



Benjamin Laher, BSc

# **Elektronenstrahlschweißen des hochfesten Stahls S960MC und Zähigkeitsuntersuchungen**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Dipl.-Ing. Dr. techn. Rudolf Vallant

Dipl.-Ing. Christian Schneider

Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik

Dipl.-Ing. Wolfgang Ernst  
voestalpine Stahl GmbH

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

### ***AFFIDAVIT***

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

*I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.*

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature

## **Kurzfassung**

In dieser Arbeit wurden an einem 8 mm dicken thermomechanischen Feinkornbaustahl S960MC Zähigkeitsuntersuchungen von Elektronenstrahlschweißungen durchgeführt. Die Schweißparameter konnten durch Auswertung makro- und mikroskopischer Querschliffbilder verbessert werden. Hierbei sind folgende Unregelmäßigkeiten bzw. Fehler aufgetreten: große Nahtunterwölbung und schlechte Durchschweißung, sowie tropfenförmige Wurzelnaht. Die Haupteinflussgrößen des Elektronenstrahls auf das Nahtaussehen waren die Fokuslage und die Strahlfigurengröße.

Im Anschluss erfolgten die Herstellung und die Fertigung von Kerbschlagbiegeproben mit der Kerblage in Schweißnahtmitte. Des Weiteren wurden Vickers-Härtemessungen durchgeführt. Es wurden insgesamt drei verschiedene Versuchsreihen auf ihre Kerbschlagbiegezugfähigkeiten und Schweißnahtgeometrien untersucht. Die Kerbschlagzugfähigkeiten (bei  $-40^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$  und Raumtemperatur) streuen stark, aufgrund der fertigungsbedingten Kerblagenunterschiede in der schmalen Schweißnaht (Nahtbreiten ca. 2 mm und Wärmeeinflusszonen ca. 0,4 mm).

## **Abstract**

In this thesis toughness studies of electron beam welds on an 8 mm thick HSLA steel S960 MC were performed. The welding parameters were evaluated by using macro- and microscopic images. Imperfections of the welds were as follow: incompletely filled groove and incomplete penetration, as well as excessive melt-through (drop-shaped root). The main influencing factors of the electron beam welding seam quality were the focus position and the beam size figure.

Polished sections were prepared and Vickers-hardness measurements were examined. Charpy-V impact tests were performed on specimens with notch location in the weld center. Three different test series were investigated regarding their Charpy-V impact toughness and weld geometries. Results for notched impact strength ( $-40^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$  and room temperature) varied due to production-related notch position variations in the narrow seam (seam widths of about 2 mm and heat-affected zones around 0.4 mm).

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Diplomarbeit unterstützt und motiviert haben.

In diesem Sinne bedanke ich mich recht herzlich bei Institutsvorstand Prof. Dr. Sommitsch der mir die Durchführung dieser Diplomarbeit am Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik ermöglicht hat.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinem Betreuer Dipl.-Ing. Christian Schneider bedanken, der mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist und mich sehr unterstützt hat. Mit seinem Wissen, Anregungen und Beitrag war es möglich, dass diese Diplomarbeit in dieser Form gelingen konnte.

Ebenfalls möchte ich mich bei Dr. techn. Rudolf Vallant und Dipl.-Ing. Wolfgang Ernst bedanken, die mir mit viel Interesse und Wissen durch diese Arbeit geholfen haben.

Darüber hinaus möchte ich mich bei meiner ganzen Familie und Freunden bedanken die mich durch dieses Studium unterstützt und begleitet haben.

Graz, Jänner 2016



## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Problemstellung	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Durchführung	1
2	Theoretischer Hintergrund	2
2.1	Elektronenstrahltechnik	2
2.1.1	Einführung in die Elektronenstrahltechnik	2
2.1.2	Vorteile und spezielle Kennzeichen der Elektronenstrahlschweißung	4
2.1.3	Maschinenaufbau	6
2.1.4	Elektronenstrahlgenerator	7
2.1.5	Arbeitskammer	8
2.1.6	Bewegungseinrichtung	8
2.1.7	Sonstige Einrichtungen	9
2.1.8	Elektronenstrahlaufbau	9
2.1.9	Verhalten und Auswirkungen der einzelnen Schweißparameter	10
2.2	Hochfeste Stähle	14
2.2.1	Herstellungsverfahren	15
2.2.2	Stahlbezeichnungen	16
2.3	Kerbschlagbiegeversuch	17
2.3.1	Erläuterung	17
2.3.2	Instrumentiertes Prüfverfahren	19
2.4	Härteprüfung	21
2.4.1	Härteprüfung nach Vickers	21
3	Material und Methoden	23
3.1	Hochfester Baustahl S960 MC	23
3.2	Entmagnetisierereinrichtung	24
3.3	Elektronenstrahl-Kammeranlage	25
3.4	Schweißvorbereitung und Materialvorbereitung	26
3.4.1	Heften der Probenplatten	26
3.5	Versuchsschweißungen	28

3.5.1	Blindnahtschweißungen	28
3.5.2	Vorbereitung für Schliffbilder	30
3.5.3	Ätzen der Blindnahtschweißproben	31
3.6	Kerbschlagbiegeversuch	31
4	Ergebnisse und Diskussion	32
4.1	Schweißparameteroptimierung	32
4.1.1	Blindschweißungen	32
4.1.2	Blindschweißungen optimiert mit konstanter Fokusslage	34
4.1.3	Verbindungsschweißungen	34
4.1.4	Verbindungsschweißungen mit Kantenanarbeitung	35
4.1.5	Verbindungsschweißungen mit gehefteten Proben	39
4.1.6	Schliffbilder Mikroskopie Probe 26	41
4.2	Strahlfigurenoptimierung	43
4.3	Kerbschlagbiegeversuch	45
4.3.1	Auswertung der Kerbschlagproben	48
4.3.2	Bewertung des Zähbruchanteils	51
4.3.3	Seitliches Bruchverhalten	51
4.3.4	Bruchflächenanalyse	53
4.4	Kerbschlagarbeiten der Schweißproben K, A und B	56
4.5	Härtemessung an Verbindungsschweißungen	59
4.6	Auswertung der Proben	62
4.6.1	Gesamtvergleich K, A und B	63
5	Zusammenfassung und Interpretation	64
6	Quellenverzeichnis	66
7	Abbildungsverzeichnis	68
8	Tabellenverzeichnis	72
9	Anhang	74
9.1	Blindnahtschweißungen	74
9.2	Schliffbilder Blindnahtschweißungen	75
9.3	Verbindungsschweißungen	77

9.4	Mikroskopische Schliffbilder	78
9.5	Kerbschlagbiegeproben	79
9.6	Kerbschlagarbeiten	84
9.7	Härtewerte K1, A1 und B5	85
9.8	Kerbschlagauswertungen Proben K, A und B	87

# 1 Einleitung und Problemstellung

## 1.1 Aufgabenstellung

In der modernen Industrie werden heutzutage immer höhere Ansprüche an Material, Beanspruchung, sowie Herausforderung an das „möglich machbare“ gestellt. Dies bestrebt die Forschung immer neue Methoden und Verfahren zu entwickeln um diese gestellten Anforderungen zu Erfüllen. Im jetzigen Stahl- und Anlagenbau sowie Kran-, Nutzfahrzeug-, und Automobilbau ist in den letzten Jahren das Interesse an hochfesten Feinkornbaustählen bedeutend gestiegen. Der Grund dafür ist einerseits das Einsparen an Gewicht und Material, sowie die mechanischen Eigenschaften des Materials, wie z.B. höherer Tragfähigkeit und Zähigkeit des Werkstoffes im Vergleich zu herkömmlichen Baustahl.

In dem thermomechanischen Feinkornbaustahl S960MC steckt noch sehr viel Potential, bezogen auf die Elektronenstrahlschweißtechnik. In dieser Arbeit lag der Fokus darauf, geeignete Schweißparameter für den S960 MC Stahl zu finden und diese dann auf ihre Zähigkeit bei verschiedenen Temperaturen (Raumtemperatur, 0°C, -20°C und -40°C) zu untersuchen.

## 1.2 Durchführung

- Literaturrecherche
- Anpassen, erweitern der Versuchs- und Schweißmatrix
- Erstellung Makroschliffe
- Parameteroptimierung
- Kerbschlagbiegeversuche bei RT, 0C°, -20C°, -40C°
- Härtemessung mit HV 0,5
- Auswertung der Ergebnisse

Aus diesen Erkenntnissen können somit detaillierte Aussagen über das Zähigkeitsverhalten beim EBW-Schweißen des S960 MC Stahls getroffen werden.

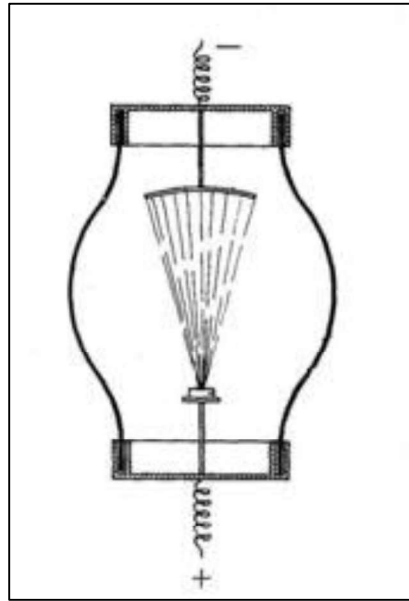
## 2 Theoretischer Hintergrund

### 2.1 Elektronenstrahltechnik

#### 2.1.1 Einführung in die Elektronenstrahltechnik

Geschichtlich gesehen liegt es mehr als 100 Jahre zurück (1869), als die beiden Physiker Crookes und Hittorf Kathodenstrahlen in Gasen herstellten und somit einige Metalle aufschmelzen (1879) konnten. Es dauerte somit eine Weile bis man an dem heutigen Stand der Technik angelangt war, wo ein CNC gesteuertes Elektronenstrahlschweißgerät mit den höchsten Qualitätsanforderungen z.B. Triebwerksteile eines Flugzeugs oder hochreaktive Werkstoffe schweißt, wie sie in der Raumfahrttechnik verwendet werden [1], [2].

Am Anfang der Entwicklung waren die Kathodenstrahlen eine durchaus erstaunliche und tolle physikalische Erscheinung, da sie von Millikan (1905) und Thompson (1897) als erste „schnell bewegte Elektronen“ zitiert wurden. Diese Kathodenstrahlen führten zur Entdeckung der Röntgenstrahlung (1895). Vom Schweißen war man zu diesem Zeitpunkt noch weit entfernt. Das große Problem der damaligen Experimente war die hohe Wärmeausbreitung beim Elektronenaufprall, die das Schmelzen des Targets bzw. Anode verursachte. Mit einer Wasserkühlung erprobte man dies zu verhindern. Erstmals gelang es dem deutschen Physiker Marcello von Piranis eine Röntgenröhre so zu konstruieren, um den Effekt des Elektronenaufpralls gezielter auszunützen. Er baute einen Elektronenstrahl Vakuum Ofen und konnte damit Tantalpulver und einige weitere Metalle anschmelzen. Eine schematische Darstellung seiner Patentschrift ist in Abbildung 1 dargestellt. Dieses Bild zeigt, wie Pirani eine Röntgenröhre so umbaut, dass er in einem Elektronenstrahl Vakuum Ofen Tantalpulver und einige Metalle schmelzen konnte. Dieser Vakuum Ofen wurde von ihm 1905 und 1907 patentiert [3], [4].



*Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Röntgenröhre aus der Patentschrift von Pirani [5]*

In den darauffolgenden Jahren arbeiteten zahlreiche Wissenschaftler mit Elektronenstrahlen. An den Gesetzmäßigkeiten der Strahlerzeugung forschten größtenteils Richardson, Langmuir, Wehnelt und Child. Die Auslegung der Elektronenoptik entwarfen jedoch Calbrick, Flegler, Davisson, Busch und Rogowski. Der technische Durchbruch von Elektronenstrahlen gelang erstmals bei der Herstellung von Mikroskopen und Oszillografen. Für die weitreichende industrielle Fertigung bzw. Einsatz fehlte es jedoch noch an ausreichend leistungsstarken Vakuumpumpen [6].

Eine neue Ära begann mit dem deutschen Physiker Steigerwald, der mit Elektronenstrahlen erstmals im Jahr 1948 Material bearbeitete. Er beschäftigte sich mit der Entwicklung von Elektronenmikroskopen und deren leistungsstarken Strahlquellen. Er stoß dabei auf die Idee, den thermischen Effekt eines gezielten Elektronenstrahls als Bohrer zu nutzen. Unter Vakuum gelang ihm einerseits das Bohren von Ziehdüsen und Uhrensteinen, andererseits das Schmelzen, Schweißen und Löten von diversen Werkstoffen.

Zu Beginn der Elektronenstrahlschweißtechnik betrachtete man die Wärmeeinbringung noch ähnlich wie bei einer Gasflamme oder die des Lichtbogens und hielt es somit nur deshalb von Vorteil, da es gasempfindliche Materialien vor Reaktion der Atmosphäre schützt.

Im industriellen Bereich gelang der Durchbruch des Elektronenstrahlschweißens im Jahr 1958, es wurde verlangt ein fünf mm starkes Zircaloy mit einer Stumpfnahht zu schweißen, wobei das Verhältnis Nahtbreite zu Tiefe klein sein sollte. Es gelang durch schrittweises Erhöhen des Strahlstroms das komplette Werkstück durchzuschweißen. Tiefschweißungen in dieser Form hat es bis zu diesem Zeitpunkt nicht gegeben und es dauerte nicht lange und man erkannte die weltweit technische Bedeutung dieses neuartigen Verfahrens. Am meisten jedoch in den USA, Steigerwald konnte dadurch zwei Maschinen verkaufen. Eine für Schweißungen an U-Bootteilen in den USA und die zweite für industriellen Schweiß Einsatz in Deutschland. Noch heute steht diese Maschine im Deutschen Museum von Meisterwerken der Naturwissenschaft und Technik in München.

Durch die besonderen Vorteile des Tiefschweißeffekts entstanden besonders in England und Frankreich immer neuere Entwicklungen der Elektronenstrahlschweißgeräte. Bisher wurde diese Technik nur in der Oberflächentechnik angewandt, so fokussierte man die Forschung darauf, jetzt immer höhere Leistungsdichten und Strahlströme zu entwickeln, um dadurch noch größere Blechstärken schweißen zu können. Besonders aufmerksam wurden Anwendungsgebiete, die höchste Ansprüche, Anforderungen und Qualität forderten, wie Luft- und Raumfahrt sowie die Kerntechnik. Daraus folgten nach und nach zahlreiche Innovationen des Elektronenstrahlschweißens wie z.B.: Strahlerzeugerraum und Arbeitskammer vakuumtechnisch voneinander trennbar, immer höhere Strahlleistungen und größere Arbeitskammern der Schweißmaschinen, Taktschweißmaschinen für eine gezielte Massenproduktion usw.

Auch heutzutage ist es für ausgebildetes Fachpersonal oft nicht leicht einen genauen Überblick über die gesamten Werkstoffbearbeitungsverfahren beim Elektronenstrahlschweißen zu haben [5].

### **2.1.2 Vorteile und spezielle Kennzeichen der Elektronenstrahlschweißung**

Hier wird ein kurzer Überblick der Vorteile und der speziellen Kennzeichen der Elektronenstrahlschweißung im Gegensatz zu den herkömmlichen Schmelzschweißverfahren dargestellt, siehe Tabelle 1-Tabelle 3.

*Tabelle 1: Verfahrenstechnische Merkmale des Elektronenstrahlschweißens [5]*

Leistungsdichte	Außergewöhnlich hohe Leistungsdichte, die im Strahlfokus bei ca. $10^7 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ liegt.
Energieeinbringung	Kinetische Energie wird mit hohem Wirkungsgrad im Werkstück umgewandelt, und nicht wie beim Lichtbogenschweißen durch Konvektion und Wärmeleitung über die Werkstoffoberfläche.
Schweißumgebung	Hauptsächlich im Vakuum, in seltenen Fällen wird Schutzgas verwendet (Atmosphäre-Schweißung).
Regelung, Steuerung	Die Schweißparameter können direkt am Gerät geregelt und gesteuert werden.

*Tabelle 2: Schweißtechnische Vorteile des Elektronenstrahlschweißens [5]*

Fugenvorbereitung	I-Stoßnaht für jeden Werkstückdickenbereich.
Schweißzusatz	In Normalfall wird kein Zusatz verwendet. Sonst bei metallurgischen Sonderfällen gelten Draht oder Bandzusatz.
Energieverteilung	Das trägheitslose Steuern des Elektronenstrahles mit beliebigen Formen, Richtungen und Frequenzen ermöglicht präzise Erstarrungs- und Schmelzvorgänge am Schweißgut.
Wärmeeinbringung	Die hohen Schweißgeschwindigkeiten ergeben eine sehr kleine Wärmeeinbringung und somit eine schmale Wärme- und Schmelzeinflusszone.
Hilfswerkstoffe	Es wird Ausschließlich im Vakuum geschweißt, dadurch werden keine Hilfsstoffe (Pulver, Schutzgase) gegen Oxidation der Schweißstelle benötigt. Sonderfall: Atmosphärische-Schweißgeräte.



*Tabelle 3: Fertigungs- und konstruktionstechnische Vorteile des Elektronenstrahlschweißen [5]*

Werkstückkonstruktion	Konstruktiv hoch anspruchsvolle Bauteile können einfach in einzelne Komponenten aufgeteilt und zerlegt werden.
Werkstücknacharbeit	Der geringe Winkel- und Längenverzug ermöglicht eine hohe Präzision beim Schweißen, dadurch können kleinste Toleranzen eingehalten werden und das Werkstück muss nicht mehr mechanisch nachbearbeitet werden.
Strahl & Werkstückführung	Die CNC-programmierte Strahl- und Werkstückführung realisiert einfaches Schweißen von Rund-, Längs- sowie räumlich gekrümmten Schweißnähten.
Werkstoffpalette	Sehr hohe Bandbreite an schweißbaren Materialien wie z.B.: gewöhnliche Baustähle, Nichteisenmetalle, Sondermetalle (Titan), un-, niedrig- und hochlegierte Stähle.
Qualitätssicherung	Einhaltung der Qualität und Sicherheit ermöglicht eine EDV-gestützte Maschinenbedienung, penibelste Konstanz und Reproduzierbarkeit der geforderten Schweißparameter und eine automatisierte Aufzeichnung der Ist-Schweißdaten.

### 2.1.3 Maschinenaufbau

Grundsätzlich wird eine Elektronenstrahlschweißmaschine abgesehen von Sonderfällen in vier Aufbaugruppen eingeteilt:

- Durchlaufmaschinen
- Taktmaschinen
- Universalmaschinen
- Mehrkammer- bzw. Schleusenmaschinen [5]

## 2.1.4 Elektronenstrahlgenerator

Der Elektronenstrahlgenerator ist im Großen und Ganzen aus zwei Hauptkomponenten aufgebaut, siehe Abbildung 2. Einmal aus dem oberen Teil: Hochspannungskupplung, Strahlerzeugerraum, Triodensystem und Isolatorgehäuse. Der untere Teil setzt sich zusammen aus: Fokussierlinse, Ablensystem und optischer Einblick. Durch Druckstufe und Strahlventil sind beide Teile vakuumtechnisch voneinander getrennt. Somit muss beim Werkstückwechsel nicht das komplette Gerät evakuiert werden [5].

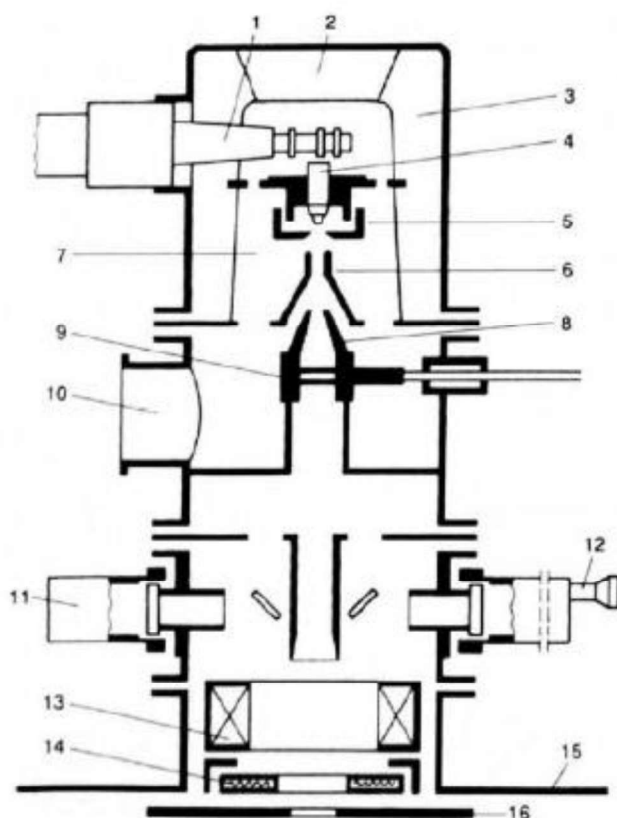


Abbildung 2: Schemabild, Querschnitt Elektronenstrahlgenerator [5]

### Bildbeschreibung Abbildung 2:

1. Hochspannungskabel
2. Strahlgeneratordeckel für Katodenaustausch
3. Hochspannungsisolator
4. Katodenwechselpatrone
5. Steuerelektrode
6. Anode
7. Strahlerzeugerraum
8. Druckstufe
9. Strahlventil
10. Anschlussflansch für Evakuierung des Strahlerzeugerraums
11. Beleuchtung für Einblickoptik
12. Einblickoptik
13. Fokussierlinse
14. Ablensystem
15. Arbeitskammerdecke
16. Hitzeschild [5]

### 2.1.5 Arbeitskammer

In der Arbeitskammer selbst findet die Schweißung der Werkstücke statt. Hierbei ist auf die vakuumtechnische Ausführung zu achten. Das Gehäuse sowie Schaugläser müssen röntgenstrahlengesichert sein, da diese ab einer Hochspannung von 80 kV entsteht. Die Größe der Arbeitskammer muss mindestens den Werkstückabmaßen entsprechen. Dies muss im Vorhinein bei der konstruktiven Auslegung berücksichtigt werden. Für den fertigungstechnischen Ablauf ist darauf zu achten, je größer die Arbeitskammer wird, desto länger dauern die Evakuierungszeiten [5].

### 2.1.6 Bewegungseinrichtung

Da sich außerhalb der Arbeitskammer der Strahlgenerator in stationärer Lage befindet muss sich der Arbeitstisch bewegen. Hierbei gibt es drei verschiedene Varianten. Einmal die X- und Y-Achsen Steuerung, selten auch Z-Richtung und die Drehvorrichtung, siehe Abbildung 3 [a-c].

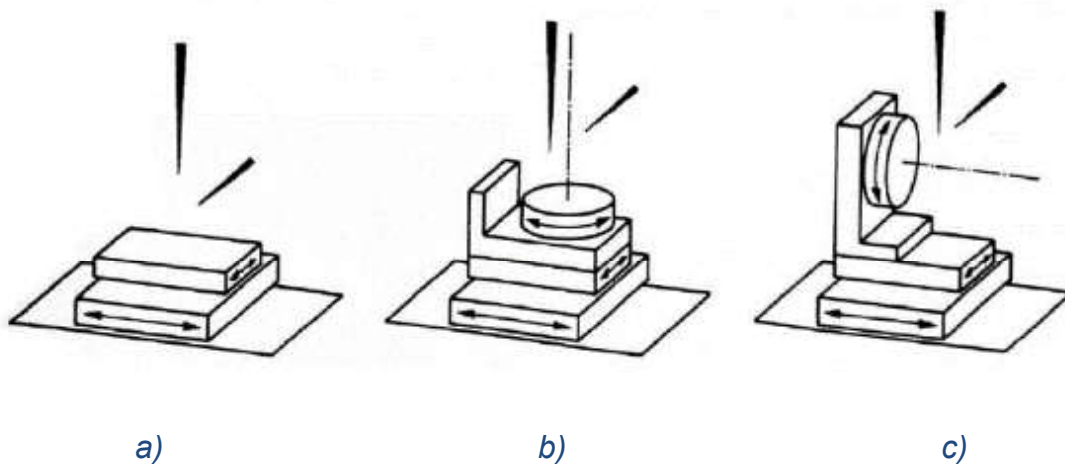


Abbildung 3: Bewegungseinrichtungen Arbeitstisch in einer Elektronenstrahlschweißanlage [7]

a) Arbeitstisch mit X- und Y-Achsbewegung

b) X- und Y-Achse und Drehbewegung C-Achse

c) X- und Y-Achse und Drehbewegung A-Achse [5]

### 2.1.7 Sonstige Einrichtungen

Zu den weiteren Einrichtungen der EBW- Anlage gehören die Vakuumeinrichtung, Pumpensteuerung, Hochspannungsversorgung, Regel- und Steuereinrichtungen, Messgeräte sowie Computer- und CNC-Steuerung [5].

### 2.1.8 Elektronenstrahl Aufbau

Die freien Elektronen erreichen bei einer typischen Schweißung und entsprechenden Vakuum mit einer Beschleunigungsspannung von 150 kV eine Geschwindigkeit von  $2 \cdot 10^8$  m/s. Dies entspricht ca. zwei Drittel der Lichtgeschwindigkeit. Bei dieser Art von Energiezufuhr entsteht eine starke Temperaturerhöhung an der Metalloberfläche. Die freien Elektronen schweben als sogenannte Elektronenwolke über der Schweißoberfläche.

Die Kathode stellt weitere Elektronen bereit um einen kontinuierlichen Schweißvorgang zu ermöglichen. Die Kathode soll außerdem eine lange Lebensdauer bei niedriger Heizleistung aufweisen. Der Kathodenwerkstoff sollte so gewählt werden, dass er den hohen Elektronenemissionen und Kathodentemperaturen standhalten kann. Werkstoffe die dafür geeignet sind und zusätzlich einen hohen Schmelzpunkt besitzen sind Wolfram und Tantal.

Durch die thermische Emission der Kathode entsteht aber noch kein schweißgeeigneter Elektronenstrahl. Um eine hohe Geschwindigkeit der Elektronen zu erreichen, wird die Kathode mit einer negativen Beschleunigungsspannung beaufschlagt, siehe Abbildung 4. Dadurch ergibt sich ein elektrisches Feld zwischen Kathode und Anode und es entsteht die erforderliche kinetische Energie für den Schweißvorgang. Der Elektronenstrom fließt nun in einem geschlossenen Stromkreis [5], [8].

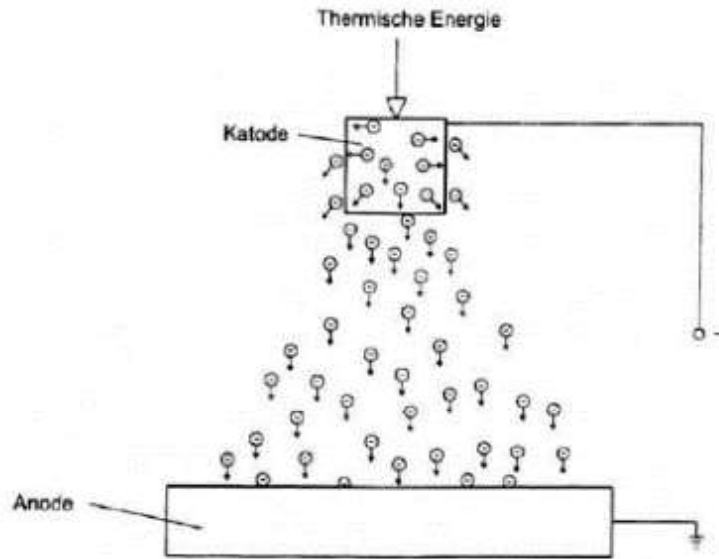


Abbildung 4: Schematische Darstellung von thermisch beschleunigten Elektronen auf eine Anode [5]

## 2.1.9 Verhalten und Auswirkungen der einzelnen Schweißparameter

### Beschleunigungsspannung (U):

Die Beschleunigungsspannung gehört zu den wesentlichen Voraussetzungen um eine hochenergetische Materialschmelzflussbearbeitung zu ermöglichen und wird in Kilovolt [kV] angegeben. Je höher die Beschleunigungsspannung wird, desto kleiner wird der Fokusbereich des Elektronenstrahls und der Fokusabstand reagiert weniger stark auf Abstandsänderungen des Schweißstücks. Der Größenbereich liegt in den meisten Anwendungen zwischen 60-150 kV [5].

### Strahlstrom (I):

Der Strahlstrom ist entscheidend für die Schweißtiefe und wird in Milliampere [mA] angegeben und liegt in den meisten Anwendungen deutlich unter einem Ampere. Er ist abhängig von den physikalischen (Dichte) und thermischen Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität) des zu schweißenden Werkstoffs. Außerdem ist der Strahlstrom für die Form der Unterraupen ausschlaggebend. Wird ein hoher Strahlstrom gewählt, so entstehen starke Ausspritzungen oder Ausbeulungen an der Nahtunterseite [5].

### Schweißgeschwindigkeit ( $v$ ):

Die Schweißgeschwindigkeit wird in Millimeter pro Sekunde [mm/s] angegeben. Je nach Geschwindigkeit entsteht eine größere oder geringere Wärmeeinbringung bei gleichbleibenden Schweißstrom in das Werkstück. Sinkt die Schweißgeschwindigkeit werden Nahtbreite und Wärmeeintrag größer. Steigt sie, verkleinert sich Wärmeeintrag und Nahtbreite. Bei den meisten Anwendungen befindet man sich im Größenbereich zwischen 1-100 mm/s, siehe Abbildung 5 [5].

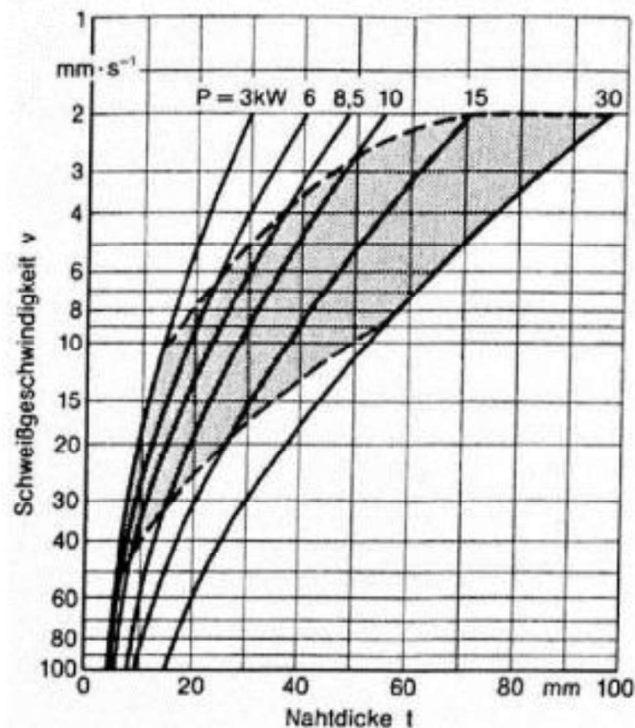
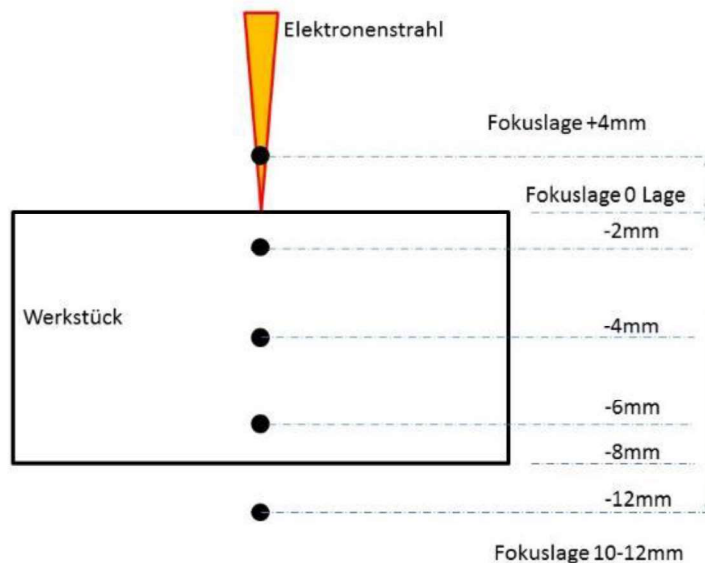


Abbildung 5: Stahlrichtwerte für mögliche Strahlleistungen  $P$  in Bezug auf Schweißgeschwindigkeit und Nahtdicke [5]

## Fokuslage (FL):

Bei der Fokuslage wird zwischen normal-, unter- und überfokussiert unterschieden. Unter „normal fokussiert“ ist zu verstehen, dass der kleinste Strahldurchmesser, also dessen Fokusbereich eines Elektronenstrahls so eingestellt ist, dass der kleinste Durchmesser auf die zu schweißende Werkstückoberfläche trifft. Die Fokusverschiebung wirkt sich je nach Einstellung auf die Nahtform und Nahtunregelmäßigkeiten aus [5].

Abbildung 6 soll die einzelnen Fokuslagen näher verdeutlichen.



*Abbildung 6: Hilfsskizze Fokuslagen*

## Frequenz (Fq):

Mithilfe der Frequenz und dem Strahlpendeln ist es möglich die Aufschmelz- und Erstarrungsvorgänge so zu beeinflussen, dass es zu einer guten Nahtqualität kommt. Welche Frequenz oder Pendelform zu wählen ist, kommt auf den jeweiligen Anwendungsfall an z.B. Viskosität des Schmelzgutes oder die Werkstücktemperatur. Kleine Amplituden mit hohen Frequenzen werden häufig zur Nahtverbesserung eingesetzt, weil dadurch das Erstarrungsverhalten des Werkstoffs verbessert wird. Beim schweißen von Metallen befindet man sich in einem Frequenzbereich von 600-1000 Hz. Für Oberflächenbehandlungen werden 1- 20.000 Hz eingesetzt [5].

## Strahlfigur (Fig Ø):

Trägheitslosigkeit und dynamisch kann der Elektronenstrahl leicht und schnell in verschiedene Positionen, Formen und Richtungen gelenkt werden. Es gibt eine Vielzahl an Formen und Figuren wie z.B. Punkt-, Kreis-, Ellipsen-, oder Rechteckfiguren. Die Strahlfigur trägt zur Form, wie der Nahtbreite der Schweißnaht bei. Einige Formen sind in Abbildung 7 dargestellt. Durch vergrößern des Strahlpendels wird die Schmelzzone erweitert und ermöglicht so Gasblasen besser an die Werkstückoberfläche zu gelangen [5].

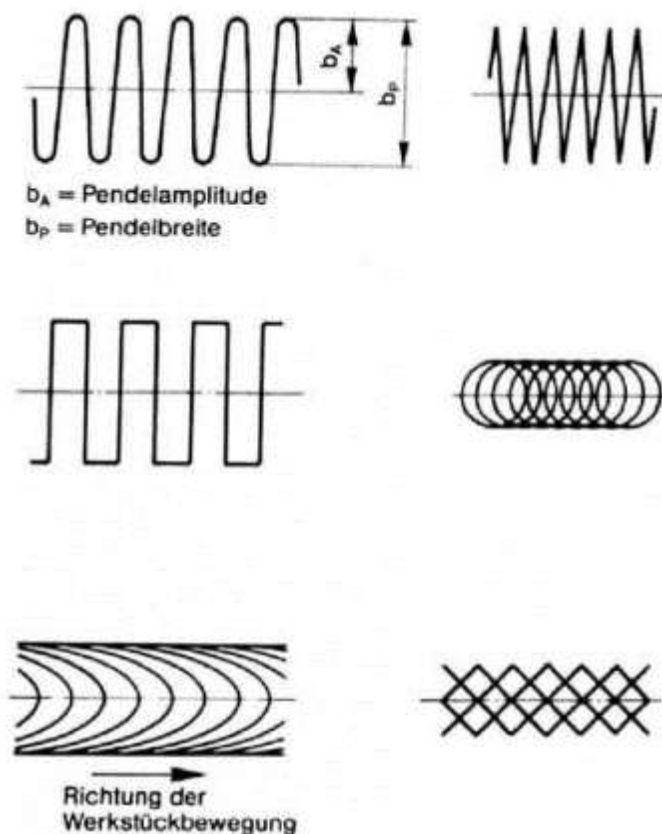


Abbildung 7: Verschiedene Strahlpendelfiguren [5]



## 2.2 Hochfeste Stähle

In den heutigen technischen Anwendungen steigen die Ansprüche und Herausforderungen an den Leichtbau stark an und somit die Nachfrage an hochfeste Feinkornbaustähle, mit einer Streckgrenze  $> 355\text{MPa}$ .

Durch ihre steigende Festigkeit können bei gleichbleibender Tragfähigkeit die Bauteildicken wesentlich verringert werden. Die speziellen Eigenschaften dieser Stähle erhöhen nicht nur die Bauteilsicherheit, sondern können dadurch mit dem Leichtbau kosteneffizient verknüpft werden. Die Anforderungen an das Material sind jedoch in jedem Anwendungsfall verschieden wie z.B. Kranbau oder Schiffsbau. Aus diesem Grund, steckt noch großes Potential, an der Weiterentwicklung der Werkstoffe und kostengerechte Fügeverfahren bereitzustellen, um eine hochwertige moderne industrielle Fertigung zu ermöglichen.

Baustähle, die thermomechanisch gewalzt sind, besitzen ein kohlenstoffarmes Gefüge. Die besonderen Eigenschaften dieser Stähle liegen in der guten Kaltumformbarkeit und aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung (kleines C-Äquivalent) sind sie sehr gut schweißbar, sowie bestens Stanz- und Schneid geeignet. Sie besitzen hohe Festigkeiten trotz niedriger Legierungsgehalte. In der Abbildung 8 ist die Zugfestigkeit über die Bruchdehnung diverser Warmbandstahlsorten abgebildet [9], [10].

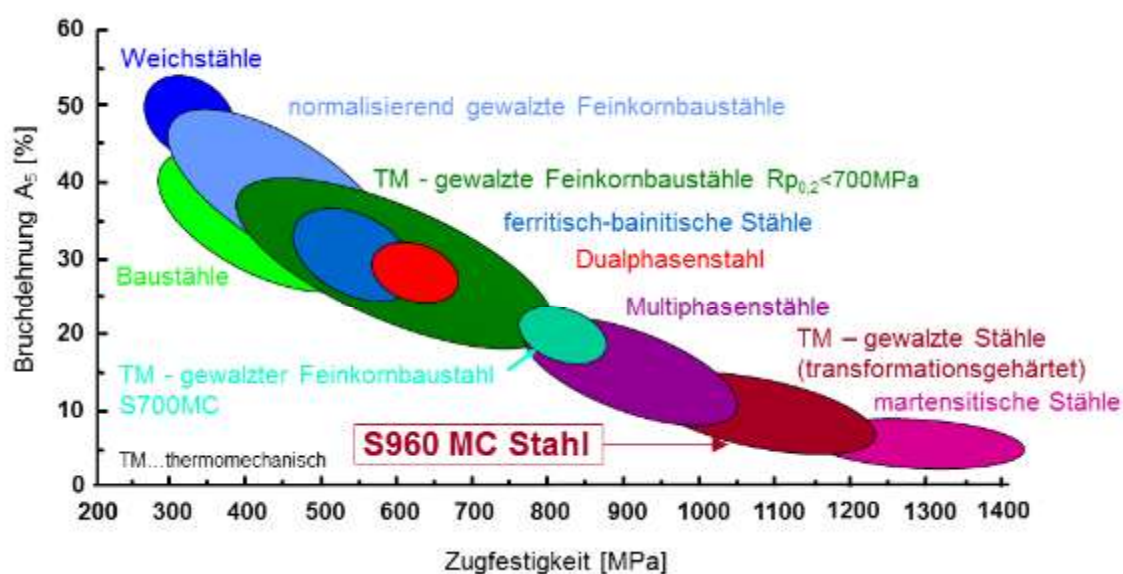


Abbildung 8: Verlauf der Zugfestigkeit über die Bruchdehnung für verschiedene Warmbandstahlsorten [11]

## 2.2.1 Herstellungsverfahren

Die Erzeugung von schweißgeeigneten niedriglegierten Feinkornbaustählen mit hohen Streckgrenzen ist nur in Verbindung mit optimierter chemischer Stahlzusammensetzung möglich. Die normgerechte Festlegung nach DIN EN 10027 Teil 1 dieser Zusammensetzung und Legierungsbestandteile haben ein breites Spektrum und geben somit den Stahlherstellern einen großen Spielraum diese Stähle zu erzeugen.

Die Stähle werden mit dem sogenannten LD-Verfahren hergestellt und sind vollkommen beruhigt. Im Wesentlichen können schweißbare Feinkornbaustähle in Bezug auf das Walzverfahren in vergütete (Q), normalisierte (N) und thermomechanische (M) gewalzte Stähle unterteilt werden.

Thermomechanisch behandelte Strangguss Stahlbänder werden üblicherweise mehrstufig gewalzt. In der Abbildung 9 sind typische Warmwalzverfahren zur thermomechanischen Behandlung, zeit- und temperaturabhängig dargestellt. Die Walztemperaturen der Verfahren nehmen von der konventionellen über die normalisierende bis hin zur thermomechanischen Fertigung ab. Beim thermomechanischen Walzen kann zusätzlich noch zwischen Luft- und Wasserabkühlung unterschieden werden. Bei der Wasserabkühlung reduziert sich die Perlitumwandlung [9]-[11].

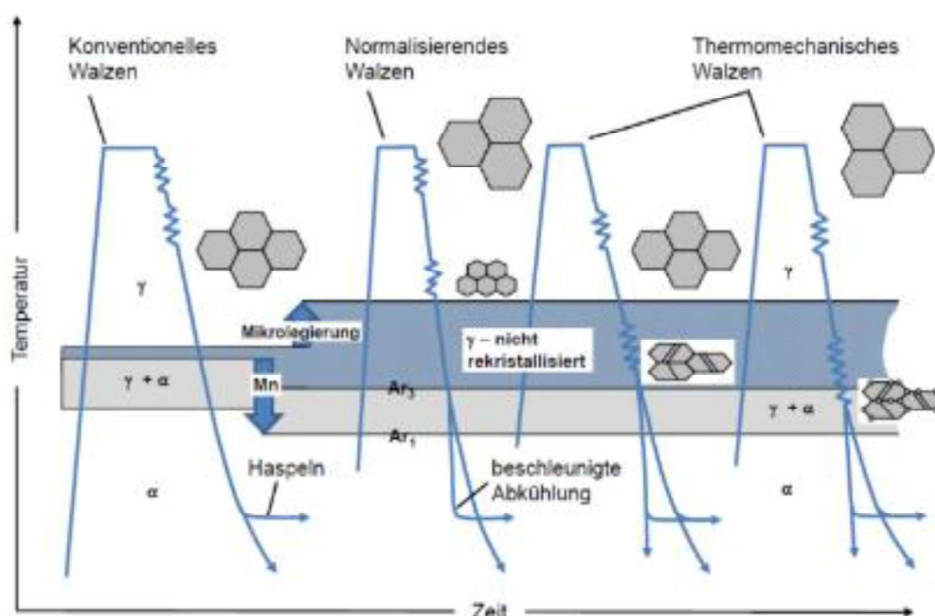


Abbildung 9: Verschiedene Warmwalzverfahren dargestellt in Abhängigkeit der Zeit über die Temperatur [12]

## 2.2.2 Stahlbezeichnungen

Die Abbildung 10 soll den Auszug der Stahlbezeichnungen nach DIN EN 10027-1 genauer verdeutlichen.

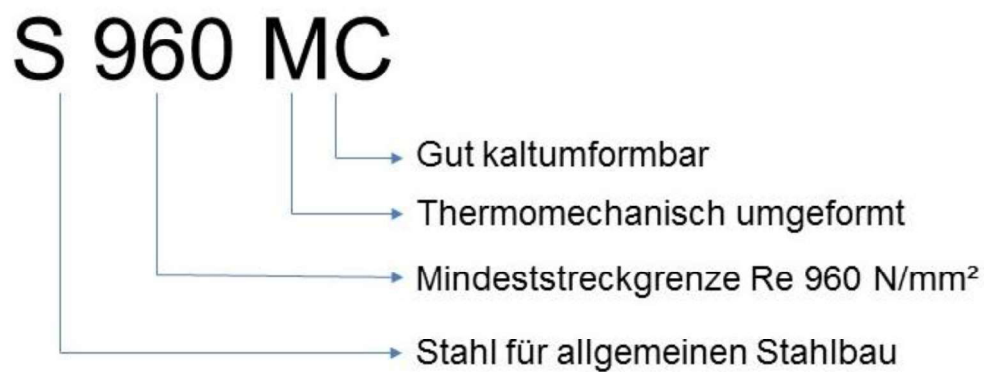


Abbildung 10: Stahlbezeichnung nach DIN EN 10027-1 [13]

## 2.3 Kerbschlagbiegeversuch

### 2.3.1 Erläuterung

Mit dem Kerbschlagbiegeversuch ist es möglich, das Bruchverhalten für verschiedene Werkstoffe bei unterschiedlichen Temperaturen zu beschreiben. Es gibt dafür verschiedene Normen wie z.B.: für metallische Proben nach DIN EN ISO 148-1 sowie für Kunststoffe nach DIN EN ISO 179-1.

Das Resultat der Messung wird mit der Kerbschlagarbeit in Joule [J] angegeben. Es ist jene Arbeit die der Pendelhammer benötigt um die Probe durchzuschlagen, welche sich mit dem Energieerhaltungssatz errechnet. Die Abbildung 11 stellt eine Prinzip Zeichnung mit dazugehöriger Berechnungsformel dar [14].

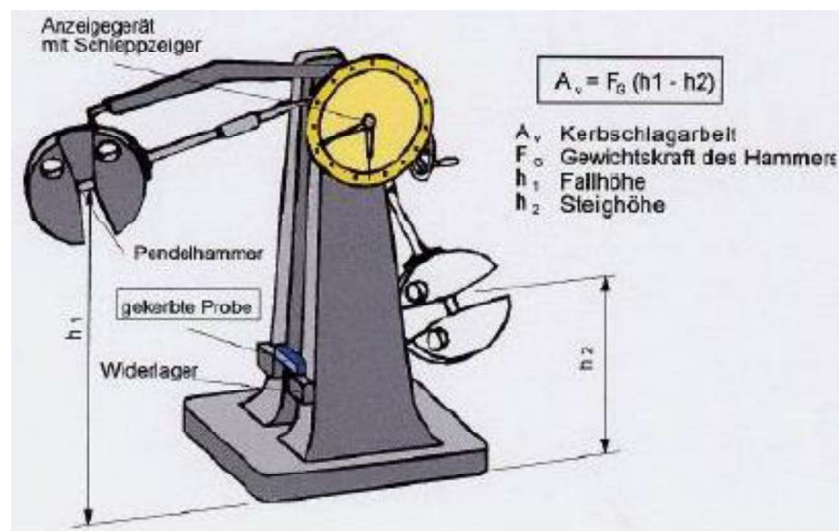


Abbildung 11: Prinzip Skizze Kerbschlagbiegeversuch mit Berechnungsformel [14]

Durch Beurteilung der Bruchfläche und Kerbschlagwerte können einige Rückschlüsse getroffen werden wie z.B. über Einsatztemperaturen der Werkstoffe, Alterungserscheinungen, Gleichmäßigkeit des Gefüges, qualitatives Urteil über die Zähigkeit, Definition des Sprödbrech- und/oder Scherbruchanteils, laterale Breitung und festlegen der Temperaturübergangskurve [11], [15].

Die Abbildung 12 zeigt schematisch die Lage der blau eingefärbten Probe im Widerlager.

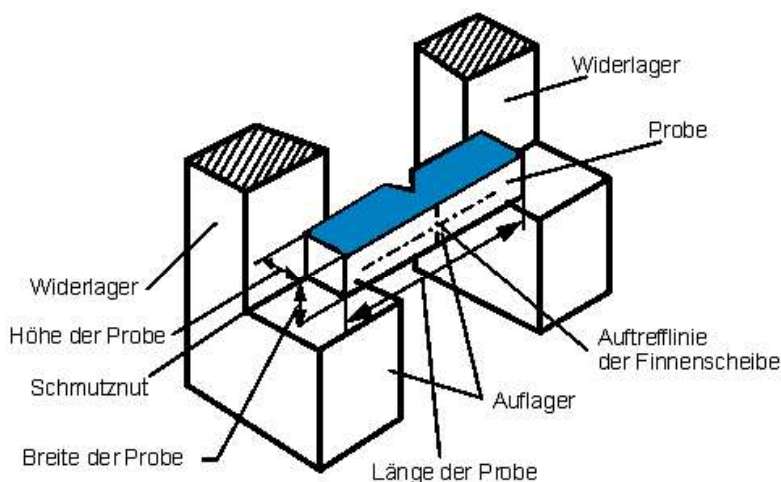


Abbildung 12: Schematische Skizze des Probenauflagers für Kerbschlagbiegeversuch [16]

In Abbildung 13 ist ein allgemeines Diagramm der Kerbschlagarbeit für den Werkstoff S235 in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt. Es zeigt den Übergang vom spröden zum duktilen Bruchverhalten anhand von Bruchflächen. Die Lage der Übergangstemperatur  $T_0$  eines Werkstoffes lässt sich mit Wärmebehandlungen beeinflussen. Einige Einflussgrößen sind in Tabelle 4 dargestellt.

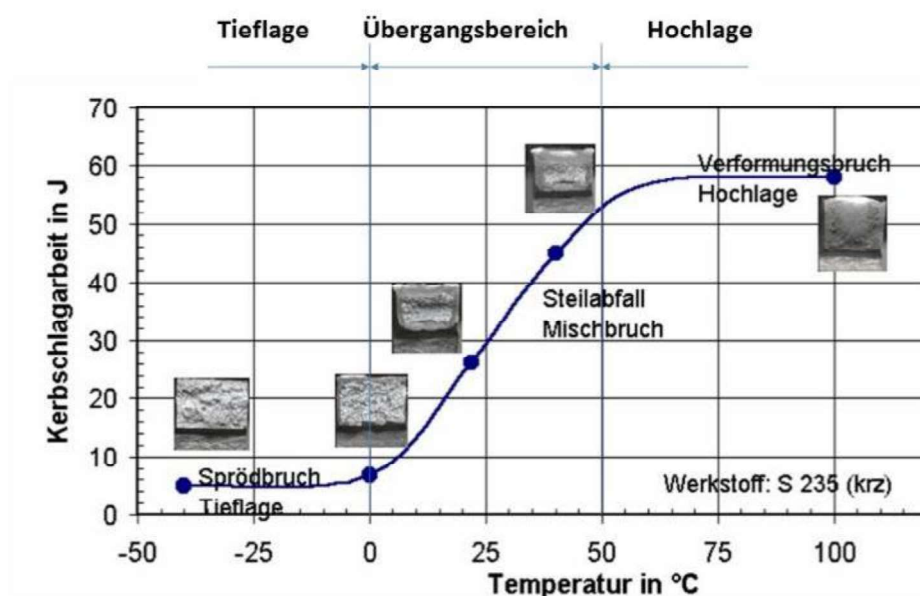


Abbildung 13: Kerbschlagarbeit-Temperatur Diagramm für S 235 [14]

*Tabelle 4: Einflussgrößen auf die Übergangstemperatur  $T_{\dot{U}}$*

<b>Werkstoffbedingte Einflussgrößen</b>	<b>Auswirkung auf <math>T_{\dot{U}}</math></b>
Gefügeinhomogenitäten	↑
Wärmebehandlung	↑ ↓
Kaltverformung	↑
Feinkörnigkeit	↓
Alterung	↑
<b>Versuchsbedingte Einflussgrößen</b>	<b>Auswirkung auf <math>T_{\dot{U}}</math></b>
Schlaggeschwindigkeit	↑
Auflagerabstand	↓
Probenbreite	↑
Probendicke	↑
Kerbschärfe	↑

Die Pfeile in Tabelle 4 bedeuten eine Erhöhung ↑ und Absenkung ↓ der  $T_{\dot{U}}$  [17].

### 2.3.2 Instrumentiertes Prüfverfahren

Das computergestützte Messverfahren basiert auf demselben Prinzip des Standardprüfverfahrens nach DIN EN ISO 148-1, jedoch wird zusätzlich eine Kraft-Durchbiegungs-Kurve während des Versuchs ermittelt. Dabei entspricht die Fläche unter der Kurve der geleisteten Schlagarbeit der gebrochenen Kerbschlagbiegeprobe. Da diese Kraft-Durchbiegungs-Kurven bei verschiedenen Temperaturen erfasst werden, entstehen eine Vielzahl an verschiedene Kurven. Diese werden deshalb in mehrere Arten von, A bis F eingeteilt, siehe Abbildung 14 [18].

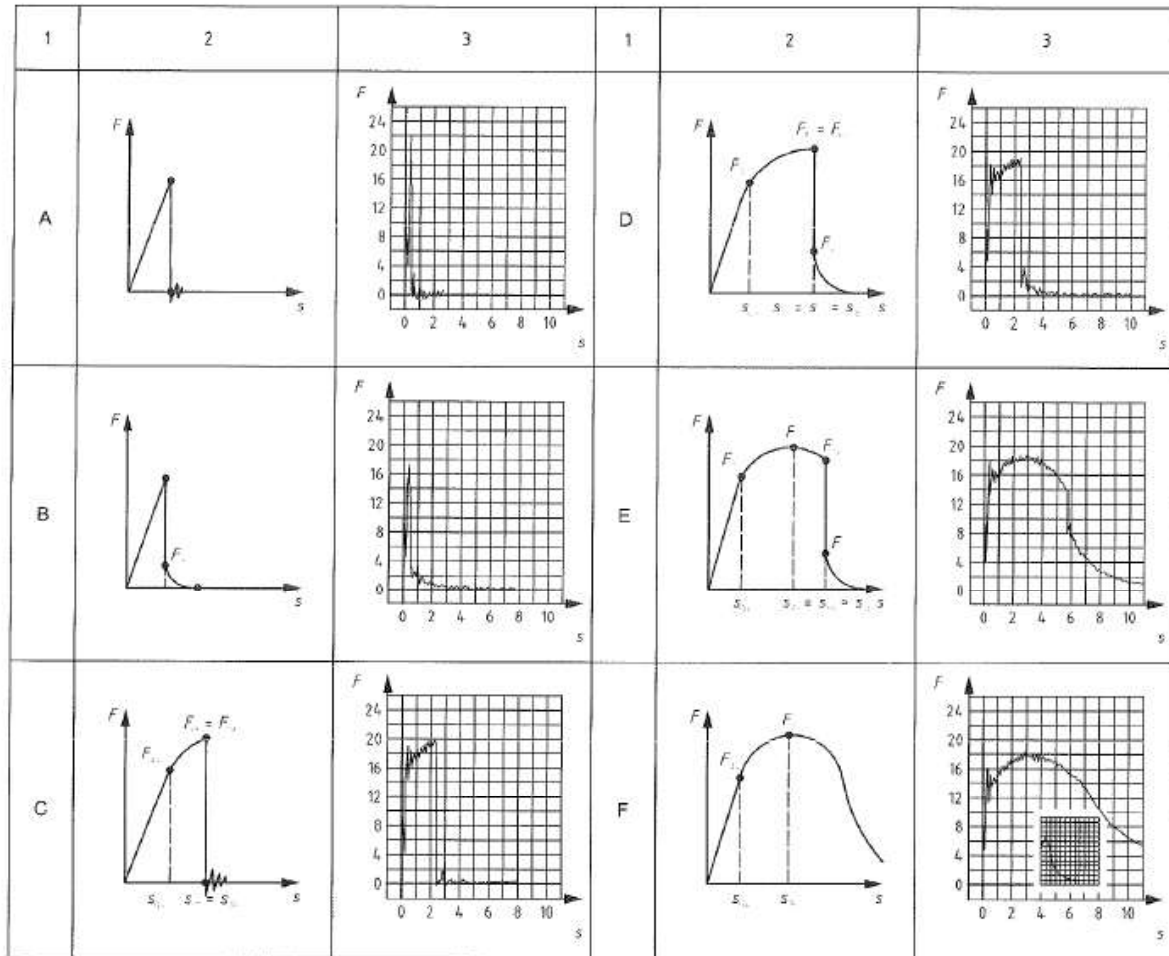


Abbildung 14: Typische Kraft-Durchbiegungs-Kurven nach EN ISO 14556 [19]

**Legende**

- 1... Art
- 2... Schematische Skizze
- 3... Beispielbild eines Messschreibers



## 2.4 Härteprüfung

Die Definition für Härte lautet: „**Härte ist der mechanische Widerstand, den ein Körper dem Eindringen eines anderen, härteren Körpers entgegensetzt**“ [11].

In der Regel differenziert man zwischen statischer und dynamischer Messung, welche aber vom Prinzip her sehr ähnlich sind. Der Prüfkörper wird konstant mit einer gewissen Prüfkraft in die zu prüfende Oberfläche eingedrückt. Dabei entsteht eine örtliche Verformung im Körper, welche computergestützt gemessen wird. Diese Deformation besteht aus einem elastischen und plastischen Anteil. Bei der statischen Prüfung, wird jedoch nur der plastische Anteil bewertet. Im dynamischen Prüfverfahren, stößt der Prüfkopf mit einer definierten kinetischen Energie und Abstand in das Werkstück. Damit diese Ergebnisse verglichen werden können stehen dafür Tabellen nach DIN 50150 bereit [20].

### 2.4.1 Härteprüfung nach Vickers

Der einzudringende Prüfkörper besteht aus einem Diamanten und hat die Form einer gleichseitigen Pyramide mit einem Öffnungswinkel von  $136^\circ$ , siehe Abbildung 15. Der Diamant wird mit einer bestimmten Kraft  $F$  und Dauer auf das Werkstück gedrückt. Die Norm für diese Methode lautet DIN EN ISO 6507-1 [21].

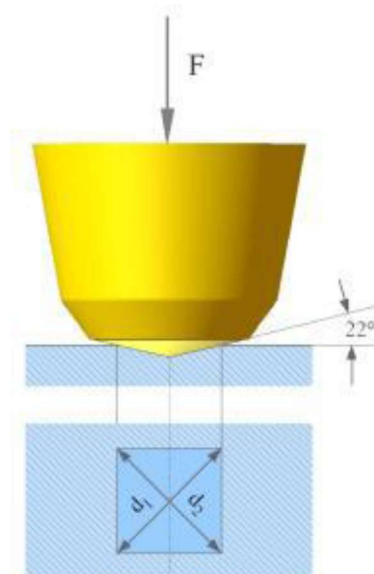


Abbildung 15: Skizze Vickersprüfkopf mit Diagonalen  $d_1$  und  $d_2$  [11]



Beim Eindringen der Pyramide entsteht ein viereckiger Abdruck im Werkstück. Je nach Dauer, Prüfkraft und Härte der zu prüfenden Oberfläche entsteht eine verschieden große Abbildung der Pyramide. Wie in Abbildung 15 ersichtlich, ergeben sich die beiden Diagonalen  $d_1$  und  $d_2$  und werden mittels Messmikroskops erfasst. Mit der Prüfkraft  $F$  errechnet sich die Vickershärte (HV). Die Formel für die Berechnung der Vickershärte lautet:

$$HV = \frac{0,102 * 2 * F * \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \approx 0,1891 \frac{F}{d^2}$$

**Dabei bedeutet:**

F... Prüfkraft in Newton [N]

d... Mittelwert aus  $d_1$  und  $d_2$  in Millimeter [mm] [22]

### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Hochfester Baustahl S960 MC

Der S960 MC ist ein thermomechanisch gewalzter Stahl mit vollmartensitischem Gefüge. Die einzelnen chemischen Zusammensetzungen, Kohlenstoffäquivalente und mechanischen Eigenschaften sind in den Tabelle 5 bis Tabelle 7 dargestellt.

*Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung (Analyse in Masse-%)*

Stahlsorte	C	Si	Mn	Cr, Ni, Mo	Cu	V, Nb, Ti	B	N
S960 MC	0,09	0,12	1,69	1,63	0,03	0,14	0,002	0,0025

*Tabelle 6: Kohlenstoffäquivalente*

Stahlsorte	Blechdicke [mm]	C [%]	CEV <sup>1)</sup> [%]	CET <sup>2)</sup> [%]	PCM <sup>3)</sup> [%]
S960 MC	8	0,09	0,66	0,34	0,27

<sup>1)</sup>  $CEV = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$ , nach IIW

<sup>2)</sup>  $CET = C + (Mn + Mo)/10 + (Cr + Cu)/20 + Ni/40$ , nach SEW 088

<sup>3)</sup>  $PCM = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5 \cdot B$ , nach API 5L

*Tabelle 7: Mechanische Eigenschaften*

Stahlsorte	Blech- dicke [mm]	Dehngrenze Rp 0,2 mind. [MPa]	Zugfestigkeit Rm [MPa]	Bruchdehnung L0= 5,65√S0 mind. [%]	Kerbschlagarbeit mind. bei -20°C [J]
S960 MC	8	960	980 - 1150	10	30

## 3.2 Entmagnetisierereinrichtung

Beim Elektronenstrahlschweißen dürfen die Platten keinen Restmagnetismus aufweisen, sie wurden daher vor Schweißbeginn entmagnetisiert, siehe Abbildung 16.



*Abbildung 16: Platten-Entmagnetisier-Apparat L211*

Die Werkstücke werden auf das graue Kunststoffband gelegt und von links nach rechts mit einer konstanten Geschwindigkeit von 0,2 m/sec. über den Polspalt bewegt und dadurch entmagnetisiert.

### Gerätebezeichnung [23]

Wagner Magnete Typ 211-17/40 S-1

- Spannung: 230V AC
- Frequenz: 50-60 Hz
- Leistung: 2860 VA
- Wirkbereich: 400mm
- Schutzart: IP65

### 3.3 Elektronenstrahl-Kammeranlage

Die Elektronenstrahl-Kammeranlage EBG 45-150 K14 entspricht den Anforderungen nach DIN EN ISO 14744. Dieses Gerät befindet sich am Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik an der TU Graz, siehe Abbildung 17.



Abbildung 17: Pro Beam Elektronenstrahl-Kammeranlage am IWS Graz

#### Gerätebezeichnung [24]

Pro Beam Typ EBG 45-150

- Leistung: max. 45 kW
- Beschleunigungsspannung: max. 150 kV
- Strahlstrom: 0,1 – 300 mA
- Strahloszillation:  $1^\circ/\mu\text{s}$
- Max. Probengröße:  $0,4 \times 0,4 \times 0,6 \text{ m}^3$
- Tischgeschwindigkeit: 0,5 – 100 mm/s
- Vakuumkammergröße:  $1,4 \text{ m}^3$
- Evakuierungszeit: < 8 min
- Druck Kammer:  $\leq 4 \times 10^{-3} \text{ mbar}$
- Druck Kathodenraum:  $\leq 5 \times 10^{-5} \text{ mbar}$

### 3.4 Schweißvorbereitung und Materialvorbereitung

Die Blindnahtschweißungen wurden wie in der Abbildung 18 gezeigten Skizze durchgeführt. Die Probengröße betrug  $100 \times 125 \times 8 \text{ mm}^3$  (Blau). Die Schweißnähte (Rot) sollen nur zur Veranschaulichung dienen. Die Schweißreihenfolge pro Platte war von eins bis fünf festgelegt. Die spezielle Reihenfolge der Nahtnummern diene als Pause zur Werkstückabkühlung während der einzelnen Schweißungen.

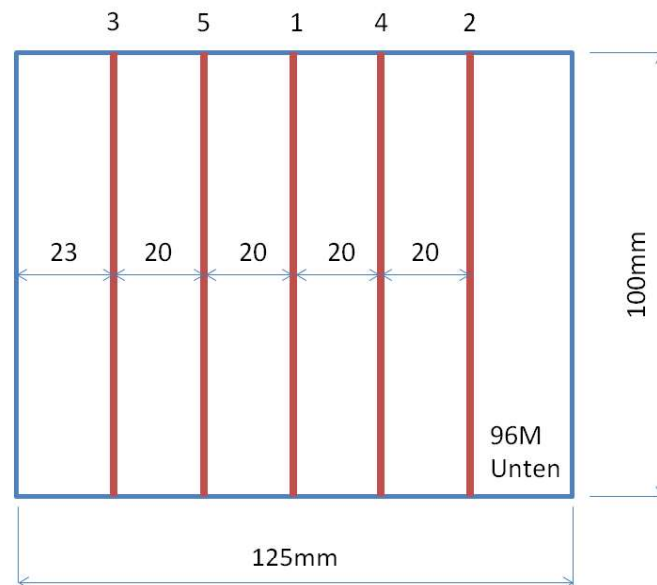


Abbildung 18: Skizze mit Probenabmessungen und Schweißvorlage für Blindschweißungen

#### 3.4.1 Heften der Probenplatten

Aufgrund der qualitativ schlechten Schweißungen der losen Bleche wurden die Proben an den Stirnseiten geheftet umso ein verrutschen während des EBW-Schweißens zu verhindern, siehe Abbildung 19.

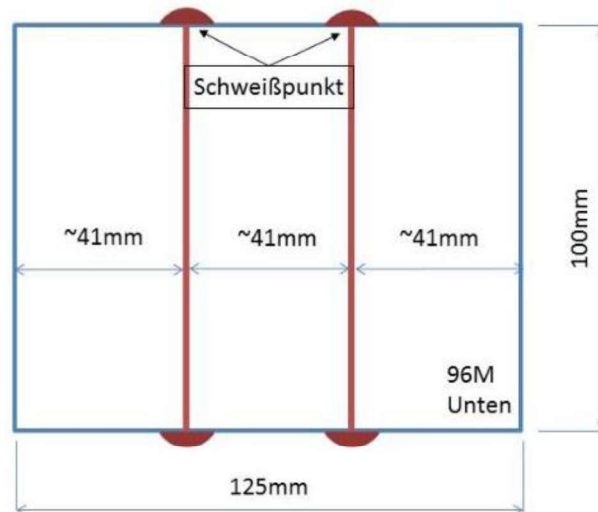


Abbildung 19: Prinzipskizze Probe mit Schweißpunkt

Abbildung 20 soll die original geheftete Schweißplatte vor Schweißbeginn darstellen. Durch die Haftpunkte an den Stirnseiten war ein verrutschen der Bleche während des Schweißvorgangs nicht mehr möglich.

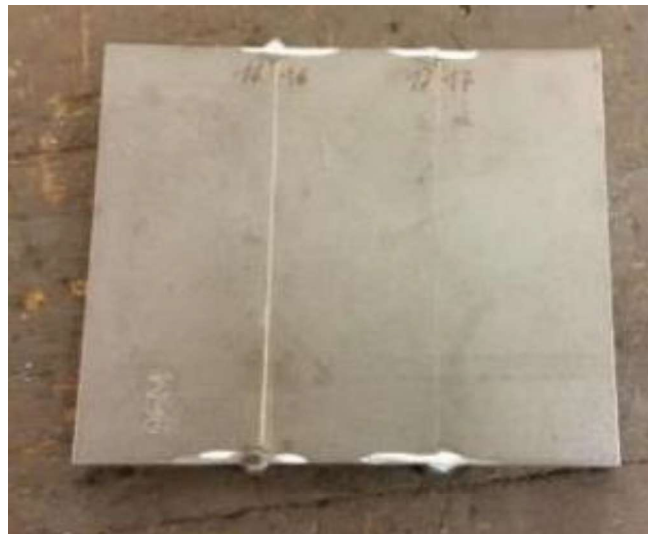


Abbildung 20: Original 3-Teilige Plattenprobe mit stirnseitigen Schweißpunkten

## 3.5 Versuchsschweißungen

### 3.5.1 Blindnahtschweißungen

Mit den Versuchsschweißungen konnten erste Eingrenzungen der Parameter getroffen werden, um zu sehen welche Schweißparameter für das Material und die Probendicke geeignet sind. Es wurde mit einem Schweißstrom von 20-40 mA sowie einer Schweißgeschwindigkeit von 5-20 mm/s Blindnähte geschweißt. Die Frequenz blieb konstant bei 600 Hz.

An der Platte 04, siehe Abbildung 21, blieb die Geschwindigkeit  $v$  konstant bei 10 mm/s und nur der Schweißstrom  $I$  von 20 auf 35 mA, wurde in 5 mA Schritten geändert. Die Platte Nr.04 und Nr. 05 zeigen die ersten Schweißversuche. In Tabelle 8 und Tabelle 9 befinden sich die dazugehörigen Schweißparameter.

#### Platte 04 Blindschweißungen

*Tabelle 8: Blindschweißparameter 04*

Run	$I$ [mA]	$v$ [mm/s]	FL [mm]	$F_q$ [Hz]	Fig $\varnothing$ [mm]	HV [kV]
1	20	10	0	600	0,2	150
2	25	10	0	600	0,2	150
3	30	10	0	600	0,2	150
4	35	10	0	600	0,2	150
5	35	10	0	600	0,2	150

In der Abbildung 21 ist deutlich zu sehen wie die verschiedenen Durchschweißungen aussehen. Die rote Nahtnummer eins in der Mitte weist eine tropfenförmige Wurzel auf, sowie die beiden äußeren Nummern zwei und drei sind tropfenförmig mit geringen Schweißspritzern und geringer Wurzelüberhöhung, siehe Abbildung 22.



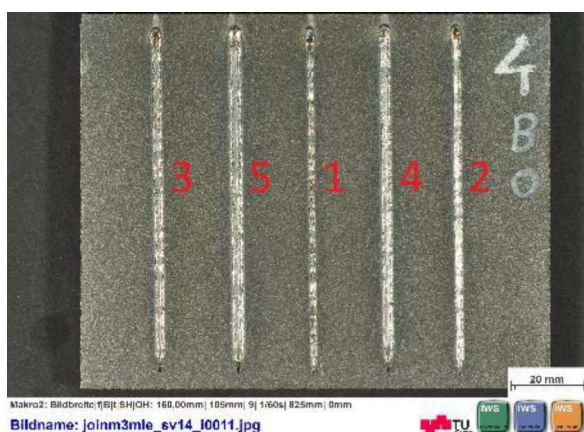


Abbildung 21: Platte 04 Blind Oberseite mit Schweißnahtkennzeichnung

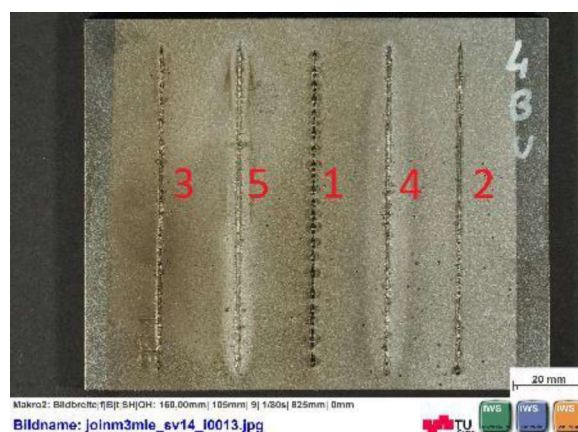


Abbildung 22: Platte 04 Blind Unterseite mit Schweißnahtkennzeichnung

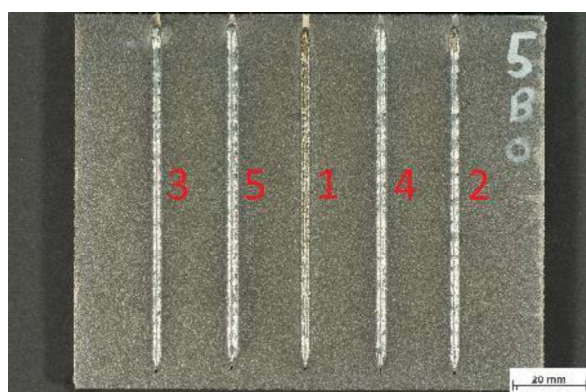
## Platte 05 Blindschweißungen

Tabelle 9: Blindschweißparameter Platte 05 Blindnaht

Run	I [mA]	v [mm/s]	FL [mm]	Fq [Hz]	Fig Ø [mm]	HV [kV]
1	20	15	0	600	0,2	150
2	25	15	0	600	0,2	150
3	30	15	0	600	0,2	150
4	35	15	0	600	0,2	150
5	35	15	0	600	0,2	150

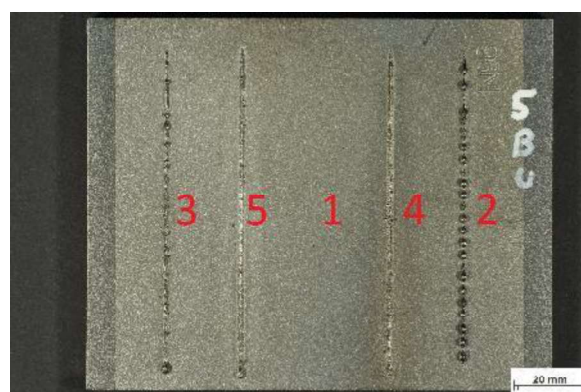
Die Abbildung 23 zeigt die Draufsicht der Platte 05 und aus der Abbildung 24, ist deutlich erkennbar, dass die Platte 05 nicht mehr ordentlich durchgeschweißt wurde (speziell Nahtnummer eins) und wenn überhaupt nur sehr tropfenförmig.





Makro2: Bildbreite: f|B|t|SH|OH: 160,00mm| 105mm| 9| 1/60s| 825mm| 0mm

Bildname: joinm3mle\_sv14\_i0014.jpg



Makro2: Bildbreite: f|B|t|SH|OH: 160,00mm| 105mm| 9| 1/60s| 825mm| 0mm

Bildname: joinm3mle\_sv14\_i0015.jpg



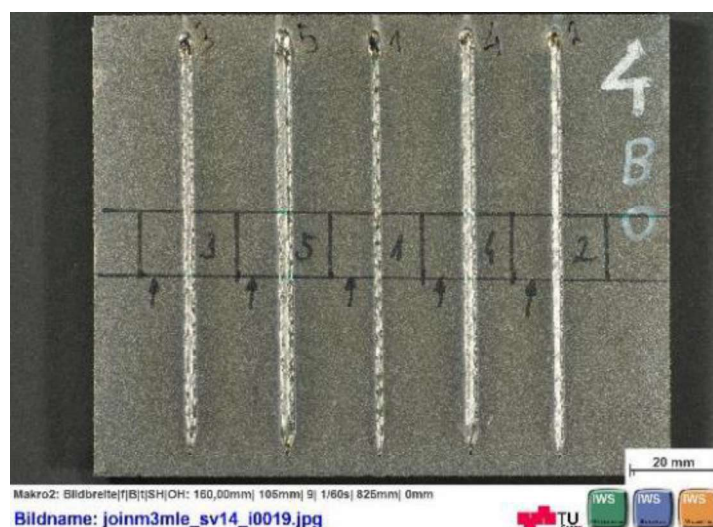
Abbildung 23: Platte 05 Blind Oberseite mit Schweißnahtkennzeichnung

Abbildung 24: Platte 05 Blind Unterseite mit Schweißnahtkennzeichnung

Sie sind also nicht weiter geeignet für eine genauere Untersuchung an Hand von Schliffbildern. Die in Rot eingezeichneten Nummern sind wiederum die einzelnen Schweißnahtnummern.

### 3.5.2 Vorbereitung für Schliffbilder

Für eine genaue Makroanalyse wurden die Proben wie in Abbildung 25 gekennzeichnet, markiert und zerschnitten. Die Bleche wurden in der Mitte zerschnitten um die einzelnen Schweißnähte genauer untersuchen zu können.



Makro2: Bildbreite: f|B|t|SH|OH: 160,00mm| 105mm| 9| 1/60s| 825mm| 0mm

Bildname: joinm3mle\_sv14\_i0019.jpg



Abbildung 25: Platte 04B Oberseite mit Schnittkennzeichnung für Einbettung der Schweißnähte

### **3.5.3 Ätzen der Blindnahtschweißproben**

Nach dem Zerschneiden der geschweißten Platten, konnten die einzelnen Stücke in Harz eingebettet und anschließend geschliffen, poliert und zum Schluss mit dem Ätzmittel Nital (3-5 %) geätzt werden.

### **3.6 Kerbschlagbiegeversuch**

Der Kerbschlagbiegeversuche wurde nach EN ISO 14556 und nach EN ISO148-1 durchgeführt. Die Charpy-V Proben sind bei Raumtemperatur (RT), 0 C°, -20 C° und -40 C° durchzuschlagen.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Schweißparameteroptimierung

#### 4.1.1 Blindschweißungen

In der Abbildung 26 und Abbildung 27 sind geätzte Querschliffe der Proben 3.2 und 4.1 dargestellt. Es ist leicht zu erkennen, dass keine Nahtüberhöhung gelungen ist und die Nahtwurzeln von unzureichender Qualität waren. Die Bewertung der Nahtunregelmäßigkeiten erfolgte nach DIN EN ISO 5817. Die Schweißparameter sind in Tabelle 10 angeführt.



Abbildung 26: Blindschweißung geätzt aus Probe 3.2,  $I=25 \text{ mA}$ ,  $v=5 \text{ mm/s}$

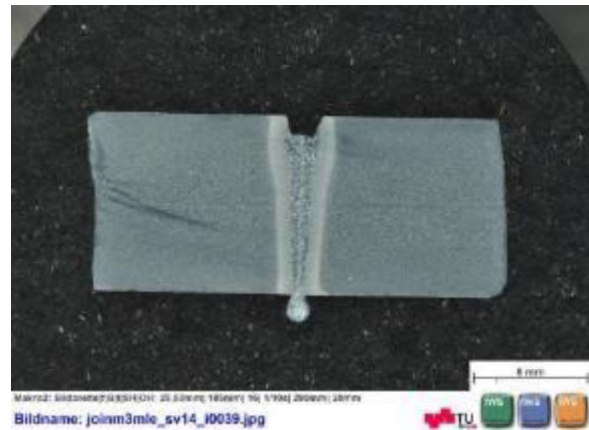


Abbildung 27: Blindschweißung geätzt aus Probe 4.1,  $I=20 \text{ mA}$ ,  $v=10 \text{ mm/s}$

Tabelle 10: Schweißparameter geätzte Schliffproben aus Run 3.2 und 4.1

Run	$I$ [mA]	$v$ [mm/s]	FL [mm]	$F_q$ [Hz]	Fig $\varnothing$ [mm]	HV [kV]
3.2	25	5	0	600	0,2	150
4.1	20	10	0	600	0,2	150

Es wurden 25 weitere Blindschweißungen durchgeführt. Aufgrund der schon gemachten Erfahrungswerte von den ersten Schweißungen, folgten 15 neuen Testschweißungen. Es wurde jetzt gezielt auf die Fokusslage, Strom und Schweißgeschwindigkeit geachtet. Die besten Parameter sind in Tabelle 11 dargestellt.

*Tabelle 11: Blindschweißversuch Run 2-15*

Run	I [mA]	v [mm/s]	FL [mm]	Fq [Hz]	Fig Ø [mm]	HV [kV]
2	35	10	+4	600	0,2	150
4	35	20	+4	600	0,2	150
8	35	20	-12	600	0,2	150
12	40,1	17,5	-4	600	0,2	150
15	27,5	17,5	-30,88	600	0,2	150

Um sich ein genaueres Bild über die Schweißparameter zu machen, sind in Abbildung 28 und Abbildung 29 die beiden besten Proben wiedergegeben. Hierbei stellte die Fokusslage, in die negative Richtung, den größten Einfluss dar. Bei den Proben 08 und 15 sind Strom und Geschwindigkeit nicht ident, jedoch bewirkte die Unterfokussierung den größten Einfluss für eine gute Nahtüberhöhung.



*Abbildung 28: Blindnähte Probe 08, I=35 mA, v=20 mm/s, FL=-12mm*



*Abbildung 29: Blindnähte Probe 15, I=27,5 mA, v=17,5 mm/s, FL=-30,88mm*

### 4.1.2 Blindschweißungen optimiert mit konstanter Fokuslage

Da die Schweißungen noch zu unsauber verliefen, wurden weitere Blindschweißungen angefertigt. Diesmal jedoch, blieb die Fokuslage konstant und es änderte sich nur die Schweißgeschwindigkeit, sowie die Strahlströme. Die besten Schweißparameter sind nach visueller Beurteilung in der Tabelle 12 aufgelistet. Diese Ergebnisse wurden für die weiteren Verbindungsschweißungen verwendet.

*Tabelle 12: Blindschweißung konstante Fokuslage FL*

Run	I [mA]	v [mm/s]	FL [mm]	Fq [Hz]	Fig Ø [mm]	HV [kV]
1	27,5	17,5	-31	600	0,2	150
2	30	20	-31	600	0,2	150
3	35	25	-31	600	0,2	150
10	30	25	-31	600	0,2	150

### 4.1.3 Verbindungsschweißungen

Mit den gewonnenen Parametern der Blindschweißungen, konnten die ersten Verbindungsschweißungen durchgeführt werden. Die Bleche wurden so wie geliefert, d.h. ohne mechanisch bearbeitete Stirnflächen eingespannt und stumpf miteinander verschweißt.

Leider waren die Schweißungen nicht in Ordnung bzw. von schlechter Qualität da eine schlechte bzw. unzureichende Kantenanarbeitung vorhanden war. Es folgte eine kaum bzw. unzureichende Nahtüberhöhung und ein starkes Durchsacken der Schweißnaht selbst. Die Parameter dafür sind in Tabelle 13 dargestellt.

*Tabelle 13: Parameter Verbindungsschweißung erster Versuch ohne Kantenanarbeitung*

Run	I [mA]	v [mm/s]	FL [mm]	Fq [Hz]	Fig Ø [mm]	HV [kV]
16	27,5	17,5	-31	600	0,2	150
17	35	15	-30	600	0,2	150
18	27,5	12,5	-31	600	0,2	150
19	30	10	-30	600	0,2	150
20	27,5	15	-5	600	0,2	150
21	27,5	15	-15	600	0,2	150

Für die nächsten Versuche mussten die Proben so bearbeitet werden damit ein bündiger Blech- bzw. Kantenstoß erreicht werden kann ohne Lücken oder Versatz. Außerdem sollte noch die Strahlfigur vergrößert werden um eine breitere Schweißnaht zu erzielen.

#### **4.1.4 Verbindungsschweißungen mit Kantenanarbeitung**

Beim Beginn der Verbindungsschweißungen wurden die Versuchsbleche in drei 40 x 100 x 8 mm<sup>3</sup> große Teile mit der mechanisch gesteuerten Schneidmaschine zerschnitten und im Anschluss mit der Feile entgratet und nachbearbeitet. Folglich wurde eine genauere Schweißfläche realisiert. Aufgrund der Drittelung der Bleche konnten mehr Schweißungen in einem Arbeitsgang durchgeführt werden. Jedoch ist mit einer größeren Aufheizung der Bleche zu rechnen. Dies wurde beim Schweißvorgang, mit 3-5 Minuten langen Pausen, zwischen den einzelnen Schweißungen berücksichtigt.

Die Proben wurden nach dem Schweißvorgang mittig ca. in 20 x 10 x 8 mm<sup>3</sup> große Stücke zerschnitten, heiß eingebettet, geschliffen und poliert und danach mit Nital (3-5 %) geätzt.



In den nachfolgenden Bildern sieht man die einzelnen Schweißungen mit Kantenanarbeitung, siehe Abbildung 30 und Abbildung 31. Es wurde jedoch nur Probe 04 aufgrund ihrer besseren Qualität unter dem Mikroskop betrachtet. Die Probe 02 wurde wegen zu großem Kantenversatz nicht näher untersucht. In Tabelle 14 sind die Parameter der Verbindungsnahte mit Kantenanarbeitung aufgelistet.



Abbildung 30: Verbindungsnaht Probe 02  
 $v=22,5$  mm/s

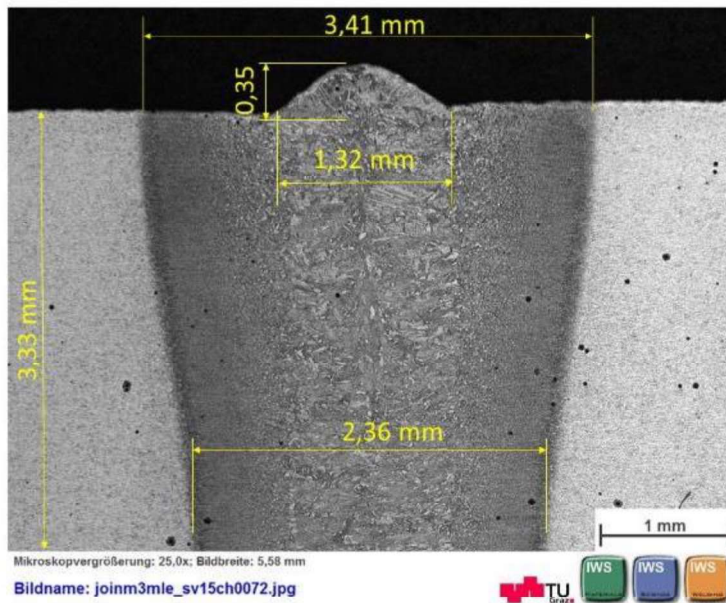


Abbildung 31: Verbindungsnaht Probe 04  
 $v= 25$  mm/s

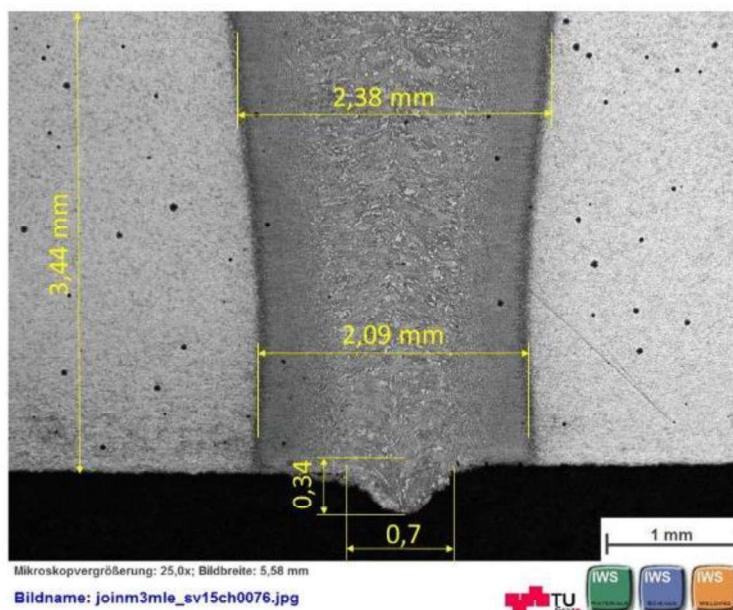
Tabelle 14: Parameter Verbindungsschweißung mit Kantenanarbeitung

Run	I [mA]	v [mm/s]	FL [mm]	Fq [Hz]	Fig Ø [mm]	HV [kV]
02	30	22,5	-31	600	0,2	150
04	30	25	-31	600	0,2	150

Bei der mikroskopischen Betrachtung teilt sich die Abbildung 32 in zwei Einzelbilder auf. Obererteil a) der SWN (Schweißnaht) und dem unteren Teil b) der SWN. In den Bildern sind grundlegende Hauptabmessungen eingezeichnet und bemaßt.



a)



b)

Abbildung 32: Mikroskopische Ansicht Verbindungsnaht der Probe 04 mit Hauptabmessungen der Schnittfläche

a) Oberteil Probe 04

b) Unterteil Probe 04



Um ein deutlicheres Bild von den einzelnen Größenverhältnissen zu bekommen, ist Abbildung 32 [a-b] bemaßt. Hierbei lag der Fokus darauf festzustellen, ob sich die Wärmeeinflusszone (WEZ) über die Nahttiefe ändert. Es blieb aber bei einem gleichbleibenden Verhältnis der WEZ-Breite. Die kleinen Messunterschiede kommen auch vom Definieren des Messbeginns, da es sehr schwierig ist den genauen Anfangspunkt zwischen reinem Schmelzgut und WEZ zu finden. Die Bemaßungen der Probe 04 sind sie in Tabelle 15 angeführt.

*Tabelle 15: Zusammenfassung der einzelnen Hauptabmessungen der Probe 04 durch mikroskopische Vermessung*

<b>Position</b>	<b>Länge [mm]</b>
Gesamtbreite oben <sup>1)</sup>	3,41
Decklage WEZ	1,05
Decklage Höhe	0,35
Decklage Breite	1,32
Gesamtbreite mitte <sup>1)</sup>	2,48
Gesamtbreite unten <sup>1)</sup>	2,09
Wurzellage WEZ	0,69
Wurzellage Höhe	0,34
Wurzellage Breite	0,7

<sup>1)</sup> Gesamtbreite= WEZ + reines Schweißgut

#### 4.1.5 Verbindungsschweißungen mit gehefteten Proben

Durch die stirnseitigen Punktschweißungen verkleinerte sich der Spalt zwischen den Stirnflächen und somit auch die bisherigen Schweißparameter. Mit den weiteren Schweißeinstellungen konnten bessere Nähte erzielt werden.

Jedoch stellten sich, wie in Abbildung 33 ersichtlich, weitere Probleme heraus. Die Fehler der Probe 13 entstanden aufgrund Bearbeitungsfehler, wie z.B. nicht gerader bzw. welliger Durchschnitte infolge Schneidscheibenunwucht, oder Winkelversatz durch Feilen. Die dazugehörigen Schweißparameter der Probe 13 stehen in Tabelle 16.



*Abbildung 33: Verbindungsnahse Probe 13 mit unzureichender Nahtüberhöhung durch Kantenversatz*

*Tabelle 16: Verbindungsschweißung geheftet Stirnseite Probe 13*

Run	I [mA]	v [mm/s]	FL [mm]	Fq [Hz]	Fig Ø [mm]	HV [kV]
13	35	25	-31	600	0,2	150

Mit den Proben 18-27 folgten weitere Verfeinerungen der letzten Ergebnisse. Es wurden alle Proben gut durchgeschweißt, siehe Abbildung 34 bis Abbildung 39. Die Naht mit der kleinsten Wurzelhöhe, ist die Probe 27 in Abbildung 39. Dies kommt durch den leichten Versatz der Bleche. In Tabelle 17 sind die besten Parameter dieser Versuchsreihe verdeutlicht.

## Schliffbilder Proben 18-27



Abbildung 34: Verbindungsnahte Probe 18 mit Kantenanarbeitung und stirnseitigen Schweißpunkt,  $I=40$  mA,  $v=27$  mm/s,  $FL=-31$  mm,  $Fq=600$  Hz,  $Fig$   $\varnothing=0,2$  mm,  $HV=150$  kV



Abbildung 35: Verbindungsnahte Probe 22 mit Kantenanarbeitung und stirnseitigen Schweißpunkt,  $I=27,5$  mA,  $v=19$  mm/s,  $FL=-31$  mm,  $Fq=600$  Hz,  $Fig$   $\varnothing=0,2$  mm,  $HV=150$  kV



Abbildung 36: Verbindungsnahte Probe 23 mit Kantenanarbeitung und stirnseitigen Schweißpunkt,  $I=37$  mA,  $v=28$  mm/s,  $FL=-31$  mm,  $Fq=600$  Hz,  $Fig$   $\varnothing=0,2$  mm,  $HV=150$  kV



Abbildung 37: Verbindungsnahte Probe 25 mit Kantenanarbeitung und stirnseitigen Schweißpunkt,  $I=42$  mA,  $v=28$  mm/s,  $FL=-31$  mm,  $Fq=600$  Hz,  $Fig$   $\varnothing=0,2$  mm,  $HV=150$  kV



Abbildung 38: Verbindungsnähte Probe 26 mit Kantenanarbeitung und stirnseitigen Schweißpunkt,  $I=44$  mA,  $v=30$  mm/s,  $FL=-31$  mm,  $Fq=600$  Hz, Fig  $\varnothing=0,2$  mm,  $HV=150$  kV

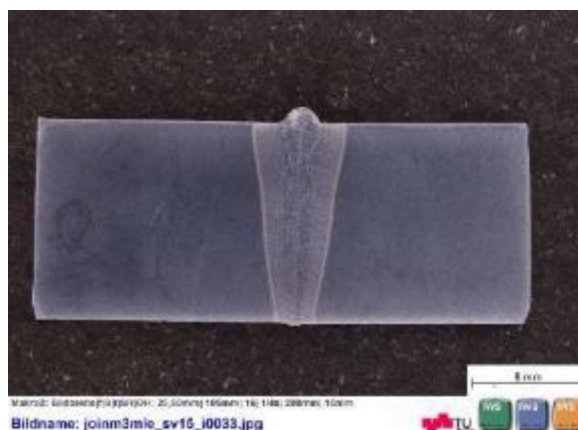


Abbildung 39: Verbindungsnähte Probe 27 mit Kantenanarbeitung und stirnseitigen Schweißpunkt,  $I=28$  mA,  $v=20$  mm/s,  $FL=-31$  mm,  $Fq=600$  Hz, Fig  $\varnothing=0,2$  mm,  $HV=150$  kV

Tabelle 17: Verbindungsschweißung geheftet Stirnseite Probe 25 und 27

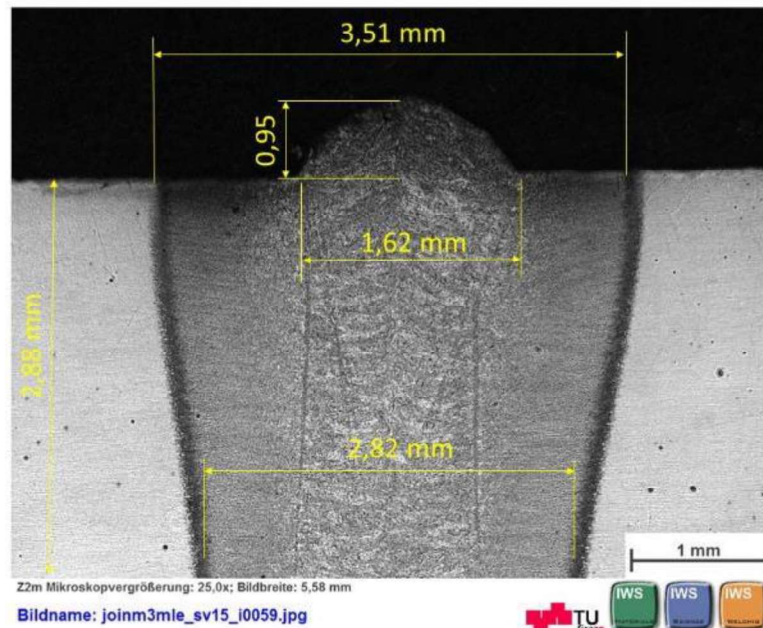
Run	I [mA]	v [mm/s]	FL [mm]	Fq [Hz]	Fig $\varnothing$ [mm]	HV [kV]
25	42	29	-31	600	0,2	150
26	44	30	-31	600	0,2	150

#### 4.1.6 Schlibbilder Mikroskopie Probe 26

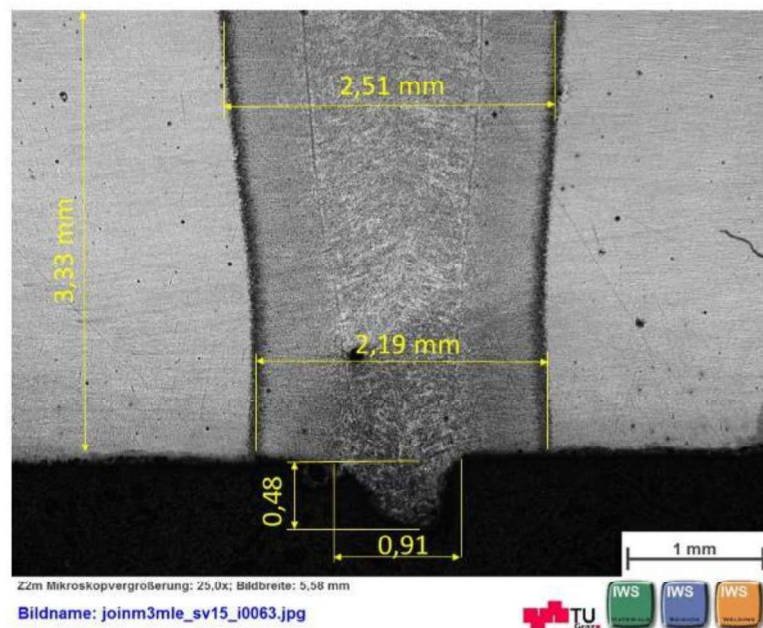
Um einen besseren Überblick zu bekommen, wurde die Probe 26, extra unter dem Mikroskop betrachtet und bemaßt. Die Schweißnaht ist in zwei Bilder aufgeteilt in Oben und Unten. Für die Mikroskopie sind die Schweißparameter in Tabelle 18 verdeutlicht und in Tabelle 19 ist die Nahtgeometrie in tabellarischer Form aufgelistet. Die Abmessungen dienen dafür, ein deutlicheres Bild von den einzelnen Größenverhältnissen zu bekommen, siehe Abbildung 40 [a-b].

Tabelle 18: Verbindungsschweißung geheftet Stirnseite Probe 26

Run	I [mA]	v [mm/s]	FL [mm]	Fq [Hz]	Fig $\varnothing$ [mm]	HV [kV]
26	44	30	-31	600	0,2	150



a)



b)

Abbildung 40: Mikroskopische Ansicht Verbindungsnaht der Probe 26 mit Hauptabmessungen der Schnittfläche

a) Oberteil Probe 26,

b) Unterteil Probe 26



Hierbei lag der Fokus darauf, ob sich die WEZ über die Nahttiefe ändert. Das Breitenverhältnis blieb annähernd konstant. Die kleinen Messunterschiede ergeben sich vom Definieren des Messbeginns, da es sehr schwierig ist den genauen Anfangspunkt zwischen reinem Schmelzgut und WEZ zu finden. Die Abmaße der Probe 26 sind in Tabelle 19 dargestellt.

*Tabelle 19: Zusammenfassung der einzelnen Hauptabmessungen der Probe 26 durch mikroskopische Vermessung*

Position	Länge [mm]
Gesamtbreite oben <sup>1)</sup>	3,51
Decklage WEZ	0,95
Decklage Höhe	0,59
Decklage Breite	1,62
Gesamtbreite mitte <sup>1)</sup>	2,62
Gesamtbreite unten <sup>1)</sup>	2,19
Wurzellage WEZ	0,64
Wurzellage Höhe	0,48
Wurzellage Breite	0,91

<sup>1)</sup> Gesamtbreite= WEZ + reines Schweißgut

## 4.2 Strahlfigurenoptimierung

Das Schweißergebnis der Probe 26 (wird als K-Probe bezeichnet) diente als Vorlage für die Optimierung. Aufgrund der Schweißfehleranfälligkeit der K-Proben (Heißrisse, Kantenversatz) wurden weitere Schweißungen mit größerem Strahldurchmesser von 0,5mm und 0,8mm durchgeführt.

Bei diesen Versuchen musste aus anlagenbedingten Gründen die Hochspannung von 150 kV auf 120 kV reduziert werden. Um die gleiche Schweißleistung zu gewährleisten, wurden die Strahlströme gemäß dem Verhältnis  $P=U \cdot I$  adaptiert.

Nach mehreren Schweißversuchen entstanden zwei weitere Parameter. In Tabelle 20 sind die Parameter für die Platten A und B dargestellt. Geschwindigkeit, Fokusslage, Frequenz und Hochspannung bleiben konstant.

*Tabelle 20: Schweißparameter A und B mit verschiedenen Strahlfiguren*

Run	I [mA]	v [mm/s]	FL [mm]	Fq [Hz]	Fig Ø [mm]	HV [kV]
A1-A4	70	25	-31	1000	0,5	120
B1-B4	80	25	-31	1000	0,8	120

Es ist außerdem in den Proben A und B ein kleiner Unterschied zwischen der Schweißnahtbreite inklusive WEZ zu erkennen, siehe Abbildung 41 [a-c] bis Abbildung 44. Dies beruht auf den Parametern der verschiedenen Schweißströme von 70 mA und 80 mA und den Strahlfiguren mit jeweils Fig Ø=0,5 mm und Fig Ø=0,8 mm.

Die Abbildung 41 [a-c] sollen den Einfluss der verschiedenen Strahlfigurengrößen auf die Schweißnahtgeometrie zeigen. Wenn man nur die Deck- und Wurzellage betrachtet kann man eine kleine Steigerung der Naht- und WEZ- Breiten erkennen. In Bild b) ist noch dazu ein leichter Versatz der Bleche beim Schweiß bzw. Heftvorgang entstanden. Mit steigender Strahlfigurengröße sind solche Unregelmäßigkeiten leichter zu verkraften und kann so eine qualitativ hochwertige Schweißnaht gewährleisten.

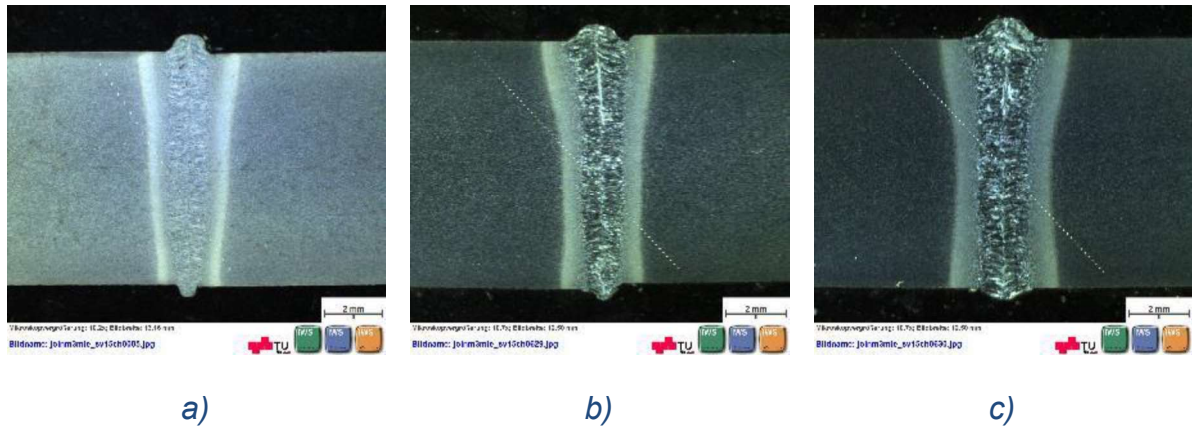


Abbildung 41: Gegenüberstellung der drei Strahlfiguren

a) K1- Probe,  $I=42\text{mA}$ ,  $v=29\text{mm/s}$ ,  $Fq=600\text{Hz}$ ,  $Fig \text{Ø}=0,2\text{mm}$ ,  $HV=150\text{kV}$

b) A1- Probe,  $I=70\text{mA}$ ,  $v=25\text{mm/s}$ ,  $Fq=1000\text{Hz}$ ,  $Fig \text{Ø}=0,5\text{mm}$ ,  $HV=120\text{kV}$

c) B5- Probe,  $I=80\text{mA}$ ,  $v=25\text{mm/s}$ ,  $Fq=1000\text{Hz}$ ,  $Fig \text{Ø}=0,8\text{mm}$ ,  $HV=120\text{kV}$

### 4.3 Kerbschlagbiegeversuch

Aus der visuellen Beurteilung der Schlibfbilder zeichnete sich als beste Schweißnaht die Probe 26 ab. Mit diesen Parametern wurden 4 Platten (K1-K4) geschweißt. Es wurden je sechs Kerbschlagbiegeproben prob Blech mit Kerblage in Schweißnahtmitte hergestellt.

In der Abbildung 42 ist zu erkennen, dass nicht jede Kerbe in der Schweißnahtmitte liegt. Diese Abweichung der Kerblage wird in der späteren Auswertung rechnerisch berücksichtigt. Die Proben, welche außerhalb eines Toleranzwertes der Schweißnahtmitte von 0,5 mm liegen, werden als ungültig angesehen und bei der Diagrammauswertung nicht weiter einfließen.





Abbildung 42: Fertig bearbeitete Kerbschlagproben K3 für Versuch bei  $-20\text{ °C}$  mit Probengröße  $7 \times 10\text{ mm}^2$ ,  $I=42\text{ mA}$ ,  $v=29\text{ mm/s}$ ,  $Fq=600\text{ Hz}$ ,  $Fig\ \varnothing=0,2\text{ mm}$ ,  $HV=150\text{ kV}$

Für die Kerbschlagbiegeproben der gekerbten A und B Proben waren fünf Einzelproben pro Temperatur vorhanden. Sie sind in Abbildung 43 und Abbildung 44 dargestellt. Das „X“ auf der Probe B55 bedeutet, dass sie aufgrund fehlender Durchschweißung, ungültig war.

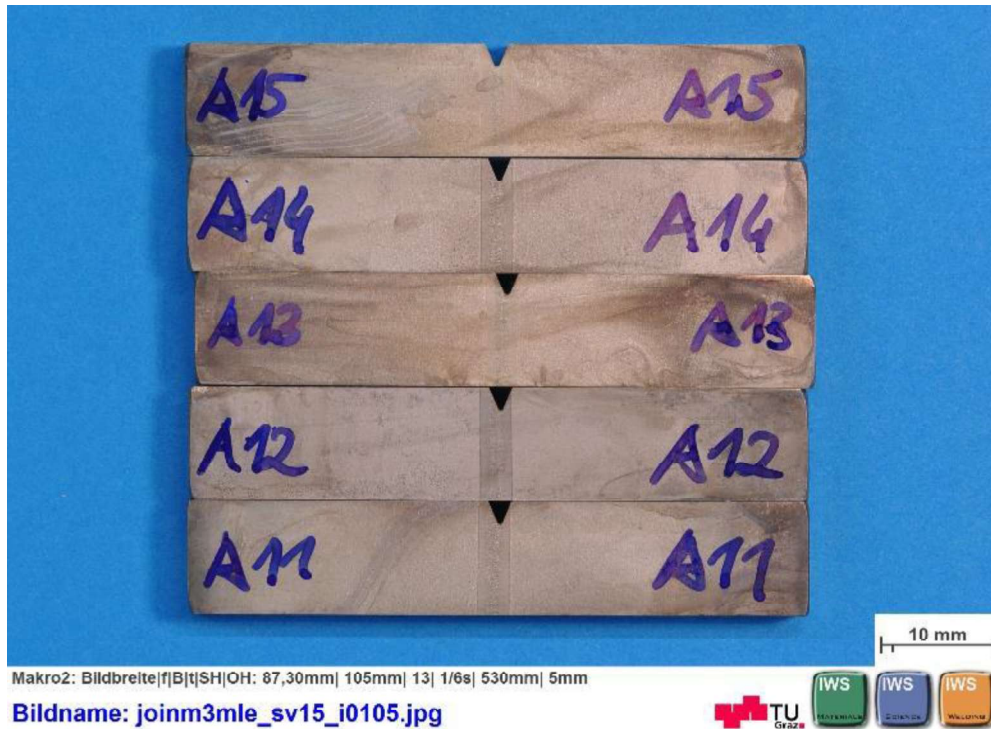


Abbildung 43: Fertig bearbeitete Kerbschlagproben A1 für Versuch bei Raumtemperatur mit Probengröße  $5 \times 10 \text{ mm}^2$ ,  $I=70 \text{ mA}$ , Fig  $\varnothing=0,5 \text{ mm}$

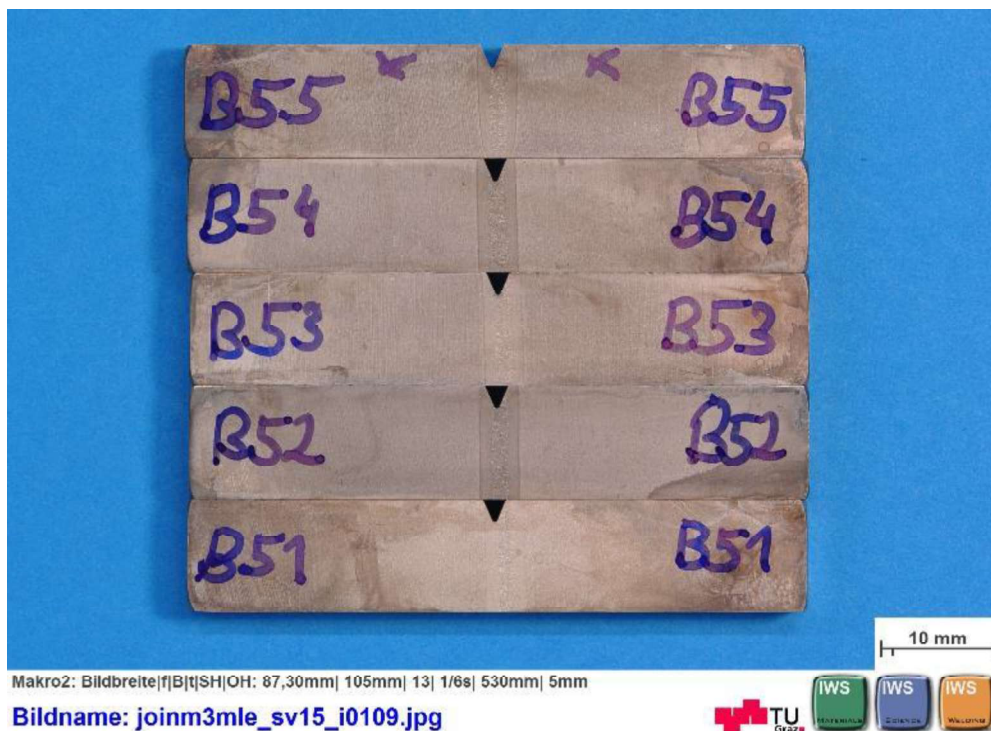


Abbildung 44: Fertig bearbeitete Kerbschlagproben B5 für Versuch bei  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  mit Probengröße  $5 \times 10 \text{ mm}^2$ ,  $I=80 \text{ mA}$ , Fig  $\varnothing=0,8 \text{ mm}$

### 4.3.1 Auswertung der Kerbschlagproben

In den nachfolgenden Abbildung 45 [a-d] sind die gesamten K-Proben pro Temperatur dargestellt. Hier ist schon gut ersichtlich wie je nach Temperatursenkung die Bruchflächen spröder werden.



a)



b)



c)



d)

Abbildung 45: Makroskopische Draufsicht der durchgeschlagenen K-Biegeproben mit Probengröße  $7 \times 10 \text{ mm}^2$ ,  $I=42\text{mA}$ ,  $v=29\text{mm/s}$ ,  $F_q=600\text{Hz}$ ,  $\text{Fig } \varnothing=0,2\text{mm}$ ,  $\text{HV}=150\text{kV}$

a) Proben K1 Raumtemperatur

b) Proben K2  $0 \text{ }^\circ\text{C}$

c) Proben K3  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$

d) Proben K4  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$



Abbildung 46 zeigt die Kraft-Durchbiegungs-Kurven aller einzelnen Proben pro Temperatur. In diesem Bild sind alle durchgeschlagenen Proben K1 bei Raumtemperatur dargestellt. Der elastische Anstiegsteil, verläuft bei jeder Probe ident, Im plastischen Teil sind größere Abweichungen festzustellen, dies ist aber durch die Kerbgrundunterschiede zu vernachlässigen. Mithilfe des instrumentierten Kerbschlagbiegeversuchs nach EN ISO 14556 konnten die Kurven entsprechend ausgewertet werden. Es traten bei Raumtemperatur die Kurven-Typen C und D auf.

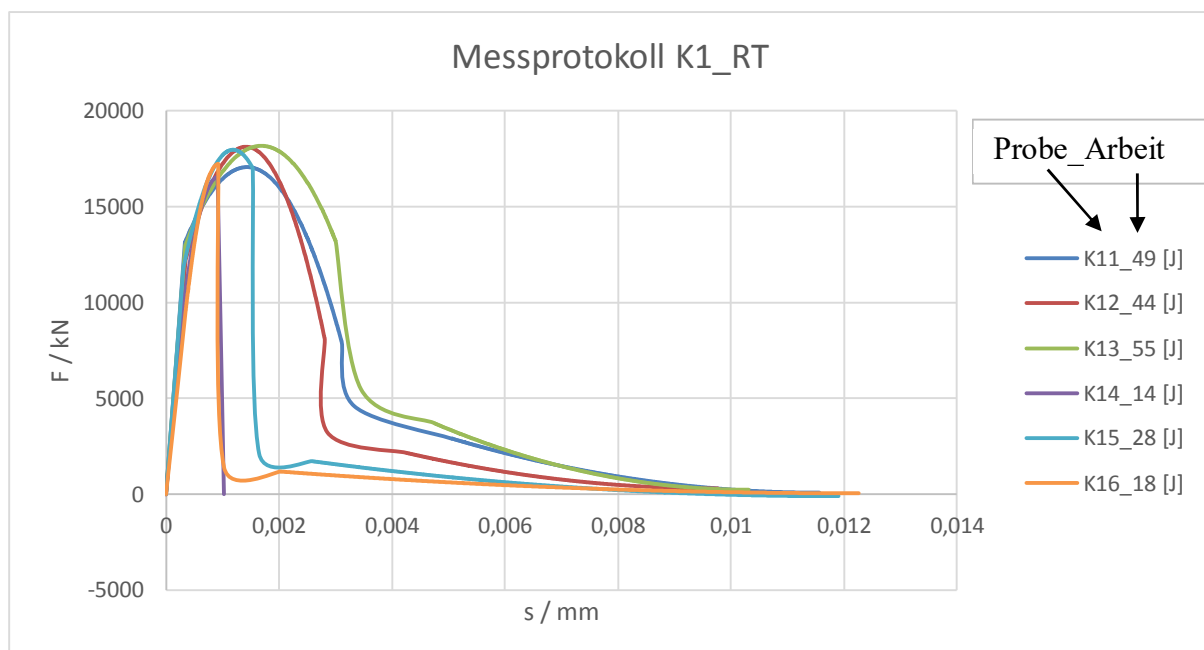


Abbildung 46: Messprotokoll der Proben K1 bei Raumtemperatur mit Probengröße  $7 \times 10 \text{ mm}^2$ ,  $I=42\text{mA}$ ,  $v=29\text{mm/s}$ ,  $Fq=600\text{Hz}$ ,  $Fig \text{Ø}=0,2\text{mm}$ ,  $HV=150\text{kV}$

Als Vergleich zu Probe K1 bei Raumtemperatur soll die Abbildung 47 dienen. Es wurde der Versuch bei  $-40^\circ\text{C}$  durchgeführt. Hier ist bis auf den Ausreißer K46 mit 42J ein starker Steilabfall zu erkennen. Bei  $-40^\circ\text{C}$  wurden die Kurven-Typen zwischen A und C festgelegt. Dies spricht für ein sprödes Bruchverhalten.

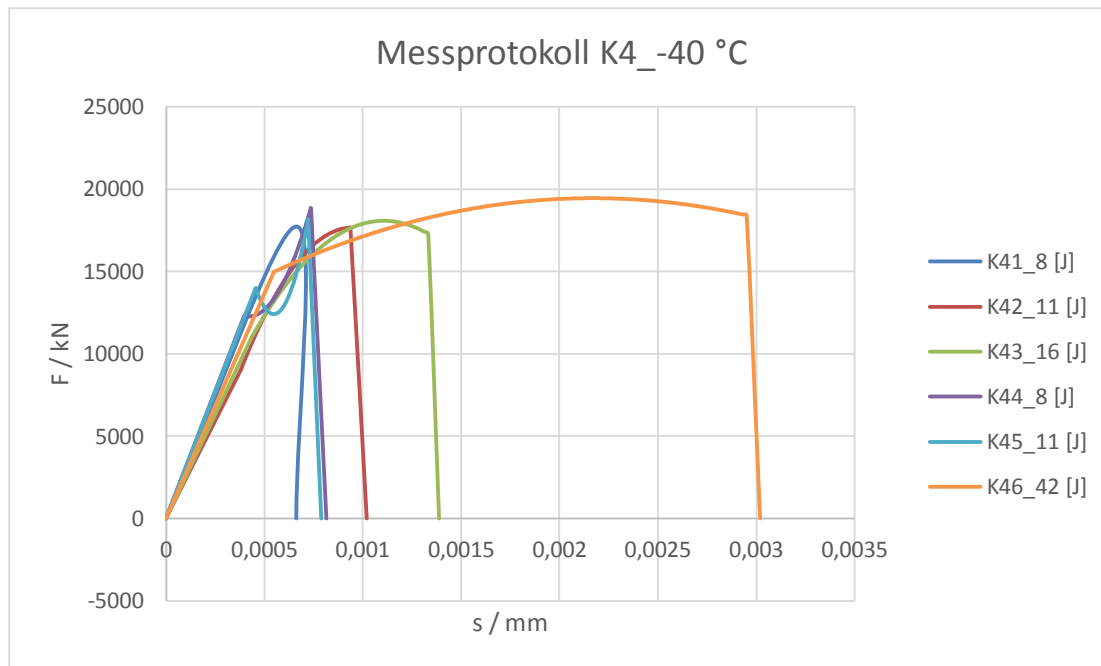


Abbildung 47: Messprotokoll der Proben K4 bei -40°C mit Probengröße 7x10 mm<sup>2</sup>, I=42mA, v=29mm/s, Fq=600Hz, Fig Ø=0,2mm, HV=150kV

Die weiteren Auswertungen der K, A und B Proben befinden sich im Anhang.

### 4.3.2 Bewertung des Zähbruchanteils

Die Beurteilung des Zähbruchanteils und der lateralen Breitung sollen hier nur beispielhaft angeführt werden, da ein eindeutiges Ergebnis aufgrund der hohen Streuungen der Kerbschlagarbeiten und den Kerbgrundlagen nicht möglich war. Dies wird in Abbildung 48 dargestellt. Hierbei lag der Zähbruchanteil mit einer Prüftemperatur von  $-20^{\circ}\text{C}$  bei 11% und lateralen Breitung von 7,02 mm.

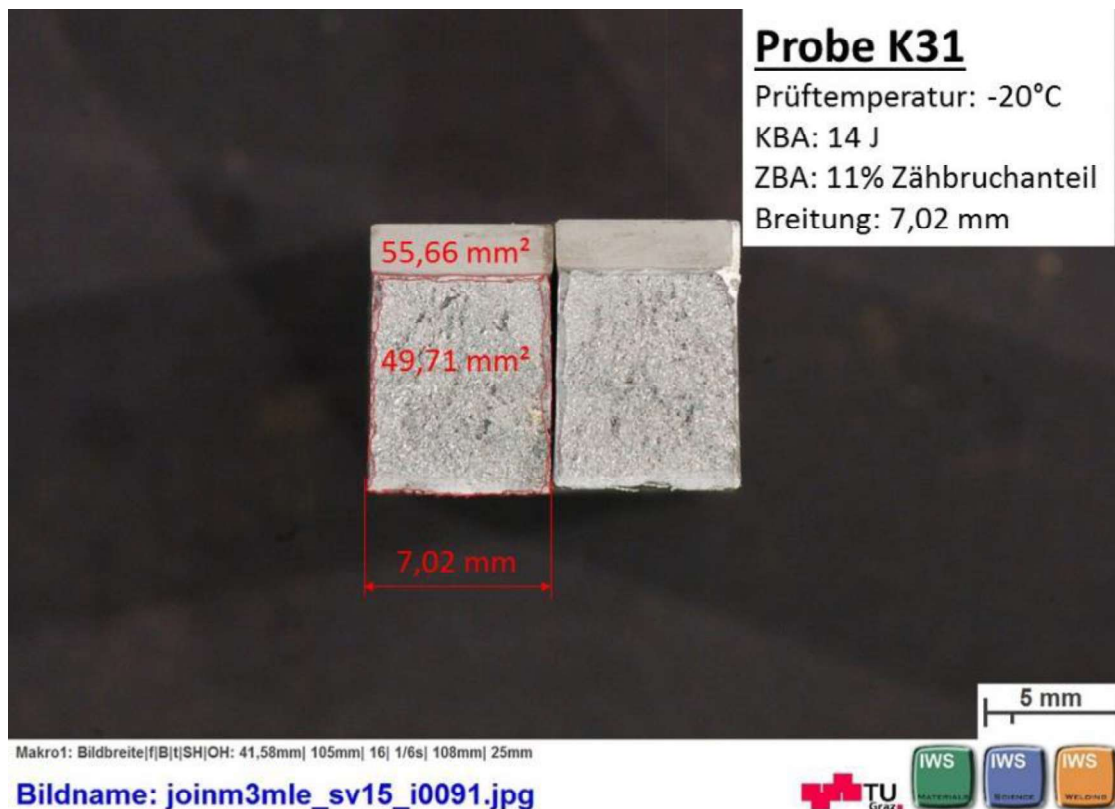


Abbildung 48: Probe K31 Zähbruchanteil und laterale Breitung mit Probengröße  $7 \times 10 \text{ mm}^2$ , Temperatur  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $I=42\text{mA}$ ,  $v=29\text{mm/s}$ ,  $Fq=600\text{Hz}$ ,  $Fig \text{ } \varnothing=0,2\text{mm}$ ,  $HV=150\text{kV}$

### 4.3.3 Seitliches Bruchverhalten

Abbildung 49 [a-c] soll die Kerbschlagbruchflächen in ihrer seitlichen Darstellung verdeutlichen. Hierbei ging es darum, ob und wie sich der Bruchflächenverlauf an der Stirnseite ändert. Im Großen und Ganzen kann aber von einem normal, senkrecht verlaufenden Bruch ausgegangen werden. Die restlichen Proben befinden sich im Anhang.



a)



b)



c)

Abbildung 49: Seitliche Bruchflächen Ansicht der Kerbschlagbiegeproben bei Raumtemperatur

a) K1-Biegeproben,  $I=42\text{mA}$ ,  $v=29\text{mm/s}$ ,  $Fq=600\text{Hz}$ , Fig  $\varnothing=0,2\text{mm}$ ,  $HV=150\text{kV}$

b) A1-Biegeproben,  $I=70\text{mA}$ ,  $v=25\text{mm/s}$ ,  $Fq=1000\text{Hz}$ , Fig  $\varnothing=0,5\text{mm}$ ,  $HV=120\text{kV}$

c) B5-Biegeproben,  $I=80\text{mA}$ ,  $v=25\text{mm/s}$ ,  $Fq=1000\text{Hz}$ , Fig  $\varnothing=0,8\text{mm}$ ,  $HV=120\text{kV}$

#### 4.3.4 Bruchflächenanalyse

Eine interessante Fehlerform ergab sich bei den Proben in Abbildung 50 [a-d]. Es entstanden kleine Freiräume bzw. Bindefehler etwa  $1,5 \times 1,5 \text{ mm}^2$  groß, die aufgrund von unzureichender Oberflächenbeschaffenheit (Welligkeit) bzw. Fettreste an der Oberfläche entstanden. Dies wurde durch die genauere Untersuchung im Rasterelektronenmikroskop (REM) ersichtlich, siehe Abbildung 51 [a-d].

In Abbildung 50 a) ist der Unterschied zwischen nicht durchgeschweißt und den rundlichen Heißrissen gut zu erkennen. Am unteren Rand der Probe K14 ist die Kantenanarbeitung noch zu sehen (Kreuzschliff leicht bläulich gefärbt). Bei den Heißrissen (siehe auch REM-Bilder in Abbildung 51), hat sich das Material auf Grund von Verschmutzung, Versatz und der hohen Schweißgeschwindigkeit nicht richtig verbunden.





a)



b)



c)



d)

Abbildung 50: Makroskopische Bruchflächenanalyse K-Biegeproben,  $I=42\text{mA}$ ,  $v=29\text{mm/s}$ ,  $Fq=600\text{Hz}$ ,  $\text{Fig } \varnothing=0,2\text{mm}$ ,  $HV=150\text{kV}$

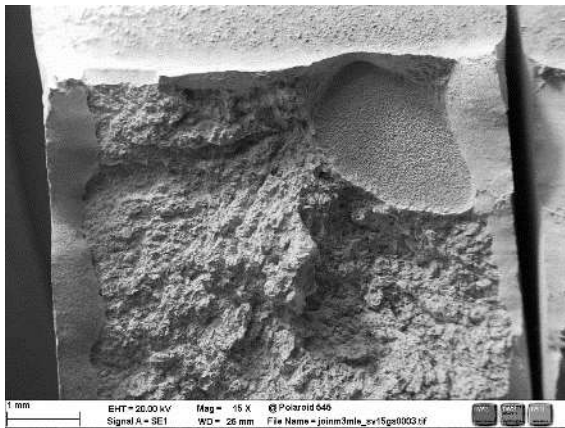
a) Probe K14 bei Raumtemperatur

b) Probe K24 bei 0 °C

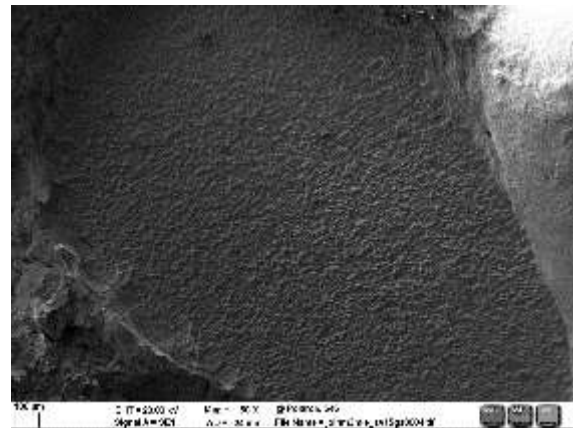
c) Probe K26 bei 0 °C

d) Probe K45 bei -40 °C

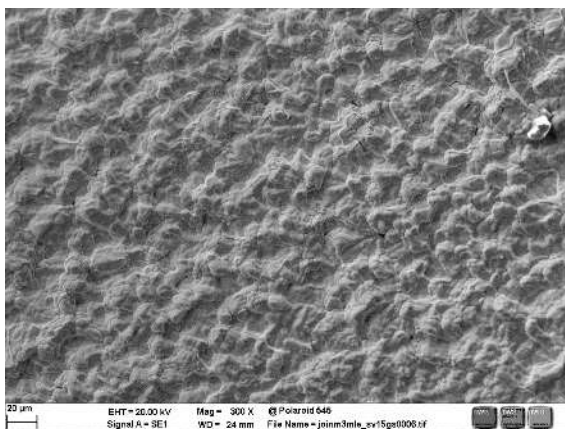
Diese Art von Heißrisse, wie in Abbildung 51, wurden jedoch nur bei den K-Proben festgestellt. In den einzelnen Bildern ist zu erkennen, dass immer wieder Aufschmelzungen passiert sind, sich jedoch der Werkstoff selbst nicht weiter verbunden hat. Dies führt zu einer Verminderung der Kerbschlagarbeit und daher sind diese Proben als ungültig für weitere Auswertungen anzusehen.



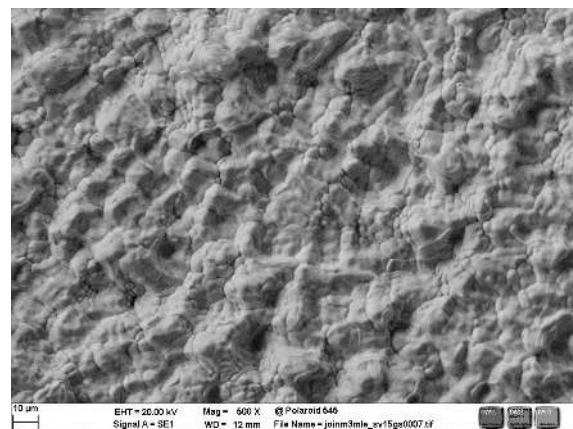
a)



b)



c)



d)

Abbildung 51: REM Untersuchung K26-Biegeprobe bei 0 °C,  $I=42\text{mA}$ ,  $v=29\text{mm/s}$ ,  $Fq=600\text{Hz}$ ,  $\text{Fig } \varnothing=0,2\text{mm}$ ,  $HV=150\text{kV}$

a) REM K26-Biegeprobe Übersichtsbild Bruchfläche

b) REM K26-Biegeprobe Detailansicht von Heißriss

c) REM K26-Biegeprobe mit nichtmetallischen Einschluss durch Verschmutzung

d) REM K26-Biegeprobe max. Vergrößerung Übersicht

Bei den beiden anderen Versuchsproben A und B wurde diese Art von Bindefehler nicht festgestellt. Es leitet sich ab, dass die Breite der Strahlfigur hierfür eine wichtigere Rolle spielt. Durch die breitere Aufschmelzung können Unregelmäßigkeiten wie Winkelversatz oder Welligkeit durch den Schneid- und Schleifprozess in der Schweißvorbereitung besser ausgeglichen werden.

#### 4.4 Kerbschlagarbeiten der Schweißproben K, A und B

Die grünen Tabellenwerte sind die gültigen Kerbschlagbiegeproben. Das bedeutet, jene die genau in der Schweißnahtmitte gekerbt und durchgeschlagen wurden. Die schwarzen Werte sind die ungültigen, hier befindet sich die Kerbe in der Wärmeeinflusszone (WEZ) oder im Grundwerkstoff, siehe Tabelle 21. Des Weiteren sind die roten Werte als ungültig zu sehen, dies waren jene Proben die nicht durchgeschweißt wurden. Die Grenze für ungültig lag bei 0,5 mm Abstand zur Schweißnahtmitte. In den weiterführenden tabellarischen Auswertungen der A und B Proben im Anhang ist das Bewertungsschema ident.

*Tabelle 21: Parametertabelle der Kerbschlagarbeiten K1-K4 über die Temperatur mit Probengröße 7x10 mm<sup>2</sup>*

Temp. [°C]	Nr.:	Arbeit [J]	Temp. [°C]	Nr.:	Arbeit [J]	Temp. [°C]	Nr.:	Arbeit [J]	Temp. [°C]	Nr.:	Arbeit [J]
20	K11	49	0	K21	22	-20	K31	14	-40	K41	8
20	K12	44	0	K22	44	-20	K32	9	-40	K42	11
20	K13	55	0	K23	40	-20	K33	9	-40	K43	16
20	K14	14	0	K24	11	-20	K34	40	-40	K44	8
20	K15	28	0	K25	23	-20	K35	12	-40	K45	11
20	K16	18	0	K26	16	-20	K36	59	-40	K46	42

In dem Diagramm unterhalb sind nur die gültigen K-Proben ausgewertet, siehe Abbildung 52. Die weiteren tabellarischen Auswertungen der 5x10 mm<sup>2</sup> A und B Proben befinden sich im Anhang. Die eingetragenen Kerbschlagarbeiten beziehen sich immer auf das Ausgangsmaß von fünf und sieben Millimetern.

## Gültige Kerbschlagarbeiten der Proben K1-K4

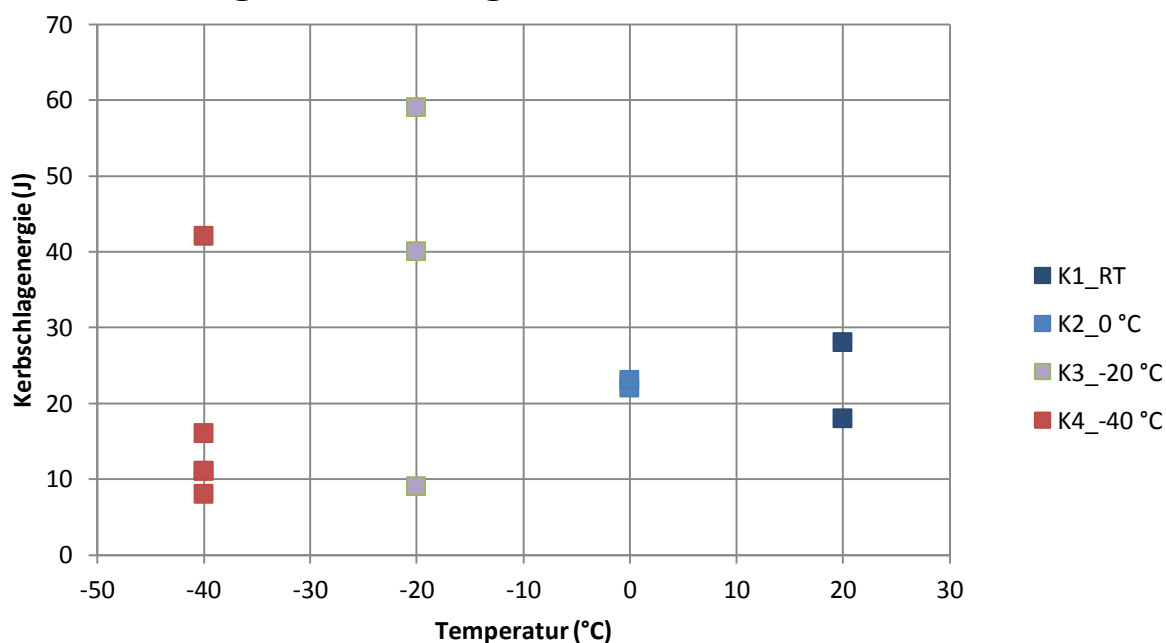


Abbildung 52: Verlauf der Kerbschlagarbeit über die Temperatur mit Probengröße  $7 \times 10 \text{ mm}^2$ , nur gültige K-Proben,  $I=42\text{mA}$ ,  $v=29\text{mm/s}$ ,  $Fq=600\text{Hz}$ ,  $\text{Fig } \varnothing=0,2\text{mm}$ ,  $HV=150\text{kV}$

Die Lage der Kerbe ist nicht die alleinige Ursache der Ausreißer der einzelnen Kerbschlagarbeitssprünge, wie bei  $-40^\circ\text{C}$  oder bei  $-20^\circ\text{C}$ , siehe Abbildung 42 (für Kerbprobe bei  $-20^\circ\text{C}$ ) und Abbildung 52. Bei allen Versuchen waren die Streuungen gleich groß, egal ob die Kerbe genau in der Schweißnahtmitte lag, in der WEZ oder dazwischen. Es ist also nicht genau definierbar ob die Streuungen der einzelnen Ausreißer kerbgrundabhängig sind, siehe Abbildung 53. Es könnte aber genauso an versuchsbedingten Einflussgrößen liegen, wie nicht genaue Zentrierung der Probe am Widerlager durch ungleiches abschneiden der Probe bezogen auf die Kerbgrundmitte, sodass der Hammer nicht zentral auf die Schweißnahtmitte schlägt. Es ist auch nicht eindeutig ersichtlich, ob die Kerbschlagarbeitssprünge durch schiefe Durchtrennung der Probe entstehen, siehe Abbildung 49 [a-c]. Hier wurde nur auf die K-Proben näher eingegangen, da diese die stärksten Sprünge aufwiesen.

Die weiteren Diagramme der A und B Proben sind im Anhang wiedergegen.

In Abbildung 53 ist ein Diagramm dargestellt, welches zeigen soll wie sich die Kerbschlagarbeit bezogen auf den Abstand des Kerbgrunds zur Schweißnahtmitte verhält (nur K-Proben).

Hierbei war die Absicht einen Unterschied bei den gültigen Proben festzustellen wie sich die Kerbschlagarbeit verändert je weiter entfernt man von der Nahtmitte ist. Interessant ist, dass sich bei manchen Proben trotz gleichem Abstand die Kerbschlagarbeit verändert. Diese Veränderung der Arbeit kann sich nur so ergeben, dass bei der Nahtvorbereitung nicht 100% dieselben Bedingungen herrschten (Kantenanarbeitung, Versatz am Stoß, Schleifungenauigkeiten, usw.). Jedoch ist bei der Probe mit 0 °C die Kerbschlagarbeit von 22 J und 23 J nahezu ident.

### Vergleich "gültige K-Proben" Kerbschlagarbeit von Kerbgrund zu Nahtmitte

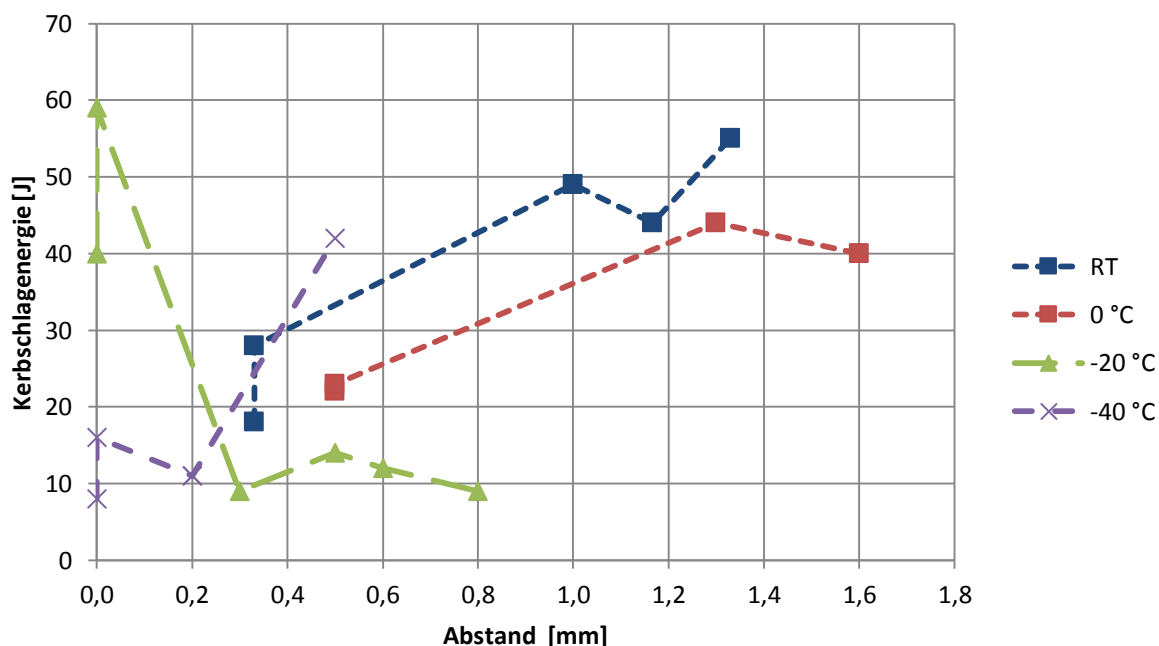


Abbildung 53: Kerbgrundabstand zur Schweißnahtmitte gültige K-Proben mit Probengröße  $7 \times 10 \text{ mm}^2$ ,  $I=42\text{mA}$ ,  $v=29\text{mm/s}$ ,  $F_q=600\text{Hz}$ ,  $\text{Fig } \varnothing=0,2\text{mm}$ ,  $HV=150\text{kV}$

Somit besteht kein direkter Zusammenhang zwischen den oben erwähnten Kerbschlagarbeitssprüngen von Abbildung 52 und dem Kerbgrundabstand zur Schweißnahtmitte, siehe Abbildung 53. Um eine genauere Aussage bezüglich der Auswirkung des Kerbgrundabstandes auf die Kerbschlagarbeit und dessen Ausreißer tätigen zu können, wären mehrere Versuche nötig. Hierbei sollte gezielt auf die Kerbgrundlage geachtet werden und eine klare Aufteilung von Mitte Schweißnaht, Übergang Schweißnaht-WEZ, Mitte WEZ und Übergang Grundwerkstoff-WEZ erstellt werden.

Die weiteren Diagramme und Auswertungen der A und B Proben befinden sich im Anhang.

#### 4.5 Härtemessung an Verbindungsschweißungen

Die Härtemessungen wurden an den Proben K1, A1 und B5 mit der Methode HV 0,5 durchgeführt. Die Nummerierungen der Eindrücke von den Probe K1, A1 und B5 waren von 1- max. 60 fortlaufend. In der Tabelle 22 sind von diesen drei Proben, die Mittelwerte von Grundwerkstoff und Schweißgut, die Maximum und Minimum Werte der WEZ, sowie dessen Differenz-Härteunterschiede dargestellt. Bei den K-Proben konnte aus versuchsbedingten Problemen nur eine geringere Anzahl an Härteeindrücken durchgeführt werden.

*Tabelle 22: Diverse HV-Härtewerte der Proben K1, A1, B5*

Proben	K1 [HV]	A1 [HV]	B5 [HV]
Mittelwert Grundwerkstoff	320,2	332,1	334,6
Mittelwert Schweißgut	380,1	374,9	376,2
Minimum WEZ	338,0	362,0	357,0
Maximum WEZ	410,0	399,0	392,0
Differenz WEZ	72,0	37,0	35,0



Die gesamten tabellarischen Auswertungen der K1, A1 und B5 Proben befinden sich im Anhang.

Die polierten und geätzten Schlibfbilder und deren Härtemessreihen sind in den folgenden Abbildung 54 bis Abbildung 56 dargestellt. Die gelben Linien stellen den Härteverlauf quer über die Schweißnaht und die rot punktierten Linien die Härteeindrücke nach Vickers dar. Der Verlauf erstreckt sich vom Grundwerkstoff zur Wärmeeinflusszone weiter zur Schweißnahtmitte und wiederum zur WEZ und schlussendlich zurück in den Grundwerkstoff.

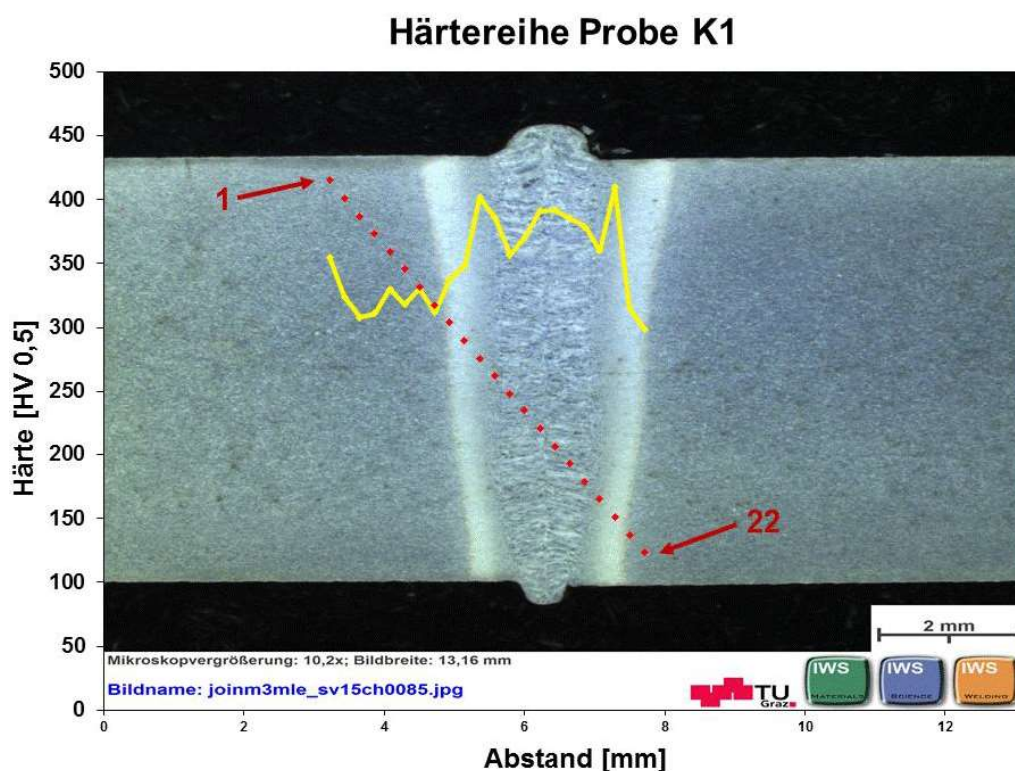


Abbildung 54: Härtereiheverlauf der Probe K1 über den Schweißnahtquerschnitt,  $I=42\text{mA}$ ,  $v=29\text{mm/s}$ ,  $Fq=600\text{Hz}$ ,  $\text{Fig } \varnothing=0,2\text{mm}$ ,  $HV=150\text{kV}$

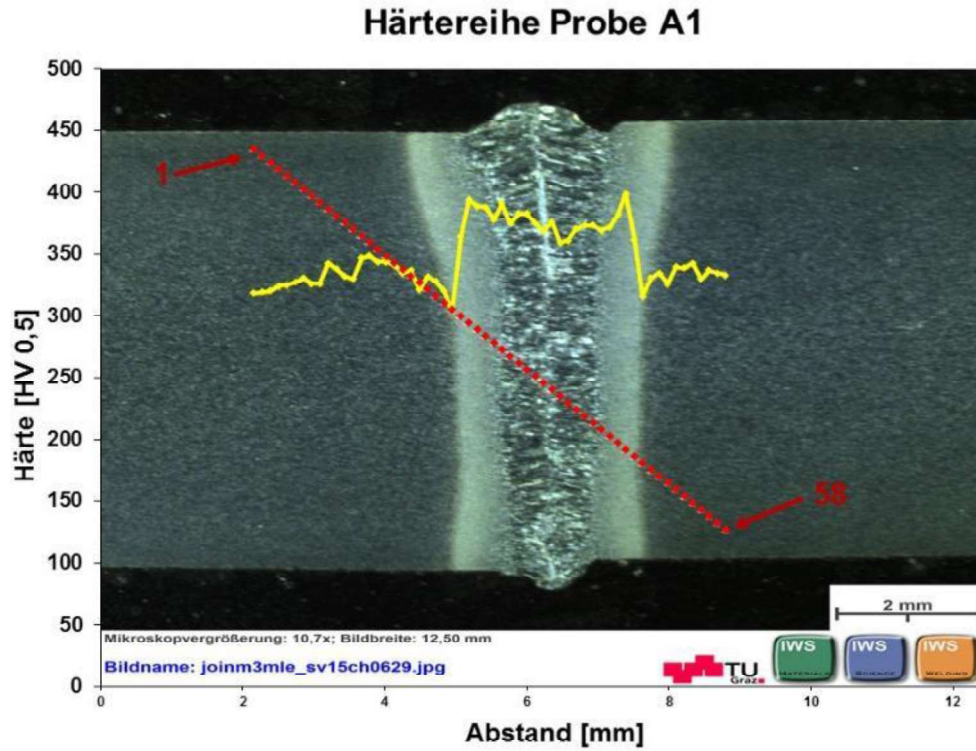


Abbildung 55: Härtereiheverlauf der Probe A1 über den Schweißnahtquerschnitt,  $I=70\text{mA}$ ,  $v=25\text{mm/s}$ ,  $Fq=1000\text{Hz}$ ,  $\text{Fig } \varnothing=0,5\text{mm}$ ,  $\text{HV}=120\text{kV}$

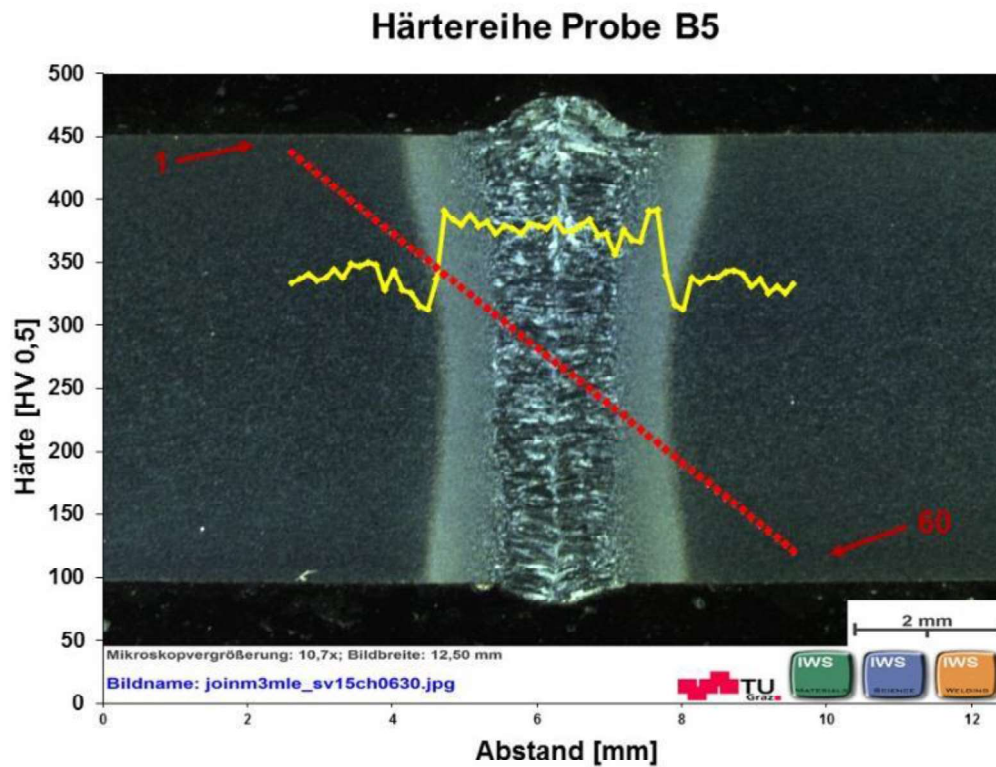


Abbildung 56: Härtereiheverlauf der Probe B5 über den Schweißnahtquerschnitt,  $I=80\text{mA}$ ,  $v=25\text{mm/s}$ ,  $Fq=1000\text{Hz}$ ,  $\text{Fig } \varnothing=0,8\text{mm}$ ,  $\text{HV}=120\text{kV}$



Der Härteanstieg in der WEZ in Abbildung 54 ist gegenüber den Schweißproben A1 und B5 deutlich zu erkennen. Im reinen Schweißgut sinkt der Härteverlauf und steigt dann zur Mitte hin wieder an. Dieser signifikante Abfall ist bei kleiner Strahlfigur (Fig.  $\varnothing=0,2$  mm) und niedriger Frequenz (600 Hz) ausgeprägter als bei größerer Strahlablenkung. Jedoch ist auch anzumerken, dass hier wesentlich weniger Prüfpunkte gesetzt wurden und somit die Auflösung des Härteverlaufs geringer ist.

In Abbildung 55 ist gut zu erkennen, dass die Härtespitzen schon geringer sind als bei der Probe-K1. Probe-A1 weist eine breitere Strahlfigur von Fig.  $\varnothing=0,5$  mm auf als Probe-K1.

Die breiteste Strahlfigur ist in Probe-B5, siehe Abbildung 56. Bei diesem Schweißparameter sind durch die breitere Strahlfigur von Fig.  $\varnothing=0,8$  mm die Differenz-Härteunterschiede am geringsten, siehe Tabelle 22. Des Weiteren ist der Verlauf der Schweißnahterweichung in Nahtmitte gleichmäßiger als bei den anderen Messungen der Proben K1 und A1.

Der Härteverlauf der Probe-B5 lässt somit darauf schließen, dass die breitere Strahlfigur bei dem S960 MC Stahl den gleichmäßigsten Verlauf aufweist. Zur Bestätigung dieses Trends, sind jedoch mehrere Versuche notwendig.

## 4.6 Auswertung der Proben

Aus dem Gesamtvergleich in Abbildung 57 ist herauszusehen, dass sich die Kerbschlagarbeiten der K-Proben eher in Tieflage befinden, jedoch ist zu beachten, dass bei dieser Auswertung zu wenig gültige K-Proben verwendet wurden (siehe Standardabweichung bei  $0^{\circ}\text{C}$  und  $20^{\circ}\text{C}$ ) um eine genauere Aussage zu treffen. Die A-Proben befinden sich ungefähr im Übergangsbereich der Kerbschlagenergie-Temperatur-Kurve. Aus den gewonnenen Erfahrungswerten und Versuchen, sei es bei der Schweißvorbereitung, dem Nahtaussehen, dem Schweißvorgang selbst, oder den metallurgischen Eigenschaften, bewährte sich die B-Proben Auswertung als beste.

#### 4.6.1 Gesamtvergleich K, A und B

Für den genormten Kerbschlagbiegeversuch nach EN ISO 148-1 sind  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  große Proben erforderlich [25]. In dieser Auswertung kamen gültige Untermaßproben zur Geltung. Für die K-Proben wurde ein Untermaß von  $7 \times 10 \text{ mm}^2$  und für A- und B-Proben wurde ein Untermaß von  $5 \times 10 \text{ mm}^2$  verwendet. Abbildung 57 zeigt die Proben auf das Standardmaß  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  hochgerechnet. Die vertikal verlaufenden Linien sollen die Standardabweichungen symbolisieren.

#### MW Gesamt Vergleich nur gültige Proben

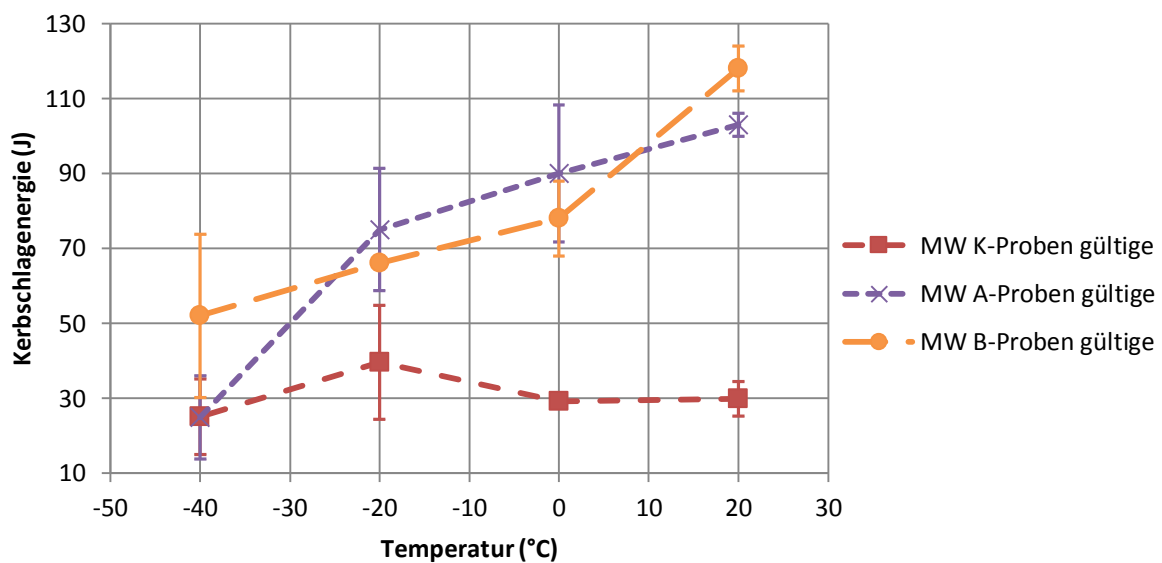


Abbildung 57: MW Gesamtvergleich hochgerechnet auf  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  gültige Proben K, A und B mit Standardabweichungen

Hinzu kommt, dass der Härteverlauf bei Probe B gleichmäßiger ist als die anderen, siehe Abbildung 56. In dieser Arbeit wurde jedoch mehr Augenmerk auf die Kerbschlagzähigkeit gelegt.

Die Schweißparameter für die B-Proben sind in der Tabelle 23 unterhalb nochmal angeführt.

Tabelle 23: Schweißparameter B-Probe

Probe	I [mA]	v [mm/s]	FL [mm]	Fq [Hz]	Fig Ø [mm]	HV [kV]
B	80	25	-31	1000	0,8	120

## 5 Zusammenfassung und Interpretation

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurden durch zahlreiche Elektronenstrahlschweißversuche und -optimierungen geeignete Schweißparameter für einen S960 MC Stahl ermittelt.

Die Vickers- Härtemessung lieferte einen detaillierten Härteverlauf von Grundwerkstoff, Wärmeeinflusszone (WEZ) und Schweißgut. Das beste Ergebnis der Vickers- Härtemessung erbrachte die B-Proben Auswertung mit den Schweißparametern: Schweißstrom  $I = 80 \text{ mA}$ , Geschwindigkeit  $v = 25 \text{ mm/s}$ , Fokusbildung  $FL = -31 \text{ mm}$ , Strahlfrequenz  $Fq = 1000 \text{ Hz}$ , Strahlfiguredurchmesser  $\text{Fig } \varnothing = 0,8 \text{ mm}$  und Hochspannung  $HV = 120 \text{ kV}$ . Hierbei waren die Härteunterschiede, in Schweißnaht und WEZ am geringsten (max.  $392 \text{ HV}_{0,5}$  und min.  $313 \text{ HV}_{0,5}$ ). Demzufolge ergab sich ein gleichmäßiger Verlauf der Härte über den Schweißnahtquerschnitt.

Von den drei Versuchsreihen K, A und B, wurden mithilfe eines Kerbschlagbiegeversuchs (Untermaßproben  $7 \times 10 \text{ mm}^2$  und  $5 \times 10 \text{ mm}^2$ ), bei Raumtemperatur,  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ , die Zähigkeiten bestimmt.

Mit dem instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch nach EN ISO 14556 konnten Kraft-Durchbiegungs-Kurven in Diagrammform erstellt und bestimmt werden. Hierbei sind die Kurven-Typen A, B, C und D aufgetreten.

Die V-Kerbe in den Kerbschlagbiegeproben konnte aufgrund der schmalen WEZ sowie Schweißnahtbreite nicht immer exakt in der Nahtmitte positioniert werden. Aus diesen Abweichungen vergrößerten sich die Streubreiten der Kerbschlagwerte in allen Temperaturbereichen und waren nur selten konsistent.

Bei der Bruchflächenanalyse der Kerbschlagbiegeproben wurden nur bei den K-Proben (1. Versuchsreihe), rundliche Heißrissbereiche auf den Bruchflächen festgestellt. Sie entstanden durch die zu kleine Strahlfigur und der damit verbundenen geringeren Anschmelzung der Stirnflächen (teilweise wellig). Erst bei größeren Strahlfiguredurchmessern entstanden diese nicht mehr. In nachfolgenden Schweißversuchen sollte daher unbedingt auf eine plane Stirnflächenbearbeitung der Schweißproben (I-Stoß ohne Spalt) und Oberflächenqualitäten von N7 oder N8 nach DIN ISO 1302 geachtet werden. Hierbei spricht man von Oberflächenrauheitswerten von  $R_a=1,6 - 3,2 \mu\text{m}$ .

Das Endergebnis der Zähigkeitsuntersuchungen des elektronenstrahlgeschweißten S960MC Stahls bezog sich auf folgende Parametereinstellungen der B-Proben:  $I=80\text{mA}$ ,  $v=25\text{mm/s}$ ,  $FL=-31\text{mm}$ ,  $Fq=1000\text{Hz}$ ,  $Fig \varnothing=0,8\text{mm}$  und  $HV=120\text{kV}$ .

Diese Einstellungen ergaben einen stetigen Verlauf der Kerbschlagarbeit über die Temperatur (Mittelwert aus jeweils 5-6 Kerbschlagproben). Des Weiteren war die B-Probe von der visuellen Prüfung des Nahtaussehens, Nahtüberhöhung, -wurzel und Schliffbild am besten.

Mit der detaillierten Analyse der drei unterschiedlichen Parametereinstellungen K, A und B konnte ein elementarer Schritt für das Elektronenstrahlschweißen des thermomechanisch gewalzten Feinkornbaustahles S960 MC und dessen Zähigkeitseigenschaften gemacht werden. Die Erfahrungen und Ergebnisse aus dieser Arbeit stellen einen guten und soliden Grundstock für weitere und spezifischere Untersuchungen, wie z.B. Optimierung der Strahlfigur oder Verbesserung der Kerbgenauigkeit von Charpy-V Proben dar.

## 6 Quellenverzeichnis

- [1] W. Hittorf, "Ueber die Electricitätsleitung der Gase," *Ann. der Phys. und Chemie*, vol. 243, no. 8, pp. 553–631, 1879.
- [2] J. J. Thomson, "The London, Edingburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science," *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, vol. 44, no. 269, pp. 293–316, 1897.
- [3] O. Glasser, *Wilhelm Conrad Röntgen und die Geschichte der Röntgenstrahlen*. 2013.
- [4] M. Von Pirani, "Method of producing homogeneous bodies from tantalum or other highly-refractory metals.," 17-Dec-1907.
- [5] H. Schultz, *Elektronenstrahlschweißen*. 1989.
- [6] C. Davisson and L. H. Germer, "The Physical Review," *Diffr. eletrons by a Cryst. nickel*, vol. 30, no. 6, pp. 0–37, 1927.
- [7] H. Suzuki and T. Hashimoto, *Electron Beam Welding*, vol. 3, no. 6. 1960.
- [8] J. Eichmeier and H. Heynisch, "Handbuch der Vakuumelektronik." p. 641, 1989.
- [9] M. Krysl, "Experimentelle Ermittlung von Schweiß-ZTU- Diagrammen für einen thermomechanisch gewalzten," *Diplomarbeit*, 2012.
- [10] P. Zimmer, *Zur Bewertung der Kaltrissicherheit von Schweissverbindungen aus hochfesten Feinkornbaustählen*. 2007.
- [11] M. M. Klein, "Werkstoffkunde Stahl," 2014.
- [12] R. Stroetmann, "Nachhaltigkeit und ressourceneffizienter Einsatz höherfester Stähle," 2015.
- [13] M. Heinzler, R. Kilgus, F. Naehner, H. Paetzold, W. Roehrer, and K. Schilling, "Tabellenbuch Metall," *Eur. Lehm.*, p. 304, 1992.
- [14] Hochschule Pforzheim, "Kerbschlagbiegeversuch," 2015. [Online]. Available: [https://www.hs-pforzheim.de/De-de/Technik/Maschinenbau/laborbereiche/werkstoffkunde/werkst\\_pruef/Seiten/mech\\_wsp\\_kerbschlag.aspx](https://www.hs-pforzheim.de/De-de/Technik/Maschinenbau/laborbereiche/werkstoffkunde/werkst_pruef/Seiten/mech_wsp_kerbschlag.aspx). [Accessed: 03-Jul-2015].
- [15] J. Priebe, "Stahlbau," 2012.
- [16] "EN 10045 Teil 1, Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy." 1990.
- [17] E. Macherauch and H.-W. Zoch, *Praktikum in Werkstoffkunde: 95 ausführliche Versuche aus wichtigen Gebieten der Werkstofftechnik*. Springer-Verlag, 2014.
- [18] *ÖNORM EN ISO 14556, Stahl- Kerbschlagbiegeveruch nach Charpy (V-Kerb)-Instrumentiertes Prüfverfahren*. 2007.
- [19] "ÖNORM EN ISO 14556, Stahl- Kerbschlagbiegeveruch nach Charpy (V-Kerb)-Instrumentiertes Prüfverfahren." 2007.
- [20] P. I. Instruments, "Härtemessverfahren," 2015. [Online]. Available: <http://www.warensortiment.de/technische-daten/erklaerung-haertemessung.htm>. [Accessed: 08-Jul-2015].

- [21] *Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*. Springer-Verlag, 2014.
- [22] CHEMIE.DE, "Härte." [Online]. Available: <http://www.chemie.de/lexikon/H%C3%A4rte.html>. [Accessed: 05-Jan-2016].
- [23] "Wagner Magnete." [Online]. Available: <http://www.wagner-magnete.de/index.php5?PHPSESSID=1254573edd7127678547d9d236ddc381&idx=205&lang=de>. [Accessed: 10-Dec-2015].
- [24] "TechDatEBW." [Online]. Available: [http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/TU\\_Graz/Einrichtungen/Institute/Homepages/i3030/Labor/Schweisslabor/TechDatEBW](http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/TU_Graz/Einrichtungen/Institute/Homepages/i3030/Labor/Schweisslabor/TechDatEBW). [Accessed: 10-Dec-2015].
- [25] "ÖNORM EN ISO 148-1, Metallische Werkstoffe- Kerbschlagbeigeversuch nach Charpy148-1, ÖNORM." 2010.

## 7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Röntgenröhre aus der Patentschrift von Pirani [5]	3
Abbildung 2: Schemabild, Querschnitt Elektronenstrahlgenerator [5]	7
Abbildung 3: Bewegungseinrichtungen Arbeitstisch in einer Elektronenstrahlschweißanlage [7]	8
Abbildung 4: Schematische Darstellung von thermisch beschleunigten Elektronen auf eine Anode [5]	10
Abbildung 5: Stahlrichtwerte für mögliche Strahlleistungen P in Bezug auf Schweißgeschwindigkeit und Nahtdicke [5]	11
Abbildung 6: Hilfsskizze Fokuslagen	12
Abbildung 7: Verschiedene Strahlpendelfiguren [5]	13
Abbildung 8: Verlauf der Zugfestigkeit über die Bruchdehnung für verschiedene Warmbandstahlsorten [11]	14
Abbildung 9: Verschiedene Warmwalzverfahren dargestellt in Abhängigkeit der Zeit über die Temperatur [12]	15
Abbildung 10: Stahlbezeichnung nach DIN EN 10027-1 [13]	16
Abbildung 11: Prinzip Skizze Kerbschlagbiegeversuch mit Berechnungsformel [14]	17
Abbildung 12: Schematische Skizze des Probenauflegers für Kerbschlagbiegeversuch [16]	18
Abbildung 13: Kerbschlagarbeit-Temperatur Diagramm für S 235 [14]	18
Abbildung 14: Typische Kraft-Durchbiegungs-Kurven nach EN ISO 14556 [19]	20
Abbildung 15: Skizze Vickersprüfkopf mit Diagonalen $d_1$ und $d_2$ [11]	21
Abbildung 16: Platten-Entmagnetisier-Apparat L211	24
Abbildung 17: Pro Beam Elektronenstrahl-Kammeranlage am IWS Graz	25
Abbildung 18: Skizze mit Probenabmessungen und Schweißvorlage für Blindschweißungen	26
Abbildung 19: Prinzipskizze Probe mit Schweißpunkt	27

Abbildung 20: Original 3-Teilige Plattenprobe mit stirnseitigen Schweißpunkten	27
Abbildung 21: Platte 04 Blind Oberseite mit Schweißnahtkennzeichnung	29
Abbildung 22: Platte 04 Blind Unterseite mit Schweißnahtkennzeichnung	29
Abbildung 23: Platte 05 Blind Oberseite mit Schweißnahtkennzeichnung	30
Abbildung 24: Platte 05 Blind Unterseite mit Schweißnahtkennzeichnung	30
Abbildung 25: Platte 04B Oberseite mit Schnittkennzeichnung für Einbettung der Schweißnähte	30
Abbildung 26: Blindschweißung geätzt aus Probe 3.2, $I=25$ mA, $v=5$ mm/s	32
Abbildung 27: Blindschweißung geätzt aus Probe 4.1, $I=20$ mA, $v=10$ mm/s	32
Abbildung 28: Blindnähte Probe 08, $I=35$ mA, $v=20$ mm/s, $FL=-12$ mm	33
Abbildung 29: Blindnähte Probe 15, $I=27,5$ mA, $v=17,5$ mm/s, $FL=-30,88$ mm	33
Abbildung 30: Verbindungsnaht Probe 02 $v=22,5$ mm/s	36
Abbildung 31: Verbindungsnaht Probe 04 $v=25$ mm/s	36
Abbildung 32: Mikroskopische Ansicht Verbindungsnaht der Probe 04 mit Hauptabmessungen der Schnittfläche	37
Abbildung 33: Verbindungsnaht Probe 13 mit unzureichender Nahtüberhöhung durch Kantenversatz	39
Abbildung 34: Verbindungsnahte Probe 18 mit Kantenanarbeitung und stirnseitigen Schweißpunkt, $I=40$ mA, $v=27$ mm/s, $FL=-31$ mm, $F_q=600$ Hz, $F_{ig} \varnothing=0,2$ mm, $HV=150$ kV	40
Abbildung 35: Verbindungsnahte Probe 22 mit Kantenanarbeitung und stirnseitigen Schweißpunkt, $I=27,5$ mA, $v=19$ mm/s, $FL=-31$ mm, $F_q=600$ Hz, $F_{ig} \varnothing=0,2$ mm, $HV=150$ kV	40
Abbildung 36: Verbindungsnahte Probe 23 mit Kantenanarbeitung und stirnseitigen Schweißpunkt, $I=37$ mA, $v=28$ mm/s, $FL=-31$ mm, $F_q=600$ Hz, $F_{ig} \varnothing=0,2$ mm, $HV=150$ kV	40
Abbildung 37: Verbindungsnahte Probe 25 mit Kantenanarbeitung und stirnseitigen Schweißpunkt, $I=42$ mA, $v=28$ mm/s, $FL=-31$ mm, $F_q=600$ Hz, $F_{ig} \varnothing=0,2$ mm, $HV=150$ kV	40



Abbildung 38: Verbindungsnahte Probe 26 mit Kantenanarbeitung und stirnseitigen Schweißpunkt, I=44 mA, v=30 mm/s, FL=-31 mm, Fq=600 Hz, Fig Ø=0,2 mm, HV=150 kV	41
Abbildung 39: Verbindungsnahte Probe 27 mit Kantenanarbeitung und stirnseitigen Schweißpunkt, I=28 mA, v=20 mm/s, FL=-31 mm, Fq=600 Hz, Fig Ø=0,2 mm, HV=150 kV	41
Abbildung 40: Mikroskopische Ansicht Verbindungsnaht der Probe 26 mit Hauptabmessungen der Schnittfläche	42
Abbildung 41: Gegenüberstellung der drei Strahlfigurengrößen	45
Abbildung 42: Fertig bearbeitete Kerbschlagproben K3 für Versuch bei -20 °C mit Probengröße 7x10 mm <sup>2</sup> , I=42 mA, v=29mm/s, Fq=600Hz, Fig Ø=0,2 mm, HV=150kV	46
Abbildung 43: Fertig bearbeitete Kerbschlagproben A1 für Versuch bei Raumtemperatur mit Probengröße 5x10 mm <sup>2</sup> , I=70 mA, Fig Ø=0,5 mm	47
Abbildung 44: Fertig bearbeitete Kerbschlagproben B5 für Versuch bei 0 °C mit Probengröße 5x10 mm <sup>2</sup> , I=80 mA, Fig Ø=0,8 mm	47
Abbildung 45: Makroskopische Draufsicht der durchgeschlagenen K-Biegeproben mit Probengröße 7x10 mm <sup>2</sup> , I=42mA, v=29mm/s, Fq=600Hz, Fig Ø=0,2mm, HV=150kV	48
Abbildung 46: Messprotokoll der Proben K1 bei Raumtemperatur mit Probengröße 7x10 mm <sup>2</sup> , I=42mA, v=29mm/s, Fq=600Hz, Fig Ø=0,2mm, HV=150kV	49
Abbildung 47: Messprotokoll der Proben K4 bei -40°C mit Probengröße 7x10 mm <sup>2</sup> , I=42mA, v=29mm/s, Fq=600Hz, Fig Ø=0,2mm, HV=150kV	50
Abbildung 48: Probe K31 Zähbruchanteil und laterale Breitung mit Probengröße 7x10 mm <sup>2</sup> , Temperatur -20°C, I=42mA, v=29mm/s, Fq=600Hz, Fig Ø=0,2mm, HV=150kV	51
Abbildung 49: Seitliche Bruchflächen Ansicht der Kerbschlagbiegeproben bei Raumtemperatur	52
Abbildung 50: Makroskopische Bruchflächenanalyse K-Biegeproben, I=42mA, v=29mm/s, Fq=600Hz, Fig Ø=0,2mm, HV=150kV	54

- Abbildung 51: REM Untersuchung K26-Biegeprobe bei 0 °C, I=42mA, v=29mm/s, Fq=600Hz, Fig Ø=0,2mm, HV=150kV 55
- Abbildung 52: Verlauf der Kerbschlagarbeit über die Temperatur mit Probengröße 7x10 mm<sup>2</sup>, nur gültige K-Proben, I=42mA, v=29mm/s, Fq=600Hz, Fig Ø=0,2mm, HV=150kV 57
- Abbildung 53: Kerbgrundabstand zur Schweißnahtmitte gültige K-Proben mit Probengröße 7x10 mm<sup>2</sup>, I=42mA, v=29mm/s, Fq=600Hz, Fig Ø=0,2mm, HV=150kV 58
- Abbildung 54: Härtereiheverlauf der Probe K1 über den Schweißnahtquerschnitt, I=42mA, v=29mm/s, Fq=600Hz, Fig Ø=0,2mm, HV=150kV 60
- Abbildung 55: Härtereiheverlauf der Probe A1 über den Schweißnahtquerschnitt, I=70mA, v=25mm/s, Fq=1000Hz, Fig Ø=0,5mm, HV=120kV 61
- Abbildung 56: Härtereiheverlauf der Probe B5 über den Schweißnahtquerschnitt, I=80mA, v=25mm/s, Fq=1000Hz, Fig Ø=0,8mm, HV=120kV 61
- Abbildung 57: MW Gesamtvergleich hochgerechnet auf 10x10 mm<sup>2</sup> gültige Proben K, A und B mit Standardabweichungen 63

## 8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verfahrenstechnische Merkmale des Elektronenstrahlschweißens [5]	5
Tabelle 2: Schweißtechnische Vorteile des Elektronenstrahlschweißens [5]	5
Tabelle 3: Fertigungs- und konstruktionstechnische Vorteile des Elektronenstrahlschweißens [5]	6
Tabelle 4: Einflussgrößen auf die Übergangstemperatur $T_{\dot{u}}$	19
Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung (Analyse in Masse-%)	23
Tabelle 6: Kohlenstoffäquivalente	23
Tabelle 7: Mechanische Eigenschaften	23
Tabelle 8: Blindschweißparameter 04	28
Tabelle 9: Blindschweißparameter Platte 05 Blindnaht	29
Tabelle 10: Schweißparameter geätzte Schliffproben aus Run 3.2 und 4.1	32
Tabelle 11: Blindschweißversuch Run 2-15	33
Tabelle 12: Blindschweißung konstante Fokusslage FL	34
Tabelle 13: Parameter Verbindungsschweißung erster Versuch ohne Kantenanarbeitung	35
Tabelle 14: Parameter Verbindungsschweißung mit Kantenanarbeitung	36
Tabelle 15: Zusammenfassung der einzelnen Hauptabmessungen der Probe 04 durch mikroskopische Vermessung	38
Tabelle 16: Verbindungsschweißung geheftet Stirnseite Probe 13	39
Tabelle 17: Verbindungsschweißung geheftet Stirnseite Probe 25 und 27	41
Tabelle 18: Verbindungsschweißung geheftet Stirnseite Probe 26	41
Tabelle 19: Zusammenfassung der einzelnen Hauptabmessungen der Probe 26 durch mikroskopische Vermessung	43
Tabelle 20: Schweißparameter A und B mit verschiedenen Strahlfiguren	44
Tabelle 21: Parametertabelle der Kerbschlagarbeiten K1-K4 über die Temperatur mit Probengröße $7 \times 10 \text{ mm}^2$	56
Tabelle 22: Diverse HV-Härtewerte der Proben K1, A1, B5	59

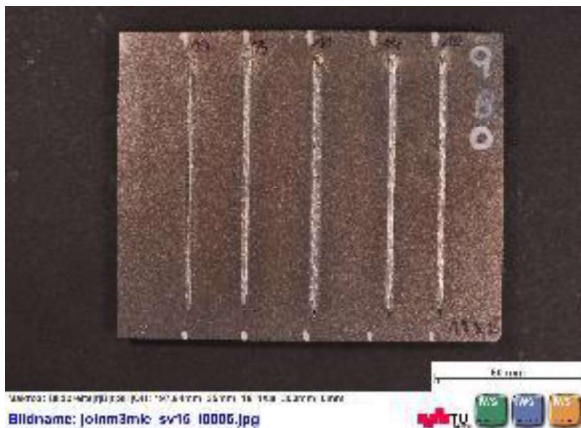
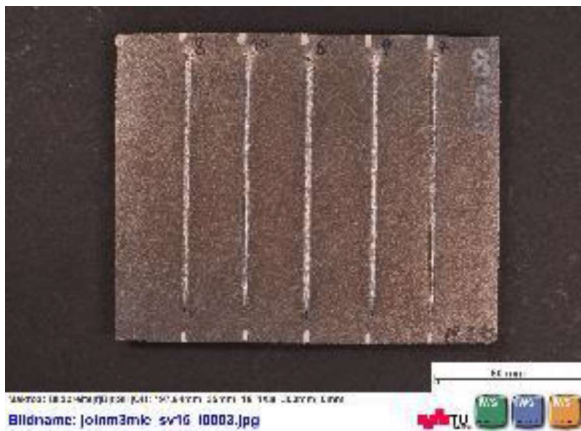
Tabelle 23: Schweißparameter B-Probe

63

## 9 Anhang

### 9.1 Blindnahtschweißungen

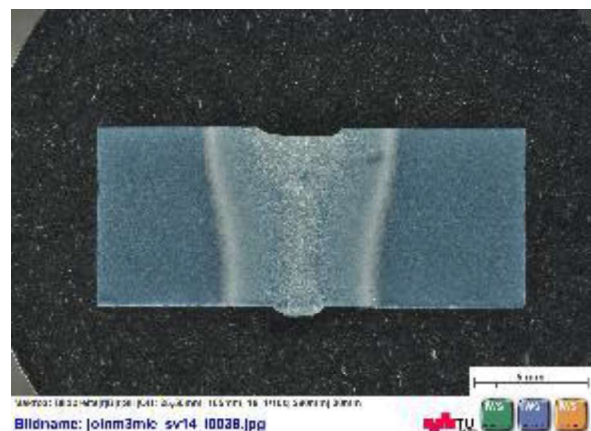
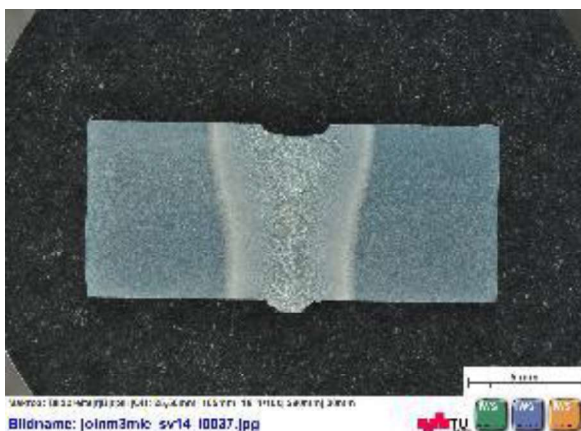
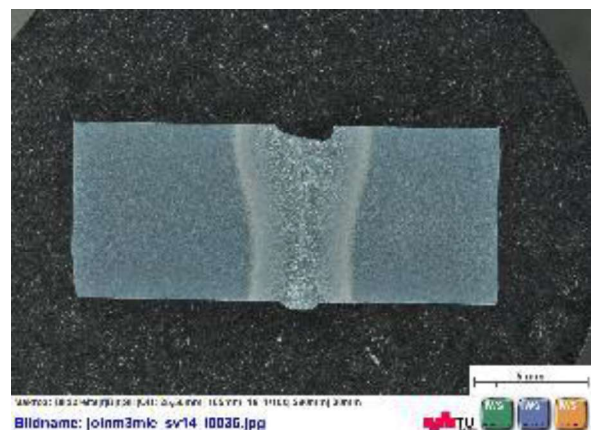
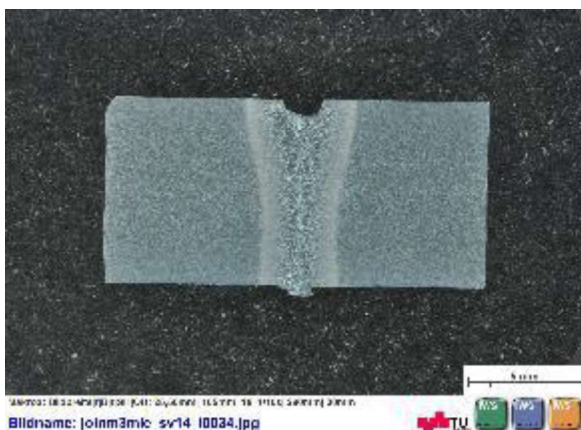
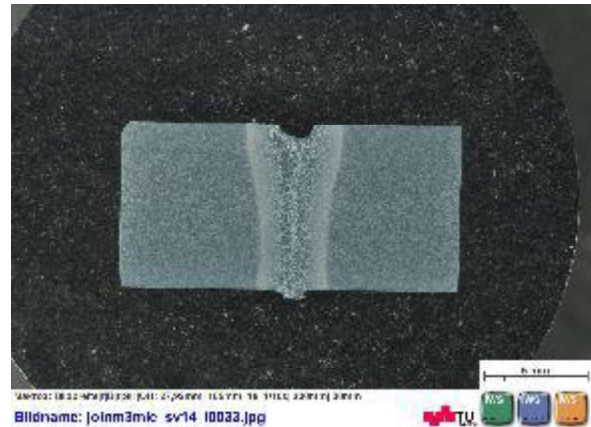
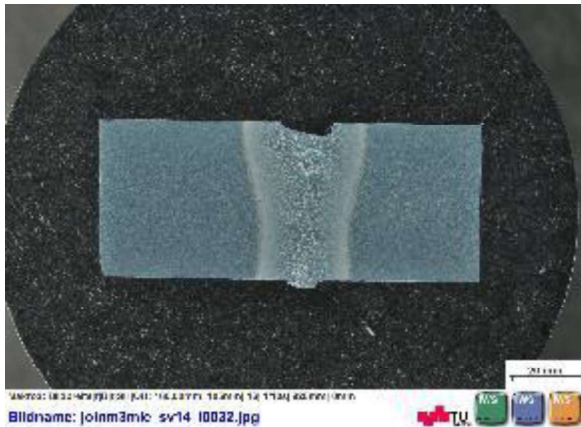
Die nachstehenden Bilder sollen ein Paar der ersten Blindschweißversuche zeigen. An den Blechunterseiten kann man deutlich die fehlende Durchschweißung oder Ausspratzungen der Wurzelnaht erkennen.

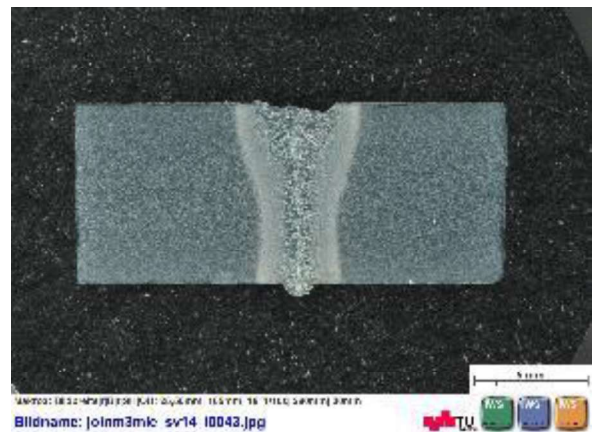
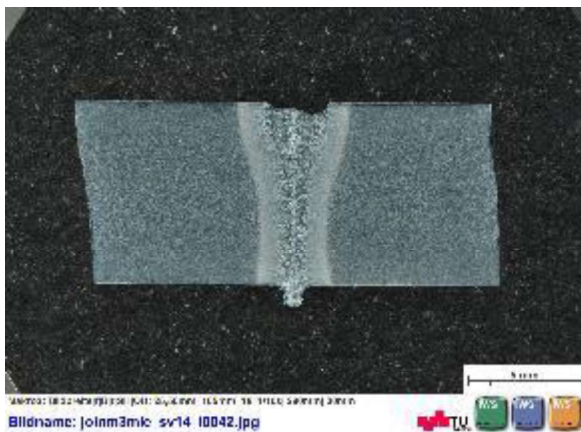
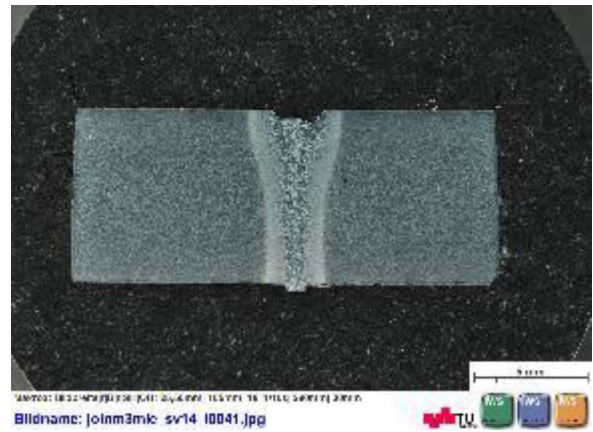
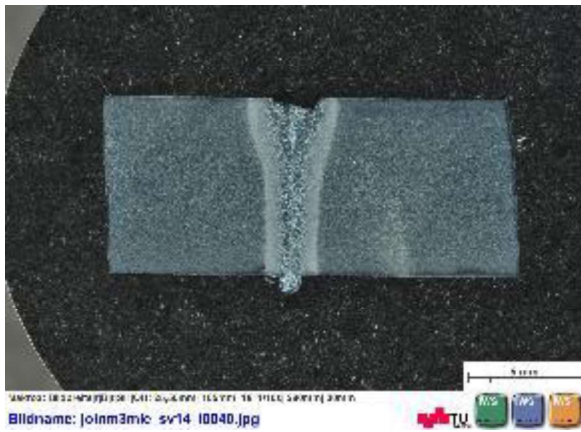




## 9.2 Schliffbilder Blindnahtschweißungen

Diese Abbildungen zeigen von den Blindschweißversuchen den Querschnitt der Naht. Hier ist zu erkennen die nicht vorhandene Decklage der Schweißnaht oder die unzureichende Durchschweißung bzw. schlechte Wurzellage.

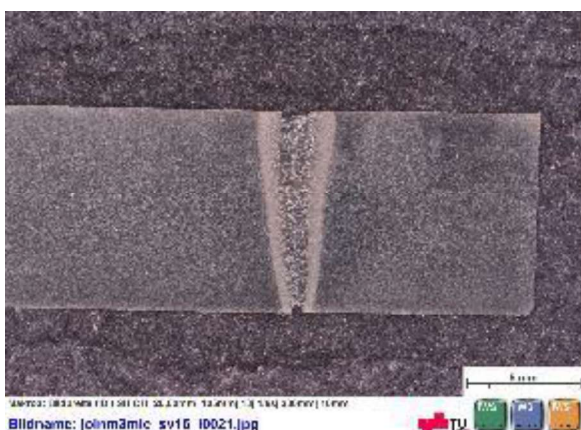






### 9.3 Verbindungsschweißungen

Hier sind die ersten Verbindungsschweißungen, jedoch wie im Schliff erkennbar ist die Naht von unzureichender Qualität.

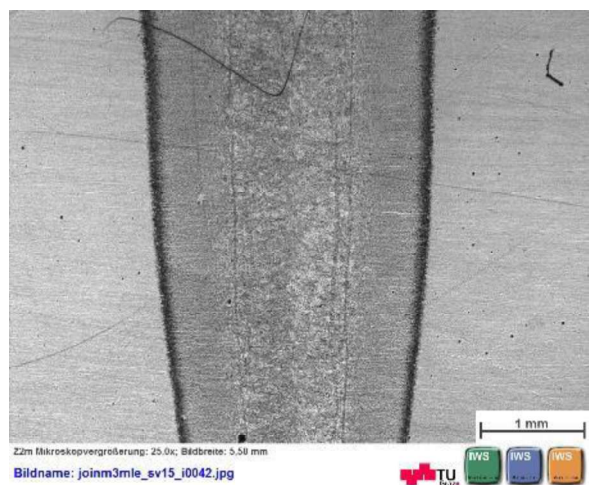
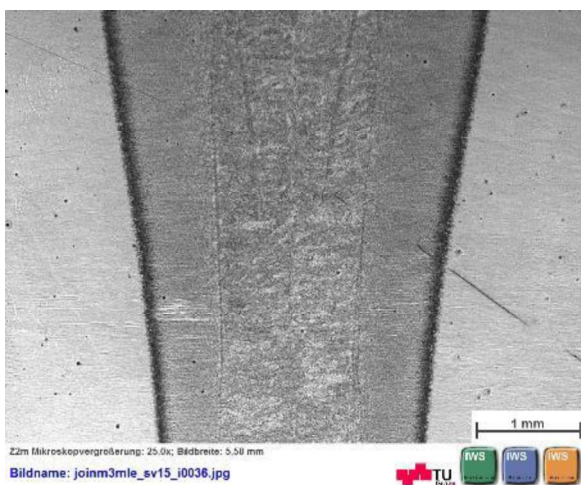
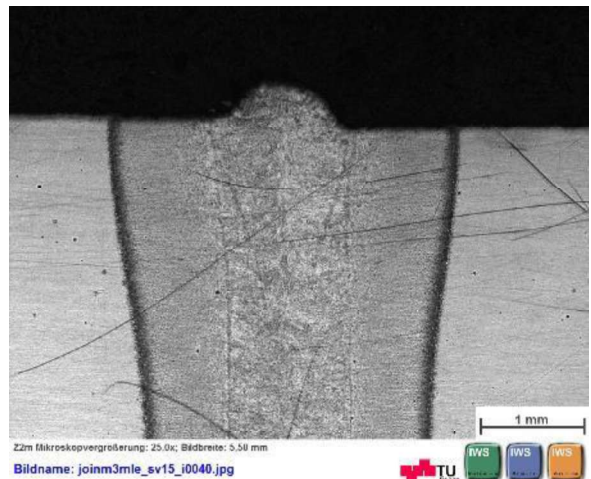
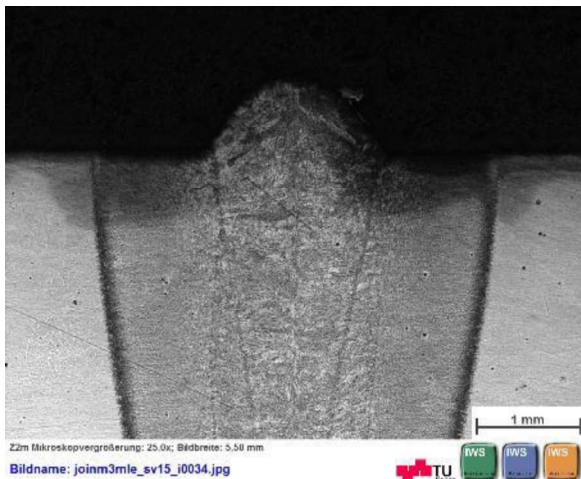


## 9.4 Mikroskopische Schliffbilder

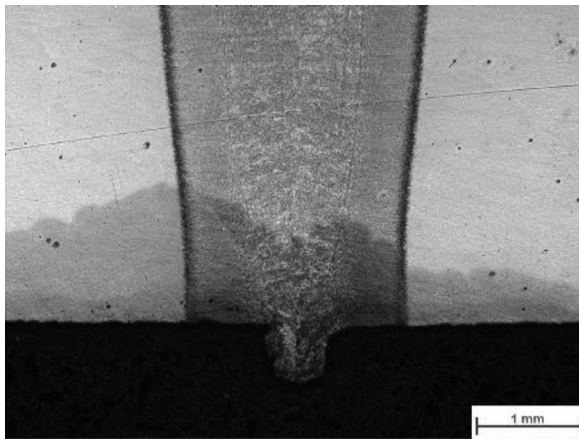
Parameter Probe 18:  $I=40\text{mA}$ ,  
 $v=27\text{mm/s}$ ,  $FL=-31\text{mm}$ ,  $Fq=600\text{Hz}$ , Fig.  
 $\varnothing=0,2\text{mm}$ ,  $HV=150\text{kV}$



Parameter Probe 22:  $I=27,5\text{mA}$ ,  
 $v=19\text{mm/s}$ ,  $FL=-31\text{mm}$ ,  $Fq=600\text{Hz}$ , Fig.  
 $\varnothing=0,2\text{mm}$ ,  $HV=150\text{kV}$

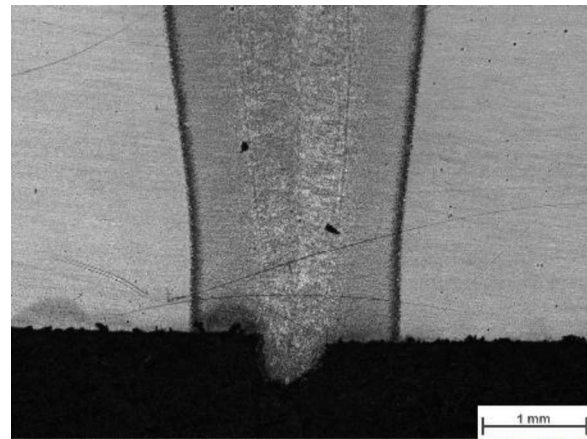






Z2m Mikroskopvergrößerung: 25.0x; Bildbreite: 5.50 mm

Bildname: joinm3mle\_sv15\_i0038.jpg



Z2m Mikroskopvergrößerung: 25.0x; Bildbreite: 5.50 mm

Bildname: joinm3mle\_sv15\_i0044.jpg



## 9.5 Kerbschlagbiegeproben

In den nachfolgenden Bildern sind alle durchgeschlagene Kerbschlagbiegeproben angeführt. Zu sehen sind Seitenansicht, Draufsicht und die ungebrochene Kerbprobe aller Temperaturbereiche.



Bildname: joinm3mle\_sv15\_J0129.jpg

Bildname: joinm3mle\_sv15\_J0129.jpg



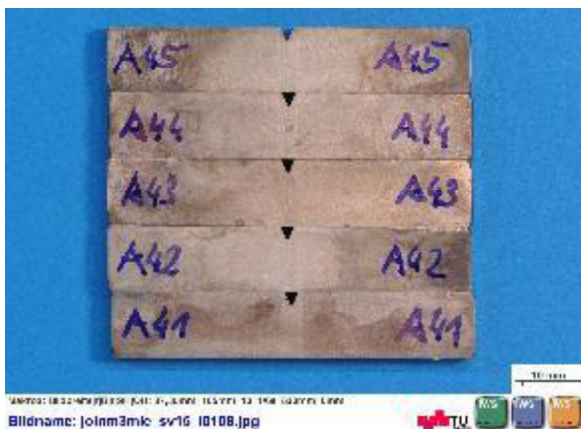
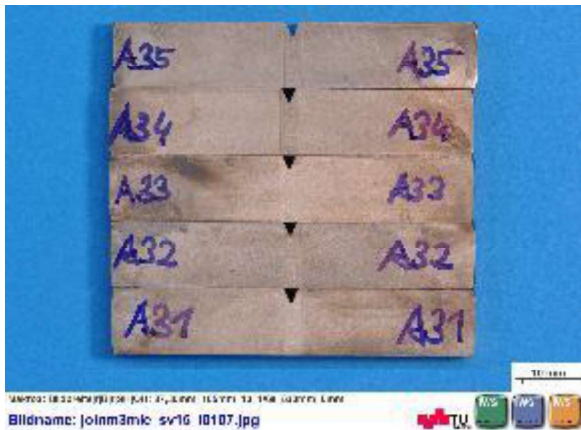
Bildname: joinm3mle\_sv15\_J0130.jpg

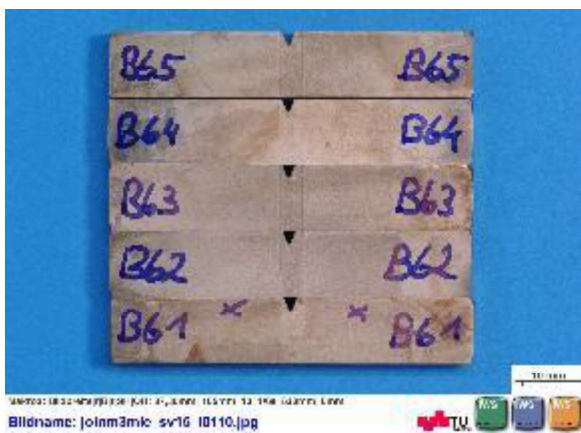
Bildname: joinm3mle\_sv15\_J0130.jpg



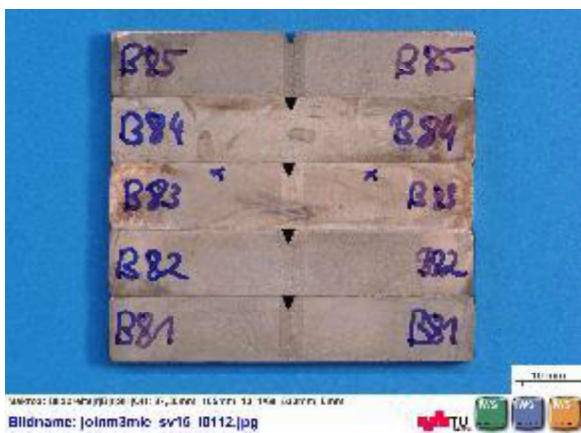














## 9.6 Kerbschlagarbeiten

Die nachfolgenden Tabellen zeigen alle Kerbschlagarbeiten pro Temperatur.

**A1-A4, l=70, v=25, FL=-31, Hz=1000, Fig=0,5, Probengröße= 5x10 mm<sup>2</sup>**

Temp. [C°]	Nr.:	Arbeit [J]	Abstand	Temp. [C°]	Nr.:	Arbeit [J]	Abstand
20	A11	50	1,0	0	A21	39	1
20	A12	61	1,0	0	A22	32	0,5
20	A13	68	0,5	0	A23	90	0,5
20	A14	65	0,5	0	A24	76	0
20	A15	73	0,0	0	A25	72	0
Temp. [C°]	Nr.:	Arbeit [J]	Abstand	Temp. [C°]	Nr.:	Arbeit [J]	Abstand
-20	A31	48	0,5	-40	A41	9	0
-20	A32	16	0,5	-40	A42	42	0
-20	A33	69	0,5	-40	A43	16	0,5
-20	A34	48	0	-40	A44	11	0,5
-20	A35	69	0	-40	A45	5	0

**B5-B8, l=80, v=25, FL=-31, Hz=1000, Fig=0,8,**

**Probengröße= 5x10 mm<sup>2</sup>**

Temp. [C°]	Nr.:	Arbeit [J]	Abstand	Temp. [C°]	Nr.:	Arbeit [J]	Abstand
20	B51	59	1,5	0	B61	66	0,5
20	B52	78	0,5	0	B62	72	0,5
20	B53	71	0,5	0	B63	45	0,5
20	B54	87	0,0	0	B64	45	0,5
20	B55	64	0,5	0	B65	45	0,5

Temp. [C°]	Nr.:	Arbeit [J]	Abstand	Temp. [C°]	Nr.:	Arbeit [J]	Abstand
-20	B71	24	1	-40	B81	34	0,5
-20	B72	25	1,5	-40	B82	5	1,5
-20	B73	16	1	-40	B83	16	1
-20	B74	44	0,5	-40	B84	64	0,5
-20	B75	66	0,5	-40	B85	6	0,5

**Orange= Nicht Durchgeschlagen ND, Schwarz= ungültig bezogen auf Kerbabstand, Grün= gültig bezogen auf Kerbabstand zur Schweißnahtmitte, Rot= ungültig**

## 9.7 Härtewerte K1, A1 und B5

In der unten angeführten Tabelle befinden sich die Härtewerte der Messauswertung. Die in Farbe gekennzeichneten Felder zeigen die max. und min. Werte an.

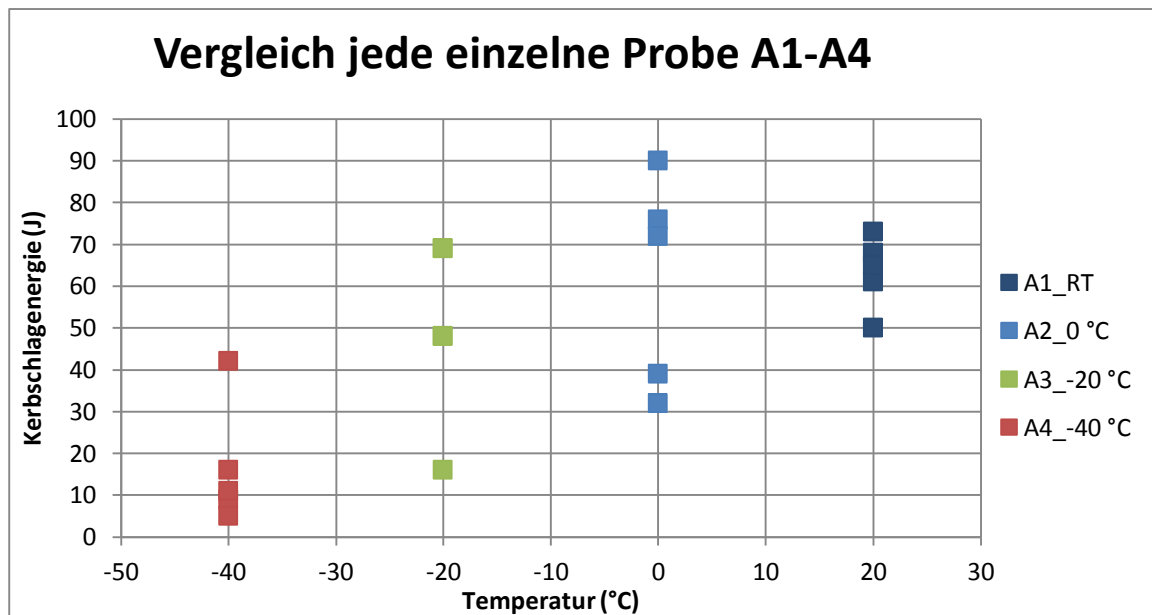
K1 Probe		A1 Probe				B5 Probe			
NR.:	HV-Härte	NR.:	HV-Härte	NR.:	HV-Härte	NR.:	HV-Härte	NR.:	HV-Härte
1	355	1	318	31	391	1	334	31	377
2	324	2	319	32	375	2	337	32	384
<b>3</b>	<b>308</b>	3	320	33	383	3	341	33	375
4	311	4	324	34	383	4	336	34	375
5	330	5	325	35	375	5	338	35	380
6	318	6	327	36	369	6	345	36	384
7	330	7	331	37	376	7	338	37	372
8	312	8	326	38	359	8	349	38	373
9	338	9	326	39	361	9	347	39	356

10	348	10	343	40	371	10	350	40	376
<b>11</b>	<b>402</b>	11	338	41	373	11	348	41	368
12	386	12	332	42	373	12	328	42	367
13	357	13	330	43	369	13	344	43	391
14	370	14	347	44	372	14	328	<b>44</b>	<b>392</b>
15	391	15	349	45	382	15	326	45	340
16	392	16	344	<b>46</b>	<b>399</b>	16	316	<b>46</b>	<b>317</b>
17	386	17	344	47	362	<b>17</b>	<b>313</b>	47	313
18	379	18	341	<b>48</b>	<b>316</b>	18	337	48	338
19	360	19	335	49	331	<b>19</b>	<b>391</b>	49	334
<b>20</b>	<b>410</b>	20	337	50	335	20	384	50	338
21	315	21	321	51	326	21	380	51	338
<b>22</b>	<b>299</b>	22	332	52	340	22	388	52	343
		23	328	53	339	23	379	53	344
		24	320	54	343	24	382	54	341
		<b>25</b>	<b>304</b>	55	330	25	373	55	331
		26	364	56	337	26	379	56	337
		<b>27</b>	<b>394</b>	57	335	27	377	57	326
		28	389	58	333	28	373	58	331
		29	388			29	381	59	326
		30	378			30	379	60	333

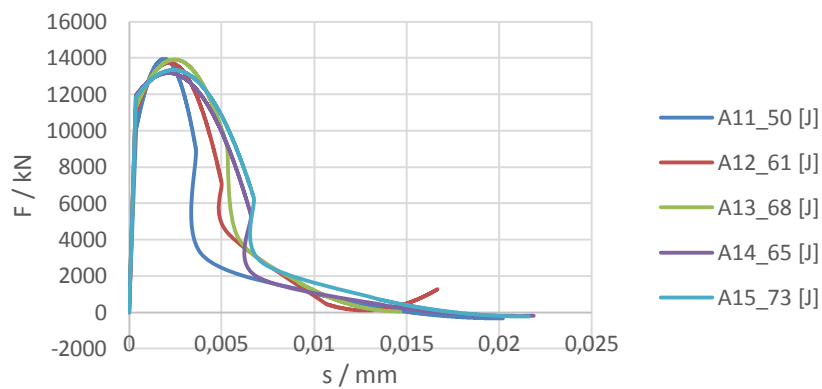
**Grün= Höchstwert, Orange= Tiefstwert**

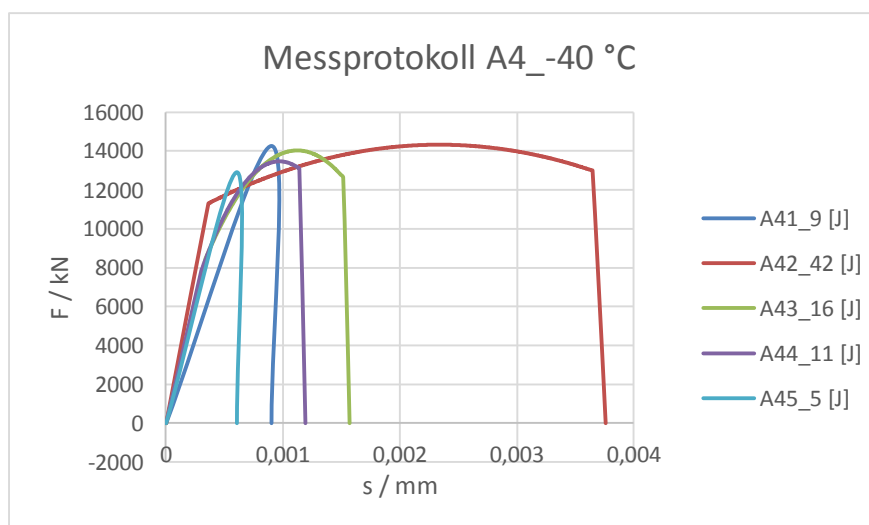
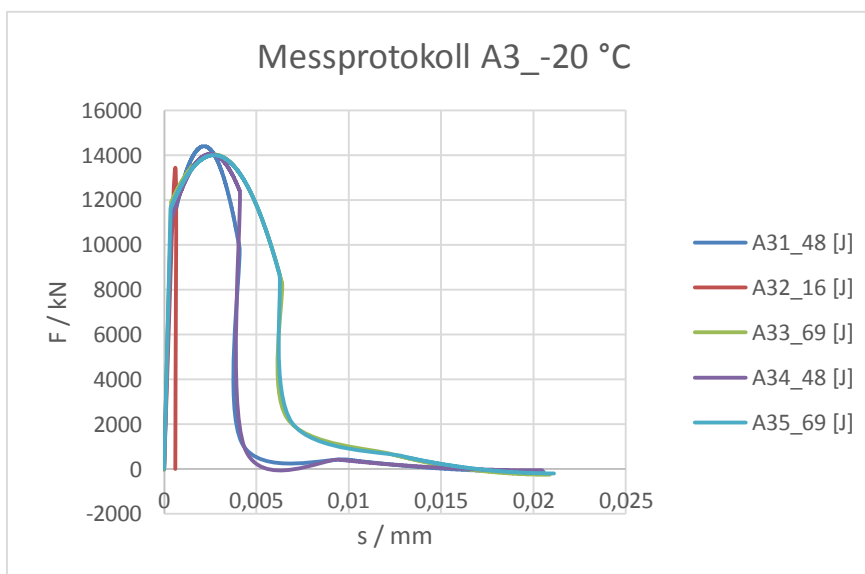
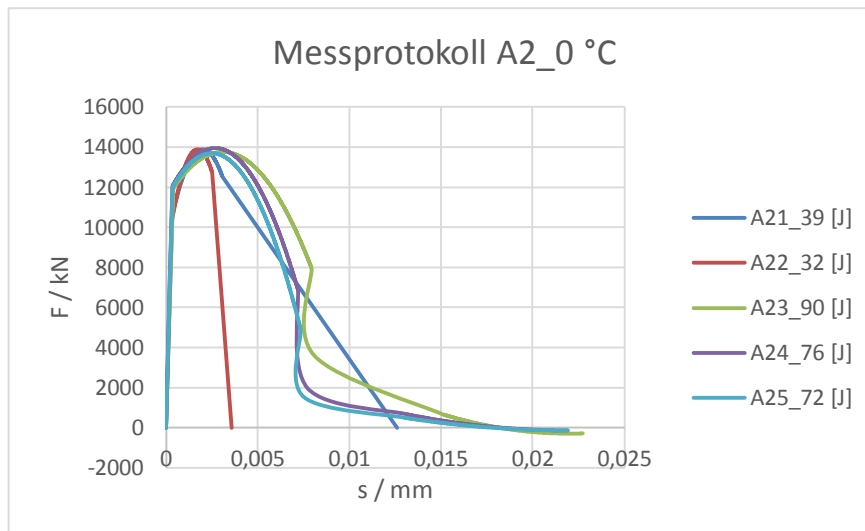
## 9.8 Kerbschlagauswertungen Proben K, A und B

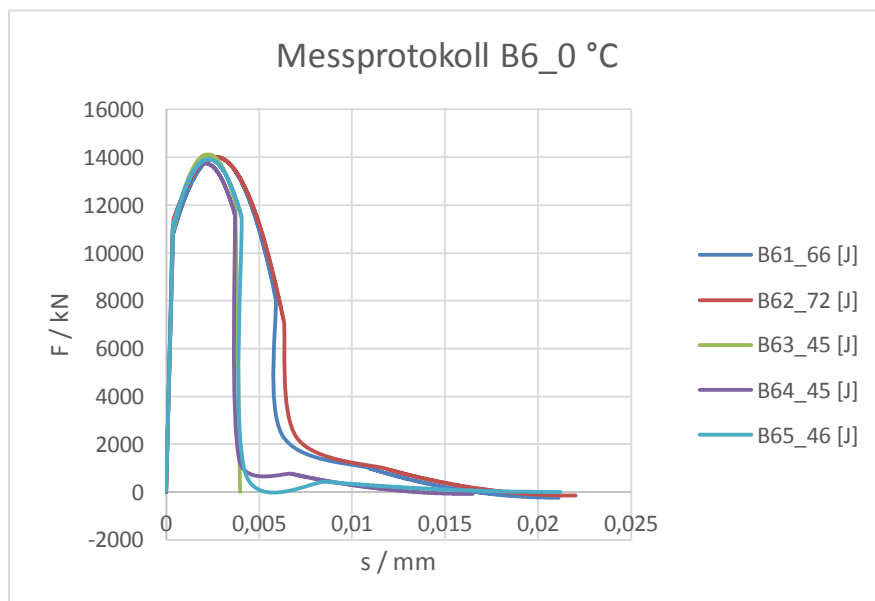
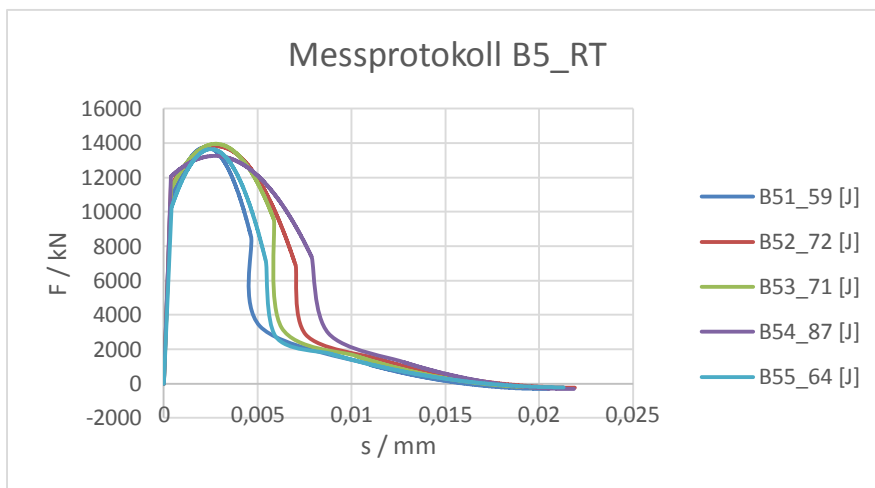
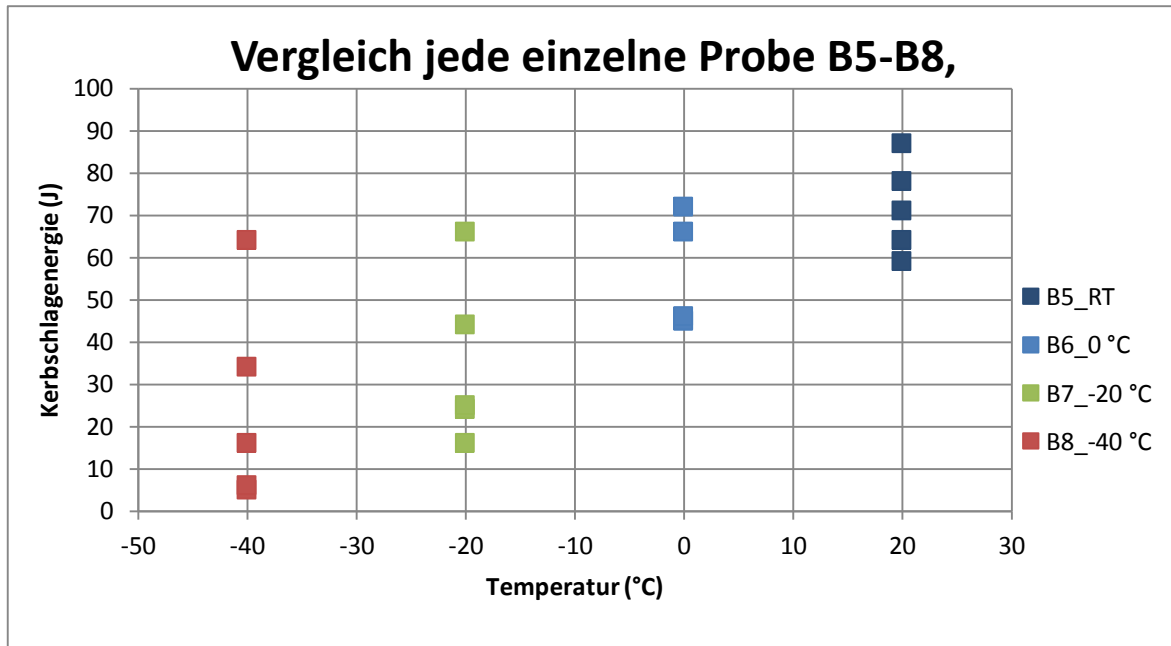
Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Kerbschlagarbeiten pro Temperatur, sowie die instrumentierte Auswertung für jede Temperatur.

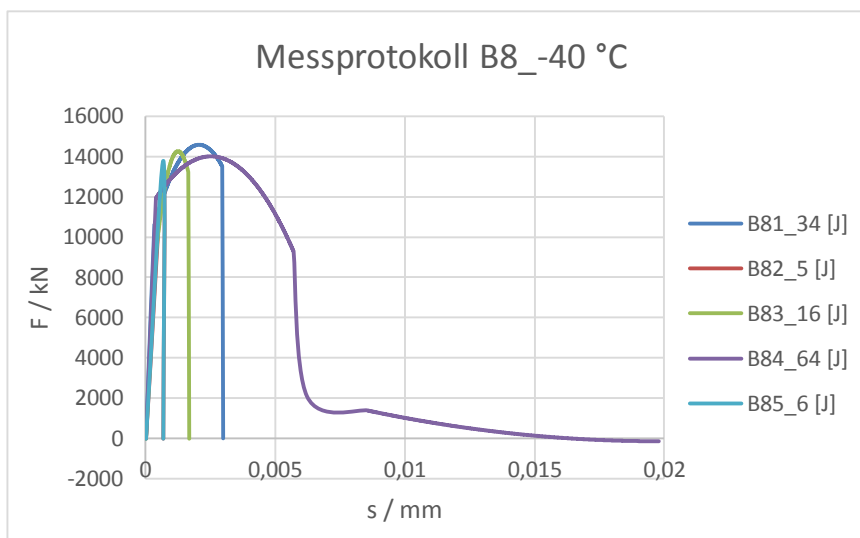
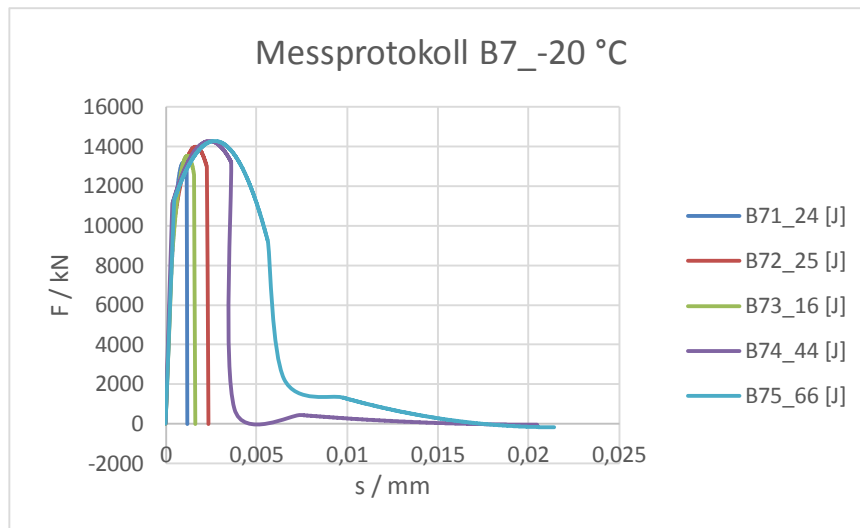


Messprotokoll A1\_RT









### Probenauswertung der restlichen K-Proben

