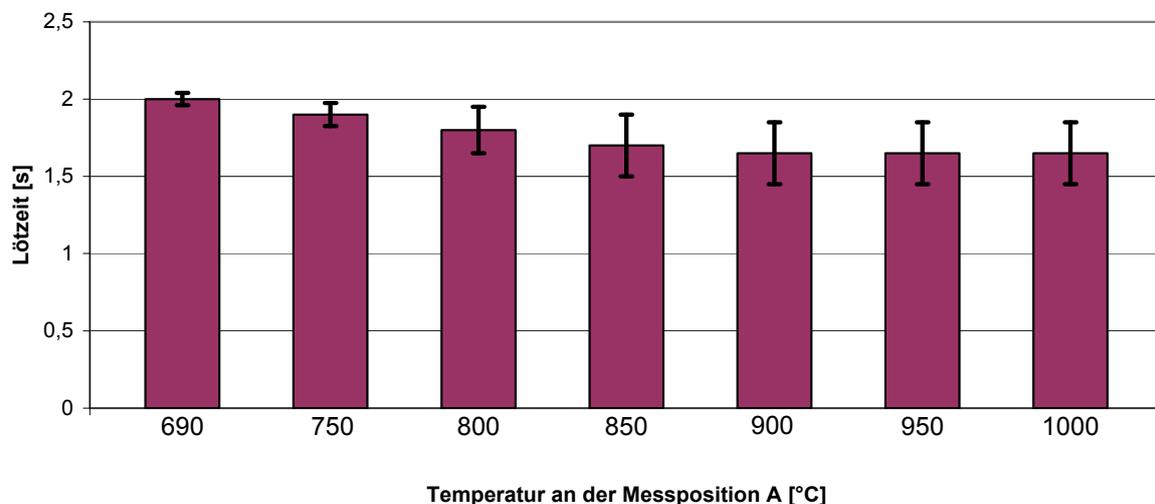


Bild 8-11: Veränderung der Lötzeit ($t_{\text{Löt}}$) durch Variation der Solltemperatur, Sägeblattgeometrie 1, bei 200 W Diodenlaser (LDF 400-650)

Hinsichtlich der Prozessstabilität ist schon mit Überschreiten der Arbeitstemperatur von 690°C eine signifikante Zunahme von Prozessunstetigkeiten festzustellen, in der Folge sind Schwankungen der Lötzeiten erkennbar.

Weiterhin kommt es bei steigender Temperatur ab einem Schwellwert zu einem erhöhten Anteil von Poren im Lot. Die mit dem Programm AxioVision der Firma CarlZeiss an kontrastverstärkten, lichtmikroskopischen Bildern und unter Anwendung der DIN EN ISO 1319-3 [130] ausgewerteten Flächenanteile sind im Bild 8-12 dargestellt. Eine Porosität von 2 bis 3% der projizierten Fläche ist nahezu bei allen

lasergelöteten Proben vorhanden und entsprechend der graphischen Auswertung im Bild 8-12 bis zu einer Solltemperatur von über 850°C konstant häufig. Diese geringe Porosität ist auch bei induktiv gelöteten Proben zu detektieren und nach DIN EN ISO 18279 Bewertungsgruppe C [129] zu tolerieren. Diese für die Verbindungseigenschaften unbedeutenden kleinen Poren entstehen durch Reste von verdampftem Flussmittel oder durch lokal leicht erweiterte Lötspalte. Ab ca. 900°C setzt ein Anstieg des prozentualen Wertes ein, der bei ca. 1000°C Solltemperatur den nach der Norm zulässigen Wert von 30% übersteigt. Bei einer Betrachtung der Ergebnisse unter dem Anspruch der Bewertungsgruppe B ist der zulässige Wert auf 20% begrenzt und im Rahmen dieser Versuchsserie bereits bei 950°C erreicht. Ursächlich für den dargestellten Anstieg der Porosität (Lötnahtfehler Poren und sog. große Gasnester) ist ein unerwünschtes Überhitzen (sog. "Kochen") des Lotes.

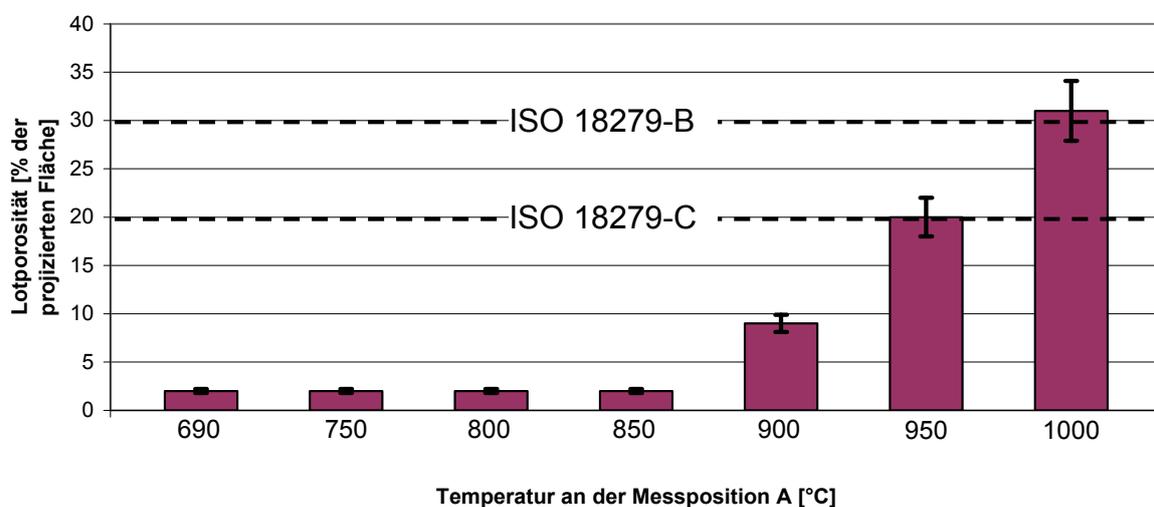


Bild 8-12: Porenbildung beim Laserlöten von Stahl und Hartmetall in Abhängigkeit von der Solltemperatur

Darüber hinaus kann ein bei gesteigerter Solltemperatur vermehrtes An- und Aufschmelzen der Kupferzwischenlage im Randbereich der Lötzone beobachtet werden.

Bei einer Solltemperatur von 690°C ist mit dem Lichtmikroskop im Schliff eine definierte Trennung zwischen den Bereichen des Dreischichtlotes detektierbar. Im Bild 8-15 links ist im mittleren Bereich der Lötzone die Kupferzwischenlage und ober- sowie unterhalb ein Bereich des messingfarbenen Lotes erkennbar. Durch eine Erhöhung der Temperatur beginnt eine Anschmelzung der Kupferzwischenlage. Bei 750°C steigt diese Beeinflussung im Vergleich zur Gesamtfläche der Zwischenlage auf 1%. Zwischen 800°C und 950°C steigt der Wert nahezu linear auf 10% (vgl. Diagramm im Bild 8-13). Die Solltemperatur von 1000°C führt zu einer prozentualen Anschmelzung von 16%.

Die eingestellten Sollwerte liegen noch unter der Schmelztemperatur von 1083°C von reinem Kupfer. Ursächlich für diese Anschmelzungen, die auch unterhalb der Liquidustemperatur von reinem Kupfer vorzufinden sind, werden lokale Leistungs-

spitzen im Laserspot, die durch den integrierenden Messfleck des Pyrometers nicht erfasst werden, angesehen.

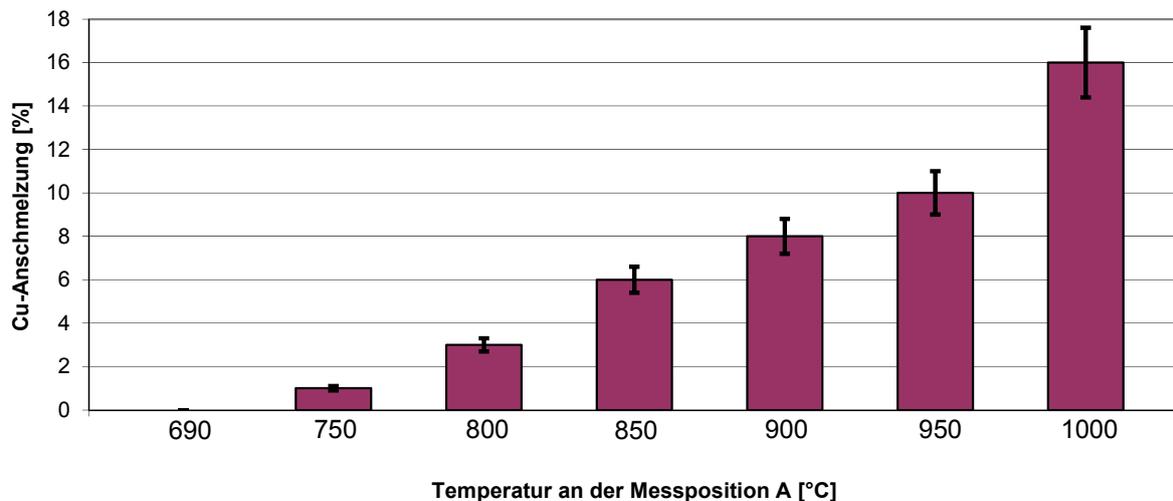


Bild 8-13: Anstieg der Kupferanschmelzung durch eine gesteigerte Solltemperatur

Ein Aufschmelzen der Zwischenlage führt, zunächst nur partiell, bei weiterer Steigerung der Solltemperatur in immer größeren Bereichen der Fügezone zu einer Vermischung von geschmolzenem Lot und flüssigem Kupfer. Nach Abschalten der Laserstrahlquelle und Abkühlen auf Solidustemperatur entsteht ein Mischgefüge aus Lot und geschmolzener Kupferzwischenlage (vgl. Bild 8-14 und Bild 8-15 rechts) aus Kupfer und Lot.

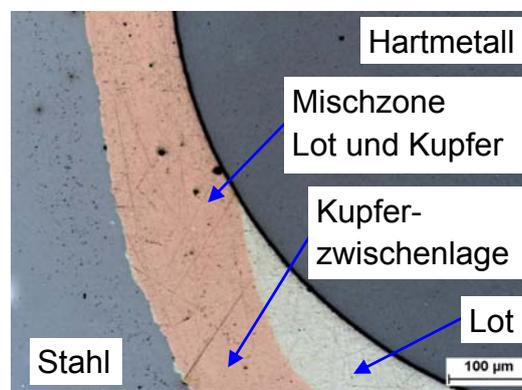


Bild 8-14: Partiiell angeschmolzene Kupferzwischenlage und gebildetes Mischgefüge bei der Solltemperatur 850°C

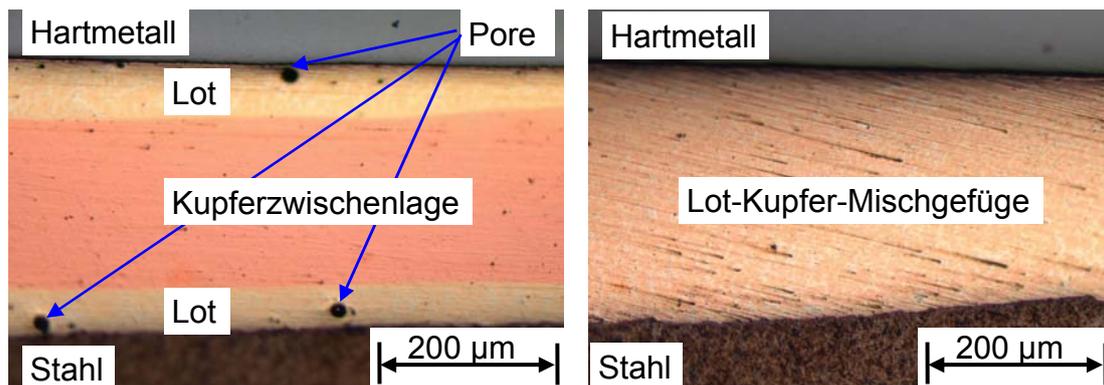


Bild 8-15: Unbeeinflusste Kupferlage in der Lötzone bei Solltemp. 690°C (links); Geschmolzene Kupferzwischenlage und entstandenes Mischgefüge im Detail, bei Solltemp. 850°C (rechts)

Die EDX-Flächenanalyse der entstandenen Gefüge stützt diese Theorie. Die Elementarverteilung einer Lötzone ohne Anschmelzung des Kupfers zeigt für das messingfarbene aufplattierte Lot eine den Herstellerspezifikationen entsprechende Zusammensetzung (vgl. Tabelle 5-4 und Tabelle 8-2 Zeile 1). Die Zwischenlage besteht nahezu aus reinem Kupfer. Abweichend hierzu ist in Tabelle 8-2 in den Zeilen 3 und 4 die Zusammensetzung des Mischgefüges einer bei 1000°C Solltemperatur gelöteten Probe an zwei verschiedenen Messpunkten dargestellt. Gegenüber den Herstellerspezifikationen des Lotes, ist der Flächenanalyse eine Reduktion des Silber-, Zink-, Mangan- und Nickelanteils bei einer vierfachen Steigerung des Kupferanteils zu entnehmen.

Tabelle 8-2: Zusammensetzungen (EDX-Flächenanalyse) der Lotgefüge nach dem Löten mit den Solltemperaturen 690°C und 1000°C

Probe und Messposition	Ag %	Cu %	Zn %	Mn %	Ni %
690°C Solltemperatur, Lot	49	16	23	7,5	4,5
690°C Solltemperatur, Kupferzwischenlage	0	99,7	0	0	0,3
1000°C Solltemperatur, Mischgefüge Messposition 1	24,2	63,9	7,5	0,3	4,1
1000°C Solltemperatur, Mischgefüge Messposition 2	20,3	69,9	7,3	0,5	2

Diese Veränderung in der Elementzusammensetzung kann nur durch Aufschmelzen der Kupferzwischenlage und die Bildung eines Mischgefüges entstanden sein.

Dieses Mischgefüge zeichnet sich durch eine gegenüber dem Lot reduzierte Festigkeit [131] und verminderte Benetzungsfähigkeit der Fügepartner aus. Die Zustandsschaubilder (vgl. Bild 8-16) zeigen am Beispiel der Eisen-Kupfer-Legierung

eine sehr begrenzte Löslichkeit im festen Zustand. Eisen-Silber-Legierungen hingegen sind durch eine vollständige Löslichkeit im flüssigen und festen Zustand gekennzeichnet.

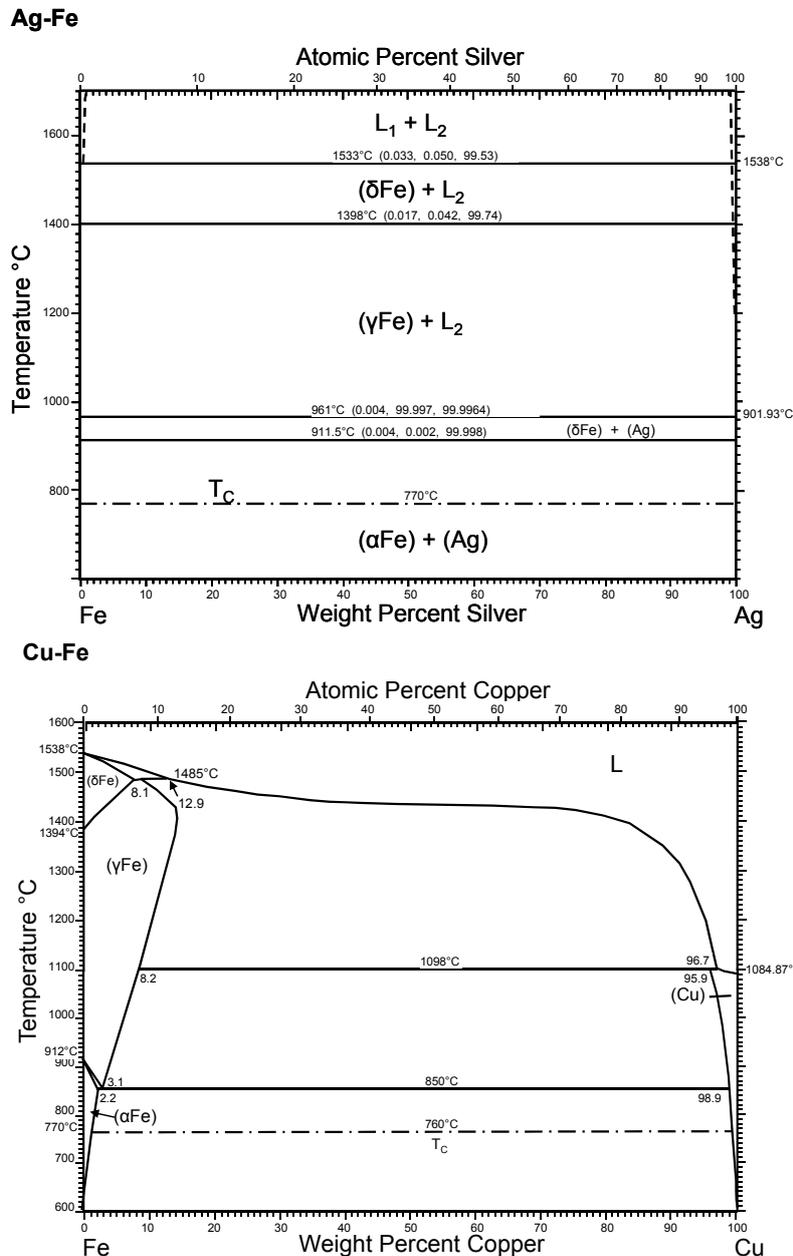


Bild 8-16: Zustandsschaubilder der Zweistoffdiagramme Ag-Fe [132] und Cu-Fe [133]

Weiterhin messbar ist zudem eine unterschiedliche Verteilung der Elemente im Lotgefüge. Mittels REM-Bildern können deutlich unterschiedliche Phasen im Lot detektiert werden. Eine Punktanalyse mittels EDX zeigt in der Elementzusammensetzung bei den hellen Phasen einen sehr hohen Anteil an Silber. Hingegen weisen die dunklen Phasen sehr hohe Anteile an Kupfer auf (vgl. Bild 8-17). Liegen diese dunklen Phasen nun direkt an der Kontaktfläche zwischen Lot und Stahlwerkstoff, so kommt der Stahlwerkstoff in diesen Bereichen ausschließlich

mit der höher kupferhaltigen Phase in Berührung. Die Bildung eines durch Diffusion erzeugten Mischkristalls zwischen Stahl und Lot wird hierdurch signifikant erschwert.

Mikroskopisch betrachtet ergeben sich durch die ungünstige Mischkristallbildung lokal Zonen geringerer mechanischer Festigkeit, die sich makroskopisch in einer reduzierten Festigkeit der gesamten Lötzone darstellen. Das mechanische Versagen der Lötzone bei einem Überlasttest erfolgt vollständig. Eine teilweise Trennung der hochkupferhaltigen Phase vom Stahlwerkstoff bei gleichzeitigem Aufrechterhalten des Verbundes zwischen hochsilberhaltiger Phase und Stahlwerkstoff ist nicht zu erkennen. Als Ursache wird eine gegenseitige Stützwirkung zwischen den einzelnen Phasen erachtet, so dass der Lotverbund erst nach Überschreiten der Gesamtfestigkeit versagt.

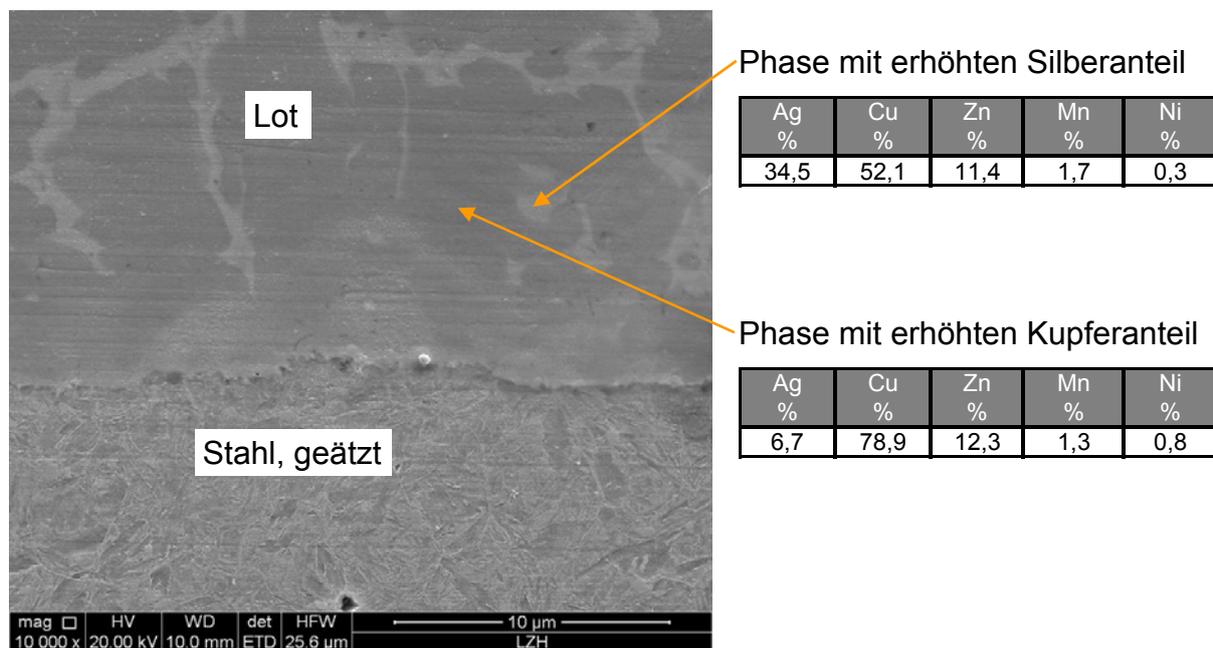


Bild 8-17: REM-Bild unterschiedlicher Phasen im Lot und EDX-Punktanalysen

Diese Aussagen gelten auf Grund gleicher Lösungsbedingungen auch zwischen Kobalt und Silber sowie Kobalt und Kupfer auf der anderen Seite der Lötverbindung, d.h. auf der Seite des Hartmetalls.

Weiterhin ist durch die Auflösung der Kupferschicht der duktile Bereich in der Fügezone nicht mehr vorhanden, weshalb die Fügepartner erhöhten Schrupfspannungen während und nach der Abkühlung ausgesetzt werden.

Unter der Anforderung eines optimalen Lötresultates bei hoher Prozessstabilität erscheint für die weiteren Versuche die Solltemperatur von 690°C im Bereich des Lotes als zielführende Limitierung. Als Ergebnis dieser Arbeiten wird zudem für alle Untersuchungen und insbesondere für den Laserlötautomaten eine Temperaturregelung im Bereich des Lotwerkstoffs und Temperaturüberwachung am Laserauftreffpunkt aufgebaut.

8.3.2 Einfluss der Laserleistung auf den geregelten Lötprozess

Am Beispiel der Sägeblattgeometrie lfd. Nr. 1 nach Tabelle 5-1 wird im Folgenden der Einfluss erhöhter Laserleistung auf die Lötzeit dargestellt. Eine Steigerung der Laserleistung führt auch bei einem temperaturgeregelten Prozess zu kürzeren Lötzeiten. So können für die untersuchte Sägeblattgeometrie bei 400 W Diodenlaserstrahlung Lötzeiten von 1,6 Sekunden bei gleichem Lötergebnis realisiert werden (vgl. Bild 8-18).

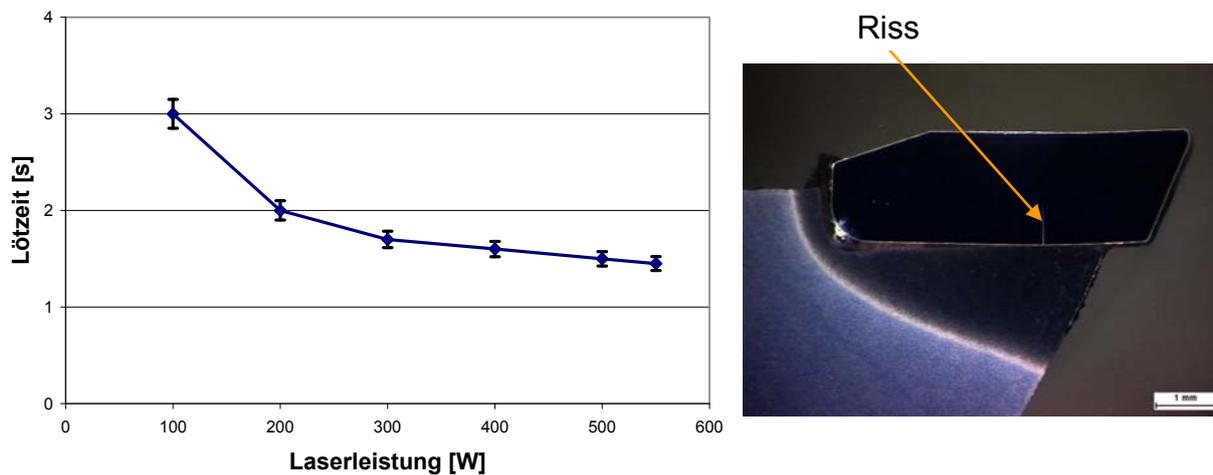


Bild 8-18: Veränderung der Lötzeit ($t_{\text{Löt}}$) bei Erhöhung der Laserleistung bei einem geregelten Prozess (Rissbildung bei 600 W)

Erkennbar ist eine zunächst steil fallende Kurve, die sich ab 200 W abflacht und bei einer Leistung von 550 W endet. Ursache ist ab 600 W das Ausbilden eines Risses quer durch den Schneidstoff ausgehend vom Bereich der Laserstrahl-Werkstück-Wechselwirkungszone bis zur Lötstelle. Diese so beeinflussten Proben zeigen in den folgenden mechanischen Untersuchungen eine drastisch reduzierte Festigkeit durch Zerschneiden der Schneide. Laserleistungen oberhalb von 550 W sollten daher für die Schneiden der Sägeblattgeometrie lfd. Nr. 1 nach Tabelle 5-1 nicht verwendet werden, da hierdurch offensichtlich der Schneidstoff mit einer zu hohen Aufheizrate beaufschlagt wird.

8.4 Beeinflussung der Hartmetallschneide durch Laserstrahlung

Bereits unterhalb der Laserleistung von 550 W ist bei allen Proben eine oberflächliche Beeinflussung in der Laserstrahl-Schneidstoff-Wechselwirkungszone erkennbar. Bei allen diodenlasergestützten Lötverbindungen, die der DIN EN ISO 18279 Bewertungsgruppe C [129] entsprechen, sehen diese Wechselwirkungszone nahezu identisch aus. Eine Abhängigkeit von der Laserleistung ist hierbei nicht erkennbar. Lediglich die Lötverbindungen, die nicht ausreichende Verbindungseigenschaften aufweisen, sind durch kleinere Wechselwirkungszone gekennzeichnet.

Die Werkstoffveränderung ist mit bloßem Auge auf der Schneidenoberfläche gut erkennbar. Der sichtbare kreisförmige Bereich im Bild 8-19 links besteht aus mikroskopisch kleinen Vertiefungen der Oberfläche. Deutlich sichtbar wird dies in

den Vergrößerungen mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops. Im Bild 8-19 ist bei einer 20-fachen Vergrößerung noch der gesamte Zahn mit dem Muster auf der Schneide zu erkennen. In der 50-fachen bzw. der 100-fachen Vergrößerung sind kleine Vertiefungen in Muschelform zu sehen. Im Folgenden wird hierfür der Ausdruck Ausmuschelung verwendet. Auffällig ist eine Zweiteilung der laserbeeinflussten Zone. Die visuell deutlich erkennbaren Ausmuschelungen befinden sich im Innenbereich der Laserstrahl-Schneidstoff-Wechselwirkungszone. Dieser wird von einem Ring umgeben, der eine leicht bläuliche Verfärbung des Schneidstoffes erkennen lässt.

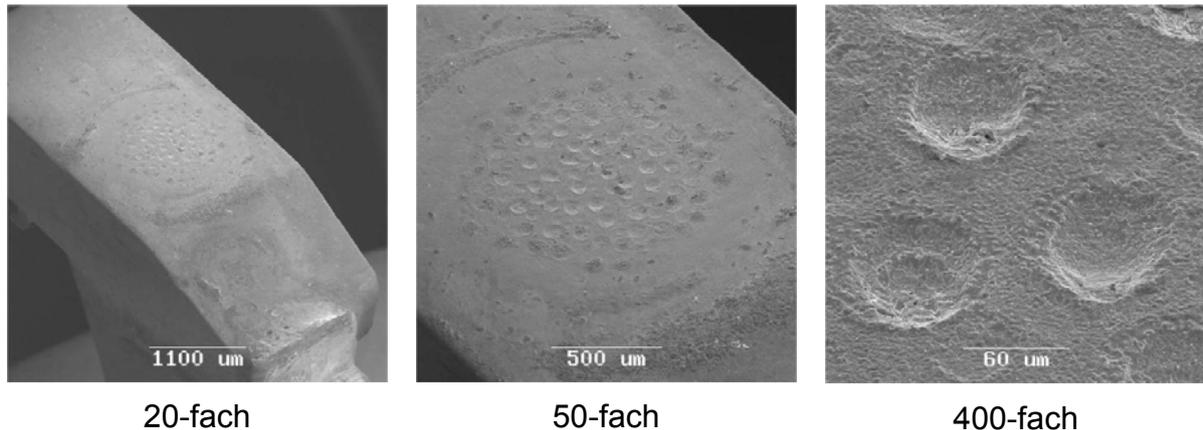


Bild 8-19: REM-Vergrößerung der Schneidenoberfläche nach dem Lötprozess

Die Oberfläche des die Ausmuschelungen umgebenden Materials stellt sich weniger schroff dar weshalb Materialausbrüche ausgeschlossen werden. In der Mitte der Ausmuschelungen ist eine deutliche Vertiefung mit ca. $\frac{1}{5}$ des Durchmessers zu erkennen. Die Ausmuschelungen sind stochastisch über die Laserstrahl-Schneidstoff-Wechselwirkungszone verteilt und folgen in Ihrer Verteilung keinem erkennbaren Muster. Der rechte Teil im Bild 8-19 zeigt eine 400-fache Vergrößerung. Hiernach weisen die Ausmuschelungen gemittelt einen Durchmesser von ca. $80 \mu\text{m}$ auf.

In der Sägeblattfertigung folgt nach dem Löten eine Nachbehandlung durch Schleifen der Zähne. Dies dient zum einen einer Lagetoleranzsteigerung im Einsatz und zum anderen dem anwendungsspezifischen Schärfen der Schneiden. So können z. B. auch verschiedene Schneidengeometrien alternierend auf dem Sägeblattumfang verteilt hergestellt werden, um eine gezielte Spanerzeugung und -führung zu ermöglichen.

Die an der Oberfläche entstandenen Ausmuschelungen sowie eine deutlich zu verzeichnende bläuliche Verfärbung werden dabei entfernt (vgl. Bild 8-20).



Bild 8-20: Sägeblatt nach dem Lötprozess (links) und in der Produktion geschliffenes Sägeblatt (Mitte und rechts)

Durch vertiefende Untersuchungen ist auszuschließen, dass sich aus diesen Ausmuschelungen potenzielle Schädigungen in den tiefer liegenden Schneidstoff fortpflanzen. Zu diesem Zweck werden mittels REM die Ausmuschelungen im Querschliff untersucht. Die Gesamtheit der untersuchten Proben zeigt ein dem Bild 8-21 ähnliches Erscheinungsbild. In keinem Fall verursachten die laserinduzierten Fehlstellen der Oberfläche orthogonale Risse, die sich in den Schneidstoff fortsetzen. Auf Basis der REM-Untersuchungen kann eine Risschädigung tiefer gelegenen Schneidstoffmaterials daher ausgeschlossen werden.

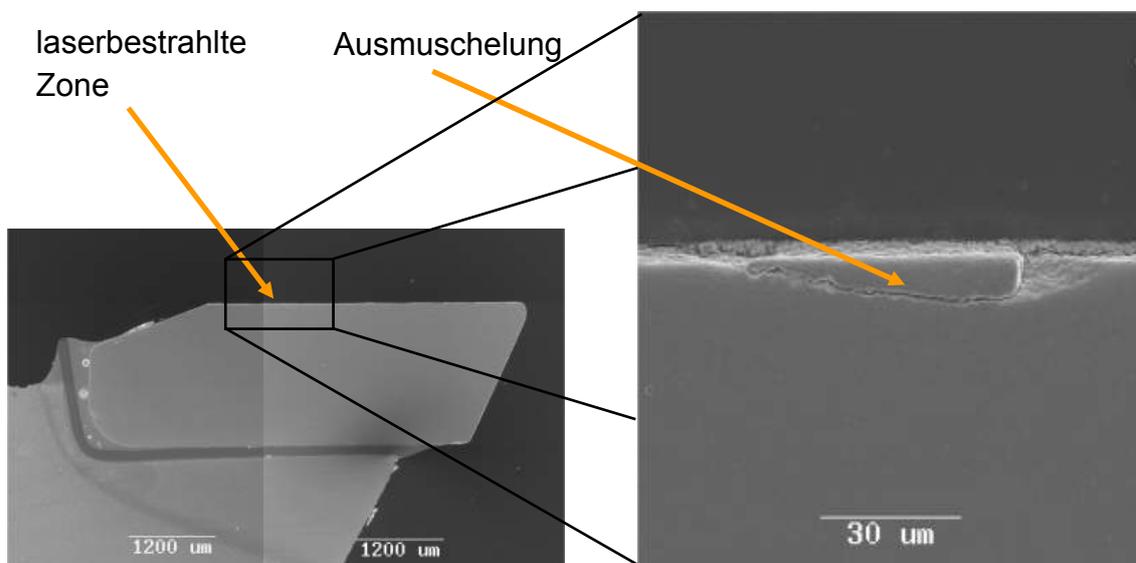


Bild 8-21: REM-Untersuchung der Ausmuschelungen im Querschliff

8.4.1 Strahlprofilanalyse und Intensitätsverteilung des Laserstrahls

Obwohl vor Beginn der Versuche der Laserstrahldurchmesser mittels Defokussierung und Vermessung auf einer wellenlängenspezifischen Detektorkarte der jeweiligen Schneidenform angepasst wurde, ist nach Abschluss des Lötvorganges keine gleichmäßige Verteilung der ungewollten Ausmuschelungen über die Schneideneroberfläche erkennbar. Gehäuft treten die Ausmuschelungen im Zentrum der Laserstrahl-Schneidstoff-Wechselwirkungszone auf, wobei sie stochastisch verteilt sind. Diese Verteilung lässt ungewollte lokale Leistungsspitzen im Laserstrahl

vermuten. Zur Klärung wird im Folgenden eine Untersuchung des Strahlprofils mit einem Laserdiagnosegerät der Firma Primes angefertigt.

Im linken Teil im Bild 8-22 ist die qualitative Intensitätsverteilung dreidimensional in Falschfarben dargestellt.

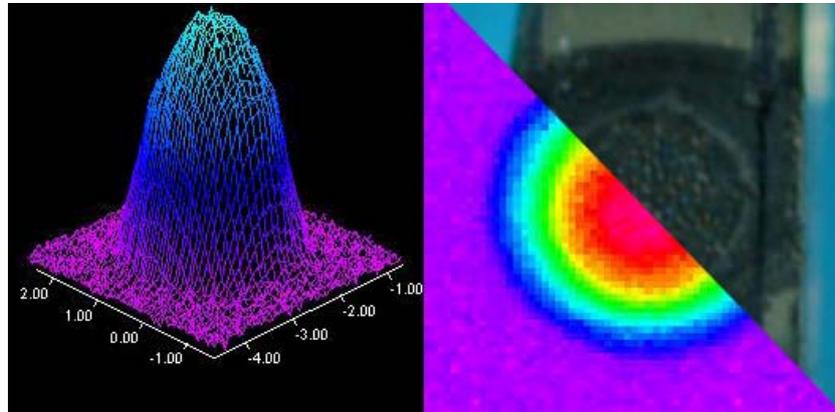


Bild 8-22: Strahlprofil des Diodenlasers bei Dauerstrahl (cw-Betrieb) mit 200 W

Hierbei ist eine rotationssymmetrische und gauß-ähnliche Verteilung der Energie im Laserstrahl erkennbar. Auf der rechten Seite der Abbildung befinden sich die zweidimensionale Falschfarbendarstellung sowie das reale Objekt zum Vergleich in einem Übergangsbild. Zu erkennen ist die deutlich höhere Intensität des Strahls von der Mitte bis zu ca. $2/3$ des Strahldurchmessers. Die Außenbereiche zeigen eine maßgeblich geringere Leistungsdichte. Die Intensitätsverteilung des Strahls stimmt somit mit dem tatsächlichen Oberflächenbild des Zahnes überein.

Ungewollte lokale Leistungsspitzen im Laserstrahl können aber auf Basis dieser Untersuchungen nicht bestätigt werden. Eine weitere Ursache für die erkennbaren Ausmuschelungen könnten auch lokale Verdampfungen des Kobaltbinders im Schneidstoff sein. Die Ausmuschelungen wären somit resultierende Ausbrüche aus dem Schneidstoffverbund, die durch Schwächung der Bindungen zwischen den Hartstoffpartikeln entstehen. Elementares Kobalt schmilzt bei einer Temperatur von 1495 °C und siedet bei 3100 °C . Diese Werte sind deutlich größer als die in der Schneidstoff-Laserstrahl-Wechselwirkungszone gemessenen Temperaturen. Es ist aber möglich, dass lokal andere – eventuell signifikant bessere – Absorptionseigenschaften auf der Oberfläche vorherrschen. Diese lokalen Absorptionsmaxima könnten zu Temperaturspitzen führen, die vom integrierenden Messfleck des Pyrometers nicht erfasst werden. Gestützt wird dies ebenfalls durch die bläuliche Verfärbung der Oberfläche, die auf das Austreten von elementarem Kobalt aus der Schneide hindeutet, daher wird im folgenden Kapitel eine Elementanalyse durchgeführt.

8.4.2 Elementanalyse der Schneidoberfläche

Mit Hilfe eines EDX-Scans (engl. energy dispersive X-ray spectroscopy) wird die Oberfläche der Schneiden hinsichtlich der elementaren Zusammensetzung untersucht. Prüfstellen befinden sich hierbei direkt am Rand einzelner Aus-

muschelungen sowie vergleichend hierzu im vorderen Bereich der jeweiligen Schneide, welche nicht direkt mit dem Laser bestrahlt wird und keine oberflächliche Veränderung aufweist. Die Messergebnisse sind für eine Vergleichsprüfung exemplarisch im Bild 8-23 dargestellt. Aufgetragen sind in beiden Diagrammen auf der Ordinate die Elemente aufgelöst nach der Energie bzw. der elementspezifischen Energie des emittierten Röntgenquants (keV) während der Analyse sowie die Häufigkeit des jeweiligen Elementes (counts) auf der Abszisse. Für den Nachweis des Kobaltanteils ist die Stelle mit der Position 7 relevant und durch eine rote Markierung hervorgehoben.

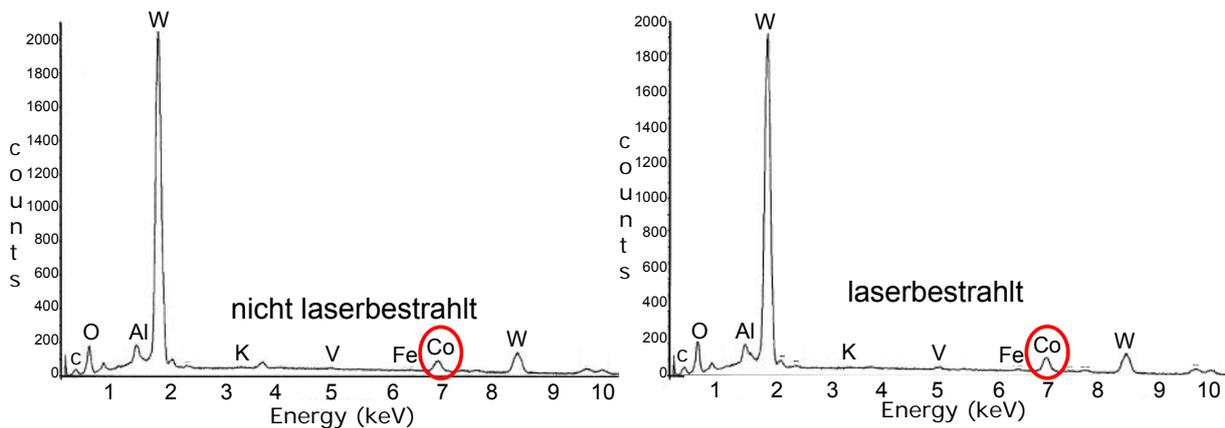


Bild 8-23: EDX-Untersuchung zur Analyse der Oberflächenzusammensetzung des Schneidstoffes

Der Analysenvergleich zeigt keine Beeinflussung der Elementarzusammensetzung, des Schneidstoffes durch die Bestrahlung mit dem Laser. Die Oberflächenzusammensetzung bleibt somit unverändert; ein Austritt vom Bindermaterial Kobalt hat nachweisbar während des Lötvorganges nicht stattgefunden.

Abschließend kommen als Ursache der Ausmuschelungen nur thermische Spannungen an der Schneidstoffoberfläche infolge lokaler Temperaturgradienten in Betracht.

8.5 Erarbeitetes Prozessfenster für automatisierte Lötungen

Auf Basis der Erkenntnisse über die Einflussgrößen auf den laserbasierten Lötprozess wird exemplarisch für die Sägeblattgeometrie 1 nach Tabelle 5-1 das bestimmte Prozessfenster für automatisiertes Lötten mit der entwickelten Laserlötmaschine dargestellt. Die Haupteinflussparameter Laserleistung (Ordinate) und Lötzeit (Abszisse) spannen dieses Fenster im zweidimensionalen Raum auf.

Das im Bild 8-24 dargestellte Prozessfenster weist eine rechts- und linksseitige Beschränkung auf. Die rechtsseitige Beschränkung ist bei vier Sekunden gesetzt, da Lötzeiten, welche die Zeiten des konkurrierenden Induktionsverfahrens übertreffen, unwirtschaftlich und nicht weiter zu untersuchen sind. Die linksseitige Beschränkung resultiert aus den Verfahrenseigenschaften des Lötprozesses. Lötverbindungen, bei denen gezielt kürzere Zeiten als eine Sekunde eingestellt werden, sind durch Einschlüsse von Flussmittelresten in der Lötzone gekennzeichnet. Diese Einschlüsse

folgen aus einer nach Erreichen der Flussmittelarbeitstemperatur zu geringen Reaktionszeit zwischen den Grundwerkstoffen und dem Flussmittel sowie einer zu geringen Zeitdauer, in der das schmelzflüssige Lot sich im Lötspalt ausbreiten und das reagierende Flussmittel verdrängen kann.

Im unteren Teil schließt sich an das Prozessfenster (grün) ein kleinerer Bereich (blau) an, der das Fenster in Richtung geringerer Laserleistung abschließt. Lötverbindungen, die mit Parametersätzen aus diesem Bereich gefertigt werden, sind anhand einer sehr kleinen Wärmeeinflusszone zu erkennen. Insbesondere der Eckbereich zwischen großer und kleiner Achse des Lötspaltes wird während des Lötprozesses nicht vollständig auf Arbeitstemperatur erwärmt, und eine Verbindung zwischen den Grundwerkstoffen sowie dem Lot kann sich dort nicht vollständig ausbilden. Ohne Präparation der Lötstelle ist diese verkleinerte Wärmeeinflusszone nur bei metallisch blanken Sägeblättern erkennbar. Brünierte Stammblätter zeigen ohne metallographische Präparation (Schleifen und Ätzen) keine Wärmeeinflusszonen. Erkennbar wird die nicht vollständige Verbindung der Fügepartner hierbei durch nicht gänzlich verlaufenes Lot sowie reduzierte Festigkeiten. Die entsprechenden Parametersätze werden zur Erlangung hoher Verbindungsfestigkeiten als unzureichend erachtet. Die zugrunde liegenden Festigkeiten werden in Kapitel 8.7 dargelegt. Mit Parametern, die noch unterhalb dieses Bereichs liegen, können keine Lötzonen mehr erzielt werden.

Parameter, die oberhalb des grünen Prozessfensters liegen, sind generell auch geeignet, um Sägeblätter zu fertigen. Die erzeugten Proben zeichnen sich durch Festigkeitseigenschaften auf dem Niveau von induktionsgelöteten Sägeblättern, jedoch auch durch vergrößerte Wärmeeinflusszonen sowie erhöhte Bauteilverzüge aus. Zudem führt die erhöhte Energiedichte zu einer verschlechterten Wirtschaftlichkeit des Verfahrens. Noch oberhalb dieser Leistungswerte liegt die detektierte Zerstörungsschwelle der Schneidstoffe.

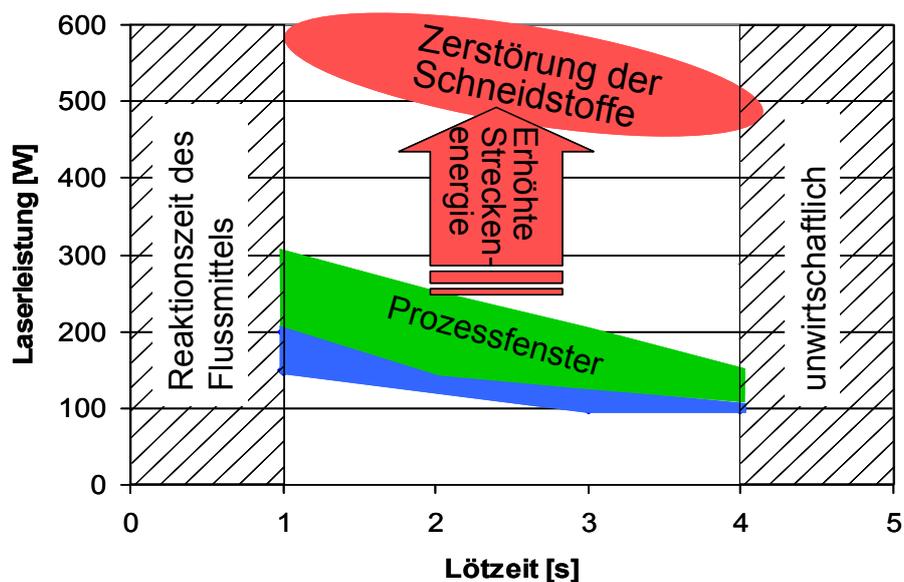


Bild 8-24: Ermitteltes Prozessfenster für Sägeblattgeometrie 1 nach Tabelle 5-1

Die Prozessparameter im grünen Bereich erzielen ein vollständiges Aufschmelzen und optimales Fließen des Lotwerkstoffes. Die Ausbildung einer qualitativ hochwertigen Naht ist anhand einer vollständigen Verbindung der Fügepartner erkennbar, die Kupferzwichenschicht ist nicht verflüssigt worden. Es sind einige wenige Poren entstanden, die jedoch gemäß DIN EN ISO 18279, Bewertungsgruppe C [129], ohne Festigkeitseinbußen toleriert werden können. Prozesstemperatur und eingebrachte Energie können als ausreichend angesehen werden.

Der innere Teil des Prozessfensters in einem Bereich von 2 Sekunden Lötzeit bei einer Laserleistung von 200 W zeigt den größten Abstand zu den Grenzen des Fensters. Die Parametersätze in der Nähe dieses Punktes können als relativ robust bezeichnet werden und sind unanfällig gegenüber Prozessschwankungen, wie sie in der industriellen Fertigung auftreten können.

8.6 Metallographische Untersuchungen des Mikrogefüges

Ergänzend zu der in diesem Kapitel vorgestellten Prozessentwicklung und der Erarbeitung des Prozessfensters werden im folgenden Abschnitt die Einflüsse der Laser- und Induktivlötung auf das Werkstoffgefüge untersucht und einander gegenübergestellt. Die metallographische Bewertung der Lötverbindungen erfolgt anhand von aus dem Sägeblattverbund getrennten und durch Schleifen und Ätzen präparierten Einzelsegmenten. Die Charakterisierung der Lötzonenausprägung erfolgt zunächst anhand von Makroschliffen, wobei als Kriterium insbesondere eine homogene Anbindung und deren Breite sowie eventuelle Inhomogenitäten herangezogen werden. Das entstandene Gefüge wird anhand von Mikroschliffen außer im Licht- auch im Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht, da die Auflösung von Lichtmikroskopen allein zur Gefügecharakterisierung auf Grund der Feinkörnigkeit der eingesetzten Werkstoffe sowie der sehr kurzen und konzentrierten Wärmebehandlung infolge des Lötprozesses nicht ausreicht.

Die im Folgenden einander gegenübergestellten Schlitze wurden induktiv- (Lötautomat **vor** dem Umbau, Bild 8-26) bzw. lasergelötet (Lötautomat **nach** dem Umbau, Bild 8-29) erzeugt. Die Handhabungsparameter sind hinsichtlich der Positionierung der Bauteile und Aufbringung der Lötzusatz- und Löthilfsstoffe unverändert.

Im oberen Teil im Bild 8-26 sind zwei unterschiedliche Varianten induktionsgelöteter Proben der Sägeblattgeometrie 1 nach Tabelle 5-1 dargestellt. Diesen Proben gemeinsam ist die Lötung mittels eines 2 kW Induktors und einer Induktionsschleife, die das Stammbblatt im Bereich des Lotes und im daran angrenzenden ca. 3 mm breiten Stahlblattanteil umschließt (vgl. Bild 8-26). Die Induktionsschleife ist wassergekühlt und besteht aus einem Kupferrohr mit einem Durchmesser von 2 mm und einer Wandstärke von 0,5 mm.

Die induktionsgelöteten Proben wurden an der Messposition A (analog zum Bild 6-10 auf Seite 54) auf 690°C temperaturgeregelt. Die Lötzeit betrug jeweils drei

Sekunden. Diese induktiv gelöteten Proben zeigen ausgehend von der Lötzone eine großflächige Wärmeeinflusszone und einen helleren Übergang zum Grundwerkstoff.

Die Energieeinkopplung in die Lötzone erfolgt bei den induktiv gelöteten Proben nahezu ausschließlich über den Stahlwerkstoff, dem insbesondere die in dieser Arbeit untersuchten und in der Industrie zu einem immer höheren Anteil verwendeten Schneidstoffe mit einem geringen Kobaltgehalt zeichnen sich durch eine sehr geringe magnetische Permeabilität aus. Dadurch können sie nur mit einem geringen Wirkungsgrad mit einem Induktor erwärmt werden.

Infolge der gleichmäßigen Wärmeausbreitung im Stammbblatt fließt die induzierte Energie nicht nur in die Fügezone, sondern auch in weiter von der Lötstelle entfernte Stammbblattbereiche, wodurch die für das Induktionsverfahren typischen großflächigen Wärmeeinflusszonen entstehen. Die im rechten Teil im Bild 8-25 dargestellte Probe ist induktionsgelötet und durch einen nachgeschalteten zweiten aber abgeschwächten Induktionsprozess im Bereich des Übergangs zwischen Wärmeeinflusszone (WEZ) und Grundwerkstoff (GW) wärmenachbehandelt. Der Lötautomat dreht hierzu das Stammbblatt wenige Grad weiter und startet für ca. zwei Sekunden einen abgeschwächten Induktionsprozess. Erkennbar wird dies im Schliff durch die Ausbildung zweier Wärmeeinflusszonen. Die Zone I ist durch den eigentlichen Lötvorgang entstanden und die Zone II durch den Nachbehandlungsvorgang. Der wärmebeeinflusste Bereich der ersten Zone hat eine Ausdehnung von 25 mm^2 , die gesamte beeinflusste Fläche (Zone I und Zone II) umfasst 37 mm^2 .

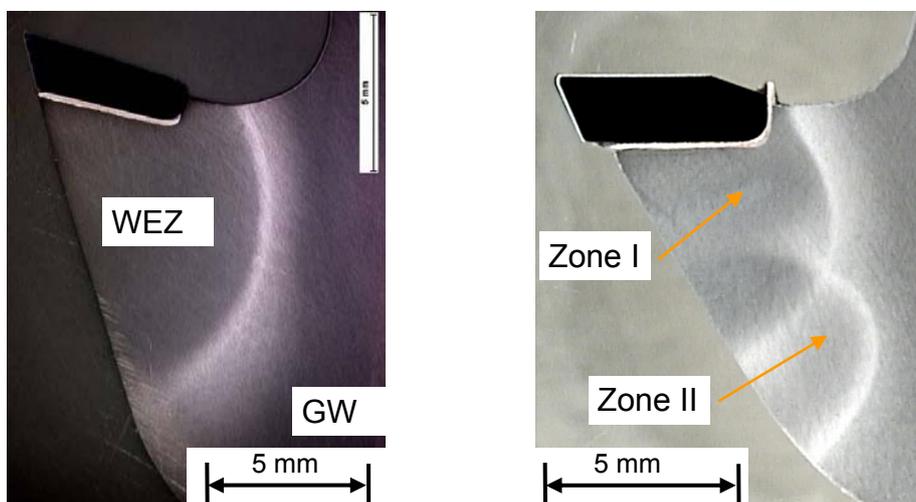


Bild 8-25: links: induktionsgelötete Probe (3 s, 2 kW) ohne Nachwärmung
rechts: induktionsgelötete Probe (3 s, 2 kW) mit Nachwärmung

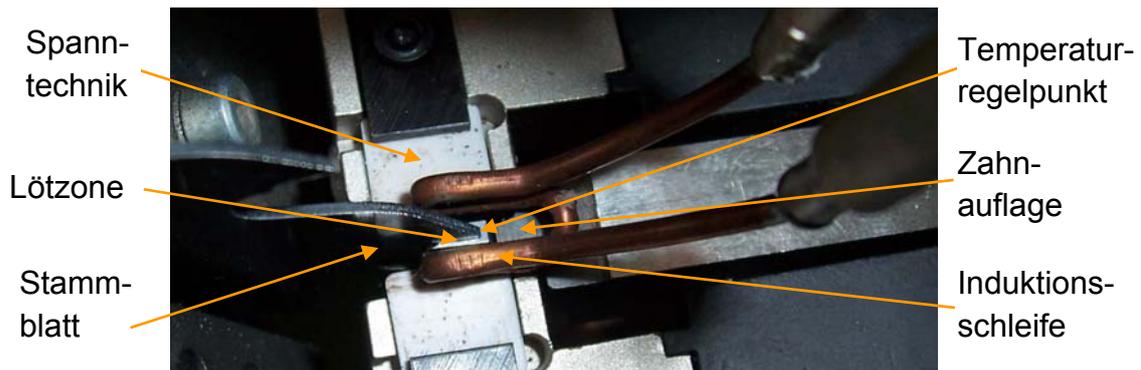


Bild 8-26: Positionierung der Induktionsschleife

Der Wärmenachbehandlungsvorgang soll die entstandene metallurgische Kerbe am Übergang WEZ und GW abschwächen. Auf Grund der Lotschmelztemperatur von ca. 650°C und der geringen Entfernung von der Lötstelle kann die 755°C betragende Austenitisierungstemperatur des Werkstoffes 75Cr1 (vgl. Bild 8-27) nicht oder nur kurzzeitig erreicht werden, wodurch die Bildung des Austenits nur unvollständig erfolgt. Zudem ist das Abkühlverhalten im Anschluss an die Wärmenachbehandlung nur sehr bedingt durch den Induktionsprozess steuerbar. Der Übergang zwischen WEZ und GW bleibt abgeschwächt erhalten. Dies ist anhand des noch vorhandenen etwas heller schattierten Übergangs zwischen WEZ und GW in der nachgewärmten Zone deutlich erkennbar (siehe Bild 8-25 rechts oben).

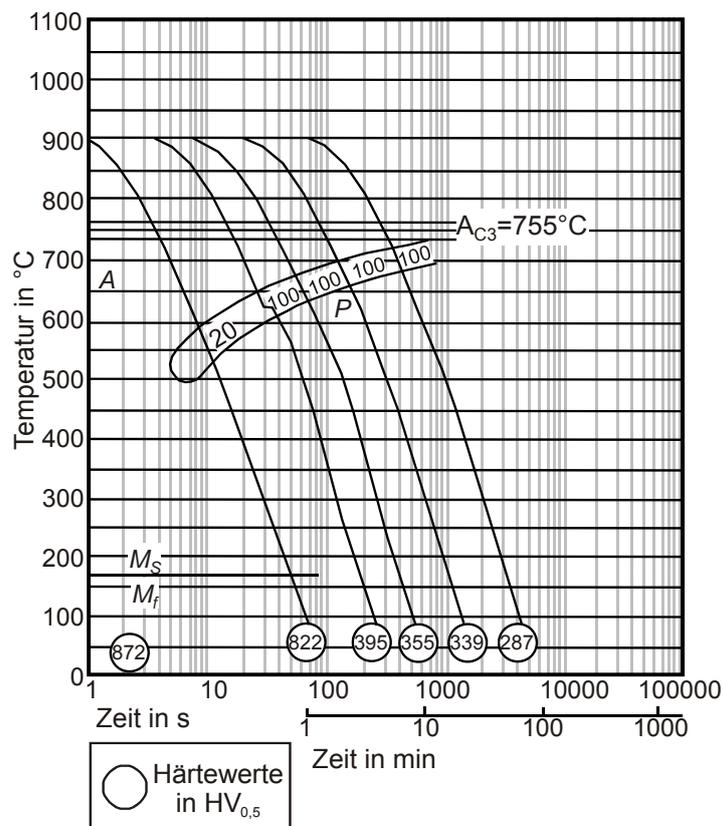


Bild 8-27: ZTU-Diagramm für kontinuierliche Abkühlung des Werkstoffes 75Cr1 [134]

Im Gegensatz hierzu wurde bei der im linken Teil im Bild 8-25 dargestellten Probe im Anschluss an den Induktionslötprozess kein separater Nachwärmprozess durch-

geführt. In der industriellen Fertigung ist dies der Standard. Der Anlassvorgang wird hierbei an vielen gestapelten Sägeblättern simultan in einem Ofen ausgeführt. Durch die dabei mögliche längere Erwärmung der Sägeblätter wird dem Umwandlungsvorgang bei gleichzeitiger Erhöhung der Stückzahl mehr Zeit gegeben. Die Temperaturbeschränkung im Hinblick auf den Lotwerkstoff verhindert aber auch in diesem Fall eine vollständige Gefügeänderung.

Das im Rahmen dieser Arbeit für Sägeblätter entwickelte Laserstrahlötverfahren zeichnet sich durch deutlich verkleinerte wärmebeeinflusste Bereiche aus. So kann in Abhängigkeit von der zugeführten Laserstrahlleistung und der Lötzeit die Größe der WEZ präzise eingestellt werden. Die Graphik in der folgenden Abbildung verdeutlicht einen direkten Zusammenhang zwischen der Laserstrahlleistung und der WEZ-Größe, eine unmittelbare Abhängigkeit der WEZ-Größe von der Lötzeit ist dagegen nicht erkennbar. Dies spiegelt sich auch bei einer Betrachtung des Verhältnisses zwischen Gesamtenergie (Laserleistung x Lötzeit) und der WEZ-Größe wider. Als ursächlich hierfür werden die vornehmlich zeitgesteuerten Abläufe wie Verdampfen des Flussmittels sowie Schmelzen und Fließen des Lotes erachtet.

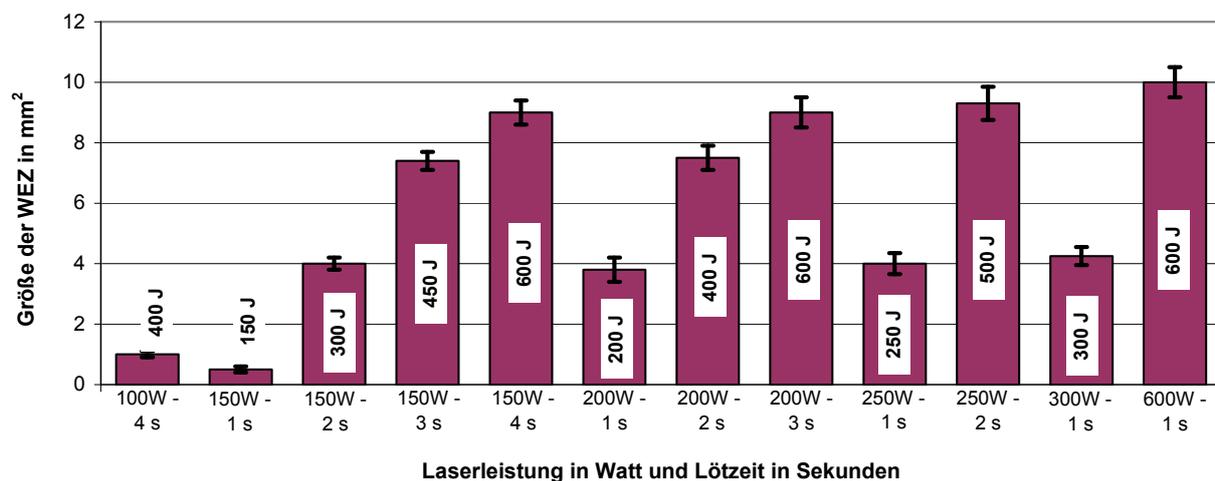


Bild 8-28: Größe der Wärmeeinflusszone in Abhängigkeit von der Laserleistung und Lötzeit am Beispiel der Sägeblattgeometrie 1 nach Tabelle 5-1

Ein im Bild 8-29 dargestellter Versuchsträger mit der Sägeblattgeometrie 1 nach Tabelle 5-1 wurde im umgerüsteten Lötautomaten mit einer Diodenlaserleistung von 200 W und zwei Sekunden Lötzeit gefügt. Bei diesem Versuchsträger, der exemplarisch für die automatisiert gelöteten Sägeblätter steht, ist die wärmebeeinflusste Zone nur $7,5 \text{ mm}^2$ groß und damit um den Faktor 3,1 kleiner als bei den induktiv gefügten Referenzproben ohne Wärmenachbehandlung.

In dem an die Lötzone angrenzenden Bereich ist eine Änderung des perlitisch-martensitischen Grundwerkstoffgefüges zu einem vorwiegend nadeligen Martensit insbesondere anhand der REM-Aufnahme im linken oberen Teil im Bild 8-29 erkennbar. Die etwas heller strukturierte Übergangszone zum Grundwerkstoff lässt bei einer lichtmikroskopischen Untersuchung einen beschränkten Bereich von ferritisch-perlitischem Gefüge erkennen.

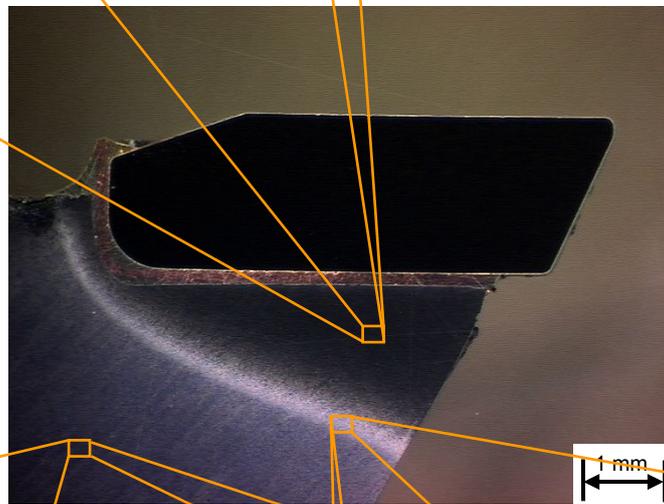
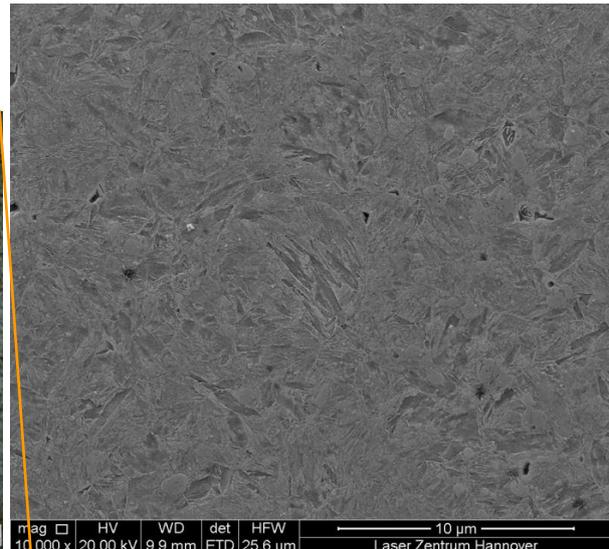
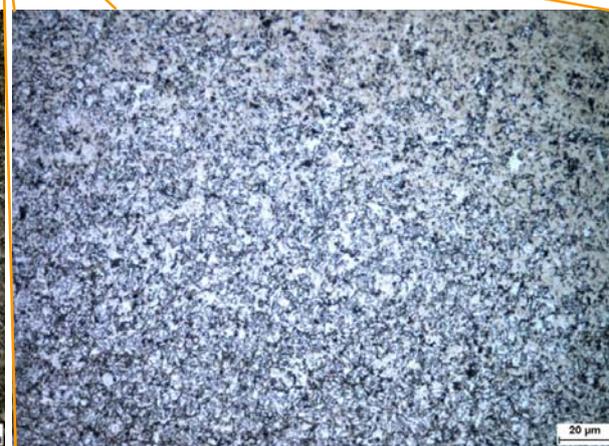
Wärmeeinflusszone**REM:****Lichtmikroskop:****Lichtmikroskop:****Lichtmikroskop:**

Bild 8-29: diodenlasergelötete Probe (200 W, 2 s): Übersicht (Mitte); Gefügebilder WEZ (oben), GW (links unten), Übergang WEZ / GW (rechts unten)

Die Wärmeeinflusszone ist an der vorderen Kante des Stammblasses durch den hier auftretenden Wärmestau stärker ausgebildet. Dieser entsteht, wie zuvor beschrieben (siehe Abschnitt 8.1) da an der Kante die Wärme nur eingeschränkt in den Grundwerkstoff abfließen kann.

Durch die Wahl eines Parametersatzes mit geringerer zugeführter Gesamtenergie (150 W und zwei Sekunden Lötzeit) können die Zonen der Wärmebeeinflussung noch weiter verkleinert werden. Da der hiermit eingestellte Prozess an der Grenze des erarbeiteten Prozessfensters liegt, ist er etwas weniger robust gegenüber Störgrößen in einer Serienfertigung. Die dennoch vollständig und fehlerfrei gelöteten Proben dieser Versuchsserie zeigen eine sogar um den Faktor 5 auf 5 mm² verkleinerte Wärmeeinflusszone, die im vorderen Teil ebenfalls etwas vergrößert ist. Im hinteren Bereich jedoch, insbesondere ab dem Eckbereich und an der kleinen Achse des Lötspaltes, kann die Bildung des vorwiegend martensitischen Gefüges (dunkler Bereich im Stahlwerkstoff im Bild 8-30) unterdrückt werden. Die hierdurch resultierenden Härteverläufe und Verbindungsfestigkeiten werden im Kapitel 8.7.1 bzw. 8.7.2 dargelegt.

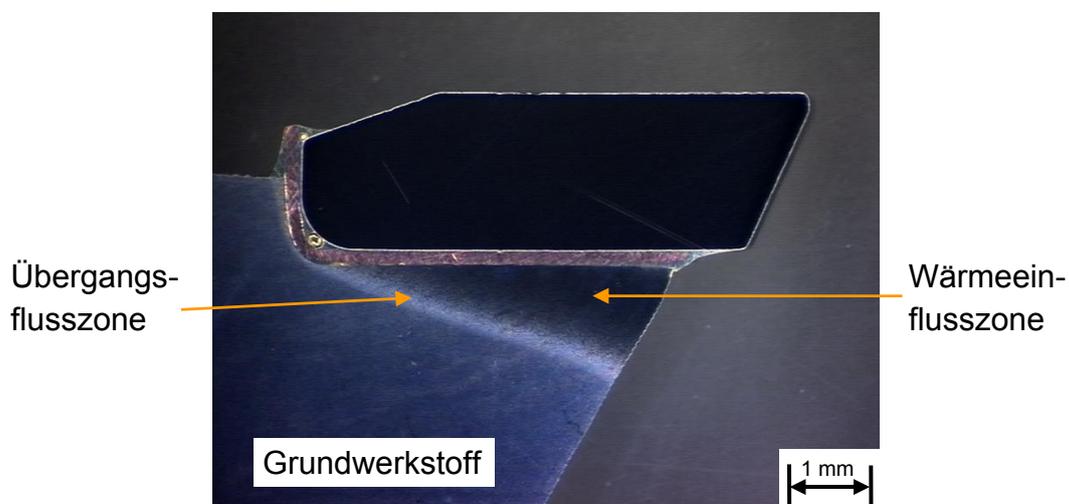


Bild 8-30: Diodenlasergelötete Probe (150 W, 2 Sekunden)

In einer systematischen Versuchsreihe werden die Übergänge an den Werkstoffgrenzen der Probenkörper analysiert, die sowohl mit hohen, mittleren wie auch niedrigen zugeführten Gesamtenergien gelötet werden. Die Gesamtheit dieser untersuchten Proben lässt weder an den Übergängen Stahl-Lot oder Lot-Kupferschicht noch an den Übergängen Lot-Schneidstoff Diffusionszonen erkennen. Dieses Phänomen, dass die Zonen unterhalb der Nachweisgrenze liegen, wurde bereits bei Laserstrahlötverbindungen von Stahlwerkstoffen dokumentiert [94,135] und kann durch die Versuchsergebnisse dieser Arbeit auch für das Laserstrahllöten von Stahl und Hartmetall bestätigt werden. Als Beispiel der durchgeführten REM-Untersuchungen ist im Bild 8-31 der Übergang zwischen Stahl und Lotwerkstoff mit 100.000 facher Vergrößerung dargestellt.

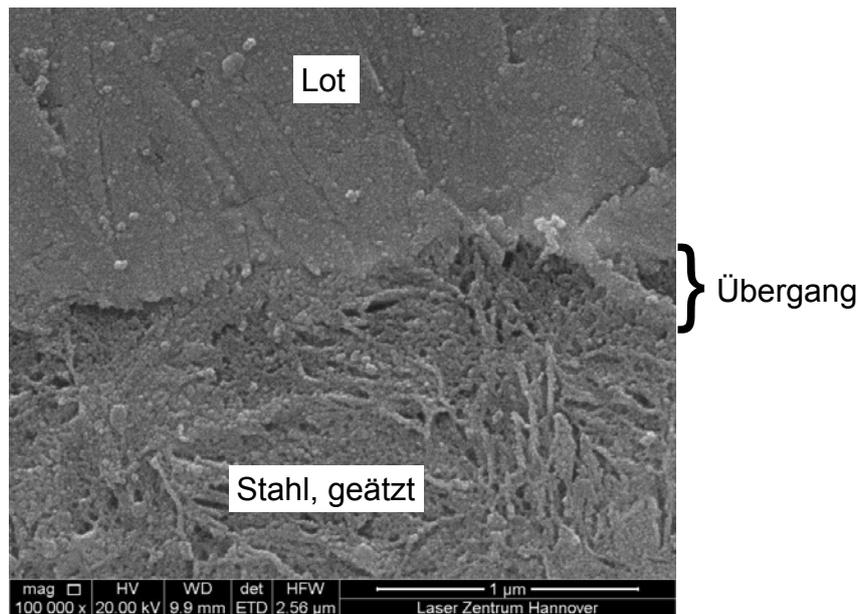


Bild 8-31: Beispielhafte REM-Untersuchung des Werkstoffübergangs Stahl-Lot

Deutlich erkennbar sind hier die scharfen Grenzen zwischen dem vorwiegend martensitischen Stahlwerkstoff und dem Lot. Das Lot hat die Strukturen auf der Stahloberfläche vollständig umschlossen. Dieser perfekt ausgeformte Übergang weist keinerlei mikroskopische Fehlstellen auf und lässt keine Diffusionszonen erkennen.

8.7 Statische Festigkeitsuntersuchungen

Die Hauptaufgabe der Lötverbindung für den Einsatz des Sägeblattes ist die Bereitstellung der Verbundfestigkeit zwischen den einzelnen Komponenten. Zur Qualifizierung des entwickelten Verfahrens werden Abscherversuche an induktiv- und lasergelöteten Sägeblättern einander gegenübergestellt. Ebenso wird die Härte des Stammblattes zur Identifizierung der durch den Wärmeeintrag beeinflussten Bereiche gemessen.

8.7.1 Bewertung der Gefügehärte

Die Charakterisierung der Stahlbeeinflussung im Hinblick auf die resultierende Härteverteilung wird durch die Härteprüfung nach Vickers entsprechend der DIN EN ISO 6507 [136] mit einer Prüfkraft von 1,96 N ($HV_{0,2}$) und einer Eindringzeit von 20 Sekunden an Querschliffen durchgeführt. Die Messpunkte werden in einem Abstand von 0,5 mm gesetzt und optisch vermessen. Die Härtemessung erlaubt einen direkten Vergleich der Verfahren untereinander, da das Prüfverfahren, im Gegensatz zu anderen mechanischen Prüfverfahren, nicht durch Einflüsse wie die Größe der Lötzone beeinflusst wird.

Die einzelnen Ausgangskomponenten der Fügeverbindung weisen die in der Tabelle 8-3 dargestellten sehr unterschiedlichen Härtewerte auf. Der höchste Gradient besteht zwischen dem Schneidstoff und der um mehr als 33 % weicheren

Kupferzwischenlage. Der Lotwerkstoff weist im gelöteten Zustand ohne Anschmelzungen der Zwischenlage eine Härte von $117 \text{ HV}_{0,2}$ auf.

Tabelle 8-3: Härtewerte der Komponenten des Werkstoffverbundes

Werkstoff	Härtewerte [$\text{HV}_{0,2}$]
Schneidstoff (P25)	2030
Lot im verlöteten Zustand	117
Kupferzwischenlage	61
Grundwerkstoff 75Cr1	477

Bei den Versuchsträgern mit zu hoher Solltemperatur ist in dem gebildeten Lot-Kupfer-Mischgefüge eine ungewollte Härtesteigerung gegenüber den Einzelkomponenten auf $120 \text{ HV}_{0,2}$ zu messen. Eine weichere Zwischenlage ist nicht mehr nachweisbar.

Der unbeeinflusste Stahlwerkstoff des Stammblattes ist durch eine für perlitisch-martensitisches Gefüge zu erwartende Härte von $477 \text{ HV}_{0,2}$ gekennzeichnet. Im Bereich der Wärmeeinflusszone ist eine Steigerung der Härte auf für Martensit charakteristische Werte von $850 - 890 \text{ HV}_{0,2}$ zu messen.

Im Bild 8-32 sind im linken Teil die Härteeindrucklinien in der Prinzipskizze sowie auf der rechten Seite am realen Objekt dargestellt. Parallel zum Schneidensitz werden Messpunkte gesetzt, die an der Flanke des Stammblattes starten. Die Messpunkte auf den Härteeindrucklinien sind abweichend zur Norm nicht äquidistant verteilt. Die Auflösung wird im Bereich hoher Gradienten durch geringe Abstände zwischen den Messpunkten erhöht, um eine möglichst exakte Identifizierung der Härteverläufe zu ermöglichen. Wenn sich auf der Härteeindrucklinie die Werte der Stammblattgrundhärte einstellen, wird mit der nächsten Linie fortgefahren, bis auch hier ausschließlich die Stammblattgrundhärte gemessen wird.

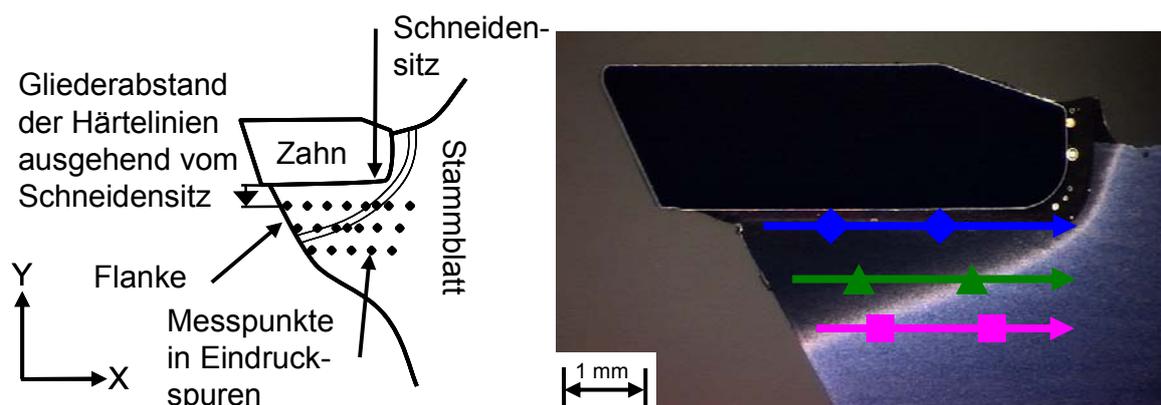


Bild 8-32: Härteeindrucklinien in der Prinzipskizze und am realen Bauteil im Schliff

In den folgenden zwei Abbildungen sind die Ergebnisse der Härteprüfung von zwei für das Laserstrahllöten charakteristischen Probenkörpern gegenübergestellt. Auf der Abszisse ist der Abstand der einzelnen Härteeindruckpunkte ausgehend von der

Flanke des Stammblattes aufgetragen. Die Ordinate entspricht der Maßskala der dazugehörigen Härtewerte.

Im Bild 8-33 sind beispielhaft die Härteverläufe einer mit 200 W (dieser Parametersatz liegt in der Mitte des Prozessfensters) und im Bild 8-34 die Härteverläufe einer mit 150 W Leistung lasergelöteten Probe dargestellt. Gemeinsam ist diesen Proben die Lötzeit von 2 Sekunden, die Solltemperatur von 690°C und die Sägeblattgeometrie 1 nach Tabelle 5-1.

Die blaue Hartelinie (Kennzeichnung Kreis) im Bild 8-33 mit 1 mm Distanz zum Schneidensitz ist bis 3,2 mm Abstand von der Flanke des Stammblattes durch eine Aufhärtung auf bis zu 890 HV_{0,2} gekennzeichnet. Auf der grünen 2 mm-Härtelinie (Kennzeichnung Dreieck) ist eine leichte Härtereduktion auf ca. 360 HV_{0,2} identifizierbar. Diese Reduktion kennzeichnet den Übergang zwischen Wärmeeinflusszone und Grundwerkstoff. Während des Lötvorganges wird diese Zone nur kurzzeitig und geringer als die eigentliche Wärmeeinflusszone erwärmt. Hierdurch werden Anlassvorgänge begünstigt, die in diesem Bereich zur Härtereduktion führen. Die magentafarbene (Kennzeichnung Quadrat) und 3 mm vom Schneidensitz entfernte Linie ist ausschließlich durch die Härtewerte des unbeeinflussten Grundgefüges gekennzeichnet.

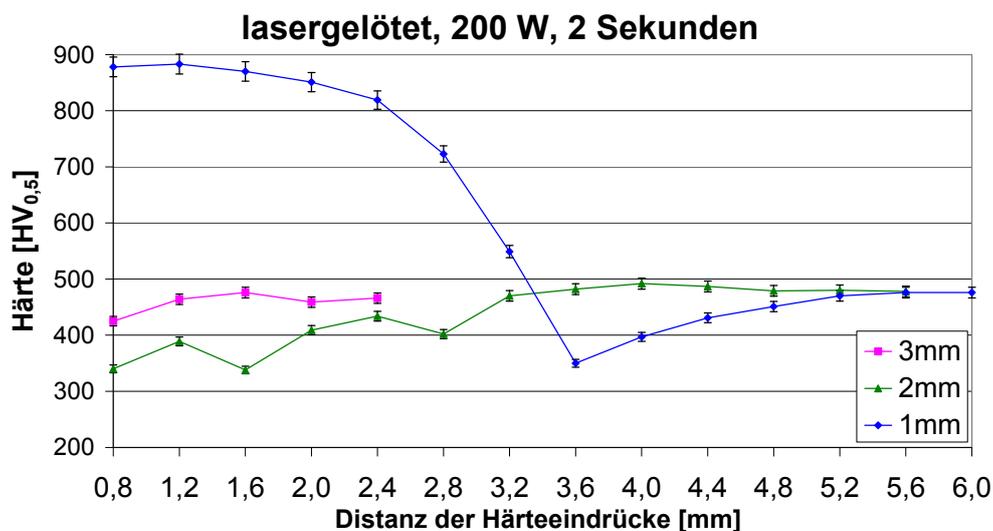


Bild 8-33: Verlauf der Härtemesspunkte parallel zum Schneidensitz, bei mit 200 W und in 2 Sekunden lasergelöteten Proben

Die bei 200 W Laserleistung gemessene Aufhärtung kann durch die Anpassung des Parametersatzes vermieden werden. Bei einer Leistungsreduktion um 50 W sinken die zugeführte Energie und die Wärmebeeinflussung des Stammblattes. So sind für die Härteverteilung bei einer mit 150 W gelöteten Probe (im Bild 8-34 dargestellt) keine über Grundwerkstoffniveau erhöhten Härtewerte festzustellen. Die hier bewusst nur 0,1 mm vom Schneidensitz entfernte blaue Linie (Kennzeichnung Punkt) zeigt eine Reduktion der Härte um ca. 80 HV_{0,2}. Diese Reduktion resultiert aus der fehlenden Stützwirkung des Gefüges, obwohl in der WEZ eine größere Härte zu erwarten wäre. In einem Abstand von 1 mm zum Schneidensitz ist nur in einem

kleinen Bereich ein zudem reduzierter Härteverlust von ca. 30 HV_{0,2} detektierbar. In einem Abstand von 2 mm ist keine Beeinflussung der Gefügehärte mehr zu erkennen.

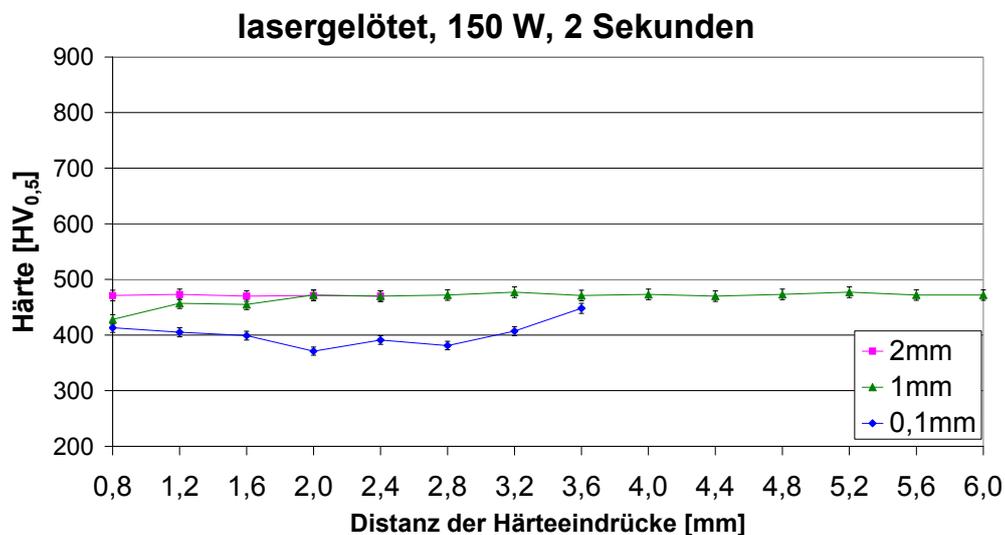


Bild 8-34: Verlauf der Härtemesspunkte parallel zum Schneidensitz, bei mit 150 W und in 2 Sekunden lasergelöteten Proben

Demgegenüber sind Proben der induktivgelöteten Sägeblätter aus aktueller Serienfertigung durch großflächige Änderungen der Gefügehärte gekennzeichnet. Bis zu einem Abstand von 7 mm zum Schneidensitz werden Steigerungen der Stahlgefügehärte auf bis zu 850 HV_{0,2} gemessen. Diese Bereiche gesteigerter Härte reichen zudem weiter in das Stammblatt hinein. So können gesteigerte Härtewerte bis zu 7 mm von der Flanke entfernt erfasst werden. Die im Diagramm im Bild 8-35 aufgetragenen Härtelinien zeigen zudem bis zu einem Abstand von 10 mm vom Schneidensitz eine um ca. 100 HV_{0,2} geringere Härte entsprechend dem charakteristischen Verhalten beim Übergang von beeinflusstem zu unbeeinflusstem Stahlgefüge. Ab einem Abstand von 11 mm zum Schneidensitz werden nur die Härtewerte des unbeeinflussten Grundwerkstoffes gemessen.

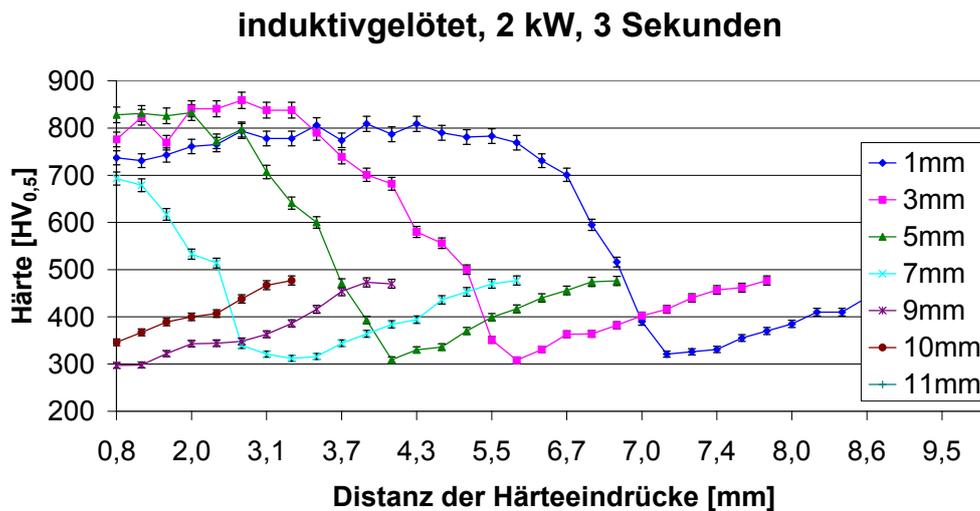


Bild 8-35: Verlauf der Härtmesspunkte parallel zum Schneidensitz, bei mit 2 kW und in 3 Sekunden induktionsgelöteten Proben

Zusammenfassend ist bei den lasergelöteten Proben eine deutlich kleinere, durch die Lötwärme veränderte Gefügezone zu identifizieren. Mit nur 5 bis 7 mm² bei den mit 200 W und in 2 Sekunden lasergelöteten Proben ist eine um ca. 4/5 gegenüber dem Induktionsverfahren verkleinerte beeinflusste Fläche messbar.

Insbesondere konzentriert sich die wärmebeeinflusste Fläche mehr auf die direkt unterhalb des Schneidensitzes lokalisierte vordere Kante des Stammblattes.

Durch Reduktion der zugeführten Leistung wird der Lötprozess etwas weniger robust. Die infolge des Lötprozesses auftretenden Härtesteigerungen können dabei gänzlich vermieden werden. Der lokal auftretende geringe Verlust an Härte kann als unkritisch angesehen werden, da das Stammblatt auch in diesem direkt an das Lot angrenzenden Bereich noch über eine um den Faktor 3 gegenüber dem Lot und um den Faktor 6 gegenüber der Kupferzwischenlage erhöhte Härte verfügt.

8.7.2 Abscherversuche zur Ermittlung der Verbundfestigkeit

Zur Bestimmung der Festigkeit des gesamten Bauteils, die sich nicht nur aus der Härte des Stahlgefüges, sondern auch aus weitere Einflussfaktoren wie Fehlstellen im Lot, Benetzungsverhalten, aber auch Schädigungen durch Risse des Schneidstoffes zusammensetzt, werden die fertig gestellten Sägeblätter einer zerstörenden Prüfung auf Scherfestigkeit unterzogen. Es gibt zur Ermittlung der Festigkeit gelöteter Sägeblätter kein standardisiertes und genormtes Verfahren. Bei der im Folgenden angewendeten zerstörenden Prüfung handelt es sich um das in der Sägenfertigung fast ausschließlich angewendete, Verfahren zur Messung der Scherfestigkeit. Der Ablauf dieses Prüfverfahrens wird im Kapitel 6.7.2 erläutert.

Im Bild 8-36 sind vergleichend die arithmetischen Mittel der Messkollektive der Scherkräfte induktiv gelöteter Sägeblätter (2 kW und 3 Sekunden) [137] zu lasergelöteten Sägeblättern mit 150 Watt in 2 Sekunden, 200 Watt in 2 Sekunden und 200 Watt in 2,5 Sekunden Lötzeit gegenübergestellt.

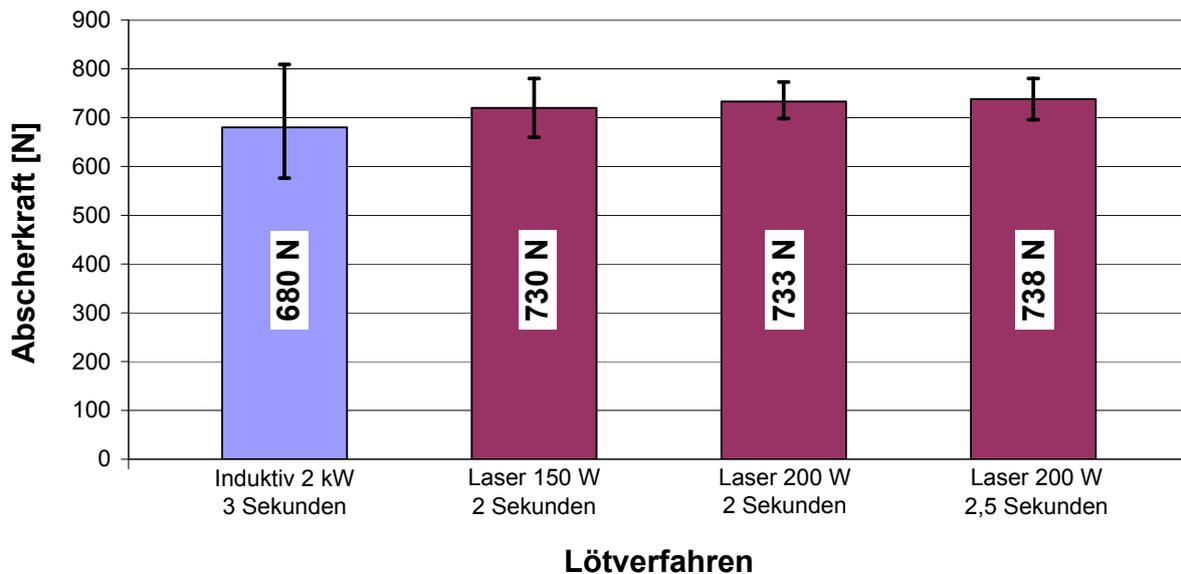


Bild 8-36: Vergleich der Abscherkräfte von induktiv - und lasergelöteten Proben verschiedener Parametersätze mit 150 W und 2 Sekunden, 200 W und 2 Sekunden, 200 W und 2,5 Sekunden

Die lasergelöteten Proben der drei Parametersätze besitzen im Vergleich zu induktivgelöteten Proben eine um 8% bis 9% höhere Festigkeit. Um denselben Faktor erhöht sich auch die flächenbezogene Scherkraft mit 150 N/mm² bis 152 N/mm² beim Laserstrahllöten im Vergleich zu 139 N/mm² beim Induktivverfahren.

Das Aussehen der Bruchflächen der auf Scherung geprüften Proben zeigt bei allen lasergelöteten Versuchsträgern (150 Watt in 2 Sekunden, 200 Watt in 2 Sekunden und 200 Watt in 2,5 Sekunden Lötzeit) eine kupferfarbene Oberfläche. Dies ist ein sicheres Indiz für einen Bruch in der Kupferzwischenlage. Beispielhaft ist im Bild 8-37 vergleichend im linken Teil die Bruchfläche einer Laserlötverbindung bei Versagen in der Kupferzwischenlage und im rechten Teil die Bruchfläche einer Induktivlötverbindung bei Versagen an der Kontaktfläche Lot-Hartmetall dargestellt.

Der Bruchverlauf in der Kupferzwischenlage bzw. an der Überganszone Kupferzwischenlage-aufplattierter Lotwerkstoff findet im gewollt schwächsten Teil der Verbindung statt und repräsentiert dadurch die bestmöglichen Verbindungseigenschaften. Der Bruchverlauf zeigt in diesem Fall die Form eines duktilen Bruchs.

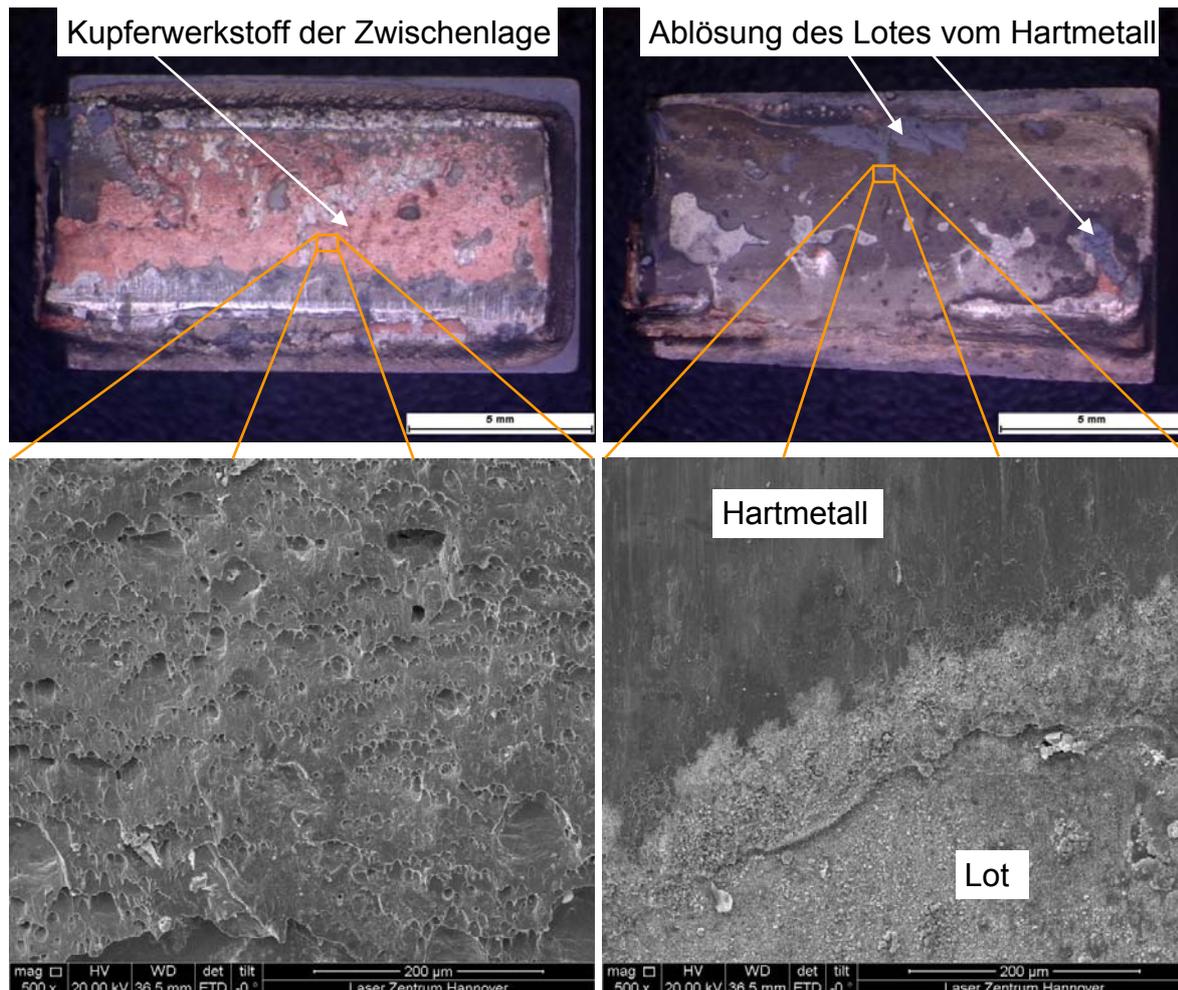


Bild 8-37: Bruchfläche einer lasergelöteten Verbindung bei Versagen in der Kupferzwischenlage (links) und einer induktivgelöteten Verbindung bei Versagen an der Kontaktfläche Lot-Hartmetall (rechts). Oben lichtmikroskopische Aufnahmen, unten REM-Bilder

Bei den induktivgelöteten Proben, die durch eine geringere Festigkeit gekennzeichnet sind, erfolgt der Bruch zumeist auf der Hartmetallseite der Lötverbindungen. Hierbei sind in lichtmikroskopischen und REM-Untersuchungen Ablösungen des Lotwerkstoffes vom Hartmetall der Schneiden zu erkennen. Es wird vermutet, dass ein Versagen der Lötverbindung hierbei von diesen Ablösungen ausgeht und sich durch den Lotwerkstoff bis zur Zerstörung der gesamten Lötverbindung fortsetzt.

Von besonderer Bedeutung ist neben den gemittelten Werten die Streuung der gemessenen Scherkräfte, da für ein Sägeblatt ähnlich wie bei einer Kette das Versagen des schwächsten Gliedes das Versagen des gesamten Bauteils bedingt.

Hier ist der Laserprozess durch eine signifikant geringere Schwankung der Werte gekennzeichnet. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurde für das Induktionslöten eine Streuung der Werte zwischen maximal 809 N und 576 N gemessen. Die Schwankungsbreite beträgt hierdurch 233 N. Die Abscherwerte der drei unterschiedlichen Parametersätze des Laserstrahlötens variieren nicht nur

untereinander (Proben mit gleichem Parametersatz), sondern auch zwischen den Parametersätzen um 50% weniger.

Die Lötverbindung mit der geringsten Festigkeit ist in dieser Messreihe beim Induktionslöten mit 576 N und beim Laserstrahllöten mit 636 N gegeben. Durch den Einsatz des Lasers erfolgt somit eine Steigerung der Verbundfestigkeit des die Festigkeit des gesamten Werkzeugs bestimmenden Zahns um 60 N bzw. 10%.

8.8 Dynamische Festigkeitsuntersuchungen

Im Rahmen der statischen Festigkeitsuntersuchungen wurden bereits eine erhöhte Festigkeit sowie geringere Festigkeitsschwankungen bei lasergelöteten Sägeblättern nachgewiesen. Die Überprüfung der dynamischen Festigkeit und der Festigkeit als Folge des Einsatzes erfolgt im Dauerschnittversuch. Mit Hilfe einer automatischen Kreissägemaschine werden hierzu die Sägeblätter auf Ihre Gebrauchseigenschaften getestet.

Trotz der bereits in den vorigen Kapiteln nachgewiesenen erhöhten Festigkeit lasergelöteter Verbindungen können im praktischen Einsatz in den licht- und rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen nicht detektierte Bauteilschäden, z. B. Risse, zu einer Zerstörung der Lötverbindung und / oder einzelner Komponenten der Werkstoffpaarung führen. Hierdurch ist der Dauerschnittversuch ein wichtiges Verfahren, welches in der Sägenfertigung zur Qualitätssicherung angewendet wird.

Der Dauerschnittversuch beinhaltet im Vorfeld zunächst eine lichtmikroskopische äußere Lötnahtbegutachtung. Anschließend durchlaufen die Versuchsträger bei einem Sägeblatthersteller die üblichen dem Lötprozess nachgeschalteten Fertigungsschritte. Hierzu zählen das Nassschleifen, das Ofenanlassen und das Richten.

Speziell bei den Sägeblättern der Geometrie 3 nach Tabelle 5-1 umfasst dies auch eine optische Aufwertung der Oberfläche durch Sandstrahlen.

Nach einzelner Aufspannen der Sägeblätter in der automatischen Kreissägemaschine „Altendorf“ (vgl. Kapitel 6.7.3) zeigen die Schnittversuche im Material Eiche-Vollholz für alle untersuchten Sägeblätter nur einen geringen Verschleiß der Schneidkante. Die beidseitig melaminbeschichtete Spanplatte hingegen führt zu erhöhtem, aber für die jeweilige Schneidstoff-Zerspanwerkstoff-Kombination üblichem Verschleiß an der Schneidkante (Hauptschneide).

Im Bild 8-38 sind die Versuchsträger der Geometrie 1 nach Tabelle 5-1 bei einem üblichen Schnittgeschwindigkeit $v_c = 70 \text{ m/s}$ und einem Zerspanweg von 50 lfm in melaminbeschichteter Spanplatte dargestellt. Diese Versuchsträger wurden mit 200 W in 2,5 Sekunden lasergelötet. Gezielt werden in diesem Versuchsprogramm Verbindungen getestet, die mit etwas verlängerter Lötzeit gefertigt wurden, da durch die erhöhte zugeführte Energie Bauteilschäden eher zu erwarten sind.

Der Verschleiß der Hauptschneide ist am stärksten an der Kantenverrundung am rechts- und linksseitigen Ende der Schneide zu erkennen.

Von besonderer Bedeutung ist jedoch, dass die eingesetzten lasergelöteten Sägeblätter während und nach dem Praxistest eine gute Anbindung der Lötstelle zeigen. Ein Ausbrechen von einzelnen Zähnen sowie eine Bildung von Rissen im Schneid-, Lot- oder Stammblattwerkstoff ist nicht zu verzeichnen.

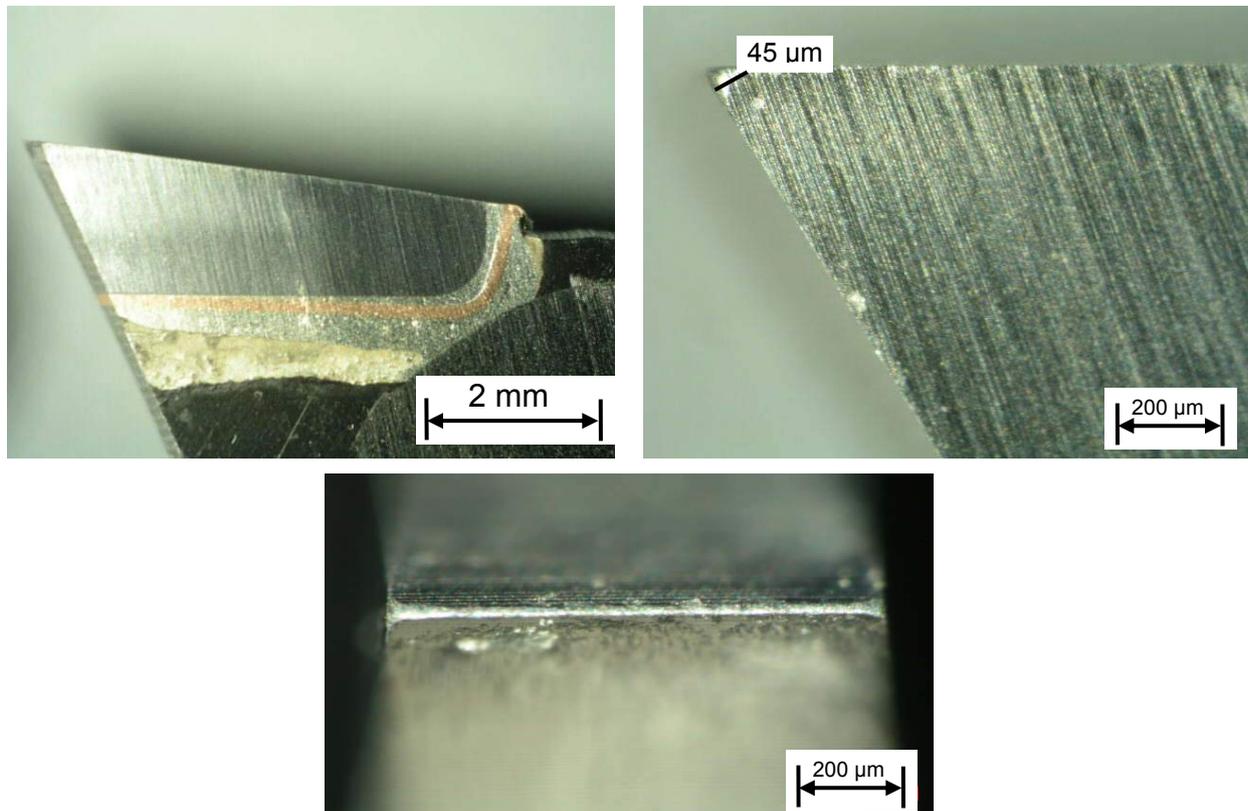


Bild 8-38: Sägeblatt mit 220 mm Durchmesser nach 50 lfm Spanplatte (links oben Übersicht eines Zahns, rechts oben Hauptschneide des Zahns seitlich, unten Hauptschneide des Zahns Ansicht von vorne)

Analoge Ergebnisse zeigen auch lasergelötete Versuchsträger mit größerem Durchmesser. Beispielhaft sind im Bild 8-39 Versuchsträger mit einem Sägeblattdurchmesser von 400 mm (Geometrie 3 nach Tabelle 5-1) dargestellt. Die Versuchsträger dieser Serie wurden mit 680 W in 5 Sekunden Bestrahlzeit lasergelötet. Die dargestellten lichtmikroskopischen Aufnahmen wurden nach 160 lfm Zerspanweg in melaminbeschichteter Spanplatte mit dem dafür üblichen Schnittgeschwindigkeit $v_c = 70$ m/s aufgenommen.

Es ist ebenfalls ein Verschleiß der Hauptschneide durch Verrunden detektierbar. Ein Ausbrechen einzelner Sägezähne sowie die Bildung von Werkstofftrennungen oder Rissen sind ebenfalls weder im Schneidstoff und Stammblatt noch in der Fügezone erkennbar.

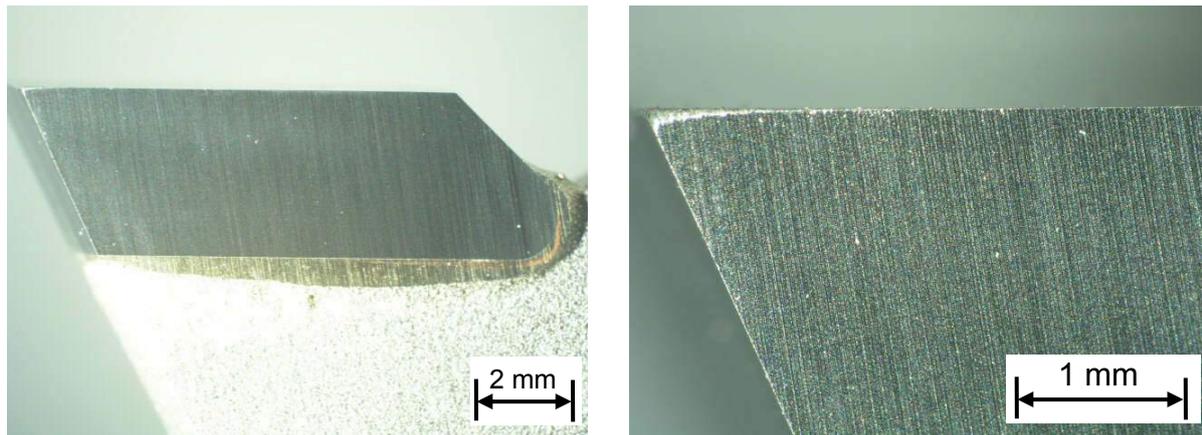


Bild 8-39: Sägeblatt mit 400 mm Durchmesser nach 160 lfm Spanplatte (links oben Übersicht eines Zahns, rechts oben Hauptschneide des Zahns seitlich)

Die Ergebnisse der Praxistests aller Versuchsserien lassen sich wie folgt zusammenfassen: Es wurden keine Risse im Sägezahn, im Lot oder im Stammbrett festgestellt, die z. B. aus dem Laserlötprozess resultieren und bei den vorgeschalteten Untersuchungen unentdeckt blieben. Ein Ausbrechen einzelner Zähne wurde nicht beobachtet. Die Verschleißuntersuchungen wurden mittels Lichtmikroskop durchgeführt und zeigten wie erwartet einen deutlich stärkeren abrasiven Verschleiß bei Sägeversuchen in Spanplatte als in Eichevollholz. Alle Kreissägeblätter wurden nur im neu geschliffenen Lieferzustand eingesetzt. Simulierter Stillstand und simulierte Störungen der Kreissägemaschine und damit wiederholtes Unterbrechen des Zerspanprozesses sowie erneutes mit voller Schnittgeschwindigkeit in Eingriffbringen haben nicht zu Zahnbrüchen der lasergelöteten Blätter geführt.

Abschließend zu dem praktischen Einsatz kann den lasergelöteten Sägeblättern eine vollständige Einsatzfähigkeit attestiert werden.

8.9 Simulation der Wärmeverteilung beim Laser- und Induktivlöten

Auf Basis der im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse wird zum Vergleich des laser- und induktivgestützten Lötverfahrens eine Simulation der Wärmeverteilung mit dem kommerziell verfügbaren Programm ANSYS® und der ANSYS® Workbench-Plattform angefertigt. Als Ergebnis werden die Temperaturverteilungen in einem Sägeblattsegment zu verschiedenen Zeitpunkten bestimmt. Als Eingangsdaten dienen die Umgebungsbedingungen, die Lötprozessparameter und die im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe von Pyrometern gemessenen Temperaturverläufe sowie Materialkennwerte und die Art der Energieeinkopplung in das Bauteil. Die Ergebnisse der erstellten thermischen Prozesssimulation werden anhand von an metallographischen Schliffen gemessenen Härteverteilungen und detektierten Wärmeeinflusszonen validiert, um die Plausibilität der Bauteilmodellierung zu gewährleisten. Die Auswirkungen des Lötprozesses auf die Gestaltveränderungen der Bauteile sowie der Wärmeabfluss in die Spanntechnik werden für die Simulationsrechnung in guter Näherung vernachlässigt. Weiterhin nicht berücksichtigt sind bei diesem Modell der Phasenübergang des metallischen Lotbereiches

vom festen zum flüssigen Zustand und im Zuge der Erstarrung wieder zurück zum festen Zustand sowie die Verdampfungsvorgänge des pastösen Flussmittels.

Die komplexen Finite-Elemente-Berechnungen, die im Rahmen des Bearbeitungsprogramms ANSYS® bzw. ANSYS® Workbench ablaufen, sollen im Folgenden anhand eines nachvollziehbaren Beispiels in Auszügen dargelegt werden. Als Grundlage dient die Wärmeleitung über einen sich verjüngenden Querschnitt bei einseitiger Wärmezufuhr [138].

Berechnet wird mittels eines zwei-elementigen Ansatzes die Wärmeleitung durch den Schneidstoff bei Laserbestrahlung. Die Kontur des Schneidstoffes ist durch die Ausbildung der Nebenfreifläche in konischer Form gekennzeichnet. Die leichte Schräge am Zahnrückens sowie die Abschrägung der Hauptschneide werden allerdings für diese Modellrechnung vernachlässigt.

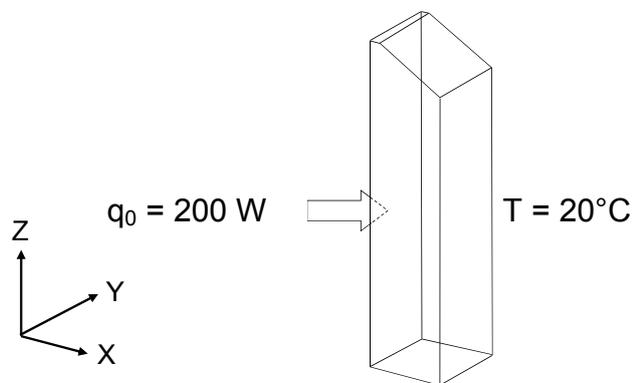


Bild 8-40: Modell des Schneidwerkstoffes

Nach Abschluss der Modellbildung ist der Querschnitt des Zahns in der X-Y-Ebene, wie in der obigen Abbildung, gegeben. An der linken Fläche ist er mit dem Lot bzw. dem Stammblatt in Kontakt und wird hierdurch im Rahmen dieser vereinfachten Modellrechnung durch den Wärmeabfluss ins Stammblatt auf 20°C gehalten. An der rechten Fläche erfolgt durch einwirkende Laserstrahlung (für diese Rechnung als vollflächige Bestrahlung angenommen) eine Einleitung von 200 W Leistung. Der Schneidstoff hat eine Leitfähigkeit von $\lambda_{th} = 80 \text{ W/mK}$. Die Breite (B) der Schneide beträgt 1,7 mm und die Dicke (D_S) 2,2 mm.

Am linken Ende beträgt die Länge der Schneide (L) 5,5 mm, am rechten Ende 5 mm. Als Querschnittsflächen werden unter diesen Randbedingungen $12,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ bzw. $11 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ berechnet. Die Eingangsdaten dieser FEM-Modellrechnung sind in der Tabelle 8-4 zusammengefasst.

Tabelle 8-4: Gegebene Werte der FEM-Modellrechnung

Eigenschaft	Wert
Last	$q_0 = 200 \text{ W}$
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_{th} = 80 \text{ W/mK}$
Elementdicke, Wärmeleitungsstrecke	$D_S = 2,2 \text{ mm}$
Querschnitt	$A(x) = (12,1 - 11) \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$

Die im Folgenden dargelegte Berechnung gliedert sich in sechs Bereiche, wobei der erste Teil, die so genannte Idealisierung, bereits durch die getroffenen Vernachlässigungen zu einem Teil abgeschlossen ist. Ergänzend hierzu wird dieser Berechnung ein stationärer, linearer Fall zu Grunde gelegt. Dies bedeutet, dass eine konstante Energiezufuhr durch die Laserstrahlquelle sowie eine lineare und eindimensionale Wärmeübertragung angenommen wird. Ebenfalls wird in diesem ersten Schritt der Elementtyp zwei-dimensionales Wärmeleitungselement auf Grund der linearen Wärmeleitung zwischen Anfangs- und Endfläche der Schneide festgelegt [139].

Im zweiten Schritt wird das Bauteil in Bereiche eingeteilt (diskretisiert), bei dieser Modellrechnung in zwei Bereiche (Elemente), vgl. Bild 8-41. Für jedes Element wird ein linearer Ansatz der noch unbekanntes Temperaturfunktion $T(x)$ gewählt. Die wichtigste einzuhaltende Randbedingung ist hierbei eine Temperaturgleichheit an den Verbindungsstellen der Elemente, den so genannten Knoten [140].

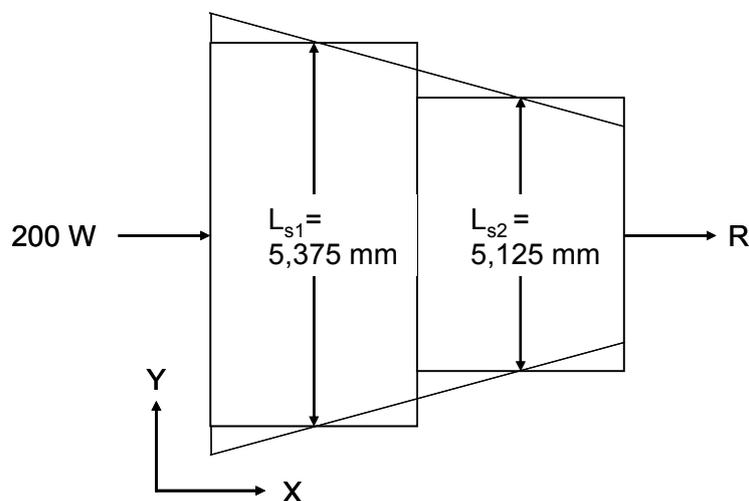


Bild 8-41: Aufteilung des Elementes in Bereiche mit gleichmäßiger Teilung

Bei dem in der obigen Darstellung skizzierten Elementtyp kann eine lineare Temperaturfunktion gewählt werden.

$$T(x) = 1 \cdot a + b \cdot x \quad (10)$$

Hierbei sind a und b freie Konstanten, für die im Folgenden die Temperaturen an den Knoten eingeführt werden. Die Temperaturfunktion ergibt sich durch Einsatz der Knotentemperaturen um die Ausgangsfunktion. Unter Verwendung der folgenden zwei Festlegungen ergibt sich mit der Schneidenlänge (L_s) und:

$$T(x=0) = b = T_1 \quad (11)$$

$$T(x=L_s) = b + a \cdot L_s = T_2 \quad (12)$$

mit
$$b = T_1 \quad \text{und} \quad a = \frac{T_2 - T_1}{L_s} \quad (13)$$

die Formel:

$$T(x) = \left(T_1 + \frac{T_2 - T_1}{L_s} \cdot x \right) \quad (14)$$

$$= \left(\frac{T_2}{L_s} \cdot x + T_1 - \frac{T_1}{L_s} \cdot x \right) \quad (15)$$

$$T(x) = \left(1 - \frac{x}{L_s} \right) \cdot T_1 + \left(\frac{x}{L_s} \right) \cdot T_2 \quad (16)$$

Werden die Formulierungen in den Klammern als so genannte Formfunktionen N_1 und N_2 beschrieben, so kann die Gesamtformel zu

$$T(x) = N_1(x) \cdot T_1 + N_2(x) \cdot T_2 \quad (17)$$

zusammengefasst werden, wobei

$$N_1(x) = 1 - \frac{x}{L_s} \quad \text{und} \quad N_2(x) = \frac{x}{L_s}$$

bedeuten. Weiterhin können die Formfunktionen N_i als Einheitstemperaturen betrachtet werden, indem T_1 und T_2 normiert werden.

$$T_1 = 1 \quad \text{und} \quad T_2 = 0 \quad \text{bzw.}$$

Der Ansatz der FEM, dessen zentraler Punkt die Ermittlung von Knotentemperaturen ist, ermöglicht auch die Betrachtung der Gradienten und der Wärmestromdichte mit demselben Ansatz. Es ergibt sich:

$$\text{grad } T(x) = \frac{dT(x)}{dx} = T'(x) \quad (18)$$

$$= \frac{d}{dx} [N] \cdot [T] = \frac{d}{dx} \left([N_1; N_2] \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} \right) \quad (19)$$

mit
$$\frac{d[N]}{dx} = \frac{d}{dx} [N_1; N_2] = [B_1; B_2] = [B] \quad (20)$$

folgt
$$\text{grad } T(x) = [B] \cdot [T].$$

Im Rahmen dieser Modellrechnung ist $[B]$ demnach:

$$[B] = \frac{d}{dx} \left[1 - \frac{x}{L_s}; \frac{x}{L_s} \right] = [B_1; B_2] = \left[-\frac{1}{L_s}; \frac{1}{L_s} \right] \quad (21)$$

Im allgemeinen Fall sind Gradienten in verschiedenen Koordinatenrichtungen aufzustellen. Da in diesem Beispiel ein Gradient nur in X-Richtung auftritt, kann T' als Spaltenvektor über die Gleichung:

$$[T'] = [B] \cdot [T] \quad (22)$$

berechnet werden.

Die ebenfalls gesuchte Wärmestromdichte ist mit dem berechneten Gradienten über die Materialkonstante Wärmeleitfähigkeit λ_{th} verknüpft:

$$q'' = \lambda_{th} \cdot T' = \lambda_{th} \cdot \frac{dT}{dx} \quad (23)$$

In Matrixschreibweise mit λ_{th} als Wärmestromdichtevektor (und im allgemeinen Fall als Wärmestrommatrize) $[D_w]$ folgt:

$$[q''] = [D_w] \cdot [B] \cdot [T]. \quad (24)$$

Im dritten Schritt wird ausgehend von den vorherigen Betrachtungen das Gleichungssystem erstellt. Das Potenzial π setzt sich aus dem Potenzial der inneren Energie π_i und dem Potenzialen der von außen durch die Laserstrahlung zugeführten und durch Verluste abgeführten Energien π_a zusammen.

$$\pi = \sum_{Elemente} (\pi_i)_e + (\pi_a)_k + \left(\sum_{Elemente} (\pi_a)_e \right) = Min. \quad (25)$$

Das Potenzial der inneren Energien π_i entspricht der Summe der Potenziale der einzelnen Elemente π_{ie} . Das Potenzial der äußeren Energien π_a hingegen ergibt sich aus der Summe der Energien, die an den Knoten wirken (π_{ak}) und den Energien, die auf die Elemente wirken (π_{ae}). Äußere Energiezufuhr im Elementbereich wird im Rahmen dieser Modellrechnung nicht betrachtet, wodurch der Term π_{ae} entfällt.

π_{ie} für das gesamte Volumen (V) des jeweiligen Elementes errechnet sich aus:

$$\pi_{ie} = \frac{1}{2} \cdot \int_0^V [T']^T \cdot [q''] dV. \quad (26)$$

Mit der Formel (22), deren Transponierter und der Formel (24) ergibt sich das innere Potenzial zu:

$$\pi_{ie} = \frac{1}{2} \cdot \int_0^V [T']^T \cdot [B]^T \cdot [D_w] \cdot [B] \cdot [T] \cdot dV. \quad (27)$$

Das Potenzial der äußeren Energien an den Knoten errechnet sich aus dem Produkt der Knotentemperaturen (bzw. deren Gradienten) und Knotenlasten q (von außen einwirkende Temperaturen):

$$\pi_{ak} = -[T']^T \cdot [q] \quad (28)$$

Das Gesamtpotenzial π ergibt sich damit zu:

$$\pi = \frac{1}{2} \cdot \left(\sum_{Elemente} \int_0^V [T']^T \cdot [B]^T \cdot [D_w] \cdot [B] \cdot [T] \cdot dV \right) - [T']^T \cdot [q]. \quad (29)$$

$$\pi = \frac{1}{2} \cdot \left(\sum_{Elemente} [T']^T \cdot \int_0^V [B]^T \cdot [D_w] \cdot [B] \cdot dV \cdot [T] \right) - [T']^T \cdot [q]. \quad (30)$$

Aus der Forderung des Minimums der Energien, gemäß dem Ansatz der FEM ergibt sich die Leitfähigkeitsmatrix für das gesamte System.

$$\frac{\partial \pi}{\partial [T]} = 0 = \cdot \left(\sum_{\text{Elemente } 0}^v \int [B]^T \cdot [D_w] \cdot [B] \cdot dV \right) \cdot [T] - [q]. \quad (31)$$

In dieser Modellrechnung zur Ermittlung des Gesamtpotenzials π ergibt sich für das hier dargestellte 2-elementige Modell des Sägezahns die folgende Formel. Die Temperatur T_1 steht hierbei für die Temperatur in der laserbestrahlten Zone, die Temperatur T_2 für die Temperatur am Übergang des ersten zum zweiten Element und die T_3 für die Temperatur am Kontaktpunkt Sägezahn zum Stammblatt. Für die Variable q gilt dieselbe Betrachtung. A steht für die Querschnittsfläche der jeweiligen Elemente:

$$\pi = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix}^T \cdot \left\{ \begin{array}{ccc} \frac{\lambda_{th1} \cdot A_{m1}}{D_{S1}} & -\left(\frac{\lambda_{th1} \cdot A_{m1}}{D_{S1}}\right) & 0 \\ -\left(\frac{\lambda_{th1} \cdot A_{m1}}{D_{S1}}\right) & \frac{\lambda_{th1} \cdot A_{m1}}{D_{S1}} + \frac{\lambda_{th2} \cdot A_{m2}}{D_{S2}} & -\left(\frac{\lambda_{th2} \cdot A_{m2}}{D_{S2}}\right) \\ 0 & -\left(\frac{\lambda_{th2} \cdot A_{m2}}{D_{S2}}\right) & \frac{\lambda_{th2} \cdot A_{m2}}{D_{S2}} \end{array} \right\} \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (32)$$

Nach dem Einsetzen der Parameter und Lösen des Gleichungssystems, z. B. durch das Eliminationsverfahren nach Gauß, würden sich im vierten Schritt der Wert für den Wärmestrom und im fünften Schritt nach Rückrechnen die gesuchten Werte für den Temperaturverlauf und den Wärmestromdichteverlauf ergeben. Im sechsten Schritt erfolgt der Abgleich der simulierten Temperaturverläufe mit gemessenen Werten. Die Ergebnisse dieser Berechnungen bilden die Basis für die farbige visualisierten Darstellungen der Temperaturverläufe in den folgenden zwei Darstellungen.

Im Bild 8-42 ist die Temperaturverteilung beim Induktionslöten dargestellt, im Bild 8-43 zum Vergleich die Lasergelötete Variante. Das Temperaturspektrum wird in diesen Fällen durch Einfärben sichtbar gemacht. In der Legende kann abgelesen werden, welche Farbe einem bestimmten Temperaturbereich entspricht. Der obere (rote) Bereich entspricht in diesen Darstellungen einem Temperaturbereich zwischen 635°C und 775°C.

Visualisiert anhand der Simulationsrechnung erfolgt beim Induktionsverfahren nach Einschalten der Energiequelle zunächst eine Erwärmung des direkt von der Induktionsschleife umschlossenen Stammblattanteils und nahezu zeitgleich die Erwärmung der Hartmetallschneide. Ursächlich hierfür ist neben den sehr guten Wärmeleitungseigenschaften des Hartmetalls auch die Annahme einer idealen Kontaktfläche zwischen den Fügepartnern, sowie die Vernachlässigung der Flussmittelreaktionen. Im weiteren Verlauf des Vorganges setzt der Wärmefluss aus dem Stammblattmaterial in der Fügezone in die von der Lötstelle weiter entfernten Stammblattbereiche ein. Bei Erreichen der für das Fließen des Lotes und für die Diffusionsvorgänge erforderlichen Mindesttemperatur ist nicht nur wie gewünscht die Lötzone, sondern auch der vom Induktor umschlossene Stammblattbereich auf die Solltemperatur erwärmt. Durch die Wärmeleitung im Stahlwerkstoff erfolgt zeitgleich

ein großflächiges Ausbreiten der zugeführten Wärme in von der Lötstelle weiter entfernt gelegene Stammblattbereiche. Diese großflächige Wärmeausbreitung im Stammblatt wird anhand der Schlitze und detektierten Gefügeveränderungen bestätigt. Nach dem Abschalten der Energiequelle kühlt die gesamte Lötzone, durch für die Simulation angenommene freie nicht näher definierten Wärmeverluste (z. B. Strahlung), auf die Umgebungstemperatur ab.

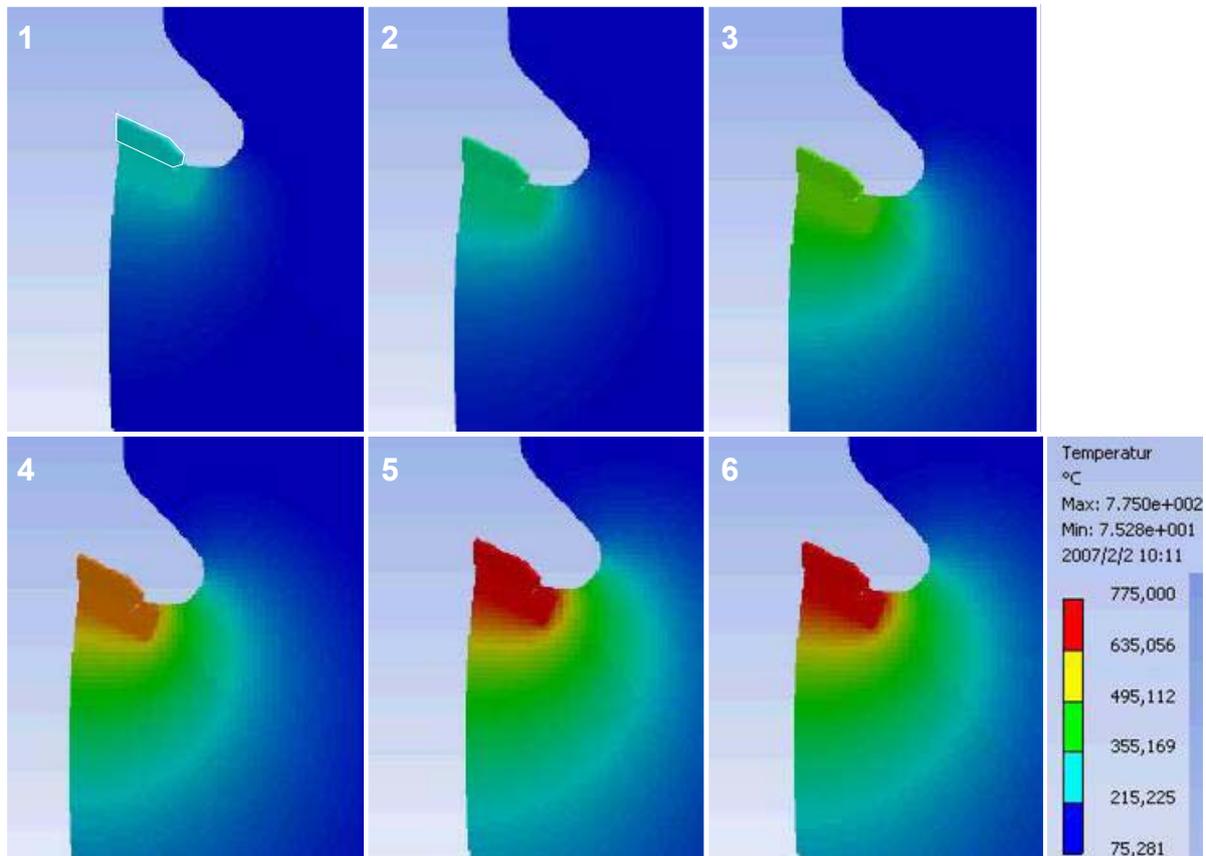


Bild 8-42: Simulation der Wärmeausdehnung beim Induktionslötverfahren, exemplarisch ist links oben das Schneidsegment angedeutet

Der Ablauf des simulierten Laserlötvorganges unterscheidet sich vom Induktionsverfahren signifikant. Nach dem Einschalten der Laserstrahlquelle erfolgt bei diesem im Laserlötautomaten umgesetzten Verfahren zunächst eine Erwärmung der Hartmetalloberfläche und infolge der guten Wärmeleitungsseigenschaften im Hartmetall eine Erwärmung der gesamten Schneide. Der im Vergleich zum Induktionsprozess vollständig geänderte Wärmefluss erfolgt hierbei von der Schneide zur Lötzone. Es ist hierdurch nicht wie bei der Induktion erforderlich, zunächst das Stammblatt und danach mittels Wärmeleitung die Lötzone zu erwärmen. An dieser Stelle zeigt sich der markante Unterschied des im Rahmen der Arbeit entwickelten Laserlötverfahrens zum Induktionsverfahren. Beim Laserstrahllöten ist die Fügezone bereits auf die erforderliche Mindesttemperatur erwärmt, bevor der Stahl des Stammblattes einer erhöhten Wärmebeeinflussung ausgesetzt wird. In der Simulation ist lediglich der direkt an der vorderen Kante unterhalb der Fügezone lokalisierte Stammblattanteil stärker erwärmt. Diese sehr

geringe Wärmeausbreitung im Stammblatt wurde ebenfalls anhand der Schlitze und detektierten Gefügeveränderungen bestätigt.

Nach dem Abschalten der Laserstrahlquelle kühlt auch hier die gesamte Lötzone, durch für die Simulation angenommene freie nicht näher definierten Wärmeverluste (z. B. Strahlung), auf die Umgebungstemperatur ab.

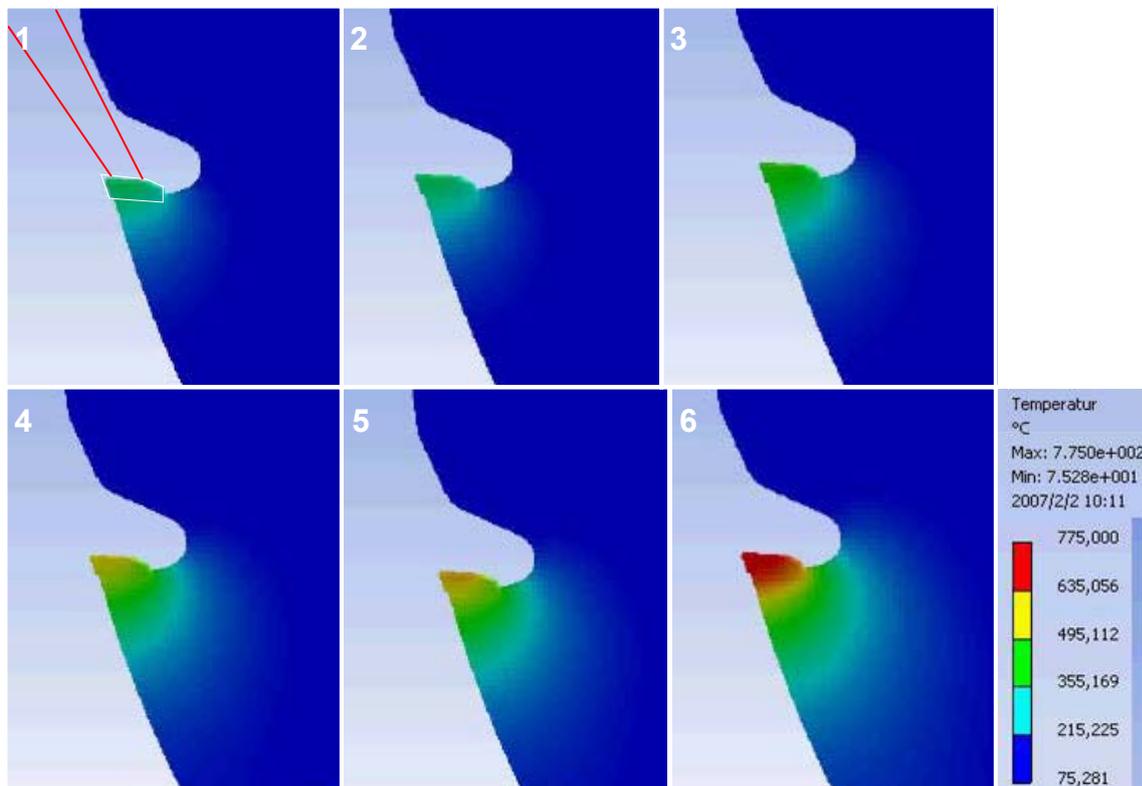


Bild 8-43: Simulation der Wärmeausdehnung beim Laserlötverfahren, exemplarisch ist links oben das Schneidsegment und der Laserstrahl angedeutet

Vergleichend kann eine signifikant größere erwärmte Zone beim Induktionslöten betragt werden. Die bei der Simulation im Zuge des Laserlötvorganges erwärmte Fläche ist weniger als halb so groß im Vergleich zum Induktionsverfahren.

Das im Rahmen dieser Arbeit erstellte und validierte Modell inklusive der modellierten Ersatzwärmequellen liefert für neue Sägeblattgeometrien eine Möglichkeit zur Abschätzung der bauteilinternen Wärmeausbreitung unter Berücksichtigung der materialeitigen Gegebenheiten.

So kann z. B. abgeschätzt werden, dass bei einer Verdoppelung der Schneidstoffgröße gegenüber der hier dargestellten Sägeblattgeometrie 1 nach Tabelle 5-1 eine um mehr als 50% stärkere Vergrößerung der erwärmten Zonen beim Induktionsverfahren im Vergleich zu nur 10% beim Laserlötverfahren zu erwarten ist.

9 Folgerungen und Ausblick: Bedeutung für die Praxis

9.1 Wirtschaftliche Aspekte

Verfahrenstechnisch entspricht der lasergestützte Lötprozess in einigen Teilen dem Induktionsprozess. Maschinenseitig identisch ist das Reservoir an Grund- und Betriebsstoffen sowie die Vorbereitung und Positionierung dieser Stoffe. Unterschiede bestehen in der Bauteilspanntechnik, der Steuerung und Regelung sowie insbesondere in der Lötwärmeerzeugung und dem Energietransport in der Maschine.

Neben den bereits dargelegten technologischen Vorteilen ist die detaillierte Betrachtung der Wirtschaftlichkeit eine Grundsäule für eine industrielle Etablierung des entwickelten Verfahrens.

Maßgebend für die Gegenüberstellung des induktiven und des lasergestützten Prozesses ist die Kalkulation der Maschinenstundensätze der Gesamtanlagen. Der Maschinenstundensatz (K_{MH}) ist definiert als die Summe aller maschinenbezogenen Kosten für ein Jahr pro Nutzungszeit in Stunden. Im Folgenden wird der Maschinenstundensatz auf Basis der Gleichung (33) berechnet.

$$K_{MH} = \frac{K_A + K_Z + K_R + K_E + K_I + K_W + K_H + K_P + K_{EIN}}{t_N} \quad (33)$$

Nach dieser Gleichung müssen die Abschreibungskosten (K_A), die Zinskosten (K_Z), die Raumkosten (K_R), die Energiekosten (K_E), die Instandhaltungskosten (K_I), die Werkzeugkosten (K_W), die Kosten für Hilfs- und Betriebsstoffe (K_H), die Programmierkosten (K_P) und die Einstellkosten (K_{EIN}) ermittelt werden. Die jährliche von der prozentualen Nutzungszeit bei Verfügbarkeit und hierdurch primär vom Arbeitszeit-Schichtsystem abhängende Lastlaufzeit (t_N) in Stunden bildet den Divisor [141, 142].

Detaillierter werden im Folgenden die Kosten der einzelnen Posten erläutert, die von den üblichen Kosten der Werkzeugmaschinen abweichen.

Die Induktionslötmaschine mit einem 2 kW-Induktor als Referenz ist aktuell zu einem Preis von 35.000 € am Markt kommerziell erhältlich. Der Wiederbeschaffungswert (WBW) der Laserlötmaschine, wie sie für diese Arbeit entwickelt und gebaut wurde, setzt sich aus mehreren einzelnen Komponenten zusammen, die in Tabelle 9-1 summiert werden. Neben der eigentlichen Handhabungsmaschine, die analog zu einem Induktionslötautomaten aufgebaut wird, sind hier als weitere Posten eine Laserstrahlquelle (500 W) und ein Kühlsystem zu nennen, welches neben der Handhabungsmaschine auch die Laserstrahlquelle mit einer hierfür zu gewährleistenden Eingangstemperatur von 17°C kühlt.

Die benötigte Strahlführung, Strahlformung und Lasersicherheitstechnik besteht aus einer Lichtleitfaser, einer Strahleinhausung der Lötzone und optischen Komponenten wie einer Bearbeitungsoptik und einem Umlenkspiegel.

Weiterhin sind die Kosten zum Schutz und zur Fixierung sowie zur Positionierung der optischen Komponenten zu kalkulieren. Zur Datenbasis der Investitionssumme sind ebenfalls Kosten für die Kühlwasser- und Spülluftverteilung sowie eine Interlockverkabelung hinzuzurechnen. Als ein essentielles sicherheitstechnisches Bauteil zum Schutz vor frei propagierender Laserstrahlung muss an der Lötposition ein Strahlabsorber vorgesehen werden.

Tabelle 9-1: Berechnung des Wiederbeschaffungswertes einer Laserlötmaschine

Hersteller / Produktbezeichnung	Einzelposten der Investitionssumme
Handhabungsmaschine	15.000 €
500 W Diodenlaserstrahlquelle inklusive LWL	40.000 €
Industriekülsystem für Laserstrahlquelle	4.500 €
Strahleinhausung der Lötzone und Strahlabsorber	500 €
Laserbearbeitungsoptik	1.800 €
Umlenkspiegel inkl. Montage / Verstelleinheit	300 €
Schutz der Optiken und Spülluftverteilung	200 €
Kühlwasserverteilung	50 €
Bauteile für Betriebssicherheit	100 €
Summe	62.450 €

Die Anschaffungspreise der Einzelkomponenten basieren auf aktuellen Informationen entsprechender Zulieferunternehmen. Summarisch entsteht für die Laserlötmaschine ein Wiederbeschaffungswert von 62.450 €.

Die kalkulatorische Abschreibung erfolgt auf Basis des Wiederbeschaffungswertes der einzelnen Komponenten, die in der Laserlötmaschine verbaut werden. Als Abschreibungszeitraum werden sechs Jahre angesetzt, wobei eine lineare Abschreibung erfolgt.

Exemplarisch wird für diese Wirtschaftlichkeitsbetrachtung als Anwendungsfall ein Produkt basierend auf der Sägeblattgeometrie 1 nach Tabelle 5-1 betrachtet. Es werden Anlagen- und Prozesskenngrößen zugrunde gelegt, die den Bedingungen der im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Werte entsprechen. Für die Berechnungen des Energiebedarfs und Betriebsmittelverbrauchs wird von einem Betriebsverhalten entsprechend dem industriellen Maßstab ausgegangen. Die Berechnung der Jahresbetriebskosten (Verbrauchsmittelkosten: Position 9 und Energiekosten: Position 10) für die Lötanlage erfolgt exemplarisch unter der Annahme eines Dreischichtbetriebes und von 320 Produktionstagen pro Jahr. 45 Tage werden für die Instandhaltung und den Maschinenstillstand durch z. B. Feiertage kalkuliert.

Die Lastlaufzeit der Diodenlaserstrahlquelle ist mit der Nutzungszeit der Handhabungsmaschine in dieser Berechnung identisch. Eine Bedienung zweier Handhabungsmaschinen mit einer Laserstrahlquelle wird für diese Berechnung nicht betrachtet. Obwohl dies technisch und taktzeitmäßig realisierbar wäre, soll im Rahmen dieser Wirtschaftlichkeitsanalyse zunächst der direkte Vergleich zwischen einer eigenständigen Induktionslötmaschine (Bauteilhandling und -positionierung

sowie inhärenter Lötwärmeerzeugung) und einer eigenständigen Laserlötmaschine (Bauteilhandlung und -positionierung sowie ebenfalls inhärente Lötwärmeerzeugung) erstellt werden.

Die Wartungsintervalle der Diodenlaserstrahlquelle erfolgen zeitgleich mit denen der Handhabungsmaschine. Die Wartungsdauer für die Diodenlaserstrahlquelle wird wesentlich durch die visuelle Kontrolle der optischen Bauteile auf Beschädigungen der Oberfläche (Strahlumlenkspiegel, Schutzgläser und die Fokussierlinse) sowie die Überprüfung der Druckluftverteilung bestimmt. Die Dauer der Wartung ist mit einer mittleren Dauer von 0,5 Stunden kalkuliert. Ein Ausfall von Dioden wird nach Überschreiten der Abschreibungsdauer angenommen und geht in der Folge nicht in die Kalkulation ein.

Der Raumbedarf für die Komponenten der Laserlötmaschine beträgt 20 m^2 , wodurch bei einem Quadratmetermietpreis von 4 €/m^2 pro Monat Raumkosten in Höhe von 31 Cent pro Stunde in einem Drei-Schichtbetrieb entstehen. Mögliche sogenannte Werkzeugkosten könnten durch einen Verschleiß an dem Lichtleitkabel, der Fokussierlinse und den Schutzgläsern entstehen. Da im Rahmen dieser Arbeit jedoch kein Betrieb der Laserlötanlage über die gesamte Abschreibungszeit bei einem Drei-Schichtbetrieb realisiert werden kann, werden diese Verschleißkosten nur näherungsweise bestimmt und ebenso wie die bei einem Induktionslötautomaten auftretenden Werkzeugkosten (z. B. Verschleiß der Induktionsspule) für die Berechnung des Maschinenstundensatzes berücksichtigt.

Für einen direkten Vergleich der beiden Lötmaschinen ist die Ermittlung der Gesamtfertigungskosten pro Bauteil, bezogen auf eine spezielle Sägeblattgeometrie oder sehr ähnliche Geometrien essentiell. Der Fertigungskostensatz (K_F) wird durch die Summe aus dem ermittelten Maschinenstundensatz (K_{MH}), den Lohnkosten (L_K), den Lohnnebenkosten (L_{NK}) und Restfertigungskosten (R_X) gebildet. Die Restfertigungskosten in der Sägeblattfertigung können durch den Schleif- und Schärfvorgang, eine optische Aufwertung durch Sandstrahlen sowie weitere teils sägehersteller- und / oder kundenspezifische Schritte zwischen unterschiedlichen Sägeblattherstellern bzw. Produktlinien variieren. Diese Kosten jedoch werden nicht durch das Lötverfahren bestimmt und sind bei beiden Verfahren demnach identisch. In der Folge werden für diese Beispielrechnung die Restfertigungskosten nicht betrachtet.

Zusammenfassend müssen bei einer Lastlaufzeit von 3900 Stunden im Jahr auf Basis des ermittelten WBW mit Fertigungskostensätzen von $49,75 \text{ €/h}$ für die Laserlötmaschine (vgl. Tabelle 9-2) und $47,91 \text{ €/h}$ für die Induktionslötmaschine (vgl. Tabelle 9-3) im 3-Schichtbetrieb gerechnet werden.

Tabelle 9-2: Kalkulation des Maschinenstundensatzes und des Fertigungskostensatzes für das Laserstrahllöten (nach VDMA, BwB7 [143])

Pos.		1-Schicht- betrieb	2-Schicht- betrieb	3-Schicht- betrieb	
(1)	Investitionssumme (Wiederbeschaffungswert WBW) 500 W Diodenlaser + Lötautomat + Kühlsystem			62.450 €	
	Maschinenlaufzeit	100 %	1300 h/a	2600 h/a	3900 h/a
(2)	Nutzungszeit bei Verfügbarkeit	80 %	1040 h/a	2080 h/a	3120 h/a
(3)	Kalk. Abschreibung: (1)/(2)/(3)	6 Jahre	10,01 €/h	5,00 €/h	3,34 €/h
(4)	Kalk. Zinsen [(1)/(2)]x[(4)/100]/2	8 % (1/2 WBW)	1,20 €/h	0,60 €/h	0,40 €/h
(5)	Versicherung [(1)x(5)/(2)]/100	0,25 % (WBW)	0,15 €/h	0,08 €/h	0,05 €/h
(6)	Raumbedarf	20 m ²			
(7)	Raumkosten: (6)x(7)x12Mo/(2)	4 €/m ²	0,92 €/h	0,46 €/h	0,31 €/h
(8)	Instandhaltungsk./Wartung: (1)x0,02/(2)	2 % (WBW)	1,20 €/h	0,60 €/h	0,40 €/h
(9)	Hilfs- und Betriebskosten		0,50 €/h	0,50 €/h	0,50 €/h
(10)	Energiekosten				
	Lötmaschine		0,70 €/h	0,70 €/h	0,70 €/h
	Laserstrahlquelle und Steuerung		0,96 €/h	0,96 €/h	0,96 €/h
	Kühlaggregat		0,50 €/h	0,50 €/h	0,50 €/h
(11)	Werkzeugkosten		0,50 €/h	0,50 €/h	0,50 €/h
(12)	Kraneinsatz oder Stapler		0,50 €/h	0,50 €/h	0,50 €/h
(13)	CNC-Programmierung		2,00 €/h	2,00 €/h	2,00 €/h
(14)	Maschinenstundensatz netto: ∑ (3) bis (13)		19,14 €/h	12,40 €/h	10,15 €/h
(15)	Lohnkosten		20,00 €/h	20,00 €/h	20,00 €/h
(16)	Lohnnebenkosten: (15)x(16)/100	80 %	16,00 €/h	16,00 €/h	16,00 €/h
(17)	Schichtzuschlag		0,00 €/h	2,40 €/h	3,60 €/h
(18)	Maschinenstundensatz brutto: ∑ (14) bis (17)		55,14 €/h	50,80 €/h	49,75 €/h
(19)	Restfertigungsgemeinkosten				
(20)	Fertigungskostensatz: (18)+(19)		55,14 €/h	50,80 €/h	49,75 €/h

Bei der Dünnschnittsägegeometrie (Ifd. Nr. 1 nach Tabelle 5-1) beträgt die Lötzeit bei einer aktuellen Serienproduktion im Induktionsverfahren sechs Minuten und sieben Sekunden und beinhaltet nach Angaben aus der Industrie 12,6% der gesamten Fertigungskosten.

Das Löten einer einzelnen der 32 Schneiden auf diesem Sägeblatt dauert demnach 11,47 Sekunden, wobei drei Sekunden die eigentliche Haltezeit sind also die Zeit, in der die Löttemperatur konstant gehalten und die in dieser Arbeit als Lötzeit bezeichnet wird. Die Aufheizzeit ergibt durch Addition der Zeit für die Zuführung und Positionierung der Fügekomponenten die oben angegebene Zeit von 11,47 Sekunden.

Durch Umrechnen der gegebenen Werte ergibt sich somit für das Verlöten einer Schneide ein Anteil von 0,394% der Gesamtherstellungskosten eines Sägeblattes. Werden diese Werte auf die Kosten je Lötzeit kalkuliert, so ergibt sich für eine Sekunde Lötzeit ein Anteil von 0,034% der Gesamtherstellungskosten.

Tabelle 9-3: Kalkulation des Maschinenstundensatzes und des Fertigungskostensatzes für das Induktionslöten (nach VDMA, BwB7 [143])

Pos.		1-Schicht- betrieb	2-Schicht- betrieb	3-Schicht- betrieb	
(1)	Investitionssumme (Wiederbeschaffungswert WBW) Induktionslötautomat			35.000 €	
	Maschinenlaufzeit	100 %	1300 h/a	2600 h/a	3900 h/a
(2)	Nutzungszeit bei Verfügbarkeit	80 %	1040 h/a	2080 h/a	3120 h/a
(3)	Kalk. Abschreibung: (1)/(2)/(3)	6 Jahre	5,61 €/h	2,80 €/h	1,87 €/h
(4)	Kalk. Zinsen [(1)/(2)]x[(4)/100]/2	8 % (1/2 WBW)	0,67 €/h	0,34 €/h	0,22 €/h
(5)	Versicherung [(1)x(5)/(2)]/100	0,25 % (WBW)	0,08 €/h	0,04 €/h	0,03 €/h
(6)	Raumbedarf	20 m ²			
(7)	Raumkosten: (6)x(7)x12Mo/(2)	4 €/m ²	0,92 €/h	0,46 €/h	0,31 €/h
(8)	Instandhaltungsk./Wartung: (1)x0,02/(2)	2 % (WBW)	0,67 €/h	0,34 €/h	0,22 €/h
(9)	Hilfs- und Betriebskosten		0,50 €/h	0,50 €/h	0,50 €/h
(10)	Energiekosten				
	Lötmaschine		0,70 €/h	0,70 €/h	0,70 €/h
	Induktor		0,86 €/h	0,86 €/h	0,86 €/h
	Kühlaggregat		0,60 €/h	0,60 €/h	0,60 €/h
(11)	Werkzeugkosten		0,50 €/h	0,50 €/h	0,50 €/h
(12)	Kraneinsatz oder Stapler		0,50 €/h	0,50 €/h	0,50 €/h
(13)	CNC-Programmierung		2,00 €/h	2,00 €/h	2,00 €/h
(14)	Maschinenstundensatz netto: ∑ (3) bis (13)		13,62 €/h	9,64 €/h	8,31 €/h
(15)	Lohnkosten		20,00 €/h	20,00 €/h	20,00 €/h
(16)	Lohnnebenkosten: (15)x(16)/100	80 %	16,00 €/h	16,00 €/h	16,00 €/h
(17)	Schichtzuschlag		0,00 €/h	2,40 €/h	3,60 €/h
(18)	Maschinenstundensatz brutto: ∑ (14) bis (17)		49,62 €/h	48,04 €/h	47,91 €/h
(19)	Restfertigungsgemeinkosten				
(20)	Fertigungskostensatz: (18)+(19)		49,62 €/h	48,04 €/h	47,91 €/h

Das Laserlötverfahren ermöglicht für diese Säengeometrie, basierend auf den im Projekt ermittelten Ergebnissen, eine Verringerung der Fügezeit (ohne die Zeit für die Zuführung der Fügekomponenten) auf 2,5 Sekunden, wobei 2,0 Sekunden der Haltezeit entsprechen. Die Haltezeit wird somit um eine Sekunde bzw. 33% verringert.

Summiert ergibt sich für das Löten der Sägeblattgeometrie 1 nach Tabelle 5-1 mit 32 Schneiden eine Reduktion der Lötzeit von sechs Minuten und sieben Sekunden um 32 Sekunden auf fünf Minuten und 25 Sekunden.

Bei einer Kalkulation mit den ermittelten Fertigungskostensätzen ergeben sich bei einer Induktionslötmaschine pro Sägeblatt (Geometrie entsprechend lfd. Nr. 1 nach Tabelle 5-1) Fertigungskosten in Höhe von 4,884 € und für eine Laserlötmaschine Kosten in Höhe von 4,491 €.

Folglich kann das Laserstrahlötverfahren mit der konventionellen Induktionstechnik hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit nicht nur konkurrieren, sondern übertrifft diese sogar durch die Reduktion der Fertigungskosten um 5,2%.

Unter der Annahme einer vollständigen Auslastung einer Induktionslötmaschine kann bei einer maximalen Nutzungszeit von 3900 Stunden pro Jahr eine

Produktionsmenge von 3188 Sägeblättern der Dünnschnittsägegeometrie (lfd. Nr. 1 nach Tabelle 5-1) pro Monat im Drei-Schichtbetrieb erzielt werden. Auf Basis der bereits ermittelten Fertigungskosten entstehen hierdurch kumulierte Kosten in Höhe von 15.507,69 Euro für die Induktionslötmaschine und in Höhe von 14.318,32 Euro für die Laserlötmaschine.

Anhand der aus einer Substitutionsrechnung resultierenden Graphen ist im Bild 9-1 die Amortisation der im WBW 27.450 Euro teureren Laserlötmaschine dargestellt. Der Break-even-point für einen Drei-Schichtbetrieb wird hierbei gegenüber dem Induktionslötautomaten nach 17 Monaten erreicht.

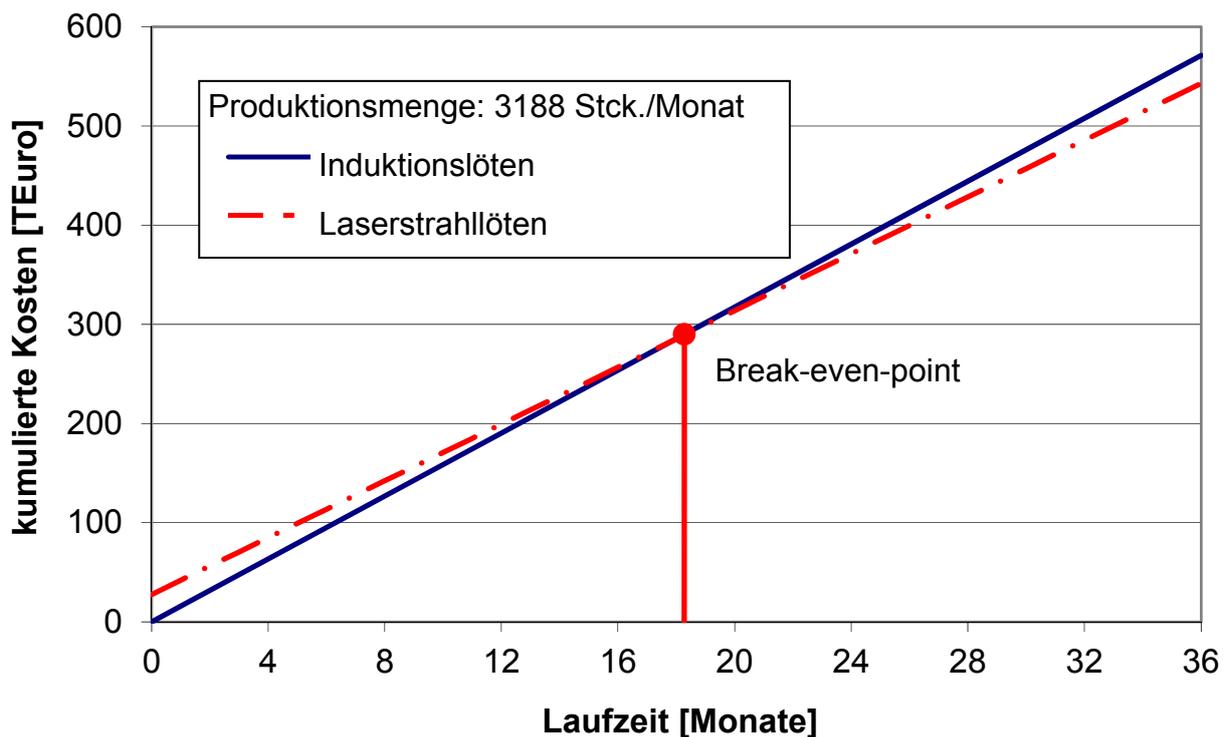


Bild 9-1: Dauer der Amortisation einer Laserlötmaschine gegenüber einem aktuellen Induktionslötautomaten

Im Rahmen dieser Kalkulation wurden die Auswirkungen der möglichen Produktionssteigerung von 3188 auf 3600 Sägeblätter je Monat, die durch das Laserstrahllöten und die dadurch verkürzten Prozesszeiten realisiert werden kann, noch nicht betrachtet. Inwieweit sich diese erhöhte Produktionsmenge unter Konstanthaltung des Erlöses am Markt verkaufen lässt, muss zunächst geprüft werden und kann daher noch nicht Gegenstand dieser Substitutionsrechnung sein.

9.2 Technologische Aspekte

Die technologischen Vorteile und Möglichkeiten des Laserstrahllöten von Kreissägeblättern können aus den Erkenntnissen zur signifikant geringeren Schädigung des Stammblasses und den verbesserten mechanischen Eigenschaften abgeleitet werden. In Tabelle 9-4 ist das Laserstrahllöten dem Induktionslöten am Beispiel der Sägeblattgeometrie 1 nach Tabelle 5-1 anhand der in dieser Arbeit erarbeiteten Prozessbedingungen und untersuchten Kriterien gegenübergestellt.

Tabelle 9-4: Technologischer Vergleich des Laserstrahllöten mit dem Induktionslöten am Beispiel der Sägeblattgeometrie 1 nach Tabelle 5-1

Kenngröße / Charakteristik	Laserstrahllöten		Induktionslöten	
	Lötgeschwindigkeit	hoch	(2 Sekunden)	mittel
Freiheitsgrad der Wärmezufuhr	hoch	(jede Komponente des Werkstoffverbunds kann einzeln erwärmt werden)	niedrig	(die Energieeinkopplung erfolgt zum größten Teil über den Stahlwerkstoff)
Wärmebeeinflussung des Stammblattwerkstoffs	gering	(9,5 mm ²)	hoch	(25 mm ²)
Lötnahtqualität anhand der DIN EN ISO 18279	hoch	Bewertungsgruppe C erfüllt	hoch	Bewertungsgruppe C erfüllt
Variabilität und Anpassung des Prozesses an andere Sägeblattgeometrien	hoch	(Automatisierbarkeit durch Linearverschiebung der Optiken)	mittel	(manuelles mechanisches Anpassen der Induktorschleife erforderlich)
mechanische Festigkeit der Verbindung	hoch	(Bsp. 738 N für lfd. Nr. 1 Tab. 7)	mittel	(Bsp. 680 N für Lfd-Nr. 1 Tab. 7)
erforderlicher Schutz vor Prozessemissionen	mittel	(Strahleinhausung ca. 500 € Kosten, Absaugung Rauch)	gering	(Absaugung Rauch)
Gleichmäßigkeit der mechanischen Festigkeit	hoch	Δ 115 N	mittel	Δ 233 N

Auf Grund der besseren Handpositionierbarkeit (wegen der Größe der Schneiden) wurde im ersten Teil dieser Arbeit, der Machbarkeitsstudie, die Entwicklung des Lötprozesses anhand der Sägeblattgeometrie 8 nach Tabelle 5-1 untersucht.

Die Entwicklung des automatisierten Lötens hingegen wurde basierend auf der größeren Relevanz in der Industrie, anhand der Sägeblattgeometrie 1, durchgeführt. Ausgehend von den hierbei erarbeiteten Erkenntnissen wurden zudem die in Tabelle 9-5 dargestellten Bestparametersätze für die weiteren zu untersuchenden Sägeblattgeometrien erarbeitet.

Tabelle 9-5: Empfehlungen zur Lasereinstellung in Abhängigkeit von den im Rahmen dieser Arbeit verlöteten Sägeblattgeometrien

lfd. Nr.	Stammblatt-durchmesser	Schneidstoff Länge x Breite x Höhe	Laserleistung	Lötzeit
1	220 mm	K01F 5,5 x 2 x 1,7 mm	200 W	2 s
2	400 mm	P25 12 x 5,6 x 4 mm	670 W	7 s
3	400 mm	K01F 13 x 6,5 x 4 mm	600 W	6 s
4	400 mm	K10F 13 x 6,5 x 4 mm	670 W	6 s
5	400 mm	K01UF 12,5 x 6,5 x 4 mm	640 W	6 s
6	400 mm	K01UF 10,5 x 4,8 x 2,5 mm	600 W	6 s
7	400 mm	DP 6 x 5,5 x 1,6 mm	Schneidstoff eignet sich nicht für Laserbearbeitung	
8	460 mm	K01UF 10,5 x 4,8 x 2,5 mm	600 W	6 s
9	1150 mm	P25 15 x 8,0 x 4,0 mm	2000 W	8 s

Auf Grund der im Zuge dieser Arbeit mit dem Laserlötautomaten gewonnenen Parameterfelder können für die verlöteten Sägeblättergeometrien und Werkstoffkombinationen die im Folgenden zusammengefassten Empfehlungen zur Einstellung der Laserstrahlquelle gegeben werden: Der Auftreffpunkt des Laserstrahls ist stets – von der Schneidkante aus gesehen – im hinteren Drittel der Schneidenoberfläche zu wählen. Eine Anpassung des Fokussdurchmessers an die Größe der Schneiden ist unabdingbar. Die Implementierung einer Temperaturüberwachung mittels Pyrometer am Auftreffpunkt des Laserstrahls sollte im Hinblick auf die Prozessstabilität vorgenommen werden. Ist dies in bereits bestehenden und umzurüstenden Induktionslötautomaten nicht umsetzbar, so ist es zur Verhinderung von Rissen im Zahnwerkstoff förderlich, die Laserleistung in der Aufheizzeit kontinuierlich anzuheben. Dies erhöht zwar geringfügig die Lötzeit, minimiert jedoch eventuelle thermische Spannungen im Schneidstoff.

Lediglich der DP-Schneidstoff ist mit dem Laser nicht zu verlöten. Die Diamantbeschichtung wird unter der Einwirkung von Laserstrahlung offensichtlich lokal graphitiert, wodurch die Absorption an Laserstrahlung lokal stark ansteigt und die oberflächliche Schneidenbeschichtung verbrennt (vgl. Bild 9-2).

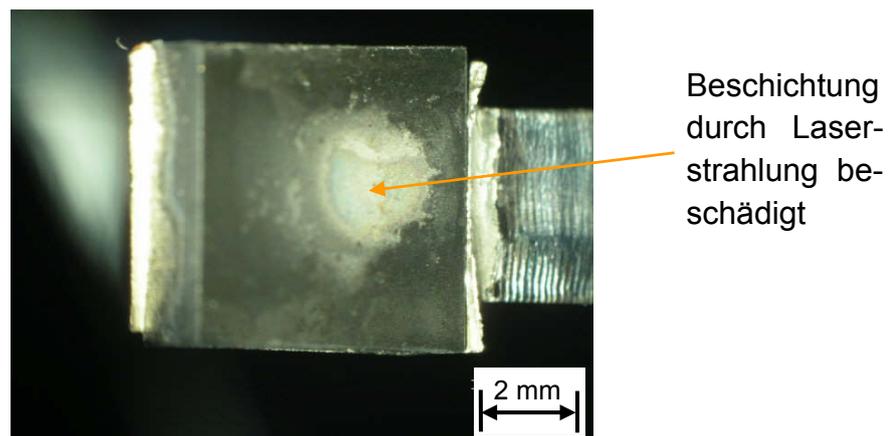


Bild 9-2: DP-Schneidstoff nach Laserbestrahlung mit 400 W in 5 Sekunden

Die Kenntnis der in dieser Arbeit charakterisierten technologischen Merkmale wie der höheren mechanischen Festigkeiten, der geringeren Wärmebeeinflussungen sowie der präzisen und gezielten Lötwärme-positionierung und -dosierung bilden die Grundlage für die zukünftigen Anwendungen des Laserstrahl-lötens für Löt-aufgaben, die diese Vorteile effektiv nutzen. Insbesondere die in Tabelle 9-5 untersuchten Versuchswerkstoffe und Versuchsgemetrien stellen für die Endanwender dieser Technologie eine breite Basis an Informationen zur technologischen Abschätzung für zukünftige Anwendungsfelder dar.

10 Zusammenfassung

Eine weiter steigende Nachfrage der Verbraucher nach Produkten aus Holzwerkstoffen führt zu steigenden Absatzzahlen im Rahmen der gesamten Wertschöpfungskette. Die Fertigung dieser Produkte mit Holzbearbeitungsmaschinen und den hierfür benötigten Komponenten der Zulieferindustrie, insbesondere der Werkzeuge wie Kreissägeblätter, stellt einen beachtlichen wirtschaftlichen und beschäftigungspolitischen Faktor dar.

Die mit dem konventionellen Induktivverfahren gefügten Kreissägeblätter weisen großflächige thermische Belastungen des Stammblasses auf. Diese Belastungen führen zu Aufhärtungen und in der Folge zu verschlechterten mechanischen Eigenschaften. Diese Vorschädigung kann im späteren Betrieb zum Versagen bei schlagartiger Belastung führen. Zu einer Abschwächung dieser Effekte werden in der Industrie beim Induktionsverfahren zumeist Parametersätze verwendet, die nicht optimalen Bedingungen zum Verbinden der Fügepartner entsprechen. Die maximal mögliche Festigkeit der Verbindung wird auf Grund dieser Lötparameter in der Regel nicht erreicht.

Ziel der vorliegenden Arbeit war daher die Entwicklung einer Technologie für das Löten von Hartmetall-Stahl-Verbindungen, die im Werkzeugbau angewendet werden kann. Das bisher für Stahl-Hartmetall-Werkstoffpaarungen nur im Labormaßstab angewendete Verfahren wurde im Rahmen dieser Arbeit erstmalig zum automatisierten Laserstrahllöten von Kreissägeblättern für die Holzverarbeitende Industrie angewendet. Die Demonstration der werkstoff- und prozessspezifischen Einflüsse auf das Bearbeitungsergebnis beim Laserstrahllöten, die Konstruktion und Fertigung der erforderlichen Anlagentechnik sowie die der automatisierten Kreissägeblattfertigung stellt den technologischen und wirtschaftlichen Nutzen dieses Verfahrens dar.

Ausgehend von repräsentativen Hartmetall-Stahl-Verbindungen wurden die Untersuchungen des Laserlötverfahrens mittels verschiedener Laserstrahlquellen und Strahlführungssysteme entwickelt und qualifiziert. In der ersten Untersuchungsphase wurden die dem Lötprozess zugrunde liegenden Einflussfaktoren hinsichtlich des Erwärmkonzeptes und der Art der Laserstrahlquelle ermittelt und charakterisiert.

Im Rahmen dieser grundlagenbasierten Untersuchungen wurden zunächst drei verschiedene Verfahren der Strahleinkopplung und Erwärmung der Lötzone erarbeitet und erprobt. Hierbei konnte auf Grund einer Zerstörung des Schneidstoffes sowie mehr als 50% erhöhter Lötzeiten im Vergleich zu den zwei weiteren Konzepten eine Bestrahlung des Bereichs Hauptschneide / Hauptfreifläche für die weiteren Untersuchungen ausgeschlossen werden.

Das Erwärmkonzept der defokussierten Bestrahlung der Schneidenoberfläche ist gegenüber dem Konzept des beidseitigen Laserstrahlbrennfleckverfahrens entlang der Fügekontur durch eine in Abhängigkeit von der Sägeblattkontur um 10% bis 25% auf bis zu 1,7 Sekunden verkürzte Lötzeit gekennzeichnet.

Die signifikant kürzesten Lötzeiten und geringsten Beeinträchtigungen der Fügepartner zeichnen den Diodenlaser gegenüber den ebenfalls untersuchten Nd:YAG- und CO₂-Lasern aus. Insbesondere der CO₂-Laser erzeugt durch verstärkte Reflexion von Laserstrahlung die Ausbildung einer weiteren Wärmeeinflusszone am Stammbblatt. Wird bei einem direkten Vergleich der Diodenlaser als Maßstab gesetzt, so benötigt der Nd:YAG-Laser 15% und der CO₂-Laser 150% mehr Leistung zum Löten derselben Fügekontur. Würde als Bezugsgröße der so genannte Steckdosenwirkungsgrad gesetzt werden, so müsste dieser Wert beim Nd:YAG-Laser sogar um den Faktor 10 erhöht werden.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde ausgehend von einer Induktionslötmaschine eine vollständig automatisierte Laserlötmaschine konstruiert, gebaut und in Betrieb genommen. Das gesamte Lösungskonzept der Strahlführung umfasst die Strahlerzeugung in einem Diodenlaser, den Transport der Laserstrahlung mittels einer 400 µm Lichtleitfaser, die Auskopplung des Laserstrahls aus einer kompakten 1-Zoll-Laseroptik, die Umlenkung des Lasers über einen Spiegel und die Fokussierung auf die Unterseite der Hartmetallschneide. Besondere Bedeutung kommt hierbei der Zugänglichkeit der Schneide zu. Hierfür wurde die Klemmvorrichtung der Schneide umkonstruiert, so dass sie eine Zugänglichkeit für den Laserstrahl entsprechend dem gewählten Erwärmkonzept bietet. Die hierbei implementierte Temperaturüberwachung am Laserauftreffpunkt und die Temperaturregelung in der Lötzone ermöglichen eine homogene Wärmezufuhr mit einer maximalen Abweichung der eingestellten Regeltemperatur von nur 20°C bei einer gesetzten Löttemperatur von 690°C. Dies entspricht einer Abweichung von 2,9% (Bezugspunkt 0°C), wohingegen ein nicht geregelter Prozess durch eine Abweichung von bis zu 43% (300°C) gekennzeichnet ist.

Eine FEM-Simulation des Induktionslötprozesses im Vergleich zum Laserlötprozess stellt die Unterschiede der beiden Verfahren hinsichtlich der Wärmeverteilung noch einmal gegenüber und rundet die Betrachtung der Ergebnisse ab. Das erstellte und mit den mechanisch-technologischen Ergebnissen validierte Modell kann für neue Sägeblattgeometrien eine Möglichkeit zur Abschätzung der bauteilinternen Wärmeausbreitung liefern.

Die im zweiten Untersuchungsabschnitt automatisiert gefertigten Kreissägeblätter erfüllen den höchsten Anforderungsgrad der DIN EN ISO 18279 (Bewertungsgruppe B) hinsichtlich Lötnahtausbildung und Lötnahtinhomogenitäten.

Die mikroskopischen Veränderungen in der Laserstrahl-Schneidstoff-Wechselwirkungszone wurden durch detaillierte Untersuchungen als unkritisch bewertet. Zum einen entfernt der dem Lötprozess nachgeschaltete Schärfvorgang diese Veränderungen vollständig. Zum anderen wurden keine Veränderungen in Form von Rissen in den unbeeinflussten Schneidstoff gefunden. Ebenso konnten keine Veränderungen in der Schneidstoffzusammensetzung detektiert werden.

Die Größe der Wärmeeinflusszonen zeigt bei dem Laserprozess im Vergleich zum Induktionsprozess eine Verkleinerung um den Faktor 3,1 (von 25 mm² auf 7,5 mm²) der durch die Lötwärme beeinflussten Stammbblattbereiche.

Die durchgeführten Untersuchungen der Gefügehärte korrelieren mit den Aussagen hinsichtlich der Ausbildung der Wärmeeinflusszonen. Die induktiv gelöteten Referenzproben zeigen eine großflächige Änderung der Gefügehärte im Abstand von bis zu 7 mm zur Lötstelle. Diese Aufhärtungen des Grundwerkstoffgefüges von 470 HV_{0,2} auf bis zu 850 HV_{0,2} in der Wärmeeinflusszone können durch die Wahl geeigneter Parameter beim Laserstrahllöten vollständig vermieden werden.

Zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften wurden Abscherversuche durchgeführt und hierbei die Kräfte gemessen, die benötigt werden, um die Schneiden aus dem Werkstoffverbund zu trennen. Gegenüber den induktionsgelöteten Referenzproben steigt die Verbundfestigkeit um 9% von im Mittel 680 N auf bis zu 738 N. Von besonderer Bedeutung ist aber vor allem der Zahn mit der geringsten Festigkeit je Sägeblatt, da dieser die Standzeit des Kreissägeblattes bestimmt. Den Untersuchungen zu Folge konnte durch den Laserlötprozess eine Steigerung um 10% erzielt werden.

Bei der dynamischen Prüfung wurden die Kreissägeblätter einer Dauerschnittprüfung unterzogen. Hierbei erfolgte keinerlei Versagen der Lötnahte der lasergelöteten Proben, auch nicht bei simulierter Maschinenstörung. Der Verschleiß entspricht somit dem normalen Verhalten der jeweiligen Schneidstoff-Zerspanstoffwerkstoff-Paarung.

Auf Basis des erarbeiteten Prozessfensters wurde für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung gezielt ein Parametersatz ausgewählt, der sich möglichst weit von den jeweiligen Prozessgrenzen befindet, um einen robusten Prozess für Industrieanwendungen als Basis heranzuziehen. Dieser Laserlöt-Parametersatz zeichnet sich vor allem durch eine um 33% kürzere Lötzeit gegenüber dem Induktionsprozess aus. Hierbei konnte im Rahmen einer Berechnung eine Reduktion der Fertigungskosten um 5,2% nachgewiesen werden.

Die aufgezeigten technologischen und wirtschaftlichen Erkenntnisse sowie die im Rahmen dieser Arbeit nachgewiesenen Vorteile legen eine möglichst zeitnahe Implementierung in die Serienfertigung nahe. Bestehende Induktionslötautomaten können zudem relativ einfach umgerüstet werden.

Insbesondere besteht durch das entwickelte Verfahren die Möglichkeit, bisher mit dem Induktionsverfahren nicht oder nur bedingt fügbare Werkstoffkombinationen – z.B. Aluminium und Hartmetall – zu verbinden. So ist ein erheblicher weiterer Forschungsansatz bei großen Sägeblättern gegeben, bei denen die Festigkeit des Stammbblattmaterials eine eher untergeordnete Rolle spielt. Es wäre zu untersuchen, ob eine Fertigung des Stammbblattmaterials aus Aluminium möglich ist, um das Gewicht der Bauteile zu reduzieren.

11 Literaturverzeichnis

- [1] Schajer, G. S.; Mote, C. D.: **Analysis of Optimal Roll Tensioning for Circular Saw Stability**; In: *Wood and Fiber Science* 16, 1984, S. 323-338.
- [2] Huber, H.; Münz, U. V.: **Untersuchungen über den Einfluss der Anlasszeit auf die Härte und Festigkeit von Kreissägeblättern für Holz und Schmelzsägeblättern für Stahl**; Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 2885, IFW Remscheid, 1979, S. 6.
- [3] Stakhiev, Y. M.: **Untersuchungen zu Problemen mit Kreissägeblättern**; In: *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2003, S. 13-22.
- [4] Glatzel, T.: **Trennschleifen von Granit mit dünnen Werkzeugen**; Dissertation, Universität Hannover, 2004, S. 5-36.
- [5] Ertingshausen, W.: **Zerspanung von Granit mit Diamant-Trennschleifscheiben**; Dissertation Universität Hannover, 1985, S. 8-12.
- [6] Huber, H.; Münz, U. V.: **Aufhärtung von Stammblättern nach dem Löten**; In: *Präzision im Spiegel*, IFW Remscheid, 1992.
- [7] Mahler, W.; Zimmermann, K. F.: **Eigenschaften und Löteignung von Hartmetallen; Lote und Flußmittel; Abkühlspannungen und Festigkeit der Lötstellen**; In: *Technik, die verbindet; Berichte aus Forschung und Praxis*, Nr. 30, Löten von Hartmetallen; Degussa, Hanau 1975.
- [8] Norm **DIN EN 847-1**: Maschinen-Werkzeuge für Holzbearbeitung - Sicherheitstechnische Anforderungen - Teil 1: Fräs- und Hobelwerkzeuge, Kreissägeblätter; Deutsche Fassung EN 847-1:2005+A1:2007. Berlin, Wien, Zürich (Beuth), 2007-11.
- [9] Unfallverhütungsvorschrift 3.10: **Maschinen und Anlagen zur Be- und Verarbeitung von Holz und ähnlichen Werkstoffen**; Gesetzliche Unfallversicherung, 1993.
- [10] Norm **DIN 8589-0**: Fertigungsverfahren Spanen - Teil 0: Allgemeines, Einordnung, Unterteilung, Begriffe; Deutsche Norm. Berlin, Wien, Zürich (Beuth), 2003-09.
- [11] N. N.: **Wissenswertes über Hartmetall**; ; Firmenschrift Hartmetall-Gesellschaft, Stuttgart, <http://www.hartmetall.nl/>, Stand 15.06.2011
- [12] Paucksch, E.; Holsten, S.; Linß, M.; Tikal, F.: **Zerspantechnik**; Vieweg und Teubner Verlag, 12. Auflage, 2008, ISBN 978-3-8348-0279-8.
- [13] Bergmann, W.: **Werkstofftechnik Teil 2: Anwendungen**; Carl Hanser Verlag München, Wien, 1991, S. 107–108.

- [14] Tönshoff, H. K.; Münz, U. V., Ahlborn, D., Przywara, R.: **Schwingungsvorgänge beim Trennschleifen von Gestein**; In: *Industrie Diamanten Rundschau*, 27, 1993, 1, S. 15-21.
- [15] Titz, P.: **Keine Schwingung. Verhindern axialer Laufabweichungen bei Kreissägeblättern mit Hilfe elektromagnetischer Stellglieder**; In: *Maschinenmarkt* 98, 1992, S. 32-39.
- [16] Slavic, J.; Cermelj, P.; Babnik, A.; Mozina, J.; Boltezar, M.: **Measurement of the blending vibration frequencies of rotating turbo wheel using an optical fibre reflective sensor**; *Meas. Sci. Technol.* 13, 2002, S. 477-482.
- [17] Bartsch, U.: **Schwingungs- und Geräuschverhalten ungedämpfter und gedämpfter Kreissägeblätter**; Dissertation, TU Braunschweig, 1982.
- [18] Rosenthal, A. R.: **Eigenspannungsinduzierung durch Laserstrahlung in scheibenförmige Werkzeuge**; Fortschrittberichte VDI, Reihe 2, Nr. 258; VDI Verlag, 1992.
- [19] Jendryschik, J.; Münz, U. V.: **Arbeitsverhalten von rotierenden Trennwerkzeugen – Modellbetrachtungen**; In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 44, 1986, 1, S. 17-22.
- [20] Denkena, B.; Tönshoff, H.K.; Friemuth, T.; Glatzel, T.: **Weniger Kosten, weniger Abfall. Natursteinbearbeitung: ökonomischer und ökologischer Nutzen dünner Sägeblätter**; In: *diamond business*, Ausgabe 1, 2003, S. 42-46.
- [21] Bienert, P.: **Kreissägen von Beton mit Diamantwerkzeugen**; Dissertation, Universität Hannover 1978.
- [22] Arntz, W.: **Das Kreissägeblatt - kein einfaches Werkzeug**; In: *Moderne Fertigung* 10, 1982, 6, S. 16-18.
- [23] Jendryschik, J.; Münz, U. V.: **Arbeitsverhalten von rotierenden Trennwerkzeugen — Spannungs- und Schwingungsverhalten von Kreissägeblättern**; In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 44, 1986, 2, S. 47-53.
- [24] Münz, U. V.: **Richtiges Vorspannen von Kreissägeblättern**; In: *Holz- und Kunststoffverarbeitung*, 16, 1981, 2, S. 142-148.
- [25] Tönshoff, H. K.; Brinksmeier, E.; Nölke, H. H.: **Zum dynamischen Verhalten von scheibenförmigen Werkzeugen**; *VDI-Z* 122, 1980, 3, S. 87-89.
- [26] Tönshoff, H. K.; Jendryschik, J.: **Dynamical Behaviour of Disklike Rotating Tools**; In: *International Journal Computers & Structures* Vol. 21, Nov. 1985, No. 1/2, S. 203-211.

- [27] Barz, E.: **Fertigungsverfahren und Spannungsverlauf bei Kreissägeblättern für Holz**; Forschungsberichte des Landes NRW, Nr. 360, 1957, Westdeutscher Verlag, Köln, Opladen.
- [28] Barz, E.; Münz, U. V.: **Prüfung und Beurteilung des Richt- und Spanzustandes bei Kreissägeblättern für die Holzbearbeitung**; In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 26, 1968, 3, S. 170-175.
- [29] Stehr, C.; Münz, U. V.: Forschungsbericht P 510, **Entwicklung eines lasergestützten Verfahrens zum Richten und Spannen von Bauteilen in der Anwendung für Sägeblätter aus Stahl mit höherer Randschichthärte**; Studiengesellschaft Stahlanwendungen, Düsseldorf 2003.
- [30] Friemuth, T.: **Herstellung spanender Werkzeuge**; Düsseldorf, VDI Verlag 2002.
- [31] Tschätsch, H.: **Praxis der Zerspantechnik**; Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden, 6. Auflage Oktober 2002, ISBN 3-528-34986-7.
- [32] Beitz, W.; Küttner, K.-H.: **Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau**; Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 18. Auflage, 1995, ISBN 3-540-57650-9.
- [33] Tönshoff, H. K.; Denkena, B.: **Spanen**; Springer Lehrbuch, Berlin/Heidelberg 2004, 2. Auflage, ISBN 3-540-00588-9.
- [34] Schönherr, H.: **Spanende Fertigung**; Oldenburg Verlag, 2002, ISBN 3-486-25045-0.
- [35] Westkämper, E.; Warnecke, H.-J.: **Einführung in die Fertigungstechnik**; Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B. G. Teubner, April 2001, 4. Auflage, ISBN 3-519-36323-2.
- [36] König, W.; Klocke, F.: **Fertigungsverfahren 1 Drehen Fräsen Bohren**; Springer Verlag, 1997, ISBN 3-540-63202-6.
- [37] Maurer, J.: **Standzeiten deutlich erhöht**; In: *Industrieanzeiger*, Band 112, 1990, Heft 65, S. 14-15.
- [38] Berns, H.: **Hartlegierungen und Hartverbundwerkstoffe. Gefüge, Eigenschaften, Bearbeitung, Anwendung**; Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 1998, ISBN 3-540-62925-4.
- [39] Schneider, J.: **Schneidkeramik**; Verlag moderne Industrie, Landsberg am Lech, 1995, ISBN 3-478-93141-10.
- [40] Stricker, R.: **Schneidstoffe**; Firmenschrift Plansee Tizit GmbH, 2002.
- [41] Kieffer, R.; Benesovsky, F.: **Hartmetalle**; Springer Verlag, Wien, 1965, S.18-52.

- [42] Weise, W.: **Einsatz innovativer Lote in der Schneidetechnik**; Firmenschrift Degussa Hüls, Esslingen, 1995.
- [43] Norm **DIN ISO 513**: Klassifizierung und Anwendung von harten Schneidstoffen für die Metallzerspanung mit geometrisch bestimmten Schneiden - Bezeichnung der Hauptgruppen und Anwendungsgruppen; Deutsche Norm. Berlin, Wien, Zürich (Beuth), 2005-11.
- [44] Richtlinie VDI 2841 Blatt 1: **CVD-Diamant-Werkzeuge - Systematik, Herstellung und Charakterisierung**; VDI 2010.
- [45] Norm **DIN ISO 8514-1**: Lötbarkeit – Begriffe; Deutsche Norm. Berlin, Wien, Zürich (Beuth), 1978-07.
- [46] Bergmann, W.: **Werkstofftechnik**; München : Carl Hanser Verlag, 5. Auflage 2005, ISBN 3-446-22576-5.
- [47] Böge, A.: **Das Techniker Handbuch**; 15. Auflage; Vieweg Verlagsgesellschaft Braunschweig; 1999.
- [48] N. N.: **Produktkatalog Firma Lennartz**; Firmenschrift Gebr. Lennartz GmbH & Co.KG, Remscheid 2000/2001.
- [49] Lugscheider, E.: **Hartlöten von hartmetallbestückten Bauteilen und Werkzeugen**; Abschlussbericht zum AiF Forschungsvorhaben Nr. 12675 N; RWTH Aachen 1999.
- [50] Abschlussbericht zum AiF Forschungsvorhaben Nr. 12792 N: **Entwicklung einer wärmearmen Fügetechnik für das Bewehren von Stammblättern mit Schneidsegmenten**; Remscheid, 2004.
- [51] Kußmaul, K.; Greitmann, M. J.: **Widerstandspreßschweißen von Hartmetallen auf Vergütungsstahl 50 CrV 4**; In: *Schweißen und Schneiden*, Band 43, 1991, Heft 1, S. 43–46.
- [52] Barbatti, C.; Garcia, J.; Liedl, G.; Pyszalla, A.: **Joining of cemented carbides to steel by laser beam welding**; In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*; Band 38, 2007, Heft 2, S. 907–914.
- [53] Sändig, S.; Wiesner, P.; Greitmann, M. J.; Deutschmann, G.: **Laserwelding of Hardmetal Components onto Steel**; In: *Proceedings ECLAT' 94 5th European Conference on Laser Treatment of Materials*, 26-27 Sept. 1994, Bremen, DVS Band 163, S. 326-331.
- [54] Sändig, S.; Wiesner, P.; Greitmann, M. J.; Deutschmann, G.: **Technische Aspekte des Verbindens von Stahl-Hartmetall-Teilen mittels Laser**; In: *Proceedings ICALEO' 95*, 13-16 Sept. 1995 San Diego, CA, S. 895-902, ISBN 0-912035-53-6.

- [55] Domke, F.: **Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung**; 10. Auflage; Berlin: Cornelsen Verlag, 1998, ISBN-10: 3590812206.
- [56] Norm **DIN 1910-100**: Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe - Teil 100; Deutsche Norm. Berlin, Wien, Zürich (Beuth), 2008-02.
- [57] Hügel, H.: **Strahlwerkzeug Laser**; G.B. Teubner, Stuttgart, 1992.
- [58] Beyer, E.: **Schweißen mit Laser**; Springer Verlag, Berlin, 1995.
- [59] Hügel, H.; Graf, T.: **Laser in der Fertigung 2**; Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2009 ISBN 978-3-8351-0005-3.
- [60] Killing, R.; Killing, U.: **Kompodium der Schweißtechnik**; Band 1. DVS Media GmbH, Düsseldorf, 2002, ISBN 978-3-87155-205-2.
- [61] Emmelmann, C.: **Einführung in die industrielle Lasermaterialbearbeitung**; Rofin-Sinar Laser GmbH, Hamburg, 1998.
- [62] Klocke, F.; König, W.: **Lasermaterialbearbeitung**; Fertigungsverfahren 3, Springer Verlag: Berlin Heidelberg, 4. Auflage, 2007, ISBN 978-3-540-23492-0.
- [63] Poprawe, R.: **Lasertechnik für die Fertigung**; Springer-Verlag: Heidelberg, 2005.
- [64] Otto, A.: **Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen**; Dissertation, Meisenbach Verlag Bamberg 1997., S. 13, ISBN-3-87525-089-3.
- [65] Norm **DIN ISO 857 Teil 2**: Schweißen und verwandte Prozesse – Weichlöten, Hartlöten und verwandte Begriffe; Deutsche Norm. Berlin, Wien, Zürich (Beuth), 2007-03.
- [66] Ignatowitz, E.; **Werkstofftechnik für Metallbauberufe**; Verlag Waldbronn, Europa, 1997.
- [67] Behnisch, M.: **Moderne Löttechnologie in der Einzel und Massenproduktion - oft einzig mögliche Verbindung**; Maschine und Werkzeug Band 90, 1989, Heft 12, S. 50-64.
- [68] N. N.: **Lötverfahren**; Firmenschrift BrazeTec, Umicore AG & Co. KG, Hanau, 2009..
- [69] Norm **DIN EN 29454 Teil 1**: Flussmittel zum Weichlöten; Einteilung und Anforderungen; Teil 1: Einteilung, Kennzeichnung und Verpackung; Deutsche Fassung. Berlin, Wien, Zürich (Beuth), 1994-02.
- [70] Norm **DIN EN 1045**: Hartlöten - Flussmittel zum Hartlöten - Einteilung und technische Lieferbedingungen; Deutsche Fassung. Berlin, Wien, Zürich (Beuth), 1997-08.

- [71] Haferkamp, H.; Kaschner, M.: **Handbuch der Verbindungstechnik**; Hrsg.: Bauer, C., München - Wien: Hanser Verlag, 1991.
- [72] Wuich, W.: **Löten**; Vogel Verlag, Würzburg, 1972.
- [73] Dorn, L. u.a.: **Hartlöten - Grundlagen und Anwendungen**; Band 146 Kontakt & Studium, Maschinenbau, Expert Verlag, 1985.
- [74] Dorn, L.: **Hartlöten und Hochtemperaturlöten**; Expert-Verlag Verlag, 2007, ISBN 3816925456.
- [75] Robert W., Messler, Jr.: **Joining of Advanced Materials**; Butterworth - Heinemann, 1993.
- [76] Bargel, H. J.; Schulze, G.: **Werkstoffkunde**; 9. Auflage; Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2005, ISBN-10: 3540792961.
- [77] Kreuzburg, K.: **Aspekte des Laserstrahlötens von metallisch-keramischen Verbindungen**; Fortschrittberichte VDI, Reihe 2, Nr. 421, VDI Verlag, 1997.
- [78] Wittke, K.; Scheel, W.: **Die Lötverbindung – Buch 3**; Verlag Dr. Markus A. Detert, Templin, 1. Auflage 2009, ISBN-13:978-3-934142-58-9.
- [79] Mock, U.: **Über das Benetzungsverhalten polymermodifizierter Grenzflächen**; Dissertation, Freiburg, 2004.
- [80] Petrunin, I. E.: **Handbuch Löttechnik**; 1. Auflage; Berlin: Verlag Technik, 1991.
- [81] Rahn, A.: Erfassung von Lötprofilen; Eugen G. Leuze Verlag KG, 2008, ISBN 978-3-87480-250-5, S.68ff.
- [82] Seel, F.: **Atombau und chemische Bindung**; 2. Auflage; Stuttgart: F. Enke-Verlag, 2003, ISBN-13: 9783761416754.
- [83] Fritz, A.-H.; Schulze, G.: **Fertigungstechnik**; Springer Verlag Heidelberg, 2006.
- [84] Mirski, Z.: **Methoden zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Hartmetall-Lötverbindungen**; *DVS-Berichte*, Band 125, 1989, S. 145–148.
- [85] Mirski, Z.; Drzeniek, H.: **Die Benetzbarkeit von Hartmetallen beim Hartlöten**; *DVS-Berichte*, Band 192, 1998, S. 289-293.
- [86] Steffens, H. D.; Wilden, J.; Möhwald, K.; Berthold, M.: **Präzisionsbearbeitung mit Festkörperlasern**; VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien, Düsseldorf, 1996, S. 99-103.

- [87] Zimmermann, K. F.; Krappitz, H.: **Technische Bedeutung und Zukunft der Löttechnik und des Diffusionsschweißens**; *DVS-Bericht 148*, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1992.
- [88] Steffens, H. D.; Wilden, J.; Möhwald, K.; Berthold, M.: **Vergleich des Laserstrahllöten mit konventionellen Methoden. Eigenschaften, Leistungsfähigkeiten, Unterschiede**; VDI-Verlag, 1996.
- [89] Eltze, A.: **Vorteile mobiler Diodenlaser im Mehrstationenbetrieb**; In: *Blech In Form*, 2/2005, S. 52-55.
- [90] Dilthey, U.: **Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1**; 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2006, S. 178, ISBN–10 3-540-21673-1.
- [91] Haferkamp, H.; Ostendorf, A.; Goede, M.; Lindemann, K.: **CVD-beschichtete Bauteile mittels Laserstrahlung härten**; In: *Werkstattstechnik* 91, 2001, Heft 7, S. 418–421.
- [92] Haferkamp, H.; Thoms, V.; Deutschmann, M.; Lindemann, K.; Müller, R.: **Optimierung von Umformwerkzeugen durch Laserstrahl-Dispergieren von Keramikpartikeln**; In: *Optimierung von Produktionsabläufen in der Blechverarbeitung*, EFB-Kolloquium, Fellbach, 2003.
- [93] Haferkamp, H.; Becker, H.; Czerner, S.; Deutschmann, M.: **Neue Entwicklungen beim Reparaturschweißen und von präventiven Maßnahmen im Werkzeugbau**; In: *Werkstattstechnik online*, Ausgabe 11/12 2003.
- [94] Hanebuth, H.: **Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik**; Erlangen: Meisenbach Verlag Bamberg, 1996, ISBN 3-87525-074-5.
- [95] Broich, U.: **Entwicklung lasergerechter Lotlegierungen**; Studie RWTH Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Werkstoffwissenschaften.
- [96] Thorson, K. A.; Fordsmand, H.; Praestgaard, P. L.: **An Explanation of Wettability Problems When Brazing Cemented Carbides**; In: *Welding Journal* 63, 1984/10, S. 308–315.
- [97] Keitel, S.; Orlick, H.: **Laserstrahl-Hartlöten mit höheren Festkörperleistungen unter besonderer Berücksichtigung der Fügegeometrie**; Präzisionsbearbeitung mit Festkörperlasern (Fügen); VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien, 1996.
- [98] Müller, W.: **Metallische Lotwerkstoffe**; Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf: DVS-Verlag, 1990.
- [99] Haldenwanger, H.-G.; Korte, M.: **Innovative Fügekonzepte für die Mischbauweise im Fahrzeug – vornehmlich Karosserie; Hart- und**

- Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen; DVS-Berichte** Band 212; Aachen; 2001, S. 140-146.
- [100] Haferkamp, H.; Bach, Fr.-W.; v. Alvensleben, F.: **Laserstrahllöten von Keramik-Metall-Verbindungen**; In: *Schweißen und Schneiden* Band 48, 1996, Heft 11, S. 853-859.
- [101] Haferkamp, H.; Marquering, M.; Kreutzburg, K.: **Laser beam brazing of mild and alloyed steel**; Second European Conference on Joining Technology, Eurojoin 2, Florence; 16.-18.05.1994, S. 325-335.
- [102] Steffens, H. D.; Wilden, J.; Möhwald, K.; Berthold, M.: **Vergleich des Laserstrahllöten mit konventionellen Methoden. Eigenschaften, Leistungsfähigkeiten, Unterschiede.**; Präzisionsbearbeitung mit Festkörperlasern (Fügen); 1996, Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 99-103.
- [103] Haferkamp, H.; Ostendorf, A.; Meier, O.; Engelbrecht, L.; Fenske, A.: **Laserstrahllöten von Stahl, Aluminium und Magnesium zur Herstellung von Tailored Hybrid Blanks**; In: *2. Kongress JOIN-TEC 2005 am 22./23. Februar 2005 in Halle, Saale.*
- [104] Orlick, H.; Schlechte, T.; Gramsch, M.: **Hochleistungs-Festkörperlaser zum Schweißen, Schneiden und Hartlöten**; *DVS-Bericht*, Band 170, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1995, S. 121-126.
- [105] Orlick, H.: **Laser beam brazing with solid-state lasers**; *DVS Bericht*, Band 163, S. 442-446.
- [106] Geiger, M.; Hanebuth, H.; Hoffmann, P.: **Laserstrahlhartlöten von Blechformteilen mit dem Nd:YAG-Laser**; Präzisionsbearbeitung mit Festkörperlasern (Fügen); VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien, 1996.
- [107] Poprawe, R.; Loosen, P.; Petring, D.; Ehrhard, A.: **New lasers for new applications. Neue Laser für neue Anwendungen.**; In: *ECLAT, European Conf. on Laser Treatment of Materials*; Frankfurt am Main: MAT-INFO Werkstoff-Informationsges., 1998, S. 11-19.
- [108] Klocke, F.; Senster, P.: **Laserstrahllöten von Aluminiumlegierungen; Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen**; *DVS-Berichte*, Band 231, DVS-Verlag Düsseldorf, 2004.
- [109] VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien: **Fügen mit Festkörperlasern, Laser in der Materialbearbeitung**; In: *Laser in der Materialbearbeitung*, Band 6, VDI, Düsseldorf; 1996.
- [110] Hornig, H.: **Praxis des Laserstrahlhartlöten im Fahrzeugbau**; In: *5. Laser-Anwenderforum 06*, 2006, Bremen.

- [111] Förster, D.; Müller, W.: **Laser in der Materialbearbeitung**; Fachbuchverlag Leipzig, 2001.
- [112] Bethke, U.; Gigengack, T.: **Fügetechnik im Umbruch: Neue Blechwerkstoffe und Karosseriekonzepte und ihre Auswirkungen auf die Fügetechnik im Automobilbau**; In: *Lösung für die Blechverarbeitung moderner Blechwerkstoffe*, EFB-Kolloquium.
- [113] Stauffer, H.; Graf, T.: **Laser-Hybridschweißen und Laserstrahllöten anhand von Praxisbeispielen aus dem Automobilbau**; In: Konferenz-Einzelbericht: *AKL' 04, 5. Aachener Kolloquium für Lasertechnik*, Tagungsband 2004, S. 109-120.
- [114] Südmeyer, I., Rohde, M.: **Einfluss des Zusatzwerkstoffs und der Übergangstexturen auf die Scherfestigkeit von laserstrahlgelöteten Keramik-Stahl-Verbindungen**; *DVS-Berichte* Band 263, Aachen, 2010.
- [115] Peter, H. J.: **Induktionslöten - eine bewährte Fügetechnologie mit innovativem Zukunftspotenzial**; In: *Schweißen und Schneiden* Band 60, 2008, Heft 4, Seiten 216–221.
- [116] Benkowsky, G.: **Induktionserwärmung**; Verlag Technik GmbH, Berlin, 1990.
- [117] Kramer, C.; Mühlbauer, A.: **Praxishandbuch Thermoprozesstechnik**; Band I, Grundlagen, Verfahren; Vulkan-Verlag Essen, 2001, ISBN 3-8027-2922-6.
- [118] Peter, H. J.: **Induktives Hartlöten - eine Betrachtung auch aus energieökonomischer Sicht**, In: *Elektrowärme International* Heft 3, 2008, S. 172-177.
- [119] Martin, H.: **VDI-Wärmeatlas**; 10. Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf, ISBN: 978-3-540-25504-8.
- [120] N. N., **Merkblatt über Grundlagen der Induktionstechnik**; Firma ELDEC, 2000.
- [121] Peter, H. J.: **Grundsätze der Induktionserwärmung**; Firmenschrift der ELDEC Schwenk Induction GmbH, Berlin, 1998.
- [122] Peter, H. J.: **Bewertung (Darstellung) des Werkzeugs Induktionsspule**; *DVS-Berichte* Band 212 Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen, S. 11-17.
- [123] N. N.: **Das ist Hartmetall**; Firmenschrift der Sandvik Hard Materials, Hauptsitz Schweden, 2009.
- [124] N. N.: **Hartmetalllöten**; Firmenschrift Umicore AG & Co. KG - BrazeTec, Hanau-Wolfgang, 2007.

- [125] Norm **DIN EN 4957**: Werkzeugstähle; Deutsche Fassung. Berlin, Wien, Zürich (Beuth), 2001-02.
- [126] Norm **DIN EN 1044**: Hartlötten - Lotzusätze; Deutsche Fassung EN 1044:1999. Berlin, Wien, Zürich (Beuth), 1999-07.
- [127] Autorenkollektiv: Pyrometer Handbuch – **Berührungslose Temperaturmessung**. IMPAC Infrared GmbH, 2004.
- [128] Norm **DIN EN 12799**: Zerstörungsfreie Prüfung von Hartlötverbindungen; Deutsche Fassung. Berlin, Wien, Zürich (Beuth), 2000-12.
- [129] Norm **DIN EN ISO 18279**: Hartlötten - Unregelmäßigkeiten in hartgelöteten Verbindungen; Deutsche Fassung. Berlin, Wien, Zürich (Beuth), 2004-04.
- [130] Norm **DIN EN ISO 1319 Teil 3**: Grundlagen der Messtechnik – Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße; Deutsche Fassung. Berlin, Wien, Zürich (Beuth), 1996-05.
- [131] N. N.: **Hartmetalllötten**; Firmenschrift BrazeTec, Umicore AG & Co. KG, Hanau, 2009.
- [132] Massalski, T. B.; Okamoto, H.: **Binary alloy phase diagrams.**; 2. Auflage, Materials Park, Ohio, 1992, ISBN: 0-87170-404-8 (Vol. 1), S. 36.
- [133] Massalski, T. B.; Okamoto, H.: **Binary alloy phase diagrams.**; 2. Auflage, Materials Park, Ohio, 1992, ISBN: 0-87170-405-6 (Vol. 2), S. 1409.
- [134] Firma Leitz GesmbH & Co KG (als einzelnes Dokument zur Verfügung gestellt)
- [135] Radscheit, C.; Binroth, C.; Sepold, G.: **Laserstrahlhartlötten mit kontinuierlichem Festkörperlaser**. VDI-Berichte 1080, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1984, S. 229-236.
- [136] Norm **DIN EN ISO 6507**; Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers. Hrsg: Deutsches Institut für Normung, Berlin / Köln, Beuth-Verlag, 1998.
- [137] Kühlmeyer, M.: **Statistische Auswertungsmethoden für Ingenieure**. Springer Verlag, 2001, S. 3-9, ISBN 3-540-41097-X.
- [138] Groth, C.; Müller, G.: **FEM für Praktiker – Temperaturfelder**. Expert Verlag, S.48-72, ISBN 3-8169-1241-9.
- [139] Groth, C.; Müller, G.: **FEM für Praktiker – Temperaturfelder**. Expert Verlag, S.48-72, ISBN 3-8169-1241-9.
- [140] Groth, C.; Müller, G.: **FEM für Praktiker – Temperaturfelder**. Expert Verlag, S.48-72, ISBN 3-8169-1241-9.

-
- [141] DVS-Merkblatt 3211; **Kostenbetrachtungen für die Prozesse des Elektronen- und Laserstrahlschweißens**: DVS Media GmbH, Januar 2011.
- [142] Goehrmann, K.: **Beitrag zum technologisch-wirtschaftlichen Vergleich des gepulsten zum kontinuierlichen Laserstrahlschweißens**; Dissertation, Clausthal, 2010.
- [143] Andreas, D.; Reichle, W.: **Das Rechnen mit Maschinenstundensätzen – BmB7, VDMA**. Maschinenbau-Verlag GmbH, 1987, S.60ff.

12 Lebenslauf

Persönliche Daten

Christian Stahlhut
Karlstraße 7a, 31737 Rinteln
geboren am 29.12.1977 in Rinteln
deutsche Staatsangehörigkeit, ledig
Eltern: Karl-Heinz Stahlhut, Verena Stahlhut (geb. Löwe)

Schulbildung

1985 – 1989 Grundschule in Rinteln
1989 – 1991 Orientierungsstufe in Rinteln
1991 – 1998 Gymnasium in Rinteln
Abschluss: Abitur

Grundwehrdienst

07/1998 – 04/1999 Grundwehrdienst in Varel und Munster

Studium

10/1999 – 08/2006 Studium des Maschinenbaus an der Universität Hannover
Abschluss: Diplom-Ingenieur

Berufliche Tätigkeit

12/1999 – 07/2006 Wissenschaftliche Hilfskraft
am Laser Zentrum Hannover e.V.
seit 08/2006 Wissenschaftlicher Mitarbeiter
am Laser Zentrum Hannover e.V.