

**Fachliche Stellungnahme für Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung
(Schweißverbindung an einem Graugussteil)**

Nr. S10/16

Auftraggeber: Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung

Ansprechpartner: Herr XXX

Aufgabe: Schadensuntersuchung

Prüfgegenstand: Verriegelung einer Klappe an einem Kessel

Untersuchungen: Prof. Dr. – Ing. Lutz Müller

Ausfertigungen: 2

Gesamtseitenzahl: 20

1. Aufgabenstellung und Voraussetzungen

Die Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung (BSU) beauftragt Prof. Dr.-Ing. L. Müller mit einer fachlichen Stellungnahme zu einem Schadensfall auf der WEICHSELSTERN (Verriegelung einer Klappe an einem Kessel), wobei das zu untersuchende Teil durch die BSU bereitgestellt wurde.

Die für die Bewertung des Schadenfalls notwendigen werkstoffkundlichen Untersuchungen (chemische Analyse, Schliffbilder, Härtemessungen) wurden als Unterauftrag durch die SLV Nord (Zertifiziertes Labor) durchgeführt.

2. Gegenstand der Untersuchungen

Die für die Durchführung der Untersuchungen bereitgestellte Verriegelung einer Klappe weist im Mittelstück (Verbindungsstück zwischen Drehgelenk und Verriegelungshaken) einen Bruch auf. Nach Informationen des Auftraggebers ist dieser Bruch durch eine plötzlich auftretende mechanische Beanspruchung ausgelöst worden. Bild 1 gibt die Einbausituation (Reste der Verriegelung noch am Kessel fixiert) wieder.

3. Durchgeführte Prüfungen

- direkte Sichtprüfung nach DIN EN ISO
- Bewertung der Schweißverbindung nach DIN EN ISO
- chemische Analysen von Grundwerkstoff und Schweißgut
- Bruchflächenuntersuchung
- Mikroschlifferstellung und metallografische Prüfung
- Härteprüfungen in Anlehnung an DIN EN ISO 9015-1

3.1 Direkte Sichtprüfung

Das angelieferte Teil wurde am IWS einer visuellen Begutachtung mit einer Stereolupe unterzogen.

3.1.1 Prüfergebnisse

Im Verbindungsstück zwischen Drehgelenk und Haken befindet sich eine Schweißverbindung. Das Schweißgut weist einen deutlichen Farbunterschied zum Grund-

werkstoff auf, was auf einen nichtartgleichen Schweißzusatzwerkstoff hinweist. Der Bruch liegt im Randbereich der Schweißverbindung. Die Rissufer weisen makroskopisch keine Hinweise (z. B. Schwingungsriefen) auf einen Schwingungsbruch auf.

Vielmehr weist die makroskopische Ausbildung der Rissufer auf einen Gewaltbruch hin (Bild 2), wobei deutlich wird, dass der Zusatzwerkstoff den Grundwerkstoff ringförmig umschließt.

3.2 Bewertung der Schweißverbindung nach DIN EN ISO 5817 (2014-06)

3.2.1 Prüfergebnisse

Die Ausführung von Schweißnähten erfolgt nach DIN EN ISO 5817 (2014-06), wobei die Unregelmäßigkeiten nach unterschiedlichen Bewertungsgruppen eingeteilt werden (B – D). Die vorliegende Schweißverbindung an der Verriegelung entspricht dabei der Bewertungsgruppe D, was der geringsten Anforderung an die Ausführung einer Schweißung entspricht und erhebliche Nahtunregelmäßigkeiten zulässt, Bilder 3 - 6.

In den Klassifikations- und Bauvorschriften (II Werkstoffe und Schweißtechnik; Ausgabe 1999; vom GL) heißt es in Abschnitt 1 Schweißen von schiffbaulichen Konstruktionen; D. Werkstoffe, Schweißbeignung unter Punkt 1.: „Die Werkstoffe müssen entsprechend dem Verwendungszweck gewählt werden, wobei die mechanischen und thermischen Beanspruchungen zu berücksichtigen sind. Die Werkstoffe müssen bei werkstoffgerechter Weiterverarbeitung in ihren Eigenschaften den Betriebsbeanspruchungen genügen.“

Weiterhin heißt es in Abschnitt 2 G Schweißen von Dampfkesseln, Kapitel 3 Punkt G.; Schweißtechnische Ausführung unter Punkt 1.: „Die Schweißnähte müssen über den ganzen Querschnitt einwandfrei durchgeschweißt sein und keine Risse oder Bundefehler aufweisen. Soweit möglich, müssen sie auf der Wurzelseite ausgearbeitet und gegengeschweißt werden“.

Setzt man diese Kriterien für die Bewertung an (Bilder 3 - 6; Endkrater, Kerben Nahtüberhöhungen usw.), so erfüllt die Schweißverbindung nicht mal die untersten Anforderungen dieser Vorschrift.

Wie Bild 7 und 8 zeigen, ist beim Schweißen auch Zusatzwerkstoff auf den Kopf des Drehgelenkes gelangt, was die Vermutung nährt, dass die Schweißung im eingebauten Zustand erfolgt ist.

3.3. Chemische Analysen von Grundwerkstoff und Schweißgut

3.3.1 Prüfergebnisse

Da der Grundwerkstoff und das Schweißgut unterschiedliche Farbgebung aufweisen, wurden Analysen sowohl vom Grundwerkstoff, als auch vom Schweißgut durchgeführt. Dabei erfolgten die chemischen Analysen nach SLV-AA WT011:2014.

Die chemische Analyse weist die typische Zusammensetzung eines Graugusses mit relativ geringem Schwefel- und Phosphorgehalt auf. Wie die mikroskopische Darstellung Bild 9 zeigt, hat sich Lamellargrafit in einer ferritischen/perlitischen Matrix ausgebildet.

Tabelle 1 gibt den Mittelwert von drei Einzelmessungen wieder. Da die Einzelmessungen deutliche Streuungen aufweisen, sind die Einzelmessungen im Anhang wiedergegeben.

Methode: Funkenemissionsspektroskopie, Mittelwert aus drei Einzelmessungen, Angaben in Masse-%

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Cu [%]	Mo [%]	V [%]
3,58	2,44	0,55	0,023	0,032	0,053	0,074	0,089	0,005	0,010
Nb [%]	W [%]	Ti [%]	Ca [%]	Sn [%]	Pb [%]	Al [%]	Mg	B [%]	Fe [%]
0,004	< 0,001	0,008	< 0,0003	0,005	< 0,001	< 0,002	< 0,001	< 0,001	> 92,9

Tabelle 1: Chemische Analyse des Grundwerkstoffs (nach SLV-AA WT011:2014)
Mittelwert aus drei Messungen.

Verfahrensbedingt werden zur Ermittlung der chemischen Zusammensetzung eines Werkstoffes Flächen mit entsprechendem Durchmesser (einigen mm) benötigt. Die hieraus ermittelten Werte ergeben dann einen Mittelwert über diese Fläche.

Da es in einer Schweißverbindung unterschiedliche Bereiche und unterschiedliche Aufmischungsgrade zwischen Zusatz- und Grundwerkstoff gibt, bilden sich häufig deutlich unterschiedliche Analysenwerte bei der Zusammensetzung in benachbarten Bereichen. Die folgenden Tabellen spiegeln dieses deutlich wieder.

Messung 1

Methode: Funkenemissionsspektroskopie, Einzelmessung, Angaben in Masse-%

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Cu [%]	Mo [%]	V [%]
0,790	0,365	0,472	0,025	0,009	< 5,0	> 56,8	0,015	< 0,005	< 0,002
Nb [%]	W [%]	Ti [%]	Ca [%]	Sn [%]	Pb [%]	Al [%]	N	B [%]	Fe [%]
< 0,003	0,069	0,015	0,002	< 0,002	< 0,002	0,007	0,010	0,0010	> 53,9

Messung 2

Methode: Funkenemissionsspektroskopie, Einzelmessung, Angaben in Masse-%

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Cu [%]	Mo [%]	V [%]
0,908	0,753	1,007	0,023	0,009	< 5,0	< 4,0	0,037	< 0,005	< 0,002
Nb [%]	W [%]	Ti [%]	Ca [%]	Sn [%]	Pb [%]	Al [%]	N	B [%]	Fe [%]
< 0,003	< 0,015	0,031	< 0,0005	< 0,002	< 0,002	0,001	n. b.	< 0,0003	> 87,9

Messung 3

Methode: Funkenemissionsspektroskopie, Einzelmessung, Angaben in Masse-%

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Cu [%]	Mo [%]	V [%]
0,584	0,562	0,947	0,019	0,010	< 5,0	20,99	0,030	< 0,005	< 0,002
Nb [%]	W [%]	Ti [%]	Ca [%]	Sn [%]	Pb [%]	Al [%]	N	B [%]	Fe [%]
< 0,003	< 0,015	0,012	n. b.	< 0,002	< 0,002	0,004	n. b.	0,0012	> 71,5

Tabelle 2 - 4: Chemische Zusammensetzung des Schweißgutes an drei unterschiedlichen Stellen.

Der hohe Nickelgehalt in Messung 1 weist deutlich auf die Verwendung eines Nickel-Basiswerkstoffes als Zusatzwerkstoff hin, wie er für das „Artfremdesschweißen“ (früher auch Kaltschweißen genannt) Verwendung findet.

Messung 3 weist zwar einen deutlich geringeren Nickelgehalt auf als es für Nickel-basislegierungen zu erwarten ist, jedoch ist dies sehr wahrscheinlich auf eine deutliche Aufmischung mit dem Grundwerkstoff zurückzuführen.

Auffällig hingegen ist Messung 2. Das Verhältnis der Elemente Kohlenstoff und Nickel lässt sich nicht so eindeutig durch eine Aufmischung von Grundwerkstoff und Schweißzusatzwerkstoff erklären. Möglicherweise fand im Rahmen der Reparatur punktuell auch ein sehr eisenhaltiger Zusatzwerkstoff mit nur geringen Nickelgehalten Verwendung.

3.4. Bruchflächenuntersuchung

3.4.1 Prüfergebnisse

Die Bilder 10 und 11 (Ausschnitt aus 10) zeigen die Bruchflächen der Rissufer. Die Rissfläche weist deutlich das Bild eines Gewaltbruches auf. Spuren von Schwingungsanrissen konnten nicht gefunden werden. Darüber hinaus wird deutlich, dass das Schweißgut sich als Ring um den Grundwerkstoff legt.

An einigen Stellen bildet sich eine dünne Schicht zwischen Zusatz- und Grundwerkstoff aus (Bild 12) und an anderen Stellen haben sich in diesem Bereich Schlackeeinschlüsse abgelagert (Bild 13).

3.5. Mikroschlifferstellung und metallografische Prüfung

3.5.1 Prüfergebnisse

Um das Gefüge über die Schweißverbindung zu interpretieren und die Härte messen zu können, wurde der Riegel längs geschnitten. Bild 14 gibt einen Überblick über den Schweißbereich (hell - Grundwerkstoff; dunkel - Zusatzwerkstoff). Im linken Bildteil ist ein weiterer Anriss zu erkennen. Darüber hinaus wird deutlich, dass nur eine unzureichende Nahtvorbereitung stattgefunden hat und, dass das Schweißgut eine deutliche Nahtüberhöhung aufweist. Die im Bild dargestellten Bereiche und Zahlen dienen der Kennzeichnung der Messstellen (interne Nummerierung).

Bild 15 (Ausschnitt aus Bild 14) gibt die Schmelzlinie zwischen Grundwerkstoff (oben) und Schweißgut wieder. Es haben sich schmale Gefügesäume gebildet, die eine Struktur aus Ledeburit, bereichsweise auch Korngrenzenkarbiden und möglicherweise „unlegiertem Stahl“ aufweisen.

In anderen Bereichen der Schweißverbindung weist das Gefüge (Bild 16; Ausschnitt aus 14) Anteile von tetragonalem Martensit und Restaustenit auf, wobei sich auch Härterisse (Bild 17) zeigen.

Im ungeätzten Schliff im Nickel-Basis-Schweißgut lassen sich Heißrisse erkennen, die sich durch Schrumpfspannungen beim Abkühlen bilden (Bild 18).

In einer Übersichtsaufnahme über das Schweißgut wird deutlich, dass sich durch die Aufmischung von Grundwerkstoff und artfremdem Grundwerkstoff stark unterschiedliche Gefügebereiche ausbilden (Bild 19). (Hauptsächliche Gefügebestandteile: Perlit, Martensit Ledeburit und Austenit).

Die Art und die Menge der sich bildenden Gefüge hängt aber, neben der chemischen Zusammensetzung, auch von den thermischen Bedingungen beim Schweißen ab.

3.6. Härteprüfungen in Anlehnung an DIN EN ISO 9015-1

3.5.1 Prüfergebnisse

Bild 3 zeigt einen Ausschnitt aus Bild 2 in dem die Härtemesspunkte aus Tabellen 1 und 2 durch rote Kreise mit Zahlen markiert sind.

Tabelle 5: Härteprüfungen (in Anlehnung an DIN EN ISO 9015-1:2011 in HV5)
Grundwerkstoff und Übergang zum austenitischen Schweißgut

1 GW [HV5]	2 GW [HV5]	3 WEZ [HV5]	4 WEZ [HV5]	5 SL [HV5]
161	151	172	244	289

GW: Grundwerkstoff; SL: Schmelzlinie; WEZ: Wärmeeinflusszone; SG: Schweißgut

Tabelle 6: Härteprüfungen (in Anlehnung an DIN EN ISO 9015-1:2011 in HV5)
Übergang vom Grundwerkstoff zum martensitisch-restaustenischen Schweißgut

6 SL [HV5]	7 SG [HV5]	8 SG [HV5]	9 SG [HV5]	10 SG [HV5]
407	425	367	543	552

GW: Grundwerkstoff; SL: Schmelzlinie; WEZ: Wärmeeinflusszone; SG: Schweißgut

Wie die Tabellen 5 und 6 zeigen, haben sich im Bereich der Schmelzlinien sehr unterschiedliche Härtewerte ausgebildet. So weist der Übergang zum hoch nickelhaltigen Schweißgut über den gesamten Bereich nur moderate Härtewerte auf (Tabelle 5). Anders in dem Bereich, in dem sich Martensit und Restaustenit gebildet haben (Tabelle 6). Hier werden Härtewerte von deutlich über 500 HV gemessen, was

die Härterisse erklärt. Die gemessenen Werte korrespondieren mit den im Schliffbild identifizierten Gefügeausbildungen.

4. Anmerkungen zum Schweißen von Grauguss mit Lamellengrafit

Die Gefügeausbildung von niedrig legierten Eisen-Kohlenstoff-Werkstoffen ist von der chemischen Zusammensetzung und auch von den thermischen Wärmezyklen bestimmt.

Die Haupteinflussgrößen auf die Schweißbeignung sind:

- der C-Gehalt in Form von Graphit und Fe_3C
- die hieraus entstehende Sprödigkeit bzw. geringe Bruchdehnungsmöglichkeit
- die geringe Möglichkeit Eigenspannungen bedingt durch den Schweißprozess abzubauen
- die sehr dünnflüssige Schmelze des Schweißbereiches
- der z. Zt. relative hohe P- und S-Gehalt

Die Ausbildung von Lamellengrafit, wie sie im Bauteil vorliegt, wird durch höhere Siliciumgehalte und langsame Abkühlung erreicht. Neben einer ausreichenden Festigkeit weist der Werkstoff jedoch nur eine sehr geringe Dehnung auf, was besondere Anforderungen an die Schweißtechnologie stellt, um rissfreie Verbindungen herzustellen.

Sollen diese Legierungen geschweißt werden, so ist das geringe Dehnungsverhalten bei lokalen thermischen Belastungen und die hierdurch bedingte Rissempfindlichkeit das dominierende Problem. Um diesem Rechnung zu tragen, haben sich zwei unterschiedliche Techniken entwickelt:

- Beim artgleichen Schweißen wird der Werkstoff während des Schweißens auf Temperaturen von 500° - 700° gehalten und anschließend sehr langsam abgekühlt. Hierdurch erreicht man Werkstoffeigenschaften, die dem Grundwerkstoff entsprechen.
- Beim artfremden Schweißen wird nur wenig Wärme in die Schweißnaht eingebracht, was zu hoher Abkühlgeschwindigkeit und entsprechend spröden Gefügen (Ledeburit und Martensit) führt. Die Art und Größe dieser Zonen hängt sehr stark vom thermischen Zyklus im Übergangsbereich

Schmelze/Wärmeeinflusszone ab. Da der Werkstoff die abkühlbedingten Schrumpfspannungen nicht abbauen kann, werden hochnickelhaltige Zusatzwerkstoffe (hohe Verformungsmöglichkeit) verwendet. Da dies nicht ausreicht, werden nur sehr kurze Abschnitte geschweißt und sofort durch Abhämmern Druckspannungen eingebracht, die einen Teil der Zugspannungen kompensieren. Da Nickel deutlich geringere Festigkeit als Gusseisen hat, werden die Festigkeiten des Ausgangsgefüges nicht erreicht.

Trotz dieser Maßnahme ist eine absolute Rissfreiheit dieses Verfahrens nicht gewährleistet.

5. Zusammenfassende Wertung

Die Schweißverbindung wurde mit einem hochnickelhaltigen Zusatzwerkstoff geschweißt. Die Ausführung der Schweißung (Endkrater, Kerben im Nahtübergang) ist z.B. nach DIN EN ISO 5817 (2014-06) nur knapp in die Gruppe D (keine Anforderungen an die Nahtqualität) einzuordnen. Dies gilt auch für andere Bewertungsrichtlinien.

Die Rissflanken weisen keine Merkmale eines Schwingungsrisses auf, vielmehr weisen diese Merkmale eines Sprödbruches auf.

Wie die mikroskopischen Schliffbilder zeigen, haben sich spröde Gefüge (Ledeburit, Martensit, Härtewerte von über 550 HV) im Nahtübergangsbereich durch die thermischen Bedingungen bei den gewählten Schweißbedingungen gebildet. Hierdurch können die thermisch bedingten Spannungen beim Abkühlen der Schweißverbindung nicht kompensiert werden, so dass sich Risse gebildet haben.

Zum anderen haben sich Heißrisse im Nickelzusatzwerkstoff gebildet, die einerseits durch niedrigschmelzende Eutektika, die sich bei diesen Werkstoffen auf den Korngrenzen bilden, und andererseits durch die thermisch bedingten Zugspannungen entstehen.

Als Ursache für das Versagen des Bauteils muss die nicht fachgerechte Schweißverbindung angesehen werden. Diese weist neben äußeren, starken Unregelmäßigkeiten auch innere Fehler (Härtegefüge mit Rissen; spannungsbedingte Heißrisse) auf. Darüber hinaus weisen Nickellegierungen geringere Festigkeiten als der Grundwerkstoff Gusseisen auf.

Es ist somit davon auszugehen, dass die Summe dieser Unzulänglichkeiten die Belastbarkeit der Schweißverbindung deutlich eingeschränkt hat.

Prof. Dr.-Ing. L. Müller

Jesteburg, den 01.11.2016

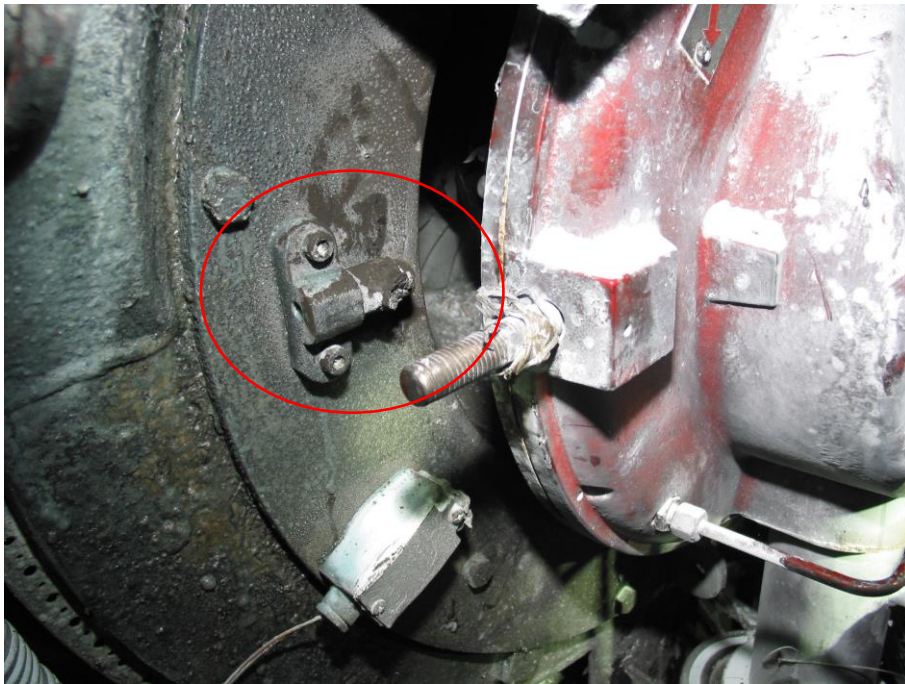


Bild 1: Einbausituation der Verriegelung (Markierung: Befestigung der Verriegelung mit Reststück). Quelle des Fotos: BSU.



Bild 2: Bruchfläche – Seite am Drehgelenk



Bild 3: Makroaufnahme der Schweißung mit Lunker und Einbrandkerben



Bild 4: Makroaufnahme der Schweißung mit Lunker und Einbrandkerben

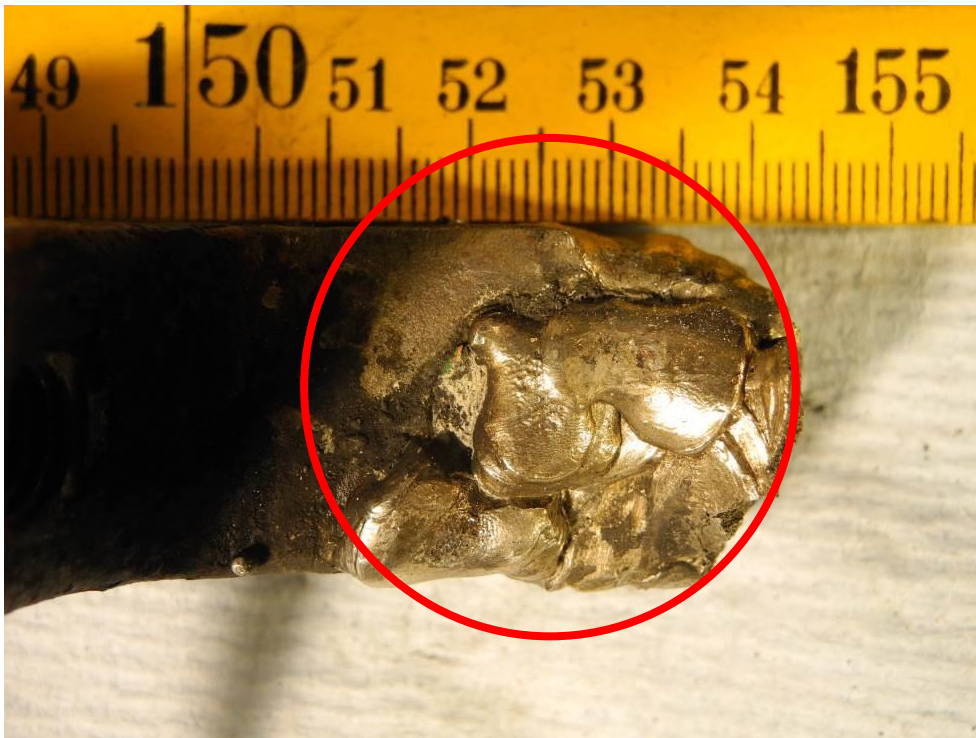


Bild 5: Makroaufnahme der Schweißung mit Lunker und Einbrandkerben

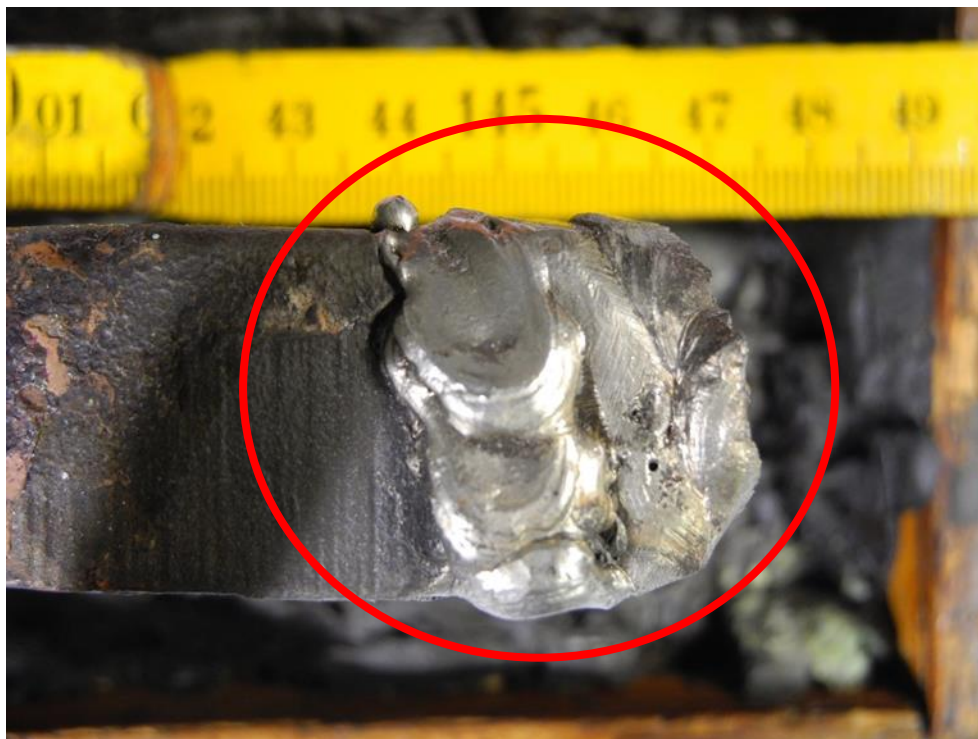


Bild 6: Makroaufnahme der Schweißung mit Lunker und Einbrandkerben



Bild 7: Kopf des Drehgelenkes „überschweißt“



Bild 8: Kopf des Drehgelenkes „überschweißt“

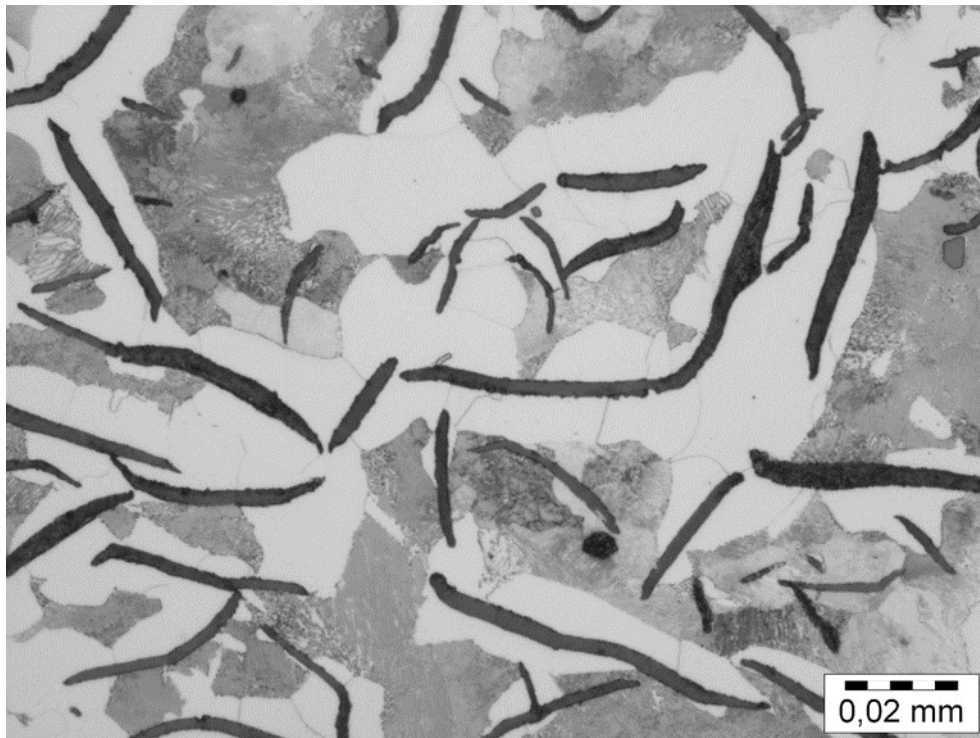


Bild 9: Mikrogefüge des Grundwerkstoffes.
Gusseisen – ferritisch-perlitisches-Grundgefüge mit Lamellengrafit

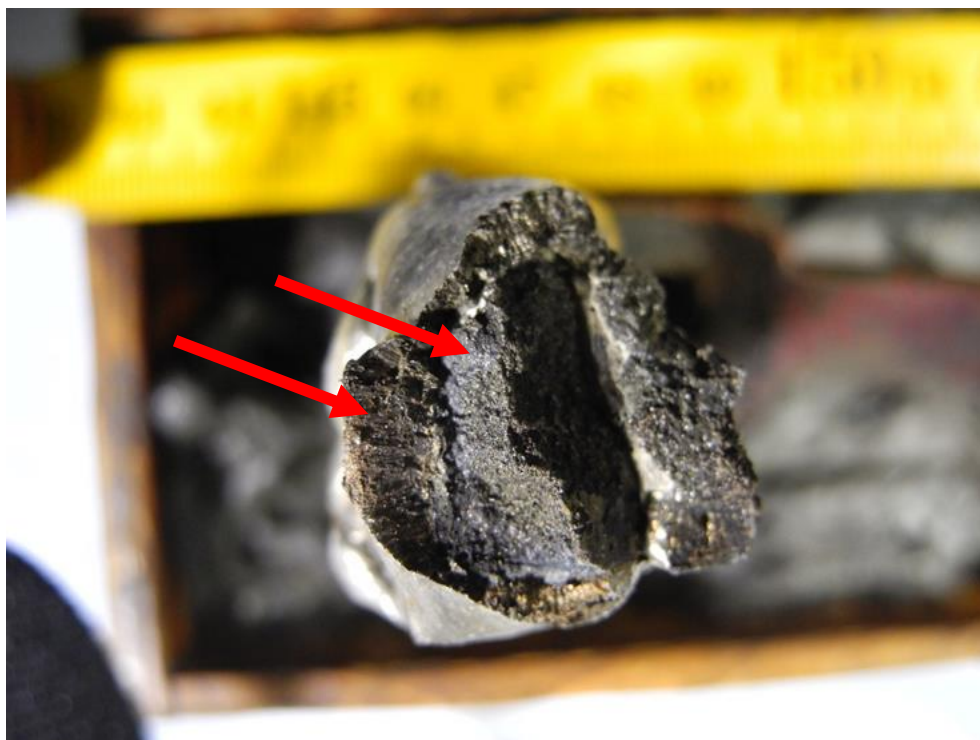


Bild 10: Bruchfläche – Mitte Grundwerkstoff; Rand – „Mantel“ aus Schweißgut

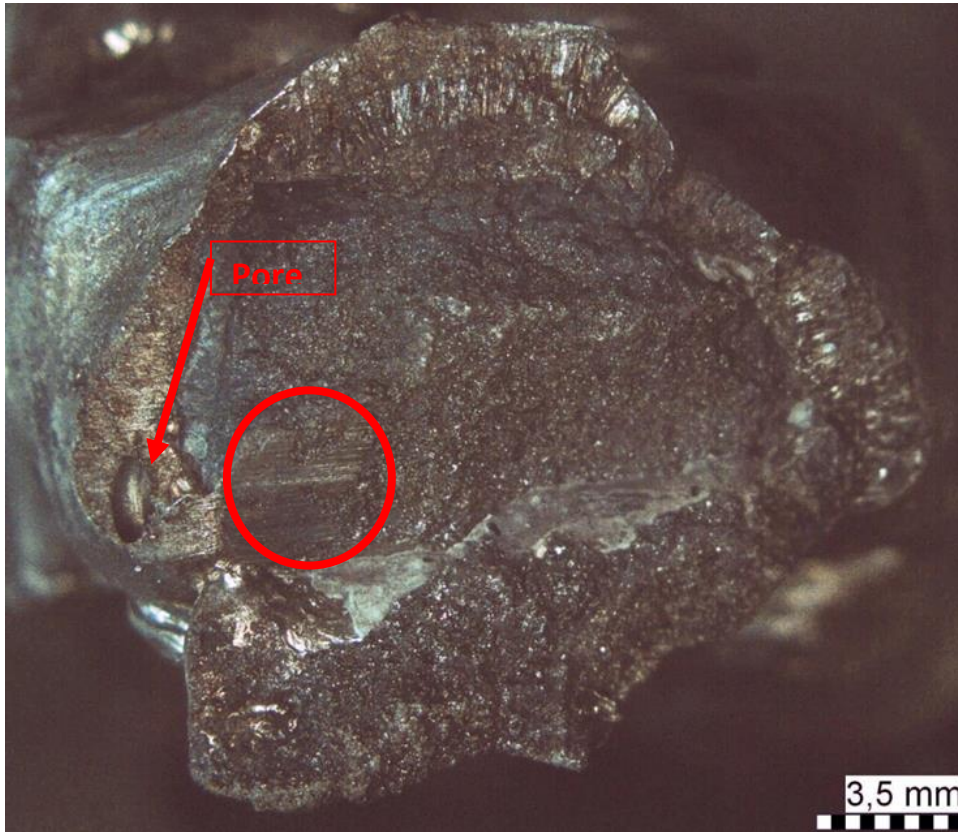


Bild 11: Ausschnitt aus Bild 10, nach dem Bruch mechanisch verformt



Bild 12: A: Schweißgut, B: Grundwerkstoff, C: Zwischenschicht

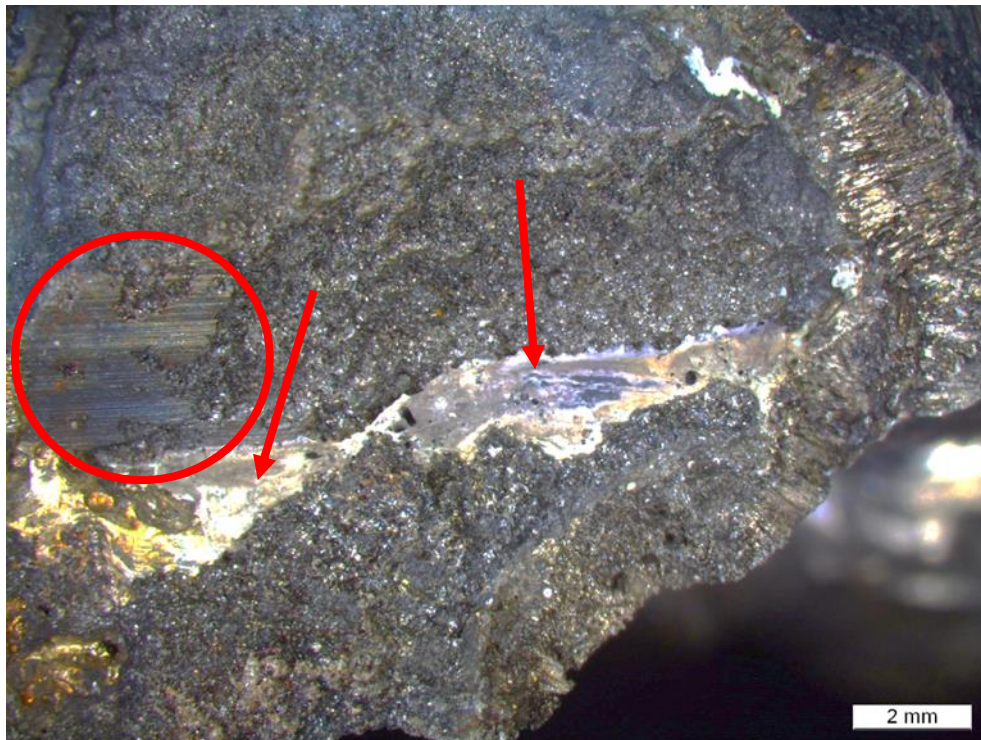


Bild 13: Schlackeneinschlüsse zwischen Zusatz und Grundwerkstoff;
Kreis – Beschädigung nach dem Bruch

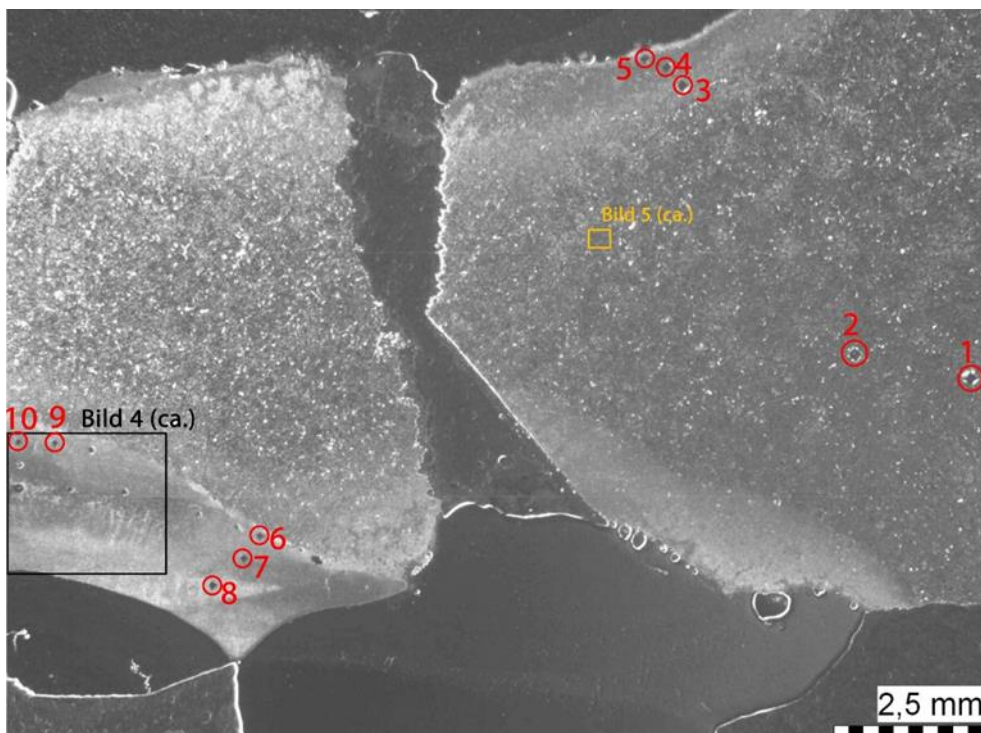


Bild 14: Übersicht über die Schweißverbindung (Markierung der Vergrößerungen –
interne Nummerierung – und Härtemessungen)

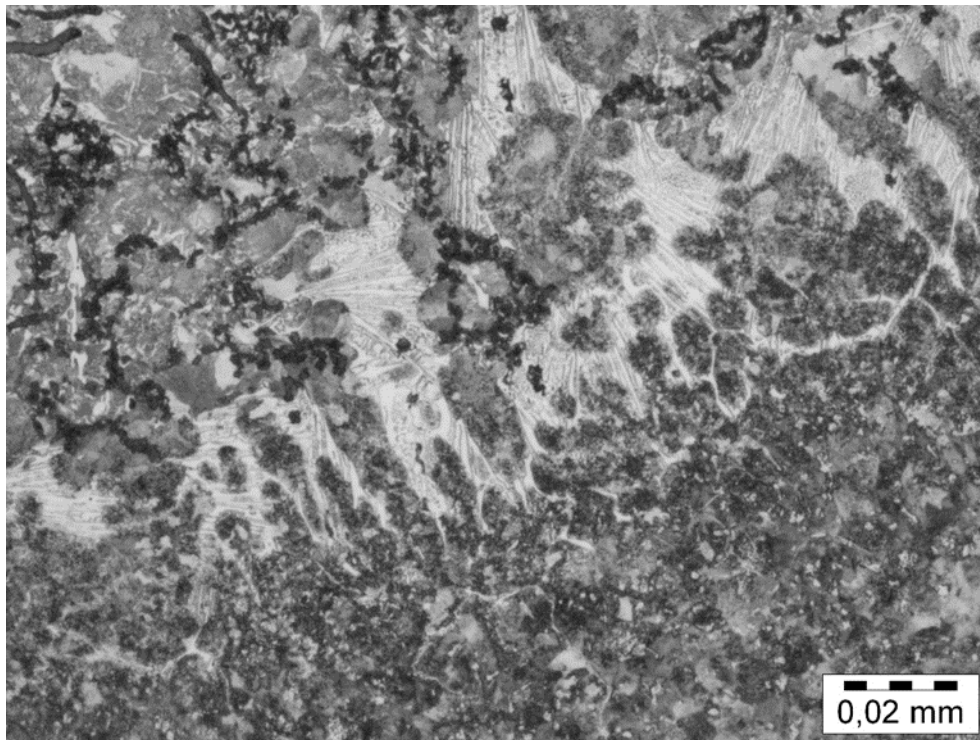


Bild 15: Schmelzlinie zwischen Grundwerkstoff (oben) und Schweißgut aus vermutlich unlegiertem Schweißzusatz (unten). Ledeburit und bereichsweise Korngrenzenkarbide.

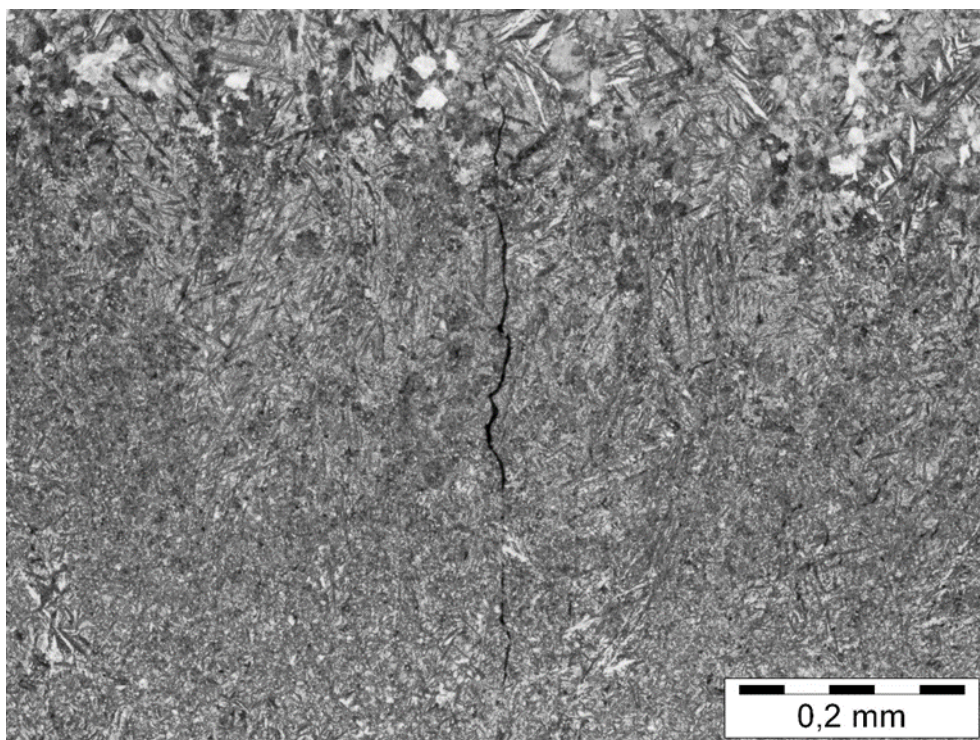


Bild 16: Nahtübergang mit Kaltriss im martensitischen Gefüge

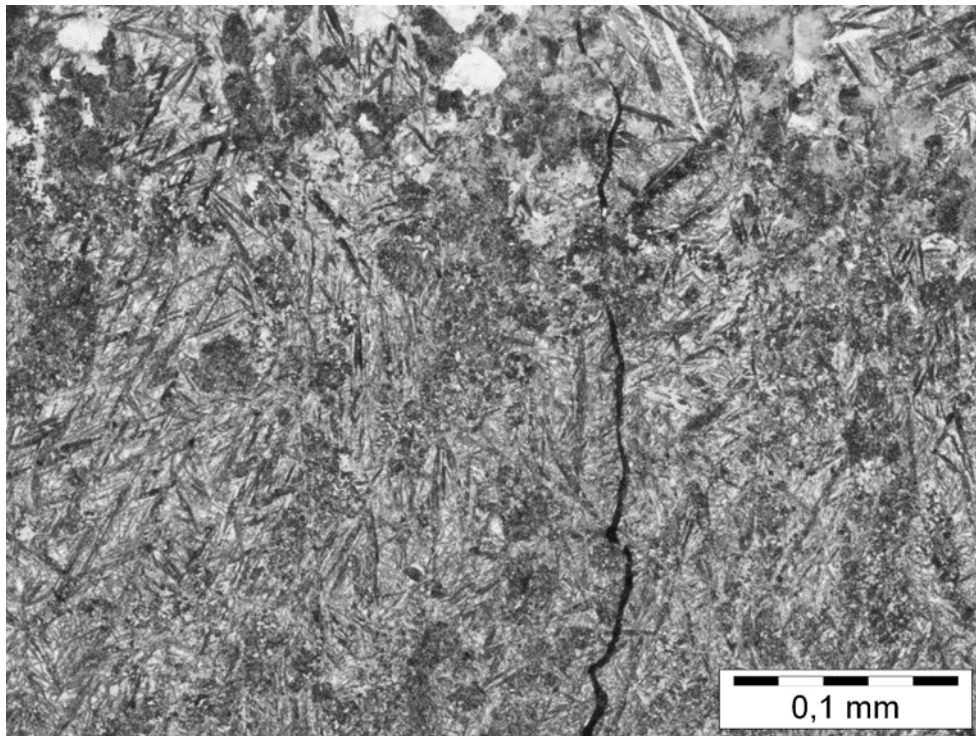


Bild 17: Ausschnitt aus Bild 16

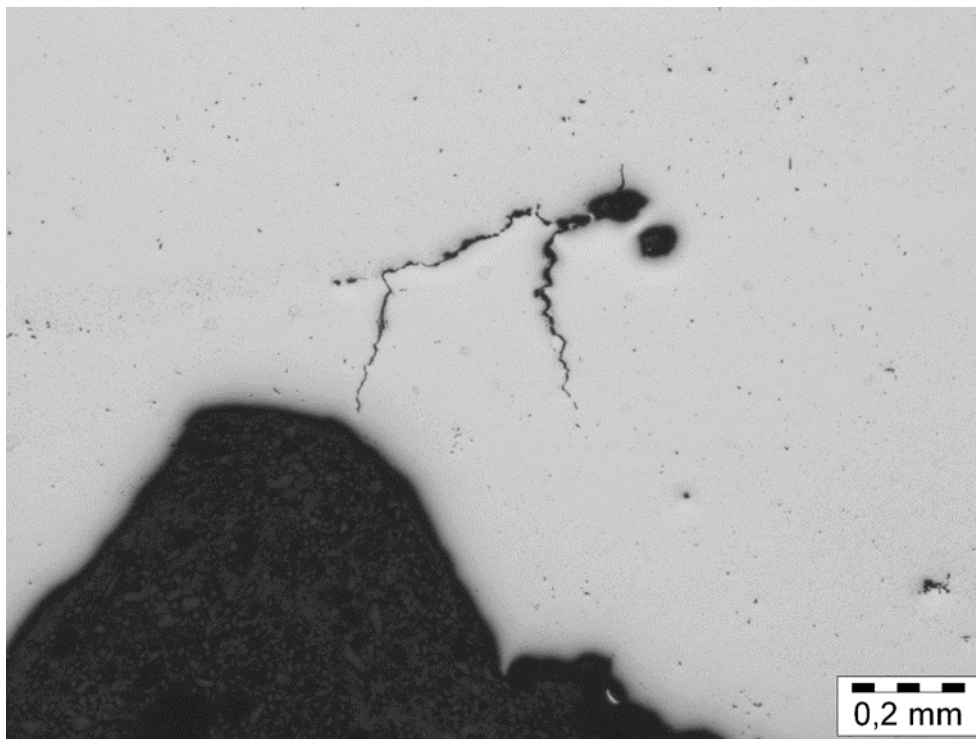


Bild 18 Heißriss im Schweißgut (ungeätzter Schliff)

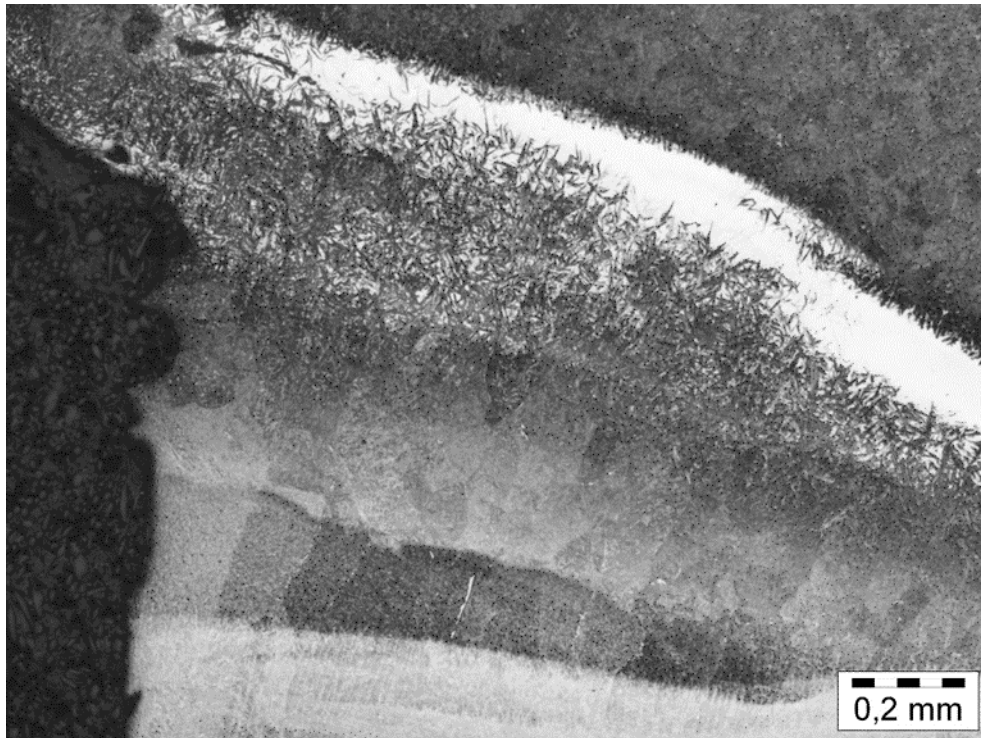


Bild19: Überblick über die Schmelzzone

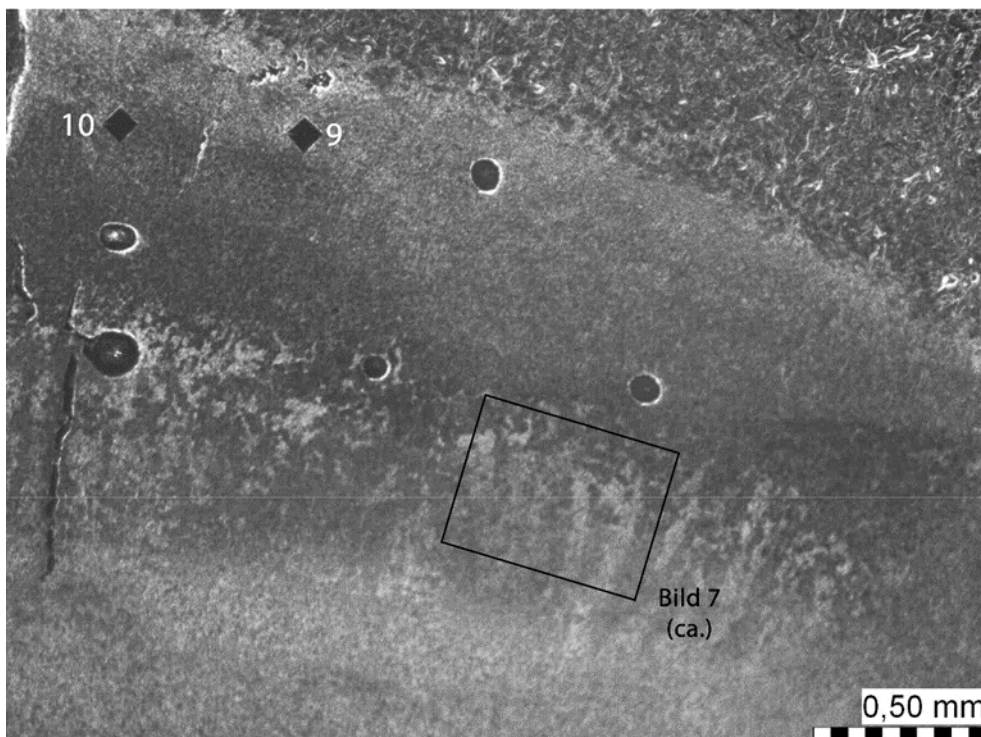


Bild 20: Ausschnitt aus Bild 14 (Lage der Bilder und Härtemesspunkte)