Steremat Induktion GmbH

Hybrides Fügen Schlussbericht technischer Teil

Förderkennzeichen 03X3032I

Veit Trautmann
15.07.2014
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

Hybrides Fügen
Förderkennzeichen 03X3032I
Schlussbericht Technischer Teil

I. Kurze Darstellung zu

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 Fügetechnologie zur Herstellung von Karosseriekomponenten für Kraftfahrzeuge aus verschiedenen Werkstoffen durch den Einsatz von thermischer Energie in Form von Laserstrahlung und elektromagnetischer Induktion.

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. Hier müssen hochfeste, bisher nur bedingt schweißbare Stähle mit Festigkeiten bis zu Rm=1900N/mm² mit konventionellen Stählen und Leichtmetallen (z.B. DX 53; AA 6016; AZ91) gefügt werden. Bild 1 zeigt die für die genannten Fügeaufgaben beispielhaften Blechverbindungen in prinzipieller Darstellung.

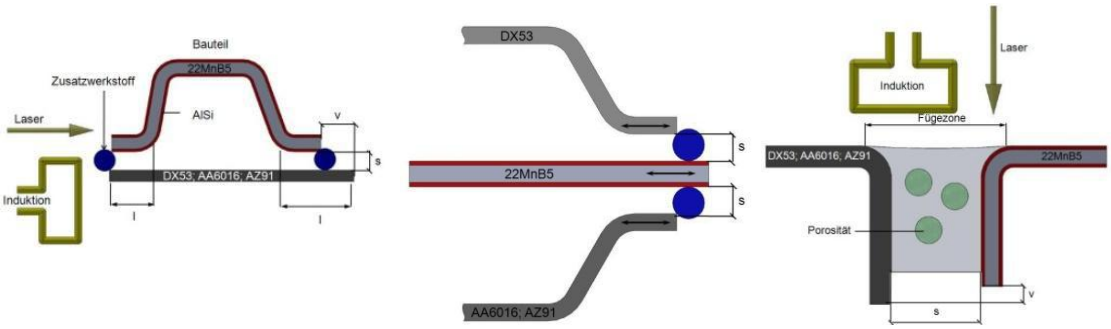


Bild 1: Fügen von Multimaterialsystemen
a) 2-Blechverbindung aus Stahl und Leichtmetall für B-Säule oder Bumper
b) 3-Blechverbindung aus Stahl und Leichtmetall für den Türeinstieg
c) Stahl-Leichtmetallverbindung von Dach- und Seitenteil mit poröser Verbindung

Wird dieses industrielle Ziel der Automobilindustrie auf die Forschung herunter gebrochen, so geht es hier um die Schaffung von Verbindungszonen mit gradiertem Eigenschaftsübergang zwischen den unterschiedlichen Fügepartnern durch gezielte Nutzung der Legierungselemente der Verbindungspartner im Bulk und in einer etwaigen Beschichtung. Zusätzlich sollen niedrig schmelzende und zugleich ausreichend feste Zusatzwerkstoffe auf Al-, Mg-, Zn-, oder Sn-Basis entwickelt werden. Als Energiequelle wird dabei auf Laserstrahlung und fallweise auf ergänzende Induktionserwärmung zurückgegriffen.
Die im Labormaßstab entwickelten gradierten Verbindungszonen sollen in einem aus neuesten Karosserie-Werkstoffen erzeugten und berechneten Funktionsmuster derart zusammenfassend dargestellt werden, dass eine zeitnahe Übertragung der Ergebnisse in Multimaterialsysteme der Verkehrstechnik real ist und einer schnellen Verwertung zugeführt werden kann. Die Werkstoff (Grund-, Zusatzwerkstoff-) und Technologieentwicklung, die Temperaturfeld- und Spannungsberechnung, die konstruktiven Betrachtungen zur Verbindungsgeometrie sowie die

schlussendlich bekannten Eigenschaften der Verbindungszone sind Elemente des Systems zur Herstellung gradierter Verbindungen für Multimaterialsysteme.
Steremat beschäftigt sich mit der Entwicklung und Anpassung einer Induktionsquelle für die Herstellung von Verbindungen an Multimaterialsystemen. Ziel ist es, die Voraussetzungen dafür zu schaffen, die Energiequellen Laser und Lichtbogen mit der induktiven Erwärmung zu koppeln, um die im Projektansatz definierte Geometrie fügen zu können.
Dieser Projektteil umfasst die Maschinentechnik sowie die Energieerzeugung. Hierzu ist es notwendig, geeignete Geräte zu definieren und hinsichtlich ihrer Eignung zu prüfen. Der Energieführung kommt besondere Bedeutung zu. Es ist vorgesehen, den Zusatzwerkstoff über die Liquidustemperatur zu erhitzen. Dies erfordert eine auf die Drahtmenge abgestimmte Energiebereitstellung. Wesentlich ist die Abstimmung zwischen dem außen und innen liegenden Schwingkreis. Hierfür sind Anpassungen unter Beachtung der von den Projektpartnern entwickelten Zusatzwerkstoffe zwingend. Die Trennung zwischen Maschine und Schwingkreis wird zu einer deutlichen Reduzierung der ansonsten beachtenswerten Energieverluste führen. Dem entgegen könnten jedoch die Geometrievorstellungen bei der Verbindungsherstellung selbst stehen. Somit sollen die Betrachtungen in beide Richtungen geführt werden.
Bei den HF-Anlagen wird Steremat die Pulspaketsteuerung nutzen. Die Leistungsregelung soll durch die Beeinflussung der Zeit zwischen den Pulspaketen vorgenommen werden. Hierfür sind geeignete Messsysteme zu entwickeln und in die Regelung einzubinden. Weitere Eingangsgrößen sind die Drahtvorschubgeschwindigkeit, der Drahtdurchmesser und die chemische Konfiguration des Drahtes. Wesentlich ist auch der Koppelabstand.
Durchzuführende Versuche sollen helfen, die Regelung für die spätere Anwendung derart zu vereinfachen, dass mit wenigen Eingaben ein reproduzierbarer Prozess gewährleistet wird. Ein wichtiger Parameter für die Erwärmung ist die Frequenz. Diese wiederum wird entscheidend von der Induktivität und somit von der Geometrie des Induktors beeinflusst. Ein Schwerpunkt der Arbeit wird somit die Entwicklung einer geeigneten Induktorgeometrie sein. Neben der Drahtaufschmelzung ist eine energetische Unterstützung der Laser- bzw. Lichtbogenwirkung vorgesehen. Das Ziel besteht darin, die Ausbreitung des Lotes zu beeinflussen. Es sind zur Lösung des Problems zwei Schritte vorgesehen:

1. separate Führung und Wirkung von zwei Induktoren und
2. die Kombination der beiden Induktoren in einem System. Dieses Ziel muss während der Themenbearbeitung mit den Projektpartnern präzisiert werden. Schlussendlich sollen Ergebnisse vorliegen, die eine Integration Laser-Induktor bzw. Lichtbogen-Induktor gestatten.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Personalbedarf

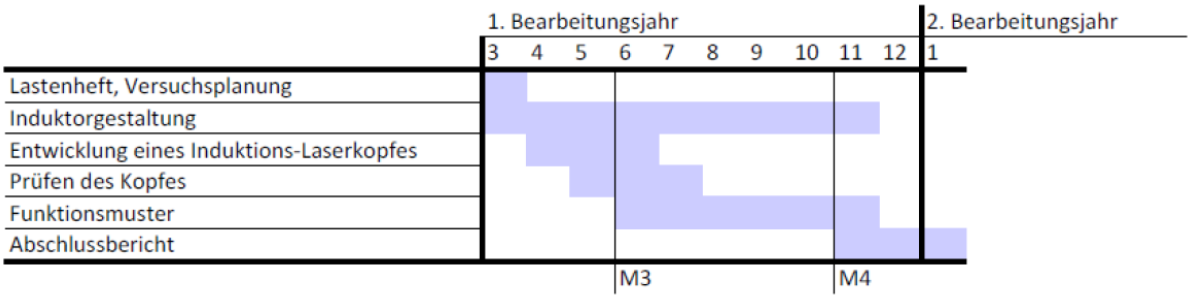
An diesem Thema arbeiteten bei Steremat die Abteilungen Technik, Montage und Induktorbau.
Der Induktorbau übernimmt die Fertigung der Induktoren und unterstützt die Versuche. Der Bereich Technik betreut die Prozessentwicklung sowie die Entwicklung des Funktionsmusters.

Materialbedarf

Zur Fertigung der Induktoren wurden Einzelteile wie Cu-Material, Anschlussbacken, Isolierkomponenten und Wasserverteilungen benötigt. Die Modifikation und Anpassung der Leistungseinheit an den Schwingkreis erforderte elektronische Bauteile nach den Ergebnissen der Voruntersuchungen.
Die notwendigen Komponenten für ein Funktionsmuster wurden entsprechend der Konstruktion auf Basis der Entwicklung eingesetzt.
Eine Leistungseinheit wird teilweise für das Projekt genutzt und zeitweise dem BIAS zur Durchführung der Versuche in Bremen zur Verfügung gestellt.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde in einzelne Arbeitspakete aufgeteilt. Zur Projektkontrolle wurden Meilensteine definiert.



Arbeitspaket 1: Lastenheft, Versuchsplanung
Die einzelnen Arbeitsschritte werden im Lastenheft fixiert und zeitlich mit den Projektpartnern abgestimmt.
Das Arbeitspaket wurde entsprechend der Planung abgeschlossen.

Arbeitspaket 2: Induktorgestaltung
Der Induktorgestaltung kommt eine große Bedeutung für den Erfolg des Projektes zu. Er wurde nach Erfahrungen der Versuche entsprechend der räumlichen Gegebenheiten des Funktionsmusters modifiziert und erfolgreich getestet. Das Arbeitspaket wurde entsprechend der Planung abgeschlossen.

Arbeitspaket 3: Entwicklung eines Induktions-Laserkopfes
Es ist eine Einheit zu konstruieren, die nach Analyse des Projektpartners BIAS an handelsübliche Laserköpfe adaptiert wird. Der Prototyp ist zu testen. Wesentlich hierbei ist die Kühlung des Kopfes. Das Arbeitspaket wurde von Steremat Induktion im aktuellen Projektzeitraum bearbeitet und abgeschlossen.

Arbeitspaket 4: Prüfung des Kopfes
Die Testung des Versuchsmusters erfolgt gemeinsam mit dem Projektpartnern BIAS und TU Cottbus. Das Arbeitspaket wurde von Steremat Induktion im aktuellen Projektzeitraum bearbeitet und abgeschlossen.

Arbeitspaket 5: Funktionsmuster
Das Zusammenwirken zwischen Drahtvorschub bei definierter Drahtqualität, der Laserenergieführung und der Schweißgeschwindigkeit sind zu prüfen und dem Anwender einfach einstellbar zu gestalten. Hierfür müssen die gewonnenen Zusammenhänge in der Maschinensteuerung hinterlegt werden. Der Prozess soll somit nach Programmaufruf automatisch zum gewünschten Verbindungsergebnis führen. Das Arbeitspaket wurde von Steremat Induktion im aktuellen Projektzeitraum bearbeitet und abgeschlossen

Arbeitspaket 6: Abschlussbericht
Die Projektergebnisse werden in einem Abschlussbericht zusammengefasst.
Der Abschlussbericht für den von Steremat Induktion bearbeiteten Projektumfang ist mit diesem Bericht erstellt.

Festlegung von Meilensteinen und deren Realisierung

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

Meilenstein 3: 30.06.2013
Die Konstruktion des Induktions-Laserkopf existiert und ist mit den Partnern abgestimmt. Erste Prototypen können für die Herstellung von Verbindungen von Multimaterialsystemen eingesetzt werden.

Der Meilenstein wurde entsprechend Planung realisiert.
.

Meilenstein 4: 30.11.2013
Die Arbeiten befinden sich in der abschließenden Phase. Ein Funktionsmuster wird hergestellt und getestet. Es liegen ausreichende Informationen vor, um das Projekt abschließen zu können.

Der Meilenstein wurde entsprechend Planung realisiert.

4. wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde

Die Kombination Laser- bzw. Lichtbogen-Induktion ist bekannt. Sie wurde in mehreren Veröffentlichungen mit unterschiedlichen Zielstellungen vorgestellt. Neuere Arbeiten zur Herstellung von Verbindungen an höher festen Feinkornstählen sind fokussiert auf die Wärmevor- bzw. -nachbehandlung. Es sollen unzulässige Veränderungen, meist in der Wärmeeinflusszone, vermieden werden. Keine der bekannten Veröffentlichungen beschäftigt sich jedoch mit dem Projektansatz, eine Verflüssigung des Zusatzwerkstoffes durch induktive Erwärmung vorzunehmen. Der 2. Im Projekt fixierte Gedanke, die Benetzung des Grundwerkstoffes durch den Zusatzwerkstoff zu beeinflussen konnte durch eigene Vorversuche bereits als sinnvoll bestätigt werden. Hierfür wurde u. A. der auf Bild 1 dargestellte Versuchsaufbau benutzt. Die positiven Effekte der Kopplung von Induktor und Lichtbogen mit dem Ziel den Spalt zwischen den zu verbinden Werkstoffe als Verbindungszone zu nutzen, konnten bei Zn beschichteten Stahlblechen sehr gut nachgewiesen werden. Auch bei Verbindungen die als Bördelnähte (Bild 2) ausgeführt waren, konnten die Festigkeiten des Grundwerkstoffes, also ca. 350 N/mm², eingestellt werden. Diese Untersuchungen führten zu einem weiteren, gern angenommenen Effekt. Wie Bild 3 verdeutlicht konnte eine konkave Nahtausbildung eingestellt werden. Diese entspricht höchsten ästhetischen Anforderungen. Als Zusatzwerkstoffe kamen bei diesen Vorversuchen konventionelle Zn-Basis-Werkstoffe des Projektpartners Grillo zur Anwendung. Die hervorragende Benetzung wird durch Bild 4 verdeutlicht. Auch genauere Untersuchungen der Unterseite des in Lichtbogenwirkung oberen Bleches verdeutlichen die wesentliche Verbesserung der Anbindung infolge der Induktorwirkung.

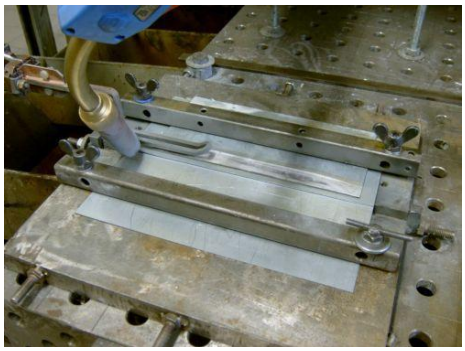


Bild 1: Induktiv unterstütztes Fügen

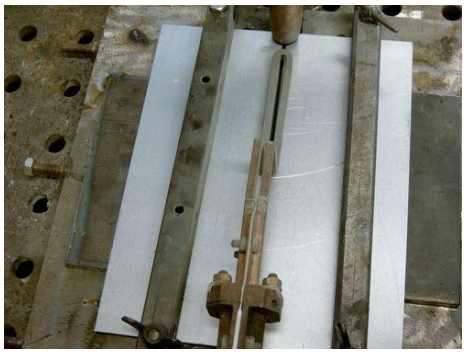


Bild 2: Bördelnaht

Wesentlich für die Ausbreitung der Zusatzwerkstoffe sind neben deren eigentlichen chemischen Konfiguration die Überhitzung der Schmelze und die Oberfläche des zu benetzenden Grundwerkstoffes. Vorteilhaft an der Grundwerkstoffseite ist die Existenz einer Zn-Beschichtung. Auf mögliche Oxidbildungen muss geachtet werden. Für Steremat ist es entscheidend, die geeigneten

Einkoppelbedingungen zu schaffen und die notwendige Temperatur an der richtigen Stelle zum exakten Zeitpunkt zur Verfügung zu stellen.

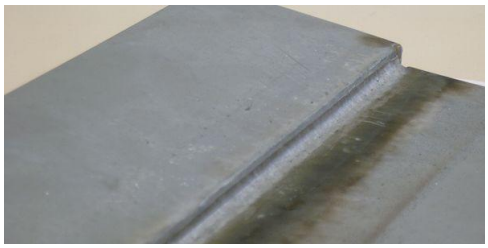


Bild 3: Nahtoberfläche

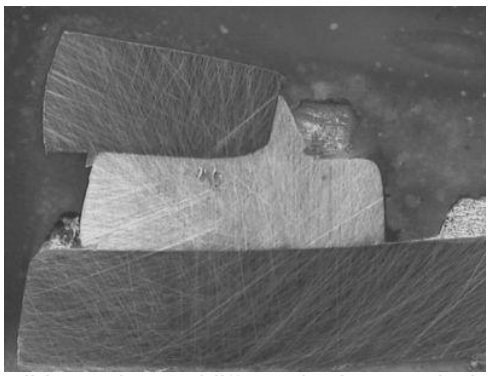


Bild 4: Schrägschliff; Ausbreitung zwischen den zu verbindenden Blechen

Um die Wirkung des Induktors beurteilen zu können, bieten sich theoretische Vorbetrachtungen an. Die zeitliche Änderung des Stromflusses dD/dt bewirkt ebenso wie ein Stromfluss j entsprechend der 1. Maxwellschen Gleichung (1) eine magnetische Erregung H.

rot H = j + dD/dt (1)

Die magnetische Flussdichte B ist proportional der Stärke des Magnetfeldes H.
B= μ H (2)Ebenso ist die elektrische Flussdichte D proportional der elektrischen Feldstärke E.

D=e E (3)

Die zeitliche Änderung des magnetischen Feldes bedeutet den Aufbau eines elektrischen Feldes (2. Maxwellgleichung).

rot E = - dB/dt (4)

Das infolge des Stromflusses im Induktor erzeugte elektromagnetische Feld führt entsprechend der 1. Maxwellgleichung zu einem Stromfluss in dem zu erwärmende Werkstoff (elektrische Leitfähigkeit vorausgesetzt). Im Inneren des Bauteils entsteht ebenfalls ein Magnetfeld. Die zeitliche Veränderung dieses Magnetfeldes führt zu Wirbelströmen, die ringförmig die magnetischen Feldlinien umschließen (2. Maxwellgleichung). Es kommt zu einer Überlagerung der Wirbelströme mit dem Primärstrom. Infolge der entgegen gerichteten Ströme zum Inneren hin erfolgt eine Löschung, während sie zum Rand hin verstärkt werden.
Die Verlagerung des elektrischen Feldes zum Rand ist stark von der Frequenz (f) des Stromes abhängig.
Permeabilität und Frequenz beeinflussen die Eindringtiefe. Je höher die Frequenz ist umso geringer ist die Eindringtiefe. Die Frequenz wiederum wird wesentlich von der Geometrie des Induktors bestimmt. Dies betrifft auch den Wirkungsgrad.
Es existieren somit eine Reihe konstruktiver Freiheiten, die während der Projektbearbeitung angepasst werden müssen.
Auch zu Kopplung zwischen Messtechnik und Pulspaketsteuerung sind Vorbetrachtungen vorhanden. Eine bedeutende Herausforderung ist dabei die Messung der Temperatur selbst mittels Pyrometer.

5.Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde in Zusammenarbeit mit den nachstehend genannten Forschungsinstitutionen

a) Ruhr-Universität Bochum (LWT), Universitätsstraße 150, 44780 Bochum

b) BTU Cottbus-Senftenberg, Großenhainer Straße 57, 01968 Senftenberg

sowie

c) BIAS – Bremer Institut für angewandte Strahltechnik GmbH,
Klagenfurter Straße 2, 28359 Bremen (als Auftragnehmer)

und den Industrieunternehmen

d) Drahtwerk Elisental W. Erdmann GmbH & Co, Werdohler Straße 40, 58809 Neuenrade

e) VW AG Wolfsburg, 38436 Wolfsburg

f) ThyssenKrupp Steel AG, Kaiser-Wilhelm-Straße 100, 47166 Duisburg

g) Waldaschaff Automotive GmbH, Fabrikstraße 6, 63857 Waldaschaff

h) Steremat Elektrowärme GmbH Bouchéstraße 12, 12435 Berlin

i) Grillo Werke AG, Weseler Straße 1, 47169 Duisburg

bearbeitet.

II. Darstellung der Projektergebnisse

Zur besseren Übersicht des Forschungsprojektes Hybrides Fügen werden die Ergebnisse des Projektes 03X3032C der Steremat Elektrowärme GmbH mit aufgeführt. Im Rahmen des Projektes 03X3032C wurden die Voruntersuchengen durchgeführt.

Vorversuche

Entsprechend der Bauteilgeometrie wurden Versuche mit Energiequellen im Mittelfrequenzbereich (ca. 25 kHz) und Hochfrequenzbereich (ca. 250 kHz) durchgeführt. Wie erwartet erwies sich die Erwärmung mittels Hochfrequenz als bessere Lösung.

Als Probengröße wurden Dimensionen von 100 x 50 mm für die Werkstoffe 22MnB5xx, DX53 (54) und AZ31 definiert

Als Lot wurden folgende Typen betrachtet:
AlSi3Mn Ø1,0; ALsi3Mn Ø1,2
ZnAl15 Ø1,2; ZnAl15 Ø1,0; ZnAL15 Ø0,8
ZnAl2 Ø1,2; ZnAl2 Ø1,0; ZnAl2 Ø0,8
ZnAl4 Ø1,2; ZnAl4 Ø1,0; ZnAl4 Ø0,8

Entsprechend des Arbeitspaketes drei wurden erste Vorbetrachtungen hinsichtlich der Induktorgestaltung getroffen. Dabei wurden folgende Gesichtspunkten betrachtet:

- hoher Wirkungsgrad
- punktgenaues Erwärmen der gewünschten Zonen
- möglichst kleine Geometrie zur Einbindung in den Laserschweißprozess
- durch die Variation des Induktorkopfes mögliche Reserven für den Leistungseintrag in das Werkstück

Nach empirischen Versuchen wurde die Geometrie des Induktors festgelegt und mit den Projektpartnern abgestimmt.

Für Erste Versuche wurde ein Induktor mit folgender Geometrie entwickelt.

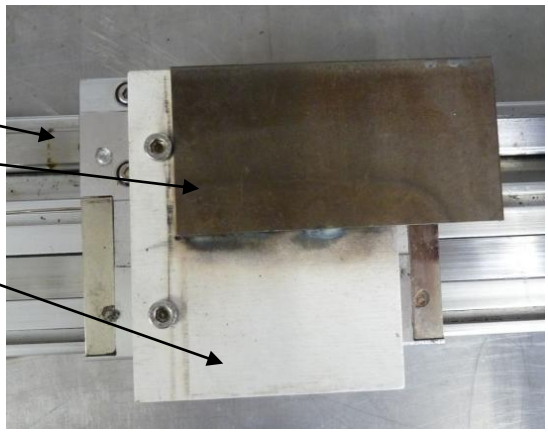
- Kopfabmaße L = 27 mm; B = 11 mm
- Gesamtlänge Induktor = 71 mm
- Abmaße Feldführung L = 17 mm; H = 15 mm
- Induktivität = 0,05 µH

Versuchseinrichtung

Führungsschlitten

GP 15

Thermische Isolierung



Weiterhin wurde in Zusammenarbeit mit dem BIAS die Wirkung der elektromagnetischen Felder auf umliegende Bauteile gemessen und für nicht kritisch beurteilt.

Im Versuchsaufbau verwendete Ressourcen:

Energiequelle 10 kW HF-Generator mit einer Arbeitsfrequenz von ca. 280 kHz

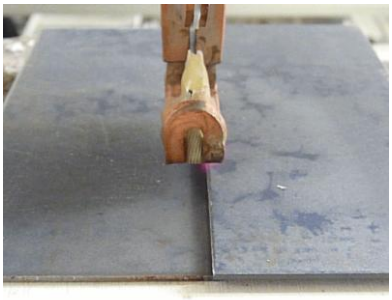
Versuchsvorrichtung Pyrometer Typ Optris PT 50

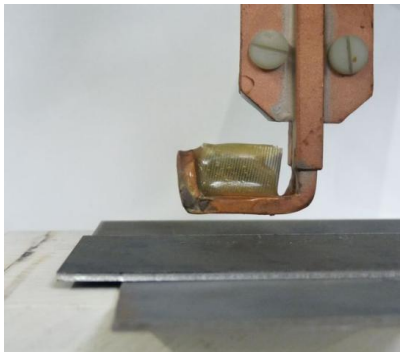
Messabstand ca. 750 mm
Winkel ca. 40°
Emissionsgrad = 75 %
Messunsicherkeit = 4 K
Messbereich 250 – 2000°C

Die Versuche wurden Flussmittelfrei realisiert.

Versuchsanordnung Standerwärmung

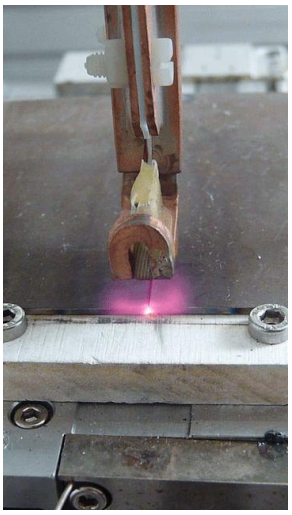
- Koppelabstand = 5 mm
- Ist-Leistung 5 kW
- Zeit = 6 s
-





Versuchsanordnung Vorschuberwärmung

- Koppelabstand = 5 mm
- Ist-Leistung 8 kW
- Vorschub ca. 250 mm/min
- Temp. ca. 700 °C



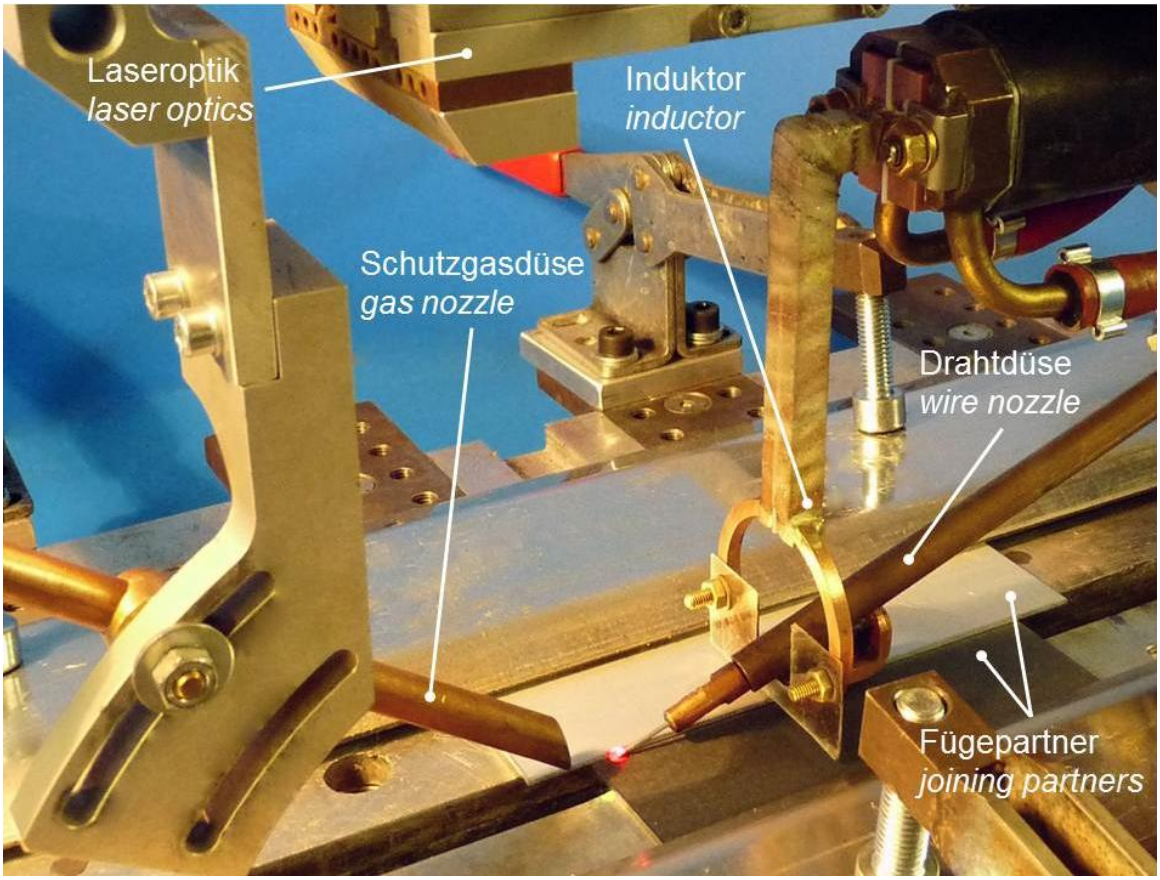
Zur weiteren Versuchsdurchführung mittels Laserkopf wurde dem BIAS Anlagentechnik zur Verfügung gestellt.

Außerhalb der geplanten Arbeitspakete wurden Benetzungsversuche mit den aufgelisteten Werkstoffen und Zusatzstoffen untersucht. Dabei konnten, unabhängig von der Vorbehandlung, mittels induktiver Erwärmung keine Erfolge bei folgender Versuchsmatrix erzielt werden.

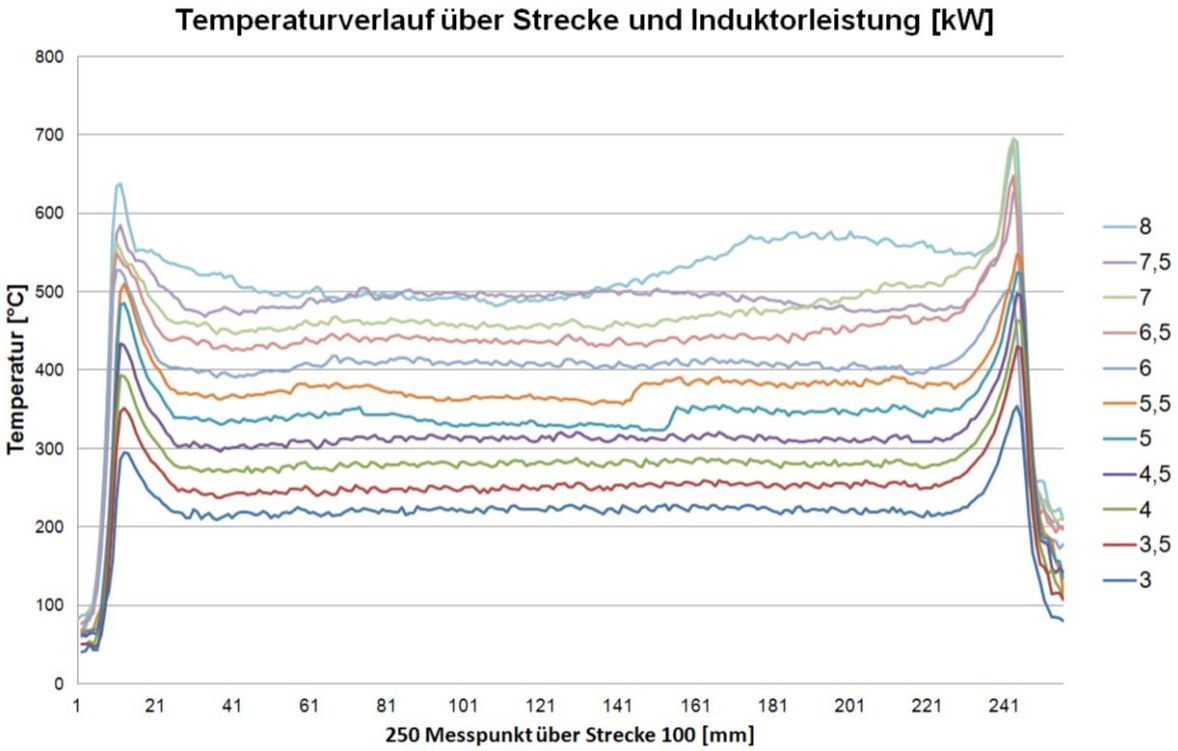
Zusatzwerk.	**Material**	**AS 80** Teil 38	**AS 150** Teil 39	**GP 15** k.A.	
AlSi3Mn	Ø1,0	Keine Benetzung			unbehandelt chem. gereinigt mech. gereinigt
ZnAL2	Ø1,0				unbehandelt chem. gereinigt mech. gereinigt
ZnAL4	Ø1,0				unbehandelt chem. gereinigt mech. gereinigt
ZnAL15	Ø1,0				unbehandelt chem. gereinigt mech. gereinigt

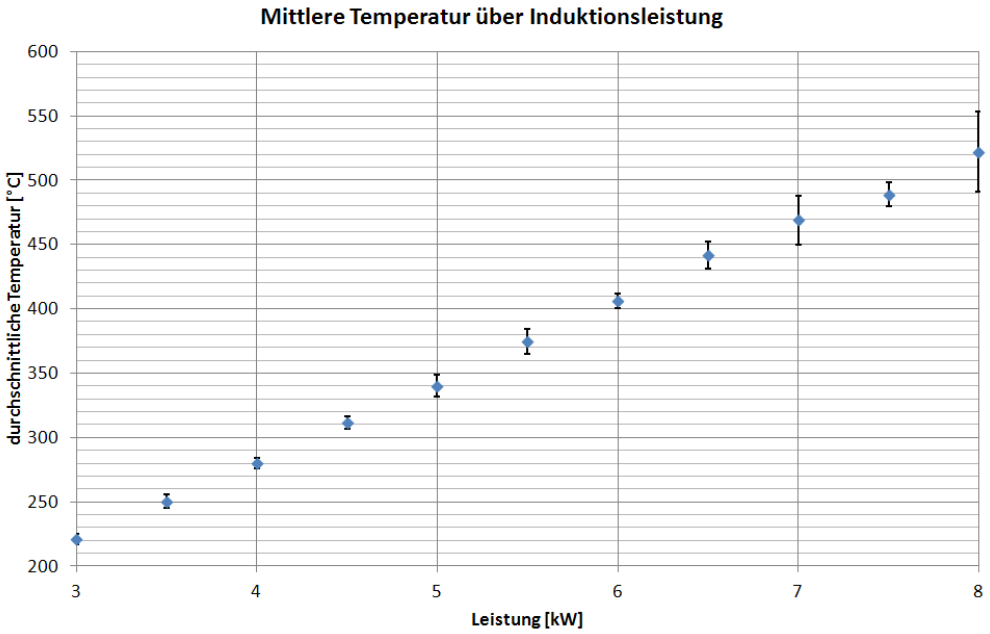
Versuchsdurchführung am BIAS mit am BIAS vorhandener Lasertechnik (Arbeitspakete 5 und 6)

Auf Grundlage der Vorversuche wurde ein spezieller Induktor zum Einbau in die Laseranlage entwickelt. Weiterhin wurde entsprechend der geometrischen Gegebenheiten Anschlussmöglichkeiten gestaltet und gefertigt.
Erste Versuche mit prototypischen Komponenten wurden durchgeführt.



Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurden Temperaturverläufe und Temperaturen in Relation zur Leistung ermittelt.

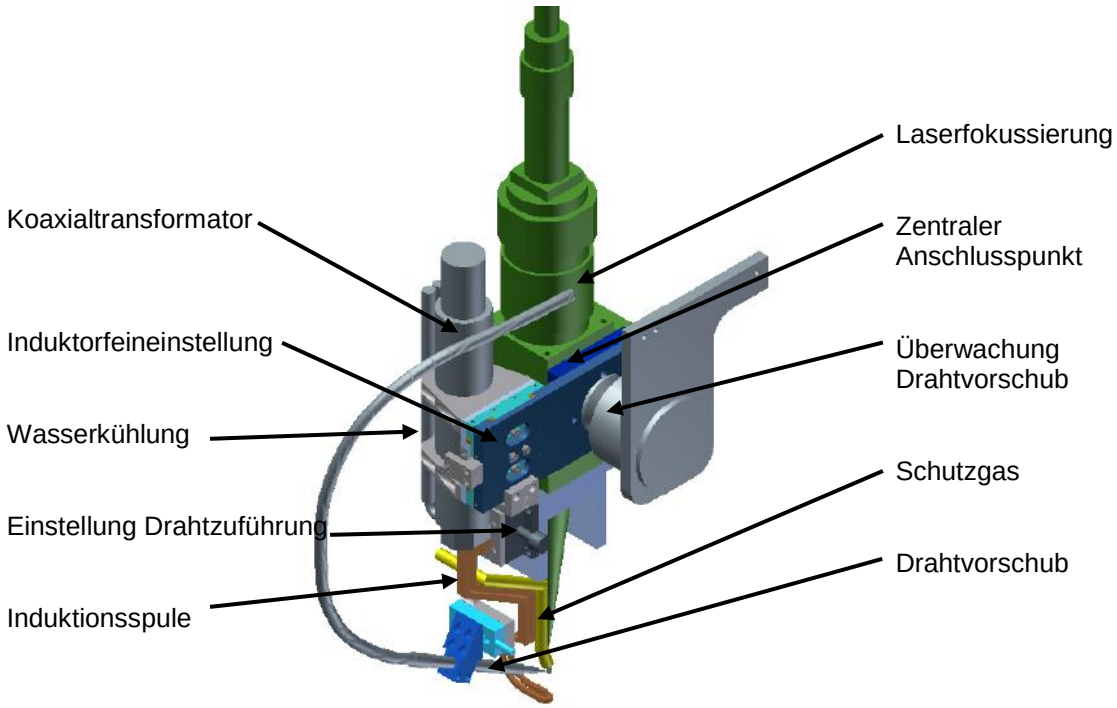




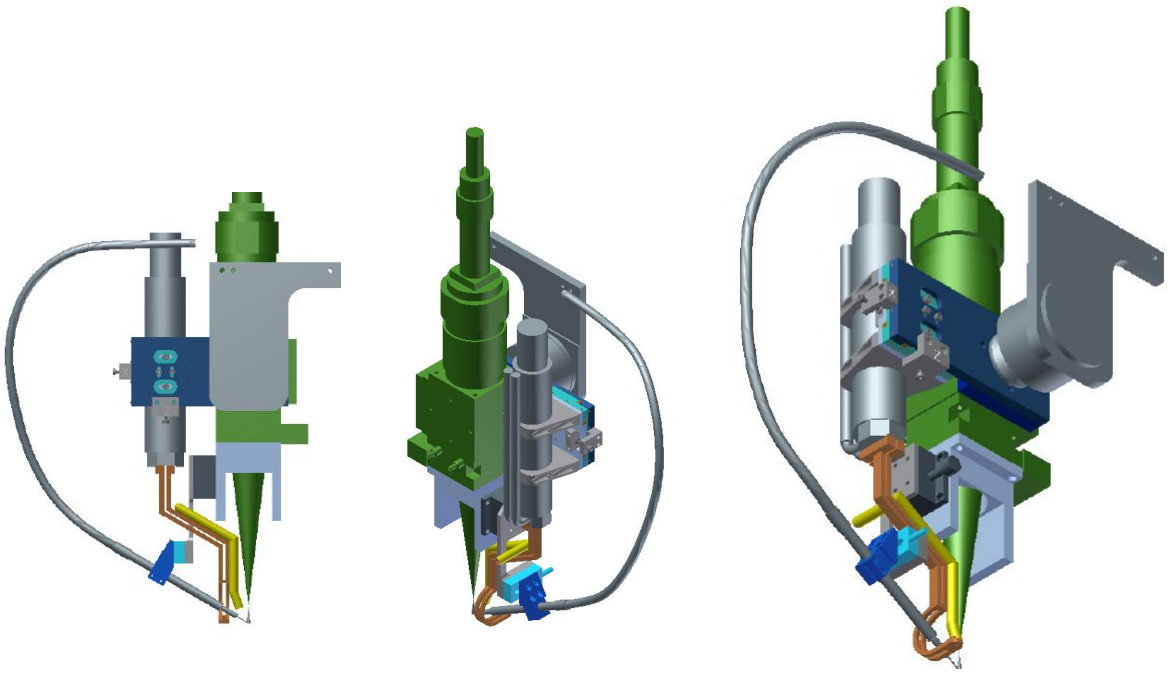
Auf Basis der Versuchsdurchführung wurden mögliche Konzepte zur industriellen Umsetzung entwickelt

Konzept 1

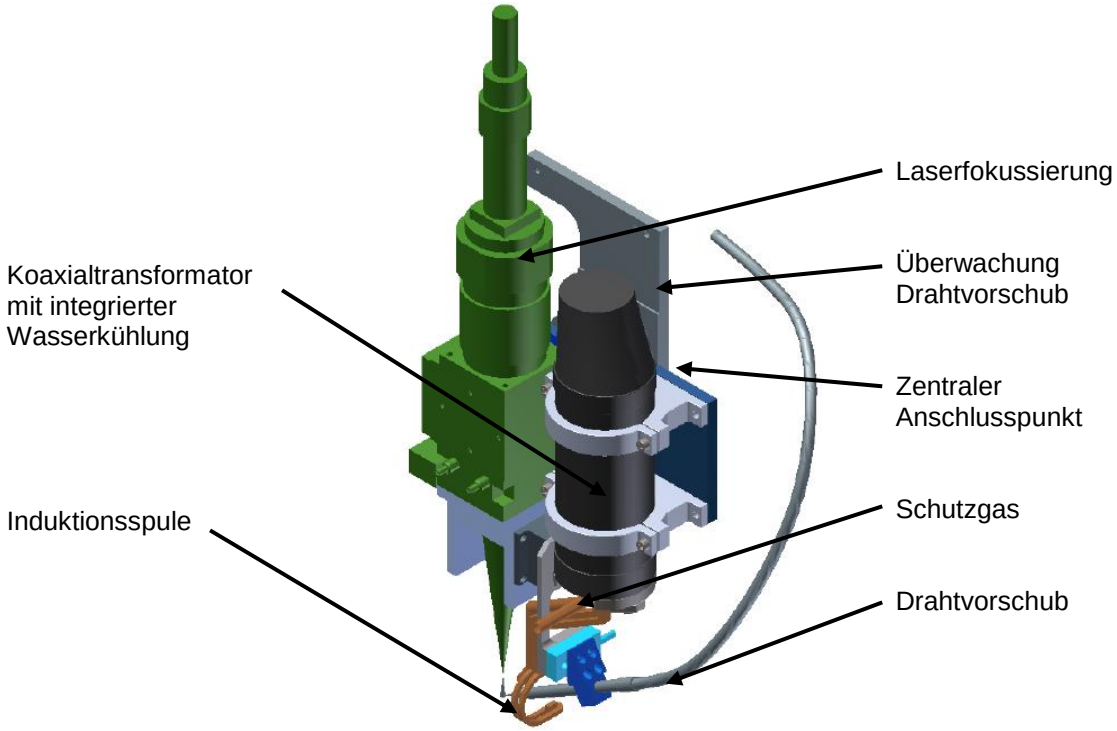
Induktions-Laserkopf mit separater Kühlung und mit Feineinstellung



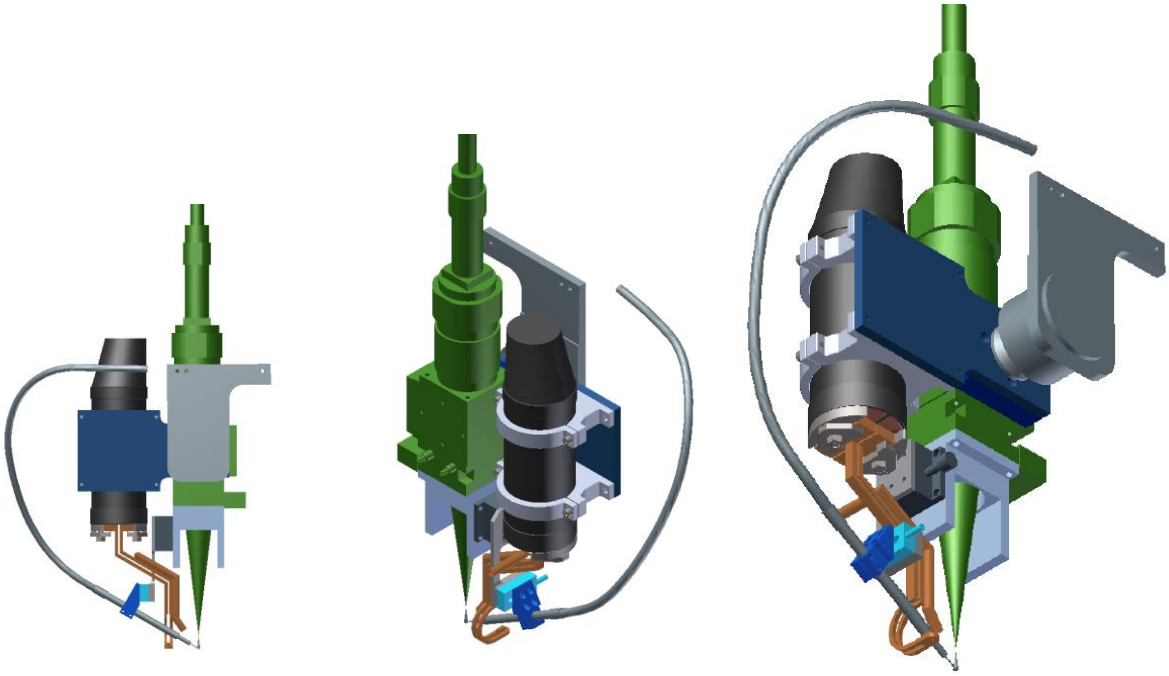
Details und Seitenansichten



Konzept 2
Induktions-Laserkopf mit direkter Kühlung und ohne Feineinstellung

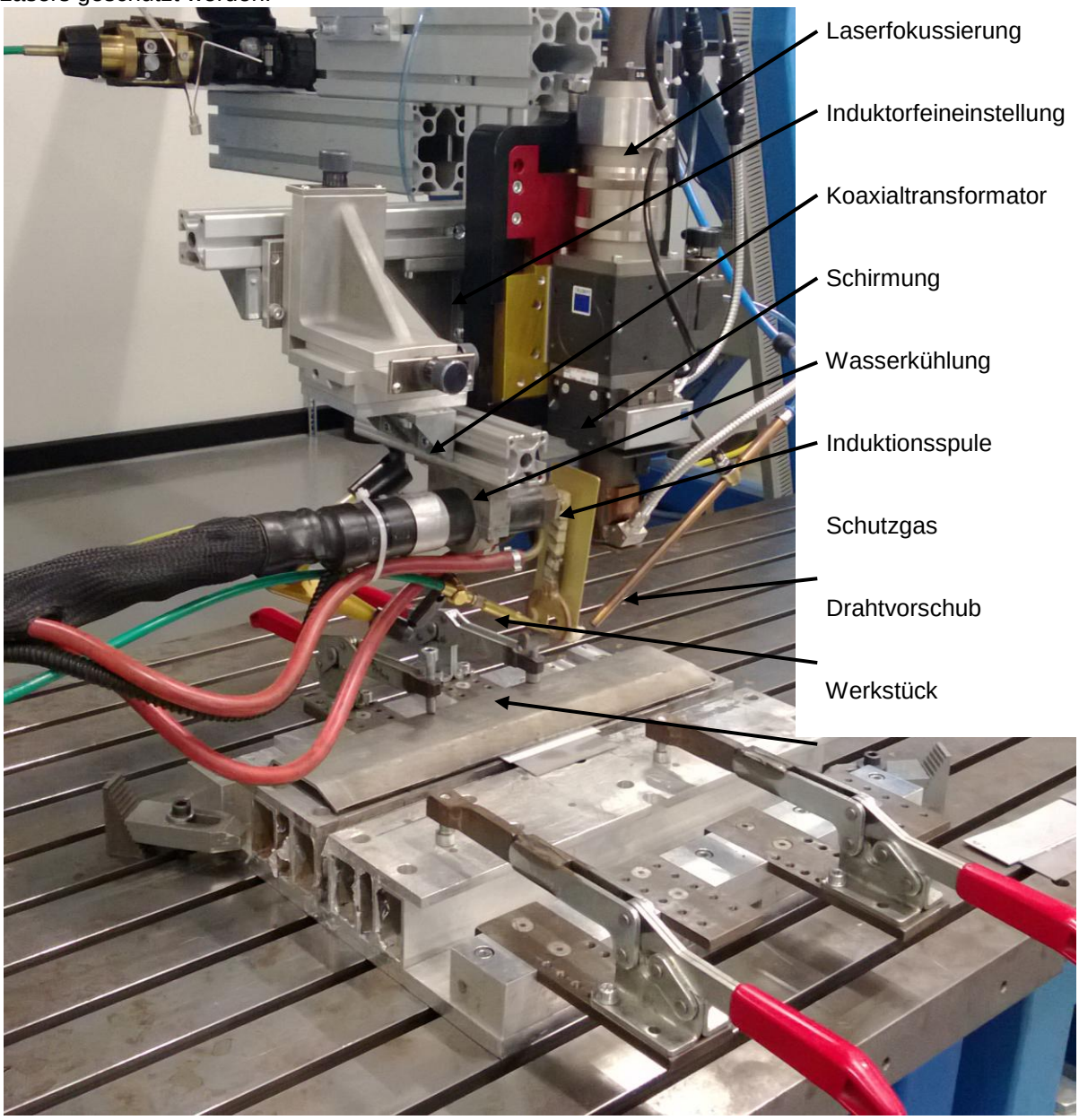


Details und Seitenansichten



Herstellung und Test des Funktionsmusters

Für die Versuchsdurchführung am BIAS wurde ein Funktionsmuster mit Induktorfeineinstellung und separater Kühlung umgesetzt.
Als größte Herausforderung sind die Integration der Energiequelle und Induktionsspule zu sehen. Im laufe des Projektes musste der Induktor zusätzlich vor der unerwartet hohe
Lasers geschützt werden.



Die erzielten Projektergebnisse mit entsprechenden Schliffproben und Zugversuchen können den Berichten der wissenschaftlichen Einrichtungen entnommen werden.