

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## **Schlussbericht für das BMBF-Verbundprojekt**

### **Hybrides Fügen von Multimaterialsystemen für Kraftfahrzeuge**

**Teilvorhaben der Brandenburgischen Technischen Universität**

**Cottbus – Senftenberg**

ehemals Hochschule Lausitz (FH)

**"Verbindungstechnologie Stahl-Stahl und Stahl-Magnesium"**

**b-tu**

Brandenburgische  
Technische Universität  
Cottbus - Senftenberg



Projektträger Jülich  
Forschungszentrum Jülich GmbH



## Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:  BTU Cottbus - Senftenberg Großenhainer Str. 57, 01968 Senftenberg  Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Ralf Winkelmann	Förderkennzeichen:  HL: 03X3032H
--	--

### **Vorhabenbezeichnung:**

**Hybrides Fügen von Multimaterialsystemen für Kraftfahrzeuge**

**Teilprojekt der BTU Cottbus-Senftenberg (ehemals Hochschule Lausitz):**

**Verbindungstechnologie Stahl-Stahl- und Stahl-Magnesium**

Laufzeit	des	Vorhabens:	Berichtszeitraum
<b>01.04.2011 - 31.03.2014</b>			<b>01.04.2011 - 31.03.2014</b>

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03X3032H gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Der Schlussbericht enthält Daten, die nicht an die TIB weitergeleitet werden. Diese sind gelb markiert



BTU Cottbus - Senftenberg  
Fertigungstechnik / Tribologie  
Prof. Dr.-Ing. R. Winkelmann  
Großenhainer Str. 57  
01968 Senftenberg

Fon: +49 (0)3573 / 85 558  
Fax: +49 (0)3573 / 85 426  
Homepage: <http://www.hs-lausitz.de/fhl/mb/labor/tribologie/Index.html>

Senftenberg, August 2014



- I. Kurze Darstellung
  - I.1 Aufgabenstellung
  - I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde
  - I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens
    - I.3.1 Planung
    - I.3.2 Ablauf
  - I.4 Wissenschaftlicher technischer Stand
    - I.4.1 Erkenntnisstand
    - I.4.2 Fachliteratur
  - I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen
- II. Eingehende Darstellung
  - II.1. Verwendung der Zuwendungen und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit  
Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele
    - II.1.1 Zuwendungen und Ausgaben
    - II.1.2 Ziele und Ergebnisse
      - II.1.2.1 AP1 Erstellung Lastenheft
      - II.1.2.2 AP2 Versuchsaufbau / Messtechnik
      - II.1.2.3 AP3 Energieführung / Benetzung
      - II.1.2.4 AP4 Versuche mit Al-Basislegierung
      - II.1.2.5 AP5 Versuche mit Zn-Basislegierung
      - II.1.2.6 AP6 Versuche mit Mg-Basislegierung
      - II.1.2.7 AP7 Sysweld-Berechnungen
      - II.1.2.8 AP8 Funktionsmuster
  - II.2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises
  - II.3. der Notwendigkeit der Angemessenheit der geleisteten Arbeit
  - II.4. des voraussichtlichen Nutzens und Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplans
  - II.5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen  
Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens an anderen Stellen
  - II.6. der erfolgten und geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse



## **I. Kurze Darstellung**

### **I.1 Aufgabenstellung**

Das Automobil der Zukunft muss die wachsenden gesellschaftlichen Erwartungen in Hinblick auf Energieeffizienz, Kraftstoffverbrauch, Klimaschutz, Sicherheit, Komfort und Nachhaltigkeit erfüllen. Der bereits beschrittene Weg das Fahrzeuggewicht durch den Einsatz innovativer Werkstoffe im Multimaterialsystem (hochfeste Stähle, Aluminium, und Magnesium) zu reduzieren, erfordert eine intelligente Kombination von Werkstoffen, Bauweisen und Fertigungsverfahren. Dabei bildet das tragfähige Verbinden der unterschiedlichen Werkstoffe einen zentralen Baustein zur Realisierung dieser Leichtbauweisen.

Ziel des Vorhabens ist deshalb die Entwicklung einer neuen Füge-technologie zur Herstellung von Karosseriekomponenten für Kraftfahrzeuge aus verschiedenen Werkstoffen durch den Einsatz von thermischer Energie in Form von Laserstrahlung und magnetischer Induktion.

Die Fertigungstechnik/ Tribologie der BTU Cottbus - Senftenberg beschäftigte sich mit der Entwicklung der technologischen Grundlagen zur Herstellung von Stahl-Stahl- und Stahl-Magnesium-Verbindungen. Hierfür wurden drei Energiequellen benutzt. Es handelt sich um die Laserstrahlung, die Induktion sowie den Lichtbogen.

Die Multimaterialsysteme werden gebildet aus hoch festen Stählen der Grundqualität 22MnB5 und Tiefziehstählen der Qualitäten DX53 bzw. DC04 sowie Magnesiumgrundwerkstoffen der Qualität AZ31. Die grundsätzlichen physikalischen Eigenschaften der zu fügenden Bauteile sollen im Verbindungsbereich weitestgehend erhalten bleiben. Somit war es erforderlich, die Prozessenergie zu begrenzen.

Grundlegende Betrachtungen erfolgen auf der Basis der Berechnung von Wärmefeldern und dem Benetzungsverhalten bei Variation der Energieführung, der Grundwerkstoffbeschichtung sowie der Verbindungsgeometrie. Es wurden die vom Projektpartner TK hergestellten und vom Projektpartner VW wärmebehandelten Bauteile mit den von den Projektpartnern Grillo und Elisental hergestellten Zusatzwerkstoffen gefügt.

Die theoretischen Erkenntnisse wurden praktisch in einer vierstufigen Versuchsdurchführung überprüft.

1. Benetzungsuntersuchungen bei Variation der Grundwerkstoffvorbehandlung, der Energieführung am Grund- und am Zusatzwerkstoff sowie der Prozess- und Schutzgasführung
2. Anpassung der Energie- und Gasführung an die Fügegeometrie
3. Herstellung und Prüfung von Verbindungen bei Variation der Fügegeometrie
4. Optimierung hinsichtlich Fügegeschwindigkeit

Für das Erzielen einer ausreichenden Benetzung und somit für positive Projektergebnisse entscheidend sind die vorhandenen bzw. sich während des Fügeprozesses einstellenden Eigenschaften der oberflächennahen Bereiche der Fügezone.

Angestrebt wurden Verbindungseigenschaften, die den Eigenschaften der Grundwerkstoffe entsprechen. Zusätzlich wurden Untersuchungen mit dem Ziel der Herstellung gradiertter Verbindungen durchgeführt. Diese sollte zum einen aus dem Prozess heraus (in situ) aber auch mit dem vom Projektpartner Grillo entwickelten Vormaterial erzeugt werden.

Es erfolgten vergleichende Betrachtungen, so dass eine direkte Beurteilung der Vor- und Nachteile der benutzten Technologievarianten ableitbar sind. Schlussendlich wurden die theoretischen Ansätze der Energiebetrachtungen mit den versuchstechnischen Ergebnissen in Übereinstimmung gebracht, so dass verallgemeinerbare Ansätze existieren, um die Bedeutung von Geometrieänderungen einschätzen zu können.



Die im Labormaßstab entwickelten Verbindungstechnologien waren bei der Herstellung eines Funktionsmusters zu überprüfen. Sich ergebende Eigenschaften der Verbindung waren zu untersuchen. Die Fertigung des Funktionsmusters war eine gute Voraussetzung dafür, die angestrebte zeitnahe Überführung der gewonnenen Erkenntnisse prüfen zu können.

Die Werkstoff (Grund-, Zusatzwerkstoff)- und Technologieentwicklung, die Temperaturfeld- und Spannungsberechnungen, die konstruktiven Betrachtungen zur Verbindungsgeometrie sowie die schlussendlich bekannten Eigenschaften der Verbindungszone sind Elemente des Systems zur Herstellung von Verbindungen für Multimaterialsysteme. Die Nutzung niedrig schmelzender Zusatzwerkstoffe bietet zusätzlich das Potential dafür, die entstandene Fügeverbindung durch Aufschmelzen der Verbindung problemlos zu recyceln bzw. eine Regenerierung einzuleiten.

Das grundlegende Verständnis der Verbindungsbildung, der Diffusionsvorgänge infolge der Fügeprozesse bietet die Basis dafür, die lokal gewünschten Eigenschaften der Fügezone den Zielstellungen anzupassen. Hierfür waren metallografische, chemische und thermomechanische Prüfungen zwingend erforderlich.

## **I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Im Konsortium sind alle für die Themenbearbeitung notwendigen Kompetenzen vertreten. Beginnend beim Hersteller höher fester Grundwerkstoffe über die Zusatzwerkstoffproduzenten und die Anwender bis hin zum Hersteller von Induktionsanlagen. Die Kombination von fügetechnischer und werkstoffwissenschaftlicher Kompetenz auf der Forschungsseite ist die beste Voraussetzung dafür, die Zielstellungen und eine Verallgemeinerung der Ergebnisse auf hohem Niveau zu erreichen.

Im Rahmen des Projektes wurde mit folgenden Forschungseinrichtungen und Industriefirmen eine Kooperationsvereinbarung abgeschlossen:

### **Forschungseinrichtungen:**

- Ruhr-Universität Bochum (LWT), Universitätsstraße 150, 44780 Bochum
- BIAS – Bremer Institut für angewandte Strahltechnik GmbH, Klagenfurter Straße 2, 28359 Bremen
- BTU Cottbus – Senftenberg ehemals Hochschule Lausitz (FH), Großenhainer Straße 57, 01968 Senftenberg

### **Industriepartner:**

- ThyssenKrupp Steel Europe AG, Kaiser-Wilhelm-Straße 100, 47166 Duisburg
- VW AG Wolfsburg, 38436 Wolfsburg
- Waldaschaff Automotive GmbH, Fabrikstraße 6, 63857 Waldaschaff
- Grillo Werke AG, Weseler Straße 1, 47169 Duisburg
- Drahtwerk Elisental W. Erdmann GmbH & Co, Werdohler Straße 40, 58809 Neuenrade



- Steremat Induktion GmbH, Otto-Lilienthal-Str. 4, D - 15566 Schöneiche bei Berlin

Am Lehrstuhl Fertigungstechnik/ Tribologie der BTU Cottbus - Senftenberg wird seit mehreren Jahren auf den Gebieten der Herstellung von Mischverbindungen zwischen Al (Mg) und St gearbeitet. Es gelang erstmals, den Zn-Basis-Draht stromführend als Zusatzwerkstoff für das Lichtbogenschweißen bzw. -löten zu nutzen. Hierzu war die Entwicklung einer geeigneten Energieübertragung (Stromdüse aus Grafit) notwendig. Hinzu kommt die Entwicklung eines Brenners mit interner Absaugung, so dass der sich trotz Nutzung geregelter Kurzlichtbögen bildende Zn-Dampf nicht nach außen dringen kann. Um derart neue Prozesse praxistauglich zu gestalten, ist sowohl ein qualifiziertes Personal als auch eine sehr ausgereifte Messtechnik erforderlich. Beides ist vorhanden. Zur Anwendung kommen höchst auflösende Messgeräte mit Abtastraten bis 2,5 GS. Es sind mehrere Messkarten für die Registrierung von hoch dynamischen Prozessen vorhanden. Die Visualisierung erfolgt mit einer Hochgeschwindigkeitskamera bei bis zu 150.000 fps. An der BTU Cottbus - Senftenberg wird mit einem Nd:YAG Laser gearbeitet. Er hat eine maximale Pulsleistung von 15 kW bei einer Pulsfrequenz von 500 Hz. Er kann an eine 5-Achsen-Bearbeitungsanlage gekoppelt werden. Die Positionierung an einen Gelenkroboter ist ebenfalls möglich. Ein Diodenlaser der Firma Laserline mit 1 kW Leistung und einer Strahlqualität (Strahlparameterprodukt) von 66 mm\*mrad komplettiert die vorhandene strahltechnische Ausrüstung.

Weiterhin ist eine 150 kW Induktionsanlage (SDF) vorhanden. Für die theoretische Ermittlung von thermischen Wirkungen auf die Grundwerkstoffe wird das Programmpaket Sysweld benutzt. Dies ist auch qualifiziert zur Anwendung zu bringen für die Beurteilung der Induktionserwärmung und die Auswirkungen dieser auf die beteiligten Werkstoffe. Es sind in den letzten Jahren hierzu eine Vielzahl von Berechnungen im Rahmen von Forschungsthemen realisiert worden.

Im Weiteren werden in der Fertigungstechnik/Tribologie der BTU Cottbus - Senftenberg Stahl-Stahl-Verbindungen unter Beachtung der Korrosionsschutzwirkung vorhandener Beschichtungen entwickelt. Hinzu kommen die theoretischen Betrachtungen zur Energieführung beim Fügen.

### **I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

#### **I.3.1 Planung**

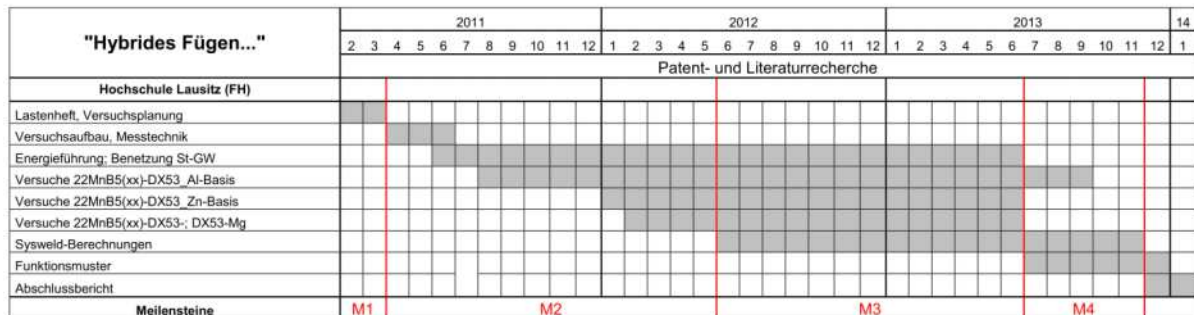
Die Aufgaben wurden entsprechend den aufgestellten Plänen bearbeitet. In der Tabelle 1 sind die von den Vertretern der Fertigungstechnik /Tribologie der BTU Cottbus - Senftenberg zu lösenden Aufgaben definiert.



*Tabelle 1: Aufgaben der BTU Cottbus-Senftenberg*

1	Theoretische und versuchstechnische Beurteilung von Legierungselementen in existierenden Zusatzwerkstoffen unter Berücksichtigung einer definierten Vermischung mit dem Grundwerkstoff
2	Bewertung der von den Projektpartnern entwickelten Zusatzwerkstoffe zur gezielten Ausbildung von Gefüge und Eigenschaften unter Berücksichtigung der Elemente existierender Stahlbeschichtungen; Beurteilung des Benetzungsverhaltens und Beschreibung der technologischen Anwendbarkeit
3	Entwicklung der Füge-technologie - bestehend aus der Laser-Induktions- sowie Lichtbogen-Wirkung sowie Qualifikation dieser zu Herstellung von Verbindungen
4	Applikation bekannter und der neu entwickelten Zusatzwerkstoffe und Beurteilung der hergestellten Verbindungseigenschaften einschließlich der Verfahrensparameter-optimierung
5	Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf bauteilähnliche Strukturen für Stahl/Stahl, Stahl/Al und Stahl/Mg-Verbindungen
6	Prüfung der chemischen Eigenschaften der Verbindung
7	Berechnung der Energiewirkung und Abgleich mit den Versuchsergebnissen Beispielrechnungen
8	Herstellung von Funktionsmustern und Ergebnisbewertung

Die organisatorische Planung wurde in einem Balkendiagramm festgelegt, Bild 1.



*Bild 1 : Balkenplan der BTU Cottbus-Senftenberg (ehemals HL)*

Die Meilensteine innerhalb des BTU-Projektteiles sind identisch mit den Meilensteinen im Gesamtprojekt. Sie sind im Zeitplan wie folgt platziert:

#### Meilenstein 1:

**31.03.2011**

Die Lastenhefte sind bei allen Projektpartnern erarbeitet und zeitlich sowie inhaltlich abgestimmt. Die Versuchsplanung existiert. Die BTU Cottbus - Senftenberg fungiert innerhalb des Projektes als Ansprechpartner.

#### Meilenstein 2:

**31.05.2012**



Es sind zwei (drei) Versuchsstände aufgebaut und messtechnisch ausgerüstet. Die Benetzungsuntersuchungen zu den Varianten 22MnB5 und AZ31 sowie DX53 (DC04) sind realisiert. Diese Arbeiten werden bis zum Meilenstein 3 weitergeführt, da sie von entscheidender Bedeutung für das Projektergebnis sind. Die Erarbeitung des Prozessverständnisses unter Nutzung der Prozessvisualisierung erfolgt fortlaufend bis 05/2013. Die Untersuchungen der ersten Verbindungen sind erfolgt, so dass die Anwendbarkeit der beiden Versuchsstände nachgewiesen ist.

#### **Meilenstein 3:**

**30.06.2013**

Die Untersuchungen zur Verbindungsherstellung, entsprechend dem 4-stufigen Programm, sind für alle Werkstoffkombinationen abgeschlossen. Die Berechnungen sind weitestgehend erfolgt und werden für die Fertigung der Funktionsmuster angewendet.

#### **Meilenstein 4:**

**30.11.2013**

Die Untersuchungen sind weitestgehend abgeschlossen. Die Berechnungen sind fertig und wurden bei der Funktionsmusterherstellung auf reale Bauteile adaptiert angewendet. Die praktische Anwendbarkeit ist nachgewiesen.

### **I.3.2 Ablauf**

Die ursprüngliche Planung des Projektes sah eine Laufzeit von 3 Jahren vor.

Das Projekt wurde im April 2011 gestartet und konnte regulär bis zum 31.03.2014 abgeschlossen werden.

Die Arbeiten wurden wie im Zeitplan definiert durchgeführt. In regelmäßigen Abständen wurden zu den Projekttreffen die Ergebnisse der Projektpartner vorgestellt und Ergebnisse ausgetauscht.

Die Projektbearbeiter stimmten sich zwischen den Treffen telefonisch und per Internet ab. Die Projektpartner hatten analoge Kenntnisstände. Die Ausgabenplanung erfolgte wie beantragt. Änderungen im Ablauf waren nicht notwendig.

## **I.4 wissenschaftlicher und technischer Stand**

### **I.4.1 Erkenntnisstand**

Die Herstellung von Mischverbindungen war und ist immer noch eine große Herausforderung für die Fügetechniker. In den letzten Jahren wurde neben der mechanischen, besonders die thermische Fügetechnik für die Herstellung derartiger Verbindungen qualifiziert. Mehrere fügetechnische Institute beschäftigten sich mit der Entwicklung von Technologien, um dieses Problem zu lösen. Auch die am Projekt beteiligten Forschungseinrichtungen BIAS und BTU Cottbus - Senftenberg arbeiteten bzw. arbeiten auf diesen Gebieten. Es entstand eine Vielzahl von Veröffentlichungen (siehe I.4.2).

Ein zentraler Punkt bei derartigen Verbindungen ist die Diffusion von Elementen. Von Stahl-Aluminium-Verbindungen ist bekannt, dass eine Zwischenschicht existenziell wichtig ist. Mit dem Phasendiagramm (Bild 2) kann leicht eine Erklärung dafür gefunden werden. Eine direkte Kontaktierung der Elemente Fe und Al führt zur Bildung spröder Phasen. Die Lösung



für dieses Problem kann nur durch die Beeinflussung der Diffusion (Teilchenstromdichte  $J$ ) erreicht werden.

$$J = -K \left( \frac{\partial \mu}{\partial x} \right)_{p;T} \quad (1)$$

Nach (1) ist dies durch das chemische Potenzial (Konzentration)  $\mu$  und dem Weg  $x$  möglich. Beeinflusst wird dies durch den Druck  $p$  und die Temperatur  $T$ . Die Proportionalität ist durch  $K$  gegeben.

Eine technisch sinnvolle Lösung zur Beeinflussung der Diffusion sind Zwischenschichten. Nach derzeitigem Wissen ist die Nutzung der häufig auf der Stahlseite der herzustellenden Stahl-Aluminium bzw. Magnesium-Verbindung vorhandenen Zink-Schicht als Zwischenschicht geeignet. Bild 3 verdeutlicht die auch nach dem thermischen Fügen einer St-Al-Verbindung noch existierende, ursprüngliche Zn-Schicht an der Stahlseite. Sie zu erhalten setzt allerdings eine sehr präzise Energieführung während des Fügeprozesses voraus.

Für die Anwendung von Al-Basis-Zusatzwerkstoffen wird in der Literatur häufig eine maximale Diffusionsschichtdicke erwähnt. Wird diese überschritten, so ist ein sprödes Versagen der Verbindung zu erwarten. Zusätze von Si und/oder Mg im Zusatzwerkstoff beeinflussen die sich bildenden intermetallischen Phasen. Somit ist die chemische Konfiguration der Al-Basis-Zusatzwerkstoffe wesentlich. Der Projektpartner Elisental hat daher in seinem Projektantrag auch eine AlSi3Mn-Basis-Legierung platziert.

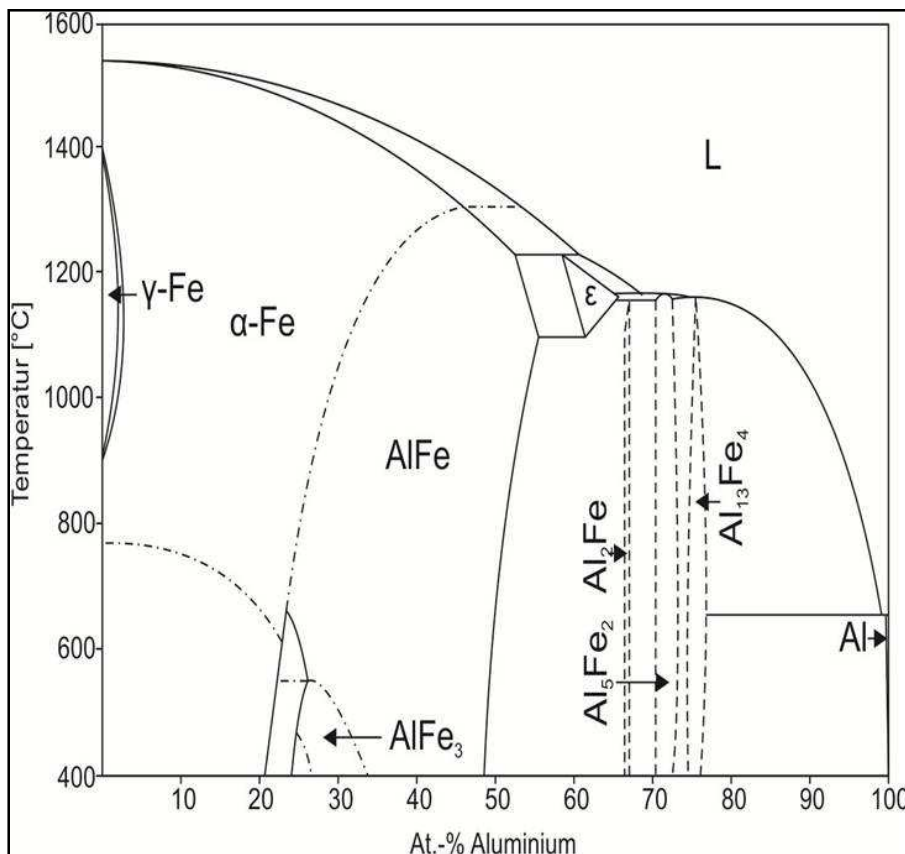


Bild 2: Phasendiagramm Fe-Al nach ASM



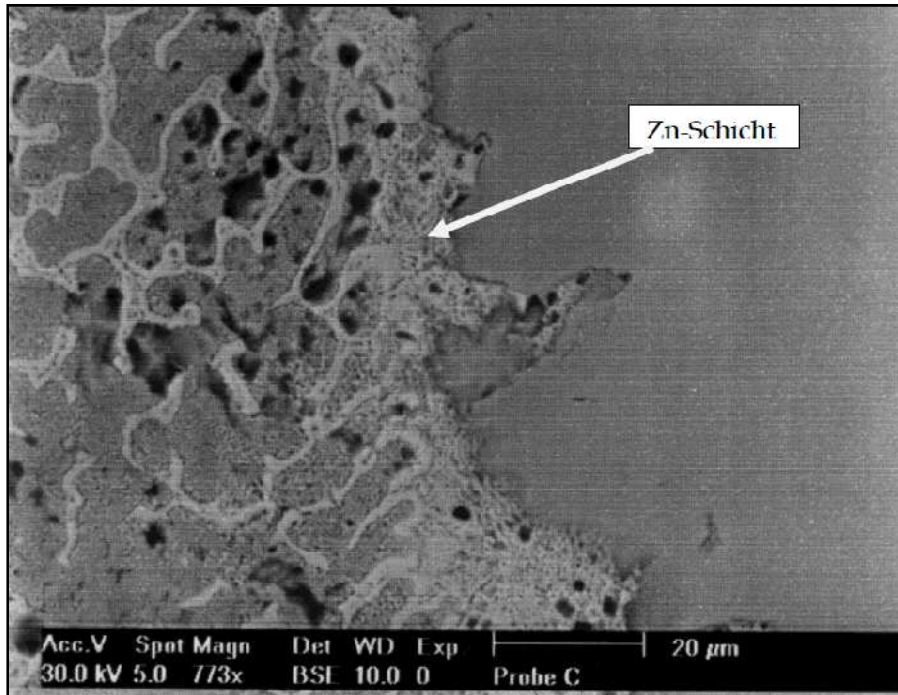


Bild 3: Stahlseite einer St-Al-Verbindung

Als Zusatzwerkstoffe für die Herstellung von Mischverbindungen St-Al sind neben Al-Basis-Werkstoffen auch Zn-Basis-Werkstoffe geeignet. Die Konzentration des Al kann deutlich reduziert werden.

Auf diesem Gebiet hat der Antragsteller umfangreiche Erfahrungen. An der BTU Cottbus - Senftenberg ist es erstmals gelungen, die Zn-Basis-Drähte stromführend zu verarbeiten. Bild 4 verdeutlicht eine unter diesen Bedingungen hergestellte St-Al-Verbindung.

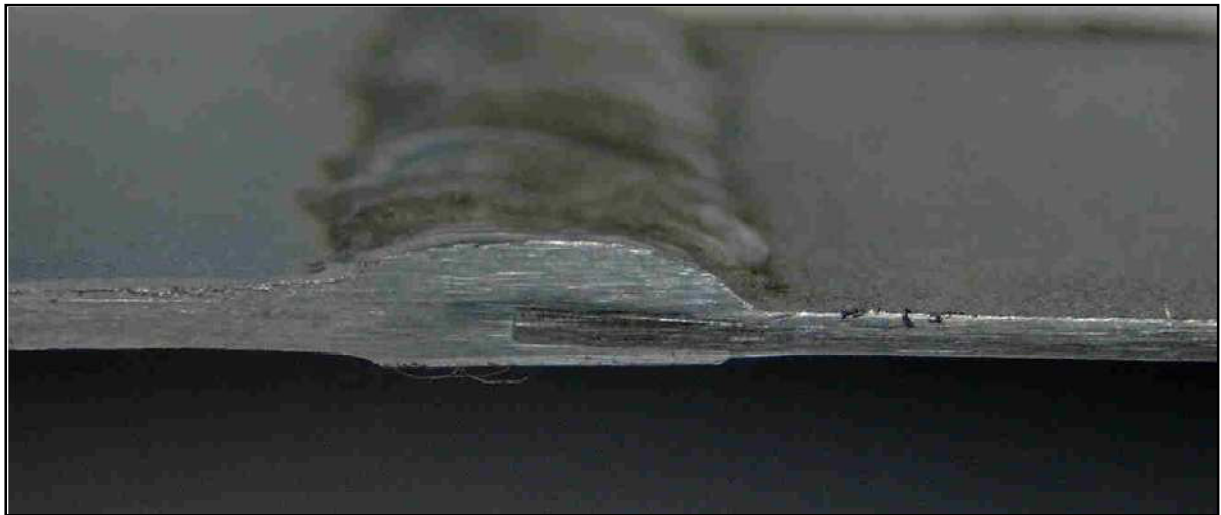


Bild 4: St-Al mit ZnAl<sub>4</sub>; MSG-Prozess

Die Anwendung von Zn-Basis-Werkstoffen bietet sich an, da auf der St-Seite ohnehin Zn existiert und eine ausreichend gute Verträglichkeit zu Al, einschließlich der deutlichen Reduzierung der Al-Konzentration, nachweisbar sind. Zu beachten sind:

- die Sublimationstemperatur und die damit verbundene Metaldampfbildung,
- der Anteil von Al im Schmelzbad,
- die begrenzte mechanische Belastbarkeit der Zusatzwerkstoffe und
- die Energieübertragung auf den Draht.



Der Zn-Basis-Draht ist auch für die Herstellung von St-St-Verbindungen geeignet (Bild 5). Bei Scherzuguntersuchungen wurden Festigkeiten von 350 MPa registriert.



*Bild 5: St-St-Verbindungen mit ZnAl4*

Somit stellen die im Projekt definierten Zusatzwerkstoffe eine sinnvolle Basis für das Erreichen des Zieles - der Herstellung gradierter Schichten - dar.

Für die Verbindungen zwischen Magnesium und Stahl existieren ebenfalls Voruntersuchungen. Es wird mit Mg-Basis-Zusatzwerkstoffen gearbeitet. Ebenso wie Zink (907°C) sublimiert Magnesium (1110°C) unter starker Dampfdruckbildung. Eine Beeinflussung des Fügeprozesses ist zu beachten. Die hergestellten St-Mg-Verbindungen weisen Scherzugfestigkeiten auf, die auf dem Niveau der Grundwerkstofffestigkeit des Magnesiums liegen. Bild 6 verdeutlicht eine derartige, unter Lichtbogenbedingungen hergestellte Verbindung. Als Zusatzwerkstoff sind, wie im Projektantrag des Partners Elisental fixiert, Mg-Basis-Werkstoffe geeignet. Es liegen auf diesem Gebiet, aufgrund der bisher nur sehr begrenzten industriellen Nachfragen, allerdings nur wenige Untersuchungsergebnisse vor.

Im Projekt „Hybrides Fügen von Multimaterialsystemen für Kraftfahrzeuge“ wird auf diesem Wissen aufgebaut. Es sollen gradierte Verbindungen entstehen, die für sicherheitsrelevante Karosseriekomponenten geeignet sind. Im Zentrum des Interesses stehen dabei im Crashfall hochbelastete Karosserieelemente, wie die B-Säule und Stoßfängermodule sowie der Türeinstieg und die Verbindung von Seitenteilen und Dachelementen.



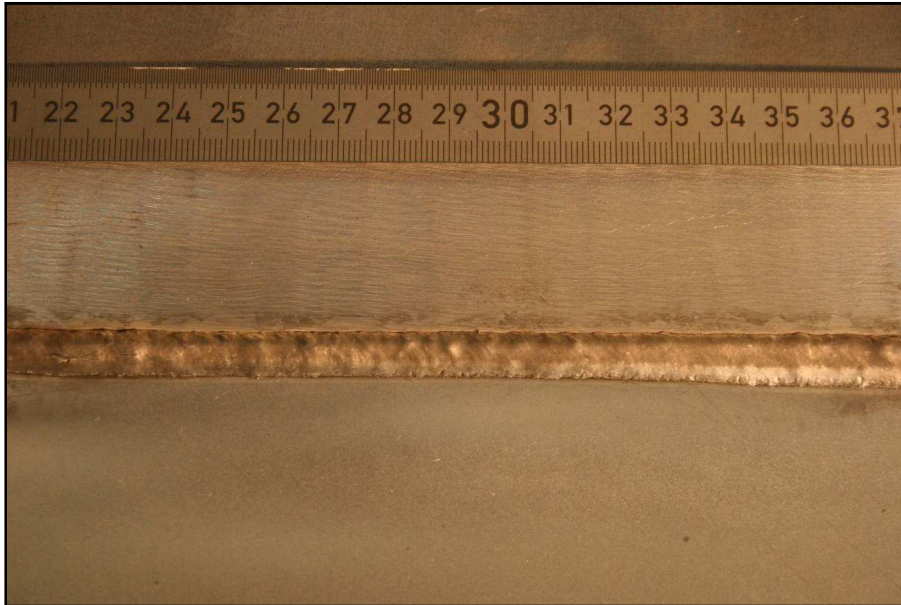


Bild 6: St-Mg-Verbindung mit AZ31

#### I.4.2 Fachliteratur

- /1/ Bach, F.-W.; von der Haar, C.: Endbericht der Forschergruppe „Hochleistungsfügetechnik für Hybridstrukturen“ FOR505. DFG, Garbsen 2009
- /2/ Wilden, J. u.a.: PROREMIX, Verlagshaus Mainz GmbH, 2009.
- /3/ Mach, M. u.a.: INDUWELD
- /4/ Winkelmann, R., u.a.: Thermisches Fügen von dünnwandigen Stahlbauteilen mit niedrig schmelzenden Zusatzwerkstoffen (P777). Abschlussbericht FOSTA, 2010
- /5/ F. Vollertsen, C. Thomy: On the meaning of zinc coatings in hybrid welding of aluminium to steel. In: Proc. ICALEO 2009, 28th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, Nov. 2 – Nov. 5, 2009, Orlando, FL, USA, 89-97.
- /6/ A. Wirth, M. Kreimeyer, J. Gnauk, C. Thomy, F. Vollertsen: Analyses on the Phase Seam of a Laser-MIG joined Aluminum-Steel Sample. In: Vollertsen, F. et al. (Eds.): Proc. 4th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing LIM 2007, Jun. 18 - 22, 2007, Munich, Germany, 111-115.
- /7/ Radsch C (1997), Laserstrahlfügen von Aluminium mit Stahl, BIAS Verlag, Bremen.
- /8/ C. Thomy, F. Vollertsen: Laser-MIG hybrid welding of aluminium to steel - Effect of process parameters on joint properties. In: IIW Com. XII Annual Assembly, Jul. 12 – 17, 2009, Singapore, IIW Doc. XII-1958-09.
- /9/ C. Thomy: Hybrid laser-arc welding of dissimilar metals. In: F.O. Olsen (Ed.): Hybrid laser-arc welding. Woodhead Publishing, Oxford, 2009, 270-295.
- /10/ S.F. Goecke, J. Wilden, S. Jahn, S. Reich, A. Fedtke, F. Vollertsen, C. Thomy: Technologiekette zum Produzieren, Reparieren und Recyceln von Produkten in Material-Mix- Bauweise – PROREMIX. In: Die Verbindungs Spezialisten 2008, DVS-Berichte Vol. 250, DVS-Verlag, Düsseldorf, 375-378.
- /11/ F. Möller, C. Thomy, F. Vollertsen: Development of a plasma-laser brazing process for fluxless joining of aluminium to steel. In: Ostendorf, A. et al. (Eds.): Proc. 5th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing LIM 2009, Jun. 15 - 18, 2009, Munich, Germany, 83-88. /12/ T. Seefeld: Das Kompetenzzentrum Schweißen



- von Aluminiumlegierungen – schweiß-technische Forschung für Aluminium-Anwender. In: Die Verbindungs Spezialisten (Große Schweißtechnische Tagung 2009), DVS 358, Düsseldorf: DVS 2009, 69-74.
- /13/ I. Zerner, M. Kreimeyer, E. Schubert: Fe-Al-Fügen mit Laser. Proc. DFG-Schwerpunktprogramm – Kurzzeitmetallurgie, Bayreuth, 1999, 27-31.
- /14/ Wagner, F.; Zerner, I.; Kreimeyer, M.; Seefeld, T.; Sepold, G.: Characterization and Properties of Dissimilar Metal Combinations of Fe/Al and Ti/Al-Sheet Materials. Proc. ICALEO 2001, LIA Congress Proceedings, Orlando, USA, 2001, 365-374.
- /15/ M. Kreimeyer, F. Wagner, I. Zerner, G. Sepold, G.: Laserstrahlfügen von Aluminium mit Titan unter Verwendung eines optimierten Arbeitskopfes. Löt'01, Aachen, DVS-Berichte, Bd. 212, DVS-Verlag, Düsseldorf, 2001, 317-321.
- /16/ M. Kreimeyer, F. Wagner, F. Vollertsen: Einfluss von Zinkbeschichtungen beim Laserstrahlfügen von Aluminium-Stahl-Überlappverbindungen. Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen, Vorträge und Posterbeiträge des 7. Intern. Kolloquiums in Aachen vom 15. bis 17. Juni 2004, ISBN 3-87155-685-8, 2004, 223-227.
- /17/ M. Kreimeyer, F. Wagner, F. Vollertsen: Laser processing of aluminum-titanium-tailored blanks. Optics and Lasers in Engineering, Elsevier, Bd. 43, Nr. 9, 2005, 1021-1035.
- /18/ B.-M. Wischhusen, M. Kreimeyer, F. Wagner, F. Vollertsen, B. Metschkow: Laser Joining of Aluminum to Steel for Modern Yacht Constructions. In: Vollertsen, F. et al. (Eds.): Proc. 4th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing LIM 2007, Munich, Germany, June 18-22, 2007, 105-109. 29
- /19/ M. Schilf, B.-M. Wischhusen, C. Thomy, F. Vollertsen, B. Metschkow: Ansätze zum Laserstrahlfügen für Aluminium-Stahl-Verbindungen im Schiffbau. In: Die Verbindungs-Spezialisten 2007, DVS-Berichte Vol. 237, DVS-Verlag, Düsseldorf, 286-290.
- /20/ A. Wirth, H. Laukant, C. Thomy, U. Glatzel, F. Vollertsen: Laser Brazing of High Strength Steels. In: Proc. ICALEO 2007, 26th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, Oct. 29 – Nov. 1, 2007, Orlando, FL, USA, 570-576.
- /21/ L. Mujica, S. Weber, C. Thomy, F. Vollertsen: Microstructure and mechanical properties of laser welded austenitic high manganese steels. In: Science and Technology of Welding and Joining, 14 (2009) 6, 517-522.
- /22/ L. Mujica, S. Weber, H. Pinto, C. Thomy, F. Vollertsen: Microstructure and mechanical properties of laser welded joints of TWIP and TRIP steels. In: Materials Science and Engineering A (2010) 527, 2071-2078.
- /23/ Jüttner S., Winkelmann R. u.a.: Konferenz-Einzelbericht: DVS-Berichte \* Band 225 (2003) Seite 377381 (5 Seiten, 8 Bilder, 5 Quellen), Düsseldorf: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren, DVS-Verlag
- /24/ Jüttner S., Winkelmann R.: Posterbeitrag: Magnesium, Proceedings of the 6th international Conference Magnesium Alloys and their Applications (2003) , WILEY-VCH-Verlag GmbH &Co. KGaA
- /25/ Winkelmann, R.: Mischverbindungen Magnesium-Aluminium und Magnesium-Stahl. Eurojoin 5, Internationaler Kongress der EWF, Wien 2004
- /26/ Winkelmann, R. u.a.: Thermisches Fügen von Bauteilen mittels Lichtbogen und Zn-Basis-Zusatzwerkstoffen. DVS Berichte Bd. 237(2005) S. 139 ff.
- /27/ Winkelmann, R.: Fugendlöten mittels Lichtbögen und niedrig schmelzenden Zusatzwerkstoffen. Werkstoffe und Werkstofftechnische Anwendungen. TU Chemnitz Lehrstuhl für Verbundwerkstoffe, Band 24, 2006, S. 413bis 423.
- /28/ Winkelmann, R. und P. Baumgart: Magnesium Zusatzwerkstoffe und Verfahren für das thermische Fügen von Magnesium-Stahl-Verbindungen. DVS-Berichte Band 240



- (2006) Seite 143-149, Düsseldorf: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren, DVS-Verlag
- /29/ Winkelmann, R. und G. Bürkner: Welding and brazing with low-melting filler materials. *Welding and Cutting* 7 (2008) Nr. 4 S.212-216
  - /30/ Winkelmann, R. u.a.: Technologieentwicklung zum MAG-Wechselstromschweißen mit Fülldrähten zum Fügen von Mehrphasenstählen für die Automobilindustrie. DVS Media GmbH, Schweißen und Schneiden 3/2010
  - /31/ Theisen W.: A novel PM-wear protection method to meet high comminution demands, *Wear* 250 (2001) S. 54-58
  - /32/ Theisen W.: Verbundwerkstoffe zum Verschleißschutz, *HTM* 55 (2000) 1, S. 45-51
  - /33/ Theisen W.: HIP Cladding of Tools, published at 6th International Tooling Conference, 10.-13. Sept. 2002, Karlstad University, Sweden
  - /34/ Verfahren zur Herstellung verschleißbeständiger Schichtverbunde mit hartstoffhaltigen Schichtwerkstoffen auf Fe-Basis, DE 10 2005 059 429, 2008
  - /35/ Verfahren zur Herstellung von innere Kühlkanäle aufweisenden Werkzeugen, DE 10 2006 032 593, 2008
  - /36/ Verfahren zur Herstellung beschichteter Verschleißteile mit Hartstoff-Metallmatrix-Verbunden auf Fe-, Ni- und Co-Basis durch Strangpressen, DE 10 2007 005 394, 2008
  - /37/ Berns H., Theisen, W.: Eisenwerkstoffe - Stahl und Gusseisen, Springer-Verlag, Berlin, 1991, 3. Auflage, 2006
  - /38/ Mujica L., Weber S., Thomy C., Vollertsen F.: Microstructure and mechanical properties of laser welded austenitic high manganese steels, *Science and Technology of Welding Joining* 2009, in press 30
  - /39/ L. Mujica, S. Weber, H. Pinto, C. Thomy, F. Vollertsen, Microstructure and mechanical properties of laser-welded joints of TWIP and TRIP steels, *Materials Science and Engineering A* 527 (2010) 2071–2078 (doi:10.1016/j.msea.2009.11.050)
  - /40/ Gugel H., Theisen W.: Laserschweißen von Mikrodrähten aus Nickel-Titan Formgedächtnislegierungen und austenitischem Stahl, *Mat.-wiss. und Werkstofftechn.*, 2007, 38, Nr. 6, S. 489-493
  - /41/ Gugel H., Schuermann A., Theisen W.: Laser welding of NiTi wires, *Proceedings of the 7th European Symposium on Martensitic Transformations, ESOMAT 2006, Special Issue Section of Materials Science & Engineering A, Vol. A481-482 (2008), Elsevier* S. 668-671
  - /42/ Huth S., Theisen W.: Diffusion alloying - a new manufacturing method for PM tool steels, *Powder Metallurgy* 52 (2009) Nr. 2, S. 91-94
  - /43/ Berns H., Riedner S., Gavriljuk V.: High Interstitial Stainless Austenitic Steels, Part I: Constitution, Heat Treatment, Properties, Application, *Proceedings of 10-th International Conference on High Nitrogen Steels (HNS 09)*, Edited by A.G. Svyazhin, V.G. Prokoshkina, K.L. Kossyrev, 6-8 July 2009, MISIS, Moskau, S. 129-139
  - /44/ Weber S., Theisen W.: Cold Work Tool Steels with Improved Hardenability and Wear Resistance, in M. Rosso, M. Actis Grande, D. Ugues (Ed) *Proc. 7th Int. Tooling Conf., Politecnico di Torino May 2006, Vol. I* S. 541-547
  - /45/ Hill H., Weber S., Siebert S., Huth S., Theisen W.: Comprehensive Investigations of the Supersolidus Liquid-Phase Sintering of Two Plastic Mold Steels, *Metallurgical and Materials Transactions A* 41 (2), 2010, S. 686-695
  - /46/ Mujica L., Weber S., Theisen W.: Computer Assisted Development of Corrosion Resistant TWIP Steels, *Proceedings of 10-th International Conference on High Nitrogen Steels (HNS 09)*, Edited by A.G. Svyazhin, V.G. Prokoshkina, K.L. Kossyrev, 6-8 July 2009, MISIS, Moskau, S. 306-311



## **I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Mit anderen Einrichtungen, abgesehen von den Projektpartnern, gab es keinen wissenschaftlichen, technologischen oder materiellen Austausch.



## **II. Eingehende Darstellung**

### **II.1 der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele**

#### **II.1.1 Zuwendungen und Ausgaben**

Es wurden im Rahmen des Projektes die in Tabelle 2 aufgeführten Geräte zum Erreichen der Zielstellung angeschafft.

*Tabelle 2: Liste getätigter Investitionen*

Lfd.Nr.	Zuordnung zur Pos. der Geräteliste des Zuwendungsbescheides
1	Hochgeschwindigkeits-Videokamera
2	Modifikation der Laseranlage
3	Lichtleiter LL-97-611/10
3	Lichtleiter LL-97-611/10 (zusätzlich aufgrund eines Defekts)
4	Defokussierkopf + Zubehör
5	Fokussieroptik
6	Umrüstung Lichtleitereinkopplung - Time Sharing
8	Laserbearbeitungskopf
9	Sysweld-Lizenz
11	LLBK45, 100:150, 90° abgewinkelt
	Gesamtsumme

#### **II.1.2 Ziele und Ergebnisse**

Die Projektbearbeiter der Fertigungstechnik / Tribologie der BTU Cottbus-Senftenberg beschäftigten sich mit der Entwicklung der technologischen Grundlagen zur Herstellung von Stahl-Stahl- und Stahl-Magnesium-Verbindungen. Hierfür wurden drei Energiequellen benutzt. Es handelt sich um die Laserstrahlung, die elektromagnetische Induktion sowie den Lichtbogen. Die theoretischen Erkenntnisse werden praktisch in einer vierstufigen Versuchsdurchführung überprüft.

1. Benetzungsuntersuchungen bei Variation der Energieführung am Grund- und am Zusatzwerkstoff  
Hierbei muss die Schutzgasführung sowie die Oberfläche der Werkstoffe besonders beachtet werden (Reinigung).



2. Anpassung der Energie- und Gasführung an die Fügegeometrie
3. Herstellung und Prüfung von Verbindungen bei Variation der Fügegeometrie
4. Optimierung hinsichtlich Fügegeschwindigkeit

Für das Erreichen der Zielstellung, der Herstellung von Verbindungen zwischen dem pressgehärteten 22MnB5 und den Werkstoffen DX53+Z bzw. DC04+ZE sowie AZ31 wurden folgende Arbeitspunkte definiert:

- AP1: Erstellung Pflichtenheft
- AP2: Versuchsaufbau und Messtechnik
- AP3: Energieführung und Benetzung
- AP4: Versuche 22MnB5-DC04-mit Al-Basis-Zusatz
- AP5: Versuche 22MnB5-DC04-mit Zn-Basis-Zusatz
- AP6: Versuche 22MnB5-DC04- Mg
- AP7: Sysweld Berechnungen
- AP8: Funktionsmuster
- AP9: Abschlussbericht

Im Folgenden werden die im jeweiligen Arbeitspunkt erzielten Ergebnisse dargestellt.

#### II.1.2.1 AP1: Erstellung Lastenheft

Das Lastenheft wurde erstellt und mit den Projektpartnern inhaltlich und zeitlich abgestimmt. Als ein Grundwerkstoff wurde der 22MnB5 mit den Beschichtungen AS150, AS80 und GP150 definiert. Er wird bei Variation der Bedingungen des Härtens eingesetzt. Es wird mit einer Blechdicke von 1,5mm gearbeitet. Als Gegenstück sollen die Werkstoffe DX53, DC04 bzw. AZ31 dienen. Der Tiefziehstahl DC04 (nach Festlegung der Projektpartner) wurde mit einer elektrolytischen Zinkbeschichtung (ZE) als 1,0mm dickes Blech bereitgestellt.

Für die Herstellung der 22MnB5-DC04-Verbindungen sind als Zusatzwerkstoffe Al- und Zn-Basislote definiert. Als Zusatzwerkstoff für die Verbindungen aus 22MnB5 und AZ31 ist der Schweißzusatz AZ61 vorgesehen.

#### II.1.2.2 AP2 Versuchsaufbau / Messtechnik

Es wurden drei Versuchsstände aufgebaut.

Es handelt sich dabei um einen Lichtbogenversuchsstand (Bild 7), einen Nd:YAG-Laserversuchsstand (Bild 8) und einen Diodenlaserversuchsstand (Bild 9).



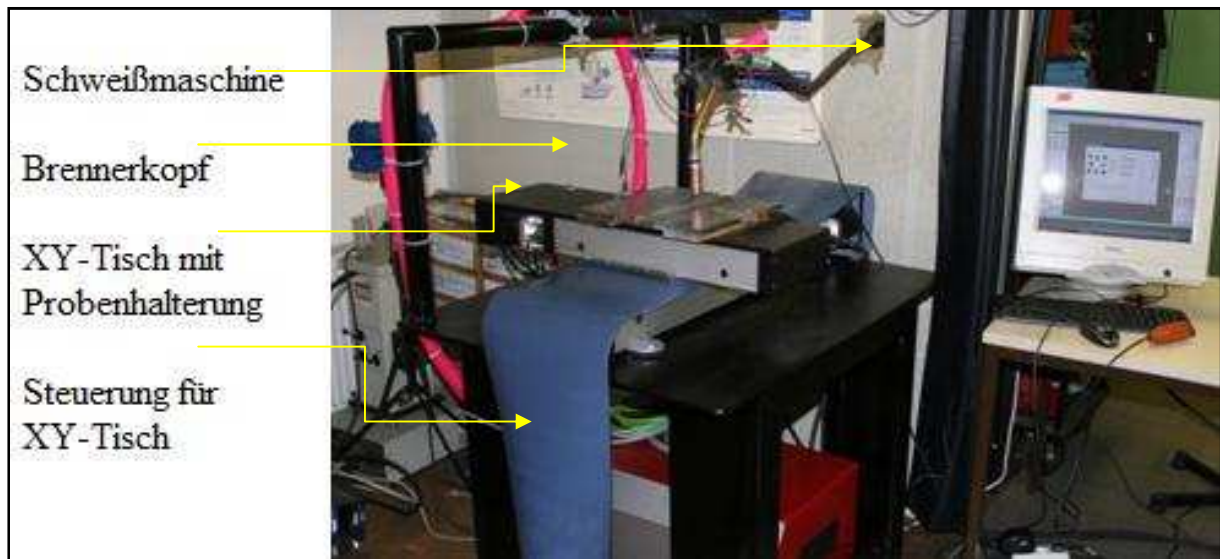


Bild 7: Lichtbogenversuchsstand

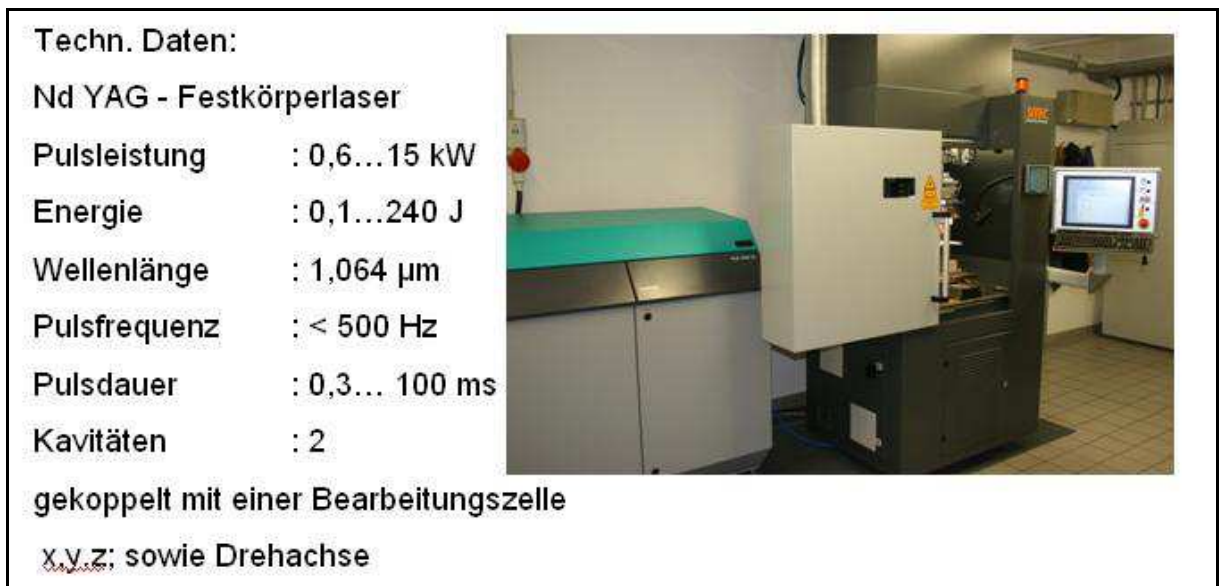


Bild 8: Nd:YAG-Laserversuchsstand

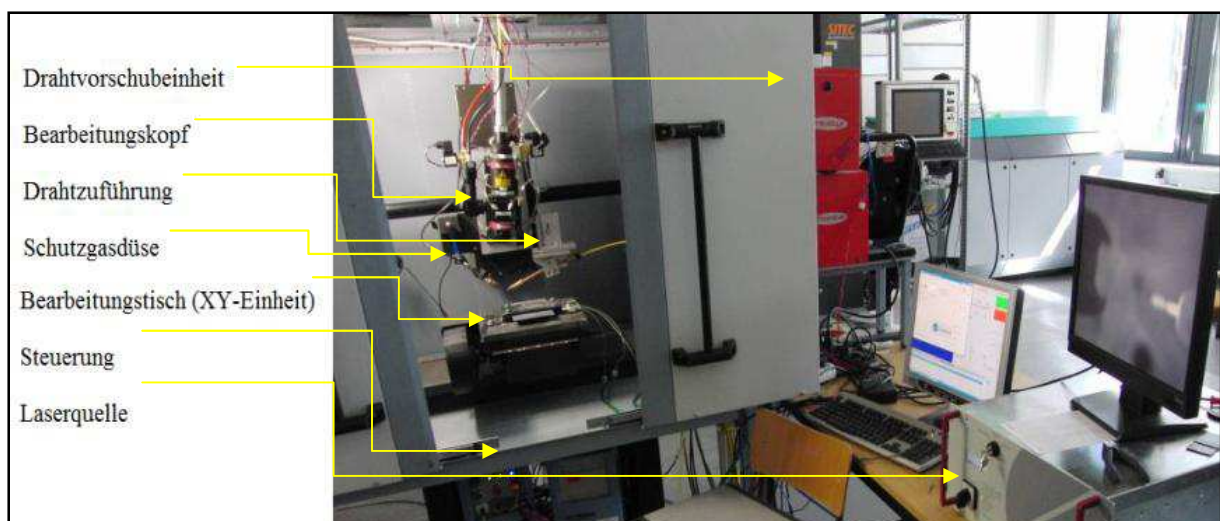


Bild 9: Diodenlaserversuchsstand



Der Lichtbogenversuchsstand ist mit den Stromquellen EWM Phoenix 330cA sowie Fronius CMT ADVANCED ausgestattet.

Durch die Möglichkeit der relativ freien Programmierung der Schweißmaschine können die Schweißparameter optimal an die jeweiligen Besonderheiten der Grund- und Zusatzwerkstoffe sowie die geometrischen Gegebenheiten angepasst werden. Zum Positionieren der Proben kommt ein frei programmierbarer Kreutztisch zum Einsatz, welcher eine exakte Führung der Proben gewährleistet. Als zweite Energiequelle wird eine Hochfrequenzinduktionsanlage HFG10 (Bild 10) mit einer Maximalleistung von 10 kW eingesetzt. Die Anlage kann sowohl am Lichtbogen- als auch an den Laserversuchsständen integriert werden.

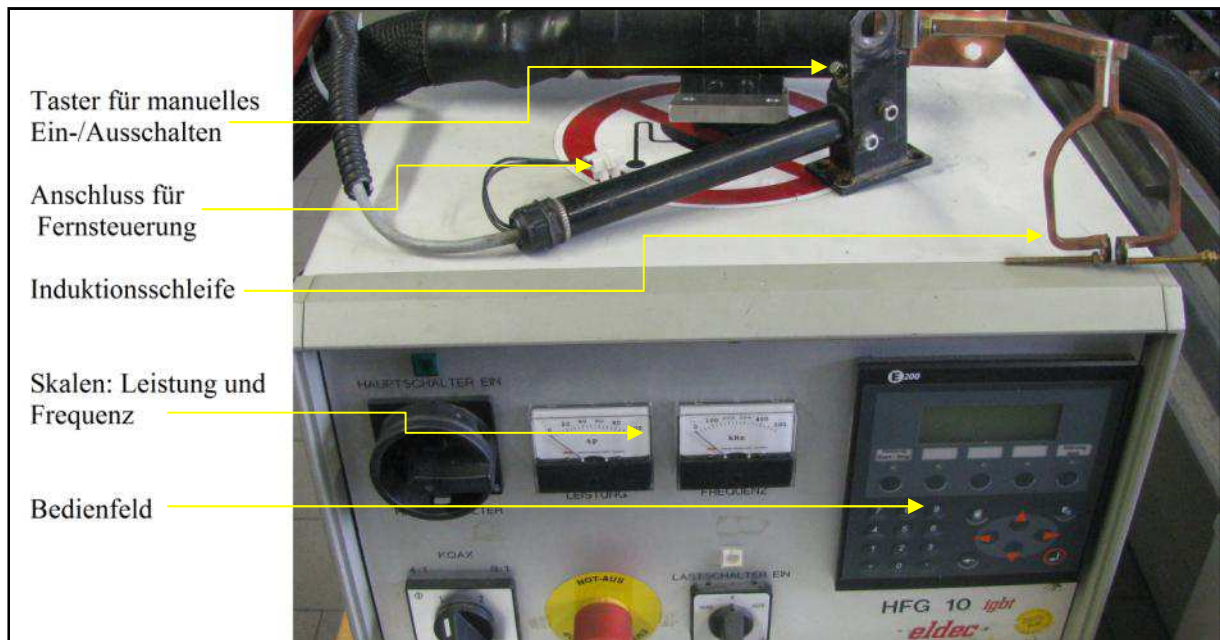


Bild 10: Induktionsanlage HFG 10

Für die Untersuchung der Prozessparameter wird eine hochgenaue Strom-Spannungs-Zeit-Messeinrichtung verwendet. Die Strommessung erfolgt mittels „LEM“ und einer Messkarte. Es wird eine der Stromstärke proportionale Spannung registriert und diese im Verhältnis 100:1 von einer Messkarte aufgezeichnet. Die Spannungen zwischen Schweißbrenner und Probenhalter werden mit Hilfe eines Differentialtaktopfes abgegriffen und im Verhältnis 200:1 von der Messkarte erfasst.

Als Messkarte kommt eine hochauflösende Transientenkarte aus dem Hause Spectrum zum Einsatz, welche bei einer Auflösung von 14bit eine Abtastrate von bis zu 20MS/s pro Kanal gestattet.

Für die Visualisierung der Tropfenbildung und -ablösung sowie des Übergangs in die Schmelze und die Untersuchung des Lichtbogenzündens stehen zwei Hochgeschwindigkeitskameras zur Verfügung. Zum einen handelt es sich um eine Weinberger Visaro G2 und zum anderen um eine Olympus I-Speed 3. Mit der Visaro G2 kann bei einer maximalen Aufnahmezeit von 10.000 Bildern pro Sekunde ein Bildausschnitt von 512x384 Pixeln dargestellt werden. Die maximale Aufnahmezeit der Olympus liegt bei 150.000 Bildern pro Sekunde. Für die Belichtung bzw. Überblendung des Lichtbogens kommt eine Plasmalampe mit 1000W bzw. ein gepulster Laser zum Einsatz.



Der Nd:YAG-Laserversuchsstand besteht aus einem gepulsten Nd:YAG Laser mit einer mittleren Leistung von 800W und einer maximalen Pulsleistung von 15 kW. Die Wellenlänge der Strahlung beträgt 1064 nm und der kleinstmögliche Brennfleckdurchmesser ist mit 0,3mm angegeben. Im Bearbeitungsraum der Laseranlage wurde eine Kaltdrahtzuführung (Bild 11) integriert, welche die Drahtzuführung gewährleistet. Als Drahtvorschubeinheit dient eine Fronius KD4010. Für die Registrierung der Temperaturen steht das Aufnahmesystem VAS33 (Bild 12) aus dem Hause Jet Systemtechnik zur Verfügung. Es können Temperaturen an bis zu 16 Messstellen gleichzeitig aufgezeichnet werden. Durch die kompakte Bauweise können das Messsystem ebenso wie die Hochgeschwindigkeitskameras an allen Versuchsständen eingesetzt werden.

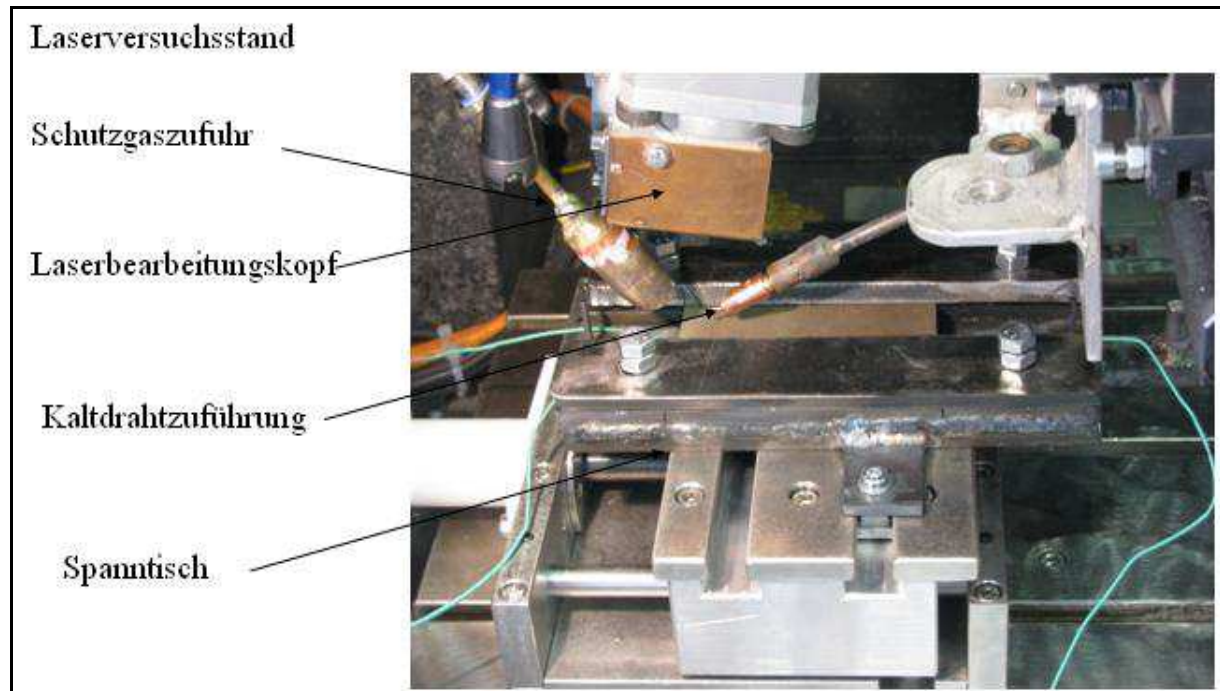


Bild 11: Kaltdrahtzuführung im Laser

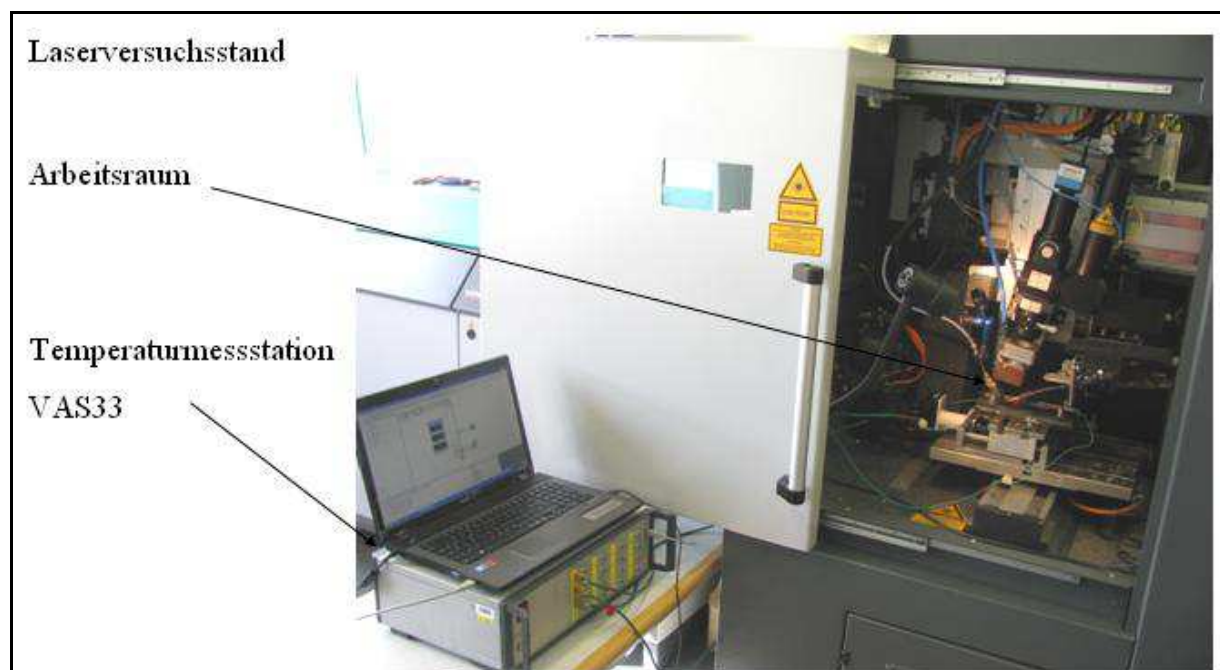


Bild 12: Nd:YAG-Laserversuchsstand mit Temperaturmessstation



Für die Verbesserung der Qualität der Laserstrahllötungen wurde ein weiterer Laserstrahlversuchsstand (Bild 9) aufgebaut. Hierbei handelt es sich um einen Diodenlaser mit einer Maximalleistung von 990W cw, welcher an eine programmierbare XYZ-Einheit gekoppelt ist. Durch den ungeladenen, kontinuierlichen Laserstrahl und einen deutlich größeren Spotdurchmesser ist ein gleichmäßigerer Energieeintrag als bei der gepulsten Nd-YAG Anlage möglich. Hierdurch wird die Benetzungsfläche vergrößert. Eine Vergrößerung der Benetzungsfläche führt zu höheren Verbindungsfestigkeiten. Es wurde eine Drahtzuführung integriert.

#### II.1.2.3 AP3 Energieführung / Benetzung

Zur Auswahl geeigneter Zusatzwerkstoffe wurden Benetzungsuntersuchungen durchgeführt, bei denen verschiedene AL- und Zn- Basislegierungen mittels Strichraupentechnik durch Lichtbogen und Laser auf die beschichteten 22MnB5 Bleche aufgetragen wurden. Es wurden Benetzungsuntersuchungen auf 3 unterschiedlichen Schichten (Bild 13) des 22MnB5 durchgeführt.

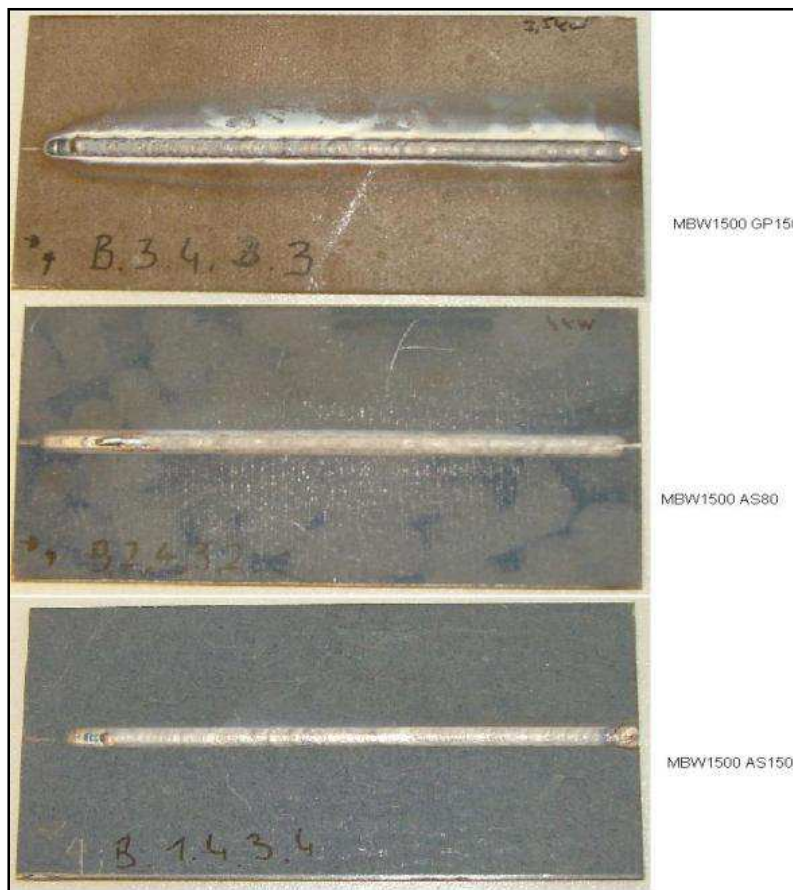


Bild 13: Auftragslötungen bei Variation der Beschichtung

Mit GP 150 ist der kathodische Korrosionsschutz "GammaProtect" von ThyssenKrupp bezeichnet. AS 80 und AS 150 sind Beschichtungen aus Aluminium und Silizium. Der Zahlenwert gibt die Masse des aufgetragenen Materials in g pro m<sup>2</sup> beschichteter Fläche an. Aufgrund der chemisch-metallurgischen Veränderungen der Beschichtungen (AlSi10Fe3) während des „Presshärtevorgangs“ ist die Haftung des Zusatzwerkstoffes an der Schicht sehr unterschiedlich. Beeinflusst wird sie zusätzlich durch die beim Löten zugeführte Energie. Je höher der Energieeintrag beim Löten definiert wird, umso größer sind die Temperaturen (Bild



14) und damit die Aufmischung der Schicht mit dem Lot. Bei diesen Untersuchungen sind die Temperaturmessfühler mittig im Nahtbereich von unten an das Blech gepunktet worden.

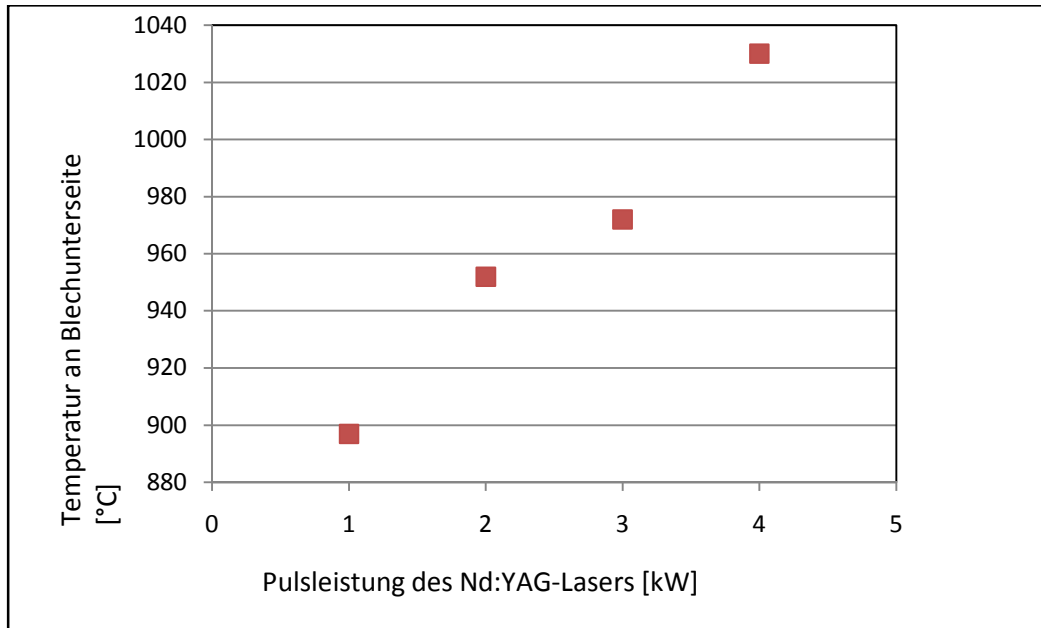


Bild 14: Temperatur an Unterseite des Bleches in Abhängigkeit der Pulsleistung des Laser

Die Aufmischung zwischen Beschichtung und Grundwerkstoff führte zu einer Zunahme der Versprödung und letztendlich zum Abplatzen der Schicht (Bild 15) vom Grundwerkstoff.

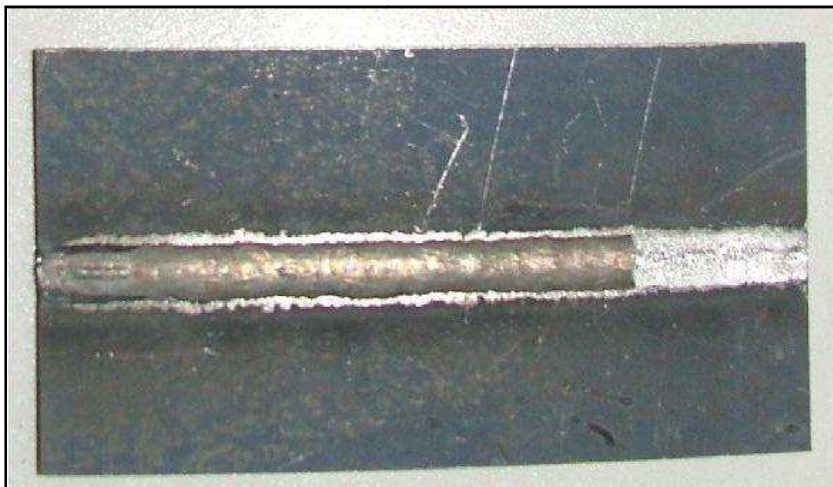


Bild 15: Versprödung und Ablösen der Auftragung

Schlussfolgernd war zu registrieren, dass der Energieeintrag in den Grundwerkstoff sehr gering einzustellen ist. Diese Erkenntnis ist unabhängig vom benutzten Verfahren, trifft also sowohl auf die Lichtbogen- als auch auf die Laserwirkung zu. Die Untersuchungen mit unterschiedlichen Lichtbogenarten ergaben Vorteile bei der Anwendung des geregelten Kurzlichtbogens (Bild 16). Die Zuführung der Energie (1190 J/s) kann bei dieser Lichtbogenart sehr genau eingestellt werden. Die Versuche mit dem Impulslichtbogen führten dagegen zu einer starken Versprödung (2035 J/s).



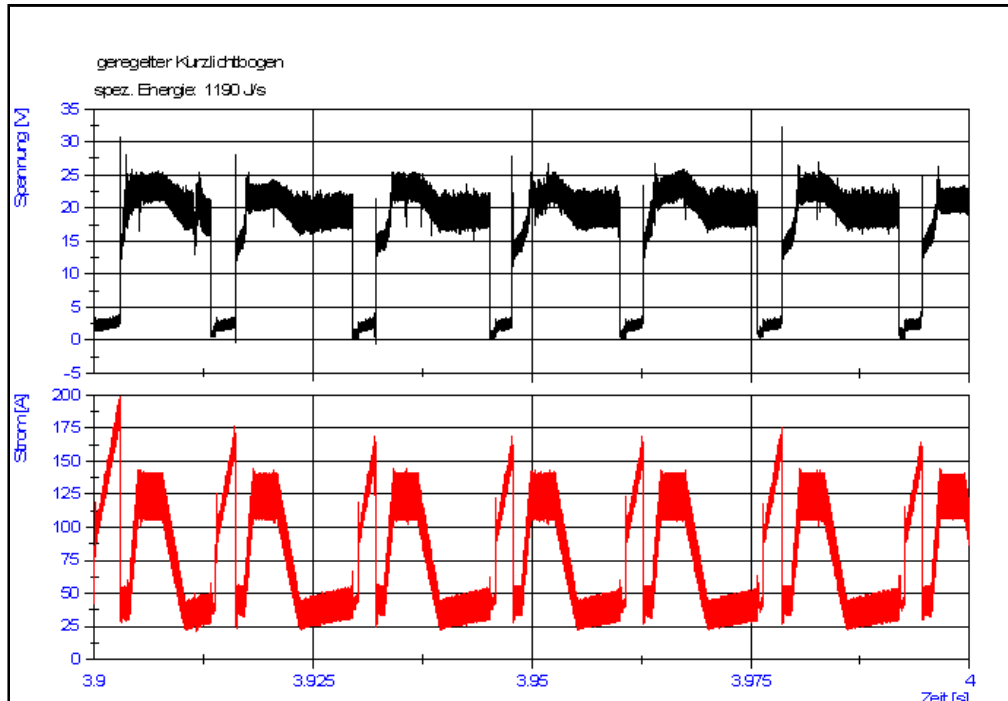


Bild 16: Messschrieb geregelter Kurzlichtbogen

Die chemische Konfiguration sowie die sich während des Presshärtens einstellenden Eigenschaften der Beschichtung am 22MnB5 beeinflussen die Benetzung und Haftung des Lotes.

Der Al-Basisdraht weist ein günstigeres Benetzungsverhalten auf den AS-Schichten auf. Die Werkstoffe ähneln sich.

Die Anwendung dieses Zusatzwerkstoffes auf der GP150 Schicht hinterlässt, aufgrund der Zinkverdampfung aus der Schicht, starke Schmauchspuren auf den Blechen. Die Verwendung eines Zn-Basislotes für die Herstellung von Verbindungen auf der GP150-Schicht erweist sich als sinnvoll. Die niedrigeren Prozesstemperaturen verursachen eine geringere Verdampfung des Zinks.

Die durchgeführten Untersuchungen, mit dem Ziel eine reproduzierbare und sichere Benetzung des Zusatzwerkstoffes an den Originalbeschichtungen des 22MnB5 nach dem Presshärteprozess durch Variation der Schweißparameter (Schweißstrom, Spannung, Schweißgeschwindigkeit) sowie der Stellung des Brenners zum oben liegenden Blech zu erreichen, führten zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen.

Somit musste die Schicht selbst beeinflusst werden. Es war erforderlich, eine Technologie der Substratvorbehandlung zu entwickeln.

Für die Verbesserung der Haftung bzw. Benetzung des Lotes am Grundwerkstoff 22MnB5 wurden Untersuchungen zur Oberflächenreinigung durch Laserabtrag, Schleifen und Strahlen bei Variation des Strahlmittels durchgeführt. Die Herausforderung bestand darin, einen definierten Abtrag einzustellen, ohne dabei eine vollständige Zerstörung der sich unmittelbar über der Diffusionsschicht befindenden Al-Fe-Schicht, zu erzielen. Es galt die hochgradig harten, spröden und gerissenen Al-reichen Phasen (z.B.  $\text{Al}_5\text{Fe}_2$ ) abzutragen und die Schicht des Typs AlFe zu erhalten.

Es sind nunmehr Parameter bekannt, mit deren Hilfe ein weitestgehend gleichmäßiger Abtrag eingestellt werden kann. Dies betrifft sowohl die Laserabtragung als auch die mechanische Zerstörung der Schicht durch Schleifen oder Strahlen.

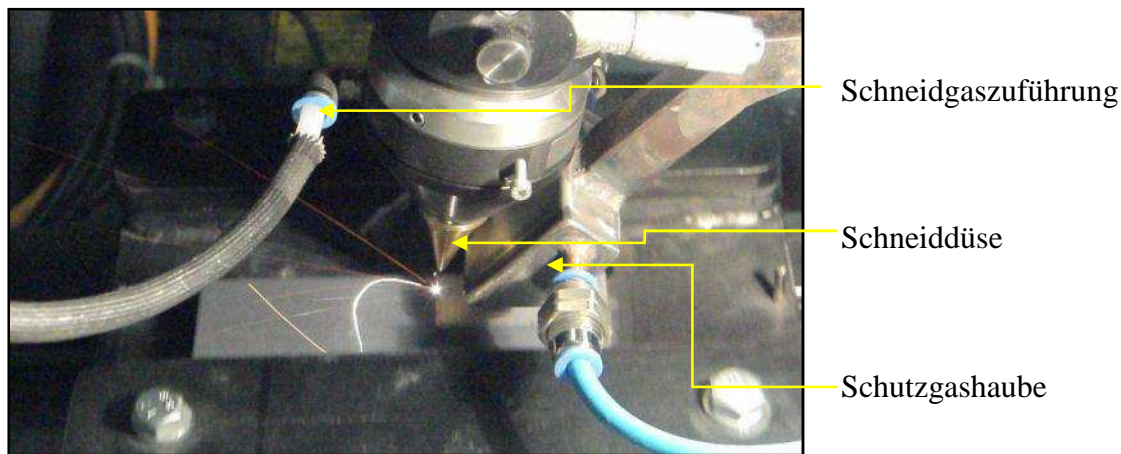


### (AP3.1) Reinigungsversuche

Die Beurteilung der definierten Reinigungsstrategien (Laser, Schleifen, Strahlen) erfolgte vergleichend. Als Optimierungskriterium fungiert die erzielte Festigkeit der mit vorbehandelten Blechen gefügten Verbindungen.

#### Laserreinigung

Die Oberflächen der AS-beschichteten 22MnB5-Bleche wurden mit dem gepulsten Nd-YAG Laser bei aufgesetztem Schneidkopf, mit kurzen Energiestößen von der Schicht befreit. Die maximale Pulsleistung wurde mit 0,5KW bei einer Pulsdauer von 0,5ms definiert. Die Pulsfrequenz betrug 200Hz. Innerhalb der Pulsmodulation wurde der Puls in 6 Mikropulse aufgeteilt, so dass die Oberfläche mit 1200 Pulsen pro Sekunde bestrahlt wurde. Als Schneidgas kam Argon zum Einsatz. Zur Verhinderung der Oxidation der Oberfläche infolge des Wärmeeintrages wurde die gesäuberte Fläche unter einer Schutzgashaube mit Argon beaufschlagt. Der Versuchsaufbau ist in Bild 17 abgebildet.



*Bild 17: Versuchsaufbau Reinigung 22MnB5 Bleche*

Durch die Variation des Abstandes der Schneiddüse zum Blech (Variation des Fokusaufmaßes) können verschiedene Schichtdicken (Bild 18) definiert abgetragen werden. Die Quantifizierung der Reinigung erfolgt vor den Lötversuchen beim Projektpartner RUB.



*Bild 18: Abtrag der Schichten (links geringer Abtrag; rechts Abtrag bis zum blanken Blech)*

Bei zu geringem Fokusaufmaß (Bild 19) wird statt der Delamination der spröden Bereiche der AS-Schicht ein Umschmelzen der Schichten und somit eine Mischung der Bestandteile erzielt.



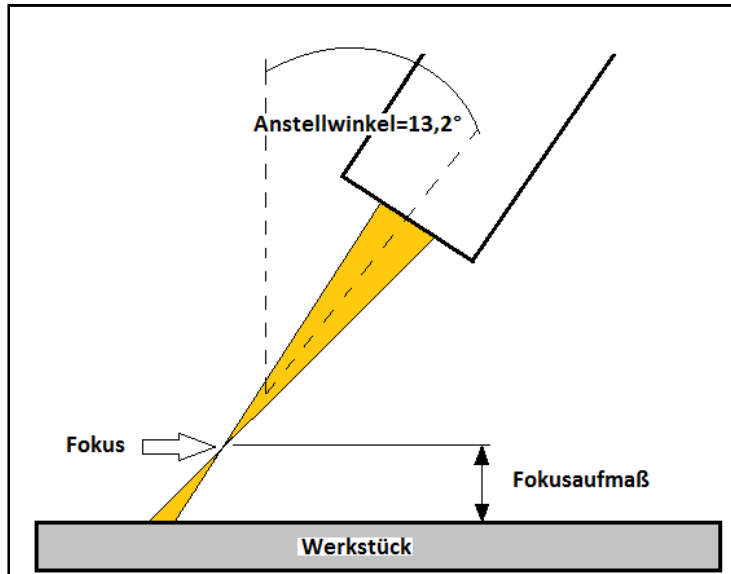


Bild 19: Fokusaufmaß

Bei zu großem Fokusaufmaß ist die Intensität der Laserstrahlung zu gering, um die AS-Schicht zu beeinflussen. Die für den Schichtabtrag mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser geeigneten Parameter sind in der Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Parameter der Laserreinigung

Laserreinigung: Nd:YAG (1064 nm)+Argon (2bar)		
Parameter	Betrag	Einheit
Mittlere Leistung $\phi P$	156	W
Pulsleistung $P_p$	1,57	kW
Energie $E$	0,78	J
Pulsdauer $t_{puls}$	0,5	ms
Frequenz $f$	200	Hz
Fokusaufmaß $F$	6,5 -7	mm
Fahrgeschwindigkeit $v_f$	90.00	mm/min
Flächenenergie	63,4	J/mm <sup>2</sup>

Die Parameter sind für den Abtrag der AS150-Schicht erarbeitet worden und funktionieren ebenfalls bei der AS80-Beschichtung.

Es ist möglich, die AS-Schicht gezielt bis zu der direkt am GW registrierten AlFe-Schicht (Bild 20) abzutragen. Dies wird angestrebt, um die Verbindungsfestigkeit zu optimieren und wird in AP 4 aufgegriffen. Da die AS150-Schicht durch die Diffusionsvorgänge auf ca. 45  $\mu\text{m}$  anwächst (RUB), ist dafür ein Abtrag von ca. 30  $\mu\text{m}$  bis 40  $\mu\text{m}$  erforderlich. Die AS80-Proben weisen niedrigere Schichtdicken auf. Diese Differenz ist für den Reinigungsprozess mit dem Nd:YAG-Laser jedoch vernachlässigbar. Die Parameter (Tabelle 3) funktionieren für beide Schichtdicken.



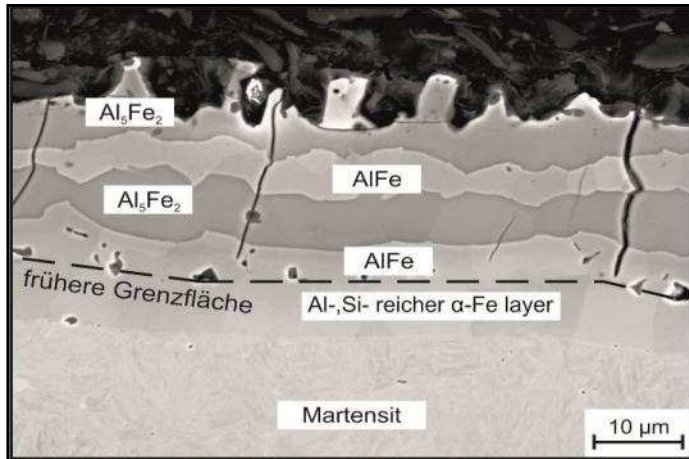


Bild 20: AS-Schicht mit spröden  $Al_xFe_y$ -Phasen durchsetzt (RUB)

Das Erreichen des angestrebten Abtrages mit den aufgeführten Parametern wurde mit dem 3D-Laserscanningmikroskop VK-X200 der Fa. Keyence dokumentiert (Bild 21).

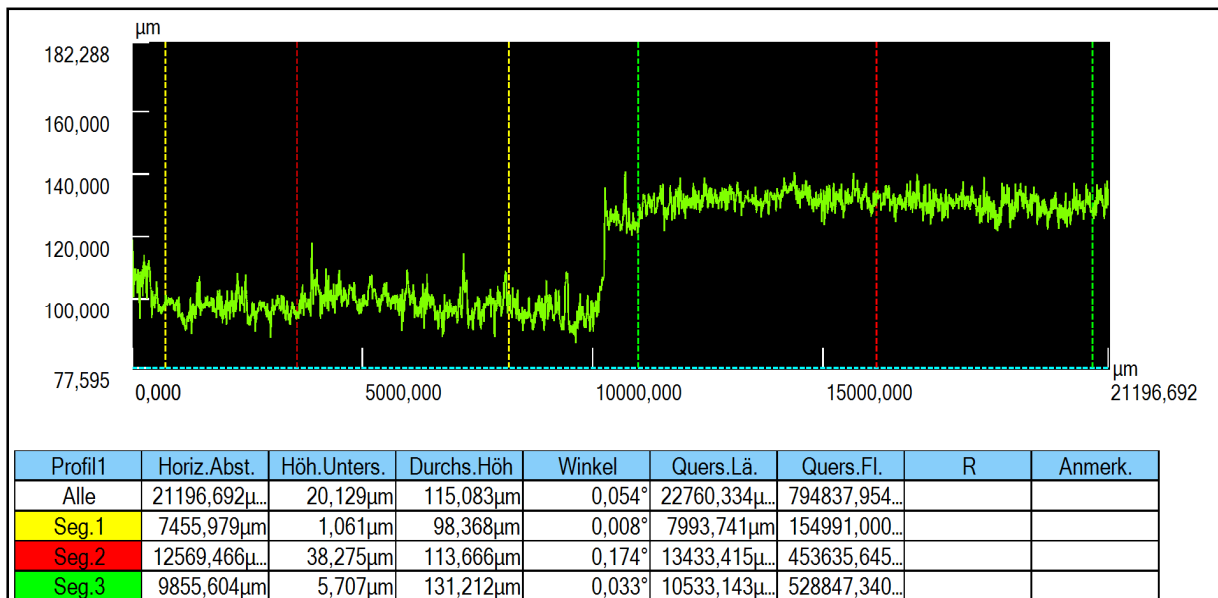


Bild 21: Höhendifferenz zw. gereinigtem u. ungereinigtem Bereich

Die Laserreinigung basiert auf Differenzen in der Wärmedehnung unterschiedlicher  $Al_xFe_y$ -Phasen. Besteht die Schicht lediglich aus der Al-Fe-Phase, so ist eine Nahtvorbereitung mit diesen Parametern nicht möglich (AP 3.2). Die Laserreinigung kann für die Vorbereitung der gehärteten und mit GP-Schichten versehenen 22MnB5-Bauteile nicht angewendet werden. Auf lasergereinigten AS-Bleichen wurde mit einem Diodenlaser und den Verbindungsparametern aus AP5 gelötet. Die Reproduzierbarkeit der Verbindungsfestigkeiten (AP 4, 5,6) waren bei den lasergereinigten Verbindungsproben am höchsten. Die aus der Laserleistung resultierende Flächenenergie, für die Parameter aus Tabelle 3, wurde berechnet. Es sind 63,4 J/mm<sup>2</sup> erforderlich.

### Strahlreinigung

Die Strahlreinigung erfolgt mechanisiert. Um reproduzierbar zu arbeiten, wird die Strahlpistole während des Prozesses per CNC-Maschine über die Probe geführt. Der Strahlversuchsstand ist in Bild 22 abgebildet.



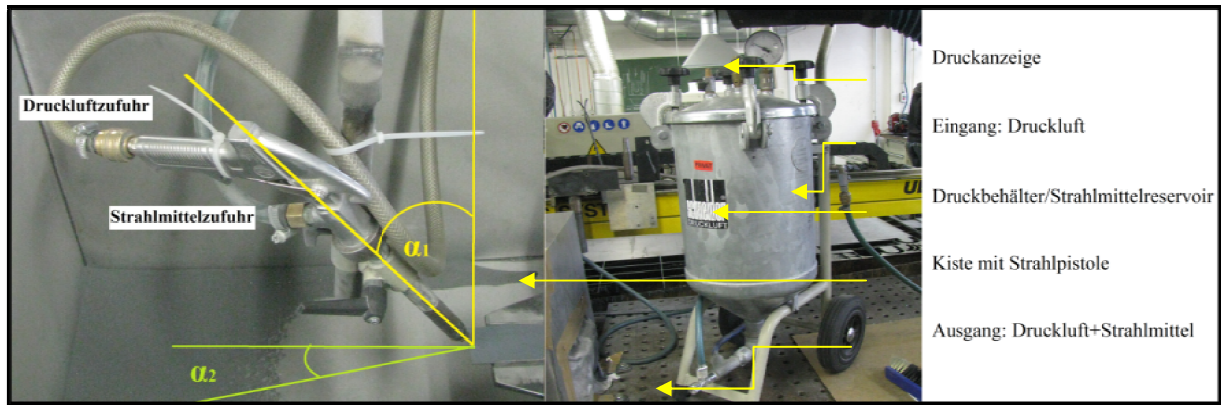


Bild 22: Strahlversuchsstand

Mit den in Tabelle 4 aufgeführten Strahlparametern konnte der Abtrag der spröden Schichten erreicht werden.

Tabelle 4: Parameter für AlZrO-Strahlung ( $\alpha 1$  und  $\alpha 2$  auf Bild 22 links bezogen)

Bezeichnung	Kürzel	Betrag	Einheit
Abstand (Lanze-Probe)	a	12	mm
Winkel 1 (Lanze-Probe)	$\alpha 1$	45	°
Winkel 2 (Lanze-Probe)	$\alpha 2$	40	°
Luftdruck	p	8	bar
Fahrgeschwindigkeit	v	200	mm/min
Fraktion (Körnung)	Kö	150(63µm-106µm)	
Lanzenöffnung	l	4,4	mm

Mit derart gereinigten Proben konnten Verbindungen mit stark differierenden Festigkeiten hergestellt werden. Die Ursachen für die registrierten Differenzen der Verbindungsfestigkeit innerhalb einer Versuchsreihe sind vermutlich auf die in der Substratoberfläche eingelagerten Strahlpartikel (Bild 24) zurückzuführen.

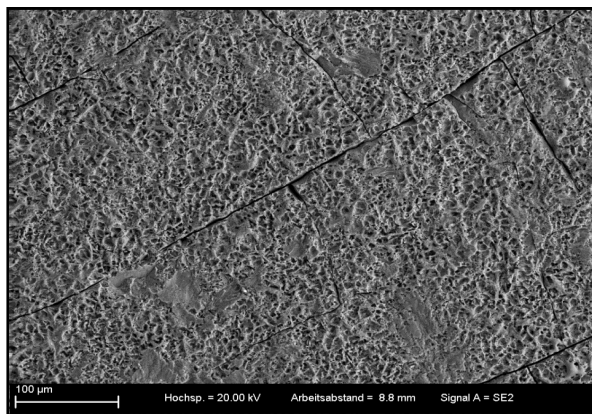


Bild 23: AS-Schicht ungestrahlt [RUB]

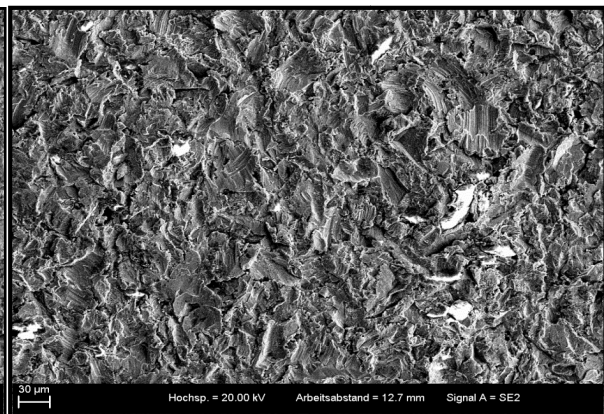


Bild 24: nach AlZrO-Bestrahlung[RUB]

Dies gilt sowohl für AS-beschichtete Bleche, die mit 920° als auch für jene, die mit 950° und 1000°C wärmebehandelt wurden.



Dieser Einlagerungseffekt ist unerwünscht. Der Prozess und die Benetzung werden gestört.

### Schleifreinigung

Für die Untersuchung der Schleifreinigung wurden Bleche mit der Fächerscheibe LFZ2 von Rhodius (Körner: 440µm aus Zirkonkorund) gereinigt. Es wurde ausschließlich mit AS-beschichteten Blechen gearbeitet. (Bedenken des Projektpartners VW zur Anwendung von GP-Schichten). Der Abtrag wurde so gewählt, dass bis auf den blanken Grundwerkstoff geschliffen wurde. Bei den mit 1000° behandelten Blechen wird deutlich, dass die Beschichtungen während des Schleifens schmierende Eigenschaften aufweisen. Dennoch kann die Beschichtung bis auf den Grundwerkstoff abgetragen werden. Auf Bleche mit dieser Oberflächenvorbereitung konnte mit dem Zusatzwerkstoff ZnAl5Cu3,5 gelötet werden. Jedoch ist die Streuung der Festigkeitswerte groß. Auch die mit dem AlSi3Mn hergestellten Verbindungen streuen stark.

Aufgrund der hohen Streuung der Festigkeitswerte innerhalb der Versuchsreihen ist die Schleifreinigung nicht empfehlenswert für die Oberflächenvorbereitung der 22MnB5-Bleche.

### *Fazit aus den Reinigungsversuchen*

Die Laserreinigung ist die zuverlässigste Variante und weist das höchste Maß an Automatisierbarkeit auf. Strahl- und Schleifreinigung sind nicht zu empfehlen.

### (AP 3.2) Reinigung von 22MnB5+AS-Blechen mit einem Nd:YAG-Laser nach verschiedenen Wärmebehandlungen

Die sich infolge des Härteprozesses bildenden Diffusionsschichten sind von der Prozesstemperatur und der Zeit abhängig (Gleichung 1). Aus diesem Grund galt es, den Laserreinigungseffekt auch an Proben zu prüfen, die bei Temperaturen von 950°C und 1000°C behandelt worden. Für die Dauer der Wärmebehandlung wird eine Austenitisierungszeit von 6 min angegeben [ThyssenKrupp].

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den Bildern 25 dargestellt. Ist der Fokus des Laserstrahls auf der Oberfläche der Beschichtung eingestellt, entspricht diese Z-Koordinate dem Fokusaufmaß von 0. Mit Fokusaufmaß F=5 befindet sich der Laserfokus demnach 5 mm über dem Blech. Die Untersuchungen erfolgten in dem Arbeitsbereich auf F=5 bis F=9,5 (Bild 25 oben links). Die weiteren benutzten Parameter sind in der Tabelle 3 aufgeführt.



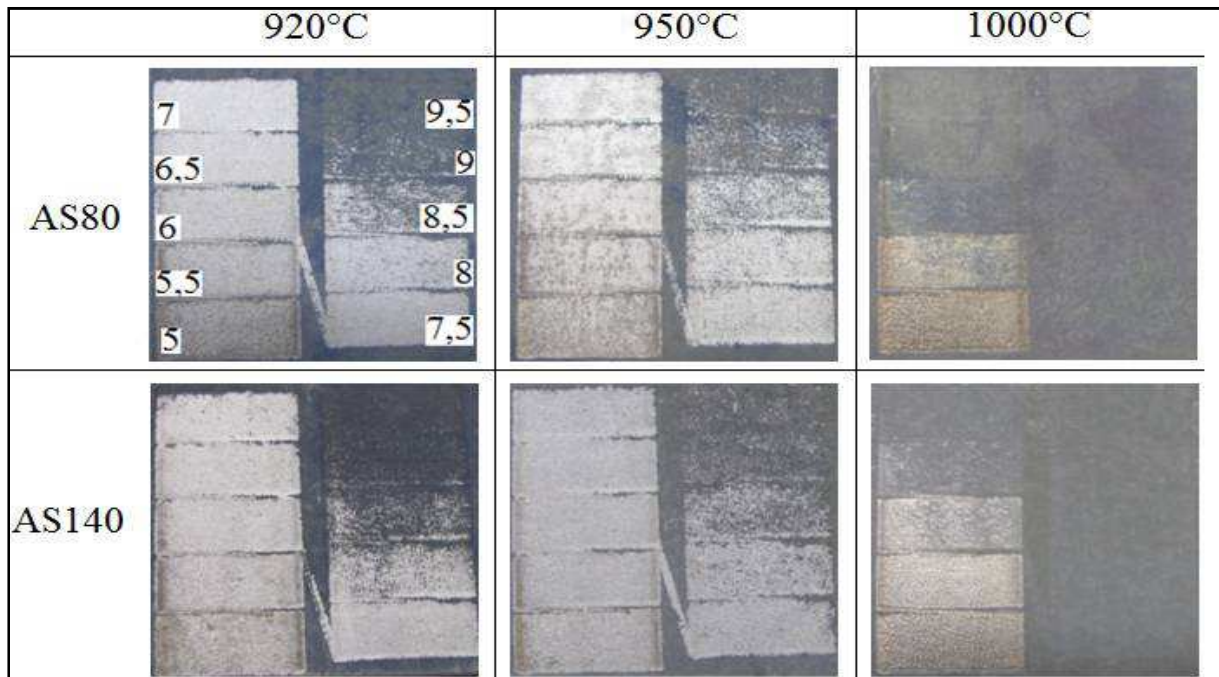


Bild 25: Reinigung mit verschiedenen Fokusaufmaßen von F+5 bis F+9,5

Visuell kann eine ausreichende Verbindungsvorbereitung durch die hellgraue Färbung erkannt werden. Eine wiederholte Wirkung des Lasers (Umkehrpunkte) an der Bauteiloberfläche ist zu vermeiden. Es kann zur Aufschmelzung des Grundwerkstoffes und somit zu einer Oxidbildung kommen. Auch dies kann bereits visuell (Bilder 26 und 27, Parameter aus Tabelle 3) registriert werden.

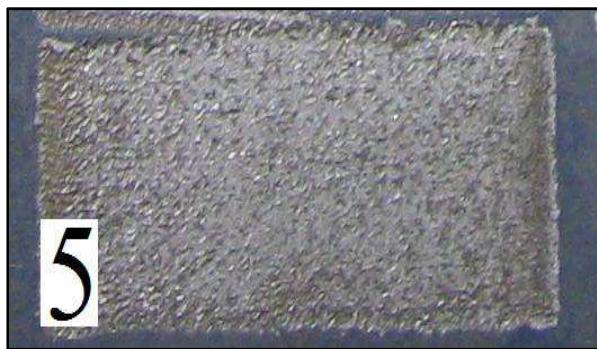


Bild 26: Umschmelzung bei F+5



Bild 27: Delamination bei F+7

Wurde das Presshärten bei 1000°C durchgeführt, ist eine Laserbehandlung offensichtlich nicht als Vorbereitung für einen Lötprozess geeignet.

Die bei konventionell gehärteten Bauteilen registrierten Schichtabplatzungen sind zurückzuführen auf die differierenden Ausdehnungen der unterschiedlichen IM-Phasen in der Schicht, welche durch den mittels Laser provozierten, hohen Temperaturgradienten ausgelöst werden. Der Projektpartner RUB hat hierzu den notwendigen Nachweis erbracht.

#### II.1.2.4 AP4 Versuche mit Al-Basislegierung

Die Verbindungen von 22MnB5 und DC04 mit dem Lötzusatzwerkstoff AlSi3Mn wurden mit dem Diodenlaser LDM 900-60 (Fa. Laserline) hergestellt. Mit den Flussmitteln Castolin FX192 und Al-Flux 028 Cs/D konnten wesentlich bessere Ergebnisse erzielt werden als ohne



Flussmittel. Beide Flussmittel sind anwendbar. Für Lötzusätze auf Al-Basis ist die Laserreinigung bis auf die AlFe-Phase zu präferieren. Bild 28 veranschaulicht die Positionen der Kaltdrahtzufuhr sowie der Schutzgasdüse. Der Laserstrahl trifft mit einem Anstellwinkel von 7° in Löttrichtung auf das Blech. Quer zur Löttrichtung ist der Laserstrahl senkrecht zum Blech angestellt.

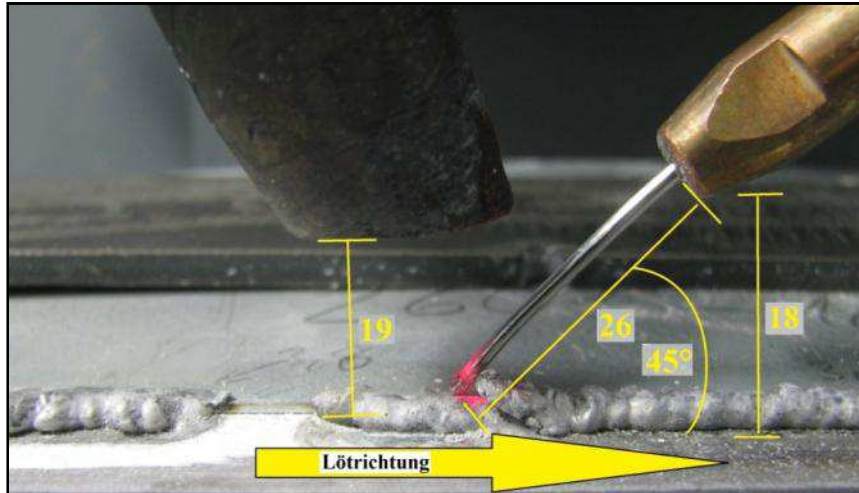


Bild 28: Draht- und Schutzgaszufuhr bei AlSi3Mn-Lötung

Die Scherzugfestigkeiten der Verbindungen 22MnB5 und DC 04 lagen zwischen 180 und 244 N/mm<sup>2</sup> und im Durchschnitt bei 208 N/mm<sup>2</sup>. Die Scherzugfestigkeit wird nach Formel 2 berechnet.

$$\sigma = F / (a * b) \quad (2)$$

Hierin bedeuten:

F die gemessene maximale Scherzugkraft (normal zur Querschnittsfläche),  
a Dicke des dünneren Bleches, hier Dicke des DC04-Bleches,  
b Breite des Querschnitts.

Es muss mit niedrigerer Energie oder höheren Fahrgeschwindigkeiten gearbeitet werden als bei Zusatzwerkstoffen auf Zinkbasis, da es sonst zur Versprödung in der Diffusionszone kommt. Die erarbeiteten Parameter wurden in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Parameter für die Laserlötung mit AlSi3Mn

Lötparameter	AlSi3Mn
Draht-Ø (mm)	1.6
Flussmittel	Al-Flux 028 Cs/D
P <sub>laser</sub> (W)	730
v <sub>fähr</sub> (mm/min)	240
v <sub>Draht</sub> (cm/min)	60
P <sub>induktor</sub> (kW)	0
Abstand Stoßkante zu Brennfleckmitte	2,5mm
Brennfleck-Ø	4mm
Drahtzufuhrwinkel	45°
Spaltmaß	0-0,2mm



Die Nähte haben auf dem 22MnB5 eine Anbindung von 3,0 - 4 mm und weisen meist negative Benetzungswinkel auf dem 22MnB5 auf (Bild 29).

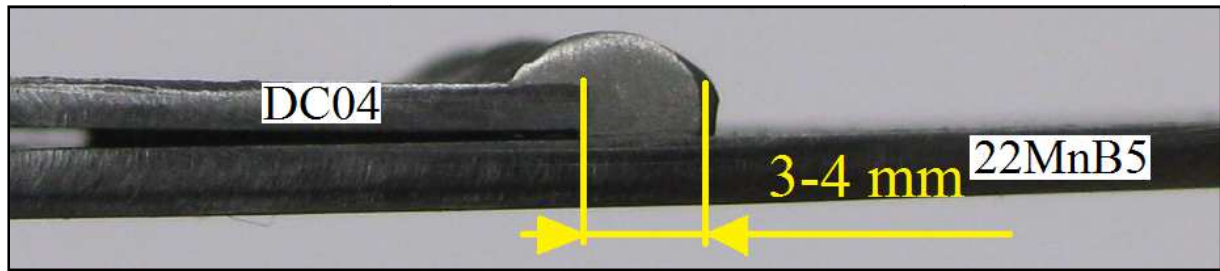


Bild 29: Querschliff 22MnB5 + DC04 mit AlSi3Mn

Eine Erhöhung der Streckenenergie verbesserte die Benetzung, führte aber zur Abnahme der Reproduzierbarkeit der Verbindungsfestigkeit.

#### (AP4.1) AlSi3Mn-Lötverbindungen im Korrosionsstand

Die Verbindungen aus AP4, AP5 und AP6 wurden einer Korrosionsprüfung unterzogen. Die Dokumentation dazu ist in die jeweiligen Arbeitspunkte eingefügt worden. Ziel der Untersuchung bestand darin, die Wirkungen der korrosiven Beanspruchung auf die Verbindungsfestigkeit zu ermitteln.

Die Korrosionsuntersuchungen erfolgten entsprechend der Prüfvorschrift des Projektpartners VW (PV 1210). Die Versuchsdauer betrug 60 Zyklen, wobei ein Zyklus einem Tag entspricht. Pro Woche wurden 5 Zyklen realisiert und somit dauerte der Versuch insgesamt 12 Wochen. In der Tabelle 6 sind die Phasen eines Zyklus aufgeführt.

Tabelle 6: Zyklen des Salzsprühnebeltests nach PV 1210

Tagesprogramm	
4 h	Salzsprühphase bei (35°C)
4 h	Ruhezeit
16 h	100 % Feuchtigkeit bei (40°C)

Während der Salzsprühphase wurde in der Versuchskammer kontinuierlich eine 5%-ige Salzlösung (NaCl) versprüht. Es wurden die Vorgaben der DIN EN ISO 9227 eingehalten, d. h. der pH-Wert der Lösung betrug bei 25°C 6 bis 7. Im Behälter beträgt der pH-Wert 6,5.

In der Tabelle 7 ist eine Zusammenstellung der korrosiv beanspruchten Proben aufgeführt.

Tabelle 7: Nahtvorbereitung und Verbindungskonfiguration

Bezeichnung	GW1 Unterblech	GW2 Oberblech	AlSi3Mn	ZnAl5Cu3,5	AZ61	Laserreinigung	Schleifreinigung
1.6.14.4.X	22MnB5	DC04+ZE		x			x
1.6.11.4.1 - 3	22MnB5	DC04+ZE	x			x	
1.6.11.4.4 - 6	22MnB5	DC04+ZE	x				x
1.5.13.1.1	22MnB5	AZ31			x		x
1.6.13.1.1	22MnB5	DC04+ZE			x		x

Im Bild 30 ist die für diese Untersuchungen definierte Probengeometrie dargestellt. Es waren pro Probe 3 Step-Nähte zu löten. Somit werden auch der Nahtanfang und das Nahtende korrosiv beansprucht.



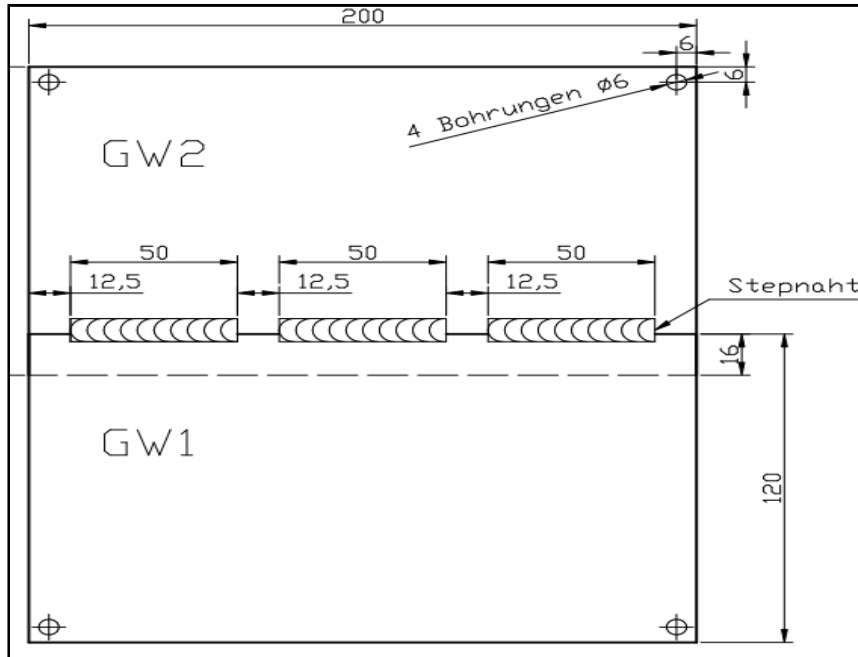


Bild 30: Korrosionsprobegeometrie

Die AlSi3Mn-Proben sind mit den in der Tabelle 5 zusammengefassten Parametern hergestellt worden. Im Bild 31 sind die Steppnähte einer Probe dargestellt.



Bild 31: AlSi3Mn-Steppnaht zw. 22MnB5 und DC04

Vor der Korrosionsprüfung wurden die Proben vom Projektpartner VW mit einer kathodischen Tauchlackierung (KTL) versehen, Bild 32. Während der Versuchsdauer der Korrosionsuntersuchung werden die Proben nach jeweils 3 Wochen beurteilt.

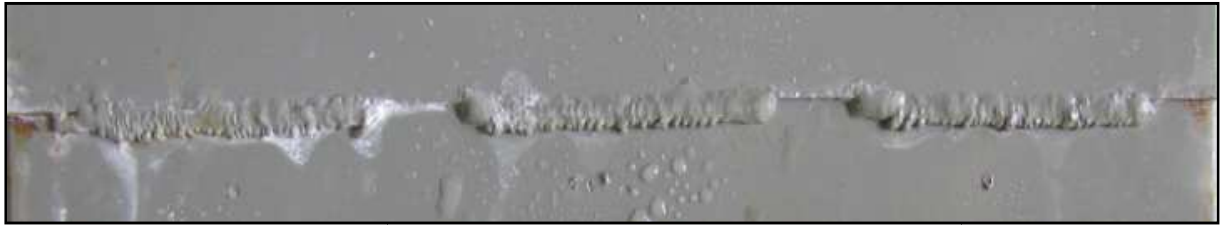


Bild 32: AlSi3Mn-Steppnaht mit KTL nach 3 Wochen



Bild 33: AlSi3Mn-Steppnaht mit KTL nach 6 Wochen





*Bild 34: AlSi3Mn-Steppnaht mit KTL nach 9 Wochen*



*Bild 35: AlSi3Mn-Steppnaht mit KTL nach 12 Wochen*

In den ersten 6 Wochen konnte an den Proben äußerlich keine korrosive Schädigung festgestellt werden, siehe Bild 33. Nach 9 bzw. 12 Wochen wurden weiße Fahnen (Bilder 34 und 35) deutlich, die an den Nähten beginnend sich zum Grundwerkstoff hin ausweiteten. Das sind deutliche Anzeichen einer korrosiven Schädigung.

Die in den AP5 und AP6 hergestellten Proben wurden identisch korrosiv beansprucht.

Die Festigkeiten der AlSi3Mn-Verbindungen nach dem Korrosionstest liegen zwischen 49 und 222 N/mm<sup>2</sup> und im Durchschnitt bei 134 N/mm<sup>2</sup>. Dies ist ein erheblicher Abfall der Festigkeitswerte im Vergleich zur Versuchsreihe der unkorrodierten Proben, die einen Mittelwert von 208 N/mm<sup>2</sup> aufwiesen. Auch die Streubreite der Festigkeitswerte vergrößert sich. Die Versuchsreihe der unkorrodierten Proben wies eine Standardabweichung von 26,4 N/mm<sup>2</sup> auf während die der Korrosionsprobenversuchsreihe bei 60 N/mm<sup>2</sup> lag.

#### II.1.2.5 AP5: Versuche mit Zn-Basislegierung

Für die Herstellung von Stahl-Stahl-Verbindungen (22MnB5 – DC04) wurden Versuche mittels Lichtbogen und Laserstrahl durchgeführt. Bei den Lichtbogenlötungen wurden zwei unterschiedliche Energiequellen (EWM Phoenix 330cA und Fronius CMT Advanced 4000) benutzt.

Für die Versuche mit der EWM wurde ein KLB-Prozess mit langer Lichtbogenbrennphase (Bild 36) erzeugt. Diese lange Lichtbogenbrennphase ist die Voraussetzung dafür, den Grundwerkstoff zu reinigen und zu aktivieren. Nur unter diesen Bedingungen konnte eine Benetzung erzielt werden. Es wurde bei einer mittleren Spannung von 15,6V und einer Drahtgeschwindigkeit von 6 m/min gearbeitet. Die Lötgeschwindigkeit betrug 24 cm/min.



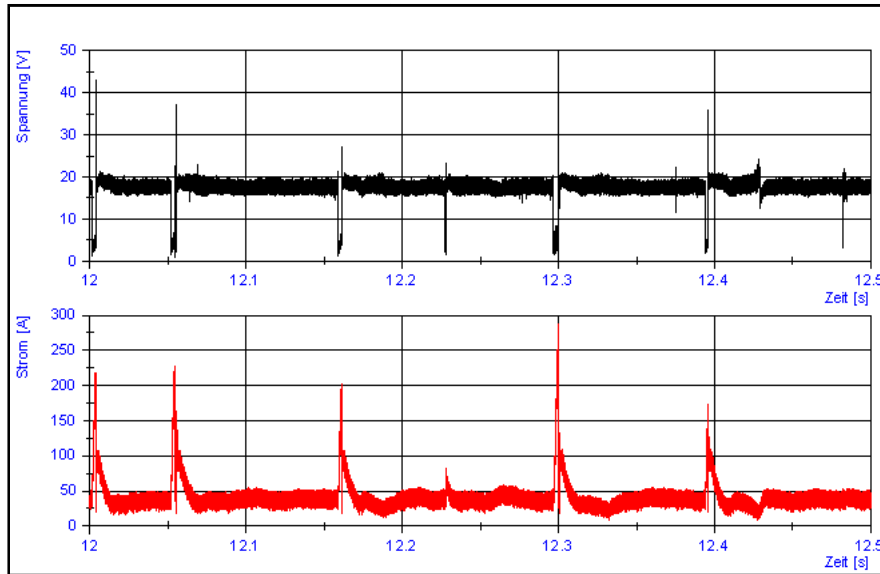


Bild 36: Messschrieb lange Lichtbogenbrennphase

Für die Verbindungsherstellung mit der Maschine aus dem Hause Fronius wurde ein CMT-Prozess ausgewählt. Im Bild 37 ist ein gemessener U-I-t-Verlauf dargestellt. Als Schweißparameter wurden 5m/min Drahtgeschwindigkeit und 24cm/min Lötgeschwindigkeit eingestellt.

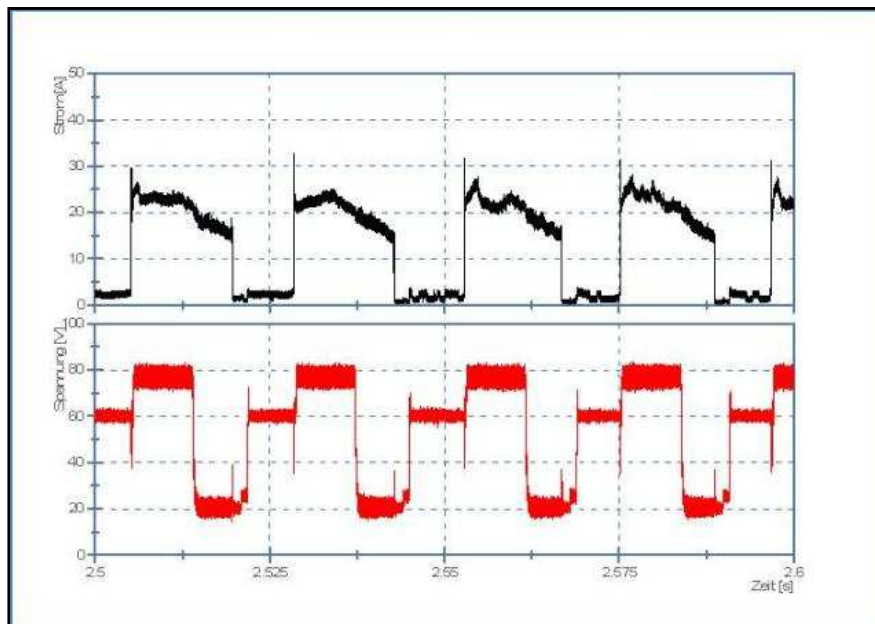


Bild 37: Strom-Spannung-Zeit Verlauf CMT Prozess

Als Zusatzwerkstoffe wurden bei den Versuchen mit der EWM der vom Projektpartner Grillo auf der Basis des ZnAl4 1,0mm entwickelte und bei der Fronius der auf dem ZnAl15 1,2mm basierende Draht verwendet. Alle Proben wurden vor der Lötung mit Edelstahlflies und Alkohol gereinigt. Im Gegensatz zu den mittels Laser hergestellten Verbindungen waren die Vorbereitungsarbeiten somit deutlich moderater.

Die Scherzugfestigkeiten lagen bei maximal 280 N/mm<sup>2</sup> (EWM-Lötungen; Bild 38) und bei 270 N/mm<sup>2</sup> (Fronius; Bild 39).

Die Streuung der Festigkeitswerte ist auf Grund der begrenzten Lötnahtvorbereitung hoch. Somit waren auch die Verbindungsstellen, welche mittels Lichtbögen gelötet werden sollten, vorzubereiten.



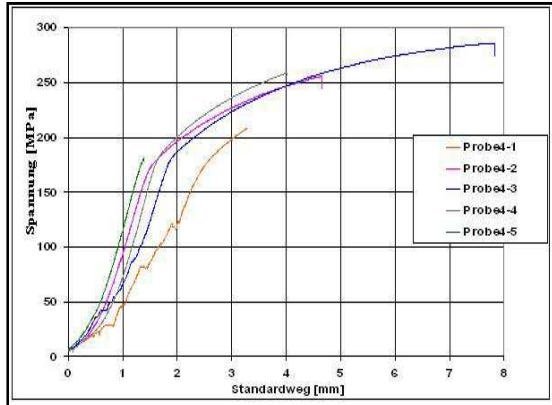


Bild 38: Ergebnisse Zugversuche EWM

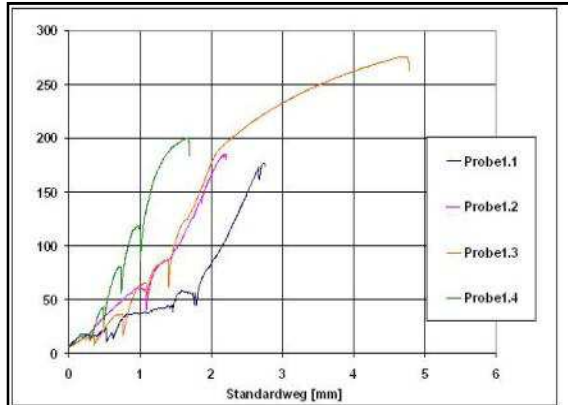


Bild 39: Ergebnisse Zugversuche Fronius

Für die Herstellung der Verbindungen mit dem Diodenlaser LDM900-60 (Fa. Laserline) wurde ein Lötzusatz auf der Basis ZnAl5Cu3,5 (1,2mm Durchmesser) verwendet. Die Nahtvorbereitung erfolgte mittels Nd:YAG-Laser und den Parametern aus Tabelle 3.

Zur weiteren Verbesserung der Benetzung des Lotes kam das Flussmittel Castolin FX192 zum Einsatz. Es wird mit Alkohol zu einer pastösen Masse verrührt und auf die Lötstelle aufgetragen.

Bei einer Lötgeschwindigkeit von 30cm/min, einer Laserleistung von 900W und einer Drahtvorschubgeschwindigkeit von 2,2m/min gelingt es, Festigkeiten im Bereich der Grundwerkstofffestigkeit des DC04-Partners einzustellen (Bild 40). Die Scherzugfestigkeiten liegen im Bereich von 260 bis 303 kN/mm<sup>2</sup> (Bild 41).

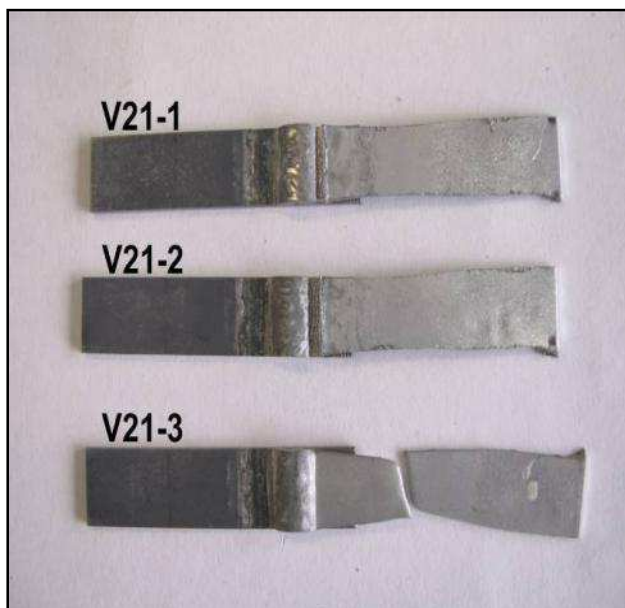


Bild 40: Bruchbild Laserlötungen

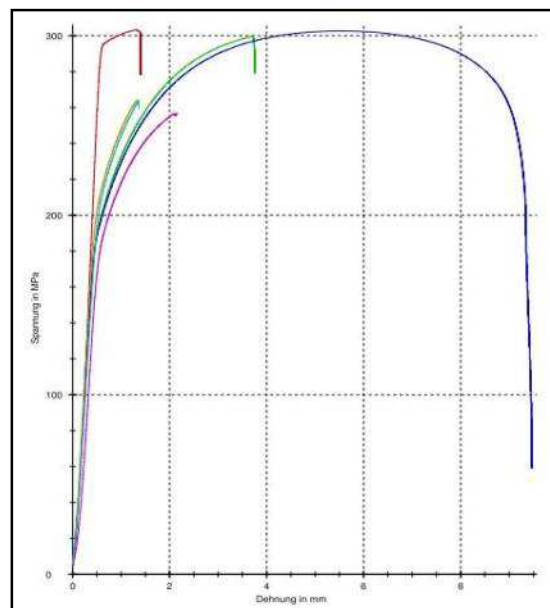


Bild 41: Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Die Streuung der Scherzugfestigkeiten liegt bei den mit Lasern gefügten Verbindungen deutlich unter denen, die mittels Lichtbogen hergestellt wurden. Dies ist ein Grund dafür, den Fokus der Arbeiten auf die Laserlötungen zu legen. Die Festigkeiten erreichten Durchschnittswerte von ca. 282 N/mm<sup>2</sup>.

Es wurde daran gearbeitet, die Streubreite der erzielten Festigkeiten zu minimieren.

Zur Verbesserung der Benetzung des Lotes kam das Flussmittel Al-Flux 028 Cs/D zum Einsatz. Dieses ist in pastöser Form zu beziehen. Als Trägermedium dient eine organische Flüssigkeit, die beim Erhitzen laut Hersteller vollständig verdampft.



Um die Technologie der Verbindungsherstellung zu vereinfachen, hat der Projektpartner Grillo einen flussmittelumhüllten Draht auf der Basis des ZnAl15 hergestellt. Mit der gleichen Zielstellung wurde auch ein flussmittelgefüllter Draht auf der Basis ZnAl4 hergestellt. Beide Drähte wurden hinsichtlich ihrer Eignung für die Herstellung von Verbindungen zum gehärteten 22MnB5 überprüft. Für den flussmittelumhüllten Draht gilt, dass bei konventioneller Drahtführung sich ein Großteil des auf dem Draht befindlichen Flussmittels vor dem Austreten des Drahts aus der Düse ablöst. Das Flussmittel bleibt sowohl an den Förderrädern der Drahtzufuhr als auch an den Drahtförderschläuchen hängen, so dass kaum Flussmittel die Nahtzone erreicht. Auch die Versuche mit dem flussmittelgefüllten Draht verliefen bei der Anwendung des Laserkaltdrahtverfahrens nicht positiv. Im stromführenden Lichtbogen konnte der flussmittelgefüllte Draht dagegen sehr gut verarbeitet werden.

Um die Reproduzierbarkeit der Verbindungsherstellung zu verbessern, wurden Versuche mit induktiver Vorerwärmung durchgeführt. Zur Vorwärmung wurde ein 10 kW Hochfrequenzgenerator verwendet (Bild 10). Die Regelung der zugeführten Energie erfolgt über ein Pyrometer. Die vom Projektpartner Steremat gefertigte Induktorschleife wird in einem definierten Abstand vor dem Laser (Bild 42) positioniert und analog dem Laser über die Verbindungsstelle bewegt. Der Abstand zwischen dem Laser und der Induktorschleife ist möglichst gering einzustellen, um Reaktionen der erwärmten Verbindungsumgebung sowie des Zusatzwerkstoffes mit der Atmosphäre zu vermeiden. Auch die Energieverluste sollten dadurch reduziert werden.

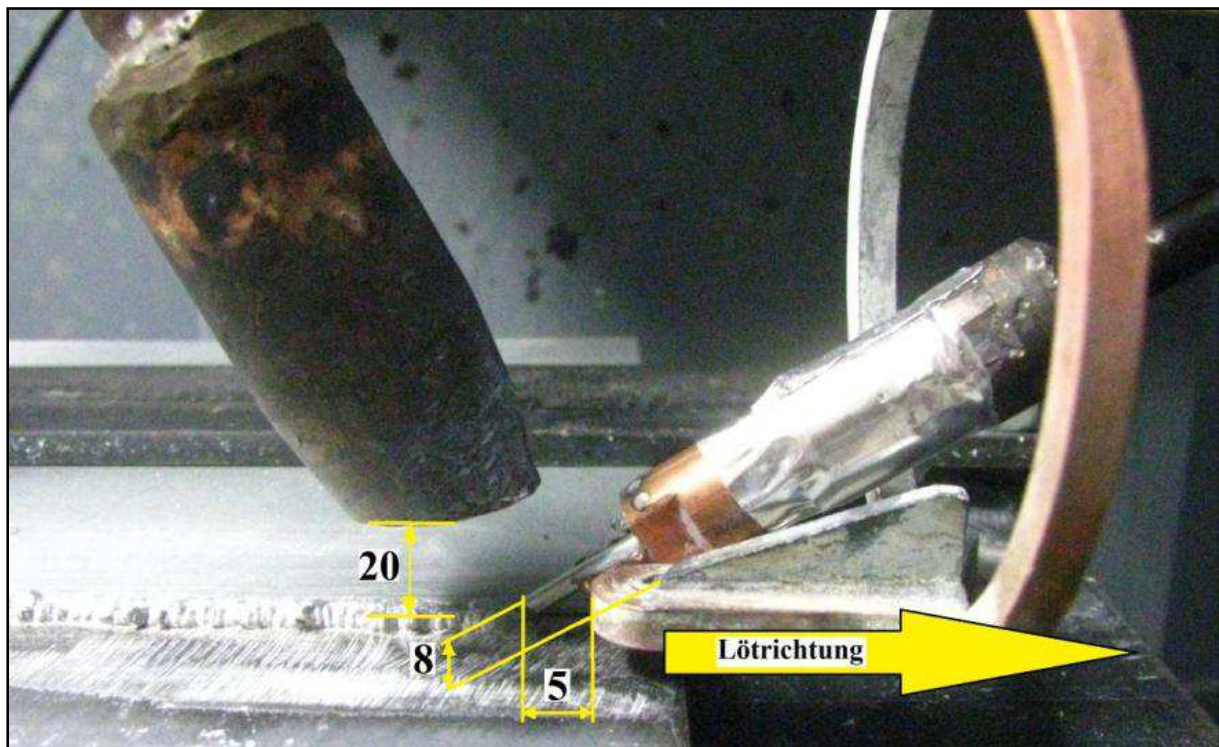


Bild 42: Induktorschleife und Drahtzufuhr bei Lötversuchen mit ZnAl5Cu3,5

Durch die Verwendung der Induktorschleife konnte die Laserleistung auf 450W halbiert werden. Für die Herstellung der Korrosionsproben in Steppnahtausführung mit dem Diodenlaser LDM900-60 (Fa. Laserline) wurden die Parameter aus Tabelle 8 verwendet.



*Tabelle 8: Parameter für ZnAl5Cu3,5-Steppnahtlötung*

Lötparameter	ZnAl5Cu3,5
Draht-Ø (mm)	1.2
Flussmittel	Al-Flux 028 Cs/D
P <sub>laser</sub> (W)	450
v <sub>fahr</sub> (mm/min)	300
v <sub>Draht</sub> (cm/min)	350
P <sub>induktor</sub> (kW)	1,5
Abstand Stoßkante zu Brennfleckmitte	3,5mm
Brennfleck-Ø	4mm
Drahtzufuhrwinkel	45°
Abstand Ind.-Schleifenende zu Laserstrahl (längs)	5mm
Spaltmaß	0-0,2mm

Die Nahtvorbereitung ist der Tabelle 7 im AP 4.1 zu entnehmen. Die Probenbewertung war analog zu AP 4.1. Die Bilder 43 bis 46 veranschaulichen die Nähte im Verlauf des Korrosionsversuchs. Es konnten visuell keine Korrosionsschäden festgestellt werden.



*Bild 43: ZnAl5Cu3,5-Steppnaht nach 3 Wochen*



*Bild 44: ZnAl5Cu3,5-Steppnaht nach 6 Wochen*



*Bild 45: ZnAl5Cu3,5-Steppnaht nach 9 Wochen*



*Bild 46: ZnAl5Cu3,5-Steppnaht nach 12 Wochen*



Die Scherzugfestigkeitswerte der Korrosionsproben wurden vom Projektpartner RUB ermittelt. Sie sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

*Tabelle 9: Scherzugfestigkeitswerte*

Bezeichnung	Rm [N/mm <sup>2</sup> ]
ZnAl5Cu3,5_1	275.3
ZnAl5Cu3,5_2	245.1
ZnAl5Cu3,5_3	261
ZnAl5Cu3,5_4	273.9
ZnAl5Cu3,5_5	217.3
ZnAl5Cu3,5_6	282.3
Mittelwert:	259.15
Standartabweichung	22.2356883

Die Korrosion schwächt die Verbindungsfestigkeit geringfügig. Die Festigkeitswerte fallen im Mittelwert von 282 N/mm<sup>2</sup> auf 260 N/mm<sup>2</sup>. Dabei wurden in beiden Versuchsreihen Standardabweichungen von ca. 22 N/mm<sup>2</sup> ermittelt werden.

#### Schaumdrähte vom Projektpartner Grillo

Die Anwendbarkeit von Schaumdrähten wurde sowohl mit dem Diodenlaser (990W) als auch mit dem Lichtbogen geprüft. Es ist nicht gelungen, Verbindungen herzustellen. Offensichtlich existieren erhebliche energetische Differenzen zwischen dem Füge- und dem Schäumprozess. Diese Art der Herstellung gradiert Schichten wurde daher nicht weiter verfolgt. Anders verhält es sich mit der "in situ"-Variante der Herstellung gradiert Schichten. Es ist nachgewiesen, dass die sich bildende Phase zwischen den zu fügenden Bauteilen sehr deutlich von der chemischen Konfiguration (chemisches Potenzial Gleichung 1) des Zusatzwerkstoffes abhängt. Während z. B. Silizium die Phasenbildung begrenzt, fördert sie Magnesium.

#### II.1.2.6 AP6 Versuche mit Mg-Basislegierung

Es wurden Versuche zur Herstellung von Verbindungen zwischen den pressgehärteten 22MnB5- und AZ31-Bleichen mittels Lichtbogen durchgeführt. Als Zusatzwerkstoff kam der vom Projektpartner Elisental auf Basis des AZ61 hergestellte 1,2mm dicke Draht zum Einsatz. Verbindungen zwischen dem 22MnB5 mit der GP-Beschichtung führten zu visuell sehr schönen Nähten (Bild 47). Die Zugfestigkeiten lagen allerdings nur bei ca. 90 N/mm<sup>2</sup> (Bild 48). Die identisch mit den AS-beschichteten Bleichen der Qualität 22MnB5 durchgeführten Versuche führten zu keinen belastbaren Verbindungen. Um belastbare Verbindungen herzustellen, ist somit eine Nahtvorbereitung zwingend.





Bild 47: Magnesium Lötung

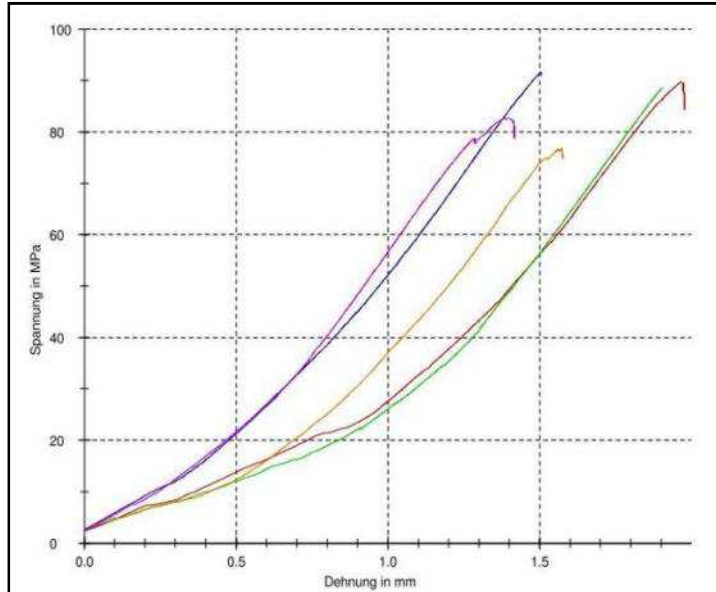


Bild 48: Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Dies wird auch durch die Ergebnisse der Versuche bestätigt, Verbindungen zwischen dem elektrolytisch verzinkten Blech der Qualität DC04 und den AZ31-Blechen herzustellen. Unter identischen Bedingungen wurden visuell sehr schöne (Bild 50) und hoch belastbare (Bild 49) Verbindungen erzeugt. Der Mittelwert der Scherzugfestigkeiten betrug 289 N/mm<sup>2</sup>. Die Bruchlage ist in Bild 51 verdeutlicht. Es wurde mit einem geregelten Kurzlichtbogenprozess und der Schweißmaschine EWM Phoenix 330cA gearbeitet. Eine Erwärmung des Stahlteiles auf ca. 475°C wirkt sich positiv auf die Reproduzierbarkeit der Verbindungseigenschaften aus.

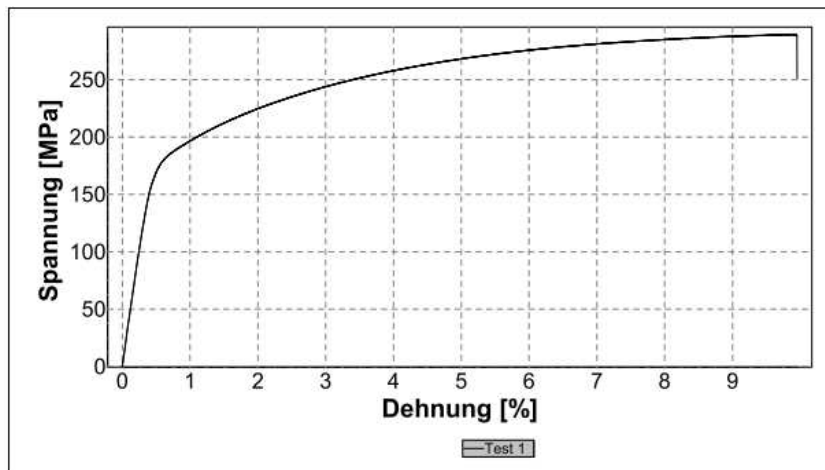


Bild 49: Spannungs-Dehnungs-Diagramm AZ61 auf DC04+ZE



Bild 50: Magnesium Lötung AZ61 auf DC04+ZE



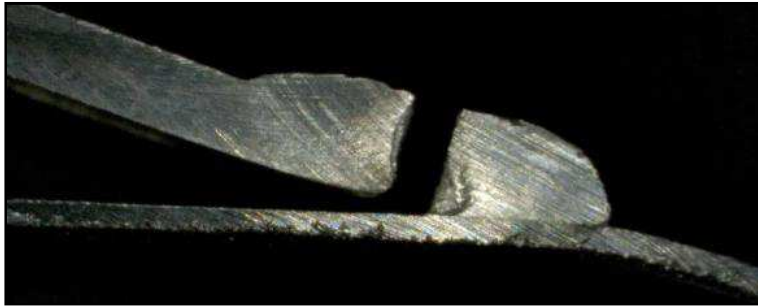


Bild 51: Bruchlage Lötung AZ61 auf DC04+ZE

Auf der Basis dieser Erkenntnisse wurden die in der Tabelle 10 aufgeführten Verbindungen hergestellt.

Tabelle 10: GW-Verbindungskombinationen

V-Proben-Nr.	GW1/dick	GW2/dick	Reinigung GW1
1.5.13.1.1	22MnB5 AS150 /1,5mm	AZ31 /2mm	Laserabtrag
1.5.13.1.2	22MnB5 AS150 /1,5mm	AZ31 /2mm	AlZrO-gestrahlt
1.4.13.1.3	22MnB5 AS150 /1,5mm	DX53 +Z /1mm	Laserabtrag
1.6.13.1.4	22MnB5 AS150 /1,5mm	DC04 +ZE /1mm	Laserabtrag

Die Verbindungsherstellung erfolgte mittels MIG-CMT Prozess mit der Stromquelle Fronius CMT. Der Brenner in senkrechter Stellung ist dabei auf den GW1 gerichtet. Zum Oberblech wird ein Draht-Versatz von 1-2 mm eingestellt. Ein Spalt von 0,2 mm ist vorteilhaft, Bild 52.

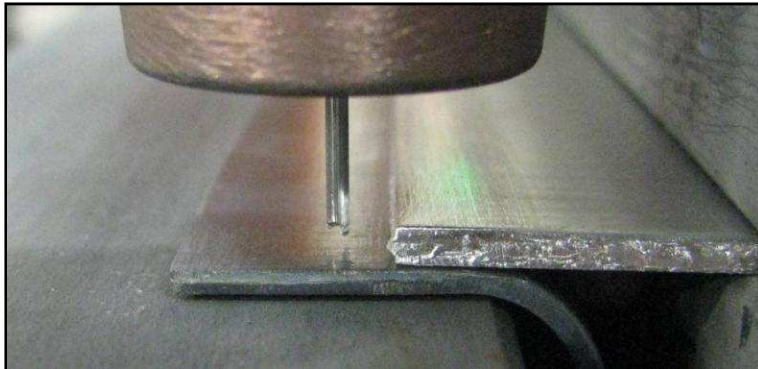


Abbildung 52: Brennerstellung (22MnB5 unten und AZ31 mit SZ AZ31)

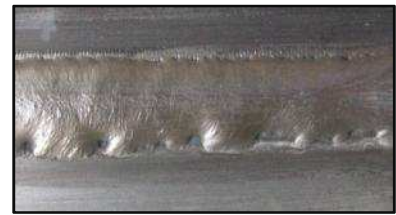
Tabelle 11 beinhaltet die bei der Lötung verwendeten Parameter.



*Tabelle 11: Parameter für die CMT-Steppnahtlötung mit AZ61*

Parameter	AZ61
Stromquelle	Fronius CMT
Draht-Ø (mm)	1,2
Schutzgas	Argon 100%
Brennerwinkel	senkrecht
Stickout	10 mm
Drahtversatz	2 mm
Drahtvorschubgeschwindigkeit	6,5 m/min
Schweißgeschwindigkeit	36 cm/min
Spannung	13 V
Strom	75,3 A
Grundstrom	70 A
Streckenenergie	2,5 kJ/cm
Kurzschlussfrequenz	~52 Hz

Die Verbindungen sind in den Bildern 53, 54 und 55 (*22MnB5 oben*) dargestellt. Die Verbindung 22MnB5 –DC04+ZE zeigt Anbindefehler durch Zinkverdampfung an der oberen Blechkante durch den Lichtbogen.

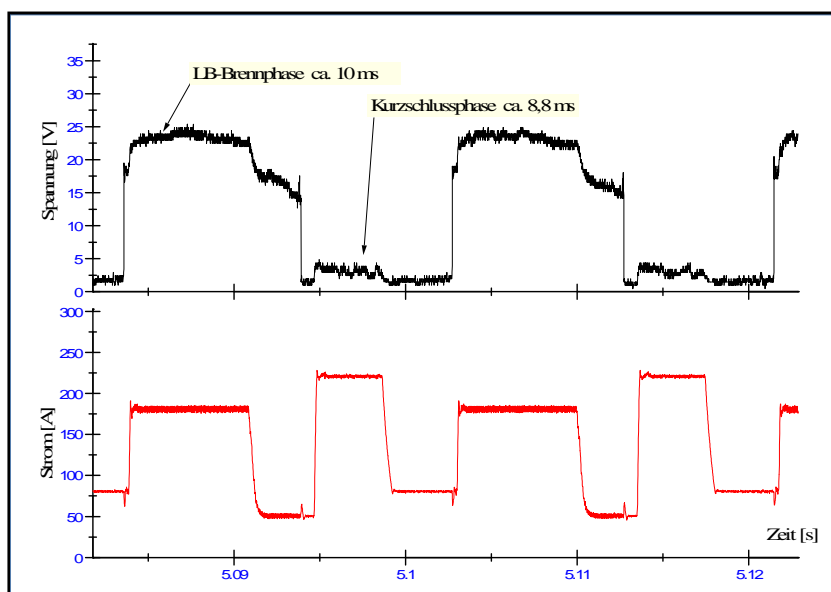


*Bild 53: 22MnB5-DX53+Z*

*Bild 54: 22MnB5 -AZ31*

*Bild 55: 22MnB5 –DC04+ZE*

Im Bild 56 ist der definierte U-I-t-Verlauf dargestellt.



*Bild 56: Spannung / Strom- Kennlinien des CMT-Schweißprozesses*



Die Prüfung der Verbindungsfestigkeit beim Projektpartner RUB ergab, dass überwiegend die Diffusionszone vom AZ61 zum 22MnB5 als Versagensort auftrat.

Die erzielten Festigkeiten im Zugversuch der Verbindungskombinationen sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Zur Spannungsberechnung wurden die gemessenen Kräfte auf die beanspruchten Querschnittsflächen des GW2 bezogen. Bei den Verbindungen zum AZ31 wurde 2 mm Bleche verwendet, wodurch sich Rm entsprechend reduziert, Tabelle 12. Aus den Verbindungen nach Tabelle 10 wurden jeweils 3 Zugproben ausgeschnitten.

Tabelle 12: Ergebnisse Zugversuch Verbindungskombinationen, SZ auf Mg-Basis

GW1 / GW2	Probe	a <sub>0</sub> [mm]	b <sub>0</sub> [mm]	L <sub>0</sub> [mm]	RP <sub>0,2</sub> [MPa]	Rm [MPa]	øRm [MPa]	F <sub>max</sub> [N]
22MnB5 DC04+ZE Laserabtrag	V1.6.13.1.4_1	1,06	10,46	175	254,2	281	249	3115
	V1.6.13.1.4_2	1,05	10,54	175	253,2	292		3237
	V1.6.13.1.4_3	1,07	11,52	175	-	174		2149
22MnB5 / AZ31 Laserabtrag	V1.5.13.1.1_1	2,17	10,12	175	-	130	136	2863
	V1.5.13.1.1_2	2,14	10,85	175	-	134		3108
	V1.5.13.1.1_3	2,10	12,28	175	-	145		3729
22MnB5 / AZ31 AlZrO-gestrahlt	V1.5.13.1.2_1	2,06	11,58	175	-	135	132	3210
	V1.5.13.1.2_2	2,09	10,75	175	-	139		3113
	V1.5.13.1.2_3	2,17	10,31	175	-	123		2752
22MnB5 DX53+Z Laserabtrag	V1.4.13.1.3_1	1,02	10,65	175	-	249	215	2706
	V1.4.13.1.3_2	1,10	11,02	175	-	193		2343
	V1.4.13.1.3_3	1,07	10,72	175	-	201		2310

Im Bild 57 sind die Kraft-Dehnungsverläufe der Zugversuche dargestellt. Die hohen Dehnungswerte bei der Verbindung 22MnB5-DC04+ZE sind auf die Eigenschaften des DC04 zurückzuführen.

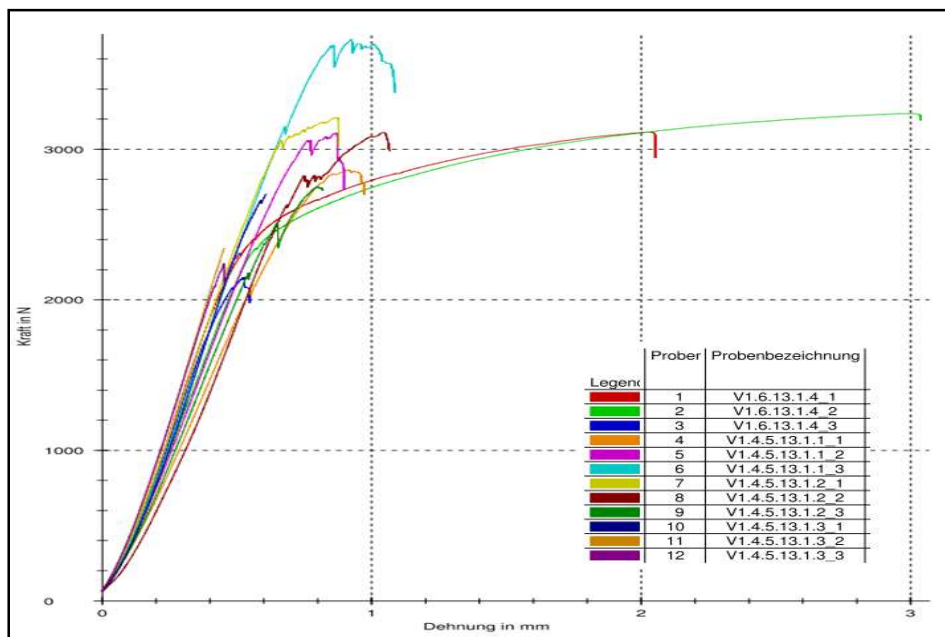


Bild 57: Kraft- Dehnungsverlauf Verbindungen 22MnB5-AZ31/DX53+Z/DC04+ZE [RUB]

Der Bruch der Verbindungen ist in Bild 58 dargestellt. Das Versagen tritt, bis auf die Verbindungen zum DX53+Z, immer in der Diffusionszone zum 22MnB5 auf. Bei der

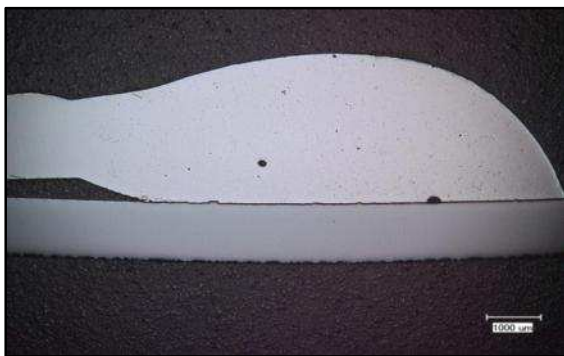


Verbindung 22MnB5-DX53+Z tritt der Bruch in der Diffusionszone zum DX-Blech auf (Bild 58 oben).



*Bild 58: Verbindungsversagensorte (oben 22MnB5- DX53+Z; unten 22MnB5- AZ31)*

Die folgenden Bilder 59 bis 62 verdeutlichen die Makroschliffe der Verbindungen mit den Diffusionszonen (Quelle: RUB).



*Bild 59: Schliff: AZ31 auf 22MnB5, SZ:AZ61 (lasergereinigt).*



*Bild 60: Schliff: AZ31 auf 22MnB5, SZ:AZ61 (gestrahlt)*



*Bild 61: Schliff DC04+ZE auf 22MnB5, SZ: AZ61*



*Bild 62: Schliff DX53+Z auf 22MnB5, SZ: AZ61*

Es ist keine Differenz zwischen der Vorreinigung mittels Laser und dem Strahlen zu registrieren. Dies ist vermutlich mit der Reinigungswirkung des LB zu erklären.



Die Parameter aus Tabelle 11 wurden auch für die Herstellung der Korrosionsproben eingesetzt. Die Oberflächenvorbereitung der 22MnB5-Blech war dabei analog zu AP4. Die Proben wiesen schon nach 3 Wochen deutliche Spuren von Korrosion auf, Bild 63.



Bild 63: AZ31-Steppnaht mit KTL nach 3 Wochen

Nach 6 Wochen sind die Proben sehr stark korrodiert (Bild 64). Der Versuch wurde abgebrochen. Die Verbindungen hatten sich aufgelöst.



Bild 64: AZ61-Steppnaht mit KTL nach 6 Wochen

#### II.1.2.7 AP7 Sysweld-Berechnungen

Die für die Simulation notwendigen Werkstoffkennwerte wurden vom Projektpartner RUB bestimmt und in die Datenbank von Sysweld integriert. Für die Darstellung des Wärmeeintrages in der Schmelzzone wird das Wärmequellenmodell nach GOLDAK [1] verwendet. Dieses Modell wird räumlich durch ein Doppelellipsoid definiert, wie in Bild 65 dargestellt. Die Doppelellipsoidgeometrie bietet sich für eine einfache Änderung der Größe und Ausdehnung der Wärmequelle an. Dadurch kann sowohl ein flacherer als auch ein tieferer Einbrand des Schweißgutes simuliert werden.

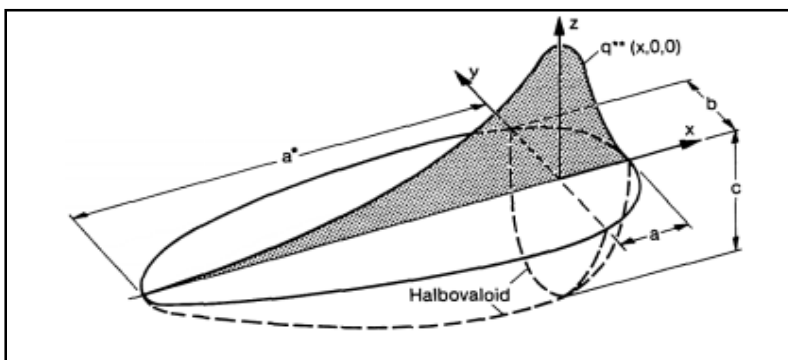


Bild 65: wandernde Ovaloidquelle mit Normalverteilung der volumenbezogene Wärmequellendichte  $q^{**}$  [2]

Die sich bei Variation der Schweißparameter ergebenden geometrischen Veränderungen der Naht sind mit den Berechnungsergebnissen anzugleichen. Ist eine Übereinstimmung erkannt, sind die berechneten Temperaturfelder akzeptabel



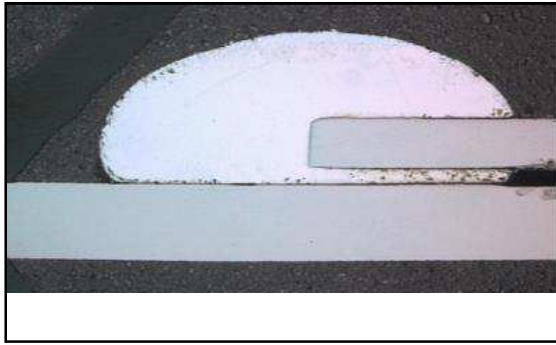


Bild 66: Schliffbild

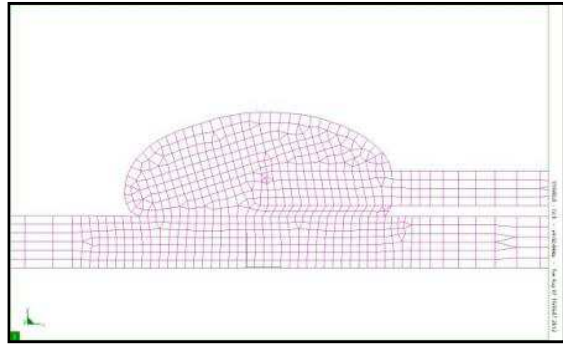


Bild 67: vernetztes Nahtmodell

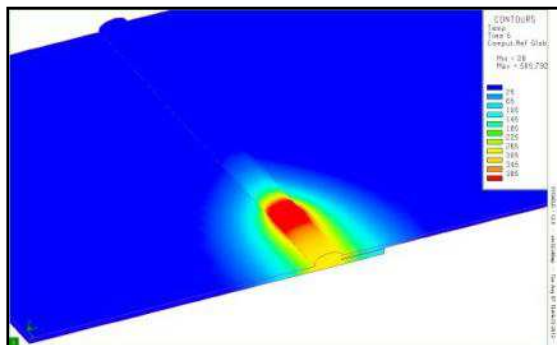


Bild 68: Temperaturverteilung Lötung ZnAl4 auf 22MnB5 – DC04

Projektbezogen erfolgten Simulationen für sämtliche Verbindungen. In den Bildern 68 bis 70 sind beispielhaft Ergebnisse der Simulationen für die Verbindungen 22MnB5-DC04 sowie 22MnB5-AZ31 dargestellt.

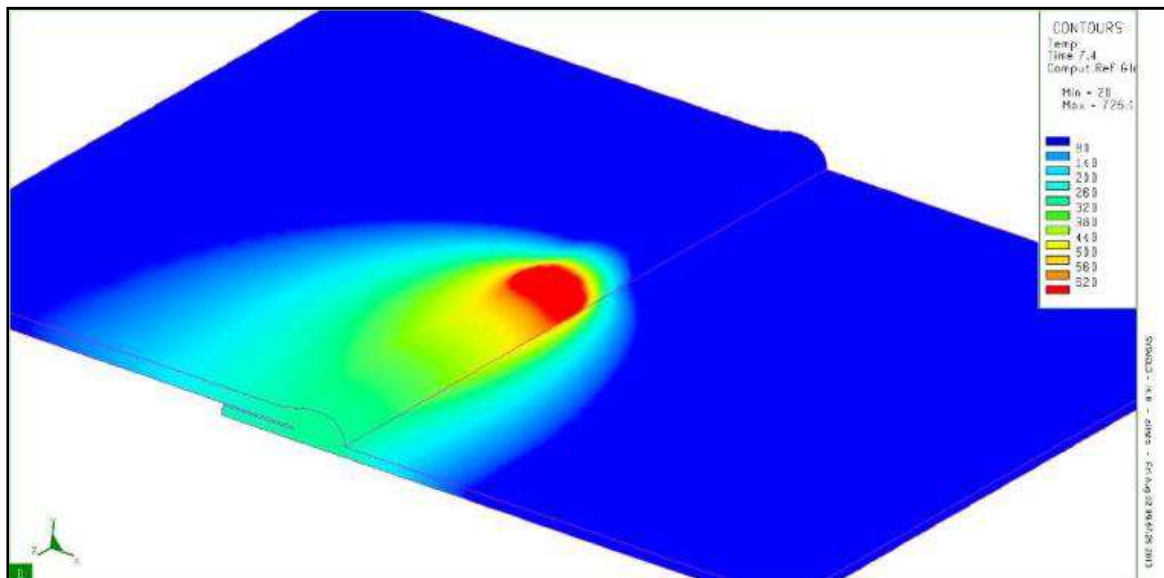


Bild 69: Simulation der Temperaturverteilung, Lötung AZ31 auf 22MnB5 mit SZ: AZ61



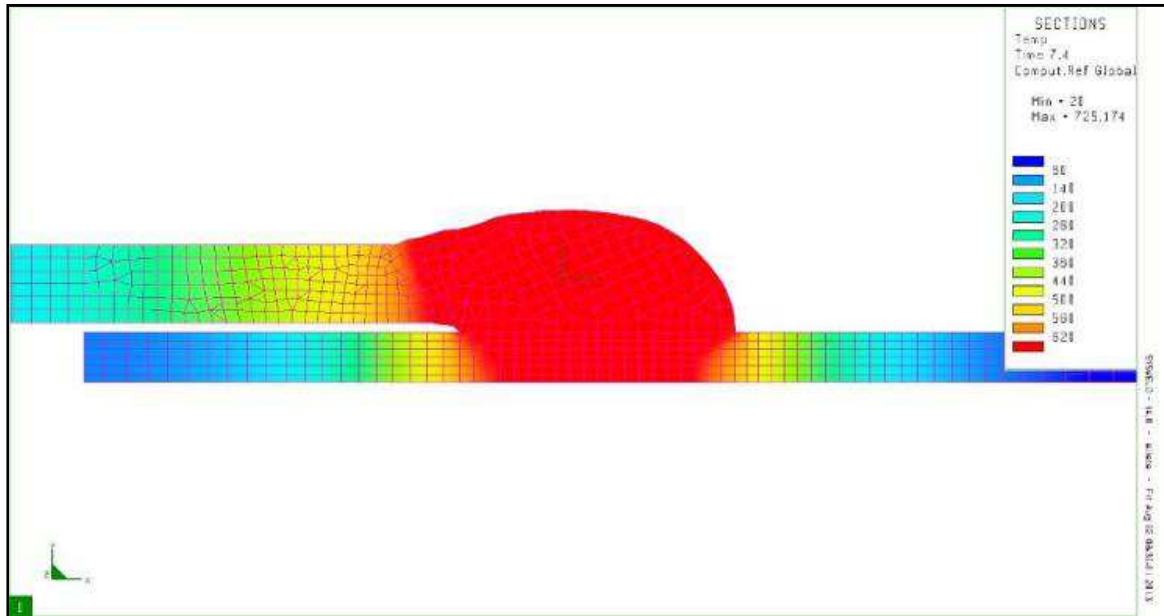


Bild 70: Querschnitt Simulation der Temperaturverteilung, Lötung AZ31 auf 22MnB5 mit SZ: AZ61

Die in den Bildern 69 und 70 dargestellten Simulationsergebnisse basieren auf folgenden Schweißparametern:

GW: AZ31, b=2mm auf 22MnB5, b= 1,5 mm  
 SZ: AZ61 ø1,2 mm Charge 283-391 Elisental  
 Verfahren: MIG, Fronius CMT  
 Parameter:  $U_s \sim 16,6$  V;  $I_s \sim 123$  A  
 $V_d = 6,5$  m/min,  
 $V_s = 48$  cm/min  
 Brenner: senkrecht  
 Drahtstellung: Versatz 1-2 mm von oberer Blechkante

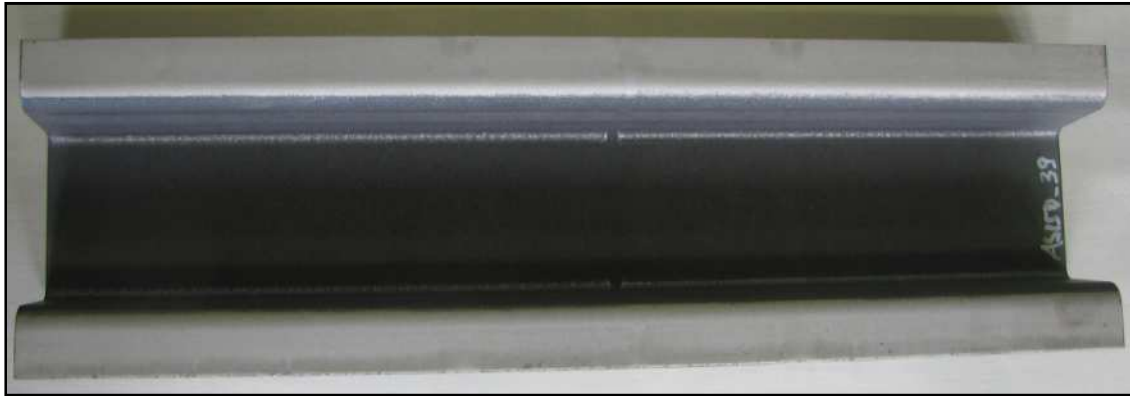
Die eingebrachte Streckenenergie wurde mit 2,4 kJ/cm ermittelt.

#### II.1.2.8 AP8 Funktionsmuster

##### (AP8.1) Funktionsmusterreinigung

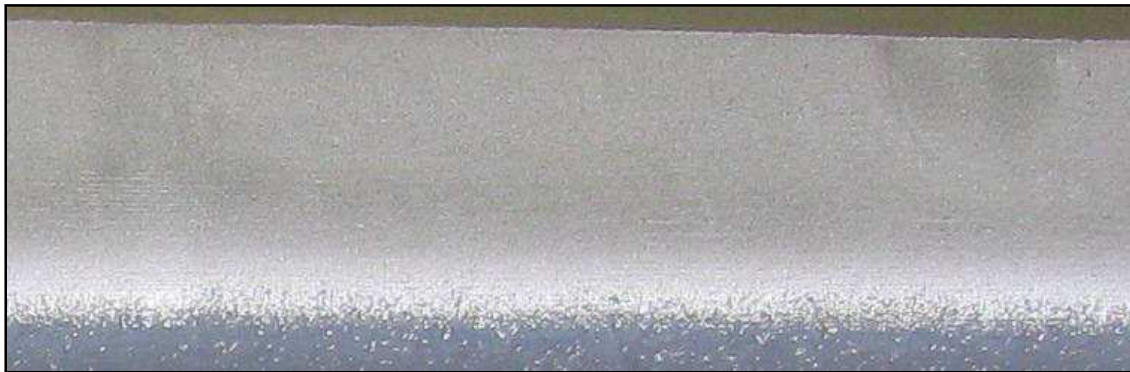
Die Parameter der Laserreinigung (AP3 Tabelle 3) wurden nun für die Reinigung des Funktionsmusters genutzt, Bild 71.





*Bild 71: mit Nd:YAG-Laser gereinigtes Funktionsmuster*

Das Funktionsmuster ist mit einer AS150-Beschichtung versehen. Der gereinigte Bereich ist hellgrau und weist nur wenige, dunkle Flecken auf, die auf Umschmelzungen oder Ungleichmäßigkeiten innerhalb der AS-Schicht schließen lassen, Bild 72. Eine Beeinträchtigung des Fügeergebnisses war nicht zu registrieren.



*Bild 72: Lasergereinigtes 22MnB5-Profil*

Somit konnte die Anwendbarkeit der ermittelten Parameter bei der Reinigung des Funktionsmusters nachgewiesen werden. Eine Verallgemeinerung der Projektergebnisse ist gegeben. Für das Fügen der Funktionsmuster wurden die erarbeiteten Parameter aus Tabelle 11 genutzt.

#### *(AP8.2) Funktionsmusterlötung*

Anstelle des Lotes AZ61 kam bei der Funktionsmusterherstellung der Zusatzwerkstoff AZ31 zum Einsatz. Der etwas höhere Schmelzpunkt dieses Zusatzwerkstoffes ist vorteilhaft. Es wurden mit diesem Lot sowohl Verbindungen zum AZ31 Grundwerkstoff (Bild 73) als auch zum DC04+ZE (Bild 74) hergestellt. Benutzt wurde ein identischer Parametersatz (Tabelle 11, AP6).



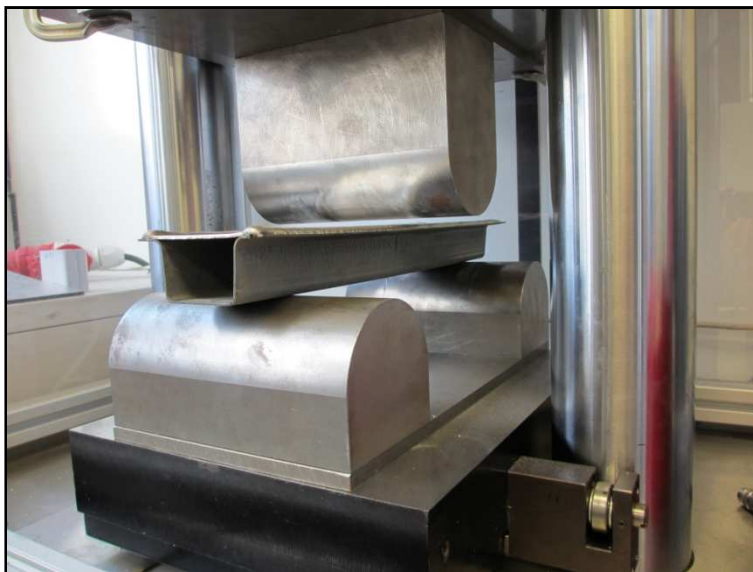


*Bild 73: Funktionsmuster AZ31 auf 22MnB5-Profil mit Lot AZ31*



*Bild 74: Funktionsmuster DC04 auf 22MnB5-Profil mit Lot AZ31*

Die Dreipunktbiegeversuche zur Beurteilung der Verbindungsfestigkeit erfolgten beim Projektpartner Waldaschaff. Der dafür genutzte Versuchsaufbau ist in Bild 75 dargestellt.



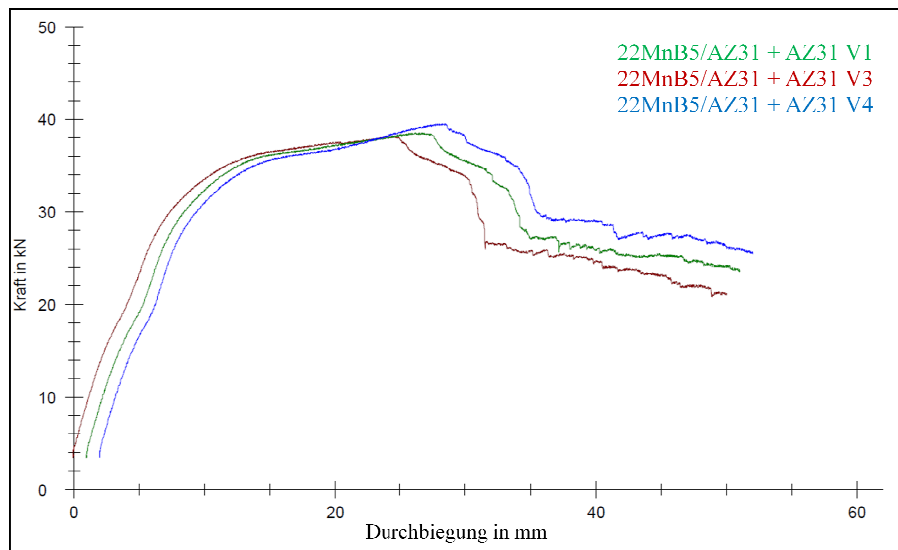
*Bild 75: Dreipunktbiegeversuchsaufbau [Waldaschaff Automotive GmbH]*

Die Versuche ergeben, dass alle Nähte die Biegebeanspruchung überstanden haben. Die Ergebnisse des Biegeversuchs sind in der Tabelle 13 zusammengefasst und die dazugehörigen Kraft-Dehnungs-Kurven sind in Bild 76 und 78 zu sehen.



*Tabelle 13: Ergebnisse des Dreipunktbiegeversuchs [Waldaschaff Automotive GmbH]*

Bezeichnung	$F_m$ [kN]	$W_{end}$ [Nm]
22MnB5/AZ31 + AZ31 V3	38,14	1441,73
22MnB5/AZ31 + AZ31 V4	38,54	1487,3
22MnB5/AZ31 + AZ31 V1	39,52	1539,39
22MnB5/DC04 + AZ31 V1	36,21	1366,49
22MnB5/DC04 + AZ31 V3	35,13	1415,59
22MnB5/DC04 + AZ31 V4	35,14	1395,92



*Bild 76: Kurven der Dreipunktbiegeversuche mit AZ31-Blechen (Tabelle 13)*



*Bild 77: 22MnB5/AZ31 + AZ31 nach der 3Punktbiegung*



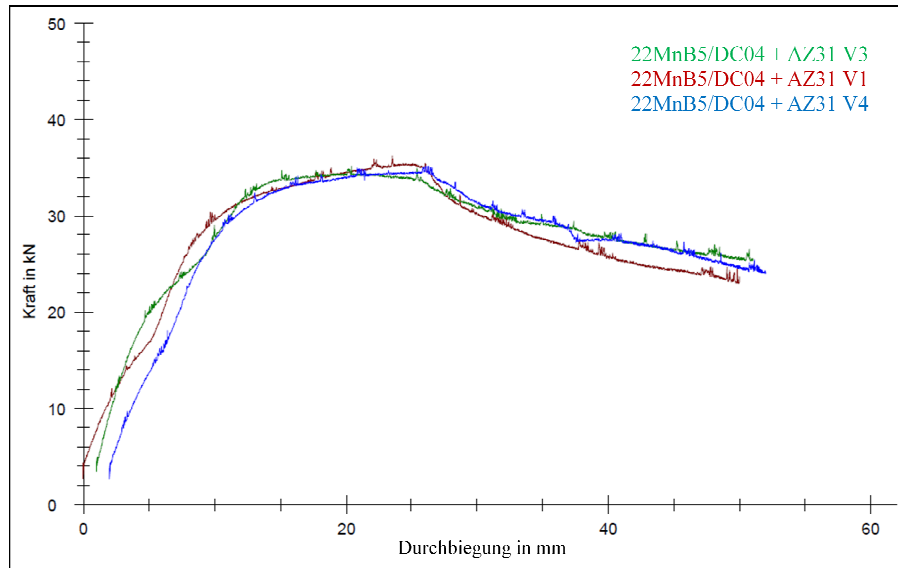


Bild 78: Kurven der Dreipunktbiegeversuche mit DC04-Blechen (Tabelle 13)



Bild 79: 22MnB5/Dc04+ZE nach der 3Punktbiegung

Die Proben wurden bis zu einer Durchbiegung von 50mm belastet. Bei einer Durchbiegung von ca. 25mm wurden die höchsten Kräfte ermittelt.

## II.2 der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Projekt waren Aufwendungen für die Nutzung des Lasers sowie die Prozessvisualisierung vorgesehen.

Es wurde im Rahmen des Projektes eine Hochgeschwindigkeitskamera der Firma Acal Bfi Germany GmbH zur Visualisierung der Gasströmungen und Beurteilung des Tropfenübergangs angeschafft.

Des Weiteren war die Anpassung der vorhandenen Lasertechnik geplant. Die Anpassung sowie technische Erweiterung der Anlage erfolgten weitestgehend wie beantragt.

Die theoretischen Betrachtungen zur Energieführung wurden mit dem Programmsystem Sysweld realisiert. Hierfür wurde im Jahr 2013 eine Jahreslizenz berücksichtigt.

Weitere Ausgaben betrafen Personal-, Sach- und Reiseaufwendungen.



### **II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die technologischen Grundlagen für die Herstellung von St-St- sowie Al-Mg-Verbindungen wurden erfolgreich entwickelt. Die erzielten Ergebnisse dokumentieren einen erheblichen Wissenszuwachs über die Herstellung der Verbindungen.

Ein zentraler Punkt bei der Herstellung von Mischverbindungen war die Beurteilung der Diffusion von Elementen (Gleichung 1). Eine Beeinflussung der Diffusionsvorgänge war demnach elementar. Einfluss auf die Diffusion konnte u.a. genommen werden, indem die Oberflächen auf die erforderlichen Eigenschaften eingestellt wurden.

Der Fertigungstechnik/Tribologie der BTU Cottbus - Senftenberg gelang es, die AS-Beschichtung des 22MnB5-Stahls reproduzierbar bis auf eine AlFe-Schicht abzutragen und somit eine zuverlässige Methode zur Oberflächenbehandlung, hinsichtlich der Erfordernisse einer Lötung, zu entwickeln. Funktionierende Parameter zur Oberflächenvorbereitung von 22MnB5+AS - Blechen wurden gefunden.

Für eine systematische Beurteilung der Verbindungsfestigkeiten der verschiedenen Lotbasis-Werkstoffe mit dem gereinigten 22MnB5 waren die in AP 4 - 6 dokumentierten Verbindungsversuche notwendig.

Um in Zukunft das Verhalten von Bauteilen während der Lötprozesse bereits im Vorfeld zu beurteilen, werden Schweißsimulationen benötigt. Die in diesem Projekt angewandte Software (Sysweld) diente dem Verringern des Versuchsaufwands und der Beobachtung nicht direkt messbarer Parameter (AP7). Mit dem Funktionsmuster (AP8) wurden die während des Projektes erzielten Ergebnisse dem Praxistest unterzogen.

Die Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften belegen, dass unter den gegebenen Randbedingungen reproduzierbare Verbindungen hergestellt werden können.

Das zeigen auch die Varianten der Fügeverbindungen des an der BTU Cottbus - Senftenberg hergestellten Funktionsmusters.

### **II.4 des voraussichtlichen Nutzens und Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplans**

Die Verwertung der Ergebnisse erfolgt in Form von Vorlesungen. Die Lehrveranstaltungen Fertigungstechnik, speziell die Fügetechnik, wird bereichert. Somit tragen Erkenntnisse dieses Projektes direkt zur praxisnahen Ausbildung von Studierenden bei. Mit den Absolventen findet das Wissen schließlich den Weg in die Wirtschaft.

Eine aktuelle Übermittlung neuer Erkenntnisse fördert stets auch das Interesse des wissenschaftlichen Nachwuchses. Die vorhandene Kompetenz auf dem Gebiet der Fügetechnik wurde mit diesem Thema erweitert. Weiterführende Arbeiten sind hoch wahrscheinlich. Die Drittmittelfähigkeit der BTU Cottbus - Senftenberg wurde gestärkt. Es ergeben sich somit Auswirkungen auf die Lehre sowie die Drittmittelforschung. Der Bekanntheitsgrad der BTU Cottbus - Senftenberg wird mit den zu erwartenden Ergebnissen steigen.

Die direkte kommerzielle Verwertung der gewonnenen Erkenntnisse liegt auf der Seite der Projektpartner aus der Industrie. Die an der BTU Cottbus-Senftenberg erzielten Ergebnisse tragen dazu bei, Prozesszeiten und Energieaufwand der Partner zu reduzieren und somit wirtschaftliche Vorteile zu erzielen.

### **II.5 des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens an anderen Stellen**



Im Verlauf des Bearbeitungszeitraums waren keine Veröffentlichungen von anderer Seite zu registrieren, die den gewonnenen Erkenntnissen zuvorkommen.

## **II.6 der erfolgten und geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse**

Die Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten wurden erstmals auf der Tagung "Multimaterialsysteme fügen - neue Herausforderungen im Leichtbau" am 26.10.2012 in Darmstadt vorgestellt.

Geplant sind weitere Veröffentlichungen. Vorgesehen ist ein Vortrag am 17.11.2014 in Dresden.



## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
<b>3. Titel</b>  <b>Schlussbericht für das BMBF-Verbundprojekt</b> <b>Hybrides Fügen von Multimaterialsystemen für Kraftfahrzeuge</b> <b>Teilprojekt der BTU Cottbus-Senftenberg</b> <b>Verbindungstechnologie Stahl-Stahl- und Stahl-Magnesium</b>		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Prof. Dr.-Ing. Ralf Winkelmann, Philipp Trommeschläger (B.Sc.),	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.03.2014	
	6. Veröffentlichungsdatum geplant	
	7. Form der Publikation Schlussbericht	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  BTU Cottbus-Senftenberg (ehemals HS-Lausitz) Fertigungstechnik / Tribologie Prof. Dr.-Ing. R. Winkelmann Großenhainer Str. 57 01968 Senftenberg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution /	
	10. Förderkennzeichen <b>03X3032H</b>	
	11. Seitenzahl 52	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 45	
	14. Tabellen 13	
	15. Abbildungen 79	
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
Die durchgeführten Untersuchungen wurden mit dem Ziel der Entwicklung neuer Fügetechnologien zur Herstellung von Karosseriekomponenten für Kraftfahrzeuge aus verschiedenen Werkstoffen durch den Einsatz von thermischer Energie in Form von Laserstrahlung, elektrischer Energie und magnetischer Induktion realisiert. Als zentrale Materialkomponente wurde der pressgehärtete 22MnB5 definiert. Dieser Werkstoff war mit Stählen der Qualität DC04 und mit Magnesiumblechen der Qualität AZ31 zu verbinden. Es galt die mechanischen Eigenschaften des 22MnB5 weitestgehend zu erhalten, so dass eine Begrenzung der thermischen Energie während des Fügeprozesses vorgegeben war. Die Einhaltung gelingt durch die Berücksichtigung niedrig schmelzender Zusatzwerkstoffe und einer geeigneten Energieführung bei der Verbindungsherstellung. Zusatzwerkstoffe auf der Basis von Zn und Al wurden getestet. Sie sind für die Herstellung von Verbindungen für die untersuchten Materialkombinationen sehr gut geeignet. Um die Energiekonzentration anzupassen, wurde die Laser- bzw Lichtbogenwirkung partiell durch eine induktive Erwärmung unterstützt. Hiermit gelingt es, die gewünschte Benetzung des Zusatzwerkstoffes zu verbessern. Von großer Bedeutung für die physikalischen Eigenschaften der Verbindung ist die Vorbehandlung der Verbindungsstelle. Hierfür sind geeignete Verfahren und Parameter ermittelt. Die Auswertung von Messungen der Energieverteilung sowie metallografische Untersuchungen helfen, das Prozessverständnis zu vertiefen.		
19. Schlagwörter Multimaterialsystem, Diffusion, Abtrag, Phase, Reinigung, Festigkeit, Korrosion		
20. Verlag	21. Preis	



## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
<b>3. Titel</b>  <b>Schlussbericht für das BMBF-Verbundprojekt</b> <b>Hybrides Fügen von Multimaterialsystemen für Kraftfahrzeuge</b> <b>Teilprojekt der BTU Cottbus-Senftenberg</b> <b>Verbindungstechnologie Stahl-Stahl- und Stahl-Magnesium</b>		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Prof. Dr.-Ing. Ralf Winkelmann, Philipp Trommeschläger (B.Sc.),	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.03.2014	
	6. Veröffentlichungsdatum geplant	
	7. Form der Publikation Schlussbericht	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  BTU Cottbus-Senftenberg (ehemals HS-Lausitz) Fertigungstechnik / Tribologie Prof. Dr.-Ing. R. Winkelmann Großenhainer Str. 57 01968 Senftenberg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution /	
	10. Förderkennzeichen <b>03X3032H</b>	
	11. Seitenzahl 52	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 45	
	14. Tabellen 13	
	15. Abbildungen 79	
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
<p>The investigations were conducted with the aim of developing new joining technologies for the manufacture of body components of motor vehicles with various materials through the use of thermal energy in the form of laser radiation, electrical energy and magnetic induction. Press-hardened 22MnB5 is defined as a core material component. This material was used to join it with steel (DC04) and magnesium (AZ31) sheets. The thermal energy given during the joining process was limited so as to keep the mechanical properties of 22MnB5 unchanged. Compliance is achieved by the inclusion of low-melting filler metals and a suitable energy supply when joining. Filler materials based on Zn and Al were tested. They are very well suited in the preparation of joints for the combinations of materials analyzed. The laser and arc effect had been partially supported by inductive heating to adjust the energy concentration. Thereby it was possible to improve the desired wetting of the filler material. The pre-treatment of the surface is of great importance for the physical properties of the solder joint. Methods and parameters suitable for this are determined. The evaluation of energy distribution measurements and metallographic analysis helped to deepen the understanding of the process.</p>		
19. Schlagwörter Multimaterialsystem, Diffusion, Abtrag, Phase, Reinigung, Festigkeit, Korrosion		
20. Verlag	21. Preis	