

Diplomarbeit

# Verbindungsschweißen von Aluminium-Silizium beschichteten Tailored Blanks mit pulverförmigem Schweißzusatz

Verfasser  
Vladimir Boskovic

**Institut für Werkzeugtechnik und spanlose  
Produktion**

Technische Universität Graz  
Vorstand: Univ. Prof. Dr.- Ing. Ralf Kolleck  
Betreuer: Dipl.-Ing. Robert Vollmer

Graz, 12. Februar 2013

## EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

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.

Graz, am .....

.....

(Unterschrift)

Englische Fassung:

## STATUTORY DECLARATION

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 marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

.....

(signature)

## DANKSAGUNG

Die vorliegende Diplomarbeit entstand während meines Studiums an der Technischen Universität Graz. Für die Anregung zu diesem Thema und die tatkräftige Unterstützung möchte ich meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Robert Vollmer herzlich danken.

Mein Dank gilt allen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen des Instituts für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion.

Danke Herrn Prof. Kolleck für die Beurteilung dieser Diplomarbeit.

Schließlich möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die jahrelang meine Ausbildung finanziert hat und mir geholfen hat, meinen Traum zu erfüllen.

Meiner Frau Angelina innigen Dank für die alltägliche Unterstützung und Hilfe während der gesamten Studienzzeit, besonders aber in der Diplomphase.

Besonderer Dank gilt meinem noch ungeborenen Kind welches mein Rückenwind war um mein Studium zu beenden.

Allen Freunden und Bekannten, Danke für ihre moralische Unterstützung!

Herzlichen Dank!

# Kurzfassung

Im Zuge der Diplomarbeit am Institut für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion wurde ein neuartiger Prozess untersucht, bei dem es sich um das Verschweißen von Aluminium-Silizium beschichteten 22MnB5 und HX340 Tailored Welded Blanks (TWB) handelte. Um Bauteile höchster Festigkeit zu erhalten werden TWB aus Bor-Mangan Stählen mittels Presshärten weiterverarbeitet. Die AlSi beschichteten Bleche haben allerdings Nachteile im Fügeprozess. Es kommt zur Anhäufung von Eisen-Aluminium (FeAl) intermetallischen Phasen in der Schweißnaht welche eine Minderung der Festigkeit bedeuten. Der momentane Stand der Technik zum Schweißen solcher Bleche ist, dass die Beschichtung vor dem Fügen mechanisch oder mittels Laserablation entfernt wird. Beim Laserschweißen verzichtet man zurzeit auf jegliche Schweißzusätze. Um das Entfernen der Beschichtung zu umgehen und dadurch Zeit zu sparen sollen nun Schweißzusätze zum Einsatz kommen die auch die Aufgabe haben dem Abfall der Festigkeit entgegenzuwirken. Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit der Untersuchung eines Schweißprozesses von Bor-Mangan Stahl 22MnB5 und HX340 mittels Laser und Schweißzusatz. Dazu wurde eine speziell für das Verfahren notwendige Schweißoptik mit der Möglichkeit geschaffen pulverförmigem Schweißzusatz dem Schmelzbad zuzuführen. Aufgrund der Kinetik des Gas-Pulver-Gemisches soll es in der Schweißzone zu einer homogenen Durchmischung der Legierungselemente kommen. Dadurch soll der Aluminiumgehalt in der Schmelze herabgesetzt werden und übliche Einbußen in der Festigkeit vermieden werden, die durch angereicherte Eisen-Aluminium Phasen entstehen. In dieser Arbeit wurden unterschiedliche Schweißzusätze mit unterschiedlichen Schweißparametern und deren Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Schweißnaht im TWB Verbund untersucht. Der Einsatz von einer Eisenbasislegierung als Schweißzusatz hat gezeigt, dass dadurch die mechanischen Werte ohne vorherigen Entschichtungsprozess verbessert werden können.

# Abstract

In order to efficiently join aluminum-silicon coated 22MnB5 with HX340, a new process has been developed at the Institute Tools & Forming. The production of these so-called 'Tailor Welded Blanks' (TWB) was realized in the course of a diploma thesis.

In order to manufacture components with highest material strengths, TWBs made of boron-manganese steels are further processed and ultimately press hardened. However, such AlSi-coated metal sheets also entail disadvantages regarding the joining processes. An increase of intermetallic FeAl phases can be observed in the welding seam, which causes a reduction of the material strength, as has been proven in the tests performed during this thesis. Due to this fact, the coating has to be removed prior to the welding process in current applications. This is done either mechanically or by laser ablation.

State-of-the-art laser welding techniques currently do not apply filler materials. In order to avoid the removal of the coating and therefore save time, different filler materials have been tested for their capability of preventing the above mentioned diminution of the achieved component strength.

This diploma thesis focuses on the laser welding process that is applied to join boron-manganese sheet metals. Laser processing optics which enables the transport of powdery filler material into the welding pool have been developed for this purpose. Because of the gas-powder kinetics, a homogeneous mixture of all alloying elements is induced. This way, the prevailing reduction of strength, caused by aluminum phases, is deemed to be minimized. Several welding consumables have been applied with varying welding parameters and the effect of these combinations on the mechanical properties of the welding seam at the TWB has been investigated. Welding consumables based on ferrous material have proven to achieve mechanical properties which could otherwise only be produced with prior removal of the sheet coating.

# Abkürzungsverzeichnis

WEZ	Wärmeeinflusszone
EDX	Energiedispersive Röntgenanalyse
REM	Rasterelektronenmikroskop
MBW	Mangan-Bor-Stahl für die Warmumformung
ZTU	Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild
EKD	Eisen-Kohlenstoff-Diagramm
TWB	Tailored Welding Blanks

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Stand der Technik .....	6
2.1	Schweißen.....	6
2.1.1	Einflussgrößen und Wechselwirkungen beim Schweißen .....	7
2.1.2	t 8/5 Konzept – Abkühlzeit .....	10
2.1.3	Kohlenstoffäquivalent .....	11
2.2	Schweißzusätze und Schweißhilfsstoffe.....	12
2.2.1	Schweißzusätze .....	12
2.2.2	Schweißhilfsstoffe – Schutz- und Prozessgase.....	13
2.3	Laserstrahlschweißen .....	15
2.3.1	Laser-Funktionsprinzip .....	15
2.3.2	Laserschweißverfahren .....	19
2.4	Wärmebehandlung.....	21
2.5	Werkstoffe .....	22
2.5.1	Mangan-Bor-Stahl 22MnB5.....	22
2.5.2	HX340 .....	23
3	Ziele der Arbeit.....	24
4	Versuchsdurchführung.....	26
4.1	Werkstoffkombinationen .....	29
4.2	Prozessparameter.....	29
4.3	Anlaufvorgang des Schweißvorganges.....	36
4.4	Presshärten.....	37
4.5	Fertigung der Probe .....	38
5	Auswertungsmethoden und Ergebnisse.....	40
5.1	Schliffproben.....	40
5.1.1	Probenherstellung.....	40
5.1.2	Schweißnahtanalyse.....	40
5.1.3	Ergebnisse .....	41
5.2	Härtemessung.....	50
5.3	REM / EDX Analyse .....	53

5.4	Biegeversuche.....	64
5.4.1	Aufbau- Verfahrensanweise.....	64
5.4.2	Ergebnisse .....	66
5.5	Zugversuche.....	70
6	Ergänzende Untersuchungen durch Abblasen der AlSi Schicht.....	73
6.1	Versuchsaufbau .....	73
6.2	Parameter .....	74
6.3	Probenvorbereitung .....	74
6.4	Auswertung der Ergebnisse.....	75
6.4.1	Schliff.....	75
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	76
	Anhang A: Schliffbilder .....	78
	Anhang B: Biegeversuche .....	84
	Anhang C: Härtemessung .....	92
	Anhang D: Zugversuche.....	100
	Literaturverzeichnis.....	104
	Abbildungverzeichnis .....	108
	Tabellenverzeichnis.....	110
	Zeichnungen .....	111

# 1 Einleitung

Im Zuge der Diplomarbeit am Institut für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion wurde ein neuartiger Prozess untersucht, bei dem es sich um das Verschweißen von Aluminium-Silizium beschichteten 22MnB5 und HX340 Tailored Blanks handelt. Ein Hersteller solcher Bleche ist die Firma ThyssenKrupp Tailored Blanks GmbH, welche auch Projektpartner dieser Arbeit ist.



Abbildung 1.1 Tailored Produkte [1]

Üblicherweise werden Halbzeuge, die später durch Presshärten weiter verarbeitet werden mit einer AlSi Beschichtung versehen, die sowohl Schutz vor Verzunderung während der Austenitisierung bieten, als auch einen passiven Korrosionsschutz darstellen. Des Weiteren wird durch den AlSi Auftrag eine Randentkohlung während der Aufheizzeit im Ofen vermieden. Diese Arbeit setzt sich mit der Verarbeitung von 22MnB5 und HX340 als TWB auseinander. Der Beschichtungsauftrag der Aluminium Silizium Beschichtung beträgt üblicherweise  $150 \text{ g/m}^2$ , daraus resultiert eine Dicke von wenigen Mikrometern. Allerdings hat die AlSi Schicht den Nachteil, dass während des Schweißens Beschichtungselemente in die Schweißnaht gelangen. Diese in der Schweißnaht vorhandenen intermetallischen Fe-Al-

Si-Zonen die durch den Fügeprozess in die Schweißnaht gelangen, senken die Bruchdehnung gegenüber entschlackten Proben signifikant. Die Einbußen in der Härte der Schweißnaht betragen bis zu 50% HV 0,1. Es kommt in Folge der Geometrie der Einlagerungen zudem zu einem Kerbwirkungseffekt unter Zugbelastung in der Schweißnaht.[2]

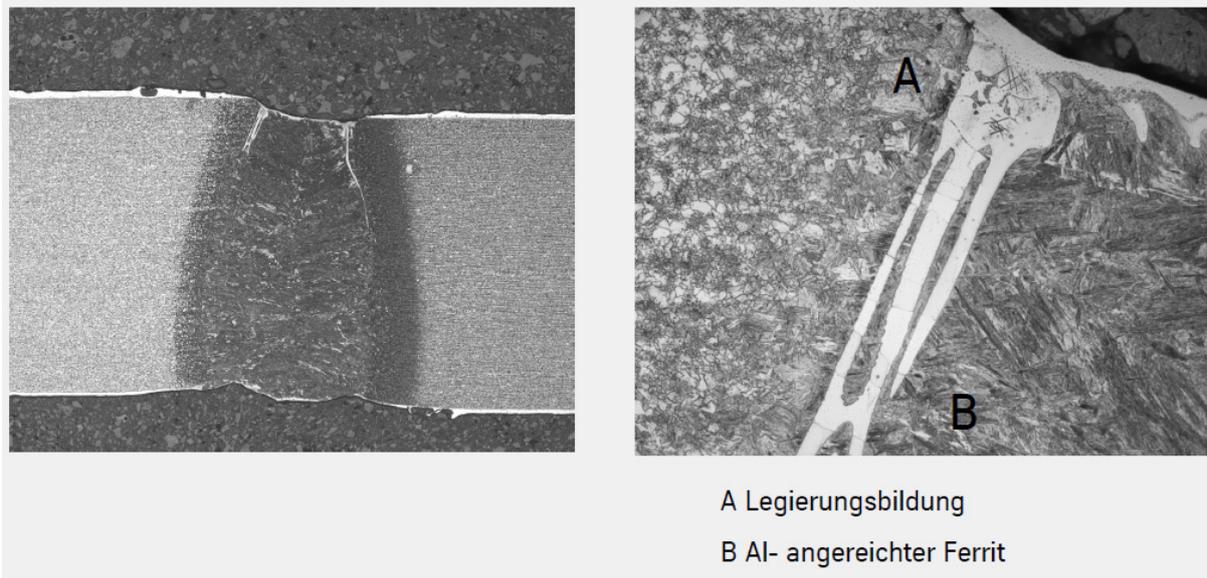


Abbildung 1.2 Schliffbild [3]

Der aktuelle Stand der Technik beim Schweißen solcher Bleche ist, dass vor dem Fügen die Beschichtung mechanisch oder mittels Laserablation entfernt wird. Beim Laserschweißen verzichtet man zurzeit auf jegliche Schweißzusätze. Um das Entfernen der Beschichtung zu umgehen und dadurch Zeit bzw. vorgelagerte Produktionsschritte und damit Kosten zu sparen sollen nun Schweißzusätze zum Einsatz kommen die auch die Aufgabe haben dem Abfall der Festigkeit entgegenzuwirken. Das Schliffbild aus Abbildung 1.2 stammt aus Versuchen der Firma Thyssen Krupp Tailored Blanks GmbH und zeigt ein typisches Bild für das Verhalten der AlSi Bestandteile in der Schweißnaht.

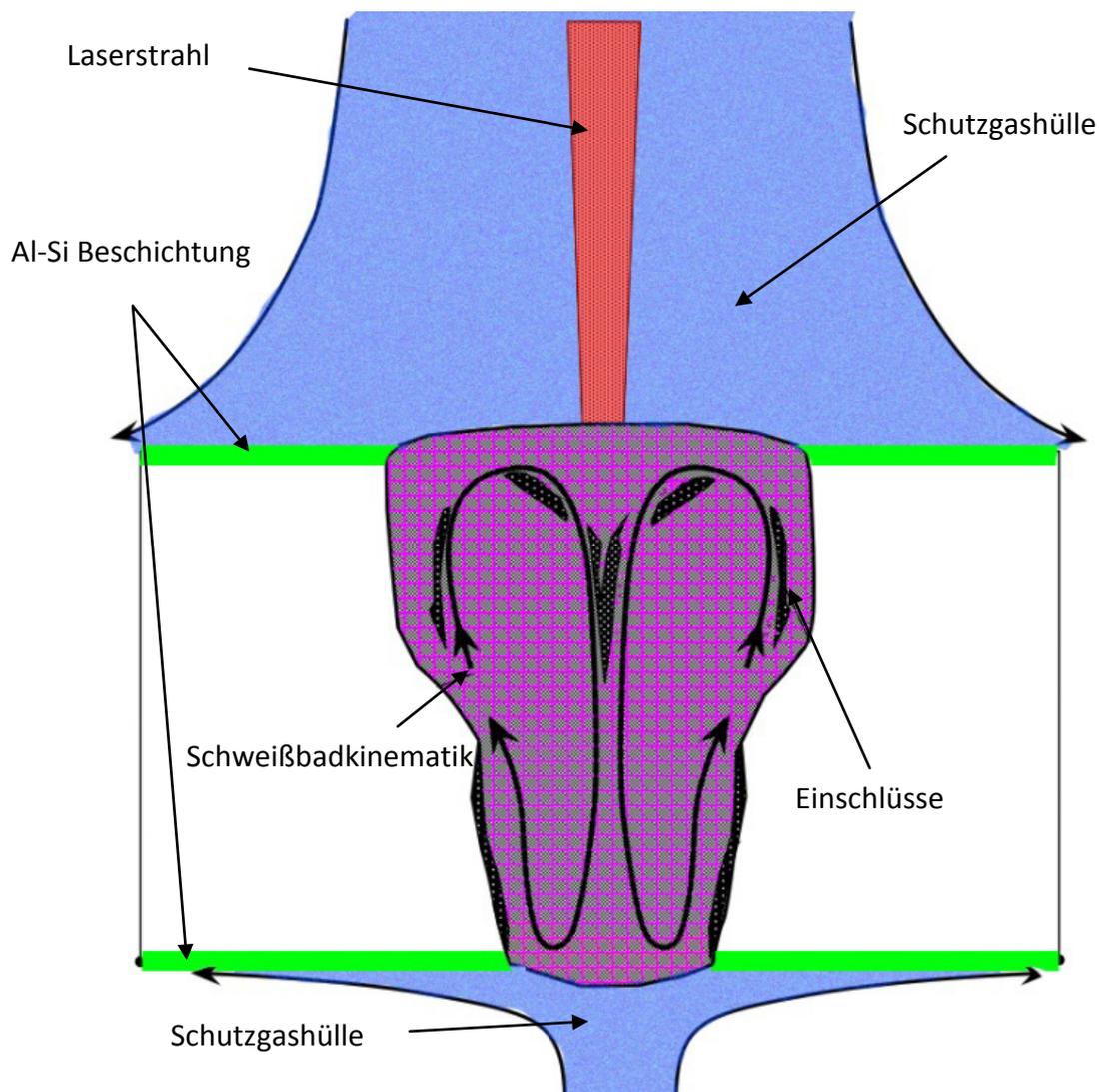


Abbildung 1.3 Zweiseitige Al-Si - beschichtetes Blech während des Schweißvorganges

Das eingesetzte Verfahren arbeitet mit einer Schweißoptik, welche dem Schmelzbad zum einen Schutzgasmischungen aus Argon und Helium, zum anderen auch ein Pulver-Gasgemisch gezielt zuführen kann. Durch das Auftreffen der Pulverpartikel auf das Schmelzbad soll es zu einer guten und homogenen Durchmischung im Schmelzbad kommen und somit die Eigenschaften der Schweißnaht in Bezug auf Festigkeit und Verformbarkeit verbessert werden. Die Kinetik des Gas-Pulverstromes soll gleichzeitig positive Eigenschaften auf die Durchmischung des Schmelzbades aufweisen um lokale Ansammlungen von FeAl-Phasen zu vermeiden.

Um das Problem der Festigkeitsminderung bei herkömmlichen Schweißverfahren zu umgehen, musste die Al-Si-Schicht vor dem Schweißen von den zu verschweißenden Stößen mittels Laserablation entfernt werden. Durch den neuen, in dieser Arbeit untersuchten Schweißprozess, erhofft man sich sowohl eine Arbeits-, als auch eine Kosteneinsparung.

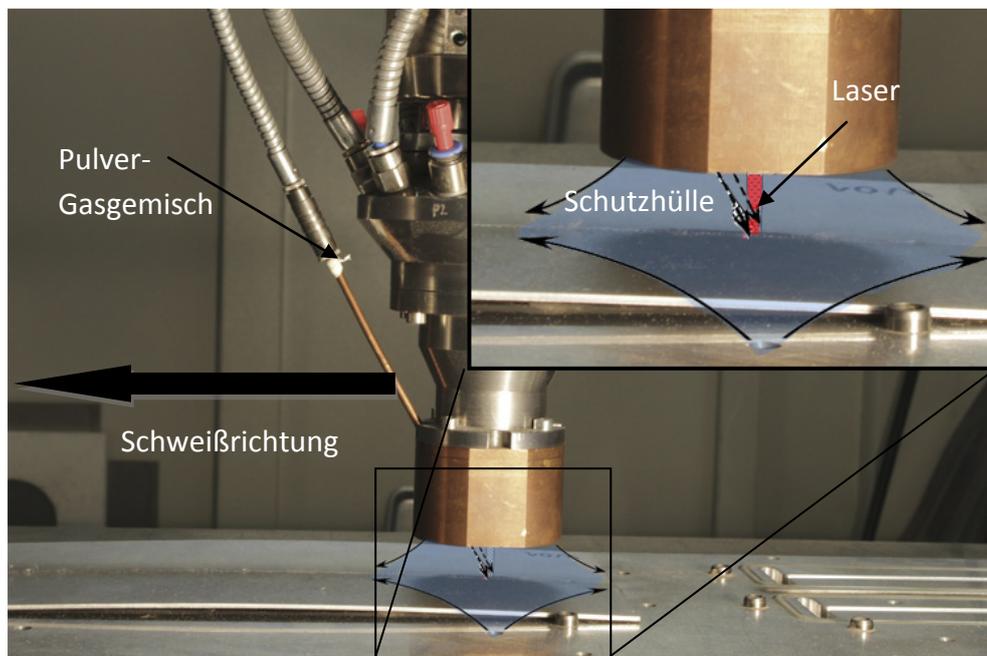


Abbildung 1.4 Schematischer Schweißvorgang

Infolge der Automatisierung von Arbeitsprozessen in der Fertigungsindustrie, wird aufgrund der Wirtschaftlichkeit und Reproduzierbarkeit das Laserschweißen bevorzugt. Der Vorteil des Laserschweißens liegt in der Genauigkeit und der sehr geringeren Wärmeeinflusszone. Es ermöglicht produktive Schweißvorgänge mit schnellen Vorschubgeschwindigkeiten, an Stellen die für andere Schweißverfahren nur schwer zugänglich sind.

Für die Versuche wurde die am Institut vorhandene CO<sub>2</sub>-Laser Station der Firma Trumpf verwendet. Die Laser Station besitzt eine maximale Laserleistung von 3200 Watt, wodurch ein breiter Anwendungsbereich vom Auftragsschweißen bis zum Laserschneiden abdeckt werden kann.



### Technische Daten:

- 5 Achs-Kinematik
  - Linearachsen  
2000 x 1000x750mm<sup>3</sup>
  - rotatorische Achsen  
B  $\pm 45^\circ$ ; C  $\pm 190^\circ$
- Trumpf TLF CO<sub>2</sub>-Laser
- automatische Fokus-Verstellung
- 4 programmierbare Pulverförderer

Abbildung 1.5 Trumpf TrumaForm DMD 505

Die gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit sollen dazu dienen, den Serienprozess zu verbessern und zukünftig den relativ aufwändigen und dadurch teuren Entschichtungsprozess von AlSi beschichteten Blechen zu umgehen.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Schweißen

Gemäß der Normen EN 14610 und DIN 1910-100 versteht man unter Schweißen das unlösbare Verbinden von Bauteilen unter Anwendung von Wärme oder Druck, mit oder ohne Schweißzusatzwerkstoffe. Dem Schweißen kam seit Einführung des Lichtbogenschweißens erhebliche Bedeutung zu. Schweißen stellt heute eine der wirtschaftlichsten Formen zur Verbindung von Bauteilen dar. Andere mechanische Verbindungsmethoden, wie Schrauben oder Nieten, bedeuten einen höheren Fertigungsaufwand und sind durch ungünstigen Kraftfluss (Kerbwirkung) gekennzeichnet und gehen daher zurück. Im Turbinenbau, Apparatebau sowie im Reaktorbau hat man in den letzten Jahren durch moderne Schweißtechniken einen großen Fortschritt erzielt. Eine Einteilung der Schweißverfahren erfolgt entweder nach den zu verschweißenden Werkstoffen oder nach dem Zweck der Schweißung. Abbildung 2.1 zeigt einen Überblick über die verschiedenen Schweißverfahren. [4]

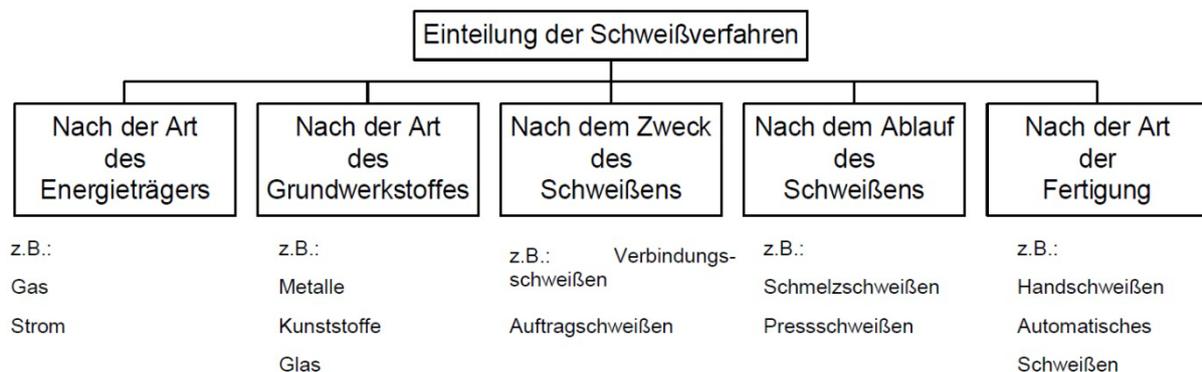


Abbildung 2.1 Einteilung der Schweißverfahren [5]

Als Primärenergieträger kann beim Schweißen sowohl Strom als auch Gas zum Einsatz kommen. Gas wird bevorzugt bei Baustellenschweißungen eingesetzt, da man hier unabhängig von Strom arbeiten kann. Doch aufgrund der Vorteile des Schweißens mit Strom hat das Schweißen mittels Flamme heute nur noch einen geringen Stellenwert und wird nur

noch im Sanitär- und Installationsbereich angewendet. Eine höhere Wirtschaftlichkeit und Qualität erreicht man mit Strom, da man eine höhere Geschwindigkeit und eine höhere Schweißleistung erzielen kann. Strom als Primärenergie eignet sich daher besonders für Schweißprozess mit hohen Stückzahlen. Als schweißbare Werkstoffe eignen sich neben den Metallen auch Kunststoffe (Thermoplaste) und spröde Werkstoffe wie Glas. Wird nach dem Zweck des Schweißens unterschieden, unterscheidet man zwischen Verbindungsschweißen und Auftragsschweißen. Beim Verbindungsschweißen besitzt das Schweißgut nahezu die gleichen Eigenschaften wie der Grundwerkstoff, beim Auftragsschweißen hat das das Schweißgut meistens andere Eigenschaften als der Grundwerkstoff, wie zum Beispiel höhere Verschleißfestigkeit. Bei der Einteilung der Schweißverfahren unterscheidet man zwischen Pressschweißen und Schmelzschiweißen, wobei sich die Schmelzbäder der beiden Schweißverfahren in ihrer Konsistenz voneinander unterscheiden. Während beim Schmelzschiweißen das Schmelzbad den flüssigen Aggregatzustand vollständig erreicht, ist beim Pressschweißen das Schmelzbad breiig. Schweißungen können manuell oder auch automatisiert durchgeführt werden. Beim manuellen Schweißen liegt der Vorteil in der Flexibilität, wobei beim automatisierten Schweißen eine hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit gewährleistet ist und der hohe Durchsatz einen wesentlichen Vorteil darstellt.

### **2.1.1 Einflussgrößen und Wechselwirkungen beim Schweißen**

Durch eine Wärmequelle wird der Grundwerkstoff über den Schmelzpunkt hinaus erwärmt und erreicht dabei die schmelzflüssige Phase. Der Temperaturabfall im Grundwerkstoff erfolgt exponentiell mit größer werdendem Abstand. Abhängig von der Leistungsdichte der Wärmequelle und der Schweißgeschwindigkeit sowie der physikalischen Eigenschaften des Werkstoffes kommt es zur Temperatureaufnahme des benachbarten Grundwerkstoffes. Das von der Temperatur beeinflusste Gebiet rund um die Schweißnaht, wie in Abbildung 2.6 gezeigt, wird Wärmeeinflusszone (WEZ) genannt und ist in verschiedene Bereiche zu gliedern. Eine Überhitzung im Grundwerkstoff direkt neben der Schweißnaht führt zur Bildung eines groben Kornes. Es kommt in diesem Bereich zu einer Steigerung der Härte und Festigkeit was eine Minderung der Zähigkeit zufolge hat. Diese Grobkornbildung kann zum Beispiel durch stabile Ausscheidungen wie Nb(C,N) in der Wärmeeinflusszone verzögert werden. Im Bereich der Sättigungslinie (A3-Linie) kommt es zur Bildung von Feinkorn. Es entsteht dabei ein ferritisch-perlitisches Gefüge welches verformungsfähig ist. Unterhalb der A3-Linie und oberhalb der A1-Linie kommt es zum Perlitfall, die sogenannte Perlit-Zerfallszone. Hier liegen dieselben Festigkeiten wie im Bereich des Grundwerkstoffes vor. Diese weisen ein Gefüge aus körnigem Zementit auf. Je nach Schweißverfahren und Schweißparameter sind die Form der Schweißnaht und die WEZ unterschiedlich groß ausgeprägt.

Durch die hohen Leistungsdichten sind entsprechende Schweißgeschwindigkeiten möglich. Gleichzeitig ist die Zone der Energieeinbringung sehr klein und dadurch entsteht relativ wenig Verzug.

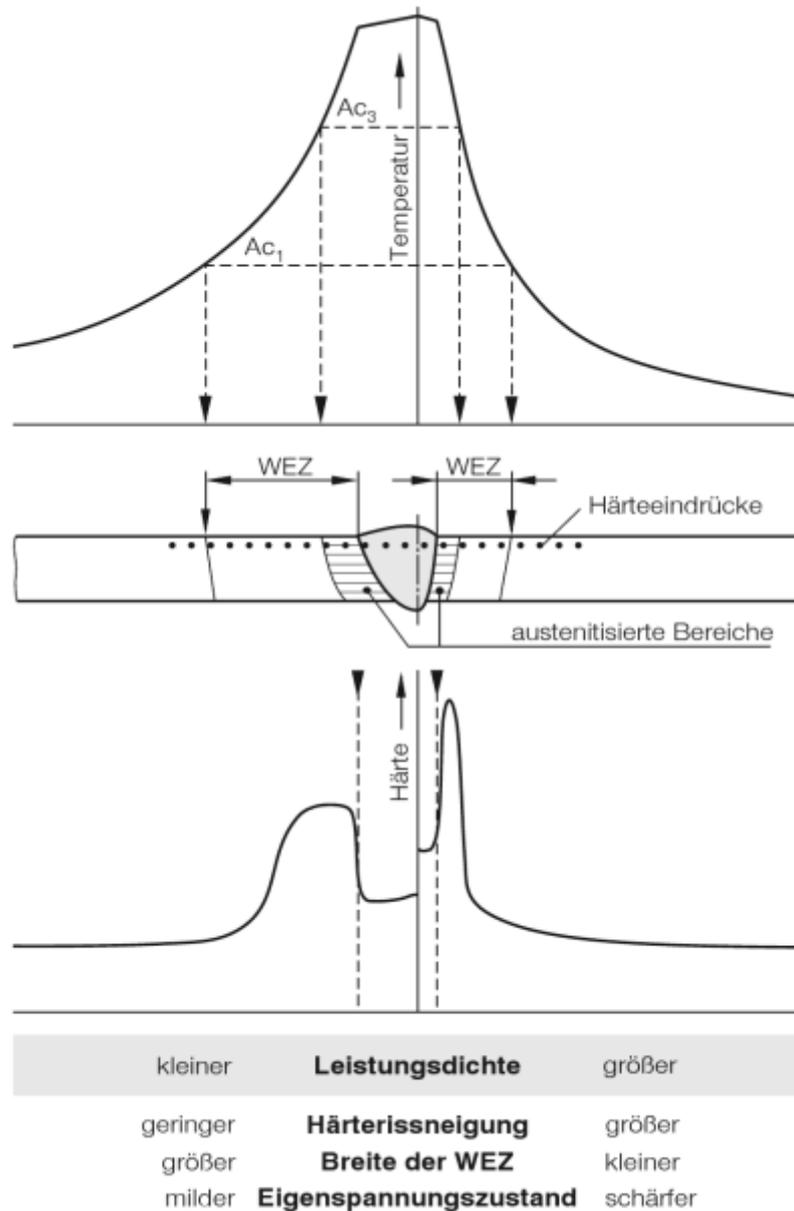


Abbildung 2.2 Wirkung von Schweißverfahren bei unterschiedlicher Leistungsdichte [6]



### 2.1.2 $t_{8/5}$ Konzept – Abkühlzeit

Der Begriff  $t_{8/5}$  beschreibt jene Zeitspanne, die die Schweißnaht sowie die Wärmeeinflusszone benötigen um den Temperaturbereich zwischen 800°C und 500°C zu durchlaufen. Gemeinsam mit dem ZTU-Schaubild ist es möglich die richtigen Schweißbedingungen zu wählen um eine gefordertes Gefüge zu erreichen. In diesem Zeitintervall laufen die wichtigsten Gefügeumwandlungen im Stahl ab. Wenn die Zeitspanne sehr kurz ist, können Gefüge aus Ferrit, Perlit, Zwischenstufengefüge und Martensit entstehen. Zudem besteht die Gefahr der Grobkornbildung, was eine Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften hat. Wenn die Zeitspanne sehr lang ist, kann aus dem Austenit nur Ferrit und Perlit entstehen, was die Härtewerte negativ beeinflusst.

Während des Schweißens der Blechplatten mit verhältnismäßig geringer Dicke entsteht eine zweidimensionale Wärmeableitung. Die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  berechnet sich nach folgender Gleichung [9]:

Näherungsweise für Stahlwerkstoffe und zweidimensionale Wärmeableitung gilt:

$$t_{8/5} = (4300 - 4,3 * T_0) * 105 * \frac{Q^2}{d^2} * 2 * \left[ \left( \frac{1}{500 - T_0} \right) - \left( \frac{1}{800 - T_0} \right) \right] * F_2$$

Q: Wärmeeinbringen

$T_0$ : Vorwärmtemperatur

d: Blechdicke

$F_2$ : Nahtfaktor bei zweidimensionaler Wärmeableitung

$$\text{Streckenenergie} = \frac{\text{Schweißleistung}}{\text{Schweißgeschwindigkeit}}$$

Die Streckenergie ist somit ein Maß für die entlang der Schweißnaht pro Längeneinheit eingebrachte Energie. Daher wird sich das aufgeschmolzene Nahtvolumen direkt in dem niederschlagen. Beim Laser-, Plasma-, Elektronenstrahlschweißen ist die Streckenergie im Vergleich zu MIG-, MAG-, Lichtbogen- Schweißen sehr gering. [10]

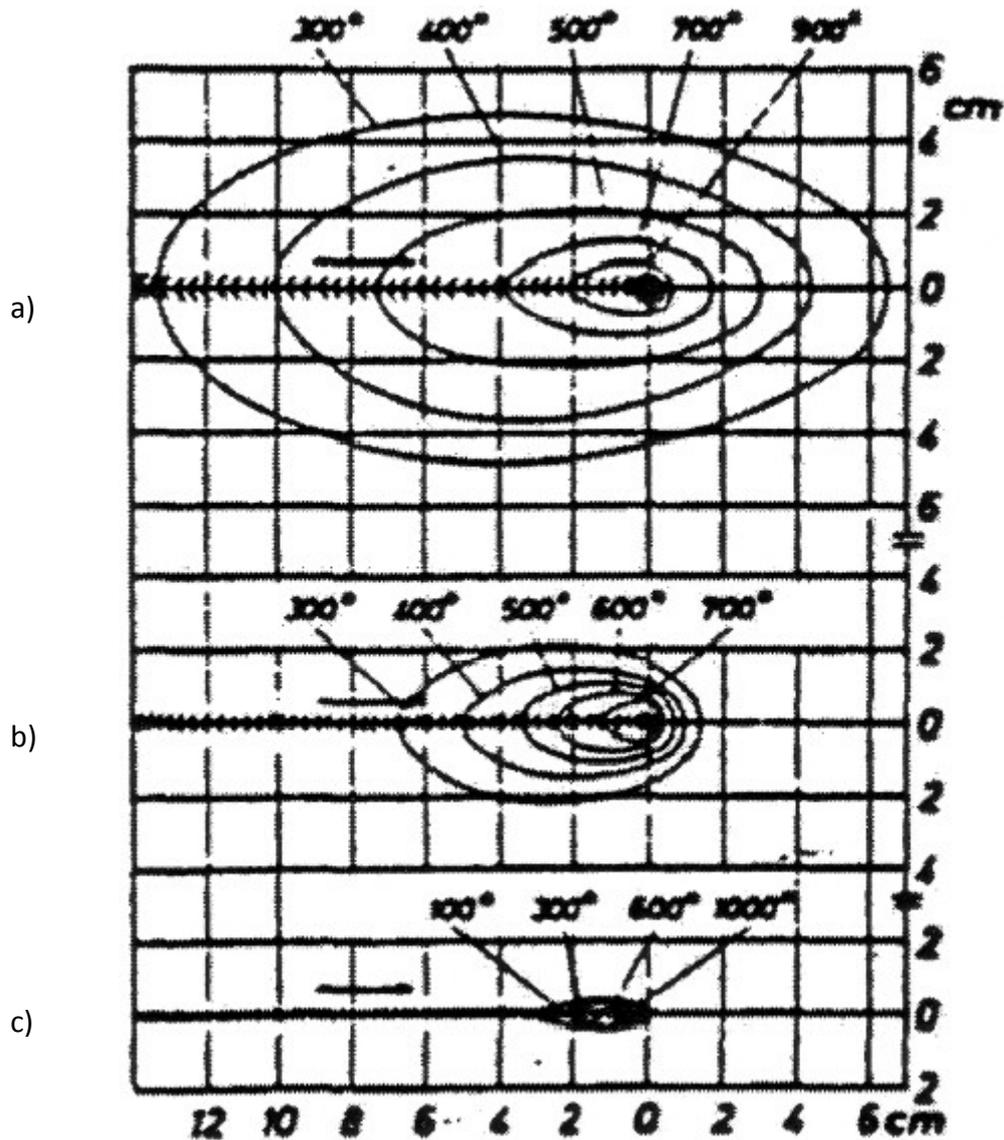


Abbildung 2.5 Wärmeverteilung bei unterschiedlichen Schweißverfahren [11]  
a)Gasschmelzschweißen b)Lichtbogenschweißen c)Elektronenstrahlsschweißen

### 2.1.3 Kohlenstoffäquivalent

Werkstückdicke, Wärmeintensität, Vorwärmtemperatur sowie die chemische Zusammensetzung des Grundwerkstoffes bestimmen den Gefügestand in der Wärmeeinflusszone. Mit Hilfe des Kohlenstoffäquivalents kann die Neigung zur Kaltrissbildung unterhalb von 250°C abgeschätzt werden. Das Kohlenstoffäquivalent ist maßgeblich von der chemischen Zusammensetzung des Werkstoffes abhängig. Die Berechnung des Kohlenstoffäquivalents erfolgt aus dem Kohlenstoffgehalt und der Menge an Begleit- und Legierungselemente. Je niedriger der Wert des Kohlenstoffäquivalents ist, umso besser ist der Stahl zum Schweißen geeignet.

Formel zur Beurteilung der Kaltrissneigung:

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}$$

Auch zur Härtungseignung eines Werkstoffes kann das Kohlenstoffäquivalent herangezogen werden. [8]

Des Weiteren wird die Kaltrissbildung durch die Einlagerung von Wasserstoffatomen im Gefüge beeinflusst, welche zur Härtesteigerung in der WEZ führt und die Duktilität der Schweißnaht signifikant herabsetzt. Dieser Effekt wird auch Wasserstoffversprödung genannt. Durch Benutzung von Schutzgas wird die Wasserstoffversprödung vermieden.

## 2.2 Schweißzusätze und Schweißhilfsstoffe

### 2.2.1 Schweißzusätze

Im Fall von Verbindungsschweißen bilden Schweißzusätze den Zusatzwerkstoff in der Schweißnaht; beim Auftragsschweißen bildet diesen die Beschichtung. Der Einsatz von zusätzlichen Schweißzusätzen hängt vom Grundwerkstoff, dem Schweißverfahren und Fertigungsbedingungen ab. Die geforderte Festigkeit kann bei unlegierten Stählen und Gusseisenwerkstoffen durch Zusatzwerkstoffe erreicht werden, die vom Grundwerkstoff abweichen. [12]

Wirkung einzelner Legierungselemente:

*Silizium* wirkt ab einer Konzentration von 0,65% als störend bei Schmelzschweißverfahren, da aufgrund des Siliziumoxids ein zähflüssiges Schmelzbad entsteht. Daher können sich leichter Risse und Poren bilden. Ein hoher Siliziumgehalt kann durch Erhöhung des Mangangehaltes kompensiert werden, da sich dünnflüssige Mangansilikate bilden. Das Schweißverhalten nimmt mit geringerem Siliziumgehalt deutlich zu, da es beim Erstarren nicht zur Lunkerbildung kommt. [13]

Durch eine geringe Zugabe von *Aluminium* (0,02%) werden die Zähigkeit sowie das Verformungsverhalten verbessert, das Sprödbbruchverhalten nimmt dadurch ab. Auch die Neigung zur Seigerung nimmt mit Zugabe durch Aluminium stark ab. [13]

*Mangan* wirkt sich bei Zugabe durch eine Erhöhung der Festigkeit aus und verringert die kritische Abkühlgeschwindigkeit. Der Gehalt an Mangan und C ist genau abzustimmen, damit es nicht zum Anstieg der Härte in der WEZ neben der Schweißnaht kommt. [13]

Der Anstieg des *Nickelgehaltes* um 1% erhöht die Festigkeit um 40 N/mm<sup>2</sup>. Dieser Anstieg der Festigkeit wirkt sich gering auf die Dehnung aus, welche nur wenig abnimmt. Durch die

kornverfeinernde Wirkung von Nickel wird die Zähigkeit gesteigert und die Streckgrenze nimmt zu. [13]

Das Austenitgebiet wird durch den Anstieg des *Chrom*gehaltes eingengt. Die kritische Abkühlgeschwindigkeit nimmt stark ab, womit eine Wasserhärtung nicht mehr zulässig wird. Die Gefahr einer Rissbildung steigt hier mit dem Chromgehalt. [13]

*Molybdän* erhöht die Zugfestigkeit und vermindert die Anlasssprödigkeit des Werkstoffes. [13]

## 2.2.2 Schweißhilfsstoffe – Schutz- und Prozessgase

Unter Schutzgas- und Prozessgas versteht man Gase deren Aufgabe es ist das Schmelzbad, den Lichtbogen sowie die Schweißzusätze von der Atmosphäre zu schützen. Das Schutzgas wird in der Regel von außen zugeführt. Außerdem kühlt das Schutzgas den Schweißkopf und das Schweißbad. [5]

Aus der Düse des Lasers gelangt das Prozessgas auf die Bearbeitungsstelle. Beim Arbeitsprozess eines Laserschneiders dient das Arbeitsgas auch dazu, den abgetragenen Werkstoff aus der Schnittfuge zu entfernen.

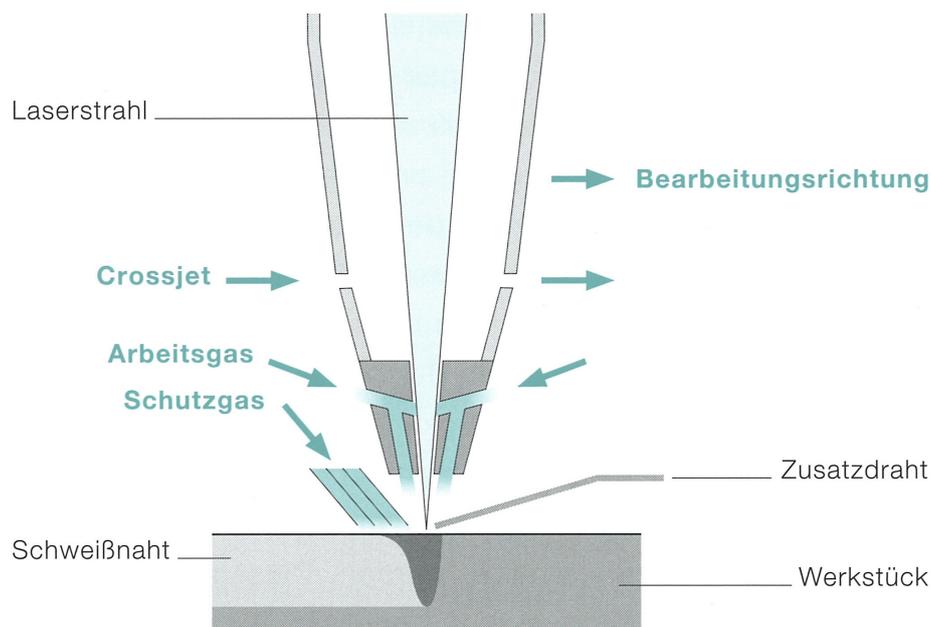


Abbildung 2.6 Schutz- und Prozessgase in Verwendung (CO<sub>2</sub> – Laser) [14]

Die richtige Wahl des Schutzgases hat auch Einfluss auf die Charakteristik der Schweißnaht und beeinflusst auch die Qualität der Naht. Dabei werden folgende Eigenschaften verändert:

- Einbrandtiefe
- Einbrandform
- Nahtbreite
- Benetzungsverhalten
- Werkstoffübergang

Die von Umwelteinflüssen abschirmende Wirkung des [Anm.: hier sollte irgendeine Eigenschaft des Gases beschrieben werden, die IN KOMBINATION mit der zweiten Eigenschaft, der Wärmeleitfähigkeit, die Schweißnahtform beeinflusst. Sonst ist der Satz unklar.] Schutzgas in Kombination mit der Wärmeleitfähigkeit des Gases haben Einfluss auf die geometrische Form der Schweißnaht. Liegt eine hohe Wärmeleitfähigkeit vor, wird nur ein schmaler Lichtbogenkern mit hoher Stromdichte zugelassen, da mehr Wärme in den Randzonen abgeführt wird. Ist die Wärmeleitfähigkeit gering, dreht sich dieser Effekt um. [15]

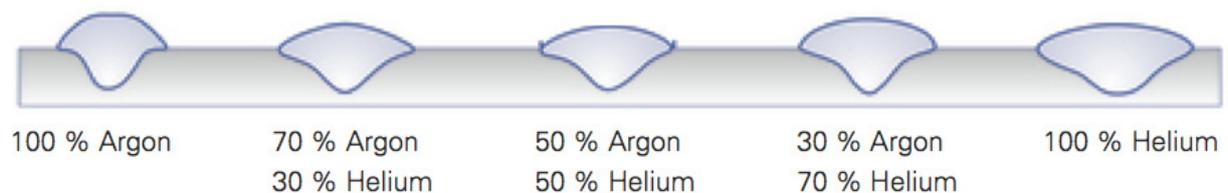


Abbildung 2.7 Einfluss von Argon und Helium auf die Schweißnahtgeometrie [16]

### Argon

Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit von Argon kommt es an der Randzone zu flachen Einbränden und in der Mitte zu tiefen. Wird die Durchflussmenge des Schutzgases erhöht so verändert sich die Naht so das an der Unterseite die Nahtbreite abnimmt und eine nagelkopfförmige Schweißnaht entsteht.

### Helium

Die Wärmeleitfähigkeit von Helium ist höher als die von Argon, was zu einer gleichmäßigeren Einbrandtiefe führt. Um die Vorteile beider Gase zu erhalten können die beiden Schutzgase auch kombiniert verwendet werden. [5]

## 2.3 Laserstrahlschweißen

Die Energie eines kohärent, monochromatisch gebündelten Lichtstrahles wandelt sich beim Auftreffen bzw. Eindringen in den Werkstoff in Wärmeenergie um. Das Laserstrahlschweißen erfolgt mit einer relativ hohen Energiedichte und wird vor allem dort eingesetzt, wo eine hohe Schweißgeschwindigkeit und eine schmale und schlanke Schweißnahtform benötigt werden. Die beiden zu verschweißenden Werkstücke befinden sich dabei im Fokus des Laserstrahls. Die Lage des Fokus hat einen erheblichen Einfluss auf die Energiedichte des Laserstrahles und ist daher auch ein wichtiger Schweißparameter.

### 2.3.1 Laser-Funktionsprinzip

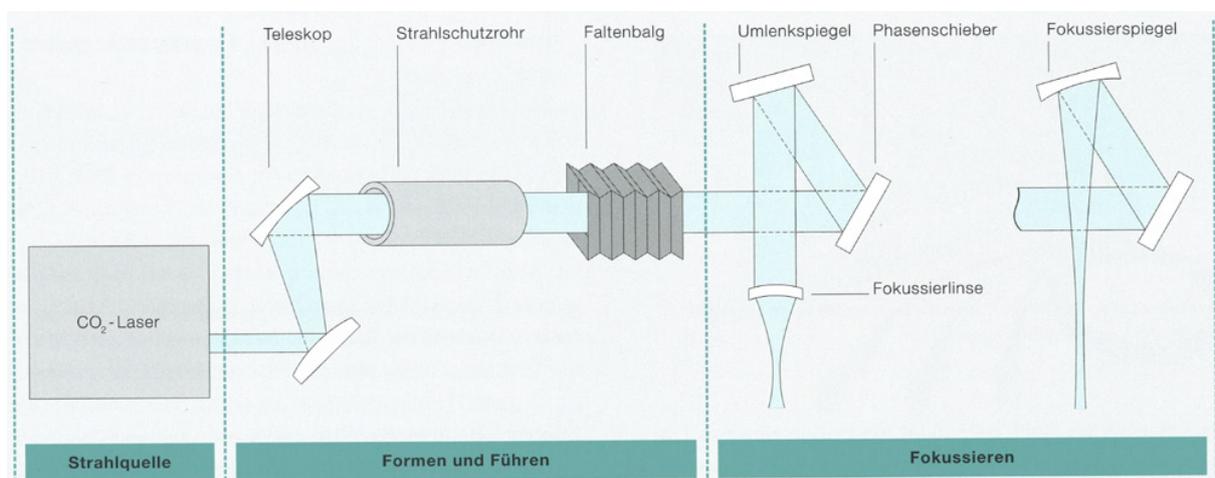


Abbildung 2.8 CO<sub>2</sub> Laser [14]

Die Atome des CO<sub>2</sub>-Gases werden durch Absorption elektromagnetischer Strahlung angeregt und gehen dabei in ein erhöhtes Energieniveau über. Fallen die Atome oder Ionen in den Grundzustand zurück wird energiereiches kohärentes Licht ausgesendet. Während die Laseranlage in Betrieb genommen wird, fließt Strom (bestehend aus freien Elektronen) von der Anode zur Katode. Im Inneren des Resonators kollidieren dann diese freien Elektronen mit den Atomen des Lasergases und bringen diese in einen angeregten Zustand. Das Atom absorbiert dann schließlich die Bewegungsenergie des freien Elektrons. Damit wird das Atom in eine höhere energetische Lage gebracht. Demzufolge befindet sich das angeregte Atom in einem metastabilen Zustand und strebt danach in seinen energetischen „Grundzustand“ zurück zu fallen. Das Ende des Gesamtprozesses, also wenn das Atom in den Grundzustand zurückgefallen ist, nennt man von spontane Emission, bei dieser wird ein Photon abgegeben. Man spricht von einem metastabilen Zustand, wenn diese nicht sofort, sondern erst später durch Übertragung eines Teilchens in den Grundzustand übergeht. Durch den Stoß eines Photons bzw. durch ein angeregtes CO<sub>2</sub>-Atom lässt sich der Rückfall in eine tiefere Lage stimulieren. Hier wird vom Atom ebenfalls ein Photon ausgesendet, das dieselbe

Ausbreitungsrichtung und dieselbe Frequenz hat. Dabei entstehen stimulierte Emissionen die durch das Photon dupliziert werden. Das Glasrohr absorbiert schließlich, die Photonen die sich in der Längsrichtung des Resonators bewegen. Die Funktion des Resonators ist die Erzeugung und optische Verstärkung großer Mengen identischer Photonen. Um dies zu ermöglichen, muss ein teildurchlässiger Spiegel, auf der Seite des Resonators existieren. Durch den gesamten Prozess der Entladung des Gases wird viel Wärme ausgestrahlt und da sich das Lasergas aufgrund der geringen Masse sehr schnell erwärmt, sollte das Lasergas gekühlt werden.

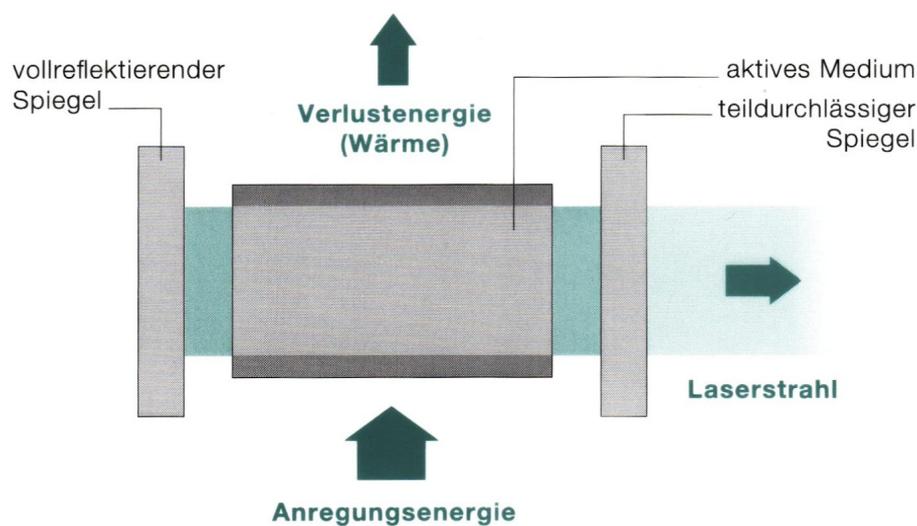


Abbildung 2.9 Laser – Funktionsprinzip [14]

Bei CO<sub>2</sub> Laser bilden Kohlendioxid, Stickstoff und Helium ein Gasgemisch-Lasermedium das Licht emittiert und das seinen Weg von der Laserquelle bis zur Absorption als freier Strahl zurücklegt. Der Laserstrahl wird durch Strahlschutzrohre, Faltbälge und Spiegel geleitet, die den Strahl formen und lenken. [14]

Für CO<sub>2</sub> mit einer hohen Laserleistung werden meist Metallspiegel eingesetzt, da diese nicht thermisch zerstört werden können und unempfindlich gegen Verschmutzung sind. Zinkselenid-Linsen stoßen bei höheren Leistungen des Lasers an ihre Grenzen. Konkave oder konvexe Spiegelflächen formen den Strahl und können ihn dann nach Bedarf aufweiten oder fokussieren. Die meisten Spiegeloptiken die zum Schweißen verwendet werden bestehen aus zwei Spiegeln die versetzt angeordnet sind. Der erste Spiegel ist ein ebener Spiegel der den Strahl auf den richtigen Winkel zum zweiten Spiegel, dem Fokussierspiegel bringt. Die Spiegel sind aus Kupfer und zudem noch hochreflektierend beschichtet. Dennoch werden ca. 0,6 bis 2 Prozent der Laserleistung vom Spiegel absorbiert. Eine Verformung der Spiegel

durch zu hohe Wärmeeinwirkung muss durch Kühlung, in der Regel durch Wasserkühlung, verhindert werden. Eine präzise Ausrichtung der Spiegel ist notwendig um eine exakte Fokussierung des Laserstrahls zu bekommen. Ein Gasstrom, der sogenannte Crossjet, verhindert, dass während der Bearbeitung des zu verscheidenden Materials Spritzer auf den Spiegel treffen.

Zur Fokussierung des austretenden Laserstrahls werden Linsen oder Spiegel eingesetzt. Je nach Zusammenstellung bestimmen sie das Abbildungsverhältnis und somit die Intensität der Laserstrahlung im Brennfleck. [15]

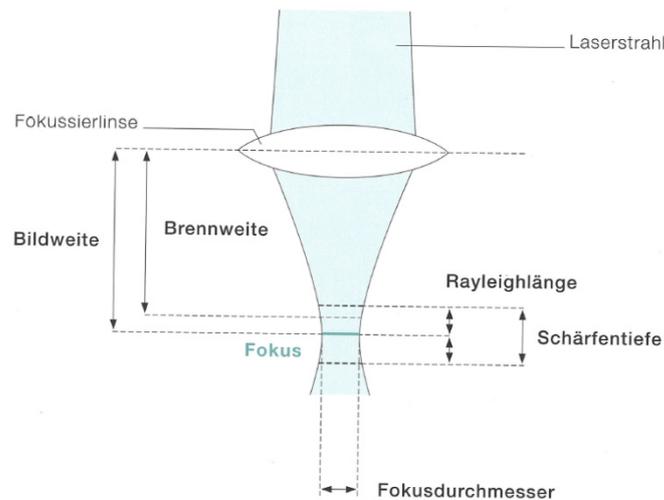


Abbildung 2.10 Prinzip des Fokussierens mit den wichtigsten Kenngrößen [14]

*Fokusdurchmesser* - Die Leistungsdichte, also die Leistung pro Flächeneinheit, wird im Fokus dadurch erhöht, indem man den Fokusdurchmesser verkleinert.

*Rayleighlänge* - Durch die Rayleighlänge wird angegeben, mit welchem Abstand sich der Strahl nach dem Fokus ausweitet und in welchem Abstand die Strahlquerschnittsfläche verdoppelt wird. Häufig wird die doppelte Rayleighlänge als Schärfentiefe bezeichnet.

*Bildweite* - Den Abstand zwischen dem Fokus und der Mitte der Linse, entspricht näherungsweise der Brennweite und wird als Bildweite bezeichnet.

*Brennweite* – Der Strahl wird stärker bei einer kleineren Brennweite fokussiert bzw. je kleiner der Fokusbereich, die Rayleighlänge und die Bildweite ist.

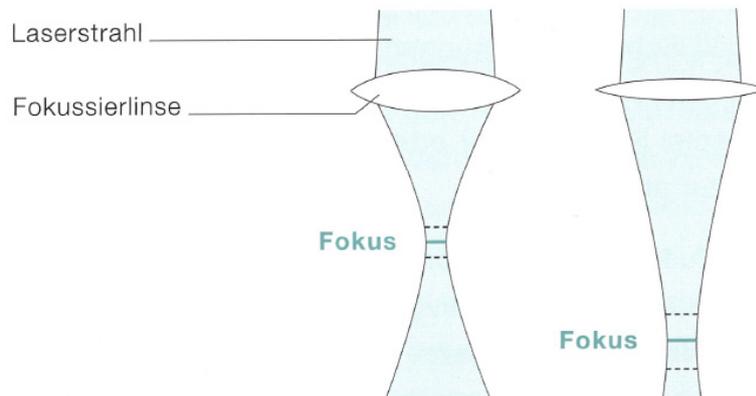


Abbildung 2.11 Fokussierlinse und Brennweite [14]

Trifft der Laserstrahl auf das Werkstück auf, wird die absorbierte Leistung in Wärme umgewandelt. Da dabei entstehende hohe Temperatur am Werkstück wird zum Verschweißen zweier Bauteil genutzt. [5]

Das Ergebnis eines Laserschweißprozesses hängt stark von der pro Zeiteinheit absorbierten Strahlungsenergie ab. Die durch Absorption eingekoppelte Leistung ist geringer als die Leistung, die auf das Werkstück auftrifft. Das Verhältnis zwischen der absorbierten Leistung ( $P_{abs}$ ) und der eintreffenden Leistung ( $P$ ) wird Absorptionsgrad ( $A$ ) bezeichnet.

$$A = \frac{P_{abs}}{P}$$

Die Absorption steigt mit der Temperatur, Eine zu hohe Temperatur kann jedoch eine irreversible Änderung der Reflexionseigenschaften hervorrufen die zum Beispiel durch Oxidationsschichten entstehen. Die Absorption ist auch von der Oberflächenbeschaffenheit und -topografie abhängig. Bei einer glatten Oberfläche sinkt die Absorption und nimmt bei Erwärmung bis zum Schmelzpunkt den Wert einer idealen Oberfläche an. [17]

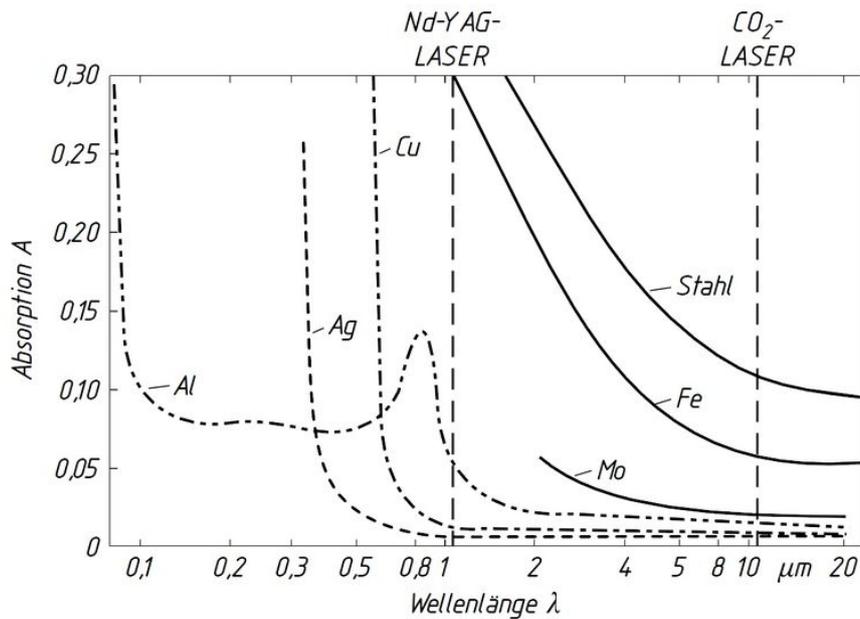


Abbildung 2.12 Absorptionskurven verschiedener Werkstoffe [18]

### 2.3.2 Laserschweißverfahren

Der Unterschied zwischen dem Wärmeleitungs- und Tiefschweißen besteht darin, dass durch den Laserstrahl bei der Wärmeleitungsschweißung der Werkstoff nur bis zu einer Tiefe von 0,5 mm aufgeschmolzen wird. Die Laserleistung genügt um den Werkstoff aufzuschmelzen, ist jedoch nicht stark genug um den Werkstoff zu verdampfen. Damit dieser Effekt auftritt muss abhängig von Werkstoff- und Lasereigenschaften die richtige Intensität des Laserstrahls gewählt werden, die unterhalb der Grenzintensität  $I_c$  sein muss. Wärmeleitung beeinflusst die Schweißnahttiefe sowie die Geometrie des Schmelzbades. Dieses Verfahren kommt vor allem bei Folien- und Dünnschichten zur Anwendung, bei denen sehr hohe Schweißgeschwindigkeiten auftreten. Der Verzug des Bauteils ist eher gering, da nur wenig Energie in den Bauteil eingebracht wird.

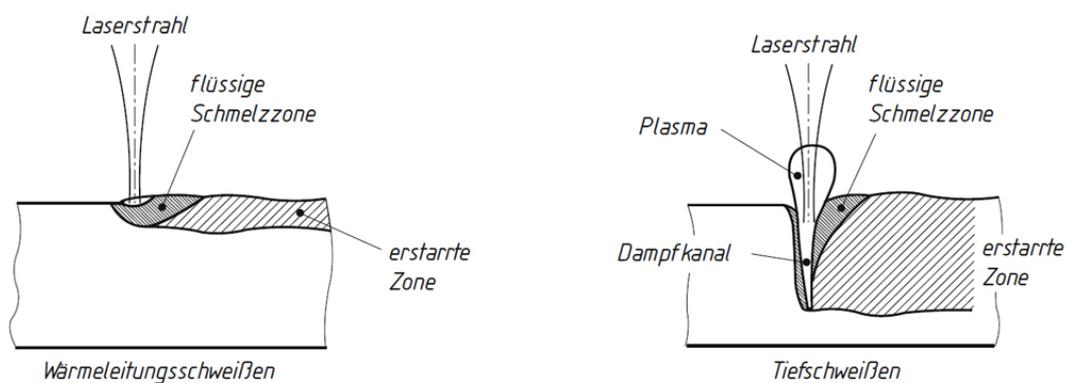


Abbildung 2.13 Laserschweißverfahren [8]

Vom Tiefschweißen spricht man wenn die Intensität der Laserstrahlung über der Grenzintensität  $I_c$  (ab  $10^6 \text{ W/cm}^2$ ) liegt und Temperaturen im Werkstoff entstehen die oberhalb der Verdampfungstemperatur des Werkstoffes liegen. Es bildet sich aufgrund der Verdampfung eine Druckerhöhung, die einen Dampfkanal (Keyhole) erzeugt. Das Material wird dabei an der Vorderfront aufgeschmolzen und umströmt dadurch denn Dampfkanal und verfestigt sich dahinter zur Schweißnaht. Auf diese Art könne Schweißnahtdicken bis zu 20 mm hergestellt werden. [17]

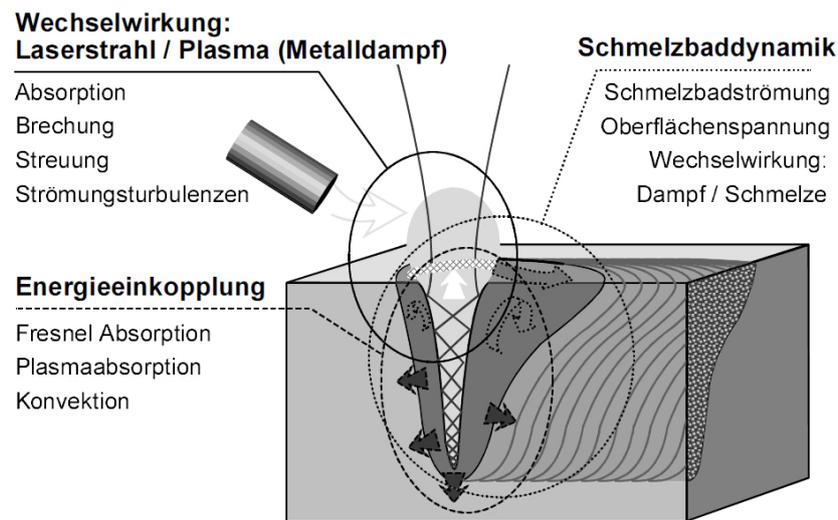


Abbildung 2.14 Schematische Darstellung des Laserstrahl-tiefschweißens und der am Prozess beteiligten Mechanismen [19]

Die *Vorteile* [8] des Laserschweißens gegenüber konventionellen Schweißverfahren sind:

- Hohe Energiedichte
- Berührungsloses Schweißen mit hoher Geschwindigkeit
- Geringer Verzug
- Geringe Streckenenergie
- Schmale Wärmeeinflusszone
- Geringe thermische Belastung
- Hoher Automatisierungsgrad

Die *Nachteile* hingegen sind:

- geringe Fertigungsgenauigkeit
- begrenzte Schweißtiefe (bis 25mm)
- bei breiteren Schweißnähten ist Schweißzusatz erforderlich

## 2.4 Wärmebehandlung

Unter dem Begriff Härten versteht man eine Wärmebehandlung, die durch Änderung des Gefüges gezielt die mechanische Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffes erhöht. Beim Härten wird der Werkstoff auf eine bestimmte Temperatur erwärmt, kurzzeitig bei dieser Temperatur gehalten und schließlich gezielt abgekühlt. Beim Presshärten entspricht diese Temperatur der Austenitisierungstemperatur. Es entsteht ein kubischflächenzentriertes Austenitgitter, das durch Umklappen des kubisch-raumzentrierten Ferritgitters entsteht. Durch Auflösung des vorhandenen Zementits erfolgt eine Anreicherung an Kohlenstoffatomen. Wird der Werkstoff sehr schnell abgekühlt, also unterhalb der kritischen Abkühlzeit, so bleibt keine Zeit um die Kohlenstoffatome zu lösen und es bildet sich ein tetragonal-verzerrtes kubisch raumzentriertes Martensitgitter. Das Martensitgefüge ist gekennzeichnet durch eine sehr hohe Oberflächenhärte. Die Martensitumwandlung wird im ZTU-Schaubild dargestellt. [20]

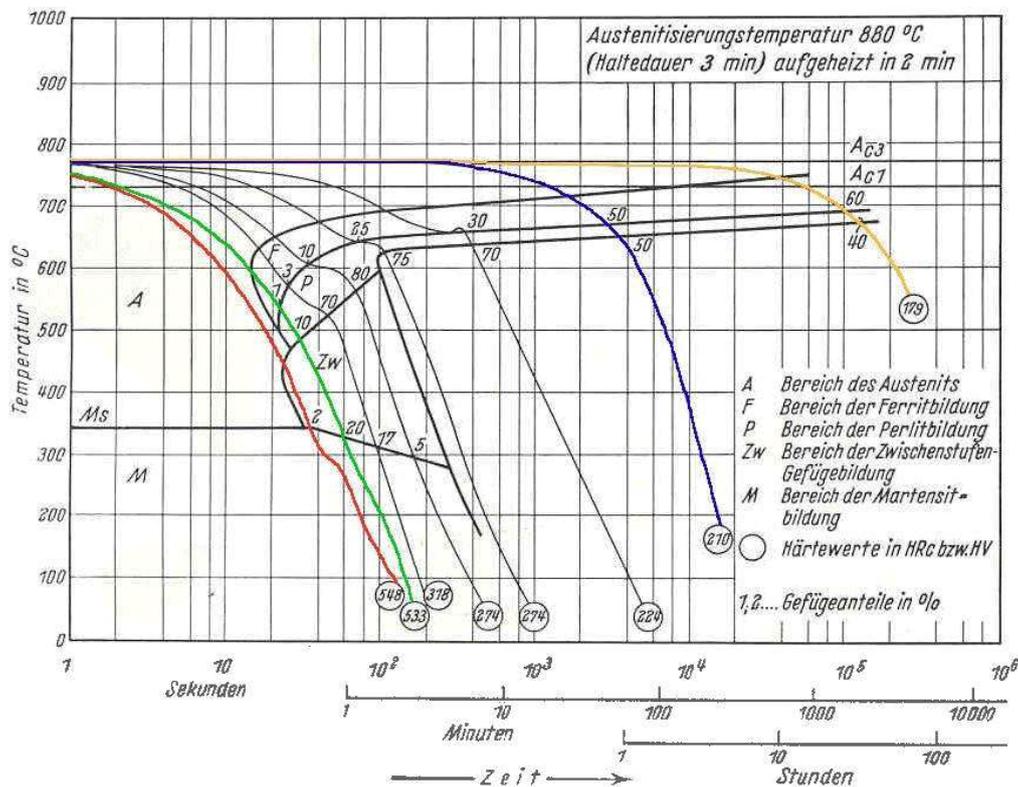


Abbildung 2.15 ZTU-Diagramm von C45 [21]

## 2.5 Werkstoffe

### 2.5.1 Mangan-Bor-Stahl 22MnB5

Der borlegierte Vergütungsstahl 22MnB5 (1.5528) eignet sich aufgrund seiner Warmumformbarkeit und höchsten Festigkeiten hervorragend als Tailored Blanks Grundwerkstoff. Die handelsüblichen Bezeichnungen für diesen Werkstoff sind MBW1500, USIBOR1500, phs-ultraform und BTR165. Einsatzgebiete sind beispielsweise Karosserieteile in der Fahrzeugindustrie. Im Anlieferungszustand besitzt der Vergütungsstahl schon eine Festigkeit von 500 MPa, die sich durch Härteverfahren wie das Press- oder Formhärten auf bis zu 1650 MPa erhöhen lässt. [22]

Stahlsorte	C max	Si max	Mn max	P max	S max	Cr + Mo max	Ti max	B max
22MnB5	0,25	0,4	1,4	0,025	0,01	0,5	0,05	0,005

Tabelle 2.1 chemischen Zusammensetzung 22MnB5

Kohlenstoffäquivalent für 22MnB5 in % :  $C_e = C + \frac{Mn+Si}{6} \leq 0,56$

Um eine Martensitstruktur und die gewünschte Härte zu erhalten, wird der Werkstoff im Ofen bei 870-950°C austenitisiert und bei dieser Temperatur etwa 5 Minuten lang gehalten. Danach wird der Werkstoff unter die Martensitstarttemperatur von  $M_s = 400^\circ\text{C}$  abgeschreckt. Um ein diffusionsloses umklappen des Austenit zu gewährleisten muss die Abkühlgeschwindigkeit über der oberen Abkühlgeschwindigkeit von 27 K/s liegen. [22]

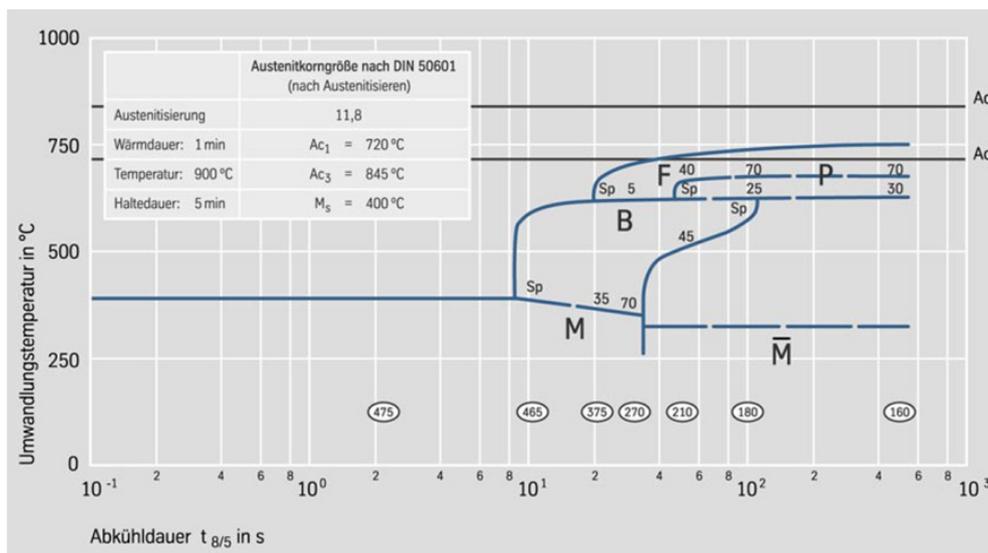


Abbildung 2.16 ZTU-Diagramm von 22MnB5 [22]

## 2.5.2 HX340

Der Werkstoff HX340 (1.0933) gehört zur Gruppe der hochfesten IF-Stähle. Die handelsüblichen Bezeichnungen für diesen Werkstoff sind MHZ340, HC340LAD und HX340LAD. Bei diesen Stählen sind die Elemente Stickstoff und Kohlenstoff üblicherweise vollständig abgebunden. Dieser Werkstoff eignet sich zum Streck- bzw. Tiefziehen, da es gleichzeitig zu hohen r- und n-Werten kommt. Durch Zugabe von Phosphor, Silizium und Mangan wird die erforderliche Festigkeit durch Mischkristallverfestigung erreicht. [23]

Dieser Werkstoff hat aufgrund seiner sehr hohen Bruchdehnung ein sehr großes Einsatzgebiet im Karosseriebau, da er auch nach der Umformung noch im ausreichenden Maße Restbruchdehnung besitzt. Diese äußert sich in der Fähigkeit, die Crashenergie zu absorbieren und wird daher als verformungsfähiges Strukturbauteil bei Fahrzeugen, z.B. in der B-Säule von Personenkraftfahrzeugen, eingesetzt.

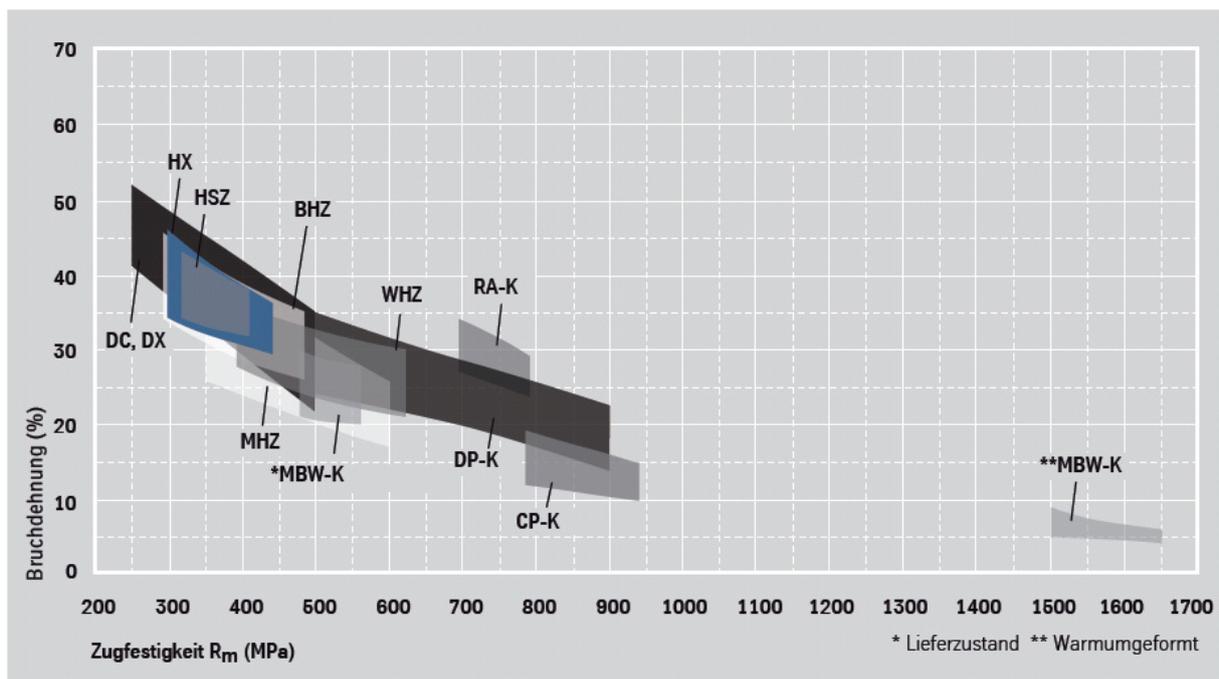


Abbildung 2.17 hochfeste IF-Stähle [23]

### 3 Ziele der Arbeit

Die Aufgabe der Diplomarbeit besteht darin, in Zusammenarbeit mit der Firma ThyssenKrupp Tailored Blanks GmbH, den Schweißprozess für die Herstellung von Tailored Welded Blanks für die Warmumformung zu optimieren. Dazu sollen Untersuchungen an den Werkstoffkombinationen aus 22MnB5 und HX340 durchgeführt werden.

Die Arbeit beruht auf der Überlegung, durch zusätzlich zugeführte Schweißzusätze die Fe-Al-Si-Zonen in den Schweißnähten zu minimieren, beziehungsweise im besten Fall zu unterbinden. Dabei wurde eine neue Art von Schweißzusatz und Zufuhrart gewählt die es ermöglichen soll diesen Effekt zu erzielen. Durch die Verwendung von feinen Metallpulvern als Schweißzusatz soll eine homogene Durchmischung in der Schweißnaht in kürzester Zeit erzielt werden, da mit konventionellen Schweißzusätzen wie zum Beispiel Drahtelektroden eine homogene Durchmischung nur schwierig erzielt werden kann.

Im ersten Schritt sollen Schweißparameter gefunden und definiert werden, um die für die Arbeit erforderliche Schweißqualität zu erzielen. Dazu zählen Prozessparameter wie Laserleistung, Vorschub, Frequenz, sowie Fokusslage des Lasers für das entsprechend eingesetzte Schweißpulver. Bei den Schweißpulvern handelt es sich um Legierungen auf Eisen- und Nickelbasis. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die verschweißten Teststreifen untersucht in dem die daraus gefertigten Proben einem Biege und Zugversuch ausgesetzt werden. Es werden auch Schliffproben hergestellt die eine genauere optische Untersuchung im Bereich der Schweißnaht liefern sollen. Der Prozess wird wissenschaftlich dokumentiert um eine Interpretation und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse der Versuche zu ermöglichen.

Basis der Untersuchungen waren die Anforderungen aus dem Lastenhefts des Herstellers des untersuchten TWBs, die hier zusammenfassend aufgelistet sind:

- Die eingesetzten Stahlblechzuschnitte können aus allen, für die Umformung in der Automobilindustrie geeigneten, schweißbaren Güten bestehen
- Zu untersuchen sind die Werkstoffkombinationen aus 22MnB5 und HX340
- Die zu verschweißenden Blechzuschnitte haben Dicken zwischen 0,5mm und 2,0mm
- Das entstehende Tailored Blank kann aus Zuschnitten verschiedener Dicke und/oder aus verschiedenen Werkstoffen bestehen
- Die Zuschnitte können eine Beölung von bis zu 1,5g/m<sup>2</sup> aufweisen
- Die Kantenvorbereitung erfüllt die Anforderungen für Kontianlagen gemäß den QS-Grunddaten für Zuschneidlinien (Zuschnitte werden von TK Tailored Blanks gemäß dem QS-Standard zugeliefert)

- Der Schweißprozess sollte einen Fügspalt von bis zu 0,3mm überbrücken können
- Die Schweißgeschwindigkeit sollte größer als 4m/min sein
- Die Breite der Schweißnaht darf 2,6mm nicht übersteigen
- Die Nahtgeometrie muss der Norm SEL100, 2.Ausgabe, ohne Nacharbeit genügen
- Das Nahtgefüge muss einen homogenen Aufbau aufweisen
- Zugversuchsproben quer zur Schweißnaht sowie Erichsen-Tiefungen versagen im Grundwerkstoff

In dieser Arbeit wurden die notwendigen Schweißparameter wie Vorschub und Frequenz experimentell ermittelt, sowie auch das Schweißpulver, das zum Einsatz kommen soll, untersucht wurden 4 verschiedene Schweißpulver, die unterschiedliche chemische Zusammensetzung haben und eine Verbesserung der Schweißnaht bewirken sollen, untersucht. Bei den eingesetzten Schweißpulvern handelt es sich um Metallpulver auf Eisen oder Nickelbasis.

Aufgrund der technische Grenze der am Institut Tools & Forming zur Verfügung stehenden Laborgeräte wurden folgende Vereinfachungen gegenüber dem ursprünglichen Lastenheft getroffen und die Untersuchungen entsprechend dieser vereinfachten Anforderungen durchgeführt:

- Der maximale Fügspalt liegt bei 0,2mm
- Die Schweißgeschwindigkeit kann aufgrund der geringen Laserleistung 4m/min unterschreiten
- Zur besseren Reproduzierbarkeit werden die Kanten (stirnseitigen Flächen) mittels Flachsleifen ideal vorbereitet um weitere Einflußfaktoren zu minimieren
- Die Schweißzone wird vor dem Fügeprozess entfettet und gereinigt
- Zusätzlich zum Zugversuch kommt ein Biegetest zur Anwendung. Der Erichsen-Versuch wird aufgrund unzureichender Ergebnisse bei 22MnB5 nicht angewendet

Zudem erfolgt eine qualitative Beurteilung der Proben mittels Mikroskopie, REM und EDX Analyse. Des Weiteren werden Mikrohärteverläufe über die Schweißnaht gemessen um daraus Rückschlüsse auf Werkstoffkennwerte, wie zum Beispiel die Zugfestigkeit des Materials treffen zu können.

Die durchgeführten Versuche sollen letztendlich helfen den Serienprozess weiter zu entwickeln und im besten Fall den Prozess der Laserablation zu vermeiden.

## 4 Versuchsdurchführung

Die Arbeit begann mit der Entwicklung einer neuartigen Schweißdüse die es ermöglicht die Schweißzusätze gezielt zum Schweißbad am Schnittpunkt mit dem Laser zu führen. Zusätzlich wurde damit ermöglicht, den Pulverstrahl in Bezug auf den Laserstrahl noch genauer zu justieren. Festkörpergelenke ermöglichen durch eine zweiachsige Kinematik am Arbeitspunkt einen Verstellweg von bis zu 3mm.

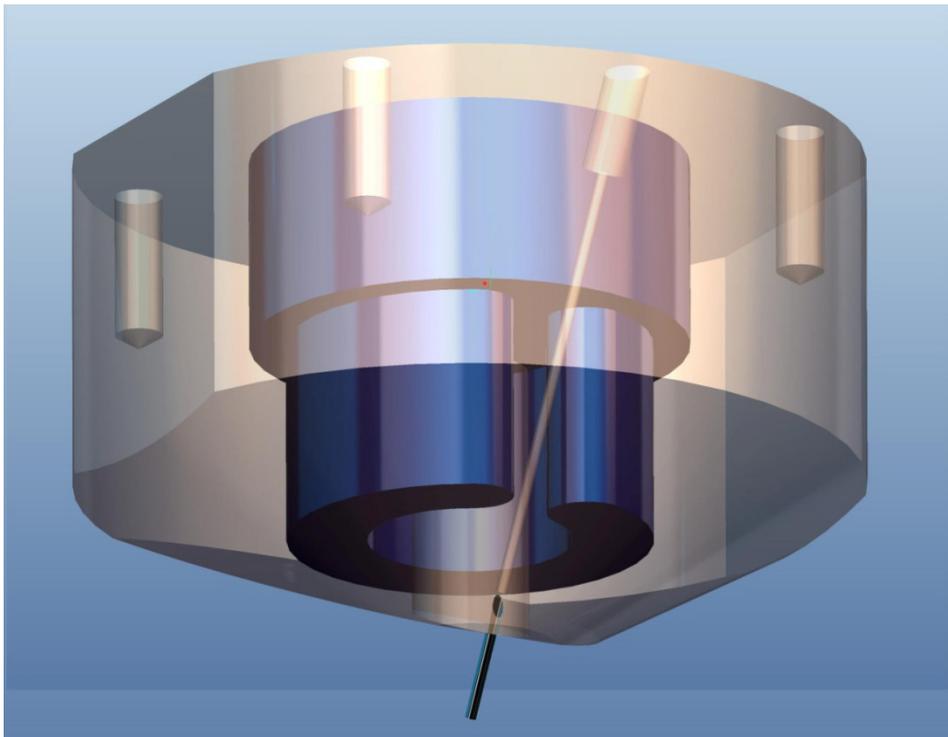


Abbildung 4.1 Aufbau der Front Nozzle mit Düsenkanal

Da es aufgrund der hohen Laserintensität im Bereich der Düsenöffnung (Front Nozzle) zu einer erhöhten Wärmebelastung kommt, musste für den Versuchsaufbau eine interne Wasserkühlung entwickelt werden. Die Zuführung des Pulvers in das Schmelzbad erfolgt durch einen Düsenkanal in der Front Nozzle. Der Düsenkanal wurde durch zahlreiche Versuche optimiert. Damit die kinetische Energie des Pulverstroms optimal genutzt werden konnte, wurde ein konischer Düsenkanal gewählt der am Anfang einen Durchmesser von 1,2 mm aufweist und sich auf 0,8 mm am Ausgang verengt. Über ein externes Fördersystem wurde das Pulver-Gas Gemisch durch die Düse als Schweißzusatz zugeführt. Um eine gute Reproduzierbarkeit der Schweißergebnisse zu gewährleisten, ist eine separate Aufspannvorrichtung vorgesehen, mit der man bis zu 6 Proben mit unterschiedlichen Parametern hintereinander schweißen kann.

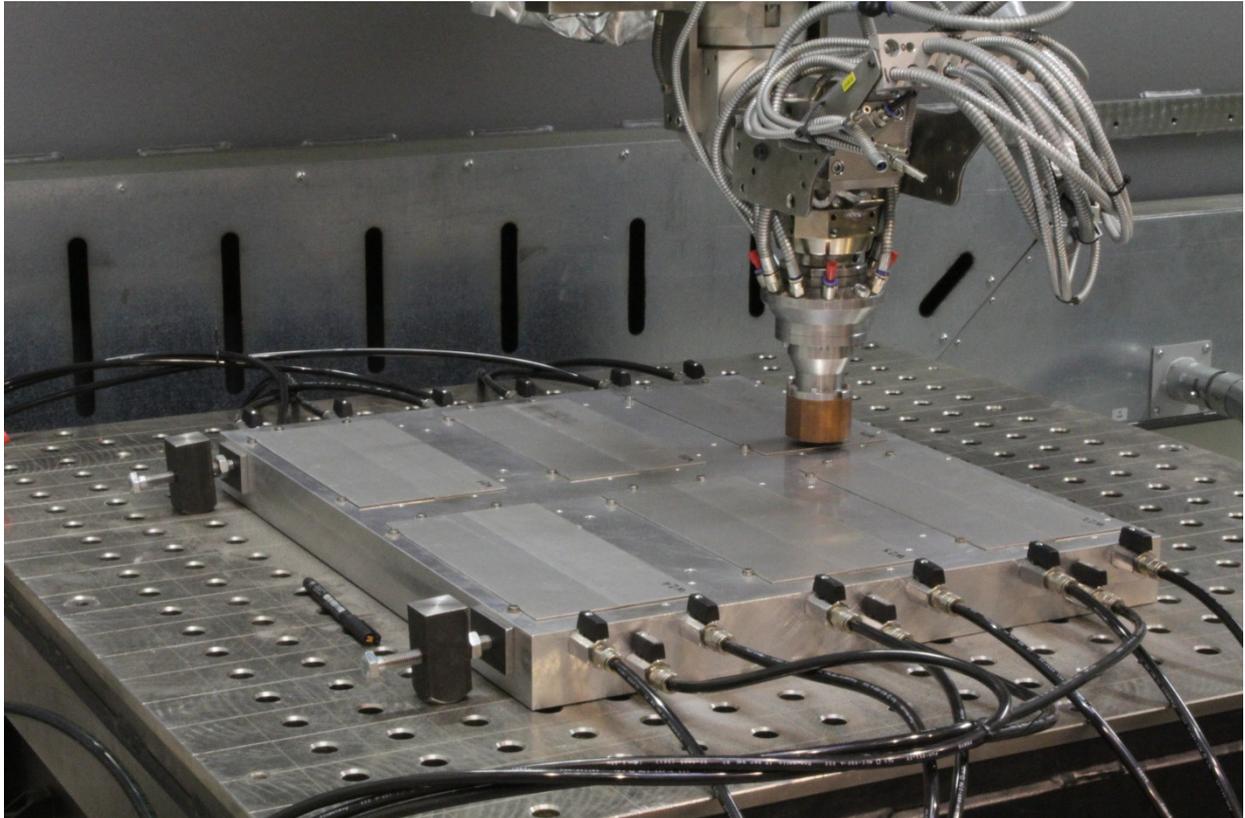


Abbildung 4.2 Laserschweißkopf mit Aufspannvorrichtung

Die Fixierung der Proben erfolgte über manuell schaltbare Ventile die einen Unterdruck erzeugen. Um das Schweißbad vor der Atmosphäre zu schützen wird die Platine von unten mit Schutzgas (Argon) beaufschlagt.

Für die Versuchsdurchführung und anschließende Auswertung wurde folgender Ablauf entwickelt und eingehalten:

- Ermittlung der notwendigen Parameter für die Schweißung
- Analyse der Proben, durch Biegeversuch, Zugversuch und Schliffproben
- Auswertung der Ergebnisse

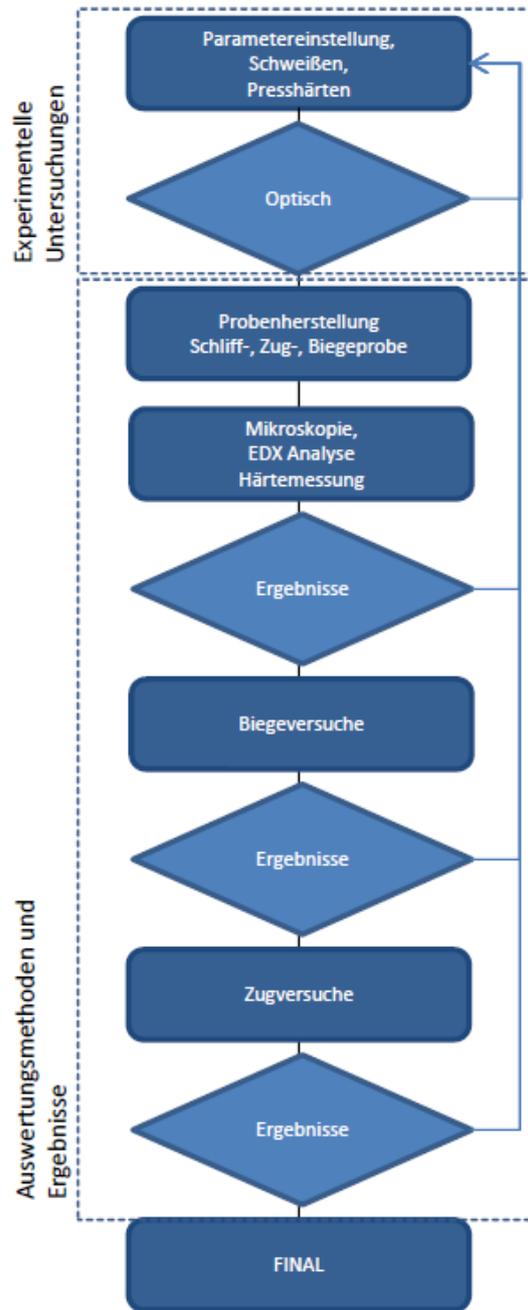


Abbildung 4.3 Flussdiagramm

## 4.1 Werkstoffkombinationen

Die Schweißversuche wurden am Institut für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion durchgeführt. Die Abmessungen der zu verschweißenden Bleche betragen 250x60x1,35 mm bzw. für Bleche deren Beschichtung entfernt wurde 250x60x1,1mm. Beim den Versuchen wurden Blechplatten sowohl gleichen Materials als auch unterschiedliche Materialpaarungen verschweißt. Die Platten wurden zunächst ohne Spalt und anschließend mit einem Spalt von 0,1mm und 0,2mm miteinander verschweißt. Es wurden die bereits oben genannten vier Metallpulver als Schweißzusatz verwendet. Alle Versuchsplatten wurden kurz vor dem Laserschweißen an der Oberfläche von Verunreinigung, Fett- oder Ölrückständen gereinigt, um Poren und Einschlüssen, die durch Verunreinigungen verursacht werden können, auszuschließen. Bei den Blechplatten wurde vor dem Schweißen die Stirnfläche abgeschliffen, um eine maximale Abweichung von  $\pm 0,05$  mm von der geforderten Breite von 60 mm zu gewährleisten.

Werkstoffkombinationen	Dicke [mm]	Spalt [mm]		
		0	0,1	0,2
MBW-MBW	1,35/1,35	Ni 40 Ni 50 NiBSi LPW4140	Ni 40 Ni 50 NiBSi LPW4140	Ni 40 Ni 50 NiBSi LPW4140
MBW-HX340	1,35/1,35			
MBW-MBW entsch.	1,1/1,1			

Tabelle 4.1 Werkstoffkombinationen

Die Proben wurden mit dem Schweißdatum und Probenindex beschriftet um den chronologischen Ablauf festzuhalten und eine lückenlose Dokumentation zu gewährleisten.

## 4.2 Prozessparameter

Die geeignete Wahl und Einhaltung der Prozessparameter ist sehr wichtig, da diese für die Qualität der Schweißnaht ausschlaggebend sind. Sie beeinflussen einerseits die Wirkung des Lasers hinsichtlich des Energie, Leistung, Leistungsdichte und Frequenz sowie den Mischprozess und die Geometrie der Naht. Folgende Parameter wurden definiert, kontrolliert und dokumentiert:

### *Energie*

Die Energie von Photonen hängt von ihrer Frequenz und ihrer Wellenlänge ab. Ein einzelnes Photon besitzt nur sehr wenig Energie, in einem Laser hingegen addiert sich die Energie der einzelnen Photonen und steigt daher auf ein Vielfaches.

### *Leistung*

Die Leistung eines Laserstrahls ist die Energie aller Photonen die innerhalb einer Sekunde an einem Beobachtungspunkt vorbeifliegen. Beim verwendeten Laser liegt die Leistung bei 3,2 kW.

### *Leistungsdichte/ Intensität*

Die Leistungsdichte ist definiert als Leistung pro Fläche. Die Leistungsdichte ist eine sehr wichtige Kenngröße, da bei gleichbleibender Laserleistung die Leistungsdichte mit dem Strahldurchmesser verändert wird. Die höchste Leistungsdichte wird im Fokus erreicht, da hier alle Photonen zusammengedrängt werden. Hier steigt die Leistungsdichte um einige Zehnerpotenzen an und ermöglicht so eine Materialbearbeitung.

### *Frequenz*

Es gibt zwei verschiedene Methoden um den Laser zu betreiben, einmal durch einen Dauerstrichbetrieb (cw-continuous wave), bei dem das Medium kontinuierlich angeregt wird und den quasistationären Betrieb (Quasi-cw-Betrieb) sogenannte gepulst Betrieb. Laser, die mit hochfrequenter Wechselspannung betrieben werden, können sowohl im Dauerbetrieb als auch im quasistationären Betrieb arbeiten. Es ist sogar eine stufenlose Regelung möglich. Im Dauerbetrieb (cw-Betrieb) ist die Frequenz so hoch (ca. 10000 Hz), dass der Laserprozess in den Nulldurchgängen der Sinusschwingung der Frequenz zwar abschwächt, aber nicht abbricht. Damit entsteht ein kontinuierlicher Laserstrahl mit einer Leistung, die sich aus der Mittelung über die Zeit der Schwingung ergibt und damit geringer ist als die Peak-Leistung.

Beim Pulsbetrieb wird das System in Pulsen angeregt und entstehen kurze Laserpausen zwischen den Laserpulsen. Die über die Zeit gemittelte Leistung des Laserstrahls wird von der Leistung, Dauer und Frequenz der Laserpulse bestimmt. Die gemittelte Leistung liegt immer unter der Leistung der Laserpulse.

Im Projekt wurde für den Dauerbetrieb (cw-Betrieb) eine Frequenz von 5000 Hz und für den Quasi-cw-Betrieb eine Frequenz von 100 Hz verwendet.

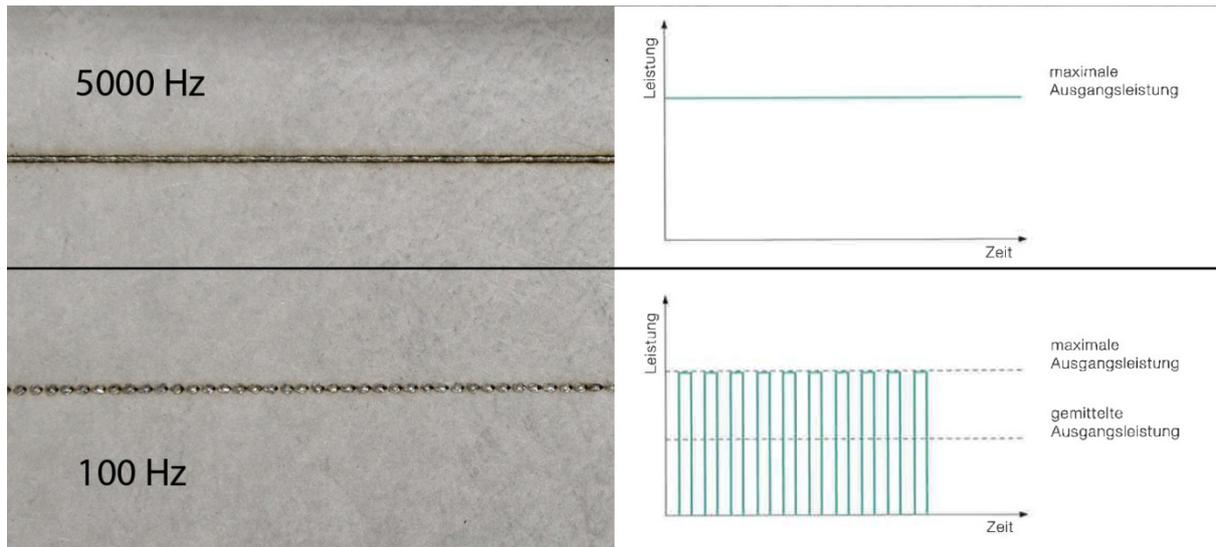


Abbildung 4.4 Unterschiedliche Frequenzen [14]

### Vorschub

Der Vorschub ist der Verfahrweg des Lasers in der y-Achse pro Zeiteinheit. Der Laser wurde mit einem Vorschub im Betrieb von 2000mm/min bis 4000mm/min gesteuert.

### Pulvertyp, Pulverfördermenge

Das Metallpulver dient als Schweißzusatz, welches zur Verbesserung der mechanischen und chemischen Eigenschaften der Schweißnaht beiträgt. Die chemische Zusammensetzung der einzelnen eingesetzten Metallpulver ist in der Tabelle 4.2 ersichtlich. Die Metallpulver (Ni40, Ni50 und NiBSi) sind auf Nickelbasis und wurden von der Firma NT Systemlösungen GmbH zur Verfügung gestellt. Das Metallpulver (LPW4140) ist auf Eisenbasis und wurde von der Firma LPW Technology entwickelt. Die Idee besteht darin, mithilfe von Schweißzusätzen auf Basis von Nickel oder Eisen den Aluminiumanteil in der Schweißnaht zu senken und dadurch die Festigkeit zu erhöhen. Zwei Modelle wurden dabei genauer behandelt.

### Modell 1: Ni-Basis

Nickel besitzt eine sehr gute Affinität zu Eisen und Aluminium. Deshalb liegt die Vermutung nahe, dass Nickel als Legierungselement als Bindeglied zwischen den beiden anderen Elementen fungiert. Jedoch kann davon ausgegangen werden, dass Nickel als klassischer Austenitbildner ein anderes Gefüge im Bereich der Schweißnaht ausbildet. Eine Aussage über die mechanischen Eigenschaften des Schweißnahtbereiches kann zu Beginn dieser Arbeit jedoch nicht getroffen werden. Daher waren genauere Untersuchungen mit diesem Schweißzusatz notwendig.

Modell 2: Fe-Basis:

Bei diesem Ansatz wird versucht, durch einen höheren Anteil von Eisen die Konzentration von Aluminium zu senken und dadurch die Festigkeit der Schweißnaht zu erhöhen.

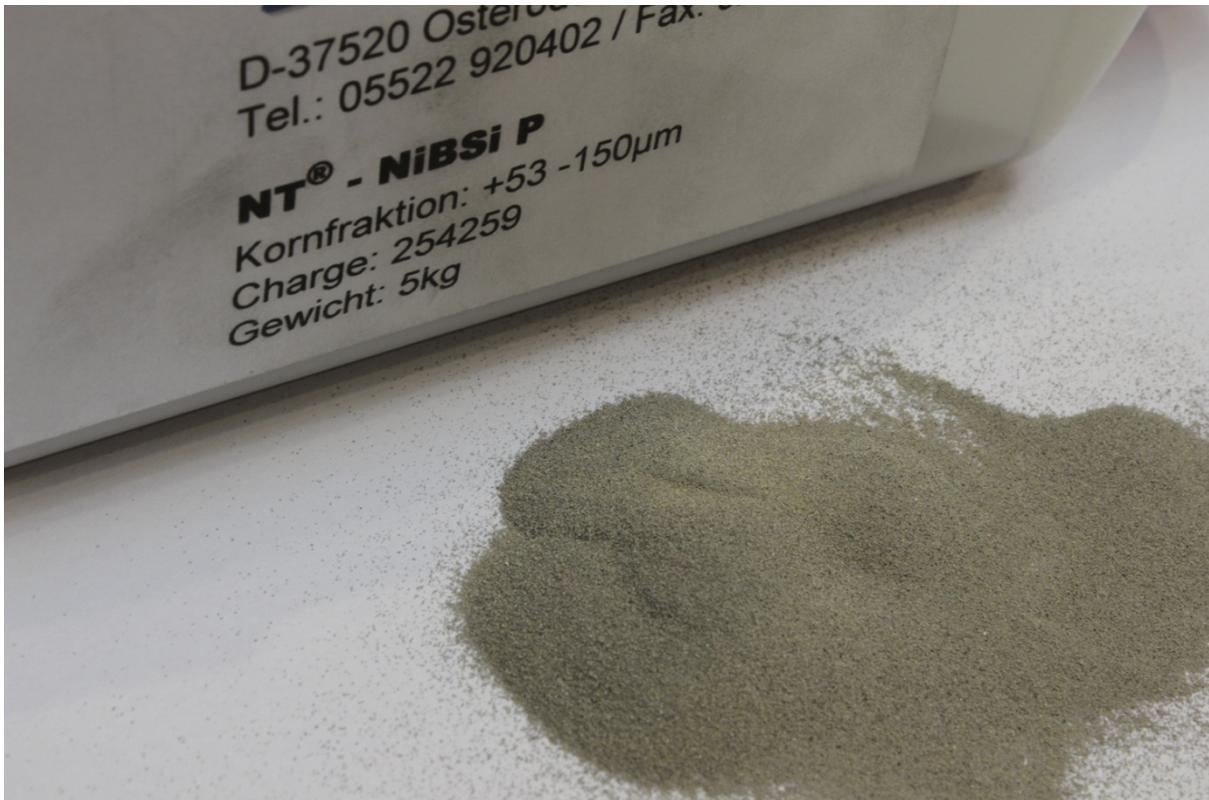


Abbildung 4.5 Metallpulver NiBSi P

Pulverart	C [%]	Si [%]	B [%]	Cr [%]	Fe [%]	Mn [%]	P [%]	Mo [%]	O [%]	N [%]
Ni 40	0,25	3,5	1,3	6,0	2,0					
Ni 50	0,45	3,8	2,3	11	2,5					
NiBSi	<0,03	3,0	3,0		<0,4					
LPW 4140	0,36	0,28		0,96	Balance	0,83	0,016	0,22	0,027	0,017

Tabelle 4.2 Chemische Zusammensetzung des Metallpulvers [24][25]

Metallpulver	Kornfraktion
Ni 40	+53 -150 µm
Ni 50	+53 -150 µm
NiBSi	+53 -150 µm
LPW4140	+44 -105 µm

Tabelle 4.3 Kornfraktion bei Metallpulvern

Das Pulver wurde durch ein drehendes Dosierkammersystem und Leitungssystem der Schweißnaht zugeführt. Je nach Umdrehungszahl der Schnecke entstanden unterschiedliche Massenströme der Metallpulver. Durch Messungen wurden die Pulvermengen gemäß Tabelle 4.4 ermittelt. Aufgrund der unterschiedlichen Partikelfraktion der verschiedenen Pulverarten kam bei derselben Umdrehungszahl unterschiedlicher Massenstrom zustande. Um den tatsächlichen Massenstrom zu dokumentieren wurde vor jedem Wechsel der Metallpulver der tatsächliche Massenstrom bei 3100 Umdrehungen pro Minute ermittelt.

Pulverart	[g/min]	[min <sup>-1</sup> ]
NiBSi	15,5	3100
Ni40	14,0	3100
Ni50	15,5	3100
LPW4140	15,0	3100

Tabelle 4.4 Pulver Menge

Zusätzlich war die Menge des Metallpulvers zu berücksichtigen, die von der Spaltbreite zwischen den beiden Blechplatten abhängt. Je größer der Abstand zwischen den Platten war, desto mehr Metallpulver wurde benötigt.

Um eine konstante Zufuhr des Metallpulvers zu gewährleisten ist ein Pulverförderer nötig. Bisher wurde Pulverstrom mittels eines Puffers, der eine Druckdifferenz besitzt um den Pulverstrom konstant zu halten, konstante zur Schweißnaht befördert. Da aufgrund der Druckdifferenz das Schweißgut, wie in der Abbildung 4.6 dargestellt, aus der Schweißnaht gedrückt wird, wurde in Zuge dieser Arbeit eine bessere Lösung entwickelt. Der hier entwickelte Pulverförderer arbeitet ohne Druckdifferenz. Es handelt sich um einen Zyklonabscheider bei dem das Metallpulver in einer Zentrifuge in Drehung gebracht wird, wodurch ein konstanter Pulverstrom entsteht.

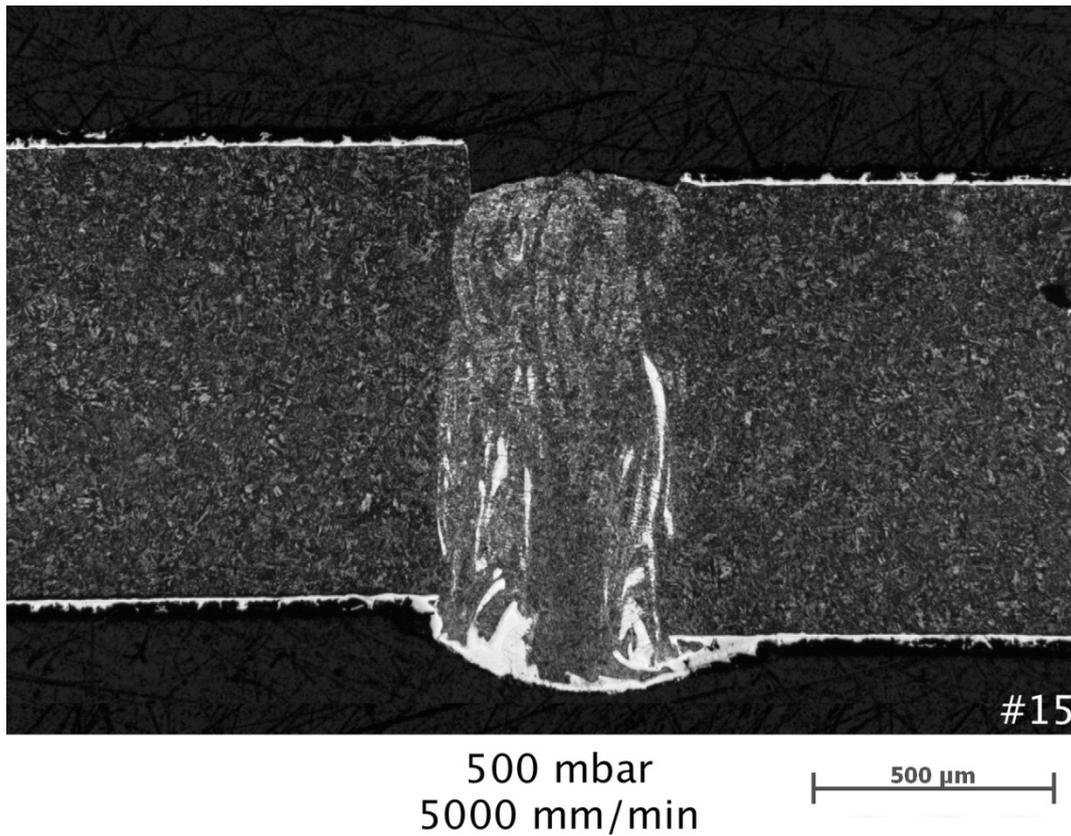


Abbildung 4.6 Schweißnaht mit Druckdifferenz von 500 mbar

In Abbildung 4.7 ist der Partikelverlauf bei unterschiedlichen Druckdifferenzen dargestellt. Die schwarze horizontale Linie stellt den Abstand von 5mm zwischen Probe und zum Laser dar. Man kann aus dieser Abbildung erkennen, dass die Streubreite bei höherer Druckdifferenz deutlich größer ist als bei niedrigem. Herrscht keine Druckdifferenz so fokussiert sich der Pulverstrahl optimal und das Metallpulver gelangt mit einem guten Wirkungsgrad in die Schweißnaht.

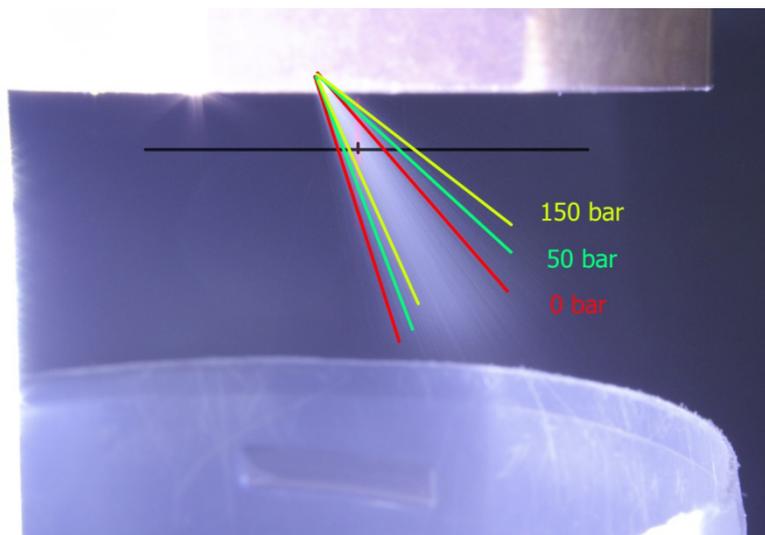


Abbildung 4.7 Partikelverlauf

*Gaskonfiguration*

Als Schutz- und Fördergase kamen Argon und Helium zum Einsatz. Unter der Gaskonfiguration versteht man ein Rezept das die Gaszusammensetzung beschreibt. Es wurde hier nur die Fördermenge der einzelnen Gasbestandteile unterschieden, das heißt wie viel von welchem Gas zugegeben wurde. Das Gas hat die Aufgabe die Pulverpartikel zu transportieren und beim Verlassen der Düse die Schmelzbadkinematik einzuleiten. Das Schutzgas schützt die Naht vor Einflüssen aus der Atmosphäre. Das Schutzgas wurde dabei auf der Oberseite wie auch auf der Unterseite aufgebracht.

Gas	Menge (l/min)	Funktion
Cover Ar	1	Fördergas
Carrier Ar	1	
Carrier He	2	
Shaping Ar	30	Schutzgas
Nozzle Ar	1	Aufspannvorrichtung
Nozzle He	30	Schutzgas Düse

Tabelle 4.5 Gaskonfiguration

*Düsenabstand*

Der optimale Abstand zwischen Düsenkopf und Blechplatte wurde auf experimentellem Weg ermittelt und für diese Experimente mit 5mm festgelegt.

*Fokus*

Für den versuchsrelevanten Schweißprozess wurde ein parabolischer Spiegel mit einem Umlenkungsgrad von 90° und einer Brennweite von 250mm verwendet.

In der unteren Tabelle werden alle Parameter der Versuchsanordnung zusammengefasst. Die Versuche wurden mit allen Kombinationen der Parameter gemäß dieser Tabelle durchgeführt.

Vorschub	Frequenz	Spalt	Hopper	Pulverart	Laserleistung	Düseabstand	Brennweite
[mm/min]	[Hz]	[mm]	[min <sup>-1</sup> ]		[%]	[mm]	[mm]
2000	100	0	3100	Ni40	100	5	250
2500	5000	0,1		Ni50			
3000		0,2		NiBSi			
3500		LPW4140					
4000							

Parametar
Variabel
Fix

### 4.3 Anlaufvorgang des Schweißvorganges

Beim Anlaufvorgang beginnt der Rechner das NC Programm einzulesen, in dem die Koordinaten, die Schweißparameter sowie die Gaskonfiguration enthalten sind. Die Leitungen werden vor dem Schweißen mit Schutzgas gespült um mögliche Verstopfungen und Verunreinigungen zu vermeiden. Der Förderer, der das Metallpulver zur Schweißnaht fördert, wird gestartet. Sobald ein quasistationärer Zustand erreicht ist, beginnt der Schweißprozess.

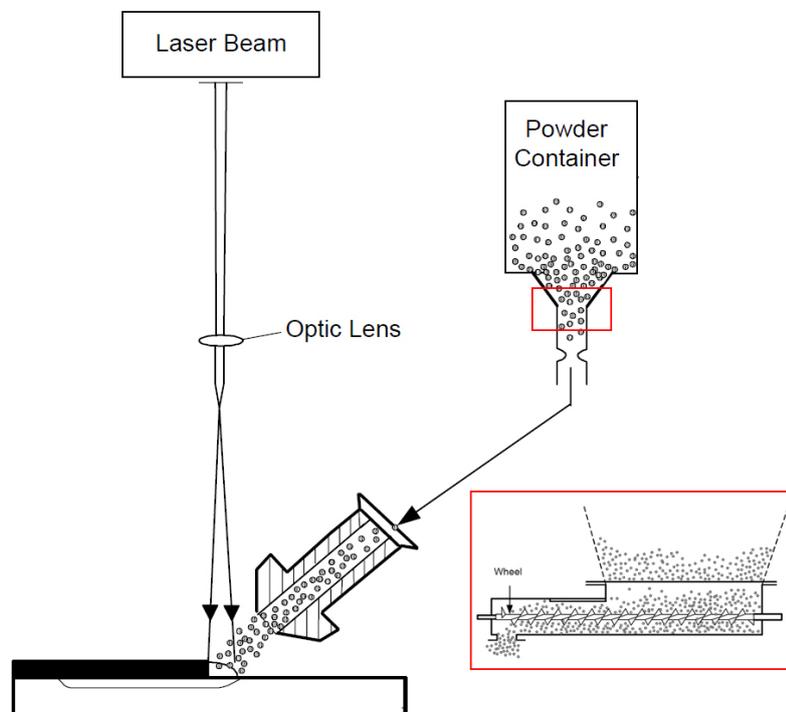


Abbildung 4.8 Schweißprinzip [26]

#### 4.4 Presshärten

Die verschweißten Proben wurden im Ofen fünf Minuten lang auf Austenitisierungstemperatur gebracht (870°C), gehalten und zuletzt in einer hydraulischen Presse auf ca. 50°C abgekühlt. Die hydraulische Presse beinhaltet ein Werkzeug zur Abkühlung der Schweißproben das am Institut entwickelt wurde. Dieses Werkzeug besteht aus zwei Platten die mit einer Wasserkühlung versehen sind und an das verschweißte Blech gedrückt werden. Die wichtigsten Parameter der Presse sind die Presskraft, die mit 1000 kN festgelegt ist, und Presszeit, die mit 12 Sekunden eingestellt wurde.

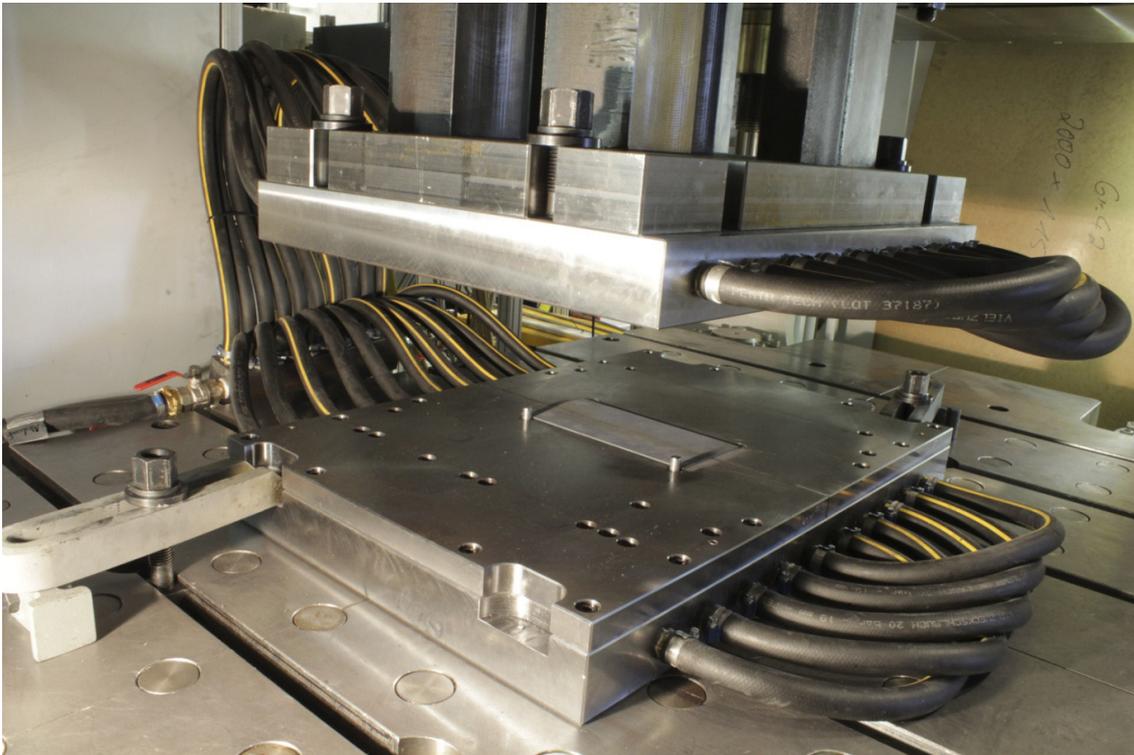


Abbildung 4.9 Presshärten

## 4.5 Fertigung der Probe

Die Proben wurden aus den verschweißten und gehärteten Blechen durch Erodieren herausgeschnitten. In der ersten Versuchsreihe wurden Schliff und Biegeproben gemacht. In der zweiten Versuchsreihe der Wiederholungsphase wurde zusätzlich zu den Schliff und Biegeproben auch Zugproben gemacht. In Abbildung 4.10 sind die geschweißten Platinen mit den für die jeweiligen Proben benötigten Entnahmeformen dargestellt. Die Probenposition ist in Anhang B und Probenabmessung in Anhang E zusammengefasst.

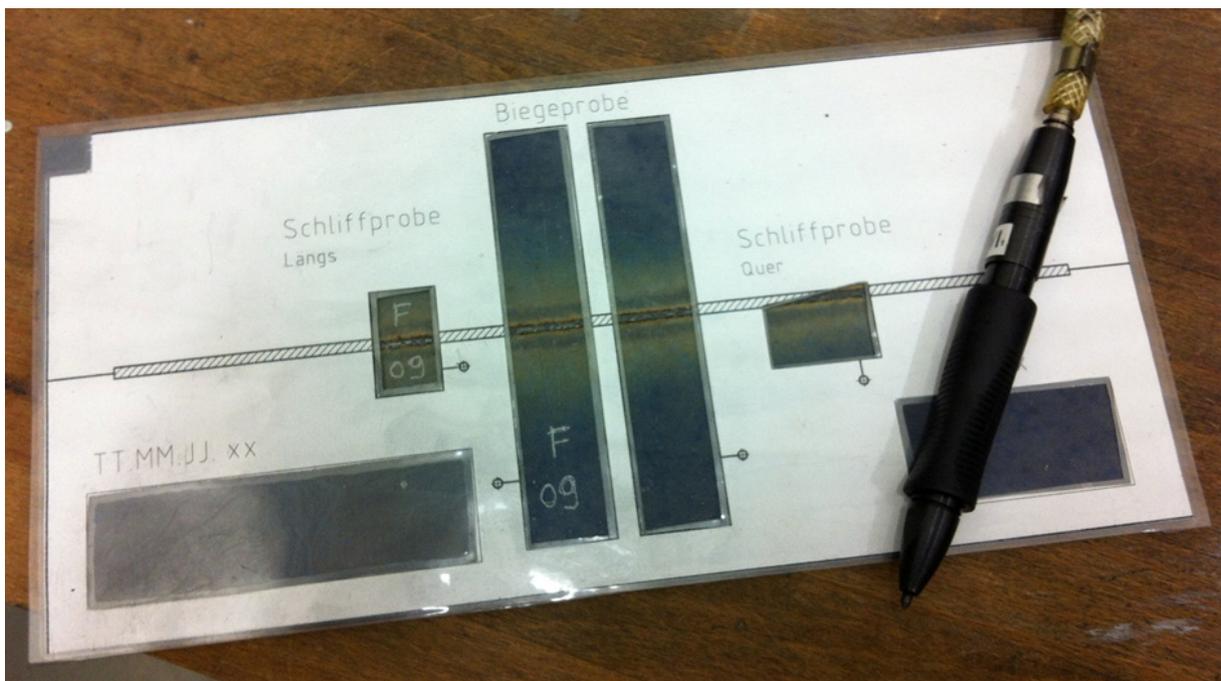


Abbildung 4.10 Probenbezeichnung

### *Erodieren*

Die Proben wurden mittels Drahterodieren herausgetrennt. Konventionelle Schneidverfahren konnten nicht zum Einsatz kommen da das Material eine Zugfestigkeit von 1600 MPa und eine Streckgrenze von 1000 MPa aufweist und damit zu hart für konventionelle Schneidverfahren ist. Durch das Drahterodieren wird die Wärmeeinflusszone minimiert und es kommt zu keiner Veränderung im Gefüge.

Die Probenkennzeichnung erfolgte mit einem Buchstaben, der für den jeweiligen Tag der Probenherstellung steht, sowie einer fortlaufenden Nummer, die die chronologische Reihenfolge der Proben, die an diesem Tag gemacht wurden, beschrieb. Im Anhang B ist die Zuordnung der einzelnen Proben zur jeweiligen Probennummer tabellarisch dargestellt.

## Beispiel A.xx

F.04	051012.04
H.04	091012.04
G.08	081012.08
G.09	081012.09
H.01	091012.01
H.02	091012.02

A - Datum

xx - Probennummer

Es wurden im Zuge dieser Untersuchungen sowohl zerstörungsfreie als auch zerstörende Prüfverfahren angewandt. Zu den Prüfverfahren gehören:

Zerstörungsfreie Prüfverfahren:

- Lichtmikroskopie
- Rasterelektronenmikroskop

Zerstörende Prüfverfahren:

- Biegeversuche
- Zugversuch
- Makro- /Mikroschliff

## 5 Auswertungsmethoden und Ergebnisse

### 5.1 Schliifproben

Anhand von Schliifproben, die gemäß der Norm EN1321 an den Probestücken gemacht wurden, lassen sich mikroskopische Untersuchungen durchführen, die Aufschluss über die chemische Zusammensetzung und das Gefüge in der Schweißnaht geben. Die Geometrie der Schweißnahtform lässt die Aussagen über die Eignung der Wahl der Parameter Vorschub, Laserleistung und Pulverfördermenge treffen. [27][28]

#### 5.1.1 Probenherstellung

Zur Herstellung der Schliifprobe wurden die erodierten Probenenteile gemeinsam mit einem Kalteinbettmittel aus Epoxidharz in eine Form gegeben und vergossen. Um Lufteinschlüsse im Harz so gering wie möglich zu halten, wurden die Proben vakuumimprägniert. Sobald die Proben ausgehärtet waren, was nach ca. 24 Stunden der Fall war, wurden die Proben stufenweise auf eine für die Untersuchung erforderliche Oberflächenqualität geschliffen und poliert. Anschließend wurden die Proben mit Nital 3% geätzt. Die Bilder der Proben, die im Anhang A zusammengefasst sind, wurden am Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik aufgenommen.

#### 5.1.2 Schweißnahtanalyse

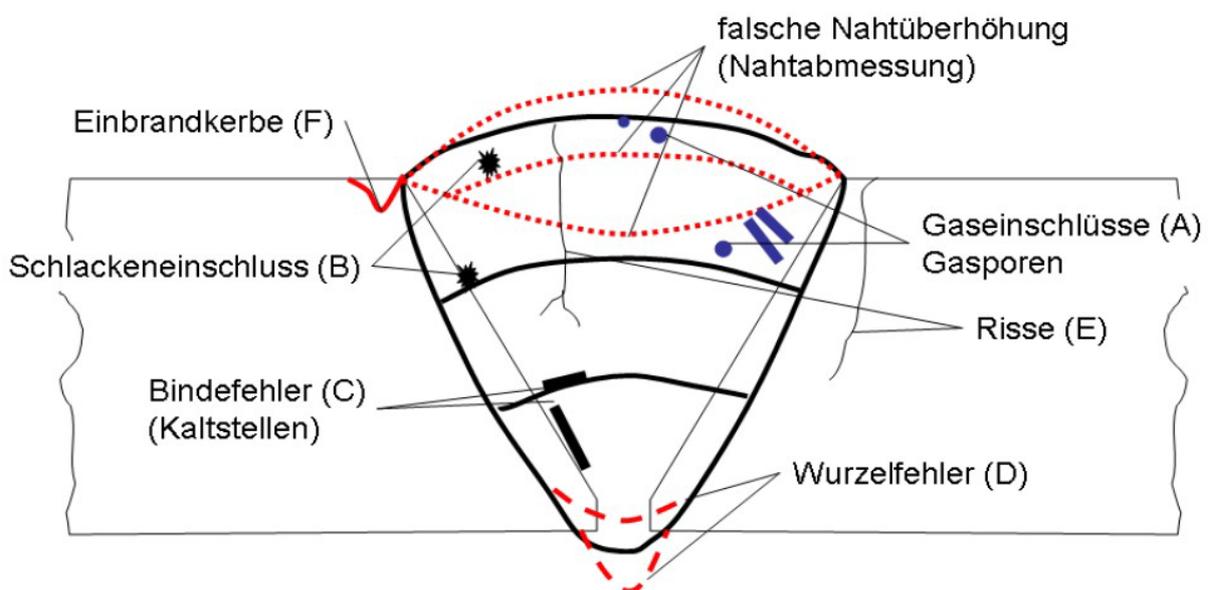


Abbildung 5.1: Schweißnahtanalyse [5]

### 5.1.3 Ergebnisse

Alle Abbildungen in der ersten Reihe stellen Schweißnähte dar die im Pulsbetrieb (100 Hz) erzeugt wurden, in der zweiten Reihe sieht man die Schweißnähte, die im Dauerstrichbetrieb des Lasers hergestellt wurden. Von links nach rechts beträgt der Vorschub 3000, 3500, 4000mm/min. Alle Proben in der Abbildung bestehen aus den Werkstoffen MBW (links) und HX340 (rechts), sind gehärtet und beschichtet und ohne Spalt geschweißt.

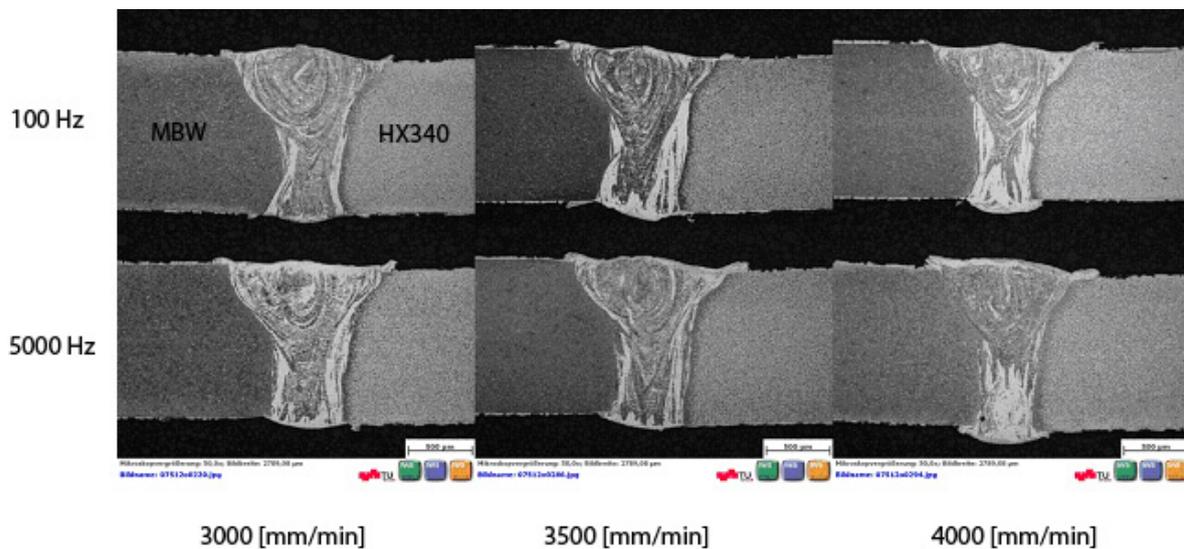


Abbildung 5.2 LPW4140 als Zusatzwerkstoff

In der Abbildung 5.2 sieht man, dass mit steigendem Vorschub im Pulsbetrieb die Nahtüberhöhung auf die Oberseite flacher wird. Durch die Schweißbadkinematik entstehen nadelförmige Fe-Al Gebiete. Man sieht hier ein Zusammenhang zwischen Schweißgeschwindigkeit und Schweißnahtbreite. In der Schweißnaht sind keine Risse und Poren ersichtlich.

Durch diese ersten Bilder lassen sich noch keine Aussagen bezüglich der mechanischen Kennwerte der Schweißnaht treffen. Jedoch ist durch die Form der Schweißnaht und der Rissfreiheit, die Festlegung und Ergänzung der Schweißparameter bestätigt. Als Schweißzusatz wurde hier ein Eisenbasiswerkstoff (LPW4140) gewählt. In weiterer Folge wurden auch nickelbasierte Zusatzwerkstoffe angesetzt und getestet.

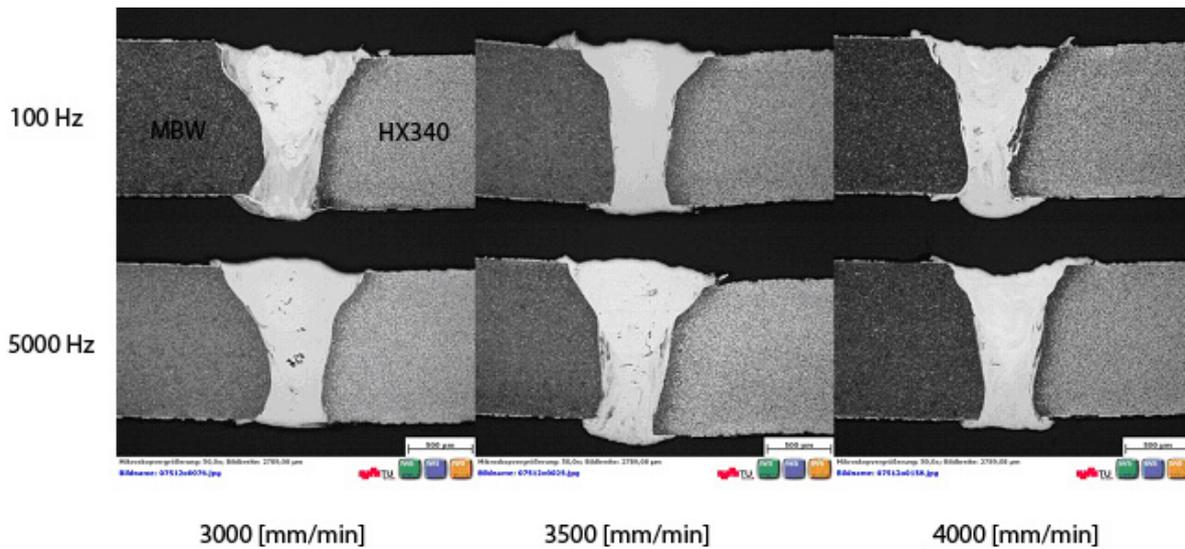


Abbildung 5.3 Ni40 als Zusatzwerkstoff

In der Abbildung 5.3 ist zu erkennen, dass mit steigendem Vorschub es zu einer flacheren Ausbildung der Schweißnaht im Bereich der Decklage kommt. Im Bereich der Schweißwurzel kommt es jedoch zu einer Überhöhung. Bei Ni40 als Schweißzusatz kommt es zu Riss- und Porenbildung in der Schweißnaht. Es ist daher deutlich zu erkennen, dass bei Metallpulver auf Nickelbasis ein anderes Gefüge entstanden ist.

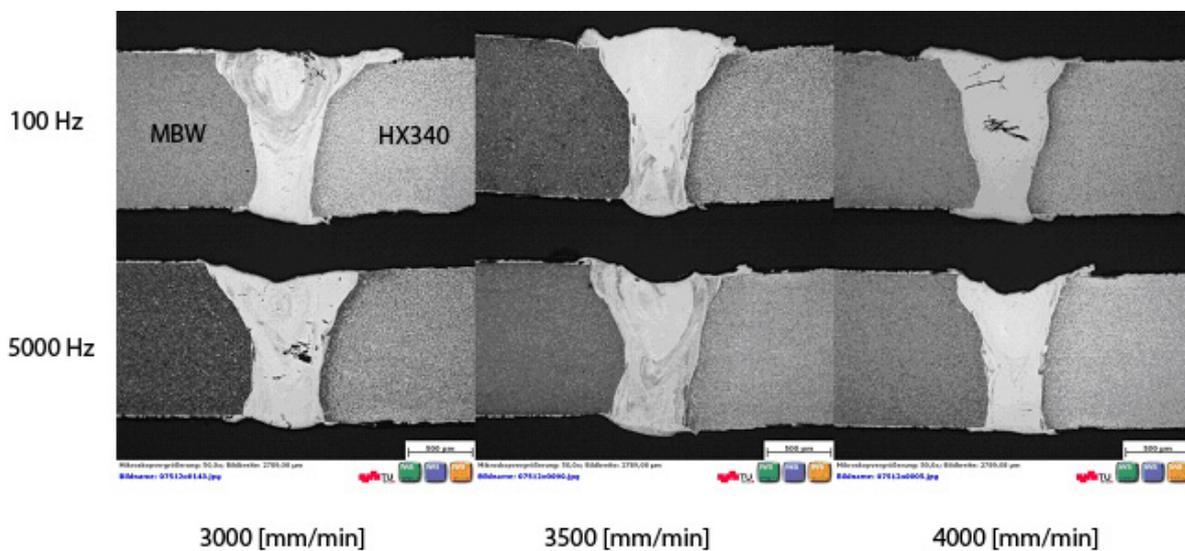


Abbildung 5.4 Ni50 als Zusatzwerkstoff

Bei Ni50 als Schweißzusatz kam es wie beim vorherigen Schweißzusatz (Ni40) zu einem Nahtefall, aber nicht zu einer Überhöhung der Schweißnahtwurzel. Es entstanden auch

hier Risse und Poren in der Schweißnaht. Der Grund dafür dürfte der sehr hohe C-Anteil im Schweißzusatz sein.

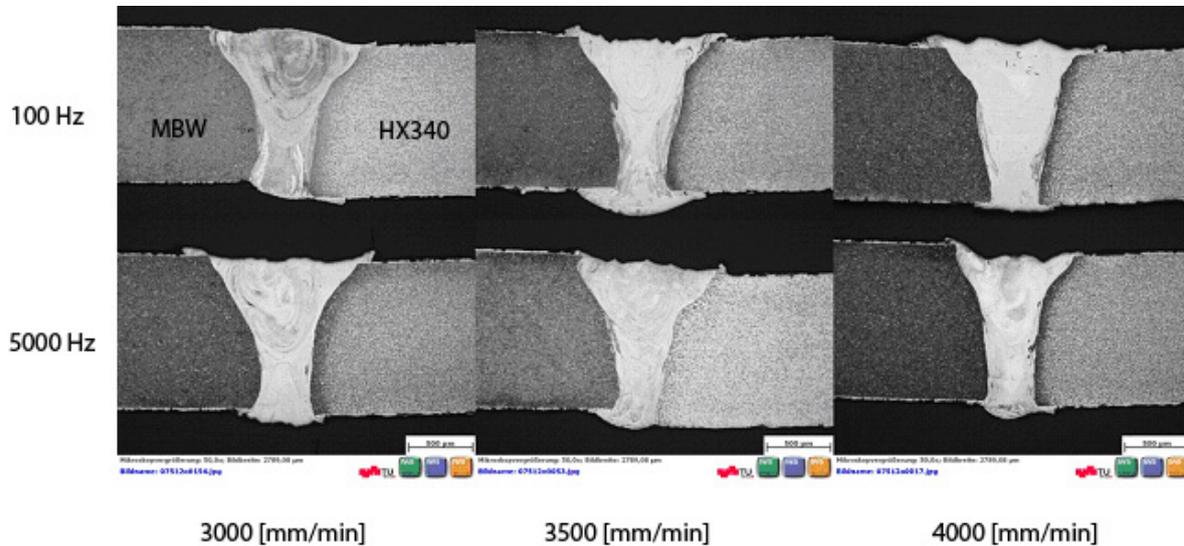


Abbildung 5.5 NiBSi als Zusatzwerkstoff

Bei diesem Schweißzusatz kam es im Pulsbetrieb sowie im Dauerbetrieb zu einer flachen Decklage wobei die Abflachung im Dauerbetrieb stärker war. Mit steigendem Vorschub wurden diese Ausbildungen deutlicher. Im Pulsbetrieb war ein tendenziell unschärferer Übergang zwischen Schweißnaht und Grundwerkstoff zu erkennen.

Wie erwartet war die Schweißbadkinematik die Ursache für die Durchmischung der AISi Beschichtung mit dem Schweißgut. Den Beweis lieferten die Schliffbilder in der Abbildung 5.6. Es wurden Proben verschweißt bei denen die Beschichtung entfernt wurde und mit Proben verglichen die mit einer Beschichtung versehen waren. In der rechten Abbildung ist zu erkennen, dass ein homogener Übergang zwischen Schweißnaht und Grundwerkstoff auf der Seite der Entschichtung auftrat. Es trat keine Ansammlung von AISi in der Schweißnahtwurzel auf.

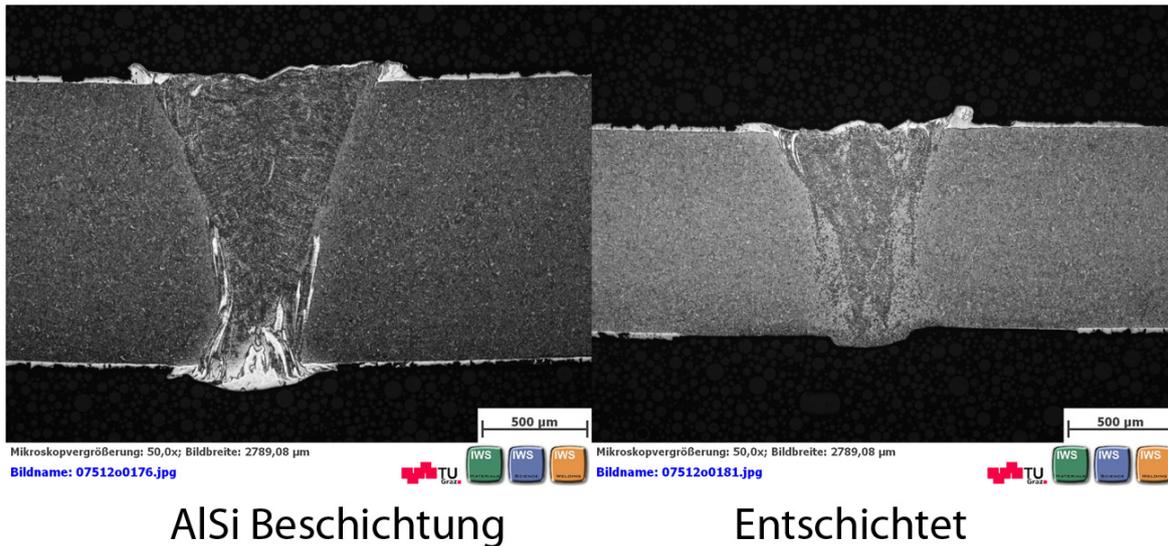


Abbildung 5.6 beschichtete und entschichtete Probe

<b>Vorschub</b>	4000 [mm/min]
<b>Frequenz</b>	100/5000 [Hz]
<b>Hopper</b>	3100 [min <sup>-1</sup> ]
<b>Spalt</b>	0,1 [mm]
<b>Metallpulver</b>	LPW4140

Ni40 und Ni50 enthalten eine höhere Konzentration an Kohlenstoff als NiBSi, während LPW4140 neben einem gleich hohen Anteil an Kohlenstoff einen geringeren Anteil an Silizium und Mangan aufweist. Aufgrund des höheren Anteils an Kohlenstoff wird die Naht spröde und es entstehen Heißrisse. Aufgrund dieser Ergebnisse wurden keine weiteren Untersuchungen mit Ni40 und Ni50 durchgeführt.

#### Fehler beim Schweißen - **Heißrisse**

Heißrisse entstehen durch hohe Temperaturen während oder nach dem Schweißen unter anderem durch niedrigschmelzende Phasen im Bereich der Korngrenzen. Aufgrund dieses Effektes kommt es zu submikroskopischen Gefügeaufweitungen die Heißrisse genannt werden. Diese weisen ein sprödes Bruchverhalten auf und wirken sich daher negativ auf die mechanischen Kennwerte der Schweißnaht aus. [29]

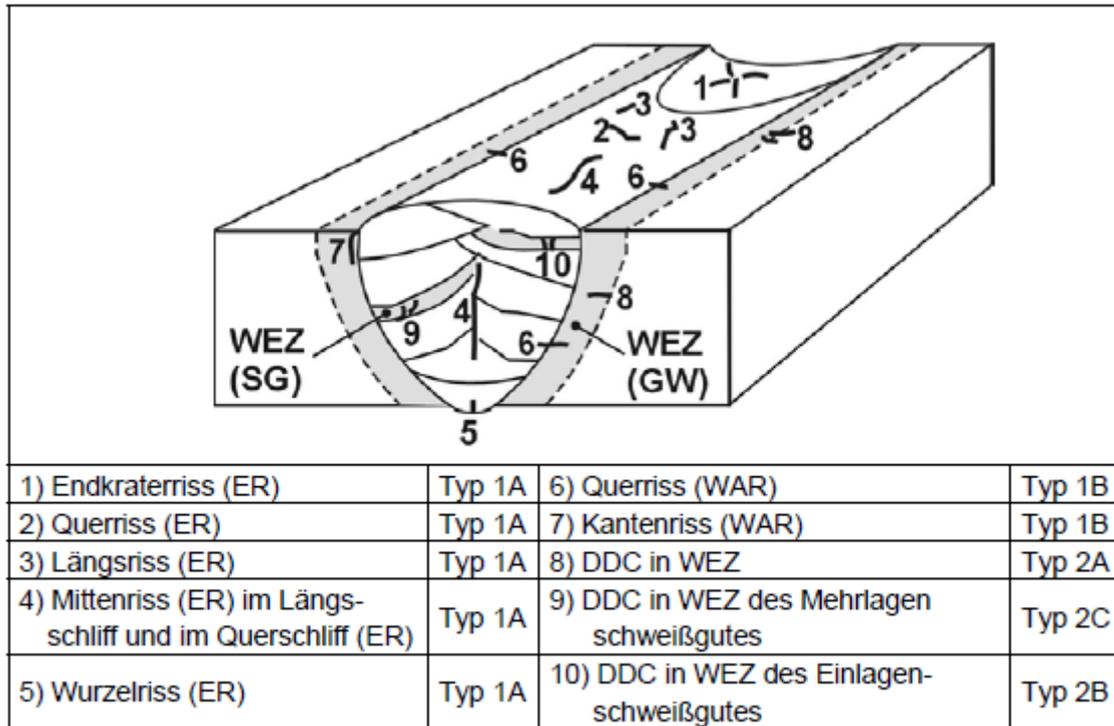


Abbildung 5.7 Bezeichnung von Heißrissen nach ihrer Lage im Schweißgut (SG) oder der Wärmeeinflusszone [29]

Element	Wirkung	Erklärung
Ni	↑	Aufweitung des Temperaturintervalls der Sprödigkeit
Mn	↓	Bildung von MnS ( $T_s \sim 1620\text{ C}$ ) anstelle niedrigschmelzender Sulfidfilme wie Nickelsulfid ( $T_s \sim 790\text{ C}$ ) oder Chromsulfid
	↓	Mn ersetzt Fe in Korngrenzenfilmen und bewirkt dort andere energetischen Verhältnisse
	↓	Mn verhindert die Bildung niedrigschmelzender Silikatfilme auf den Korngrenzen
	↓	Mn führt zu einer feinkörnigeren Erstarrungsstruktur des Schmelzbades
	↑	Bildung niedrigschmelzender Mn-P-Eutektika ( $T_s \sim 960\text{ C}$ )
Si	↑	führt zu niedrigschmelzenden Silikatfilmen auf den Korngrenzen
	↑	Bildung Si-reicher Phasen (Verbindungen) mit niedriger Solidustemperatur auf den Korngrenzen
	↑	fördert dendritische Erstarrungsstruktur
Mo	↓	vermindert die Benetzungsfähigkeit der Austenitkorngrenzen für niedrigschmelzende Phasen
C	↓	in stabilisierten Stählen mit steigendem C-Gehalt Zunahme der Karbidmenge, dadurch homogeneres feinkörnigeres Gefüge

Tabelle 5.1 Einfluss von Legierungs- und Begleitelementen auf die Heißrissanfälligkeit [30]

Ein weiterer Fehler, der innerhalb der Heißrisse auftritt, ist der sogenannte Mittelrippendefekt. Dieser wird in Abbildung 5.8 dargestellt.

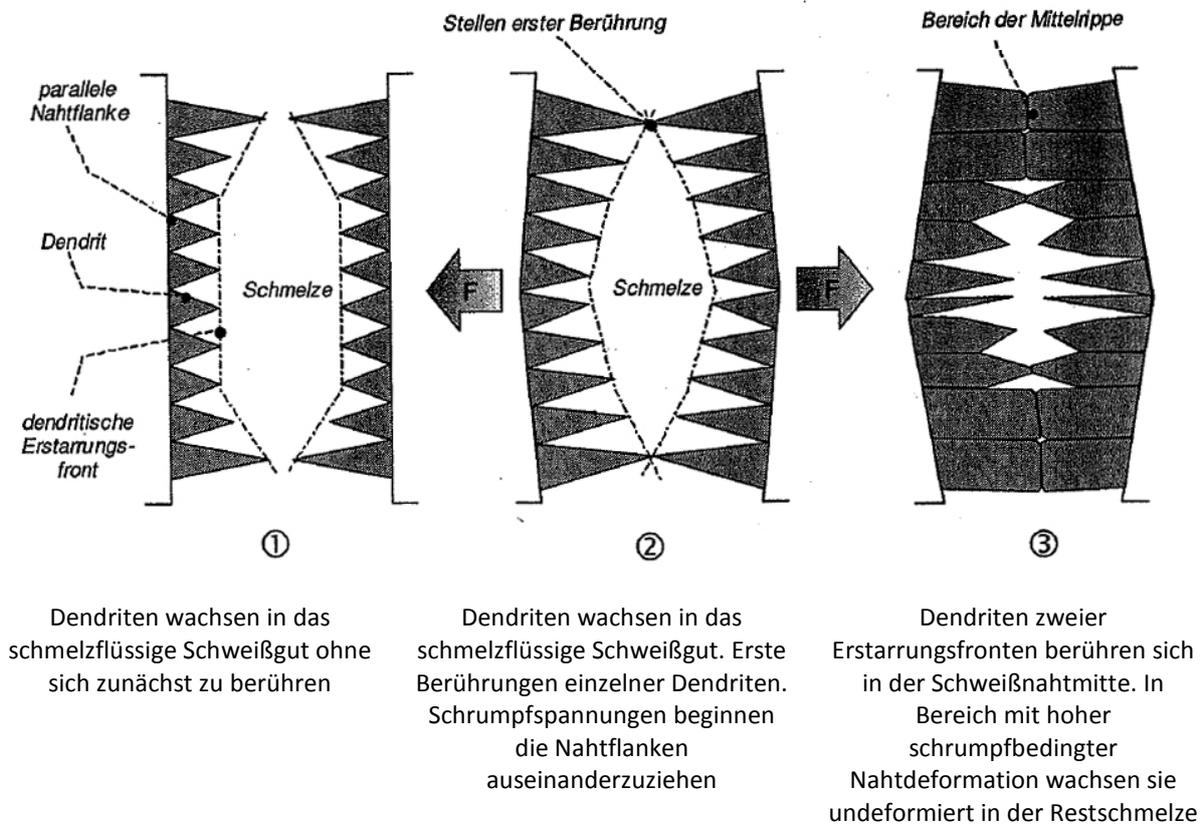


Abbildung 5.8 Mittelrippendefekt [30]

Die Abbildungen (5.9 und 5.10) zeigen die Schweißnaht bei unterschiedlichen Schweißzusätze, sonst jedoch gleichen Schweißparametern. Bei Ni40 und Ni50 sind deutliche Rissbildung und Porenbildung erkennbar, was bei den anderen Schweißzusätzen nicht der Fall ist.

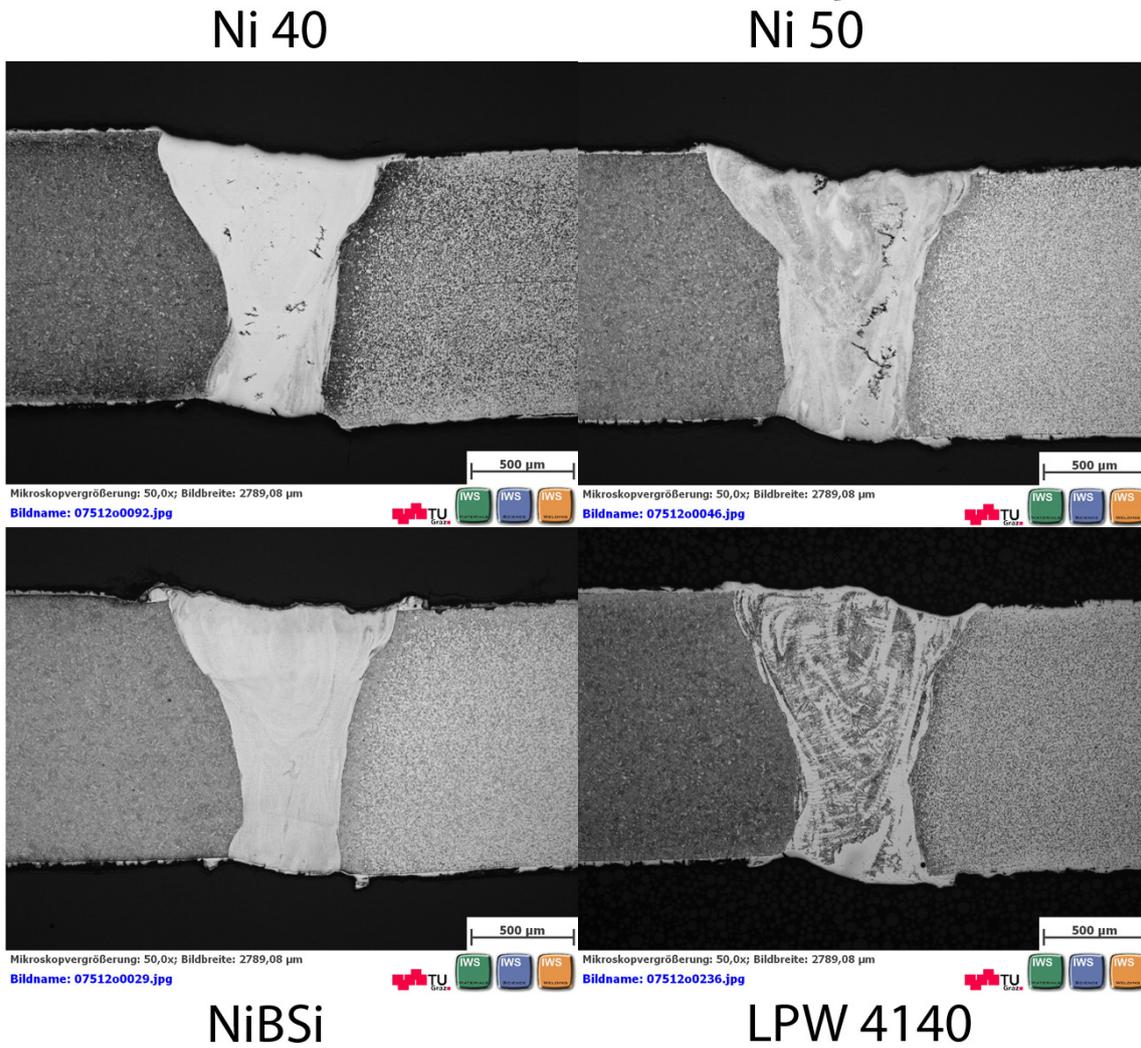


Abbildung 5.9 S Schweißnaht bei unterschiedlichen Schweißzusätzen

<b>Vorschub</b>	3000 [mm/min]
<b>Frequenz</b>	100 [Hz]
<b>Hopper</b>	3100 [min <sup>-1</sup> ]
<b>Spalt</b>	0,1 [mm]

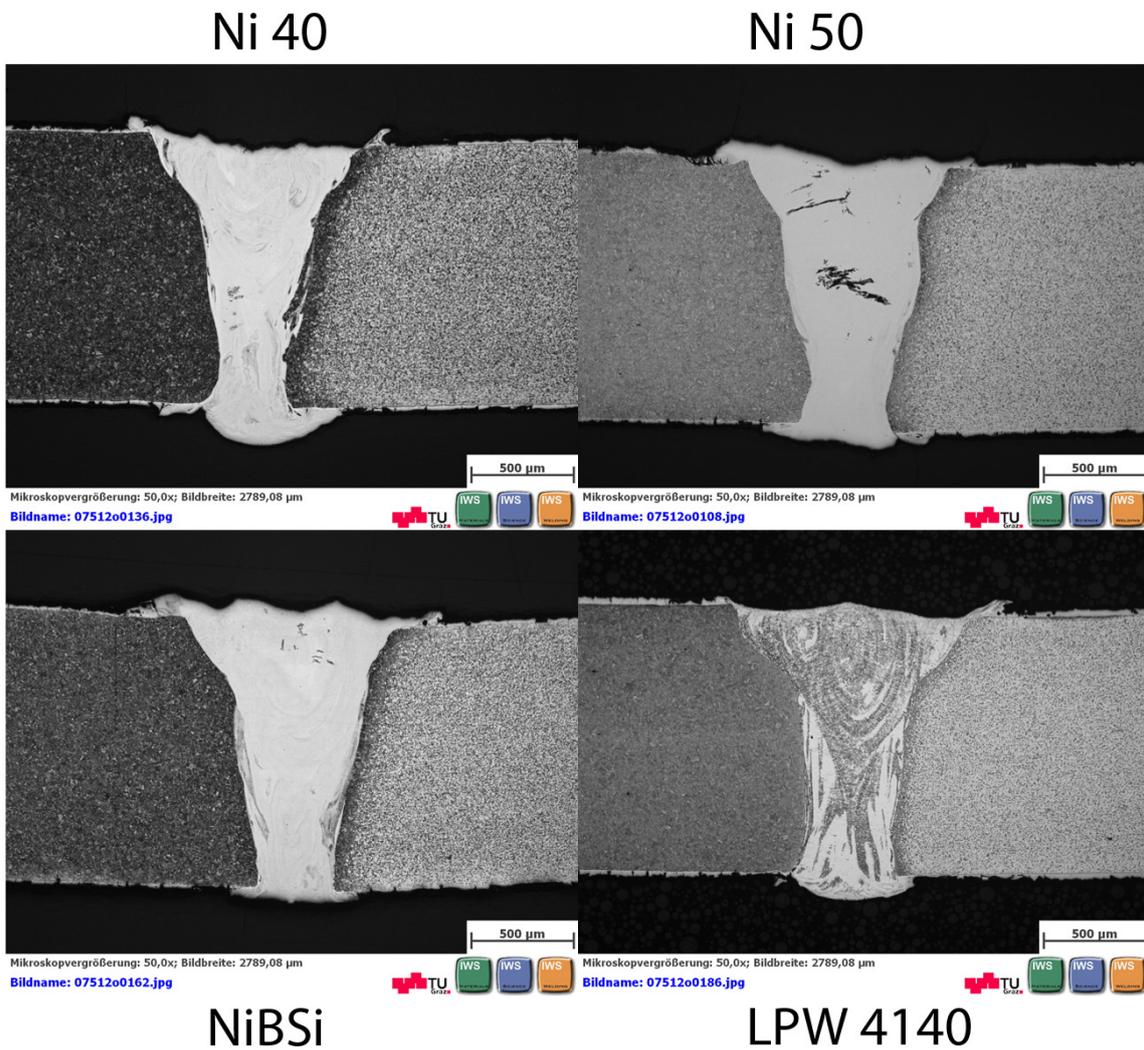


Abbildung 5.10 Schweißnaht bei unterschiedlichen Schweißzusätzen

<b>Vorschub</b>	4000 [mm/min]
<b>Frequenz</b>	100 [Hz]
<b>Hopper</b>	3100 [min <sup>-1</sup> ]
<b>Spalt</b>	0 [mm]

In der Abbildung 5.11 sieht man eine 200-fache Vergrößerung der Schweißnaht bei der es zur Heißrissbildung kommt.

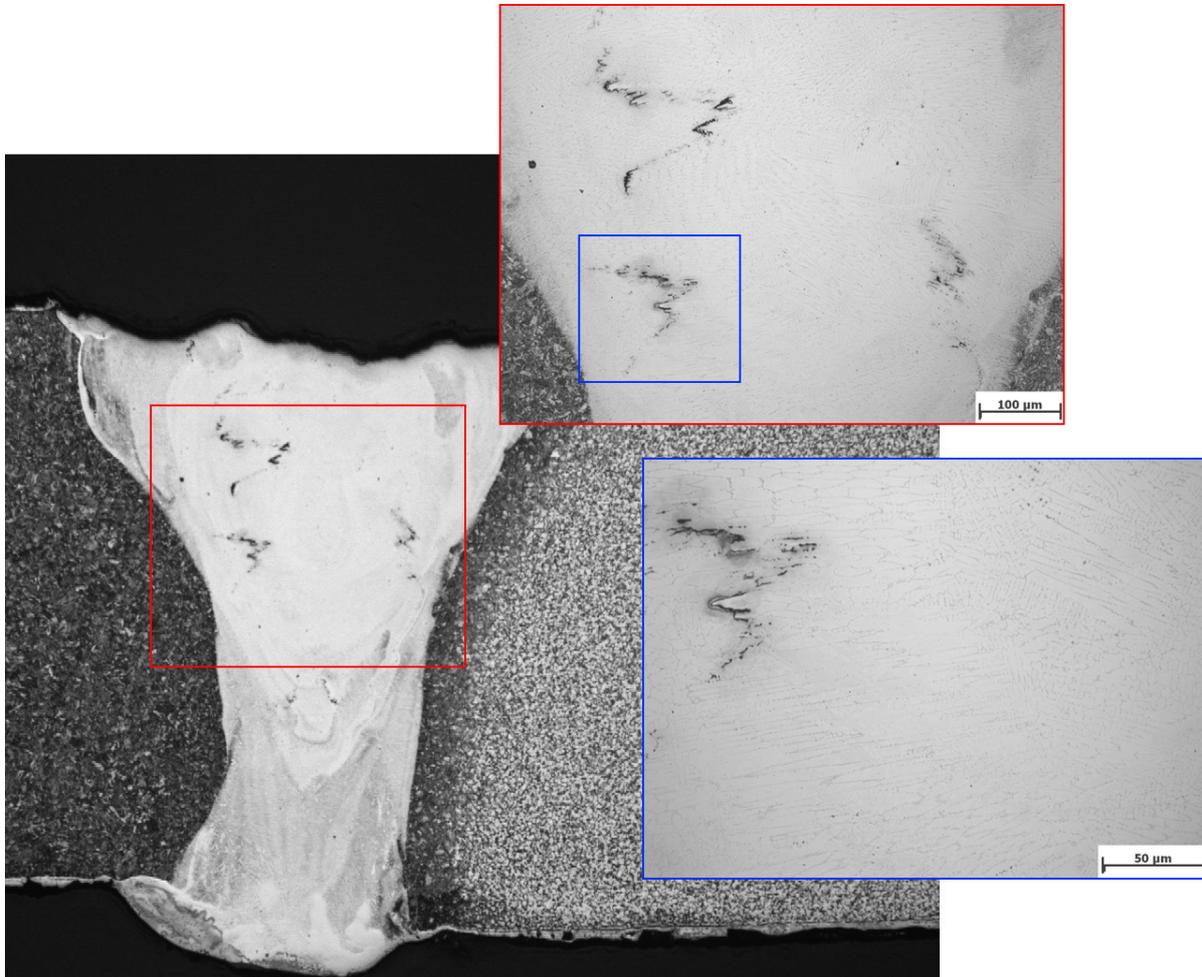


Abbildung 5.11 Heißrissbildung

Die weiteren Schliffbilder befinden sich im Anhang A.

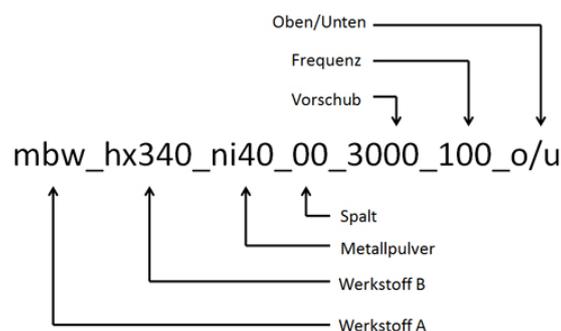
## 5.2 Härtemessung

Die Härtemessung nach der Norm EN 1034 kann mit Einschränkungen zu den zerstörungsfreien Prüfverfahren gezählt werden. Die Härtewerte können in direkten Bezug zum abrasiven Verschleißwiderstand gesetzt werden. Bei manchen Härteverfahren lässt sich auch eine Verbindung zur Zugfestigkeit herstellen. Zur Bewertung der Zähigkeitseigenschaften in kleinen Volumenbereichen dienen Mikro- und Makrohärteprüfverfahren. Bei den statischen Härteprüfverfahren handelt es sich um Eindringverfahren, bei denen abhängig vom Verfahren ein Körper mit definierter Form (Kugel, Pyramide, Kegel) in das Probestück gedrückt wird und dessen Eindringwiderstand bestimmt wird. Zur Bewertung kommen zwei Arten zur Anwendung; bei der ersten Art wird die Prüfkraft auf die Oberfläche bezogen (Brinellhärte, Vickershärte) und bei der zweiten Art wird die bleibende Eindringtiefe eines Eindringkörpers bestimmt (Rockwellhärte).

In der Norm EN ISO 6507-1:2005 bis -4:2005 ist die Härteprüfung nach Vickers (HV) definiert, die bei der vorliegende Arbeit zur Bestimmung der Härte zum Einsatz kommt. Den Eindringkörper beim Vickers Härteverfahren bildet eine gleichseitige Diamantenpyramide die einen Öffnungswinkel von  $136^\circ$  aufweist und mit einer festgelegten Prüfkraft in das Werkstück gedrückt wird. Durch messen der Diagonalen des Abdruckes mittel Mikroskop wird die Eindruckoberfläche berechnet. Die vorgegebene Prüfkraft wird durch die Eindruckoberfläche dividiert und mit dem Faktor 0,1891 multipliziert und ergibt die Vickershärte. [31][32]

Wie schon im Kapitel 1 beschrieben, kommt es bei erhöhtem AISi Gehalt zur Minderung der Härte in der Schweißnaht. Die Beschichtung hat einen Einfluss auf die Härte der Schweißnaht. Es kommt dort zu Einbußen bis zu 50% HV 0,1. In den Abbildungen 5.13 ist der Härteverlauf in der Schweißnaht im oberen und unteren Teil der Probe dargestellt. An der Stelle an der die Härte stark abnimmt ist anzunehmen dass die Diamantpyramide sich in einem Bereich mit hohem AISi Anteil befindet, oder auf ein Gebiet mit Poren und Rissen gestoßen ist. Weiter Härteverläufe befinden sich im Anhang C.

Jedes Bild ist nach folgender Definition mit den jeweiligen Schweißparametern gekennzeichnet:



Der Härteverlauf wäre ideal, wenn die Härte in der Schweißnaht stetig bis auf die Härte des weicheren Grundwerkstoffes abfällt, wie diese in der Abbildung 5.12 dargestellt ist. Ziel ist es, unstetige Härtesprünge zu vermeiden.

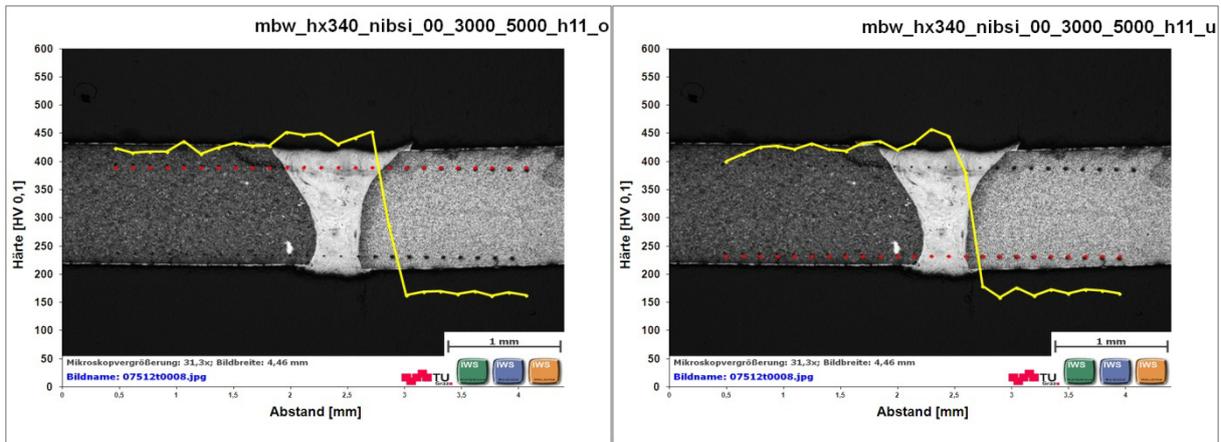


Abbildung 5.12 Härteverlauf

Bei Pulvern auf Nickelbasis, das sind Ni40, Ni50 und NiBSi, entsprechen die Härteverläufe bei der Verbindung von 22MnB5/HX340 dem geforderten Ziel. (Abbildungen 5.13 und 5.14)

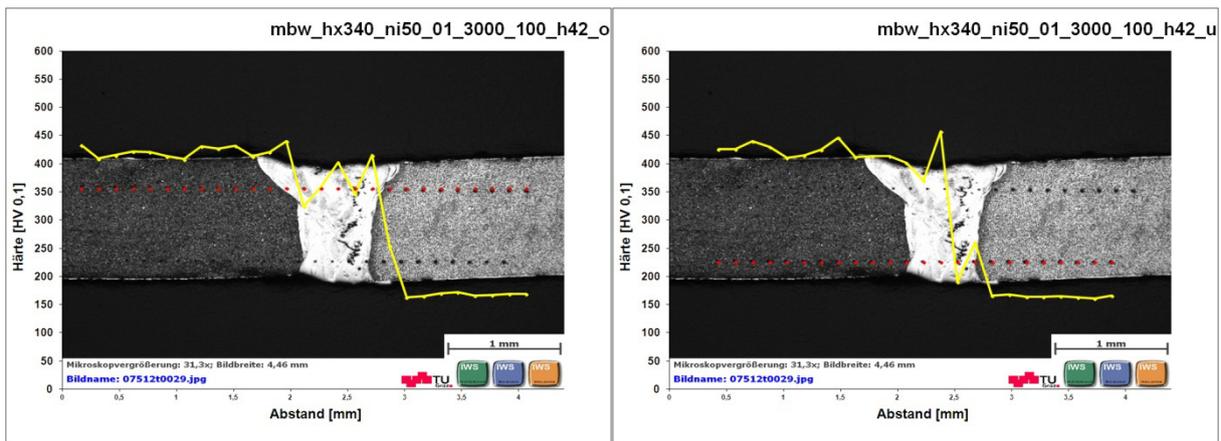


Abbildung 5.13 Probe H42

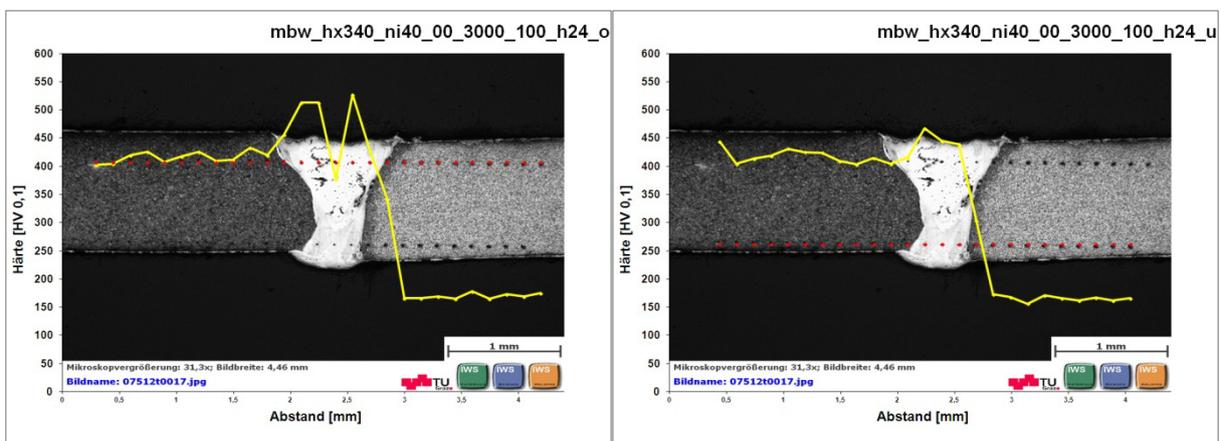


Abbildung 5.14 Probe H24

Das Pulver auf Eisenbasis (LPW4140) wies beim Verschweißen der gleichen Grundwerkstoffe 22MnB5/22MnB5 einen Härteverlauf auf bei dem es zum Abfall der Härte in der Schweißnaht kommt. Dieser Verlauf entspricht bei dieser Kombination nicht den Vorgaben.

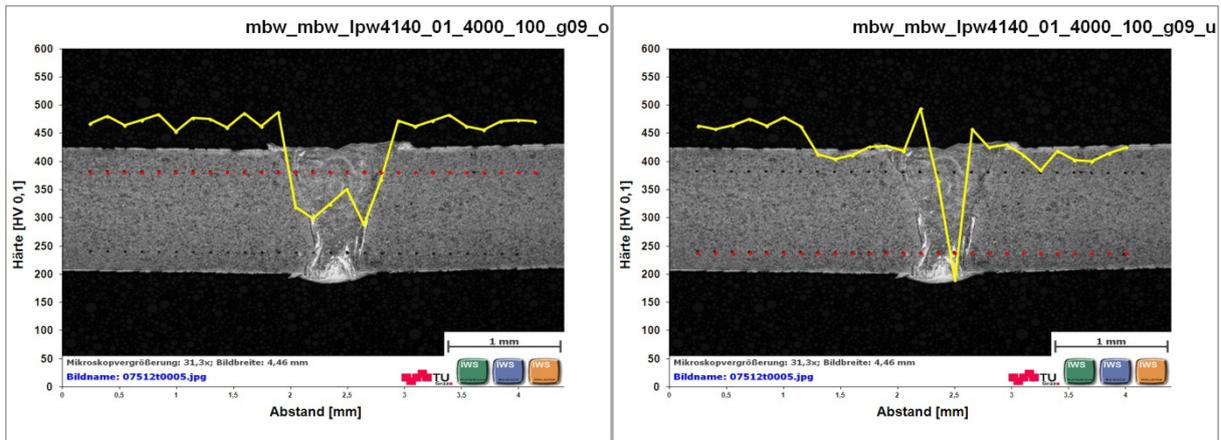


Abbildung 5.15 Probe G09

Bei der Verbindung der beiden Grundwerkstoffe 22MnB5/HX340 in Kombination mit dem Pulver auf Eisenbasis (LPW4140) ergab sich ein zufriedenstellender Härteverlauf, wobei das Härteniveau im Bereich der Schweißnaht noch etwas höher liegen könnte.

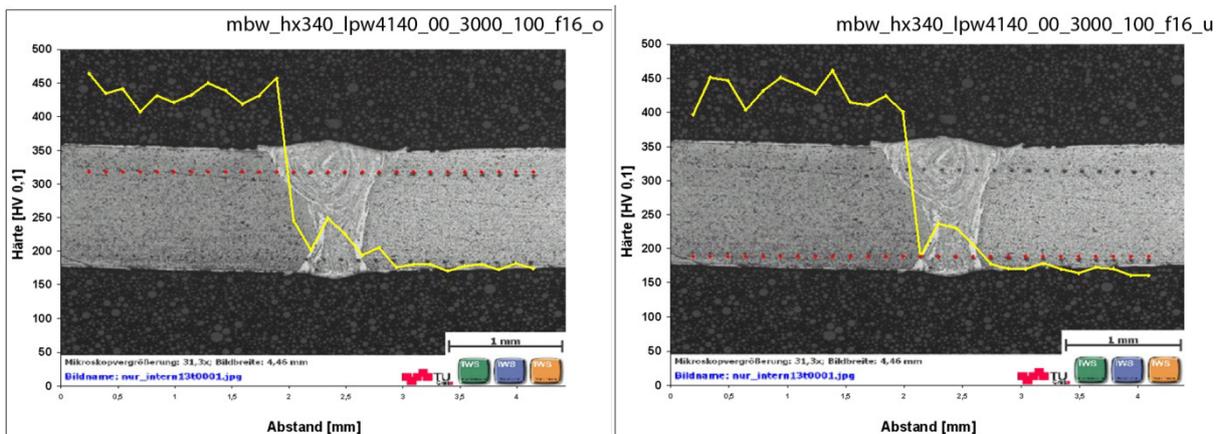


Abbildung 5.16 Probe F16

### 5.3 REM / EDX Analyse

Bei der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (engl. **energy dispersive X-ray spectroscopy**: EDX; EDXS oder EDS) handelt es sich um ein chemisches Analyseverfahren, mit dem es möglich ist Elemente zu detektieren. Es ist sowohl möglich die Art des Elementes, sowie dessen Anteil in Probenmaterial zu bestimmen. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Schnelligkeit, da diese Vorrichtung in Kombination mit einem Rasterelektronenmikroskop verwendet werden kann. Mit dem EDX ist eine sehr genau Bereichsmessung möglich. [17]

Um die Verteilung der Legierungselemente zu untersuchen, wurde eine EDX Analyse an der Schweißnaht durchgeführt. Insgesamt wurden mit dem Rasterelektronenmikroskop vier Proben (H24, H36, G10 und H09) untersucht. Das rote Quadrat stellt den Bereich dar der untersucht wurde.

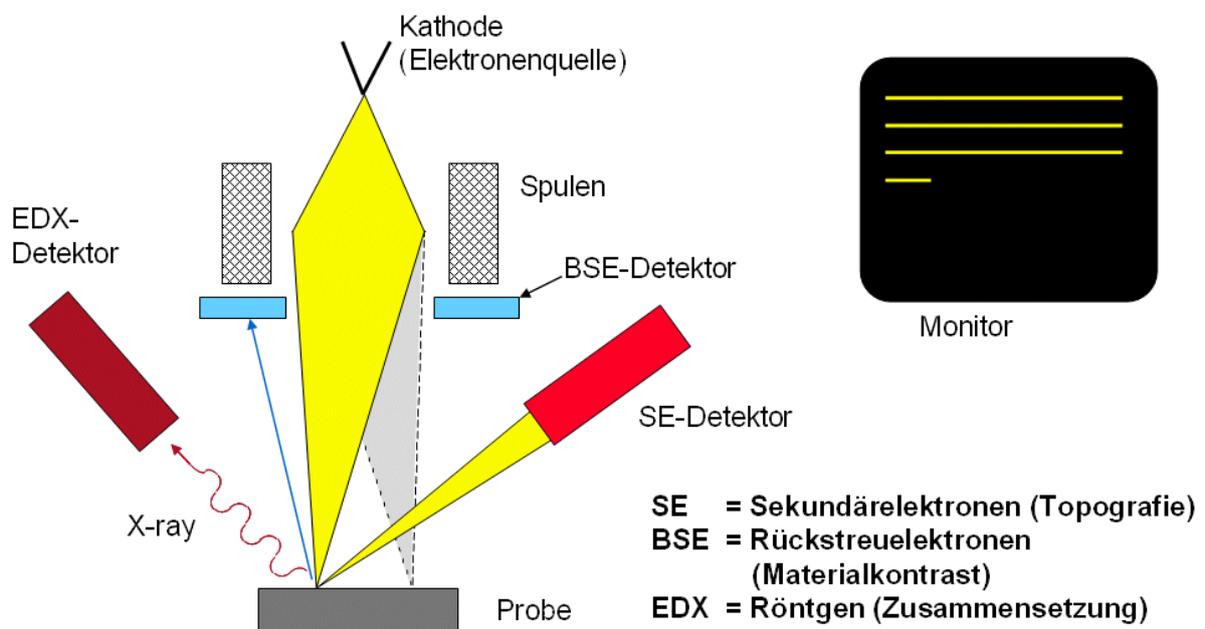


Abbildung 5.17 EDX Prinzip [33]

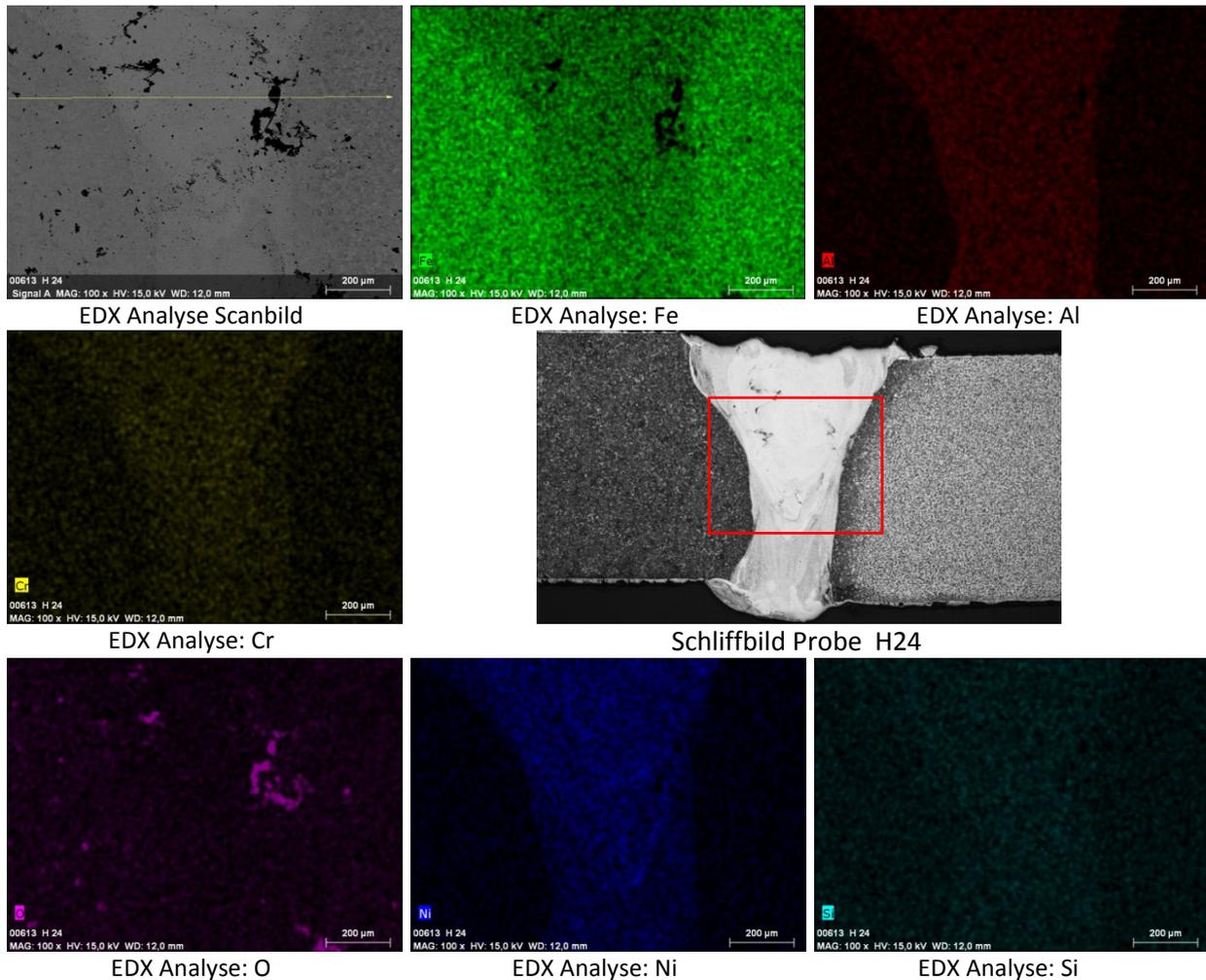
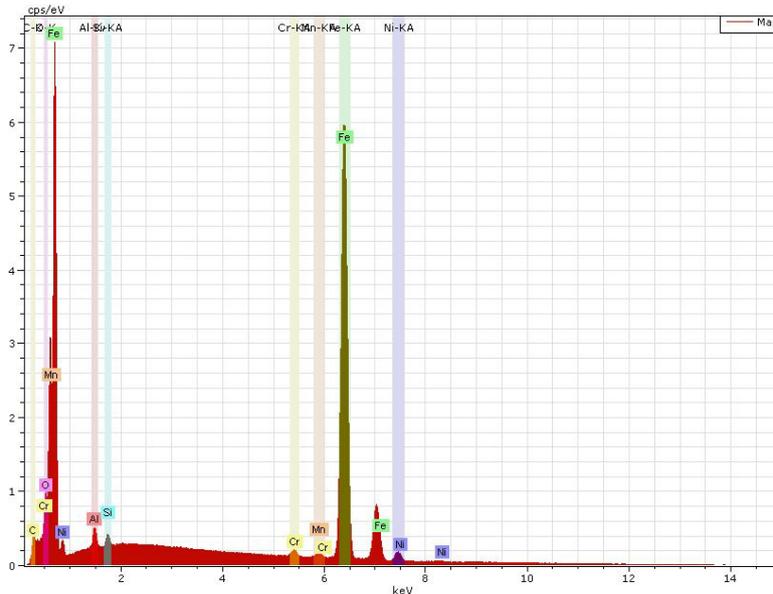
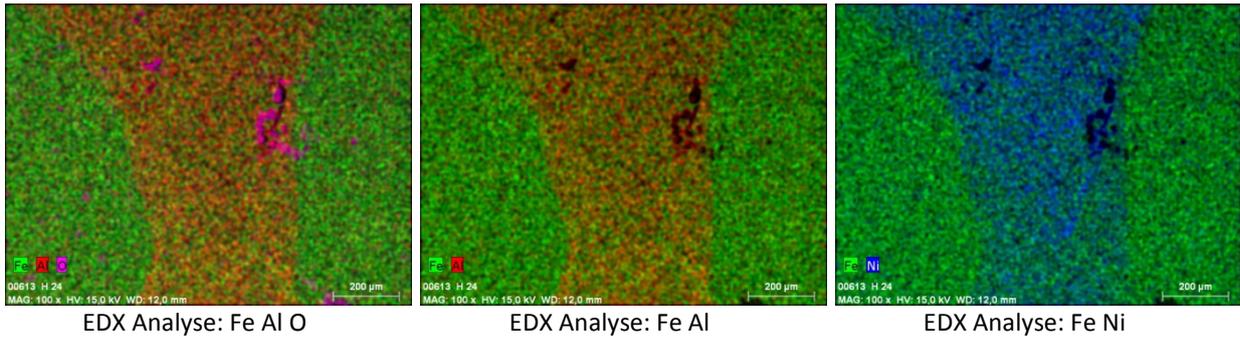


Abbildung 5.18 EDX Analyse Probe H24

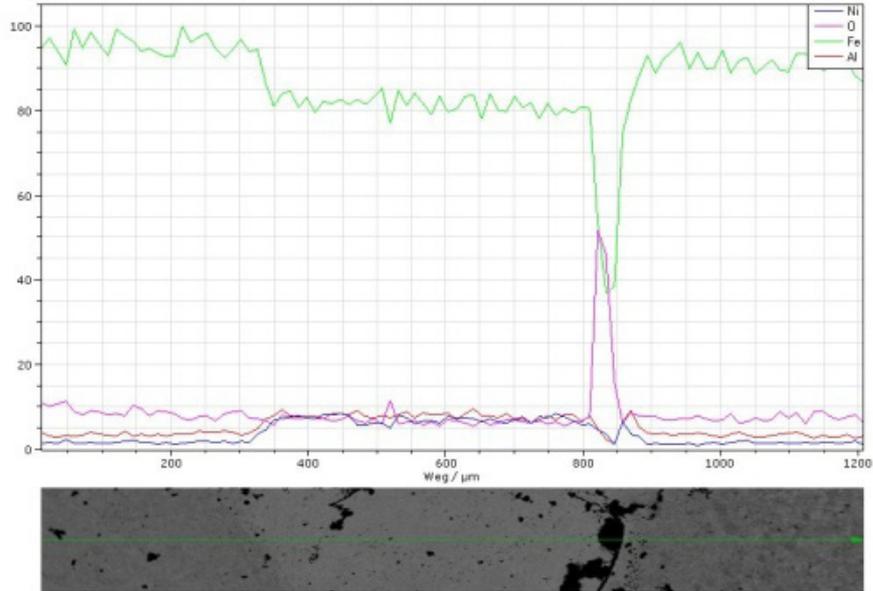
Aus den Analysen ist ersichtlich, dass es zu einer erhöhten Konzentration von Aluminium, Chrom und Nickel in der Schweißnaht gekommen ist. Der Siliziumgehalt in der Schweißnaht war nur ein wenig höher als im Grundwerkstoff. Die Konzentration von Eisen in der Schweißnaht fiel jedoch ab. Bereiche mit erhöhtem Sauerstoffgehalt deuteten auf Risse hin (Abbildung 5.18). In der Abbildung 5.19 sieht man die Legierungen im Verhältnis zueinander und einen Linescan der Probe.

Die Probe H24 wurde mit folgenden Parametern verschweißt

<b>Vorschub</b>	3000 [mm/min]
<b>Frequenz</b>	100 [Hz]
<b>Hopper</b>	3100 [min <sup>-1</sup> ]
<b>Metallpulver</b>	Ni40



Zusammensetzung EDX-Spektrum



EDX Analyse: LineScan

Abbildung 5.19 EDX Analyse Probe H24

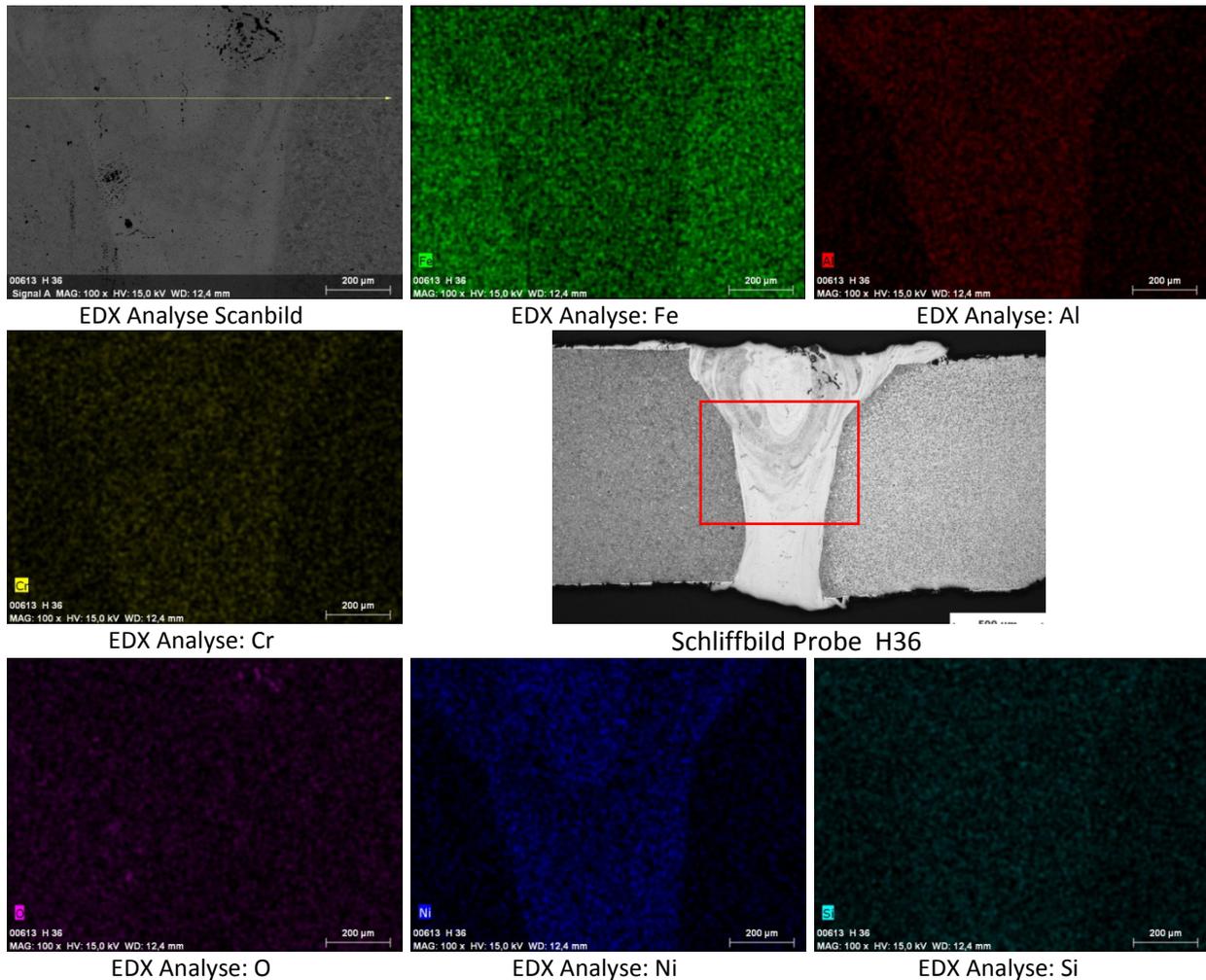
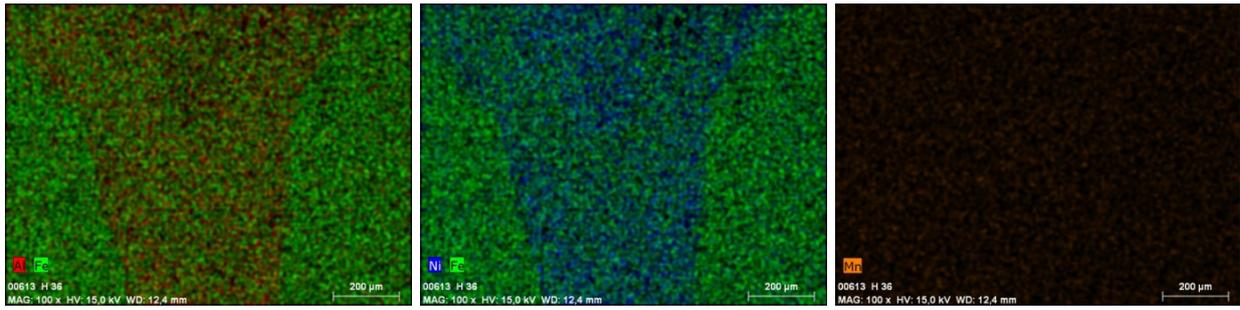


Abbildung 5.20 EDX Analyse Probe H36

In der Abbildung 5.20 sieht man einen Anstieg der Elemente Chrom Nickel und vor allen von Aluminium in der Schweißnaht. Der Siliziumgehalt in der Schweißnaht ist nur ein wenig höher als im Grundwerkstoff. Die Konzentration von Eisen in der Schweißnaht fällt auch in dieser Probe ab. Der Sauerstoffgehalt in der Naht bleibt konstant. In der Abbildung 5.21 sind eine Linescan der Probe und ein EDX-Spektrum dargestellt.

Die Probe H36 wurde mit folgenden Parametern verschweißt

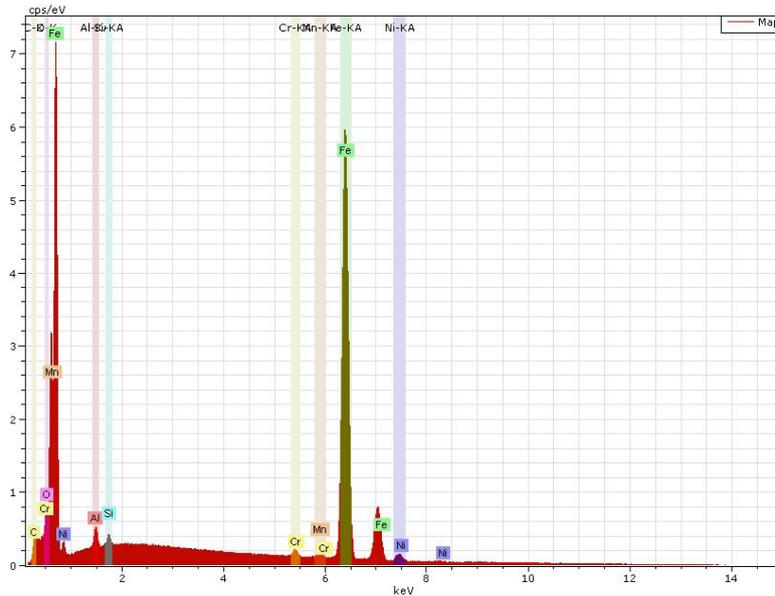
<b>Vorschub</b>	3000 [mm/min]
<b>Frequenz</b>	100 [Hz]
<b>Hopper</b>	3100 [min <sup>-1</sup> ]
<b>Metallpulver</b>	Ni50



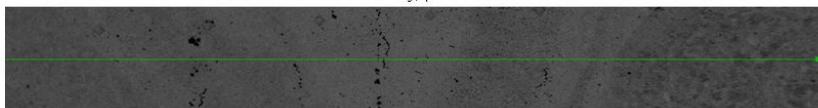
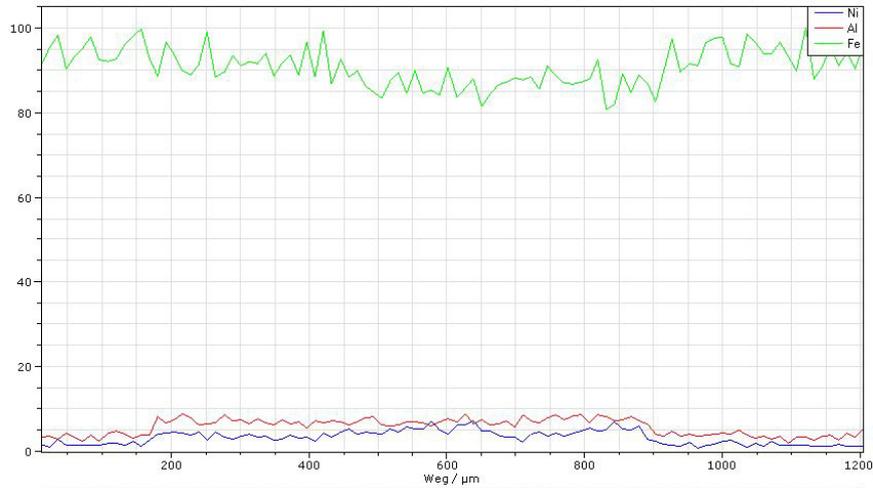
EDX Analyse: Fe Al

EDX Analyse: Fe Ni

EDX Analyse: Mn



Zusammensetzung EDX-Spektrum



EDX Analyse: LineScan

Abbildung 5.21 EDX Analyse Probe H36

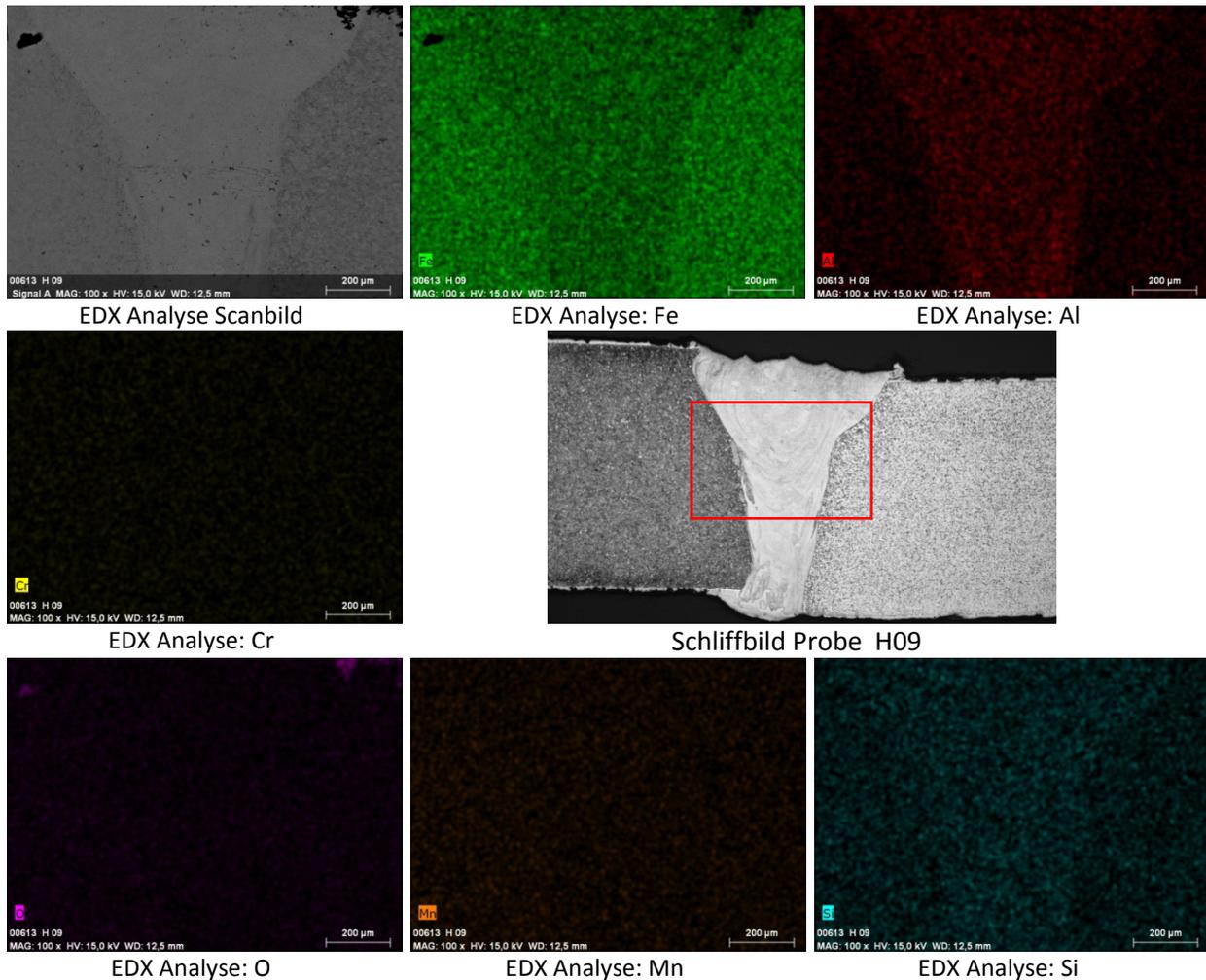


Abbildung 5.22 EDX Analyse Probe H09

Beim Schweißen mit NiBSi Metallpulver waren die Elemente Mangan, Chrom und Sauerstoff homogen verteilt. Der Siliziumgehalt war ein wenig höher als im Grundwerkstoff und der Anteil an Aluminium und Nickel deutlich höher als im Grundwerkstoff. Die Konzentration von Eisen fiel in der Schweißnaht ab. In der Abbildung 5.23 ist eine EDX Analyse (Fe-Al, Fe-Ni) sowie ein Linescan mit und ohne Eisen Anteil dargestellt.

Die Probe H09 wurde mit folgenden Parametern verschweißt

<b>Vorschub</b>	3500 [mm/min]
<b>Frequenz</b>	5000 [Hz]
<b>Hopper</b>	3100 [min <sup>-1</sup> ]
<b>Metallpulver</b>	NiBSi

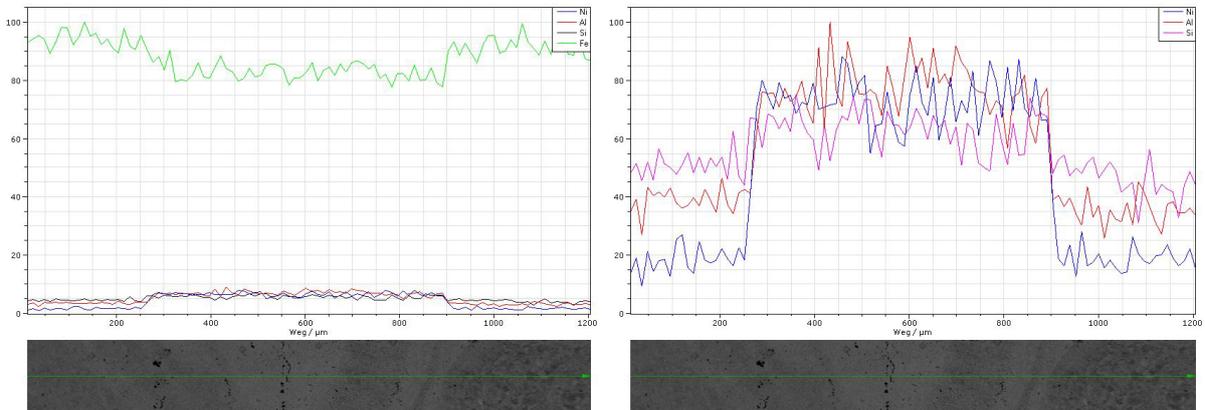
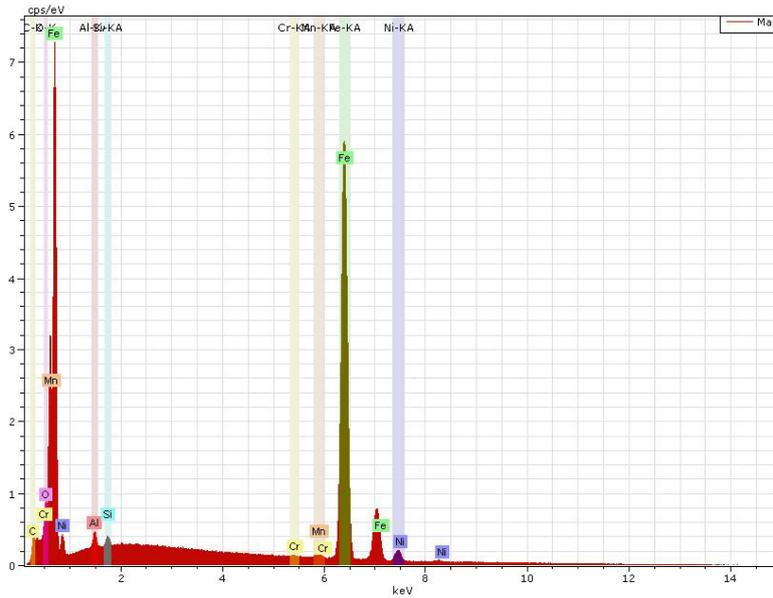
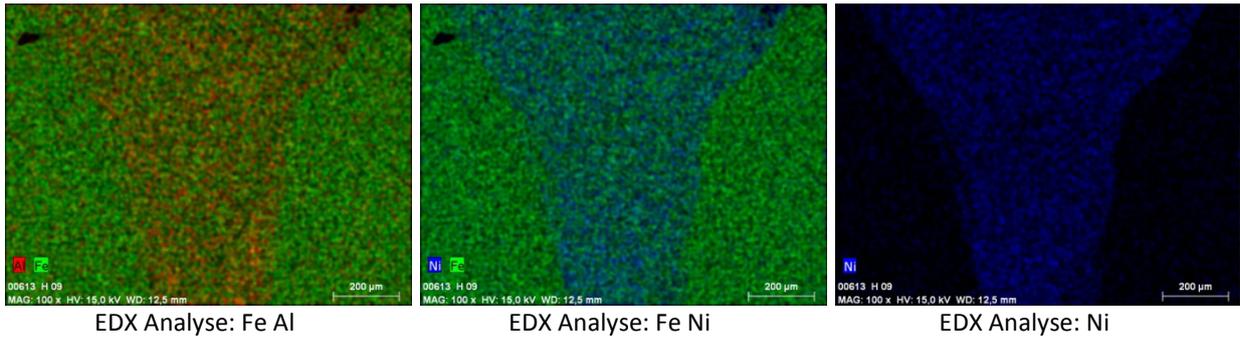


Abbildung 5.23 EDX Analyse Probe H09

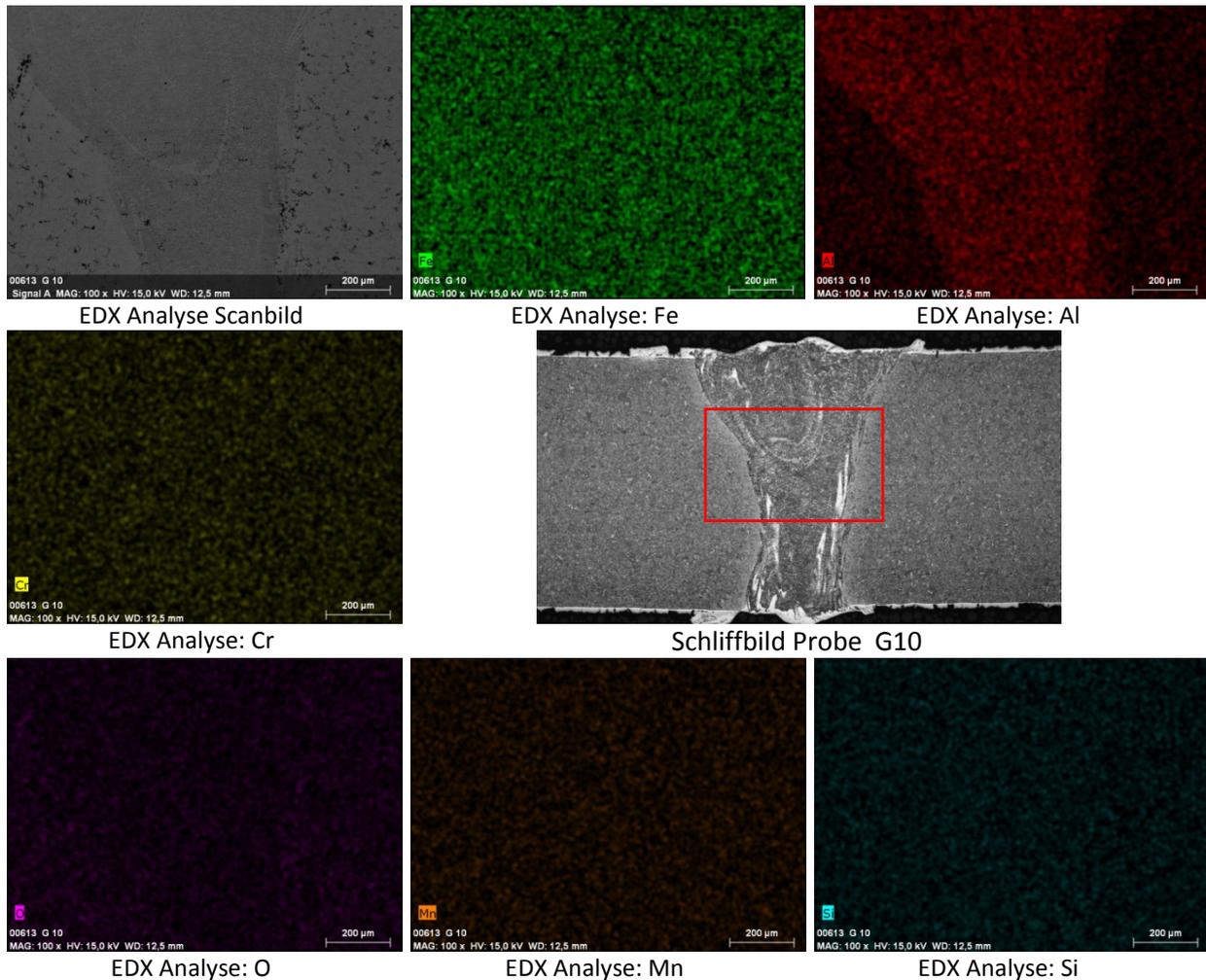
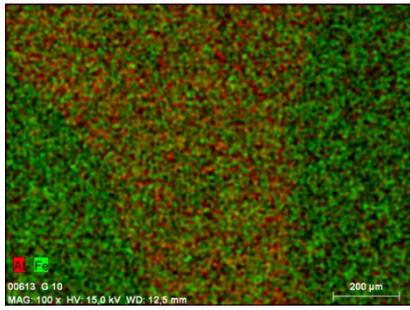


Abbildung 5.24 EDX Analyse Probe G10

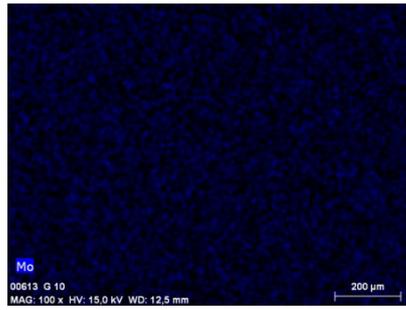
Da das Pulver LPW4140 auf Eisenbasiswerkstoff basiert, kommt es zu keinem Abfall der Eisenkonzentration in der Schweißnaht, was auch aus Abbildung 5.24 ersichtlich ist.. In der Abbildung 5.24 sieht man weiteres, dass auch die Anteile der Elemente Mangan, Silizium, Chrom und Sauerstoff gleichmäßig verteilt sind. Nur beim Aluminium kommt es wieder zu einem Anstieg in der Schweißnaht. In Abbildung 5.25 ist ein Linescan mit und ohne Eisenanteil dargestellt.

Die Probe G10 wurde mit folgenden Parametern verschweißt

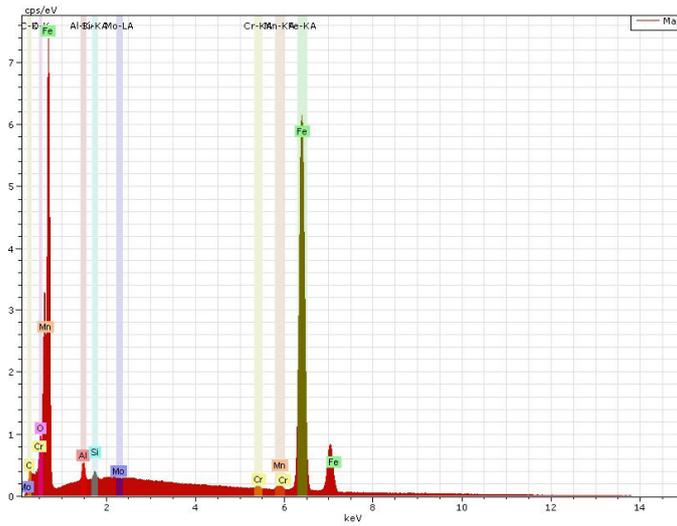
<b>Vorschub</b>	3500 [mm/min]
<b>Frequenz</b>	5000 [Hz]
<b>Hopper</b>	3100 [min <sup>-1</sup> ]
<b>Metallpulver</b>	LPW4140



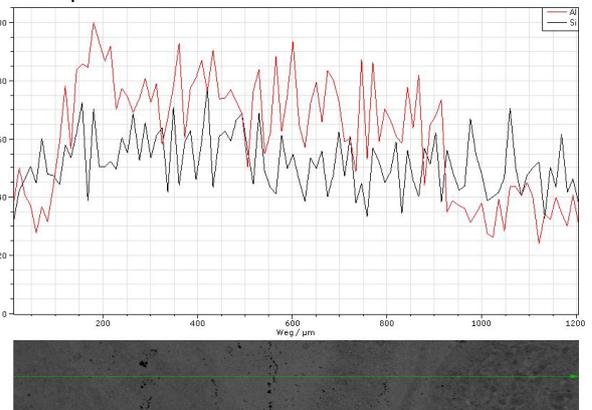
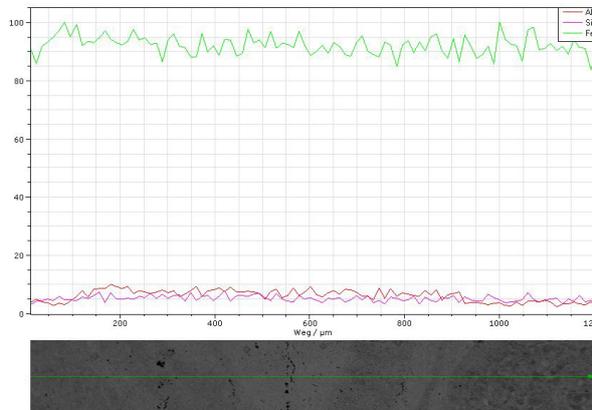
EDX Analyse: Fe Al



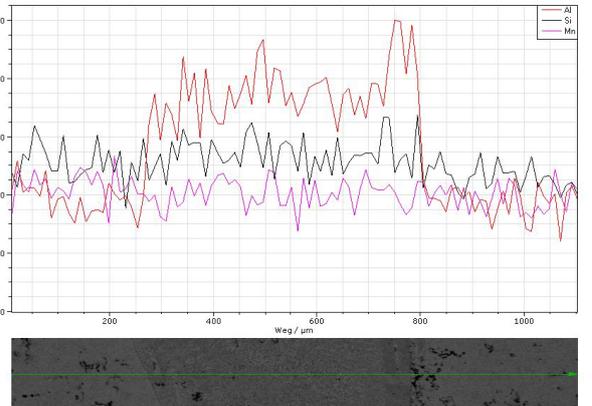
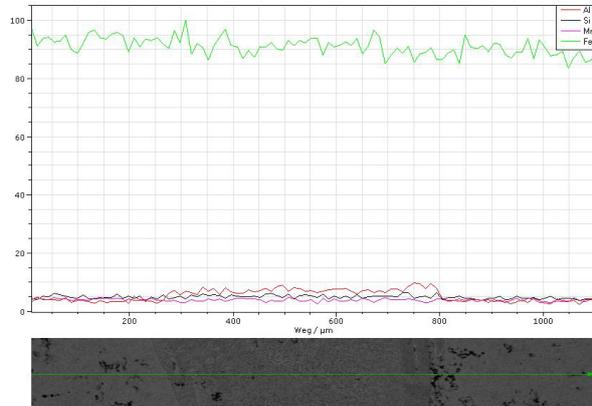
EDX Analyse: Mo



Zusammensetzung EDX-Spektrum



EDX Analyse: LineScan 1 mit und ohne Fe



EDX Analyse: LineScan 2 mit und ohne Fe  
Abbildung 5.25 EDX Analyse Probe G10

Auffällig ist, dass im Bereich der mit FeAl angereicherten Zone, wie in der oberen EDX Analyse (Abbildung 5.25) dargestellt ist, keine besonders hohe Konzentration von Aluminium vorliegt.

Es wird vermutet, dass es durch die Wärmebehandlung zu einer Diffusion von Aluminium in den Bereich der Schweißnaht kommt. Um dies zu prüfen wurden weitere Versuche durchgeführt. Dabei wurden die geschweißten Platinen mit fünf und beziehungsweise 20 Minuten im Ofen wärmebehandelt. Anschließend erfolgte ein Vergleich mittels EDX-Analyse, wobei eine Schweißplatte ohne Wärmebehandlung die Referenz bildete. Die Abbildung 5.25 zeigt, dass der durchschnittliche Aluminiumanteil innerhalb der Schweißnaht bei der Probe ohne Wärmebehandlung bei circa zehn Prozent liegt. In der nadelförmigen FeAl Zone wurden sogar ein Spitzenwert von 18 Prozent gemessen. Bei der Probe mit fünf minütiger Wärmebehandlung lag der Aluminiumanteil unter zehn Prozent. Unstetige Spitzenwerte sind trotz unterschiedlichem Gefüge nicht mehr eindeutig zu erkennen. Abbildung 5.28 zeigt, dass der Anteil an Aluminium in der Schweißnaht bei einer Wärmebehandlungsdauer von 20 Minuten ähnlich wie in der Probe mit fünfminütiger Wärmebehandlung ist. Auch hier sind keine eindeutigen Spitzen erkennbar. Es kam jedoch zur Ausbildung einer neuen großflächigeren Gefügestruktur die einen Aluminiumanteil von 10 bis 14 Prozent aufwies. Dieser Tatsache bestätigt die vorher erwähnte Vermutung der Diffusion von Aluminium während der Wärmebehandlung.

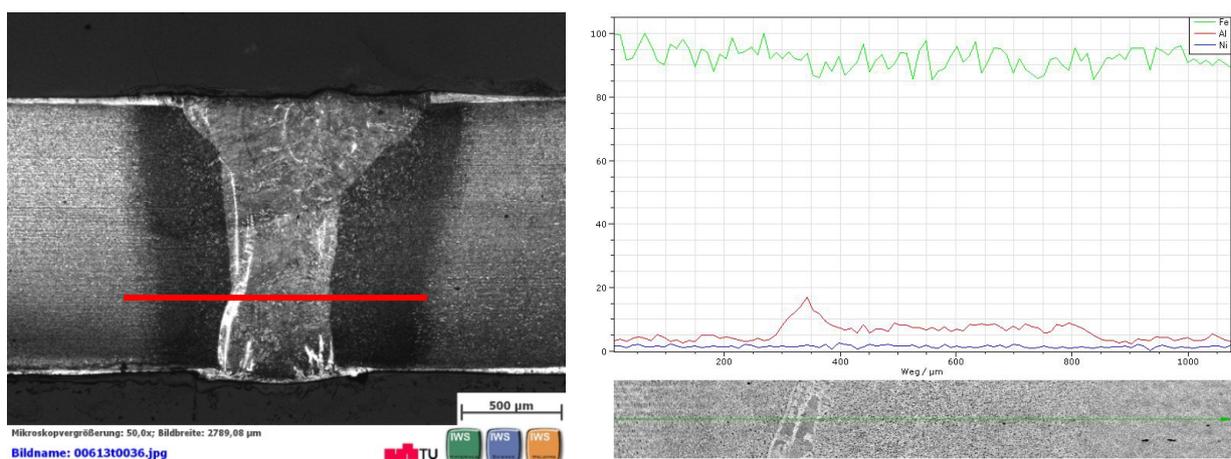


Abbildung 5.26 EDX-Analyse Probe ohne Wärmebehandlung

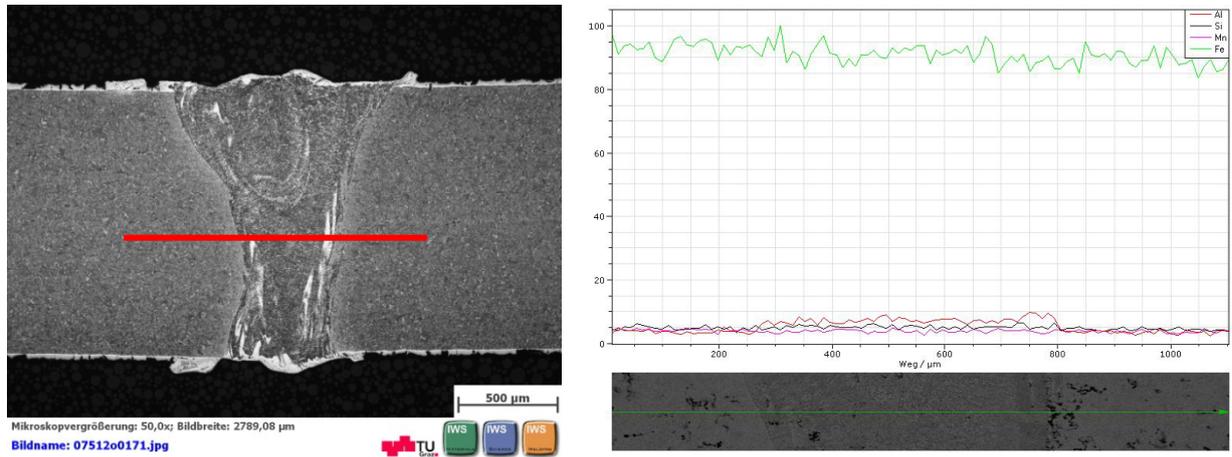


Abbildung 5.27 EDX-Analyse Probe mit Wärmebehandlung 5min

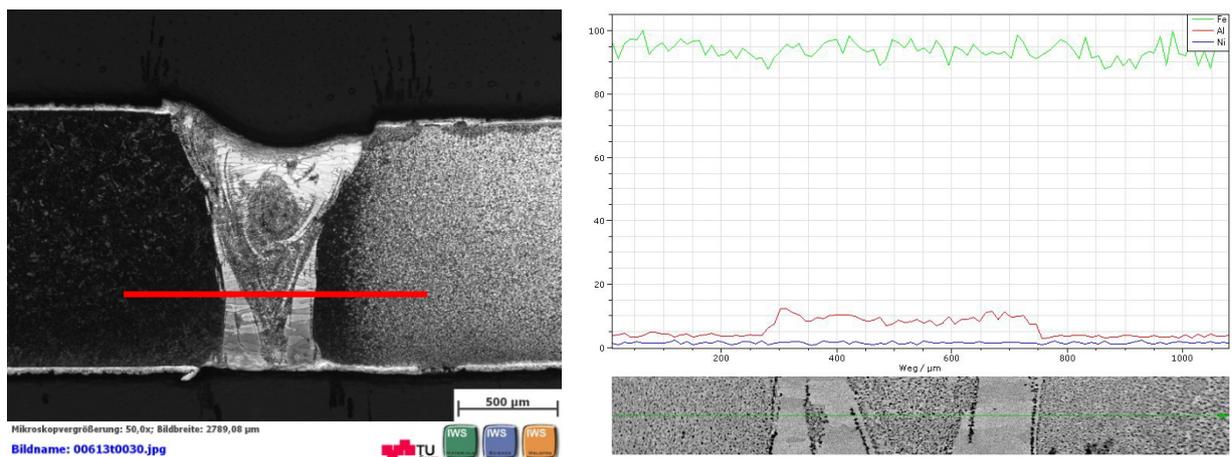


Abbildung 5.28 EDX-Analyse Probe mit Wärmebehandlung 20min

## 5.4 Biegeversuche

Unter dem Biegeversuch versteht man gemäß [EN 910] eine einachsige Verformung die eine inhomogene Spannungs- und Dehnungsverteilung zur Folge hat. Damit werden Werkstoffeigenschaften ermittelt, die bei einachsigen Biegespannungen relevant sind. Je nach Art des Werkstoffes -duktile oder spröde- werden verschiedenen Kennwerte gewonnen. Während bei duktilen Werkstoffen die Bestimmung der Biege-Fließgrenze und des größtmöglichen Biegewinkels im Vordergrund stehen, ist bei spröden Werkstoffen die Biegefestigkeit maßgebend. [32]

### 5.4.1 Aufbau- Verfahrens-anweise

Bei der Biegeprobe wurden aus den verschweißten Blechplatinen Proben mit dem Abmessungen von 20 x 100 mm entnommen und an der Biegemaschine Trumpf TruBend 7036 geprüft. Da die Festigkeiten und Fließspannungen der beiden als TWB verschweißten Platinen ungleich waren, konnte die Probe nicht mit dem üblichen 3-Punkt Biegeversuch getestet werden. Folgende Abbildung zeigt Versuche an 3-Punkt-Biegegesenk am Institut für Werkzeugtechnik & Spannlose Produktion.



**HX340 - MBW** Probe H07



**MBW - MBW** Probe H03

Abbildung 5.29 Biegeprobe

Deshalb wurde gemäß der Norm EN ISO 7438 eine Biegevorrichtung mit einem Klemmmechanismus aufgebaut, die am Institut für Werkzeugtechnik & Spannlose Produktion entwickelt wurde und in der Abbildung 5.30 dargestellt ist. [34]



Abbildung 5.30 Biegevorrichtung

Der Zusammenhang zwischen dem Biegewinkel und dem Stempelweg wird in Tabelle 5.2 dargestellt. Die Konstruktionszeichnung der Biegevorrichtung befindet sich im Anhang E. Der Radius des oberen und der unteren Werkzeuges beträgt 4mm und 1mm.

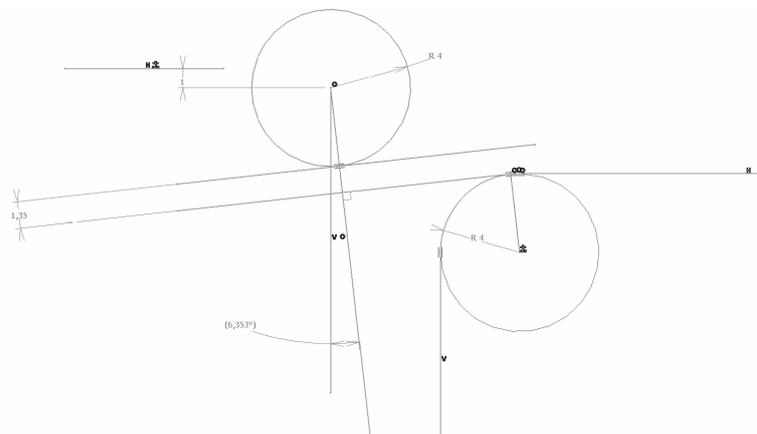


Abbildung 5.31 CATIA Biegevorrichtung

In Tabelle 5.2 ist die Winkelveränderung um den sich die Probe nach jedem Biegevorgang ändert berechnet und aufgelistet. Die komplette Tabelle befindet sich im Anhang B.

Tiefe	R=1mm	R=4mm
1mm	14°	6,5°
2mm	29°	13,5°
3mm	44°	21°
4mm	56°	30°
5mm	64,5°	39°
6mm	70,5°	49°
7mm	74,5°	59°
8mm		69°
9mm		77,5°
10mm		83°

Tabelle 5.2 Umrechnung Tiefe-Winkel

Für die Biegeversuche wurde die weichere Seite der Probe aus dem Werkstoff HX340 mit der Schweißnaht nach oben eingespannt. An der Stelle an der das obere Werkzeug (Stempel) das Probenstück berührt, wird um die Probe geschmiert Reibung zu reduzieren. Die Biegung wurde in 0,2mm Schritten durchgeführt.

#### 5.4.2 Ergebnisse

In dieser Arbeit wurden nur gehärteten Proben untersucht. Die Ergebnisse der Biegeproben lieferten folgende Erkenntnisse über die Qualität der Schweißnaht:

Probe	A.xx	Vorschub [mm/min]	Frequenz [Hz]	Spalt [mm]	Hopper [min <sup>-1</sup> ]	Pulverart	Biegewink [°]	Biegewink [°]	
051012.01	F.01	2000	5000	0	ohne		24,5	23	
051012.02	F.02		100	0			23	24,5	
051012.03	F.03	4000	5000	0	3100	LPW4140	18	16,5	
051012.04	F.04		100		6200		18	19,5	
091012.04	H.04		5000		18		21		
081012.08	G.08		5000	0.1	3100		19,5	18	
081012.09	G.09		100				18	16,5	
...	...		...	...	...		...	...	...

Tabelle 5.3 Biegeversuch Ergebnisse

Der Winkel in der Tabelle 5.3 beschreibt jenen Biegewinkel, bei dem die Probe komplett gebrochen ist. Die Proben die mit LPW4140 als Zusatzwerkstoff geschweißt wurden, erreichten als Referenzwert eine Durchbiegung bis zum maximale Biegewinkel von 80° ohne dass die Schweißnaht versagt hätte. Danach folgte NiBSi mit einem maximalen Biegewinkel von 45°. Ni50 und Ni40 erreichten einen Biegewinkel von etwas über 30°. Die ganze Tabelle befindet sich im Anhang B.

Die hier dargestellten Ergebnisse stellen den arithmetische Mittelwert aus den Messungen mehrerer Proben dar. In der Abbildung 5.32 sind die Ergebnisse aus einer Biegeprobe mit einem Vorschub von 3000 mm/min dargestellt. Die Darstellung unterscheidet zwischen dem Biegewinkel, die bei Dauerbetrieb des Lasers und bei pulsierendem Betrieb erreicht werden. Dabei wird ersichtlich, dass der erreichbare Biegewinkel bei pulsierendem Schweißbetrieb größer ist als bei Dauerbetrieb.

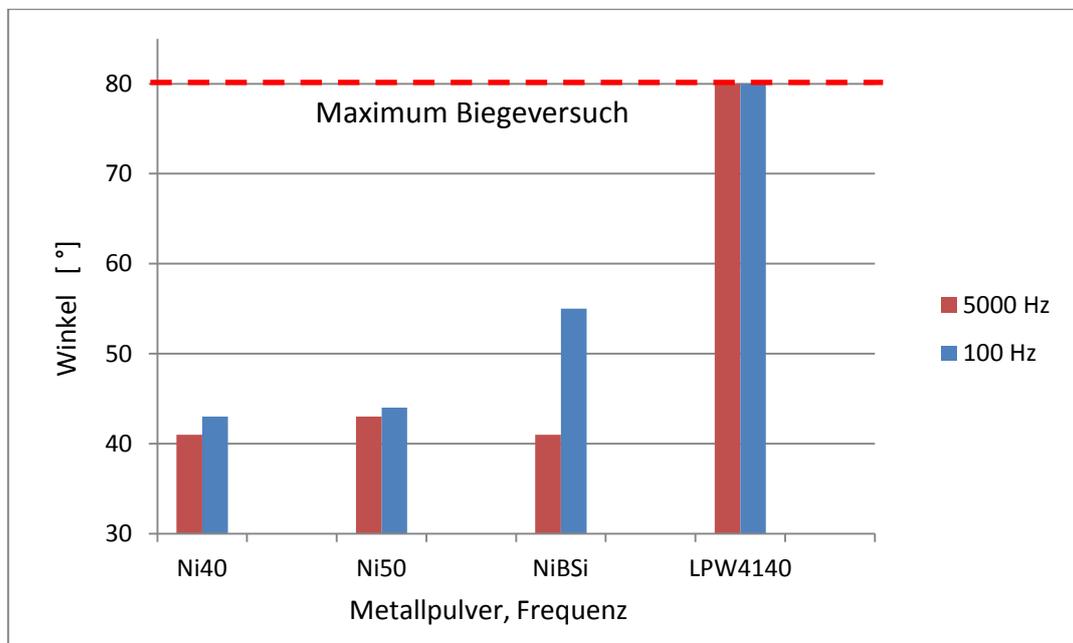


Abbildung 5.32 Biegeversuche

Es wurden auch die Proben getestet bei denen die Beschichtung vor dem Verschweißen entfernt wurde. Diese Proben wiesen eine Stärke von 1,1mm auf. Die Proben bei denen die beiden Blechplatinen aus gleichen Materialien bestehen wurden mit dem 3-Punkt-Biegeversuch getestet. Da die Biegefestigkeit der Proben, die aus verschiedenen Blechplatinen bestehen, mit einem anderen Verfahren getestet wurden, lässt sich kein direkter Vergleich zwischen den unterschiedlichen Proben anstellen. Als Referenzbiegewinkel wurde 40° genommen.

Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass die Belastbarkeit direkt mit der chemischen Zusammensetzung des Metallpulvers zusammenhängt.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurden die Wiederholungversuche nur mehr mit den Pulvern LPW4140 und NiBSi durchgeführt; Ni40 und Ni50 wurden aufgrund der ungeeigneten Eigenschaften nicht mehr weiter betrachtet.

Durch experimentelle Ergebnisse wurde festgestellt, dass bei höheren Schweißgeschwindigkeiten, der Bruchwinkel geringer wird. In der Abbildung 5.33 wird die Abhängigkeit zwischen den Biegewinkel und dem Vorschub dargestellt.

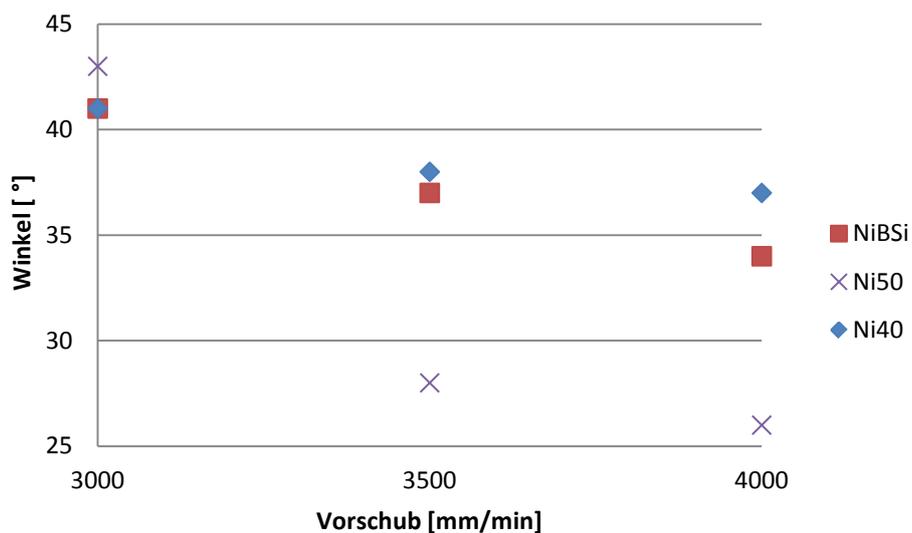


Abbildung 5.33 Biegewinkel in Abhängigkeit vom Vorschub

<b>Frequenz</b>	5000 [Hz]
<b>Hopper</b>	3100 [min <sup>-1</sup> ]
<b>Spalt</b>	ohne

Wie bereits aus vorigen Prüfverläufen ersichtlich, kam es mit den Schweißzusätzen Ni40 und Ni50 zu geringeren Biegewinkel als mit anderen Metallpulvern aufgrund der ungünstige chemische Zusammensetzung.

Die Proben, die mit LPW4140 als Zusatzwerkstoff geschweißt wurden, versagten bei einem Radius von 4mm nicht. Aufgrund dessen wurde mit einem Stempel der einen Radius von 1mm besitzt, ein Test durchgeführt. Die Tendenz des spontanen Bruchs, bis zum totalen Versagen, wurde entnommen um die Auswertungen zu interpretieren. Um das Ganze in einem Vergleich darzustellen, wurde die Probe ohne Zusatzwerkstoff, sonst jedoch gleichen Schweißparametern, überprüft. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.34 ersichtlich.

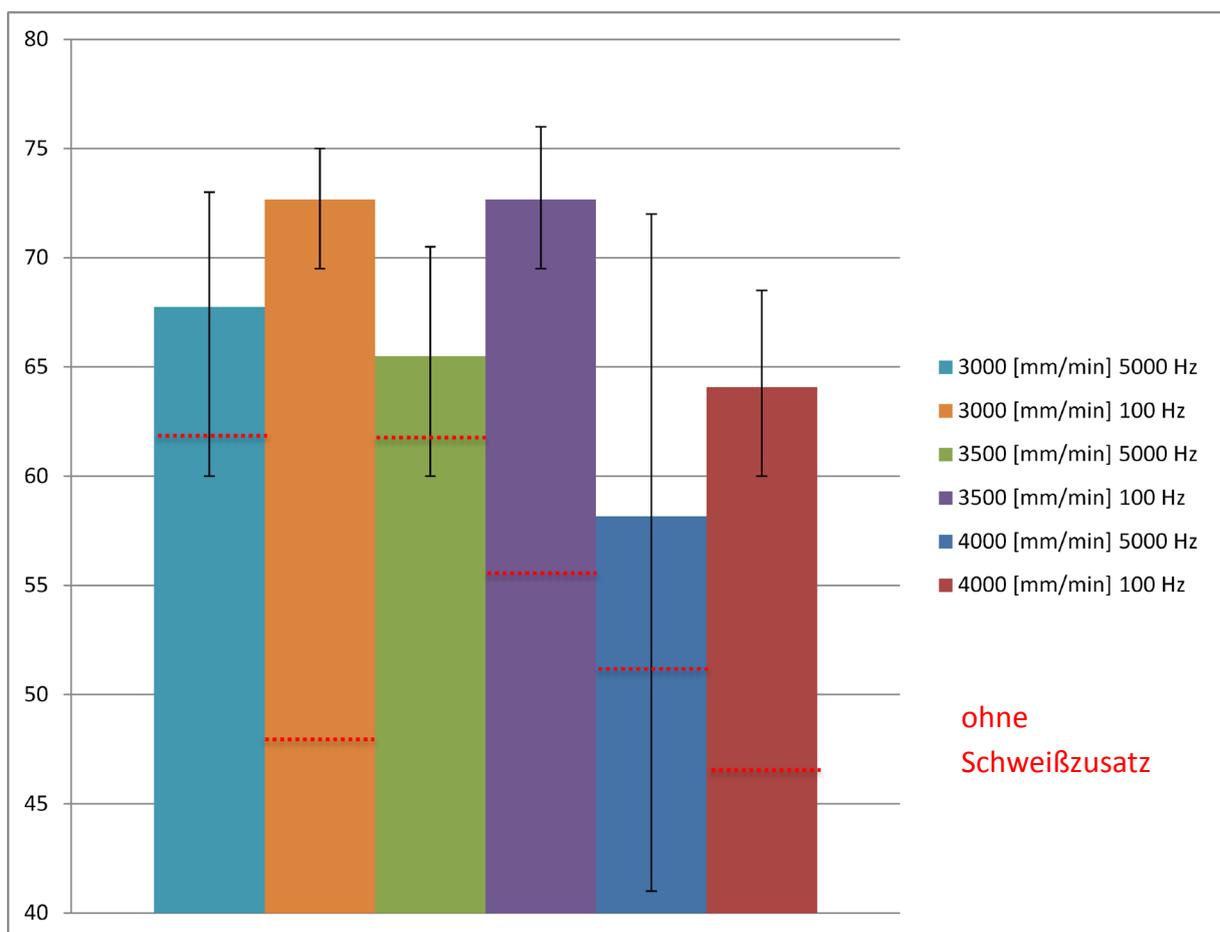


Abbildung 5.34 Biegeversuche mit LPW4100 und ohne Schweißzusatz

Daraus kann man erkennen, dass die Streuung bei geschweißten Proben im Pulsbetrieb, deutlich kleiner ist, als im Dauerstrichbetrieb des Lasers. Ebenfalls ist aus diesem Abbildung ersichtlich, dass der Biegewinkel mit dem Schweißzusatz LPW4140 höher ist als ohne.

## 5.5 Zugversuche

Der Zugversuch ist ein zerstörendes Prüfverfahren zur Bestimmung von Werkstoffkennwerten wie Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung.

In der Norm EN 10002-1:2001 (D) Anhang B ist die Probenform definiert.

Der Zugversuch wurde am Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik durchgeführt. Dabei wurde eine Vorkraft von 200N und eine Prüfgeschwindigkeit von 5mm/min angewendet.

Beim Zugversuch wird ein Versagen im Grundwerkstoff erwartet, womit gezeigt werden soll, dass die Zugfestigkeit in der Schweißnaht größer ist als im Grundwerkstoff.

In der Wiederholungsphase wurden neben einer Schliffprobe auch zwei Biegeproben und zwei Zugproben durchgeführt. Der Schneidplan mit allen Dimensionen und Ergebnissen befindet sich im Anhang D, hier sind nur die wichtigsten Ergebnisse und Feststellungen dargestellt.

In der Versuchsdurchführung wurden nur Proben verwendet die mit LPW4140 und NiBSi Metallpulver als Schweißzusatz verschweißt wurden. Die Untersuchungen mit dem Schweißzusatz Ni40 und Ni50 wurde aufgrund der Heißrisse nicht weiter verfolgt. Mit jedem Schweißparametersatz wurden drei gleiche Proben hergestellt, an welchen in Summe sechs Zugproben durchgeführt wurden. Es wurde festgestellt, dass bei den Proben die mit LPW4140 Metallpulver verschweißt wurden, der Grundwerkstoff zuerst versagt, d.h. das die Schweißnaht eine höhere Zugfestigkeit aufweist als der Grundwerkstoff HX340. Bei zwei Proben (W07, W08) kam es zu einem Versagen bei einer geringeren Bruchdehnung aufgrund von Beeinflussungen der Wärmeeinflusszone. Diese Proben wurden im Dauerstrichbetrieb geschweißt (cw-Betrieb). Bei den Proben welche im Pulsbetrieb geschweißt wurden kam es in allen Fällen zu einem Versagen im Grundwerkstoff. Die Werte die Zugfestigkeit der Proben mit LPW4140 Metallpulver reichen von 570 bis 657 MPa.



Abbildung 5.35 Zugprobe mit LPW4140

Fast alle Proben, die mit NiBSi verschweißt wurden, versagten an der Schweißnaht. Bei drei von 34 Proben kam es zum Versagen im Grundwerkstoff HX340. Die Werte für die Zugfestigkeit lagen, abhängig von den jeweiligen Schweißparametern, zwischen 363 und 580 MPa. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 5.36 zusammengefasst

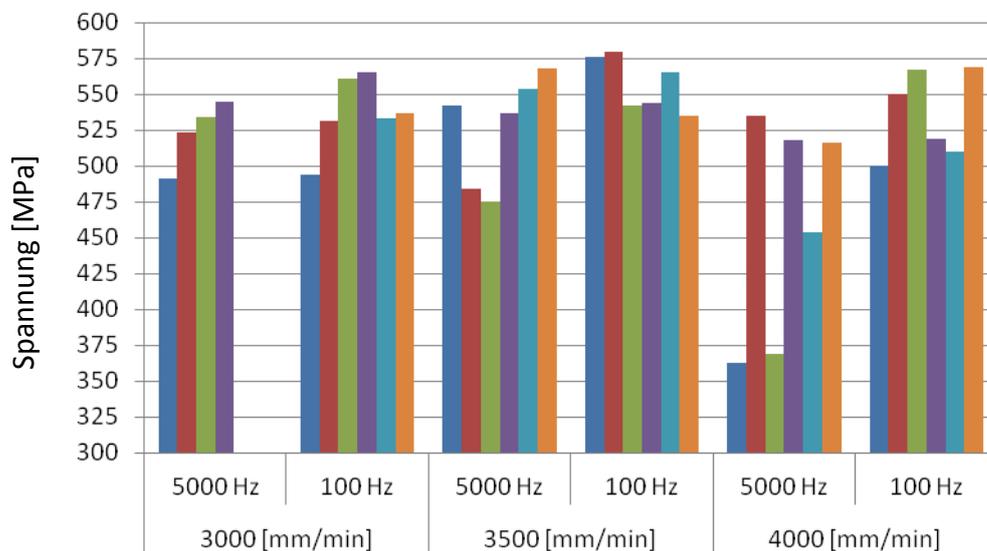


Abbildung 5.36 Zugversuch Ergebnisse NiBSi

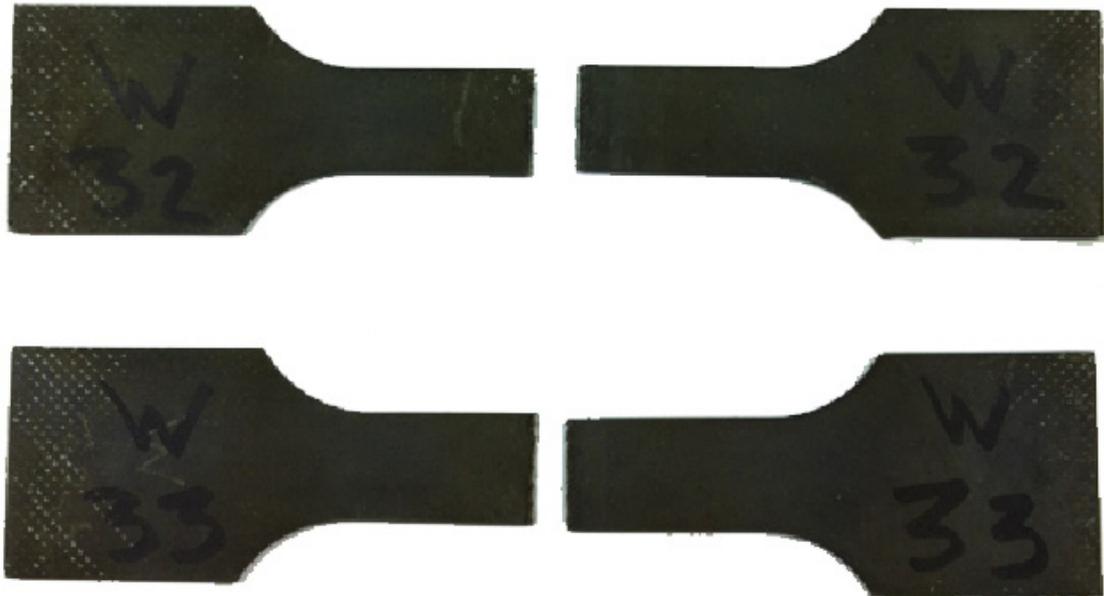


Abbildung 5.37 Zugprobe mit NiBSi

Zusätzlich wurden noch Zugversuche an Proben, die ohne Metallpulver verschweißt wurden, durchgeführt. Die Werte der Zugfestigkeit variiert bei diesen Proben zwischen 490 und 585 MPa, wie aus Abb. 5.38 ersichtlich ist. Das gesamte Diagramm ist im Anhang D zu finden.

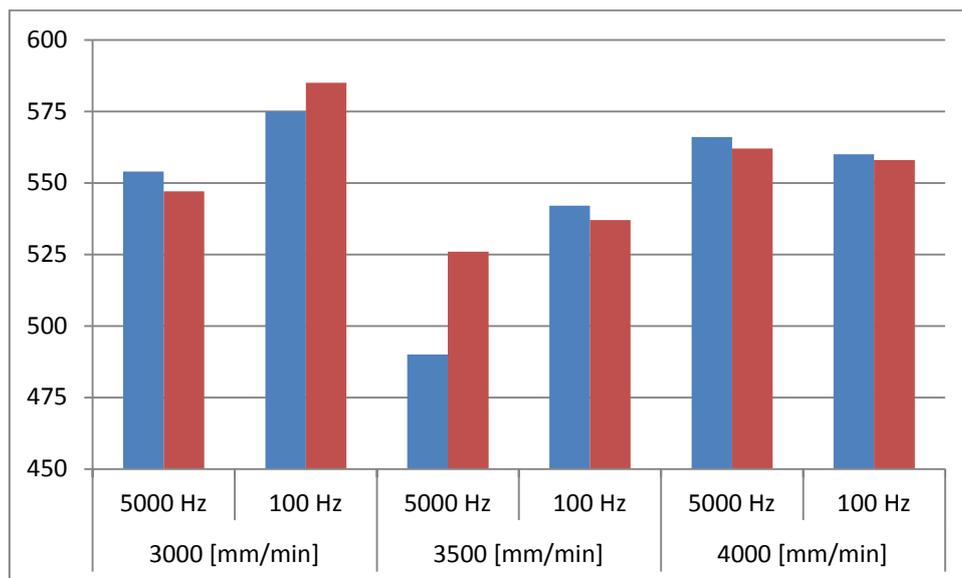


Abbildung 5.38 Zugversuche Proben ohne Schweißmittel

## 6 Ergänzende Untersuchungen durch Abblasen der AlSi Schicht

### 6.1 Versuchsaufbau

Es wurde unter anderem über Alternativen nachgedacht, wie die AlSi Beschichtung in der Schweißnaht zu entfernen werden könnte. Durch eine neue Düsenkonstruktion sollte mit Hilfe einer punktuellen Gasströmung die geschmolzene Beschichtung voreilend abgeblasen werden. Der Schmelzpunkt der Beschichtung liegt deutlich unter der des Stahlwerkstoffes bei  $450^{\circ}\text{C}$  weshalb ein größerer Bereich flüssigen Aluminium-Siliziums um das eigentliche Schweißschmelzbad existiert. Bei diesem Schweißprozess wird auf die Verwendung eines Zusatzwerkstoffes verzichtet. Das Prinzip ist in der Abbildung 6.1 dargestellt.

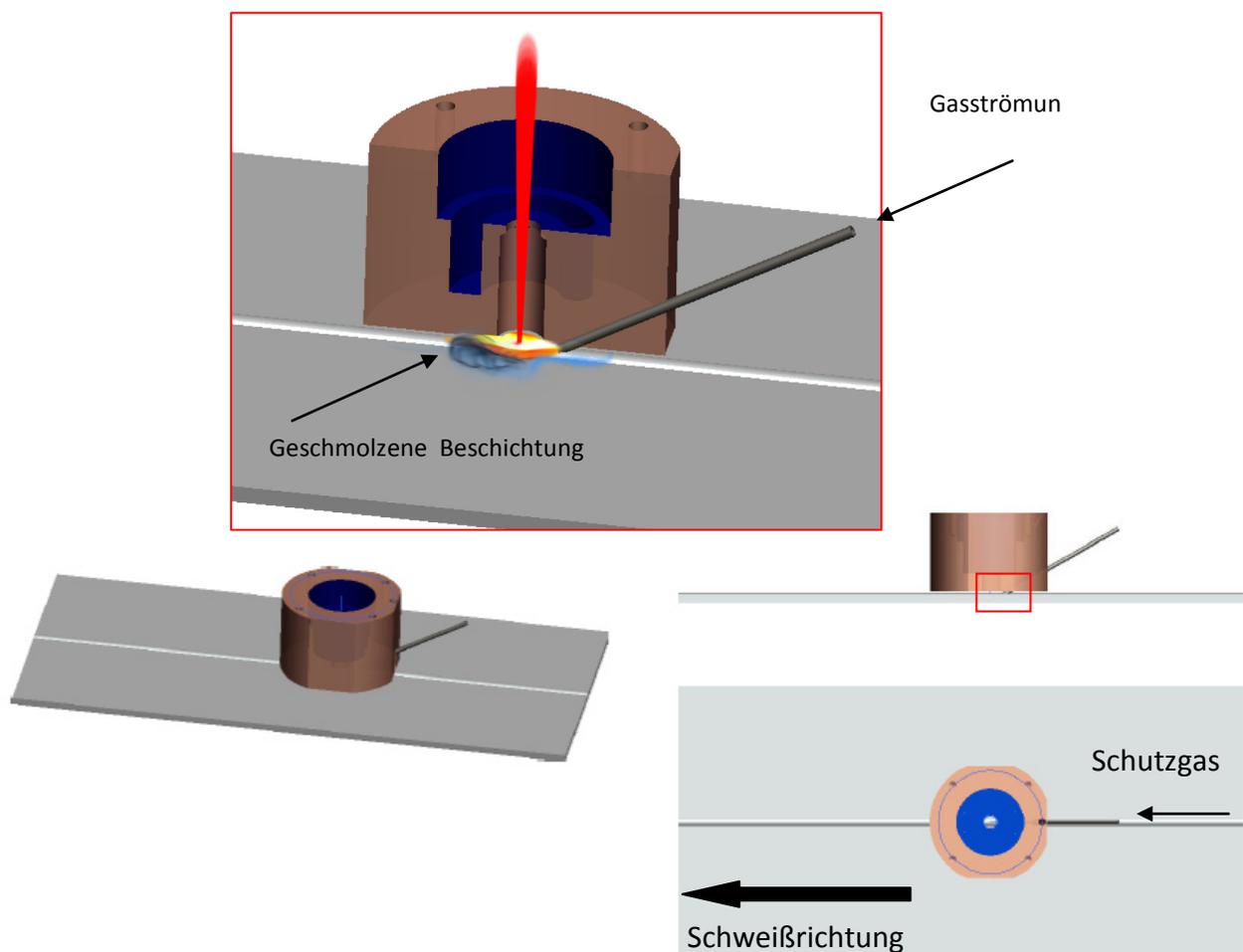


Abbildung 6.1 Abblasen der AlSi Beschichtung

## 6.2 Parameter

Es wurden der Vorschub und Abblasdruck aus dem Schweißkopf variiert. In der Tabelle 6.1 sind die Proben mit den dazugehörigen Parametern aufgelistet.

Werkstoff	Probe	A.xx	Vorschub [mm/min]	Frequenz [Hz]	Spalt [mm]	Hopper [min <sup>-1</sup> - 1]	Pulverart	Abblasdruck
MBW - MBW	200213.01	J.01	3000	100	0	x	ohne	1,5 [ bar]
	200213.02	J.02	3000	100				2 [ bar]
	200213.03	J.03	3000	100				2,5 [ bar]
	200213.04	J.04	3500	100				1,5 [ bar]
	200213.05	J.05	3500	100				2 [ bar]
	200213.06	J.06	3500	100				2,5 [ bar]
	200213.07	J.07	4000	100				1,5 [ bar]
	200213.08	J.08	4000	100				2 [ bar]
	200213.09	J.09	4000	100				2,5 [ bar]

Tabelle 6.1 Schweißparameter für Ablasssystem

## 6.3 Probenvorbereitung

Es wird auf das Kapitel 4.4 und 4.5 verwiesen, jedoch wird hier eine andere Schneidmatrix verwendet, die in der Abbildung 4.4 zu sehen ist. Es wurden daraus drei Proben gewonnen, der Schweißvorgang wurde mit denselben Parametern durchgeführt.

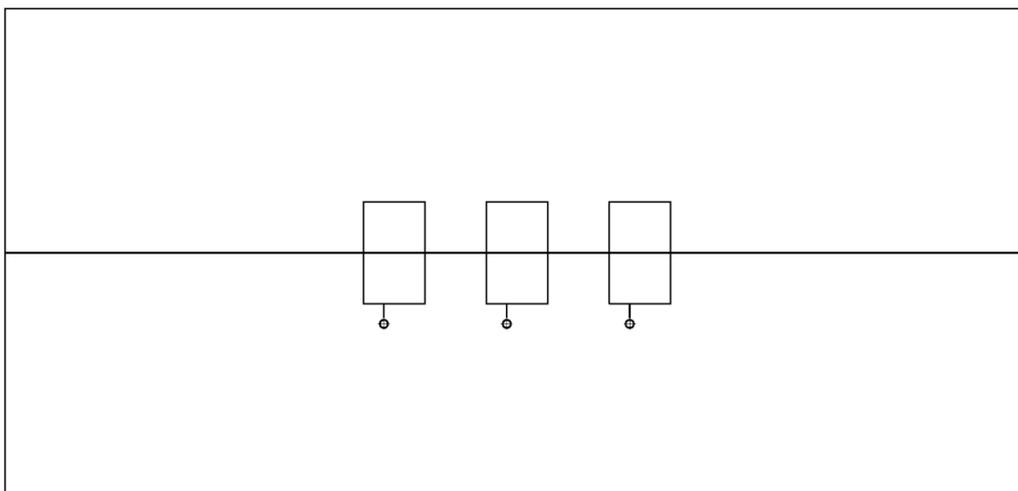


Abbildung 6.2 Schliffproben

## 6.4 Auswertung der Ergebnisse

### 6.4.1 Schliff

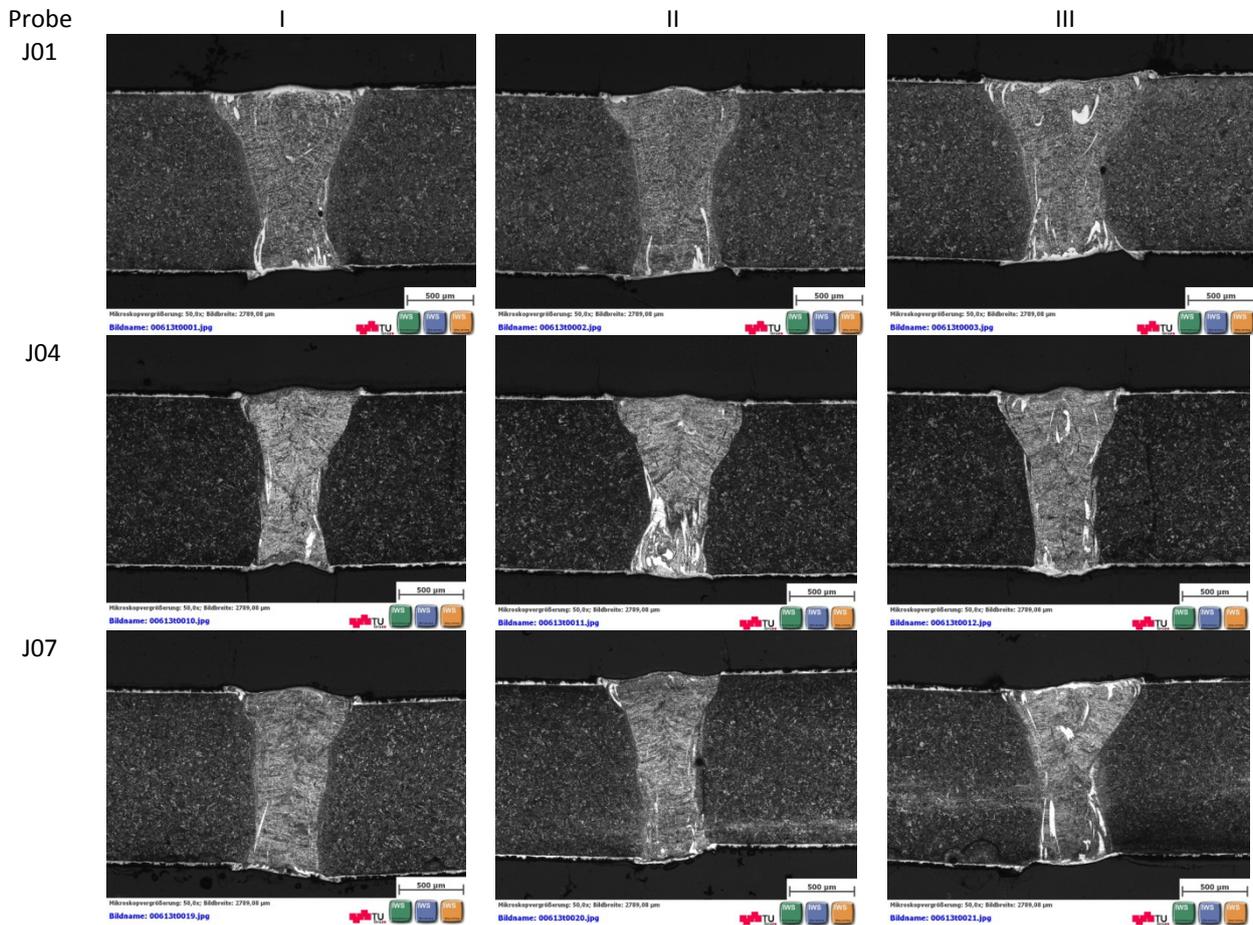


Abbildung 6.3 Schliffproben von Schweißversuchen mit Abblasvorrichtung

Aus den Abbildungen ist ersichtlich, dass im oberen Bereich der Schweißnaht weniger intermetallische FeAl Phasen vorhanden sind. Desweiteren kann man auch erkennen, dass im Bereich der gesamten Schweißnaht - verglichen mit dem Grundwerkstoff - unvollständiger Martensitgehalt vorliegt. Für eine vollständige Beurteilung sollten noch zusätzlich Biege- Zugversuche vorgenommen werden, um die mechanischen Eigenschaften festzustellen.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Diplomarbeit wurde ein neuartiger Schweißprozess untersucht, der das Fügen von Al-Si beschichteten 22MnB5 und HX340 Tailored Blanks verbessern sollte. Um den momentan vorgeschalteten Fertigungsprozess der lokalen Entschichtung zu umgehen, muss die Schweißnaht durch Anpassung der Schweißparameter und der Verwendung von Schweißzusätzen verändert und optimiert werden. Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit sowohl die Auswahl der Schweißparameter, die Prozessgestaltung als auch die Verwendung diverser Zusatzwerkstoffe genauer untersucht.

Aus lichtmikroskopischen Untersuchungen der Schlitze im Bereich der Schweißnaht war bereits vorab bekannt, dass sich das AlSi aus der Beschichtung in die Schweißnaht einbringt und dadurch die mechanischen Eigenschaften des TWB negativ beeinflusst. Dieser Effekt konnte zu Beginn dieser Arbeit reproduzierbar bestätigt werden wie auch der positive Effekt des Entschichtens. Die Auswertung der Schweißversuche erfolgte mittels lichtmikroskopischer Untersuchungen, Messung der Mikrohärteverläufe über den Bereich der Schweißnaht, EDX Analysen, Zugversuche und Biegeversuche verschweißter Proben. Durch Zuführung von pulverförmigen Schweißzusätzen zum Schweißprozess wurde untersucht ob die negativen Eigenschaften der Beschichtung durch Zulegieren anderer chemischer Elemente oder durch „verdünnen“ der Aluminiumkonzentration verbessert werden können. Dabei wurden drei nickelbasierte Schweißzusätze und ein eisenbasierter Schweißzusatz gewählt. Die Bildung von Poren und Heißrissen bei Zuführung von Ni40 und Ni50 als Zusatzwerkstoff ließen diese vorzeitig aus den Untersuchungen ausscheiden. Die Zuführung von NiBSi zeigte vielversprechende Ergebnisse sowohl im Schliffbild als auch im Härteverlauf über die Schweißnaht. Jedoch fällt die notwendige Duktilität der höheren Härte zum Opfer was in den Zugversuchen und Biegeversuchen deutlich wurde. Als am besten geeigneter Schweißzusatz stellte sich LPW4140, eine Legierung auf Eisenbasis, heraus. Dieser hat zwar nicht die ausreichende Zugfestigkeit beim Verschweißen von zwei Mangan-Bor-Platinen, jedoch zeigten sich gute Ergebnisse beim Verschweißen von 22MnB5- und HX340-Blechen.

Es wurde gezeigt, dass der Einsatz von LPW4140 bei gleichen Grundwerkstoffen 22MnB5/22MnB5 nicht möglich ist, da es zum Härteabfall in der Schweißnaht kommt. Die Paarung 22MnB5/HX340 mit LPW4140 als Zusatzwerkstoff weist gute Ergebnisse im Härteverlauf auf. Die Mikrohärteliegt etwas über dem Niveau des weicheren Grundwerkstoffes. Auch die mechanischen Untersuchungen der Schweißproben erzielten gute Ergebnisse. Im Zugversuch wurde das Vorgabekriterium erreicht indem ausschließlich der weichere Grundwerkstoff versagte. Zudem zeigten die Biegeversuche signifikant bessere Ergebnisse als bei Schweißungen ohne Zusatzwerkstoff.

Untersucht wurde zudem eine Möglichkeit die deutlich früher schmelzende Aluminium-Silizium Schicht im flüssigen Zustand vor dem Schweißen mit einer Gasdüse abzublasen. Erste Untersuchungen mittels Gefügeaufnahmen zeigten ein positives Verhalten. Jedoch ist dieses Verfahren prozesstechnisch sehr schwer realisierbar, da gezielt beidseitig abgeblasen werden muss.

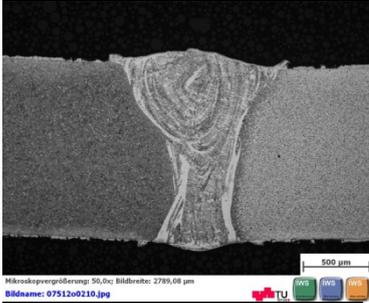
Basierend auf den vorliegenden Ergebnissen sollten nun weitere Untersuchungen an gleichen Blechpaarungen (22MnB5/22MnB5) mit unterschiedlicher Dicke vorgenommen werden. Mit dem Zusatzwerkstoff LPW4140 konnten keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden da die Festigkeit des Grundwerkstoffes mit diesem Schweißzusatz nicht erreicht wurde. Weitere Überlegungen einen höher legierten Zusatzwerkstoff auf Eisenbasis mit höherem Kohlenstoffgehalt zu verwenden könnten hier zum Erfolg führen. Die Verfügbarkeit eines solchen Schweißzusatzes muss jedoch geprüft werden. Die Biege- und Zugversuche für die Blechpaarung 22MnB5/HX340 mit LPW4140 als Zusatzwerkstoff wurde an ebenen, pressgehärteten Platinen durchgeführt welche nicht dem realen Anwendungsfall des angedachten Endproduktes entspricht. Aufgrund dieser Tatsache sollten nun Versuche am Umformwerkzeug mit realitätsnaher Bauteilgeometrie vorgenommen werden um eine Aussage über die Qualität und Stabilität des untersuchten Schweißprozesses treffen zu können.

Das im Laufe dieser Arbeit festgestellte Diffusionsverhalten von Aluminium in Abhängigkeit der Wärmebehandlungszeit zeigte interessante Ergebnisse der Gefügestruktur im Bereich der Schweißnaht. Jedoch konnten mit dem bis dato durchgeführten Untersuchungen noch keine befriedigenden Aussagen über die Zusammenhänge getroffen werden. Eine Möglichkeit wäre hier durch Einsatz von MathCalc eine numerische Simulation des Diffusionsverhaltens durchzuführen. Zusätzlich könnte die Durchführung einer umfassenden Versuchsmatrix mit unterschiedlichen Prozessparametern weiteren Aufschluss über das Diffusionsverhalten und die damit verbundene Gefügezusammensetzung geben.

## **Anhang A: Schliffbilder**

Probe  
F16

Vergrößerung x50



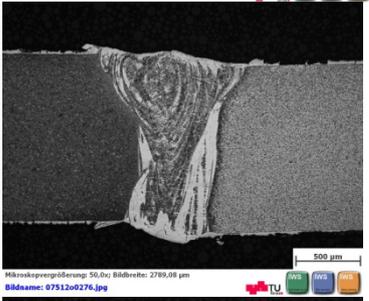
Vergrößerung x100



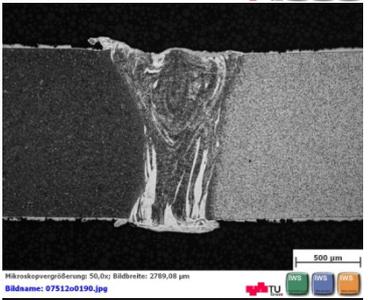
Vergrößerung x200



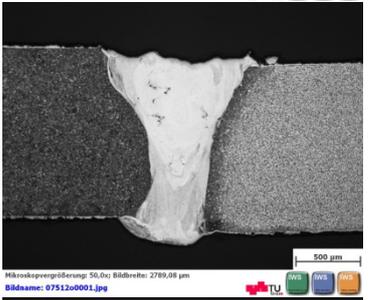
F14



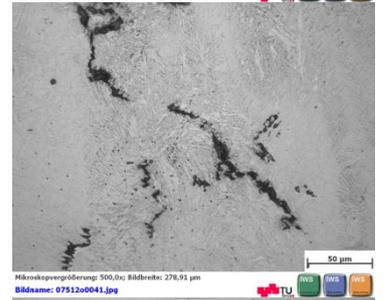
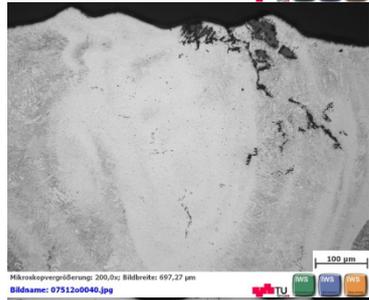
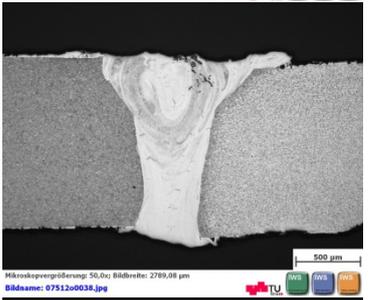
G17



H24



H36

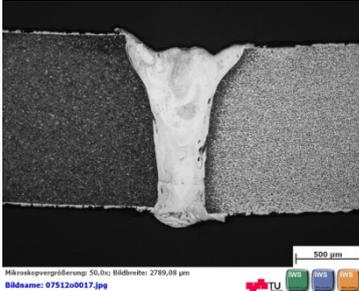


H32



Probe  
H07

Vergrößerung x50



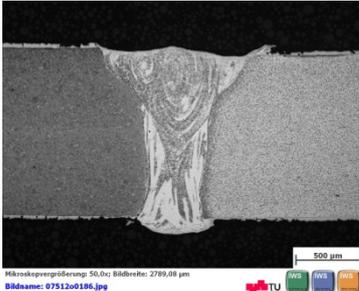
Vergrößerung x100



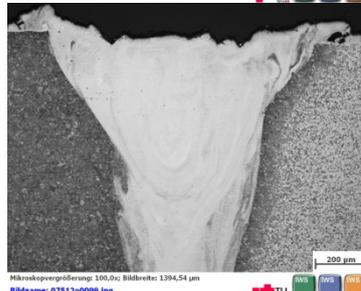
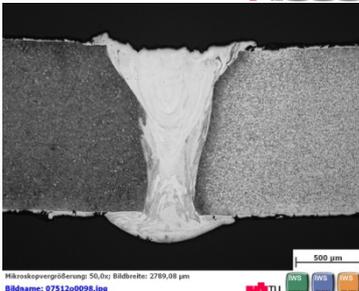
Vergrößerung x200



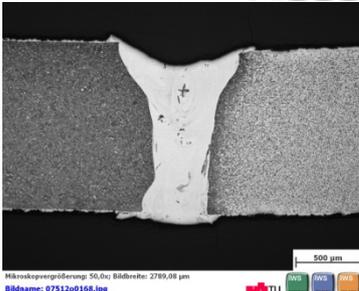
F12



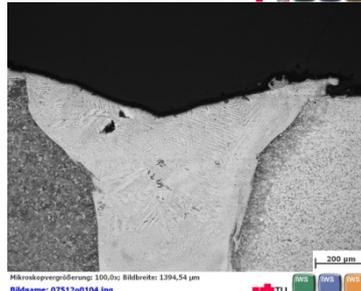
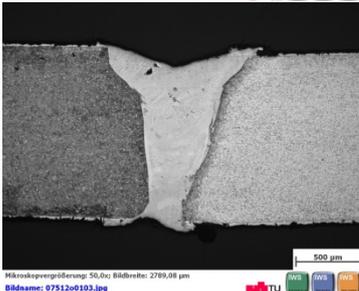
H10



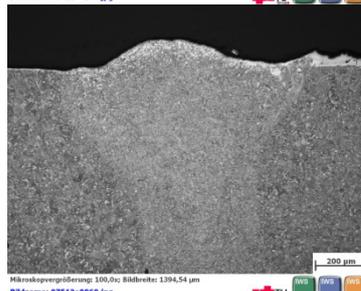
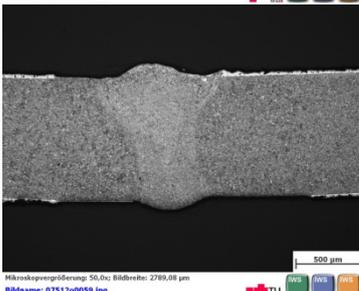
H16



H14

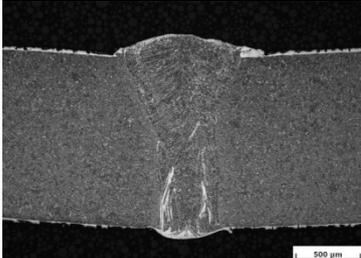


G04



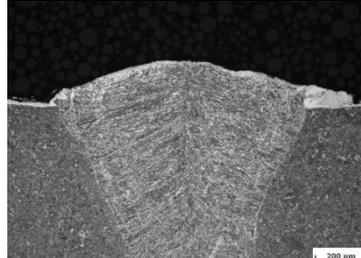
Probe  
F03

Vergrößerung x50



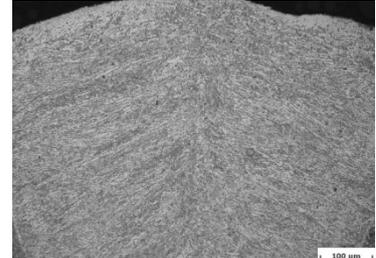
Mikroskopvergrößerung: 50,0x; Bildbreite: 2789,08 µm  
Bildname: 07512o0261.jpg

Vergrößerung x100



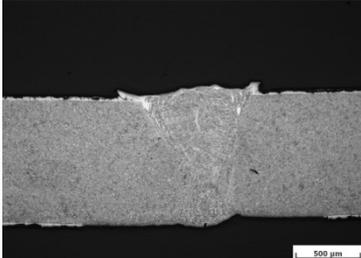
Mikroskopvergrößerung: 100,0x; Bildbreite: 1394,54 µm  
Bildname: 07512o0262.jpg

Vergrößerung x200

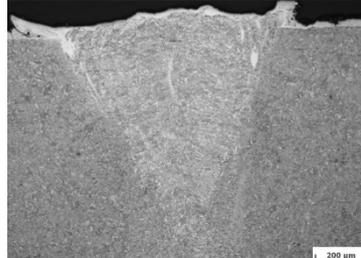


Mikroskopvergrößerung: 200,0x; Bildbreite: 697,27 µm  
Bildname: 07512o0263.jpg

G02



Mikroskopvergrößerung: 50,0x; Bildbreite: 2789,08 µm  
Bildname: 07512o0064.jpg

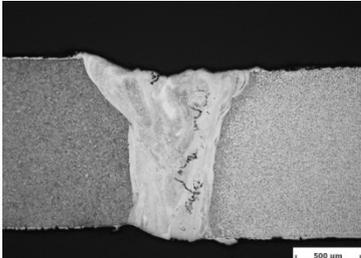


Mikroskopvergrößerung: 100,0x; Bildbreite: 1394,54 µm  
Bildname: 07512o0069.jpg



Mikroskopvergrößerung: 200,0x; Bildbreite: 697,27 µm  
Bildname: 07512o0070.jpg

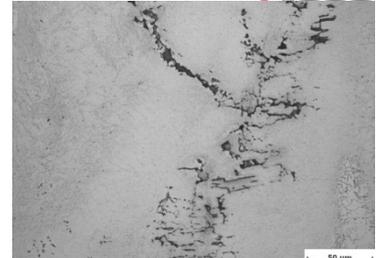
H42



Mikroskopvergrößerung: 50,0x; Bildbreite: 2789,08 µm  
Bildname: 07512o0046.jpg

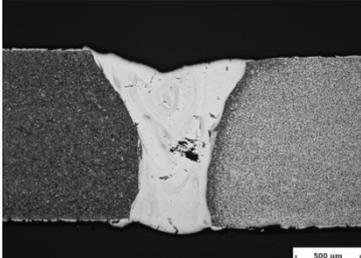


Mikroskopvergrößerung: 100,0x; Bildbreite: 1394,54 µm  
Bildname: 07512o0050.jpg

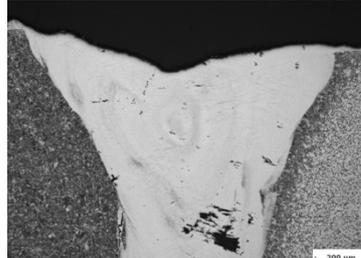


Mikroskopvergrößerung: 500,0x; Bildbreite: 278,91 µm  
Bildname: 07512o0052.jpg

H41



Mikroskopvergrößerung: 50,0x; Bildbreite: 2789,08 µm  
Bildname: 07512o0143.jpg



Mikroskopvergrößerung: 100,0x; Bildbreite: 1394,54 µm  
Bildname: 07512o0144.jpg



Mikroskopvergrößerung: 200,0x; Bildbreite: 697,27 µm  
Bildname: 07512o0145.jpg

H35



Mikroskopvergrößerung: 50,0x; Bildbreite: 2789,08 µm  
Bildname: 07512o0081.jpg

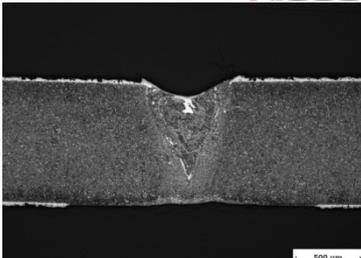


Mikroskopvergrößerung: 100,0x; Bildbreite: 1394,54 µm  
Bildname: 07512o0012.jpg

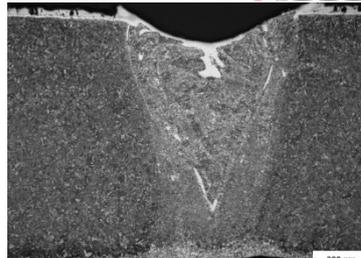


Mikroskopvergrößerung: 200,0x; Bildbreite: 697,27 µm  
Bildname: 07512o0013.jpg

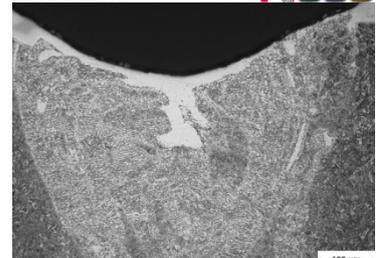
G06



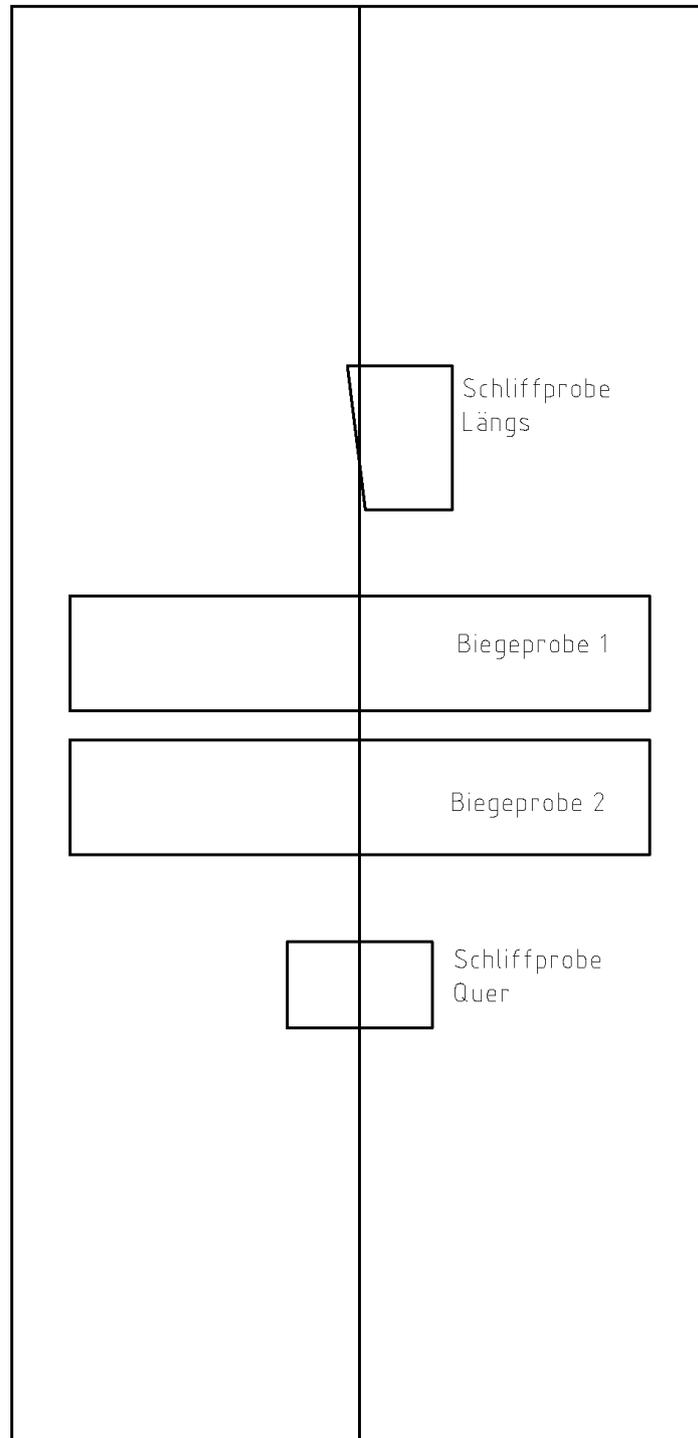
Mikroskopvergrößerung: 50,0x; Bildbreite: 2789,08 µm  
Bildname: 07512o0081.jpg

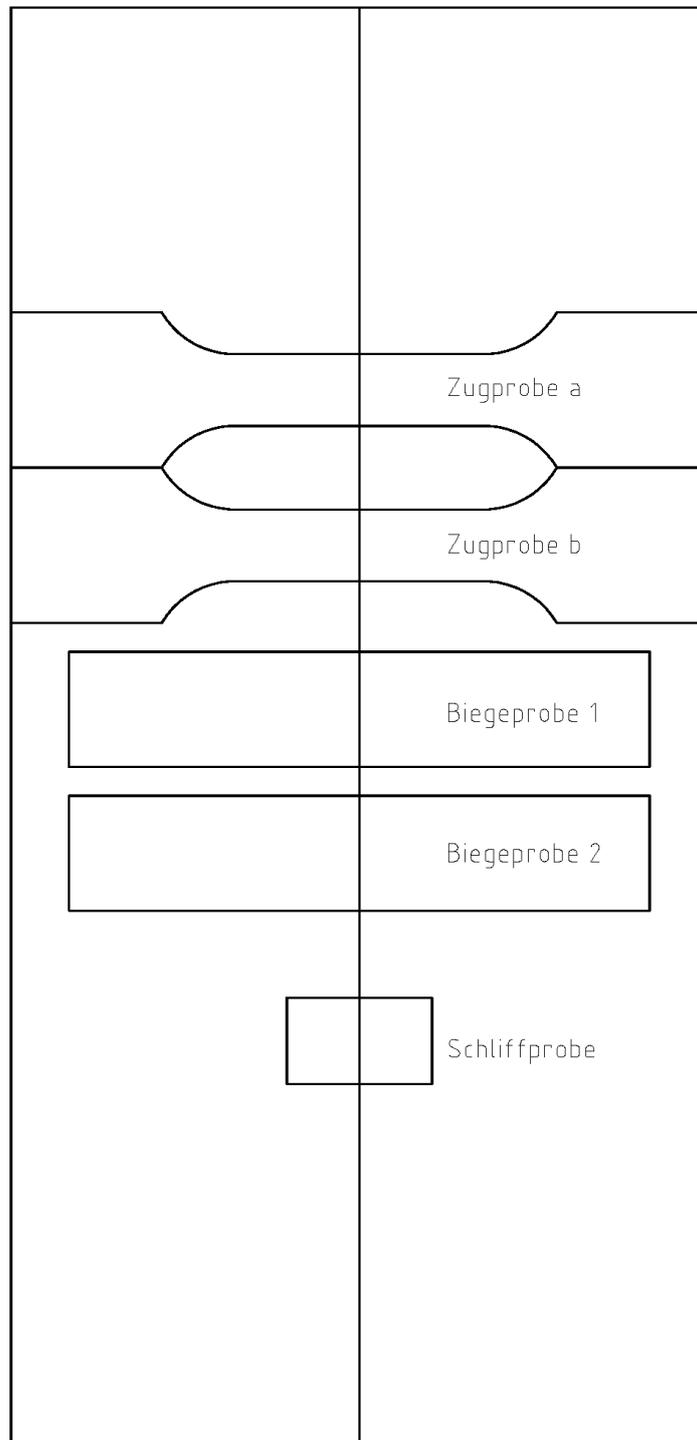


Mikroskopvergrößerung: 100,0x; Bildbreite: 1394,54 µm  
Bildname: 07512o0082.jpg



Mikroskopvergrößerung: 200,0x; Bildbreite: 697,27 µm  
Bildname: 07512o0083.jpg





## **Anhang B: Biegeversuche**

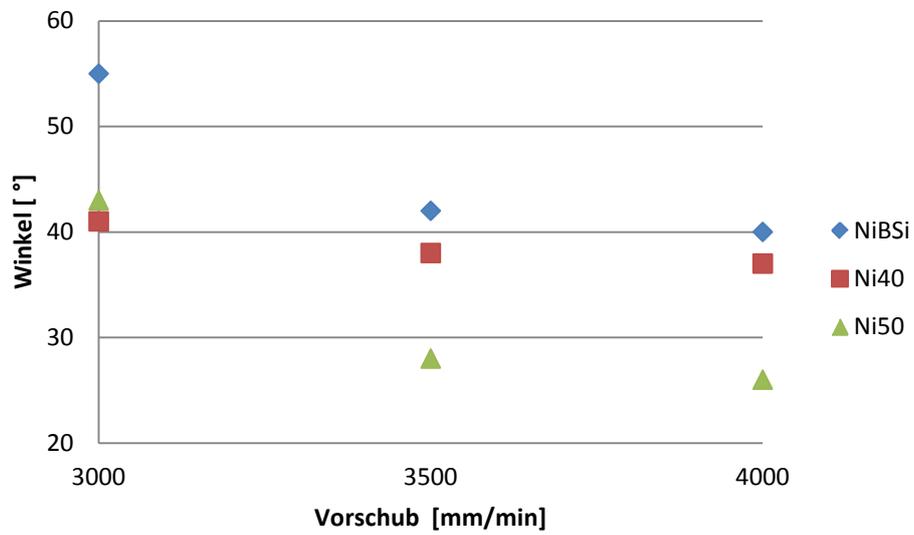
Probe	Probe	A.xx	Vorschub [mm/min]	Frequenz [Hz]	Spalt [mm]	Hopper [min <sup>-1</sup> ]	Pulverart	Biege [°]	Biege [°]	
MBW - MBW	051012.01	F.01	2000	5000	0		ohne	24,5	23	
	051012.02	F.02		100				23	24,5	
	051012.03	F.03	4000	5000	0	3100	LPW4140	18	16,5	
	051012.04	F.04		100				18	19,5	
	091012.04	H.04		5000	6200	18		21		
	081012.08	G.08		5000	0.1	3100		19,5	18	
	081012.09	G.09		100				18	16,5	
	091012.01	H.01		5000	0.2	3100		16	15	
	091012.02	H.02		100				14	18	
	051012.05	F.05		3500	5000	0		3100	18	16,5
	051012.06	F.06	100		18		19,5			
	081012.10	G.10	5000		0.1	3100	18	18		
	081012.11	G.11	100				23	19,5		
	091012.03	H.03	5000		0.2	3100	16	19,5		
	091012.02	H.02	100				14	18		
	051012.07	F.07	3000	5000	0	3100		18	19,5	
	051012.08	F.08		100				23	23	
	091012.05	H.05		5000	6200	14		16,5		
	091012.06	H.06		100				16	18	
	081012.12	G.12		5000	0.1	3100		18	16,5	
	081012.13	G.13		100				19,5	28	
	051012.09	F.09		2500	5000	0		3100	18	19,5
	051012.10	F.10			100				23	24,5
	250712.01	A.01	4000	5000	0	1550	NiBSi	8	6	
	080812.09	E.09				3100	LPW4140	16	16	
	080812.01	E.01		100	0.1	3100	NiBSi	8	6	
	080812.10	E.10		100	0	3100	LPW4140	18	18	
	080812.08	E.08				6200	NiBSi	12	14	
	080812.06	E.06				6200		10	14	
	070812.01	D.01		2000	5000	0.1	3100		10	10
	060812.02	C.02			500	0	ohne	22	30	
	310712.03	B03					18	22		
	060812.03	C03	100				26	22		
060812.14	C14				1550	30	18			
070812.02	D02				0.1	3100	10	10		
070812.04	D04	1000	5000	0.1	3100	10	12			
060812.10	C10			0.2	1550	12	10			
070812.05	D05		100	0.1	3100	10	14			
060812.13	C13			0.2	3100	10	12			

Probe	Probe	A.xx	Vorschub [mm/min]	Frequenz [Hz]	Spalt [mm]	Hopper [min <sup>-1</sup> ]	Pulverart	Biege [°]	Biege [°]	
MBW-HX340	051012.11	F.11	4000	5000	0	3100	LPW4140	o. V.	o. V.	
	051012.12	F.12		100				o. V.	o. V.	
	051012.13	F.13	3500	5000				o. V.	o. V.	
	051012.14	F.14		100				o. V.	o. V.	
	051012.15	F.15	3000	5000				o. V.	o. V.	
	051012.16	F.16		100				o. V.	o. V.	
	091012.07	H.07	4000	5000		3100	NiBSi	30	39	
	091012.08	H.08		100				49	51	
	091012.09	H.09	3500	5000				30	55	
	091012.10	H.10		100				50	59	
	091012.11	H.11	3000	5000				43	39	
	091012.12	H.12		100				85	81	
	091012.19	H.19	4000	5000		3100	Ni40	35	39	
	091012.20	H.20		100				33,5	43	
	091012.21	H.21	3500	5000				38	38	
	091012.22	H.22		100				39	39	
	091012.23	H.23	3000	5000				41	41	
	091012.24	H.24		100				X	43	
	091012.31	H.31	4000	5000		3100	Ni50	26	26	
	091012.32	H.32		100				23	24,5	
	091012.33	H.33	3500	5000				28	28	
	091012.34	H.34		100				28	51	
	091012.35	H.35	3000	5000				41	45	
	091012.36	H.36		100				39	49	
	081012.14	G.14	4000	5000		0,1	3100	LPW4140	o. V.	o. V.
	081012.15	G.15		100					o. V.	o. V.
	081012.16	G.16	3500	5000					o. V.	o. V.
	081012.17	G.17		100					o. V.	o. V.
	081012.18	G.18	3000	5000					o. V.	o. V.
	081012.19	G.19		100					o. V.	o. V.
	091012.13	H.13	4000	5000			3100	NiBSi	16,5	16,5
	091012.14	H.14		100					26	23
	091012.15	H.15	3500	5000					21	28
	091012.16	H.16		100					28	30
	091012.17	H.17	3000	5000					35	33,5
	091012.18	H.18		100					35	35

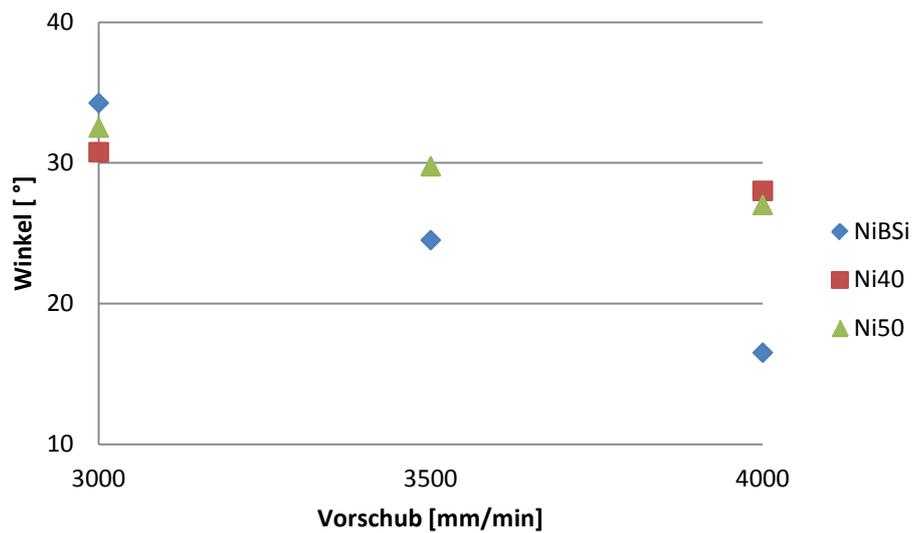
Probe	Probe	A.xx	Vorschub [mm/min]	Frequenz [Hz]	Spalt [mm]	Hopper [min <sup>-1</sup> ]	Pulverart	Biege [°]	Biege [°]	
MBW - HX340	091012.25	H.25	4000	5000		3100	Ni40	28	28	
	091012.26	H.26		100				24,5	19,5	
	091012.27	H.27	3500	5000				x	X	
	091012.28	H.28		100				x	X	
	091012.29	H.29	3000	5000				30	31,5	
	091012.30	H.30		100				26	24,5	
	091012.37	H.37	4000	5000		3100	Ni50	26	28	
	091012.38	H.38		100				24,5	23	
	091012.39	H.39	3500	5000				35	24,5	
	091012.40	H.40		100				x	x	
	091012.41	H.41	3000	5000				35	30	
	091012.42	H.42		100				26,5	28	
	100113.01	W.01	3000	5000		0	3100	LPW4140	63*	75*
	100113.02	W.02							73*	67*
100113.03	W.03	60*			68,5*					
100113.04	W.04	100		74,5*	69,5 *					
100113.05	W.05			69,5*	74,5 *					
100113.06	W.06			73*	75*					
100113.07	W.07	3500	5000	70,5*	66 *					
100113.08	W.08			X	70,5*					
100113.09	W.09			60*	61 *					
100113.10	W.10		100	75*	71,5*					
100113.11	W.11			72*	72*					
100113.12	W.12			76*	69,5*					
100113.13	W.13	4000	5000	72*	60*					
100113.14	W.14			41*	61*					
100113.15	W.15			X	60*					
100113.16	W.16		100	68,5*	64,5*					
100113.17	W.17			60*	67*					
100113.18	W.18			60*	64,5*					

Probe	Probe	A.xx	Vorschub [mm/min]	Frequenz [Hz]	Spalt [mm]	Hopper [min <sup>-1</sup> ]	Pulverart	Biege [°]	Biege [°]	
MBW- HX340	100113.19	W.19	3000	5000	0	3100	NiBSi	40	41	
	100113.20	W.20						44	33,5	
	100113.21	W.21						47	41	
	100113.22	W.22						47	43	
	100113.23	W.23						44	43	
	100113.24	W.24						43	61	
	100113.25	W.25	3500	5000				28	35	
	100113.26	W.26						37	41	
	100113.27	W.27						39	30	
	100113.28	W.28						31,5	35	
	100113.29	W.29						39	43	
	100113.30	W.30						43	35	
	100113.31	W.31	4000	5000				41	35	
	100113.32	W.32						39	28	
	100113.33	W.33						28	33,5	
	100113.34	W.34						43	35	
	100113.35	W.35						39	39	
	100113.36	W.36						35	35	
MBW MBW  Entsch  Dicke 1,1mm	081012.01	G.01	5000	5000	0	3100	LPW4140	18	18	
	081012.02	G.02		100				16,5	18	
	081012.05	G.05		5000				0.1	18	19,5
	081012.06	G.06		100				21	23	
	081012.03	G.03	4000	5000				0	19,5	18
	081012.04	G.04		100				24,5	24,5	
	081012.07	G.07		5000				0.1	24,5	23

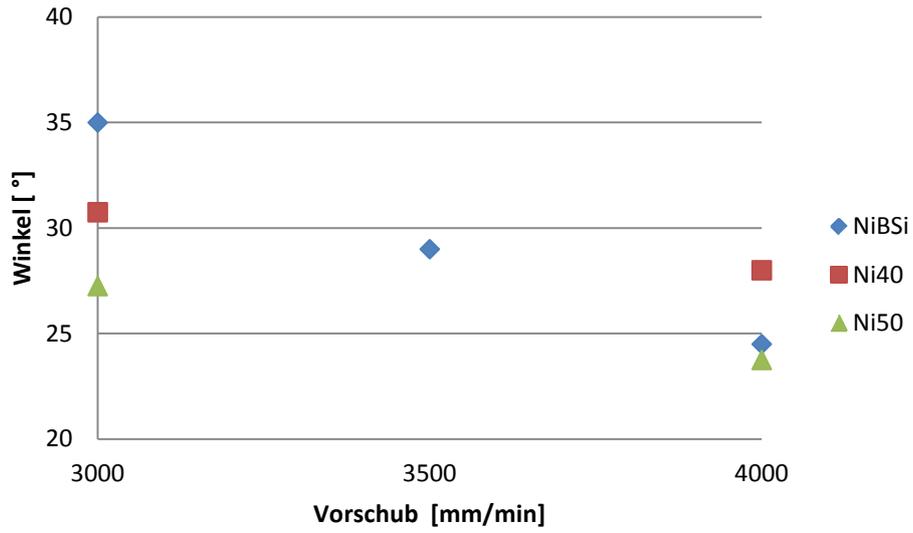
o.V. - ohne  
Versagen  
\*Radius 1mm



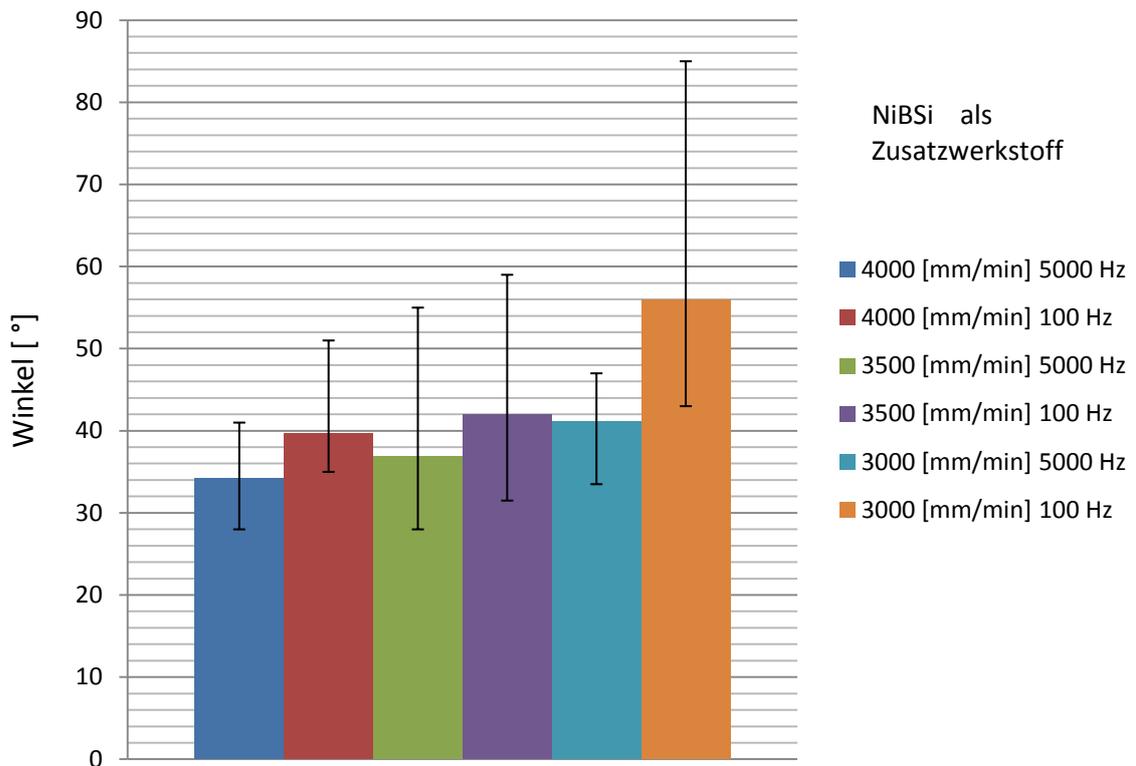
**Frequenz** 100 [Hz]  
**Hopper** 3100 [min<sup>-1</sup>]  
**Spalt** ohne



**Frequenz** 5000 [Hz]  
**Hopper** 3100 [min<sup>-1</sup>]  
**Spalt** 0,1 mm

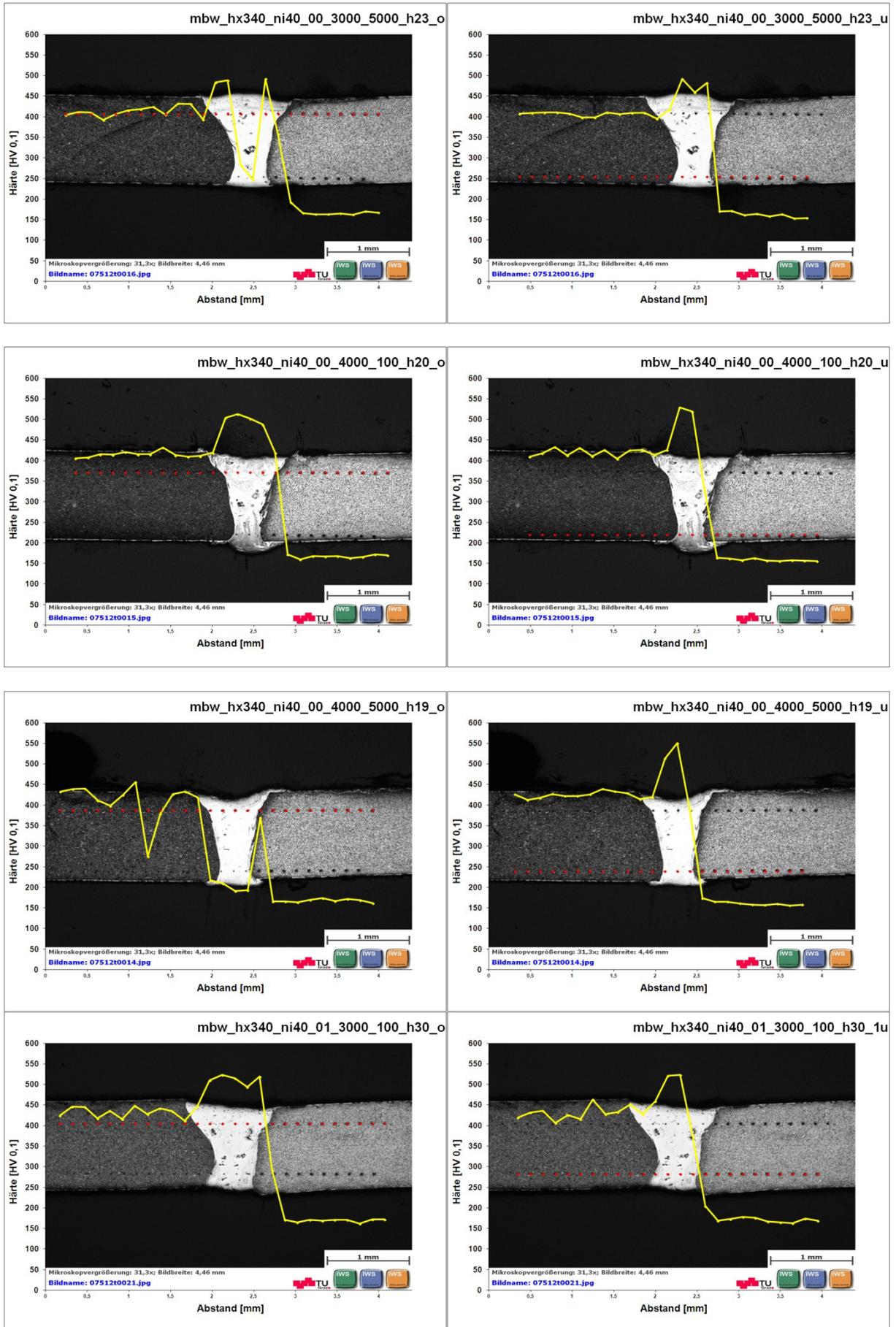


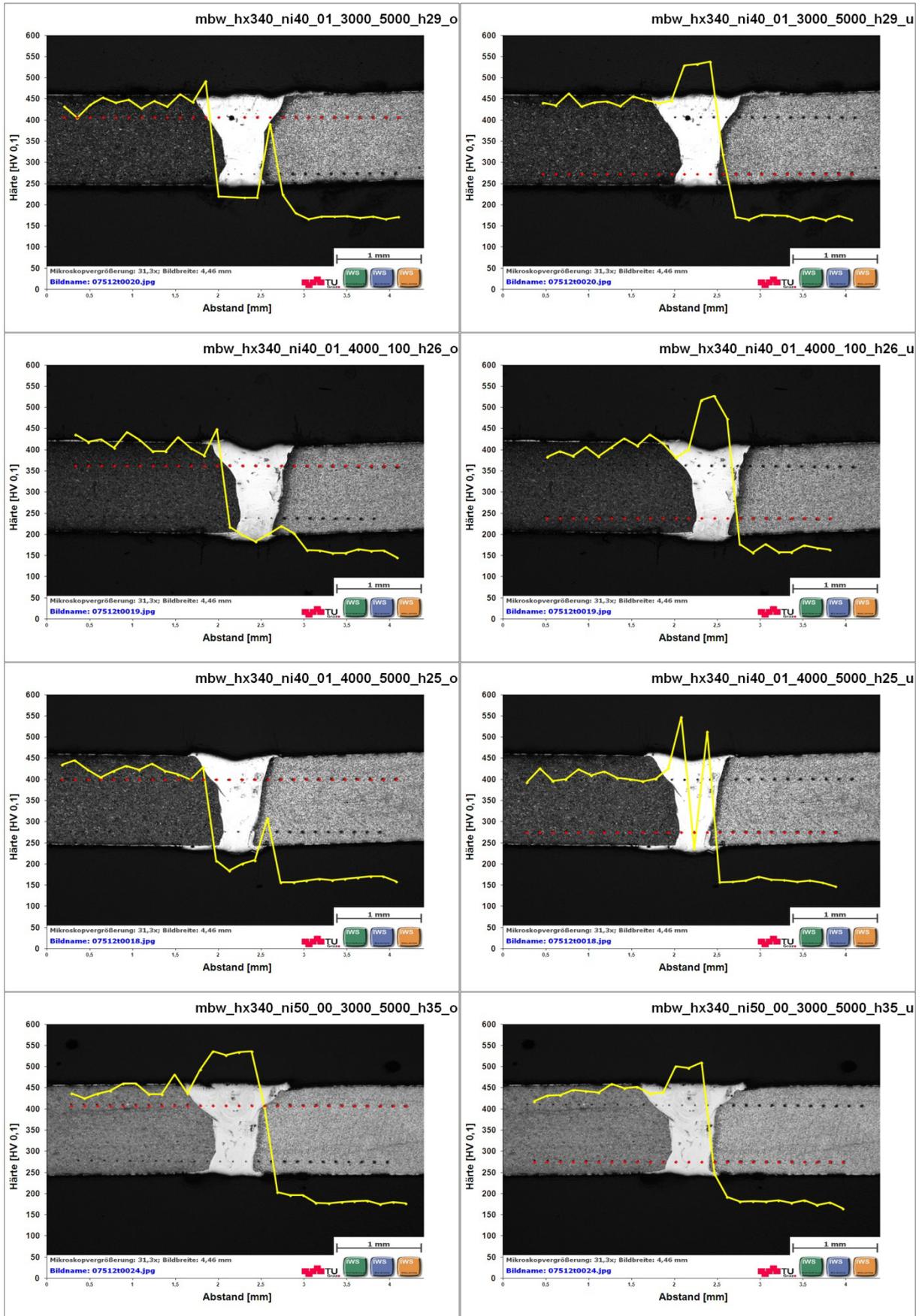
**Frequenz** 100 [Hz]  
**Hopper** 3100 [min<sup>-1</sup>]  
**Spalt** 0,1 mm

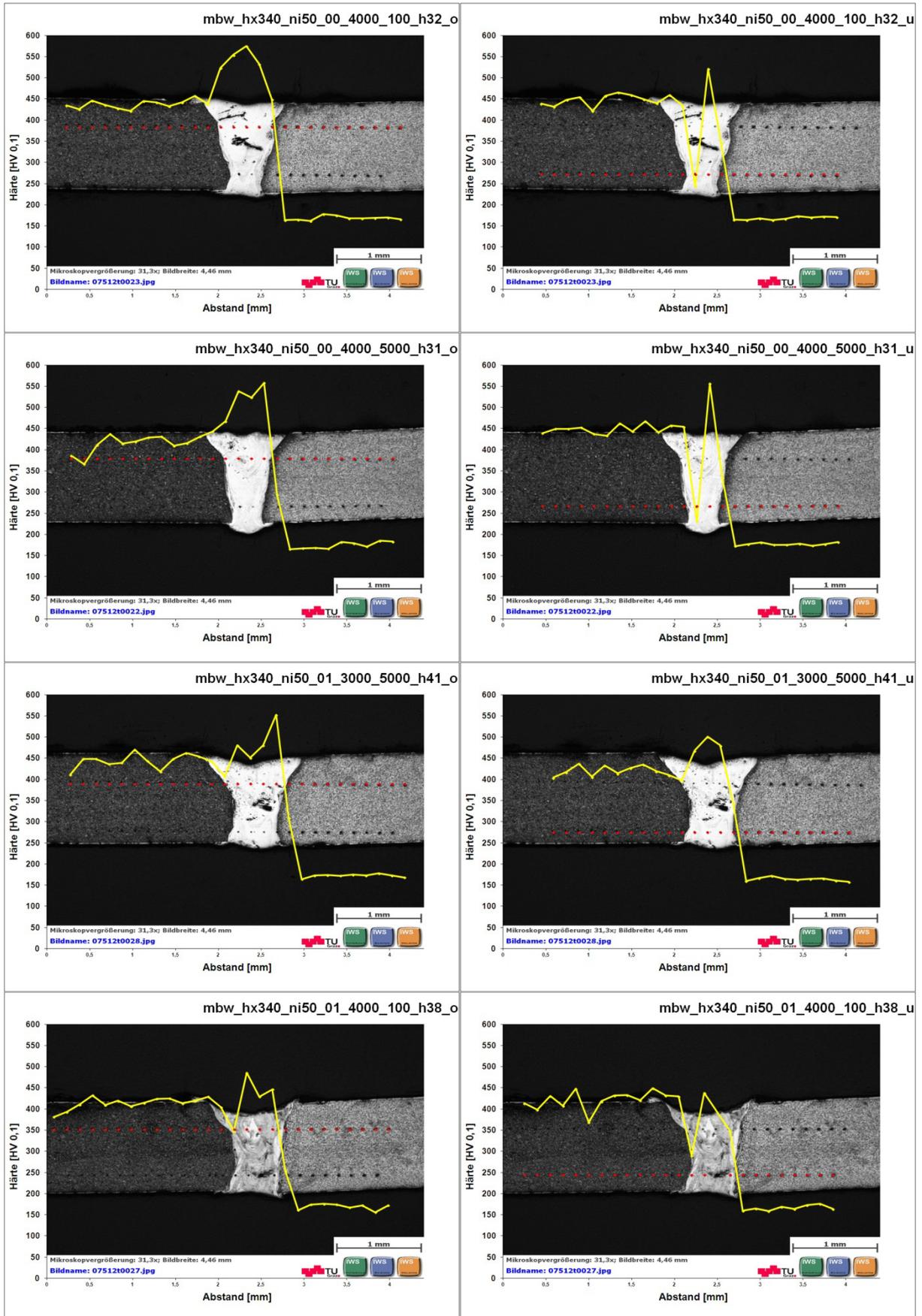


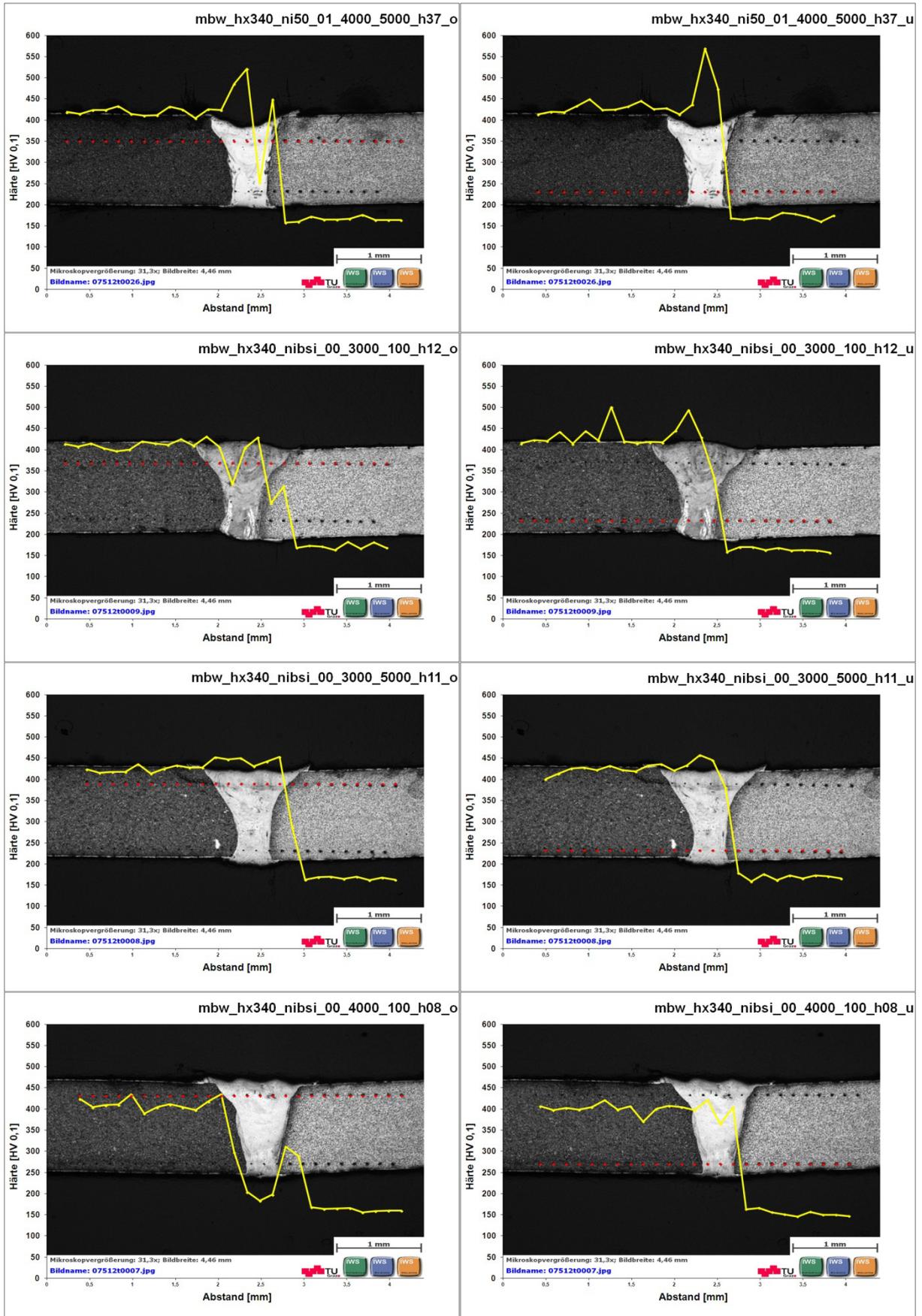
Schritt Nr.	Tiefe [mm]	Rundung R=1mm	Rundung R=4mm	Schritt Nr.	Tiefe [mm]	Rundung R=1mm	Rundung R=4mm
1	0	0	0	27	5,2	66	41
2	0,2	2,6	1,5	28	5,4	67	43
3	0,4	5,3	2,5	29	5,6	68,5	44
4	0,6	8	4	30	5,8	69,5	47
5	0,8	11	5	31	6	70,5	49
6	1	14	6,5	32	6,2	71,5	51
7	1,2	17	8	33	6,4	72	53
8	1,4	20	9	34	6,6	73	55
9	1,6	23	10,5	35	6,8	74	57
10	1,8	26	12	36	7	74,5	59
11	2	29	13,5	37	7,2	75	61
12	2,2	32	15	38	7,4	75,5	63
13	2,4	35	16,5	39	7,6	76	65
14	2,6	38	18	40	7,8		67
15	2,8	41	19,5	41	8		69
16	3	44	21	42	8,2		71
17	3,2	46	23	43	8,4		73
18	3,4	49	24,5	44	8,6		74,5
19	3,6	51	26	45	8,8		76
20	3,8	54	28	46	9		77,5
21	4	56	30	47	9,2		79
22	4,2	58	31,5	48	9,4		80
23	4,4	60	33,5	49	9,6		81
24	4,6	61	35	50	9,8		82
25	4,8	63	37	51	10		83
26	5	64,5	39				

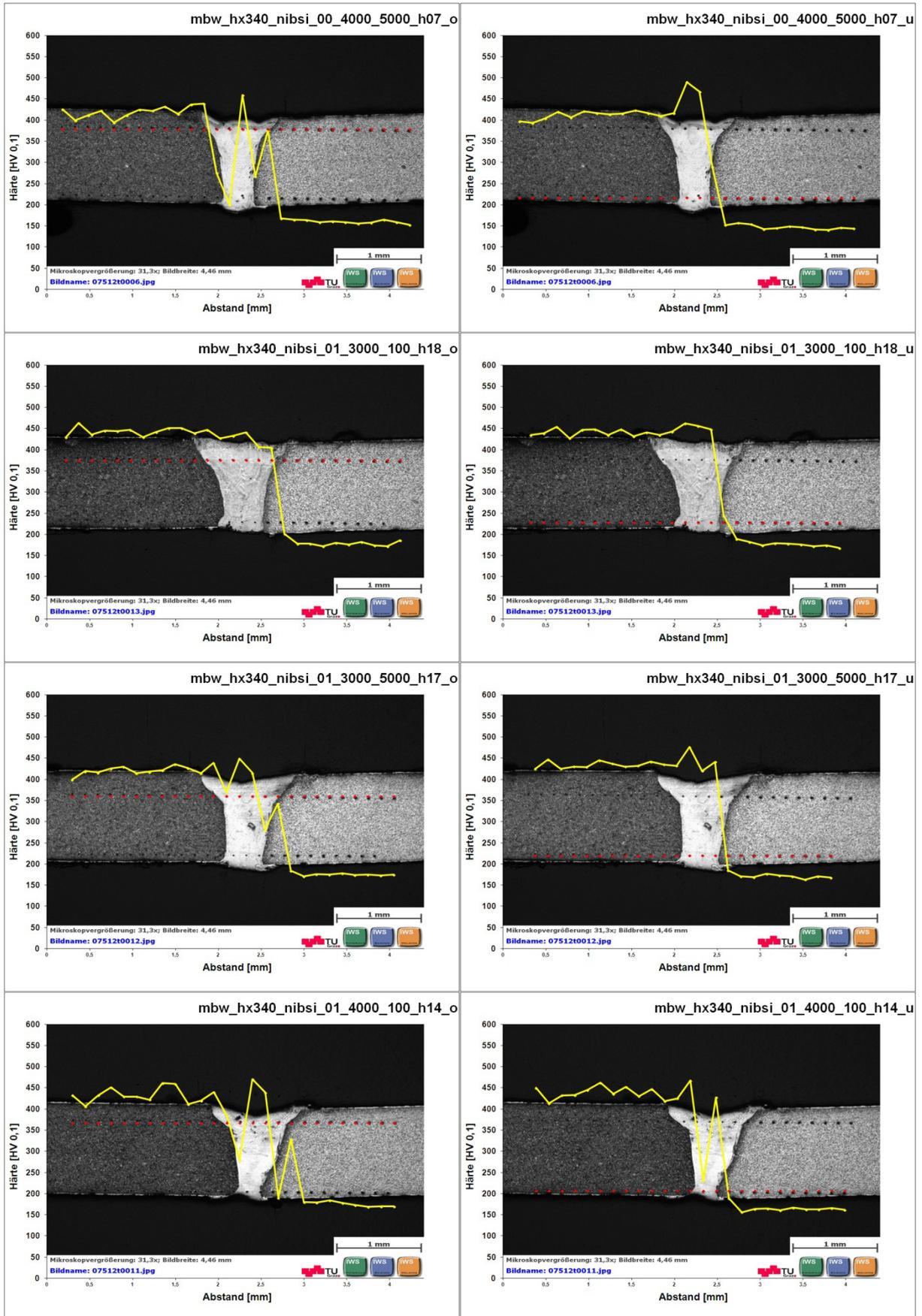
## **Anhang C: Härtemessung**

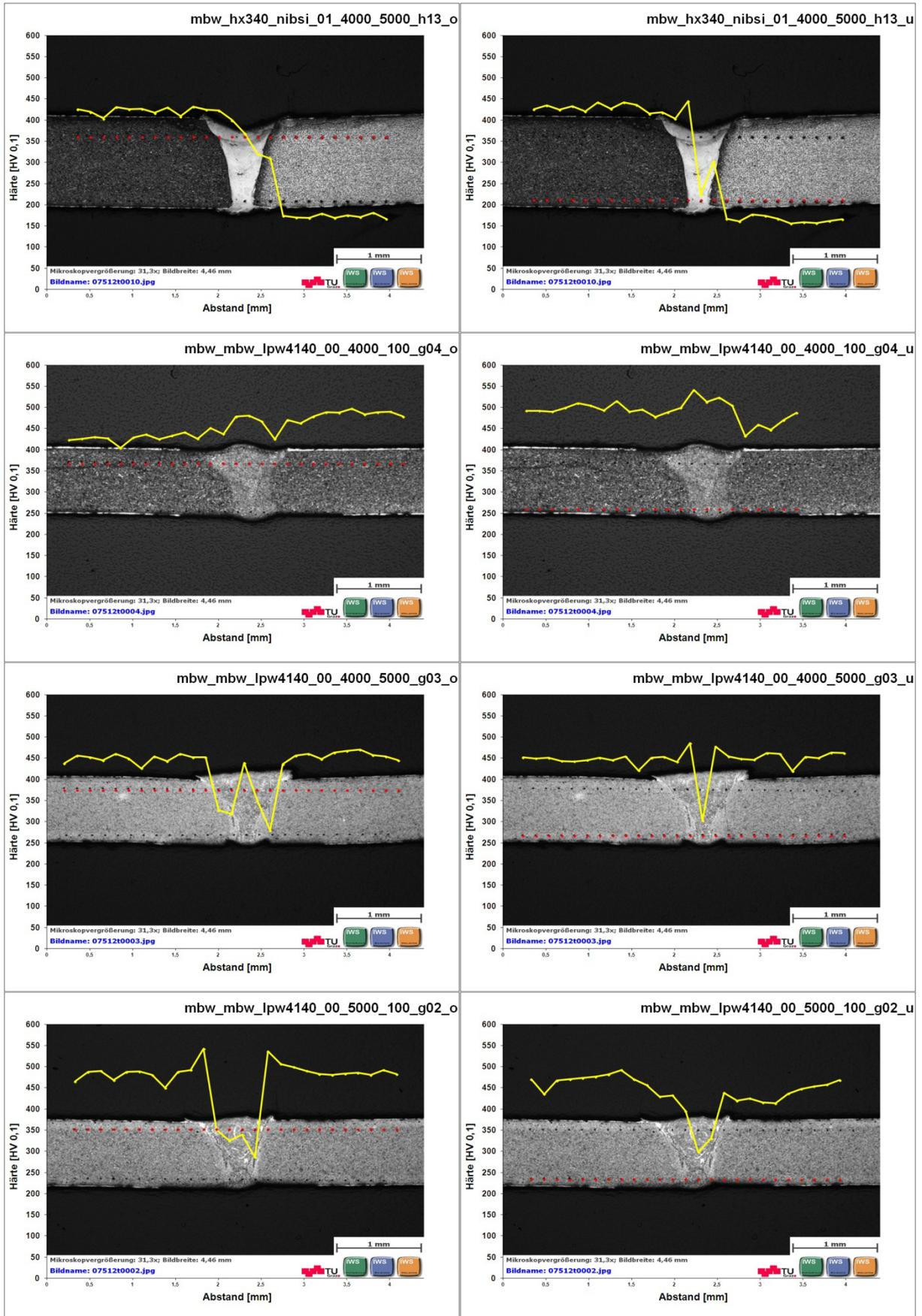


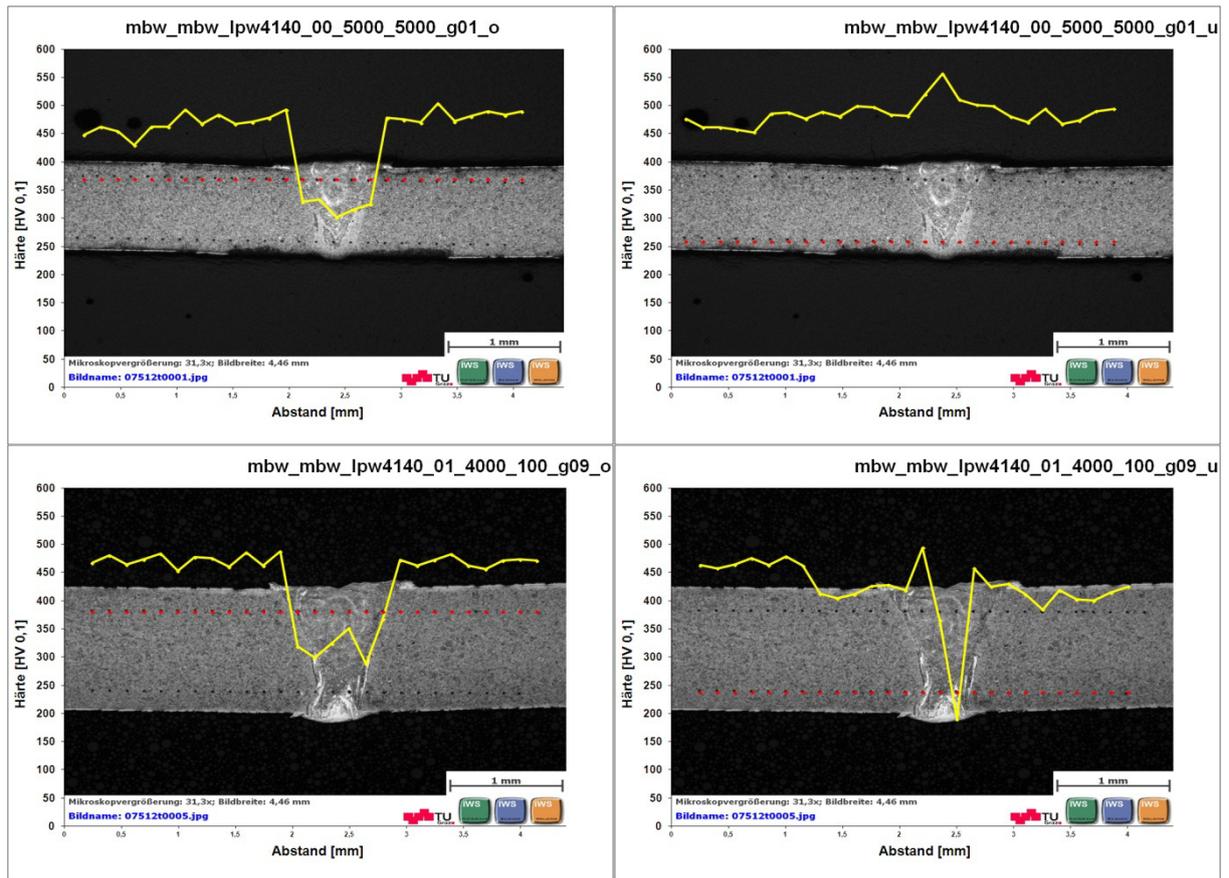












## **Anhang D: Zugversuche**

## Prüfprotokoll Zugversuche

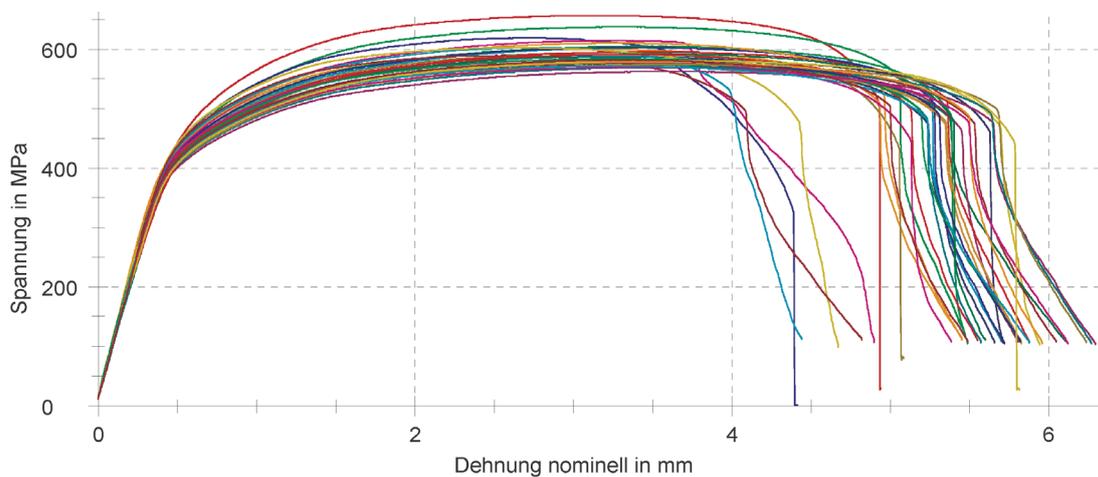
Überschrift : Prüfprotokoll Zugversuche Proben­typ : Flachprobe  
 Prüfnorm : DIN EN 10002-1 Vor­be­hand­lung : geschweißt  
 Art und Bezeichnung : W.18\_b Prüfer : Herbert Penker  
 Vorkraft : 200 N  
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min

### Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Art und Bezeichnung	R <sub>m</sub> MPa	F <sub>m</sub> kN
	1	W.09_a	657	11.09
	2	W.09_b	638	10.76
	3	W.08_a	619	10.45
	4	W.08_b	600	10.13
	5	W.07_a	615	10.38
	6	W.07_b	603	10.17
	7	W.01_a	583	9.84
	8	W.01_b	577	9.74
	9	W.02_a	574	9.68
	10	W.02_b	578	9.75
	11	W.03_a	578	9.76
	12	W.03_b	578	9.75
	13	W.04_a	588	9.92
	14	W.04_b	594	10.03
	15	W.05_a	596	10.05
	16	W.05_b	605	10.21
	17	W.06_a	603	10.18
	18	W.06_b	611	10.30

Legende	Nr	Art und Bezeichnung	R <sub>m</sub> MPa	F <sub>m</sub> kN
	19	W.10_a	582	9.83
	20	W.10_b	603	10.18
	21	W.11_a	603	10.17
	22	W.11_b	589	9.95
	23	W.12_a	592	10.00
	24	W.12_b	584	9.85
	25	W.13_a	570	9.62
	26	W.13_b	563	9.50
	27	W.14_a	570	9.62
	28	W.14_b	575	9.70
	29	W.15_a	591	9.98
	30	W.15_b	584	9.86
	31	W.16_a	580	9.79
	32	W.16_b	579	9.78
	33	W.17_a	570	9.62
	34	W.17_b	572	9.65
	35	W.18_a	581	9.81
	36	W.18_b	582	9.82

### Seriengrafik:



## Prüfprotokoll Zugversuche

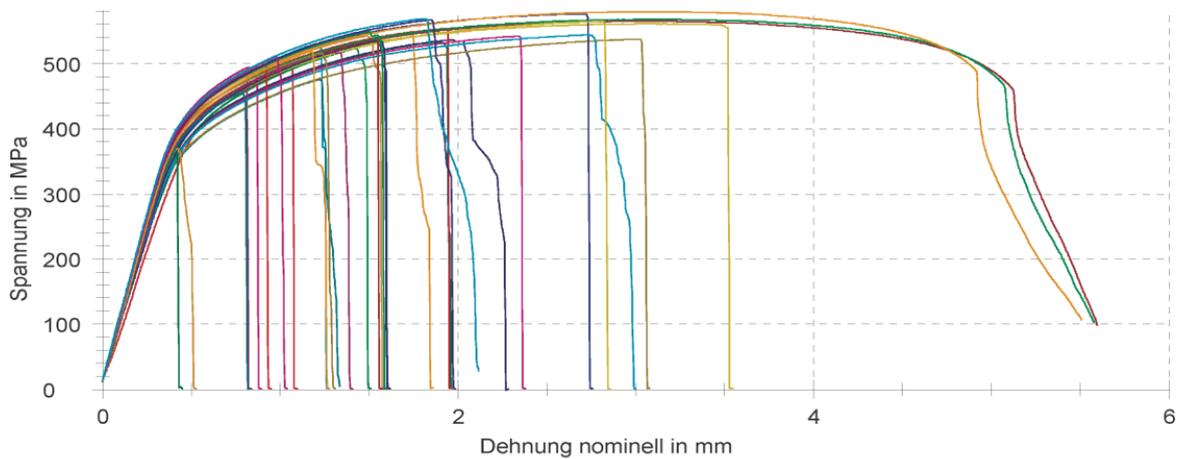
Überschrift : Prüfprotokoll Zugversuche Vorbehandlung : geschweißt  
 Prüfnorm : DIN EN 10002-1 Prüfer : Herbert Penker  
 Probentyp : Flachprobe  
 Vorkraft : 200 N  
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min

### Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Art und Bezeichnung	R <sub>m</sub> MPa	F <sub>m</sub> kN
	37	W.20_a	491	8.29
	38	W.20_b	523	8.83
	39	W.21_a	534	9.01
	40	W.21_b	545	9.19
	41	W.22_a	494	8.34
	42	W.22_b	531	8.96
	43	W.23_a	561	9.47
	44	W.23_b	565	9.54
	45	W.24_a	533	8.99
	46	W.24_b	537	9.06
	47	W.25_a	542	9.15
	48	W.25_b	484	8.16
	49	W.26_a	475	8.01
	50	W.26_b	537	9.07
	51	W.27_a	554	9.34
	52	W.27_b	568	9.58
	53	W.28_a	576	9.72

Legende	Nr	Art und Bezeichnung	R <sub>m</sub> MPa	F <sub>m</sub> kN
	54	W.28_b	580	9.79
	55	W.29_a	542	9.15
	56	W.29_b	544	9.18
	57	W.30_a	565	9.53
	58	W.30_b	535	9.04
	59	W.31_a	363	6.13
	60	W.31_b	535	9.02
	61	W.32_a	369	6.23
	62	W.32_b	518	8.74
	63	W.33_a	454	7.67
	64	W.33_b	516	8.71
	65	W.34_a	500	8.43
	66	W.34_b	550	9.28
	67	W.35_a	567	9.58
	68	W.35_b	519	8.75
	69	W.36_a	510	8.61
	70	W.36_b	569	9.60

### Seriengrafik:



## Prüfprotokoll Zugversuche

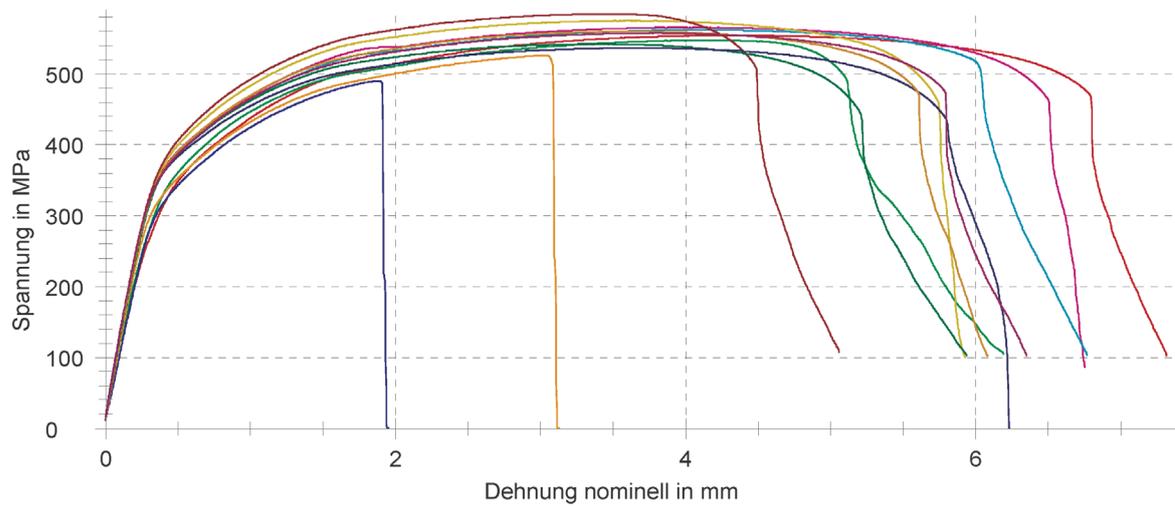
Überschrift : Prüfprotokoll Zugversuche      Vorbehandlung : geschweißt  
 Prüfnorm : DIN EN 10002-1                      Prüfer : Herbert Penker  
 Probentyp : Flachprobe  
 Vorkraft : 200 N  
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min

### Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Art und Bezeichnung	R <sub>m</sub> MPa	F <sub>m</sub> kN
<span style="color: red;">■</span>	71	10_a	554	9.35
<span style="color: green;">■</span>	72	10_b	547	9.24
<span style="color: blue;">■</span>	73	11_a	490	8.27
<span style="color: orange;">■</span>	74	11_b	526	8.88
<span style="color: magenta;">■</span>	75	12_a	566	9.54
<span style="color: cyan;">■</span>	76	12_b	562	9.48

Legende	Nr	Art und Bezeichnung	R <sub>m</sub> MPa	F <sub>m</sub> kN
<span style="color: yellow;">■</span>	77	13_a	575	9.71
<span style="color: red;">■</span>	78	13_b	585	9.87
<span style="color: green;">■</span>	79	14_a	542	9.15
<span style="color: blue;">■</span>	80	14_b	537	9.06
<span style="color: orange;">■</span>	81	15_a	560	9.45
<span style="color: purple;">■</span>	82	15_b	558	9.41

### Seriengrafik:



## Literaturverzeichnis

- [1] S. Simon, Werkstoffgerechtes Konstruieren und Gestalten mit metallischen Werkstoffen, Habilitationsschrift, 2007.
- [2] A. S. Ganzer, „Hochfester und leicht umformbarer Stahl für den Automobilbau,“ *Laserschweißen*, pp. 33-37, 28 März 2009.
- [3] ThyssenKrupp, „Laserschweißnaht an AS - Feiblechen 22MnB5 ohne Kantenbehandlung“.
- [4] „Wikipedia - Schweißen,“ [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Schweißen>. [Zugriff am 12 2012].
- [5] P. Enzinger, Fügetechnik. Skriptum zur Vorlesung, Technische Universität Graz, 2008.
- [6] G. S. Herbert Fritz, Fertigungstechnik, Berlin: Springer Vieweg, 2012.
- [7] „Schweisemaschinen,“ KNAUTZ, [Online]. Available: <http://www.schweisemaschinen.net/schweisemaschinen/plasma-schweisemaschinen/plasmaschweissen-vs-wig-schweissen/>. [Zugriff am 02 03 2013].
- [8] V. S. Hans J. Fahrenwaldt, Praxiswissen Schweißtechnik, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
- [9] Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 088 Beiblatt 2, Schweißgeeignete Feinkornbaustähle - Richtlinien für die Verarbeitung, besonders für das Schmelzschiessen; Ermittlung der Abkühlzeit  $t_{8/5}$  zur Kennzeichnung von Schweißtemperaturzyklen. 4. Ausgabe, Düsseldorf : Verlag Stahleisen, 1993.
- [10] F. Rick, Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschiessen, München: Herbert Utz Verlag, 2001.
- [11] P. Cerjak, Schweißtechnik. Skriptum zur Vorlesung, Technische Universität Graz, 2007.
- [12] Roloff/Matek Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung, 20., überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag , 2011.
- [13] L. Lohrmann, Kleine Werkstoffkunde für das Schweißen von Stahl und Eisen, Düsseldorf: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren, DVS-Verlag, 1995.
- [14] G. Buchfink, Werkzeug Laser. Ein Lichtstrahl erobert die industrielle Fertigung,

- Würzburg: 1. Auflage, Vogel, 2006.
- [15] H. Hügel, Laser in der Fertigung. Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009.
- [16] M. G. G. Krefeld, „Messer Group GmbH: Schutzgas-Schweißen. Ausgewählte Übersichtstabellen,“ [Online]. Available: [http://www.messergroup.com/de/Daten/Fachbroschueren/Schweissen\\_und\\_Schneiden//Schutzgas\\_Schweissen\\_Schutzgasschweissen\\_ausgewaehlte\\_Uebersichtstabellen.pdf](http://www.messergroup.com/de/Daten/Fachbroschueren/Schweissen_und_Schneiden//Schutzgas_Schweissen_Schutzgasschweissen_ausgewaehlte_Uebersichtstabellen.pdf). [Zugriff am 27 01 2013].
- [17] R. Poprawe, Lasertechnik für die Fertigung. Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur, Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [18] „Absorptionskurven,“ [Online]. Available: [http://wiki.zimt.uni-siegen.de/fertigungsautomatisierung/index.php/Einsatz\\_von\\_Strahlschwei%C3%9Fverfahren\\_im\\_multimaterialen\\_Fahrzeugleichtbau](http://wiki.zimt.uni-siegen.de/fertigungsautomatisierung/index.php/Einsatz_von_Strahlschwei%C3%9Fverfahren_im_multimaterialen_Fahrzeugleichtbau). [Zugriff am 2013 02 01].
- [19] Schinzel, Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Automobilbau, Stuttgart: Herbert Utz Verlag - Wissenschaft München, 2002.
- [20] H.-D. Dobler, Fachkunde Metall, 54., neu bearb. Aufl. ; 6 Dr., Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel, 2003.
- [21] „Hochschule Aalen,“ [Online]. Available: [www.htw-aalen.de/sgv/Materialographie/lehre/prakt/umwandlungstahl/ztu\\_c45\\_gross.htm](http://www.htw-aalen.de/sgv/Materialographie/lehre/prakt/umwandlungstahl/ztu_c45_gross.htm). [Zugriff am 02 03 2013].
- [22] „ThyssenKrupp, Mangan-Bor-Stähle MBW zum Warmformhärten,“ 2008. [Online]. Available: [www.thyssenkrupp-steel-europe.com/tiny/sn/download.pdf](http://www.thyssenkrupp-steel-europe.com/tiny/sn/download.pdf). [Zugriff am 27 01 2013].
- [23] „ThyssenKrupp, HX340,“ 2008. [Online]. Available: [http://www.thyssenkrupp.at/files/qs/TechnischeInfo/Feinblech\\_und\\_oberflaechenveredeltes\\_Material/Hoehere\\_feste\\_IF\\_Staehle.pdf](http://www.thyssenkrupp.at/files/qs/TechnischeInfo/Feinblech_und_oberflaechenveredeltes_Material/Hoehere_feste_IF_Staehle.pdf). [Zugriff am 12 2012].
- [24] n. S. GmbH, *Neue Technologie eröffnet neue Wege für ihre Produkte von morgen*.
- [25] L. Technology, *Metal additive manufacturing powders*, England, 2011.
- [26] K. C. Toyserkani, Laser Cladding, Boca Raton London New York Washington, D.C.: CRC Press, 2005.

- [27] H. u. C. K. Schumann, Metallographie 13., neubearb. Aufl., Leipzig: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, 1991.
- [28] T. Merkel, Taschenbuch der Werkstoffe; 7. Aufl., München: Fachbuchverlag Leipzig, 2008.
- [29] M. Wolf, Zur Phänomenologie der Heißrissbildung beim Schweißen und Entwicklung aussagekräftiger Prüfverfahren, Berlin: Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft GmbH, 2006.
- [30] J. Schuster, Heißrisse in Schweißverbindungen. Entstehung, Nachweis und Vermeidung, Düsseldorf: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren, DVS-Verlag, 2004.
- [31] „Wikipedia - Härte,“ [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Härte>. [Zugriff am 11 2012].
- [32] K.-H. G. u. J. Feldhusen, Taschenbuch für den Maschinenbau Auflage 23., Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2007.
- [33] „EDX Analyse,“ [Online]. Available: <http://www.ims-analytics.de/methoden/rasterelektronenmikroskopie-und-elektronenstrahlmikroanalyse-remedx/>. [Zugriff am 1 2013].
- [34] Schweißtechnik 8, Europäische/internationale Normung: Schweißtechnisches Personal, Verfahrensprüfung, Qualitätsanforderungen, Düsseldorf, Berlin ; Wien [u.a.]: Beuth, Verl. für Schweißen und Verwandte Verfahren.
- [35] G. Schulze, Die Metallurgie des Schweißens Eisenwerkstoffe - Nichteisenmetallische Werkstoffe, Heidelberg Dordrecht London New York: © Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [36] A. Mertens, Tailord Blanks. Stahlprodukte für den Fahrzeug-Leichtbau, 1.Auflage, München: Verlag Moderne Industrie, 2003.
- [37] Hora, „Digitale Automobilfabrik - Sonderverfahren. Vorlesung 6. ETH,“ 2010. [Online]. Available: <http://www.ivp.ethz.ch/education/vorlesungen/methvirtproz/skriptmethvirtprod/6.1>. [Zugriff am 11 2012].
- [38] „Polymer Service GmbH Merseburg,“ [Online]. Available: [http://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Energiedispersive\\_Röntgenspektroskopie](http://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Energiedispersive_Röntgenspektroskopie). [Zugriff am 11 2012].

- [39] G. Feigl, Qualitätssicherung, Graz: Institut für Werkstoffkunde TUGraz, 2010.
- [40] „Wikipedia,“ [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Härte>. [Zugriff am 11 2012].
- [41] U. Wegmann, Temperaturzyklen beim Lichtbogenschweißen - Einfluß von Schweißverfahren und Nahtart auf die Abkühlzeit. Schweißen und Schneiden, Jahrgang 28, 1976.
- [42] DIN EN 1011-1: Empfehlung zum Schweißen metallischer Werkstoffe, Teil 1: Allgemeine Anleitungen für Lichtbogenschweißen, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1998.

# Abbildungverzeichnis

Abbildung 1.1 Tailored Produkte [1] .....	1
Abbildung 1.2 Schliffbild [3] .....	2
Abbildung 1.3 Zweiseitige Al-Si - beschichtetes Blech während des Schweißvorganges .....	3
Abbildung 1.4 Schematischer Schweißvorgang .....	4
Abbildung 1.5 Trumpf TrumaForm DMD 505 .....	5
Abbildung 2.1 Einteilung der Schweißverfahren [5] .....	6
Abbildung 2.2 Wirkung von Schweißverfahren bei unterschiedlicher Leistungsdichte [6].....	8
Abbildung 2.3 Form von Schweißbad und WEZ [7].....	9
Abbildung 2.4 EKD mit Temperaturverlauf und Abbildung der WEZ, Stahl [8] .....	9
Abbildung 2.5 Wärmeverteilung bei unterschiedlichen Schweißverfahren [11] .....	11
Abbildung 2.6 Schutz- und Prozessgase in Verwendung (CO <sub>2</sub> – Laser) [14] .....	13
Abbildung 2.7 Einfluss von Argon und Helium auf die Schweißnahtgeometrie [16].....	14
Abbildung 2.8 CO <sub>2</sub> Laser [14] .....	15
Abbildung 2.9 Laser – Funktionsprinzip [14].....	16
Abbildung 2.10 Prinzip des Fokussierens mit den wichtigsten Kenngrößen [14].....	17
Abbildung 2.11 Fokussierlinse und Brennweite [14] .....	18
Abbildung 2.12 Absorptionskurven verschiedener Werkstoffe [18] .....	19
Abbildung 2.13 Laserschweißverfahren [8] .....	19
Abbildung 2.14 Schematische Darstellung des Laserstrahl-tiefschweißen und der am Prozess beteiligten Mechanismen [19] .....	20
Abbildung 2.15 ZTU-Diagramm von C45 [21].....	21
Abbildung 2.16 ZTU-Diagramm von 22MnB5 [22] .....	22
Abbildung 2.17 hochfeste IF-Stähle [23] .....	23
Abbildung 4.1 Aufbau der Front Nozzle mit Düsenkanal.....	26
Abbildung 4.2 Laserschweißkopf mit Aufspannvorrichtung.....	27
Abbildung 4.3 Flussdiagramm .....	28
Abbildung 4.4 Unterschiedliche Frequenzen [14].....	31
Abbildung 4.5 Metallpulver NiBSi P .....	32
Abbildung 4.6 Schweißnaht mit Druckdifferenz von 500 mbar.....	34
Abbildung 4.7 Partikelverlauf.....	34
Abbildung 4.8 Schweißprinzip [26] .....	36
Abbildung 4.9 Presshärten .....	37
Abbildung 4.10 Probenbezeichnung .....	38
Abbildung 5.1: Schweißnahtanalyse [5].....	40
Abbildung 5.2 LPW4140 als Zusatzwerkstoff .....	41
Abbildung 5.3 Ni40 als Zusatzwerkstoff.....	42
Abbildung 5.4 Ni50 als Zusatzwerkstoff.....	42
Abbildung 5.5 NiBSi als Zusatzwerkstoff .....	43

Abbildung 5.6 beschichtete und entschichtete Probe.....	44
Abbildung 5.7 Bezeichnung von Heißrissen nach ihrer Lage im Schweißgut (SG) oder der Wärmeeinflusszone [29] .....	45
Abbildung 5.8 Mittelrippendefekt [30] .....	46
Abbildung 5.9 S Schweißnaht bei unterschiedlichen Schweißzusätzen .....	47
Abbildung 5.10 Schweißnaht bei unterschiedlichen Schweißzusätzen .....	48
Abbildung 5.11 Heißrissbildung.....	49
Abbildung 5.12 Härteverlauf .....	51
Abbildung 5.13 Probe H42 .....	51
Abbildung 5.14 Probe H24 .....	51
Abbildung 5.15 Probe G09 .....	52
Abbildung 5.16 Probe F16 .....	52
Abbildung 5.17 EDX Prinzip [33].....	53
Abbildung 5.18 EDX Analyse Probe H24 .....	54
Abbildung 5.19 EDX Analyse Probe H24 .....	55
Abbildung 5.20 EDX Analyse Probe H36 .....	56
Abbildung 5.21 EDX Analyse Probe H36 .....	57
Abbildung 5.22 EDX Analyse Probe H09 .....	58
Abbildung 5.23 EDX Analyse Probe H09 .....	59
Abbildung 5.24 EDX Analyse Probe G10 .....	60
Abbildung 5.25 EDX Analyse Probe G10 .....	61
Abbildung 5.26 EDX-Analyse Probe ohne Wärmebehandlung .....	62
Abbildung 5.27 EDX-Analyse Probe mit Wärmebehandlung 5min.....	63
Abbildung 5.28 EDX-Analyse Probe mit Wärmebehandlung 20min.....	63
Abbildung 5.29 Biegeprobe .....	64
Abbildung 5.30 Biegevorrichtung.....	65
Abbildung 5.31 CATIA Biegevorrichtung .....	65
Abbildung 5.32 Biegeversuche .....	67
Abbildung 5.33 Biegewinkel in Abhängigkeit vom Vorschub.....	68
Abbildung 5.34 Biegeversuche mit LPW4100 und ohne Schweißzusatz .....	69
Abbildung 5.35 Zugprobe mit LPW4140 .....	71
Abbildung 5.36 Zugversuch Ergebnisse NiBSi .....	71
Abbildung 5.37 Zugprobe mit NiBSi .....	72
Abbildung 5.38 Zugversuche Proben ohne Schweißmittel .....	72
Abbildung 6.1 Abblasen der AlSi Beschichtung.....	73
Abbildung 6.2 Schliffproben.....	74
Abbildung 6.3 Schliffproben von Schweißversuchen mit Abblasvorrichtung.....	75

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 chemischen Zusammensetzung 22MnB5.....	22
Tabelle 4.1 Werkstoffkombinationen .....	29
Tabelle 4.2 Chemische Zusammensetzung des Metallpulvers [24][25] .....	32
Tabelle 4.3 Kornfraktion bei Metallpulvern .....	32
Tabelle 4.4 Pulver Menge.....	33
Tabelle 4.5 Gaskonfiguration .....	35
Tabelle 5.1 Einfluss von Legierungs- und Begleitelementen auf die Heißrissanfälligkeit [30]	45
Tabelle 5.2 Umrechnung Tiefe-Winkel.....	66
Tabelle 5.3 Biegeversuch Ergebnisse .....	66
Tabelle 6.1 Schweißparameter für Ablasssystem.....	74

# Zeichnungen