

Abschlussbericht

ZE:
Fraunhofer Institut für Werkzeug-
maschinen und Umformtechnik (IWU)
Reichenhainer Str. 88
09126 Chemnitz

Förderkennzeichen:
03WKCA03B

BMBF Wachstumskern TeMaK:

„Technologieplattform zum Einsatz von Magnesium-Knetlegierungen für den Fahrzeugbau im Produktionszyklus“

Verbundprojekt V 3:

„Innovative Technologien zum Fügen von Magnesium-Knetlegierungen“

Teilprojekt 3.2:

„Darstellung von Tailored Products (Blanks und Tubes)“

Projektbearbeiter: PD Dr.-Ing. F. Riedel
Dipl.-Ing. (FH) Tibor Paizs

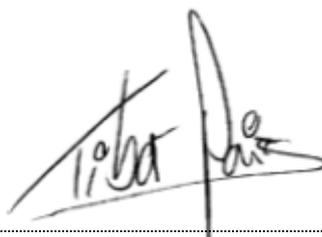
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2011 – 30.06.2014

Berichtszeitraum: 01.07.2011 – 30.06.2014

Chemnitz, den 01.12.2014



Dr.-Ing. habil. F. Riedel
Schweißfachingenieur (EWE)
Abteilungsleiter Thermisches Fügen



Dipl.-Ing. (FH) T. Paizs
Schweißfachingenieur (EWE)

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03WKCA03B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt beim Projektbearbeiter.

Danksagung

Für die Zuwendung im Förderprogramm "Innovative regionale Wachstumskerne" danken wir dem Bundesministerium für Bildung und Forschung.

Unser Dank gilt besonders dem Projektträger Jülich / Forschungszentrum Jülich GmbH für die wichtigen Hinweise zur administrativen Abhandlung des Verbundprojektes und Herrn Dr. Schulz vom Projektträger Forschungszentrum Berlin für seine wichtigen konstruktiven Anmerkungen zum Projekt.

Des Weiteren danken wir allen Partnern im Wachstums Kern, besonders den Partnern im Teilprojekt Fügen. Ohne diese sehr konstruktive Zusammenarbeit wären die erzielten Projektergebnisse in diesem Umfang und dieser Qualität nicht möglich gewesen.

Inhaltsverzeichnis

	Formelzeichen, Abkürzungen und Symbole.....	IV
1	Kurzdarstellung des Projektes.....	1
1.1	Aufgaben und Zielstellungen.....	1
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	2
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	2
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn	3
1.4.1	Laserstrahlschweißen von Magnesiumfeinblechen.....	3
1.4.2	Nahtverfolgung und Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen von Feinblechen	4
1.4.3	Kennwerte und Festigkeitskonzepte für die Auslegung von Magnesiumfeinblechschweißverbindungen.....	5
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	5
2	Fachbericht	6
2.1	Erzielte Ergebnisse.....	6
2.1.1	Optimierung der Herstellung der Tailored Blanks.....	6
2.1.1.1	Charakterisierung der Problemstellung und Erarbeitung von Lösungswegen	6
2.1.1.2	B4- Technologieentwicklung und Untersuchungen zur Vergrößerung der Spaltüberbrückbarkeit beim Laserstrahlschweißen ohne Zusatzwerkstoff	7
2.1.1.3	B5- Erweiterung der Anwendungsgrenzen und Optimierung der Nahteigenschaften beim Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff	11
2.1.1.4	B6- Entwicklung eines Konzeptes für ein Nahtverfolgungssystem für das Laserstrahlschweißen von Tailored Products.....	18
2.1.2	Eigenschaftsermittlung.....	20
2.1.2.1	B8- Entwicklung der Eigenschaften von Laserschweißnähten hinsichtlich einer nachgelagerten Umformung bzw. von Laserstrahlschweißnähten an umgeformten Halbzeugen	20
	B9- Kennwertermittlung und Festigkeitskonzept.....	20
2.1.3	Entwicklung eines Qualitätssicherungskonzeptes	23
2.1.4	Auswahl und Fertigung des Demonstrators.....	25
2.1.4.1	B1- Potentialanalyse diverser Produktgruppen, einschließlich deren Eigenschaftsprofile.....	25
2.1.4.2	B2- Konzipierung und Auslegung des Demonstrators.....	26
2.1.4.3	B3- Erstellung der Prozessketten für die Fertigung des Demonstrators	26
2.1.4.4	B10- Fertigungsplanung für die Herstellung des Demonstrators.....	27
2.1.4.5	B11- Herstellung des Demonstrators und Optimierung der maßlichen und funktionellen Parameter	28
2.1.5	B12- Bewertung der Wirtschaftlichkeit der neuen Technologien sowie Nachweis der Energie- und Ressourceneffizienz	31
2.2	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	32
2.3	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens	33
2.4	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	33
	Literaturverzeichnis	35

Formelzeichen, Abkürzungen und Symbole

Symbol	Einheit	Benennung
A	mm ²	Fläche (Nahtfläche)
A ₁₀	%	Bruchdehnung
α	1/°C	Wärmeausdehnungskoeffizient
b	mm	Nahtbreite
b _{s,max}	mm	maximal mögliche überbrückbare Spaltbreite
d	mm	Drahtdurchmesser
d _p	mm	Stempeldurchmesser
E _s	J/m	Streckenenergie
FAT	MPa	FAT-Wert ist ein normierter IIW-Schwingfestigkeitswert bei 2*10 ⁶ Lastwechsel und Steigung der Wöhlerlinie k = 3
F _F	kN	Fügekraft
F _Z	kN	Zugkraft
f	mm	Fokuslage, gemessen von der Blechoberseite
GW	-	Grundwerkstoff
H _{Vol.}	J/mm ³	gesamte Enthalpie (Erhitzen auf Schmelzpunkt und Erschmelzen)
h	mm	Nahtüberhöhung
IHU	-	Innenhochdruckformen
1,2 K	-	1-, 2-Komponenten
k	-	Steigung der Wöhlerlinie
N	-	Lastwechsel
n	-	Probenanzahl
P _L	W	Laserleistung
P _ü	%	Überlebenswahrscheinlichkeit
R	-	Spannungsverhältnis
R _m	MPa	Zugfestigkeit
R _{p0,2}	MPa	0,2 % Dehngrenze
RT	-	Raumtemperatur (20°C)
SN	-	Schweißnaht
T	°C	Temperatur
T _V	°C	Verdampfungstemperatur
t	mm	Blechdicke
t	s	Zeit
σ _N	MPa	Nahtfestigkeit (Schubspannung)
σ _V	MPa	Verbindungsfestigkeit (Schubspannung)
v _D	m/min	Drahtvorschubgeschwindigkeit
v _F	m/s	Fügeschwindigkeit / Setzgeschwindigkeit
v _S	m/s	Schweißgeschwindigkeit
WEZ	-	Wärmeeinflusszone

1 Kurzdarstellung des Projektes

1.1 Aufgaben und Zielstellungen

Für die Herstellung von Komponenten im Karosseriebau wie beispielsweise Dächer und Türen werden für die Umformung sehr große Platinen benötigt. Die benötigten Platinen erreichen in vielen Anwendungen Dimensionen, die nicht durch Einzelplatinen/Coils abgedeckt werden können. Aus diesem Grund werden dazu Einzelplatinen zu so genannten *Tailored Blanks* verschweißt. Aufgrund der guten Nahteigenschaften (geringe Nahtbreite, gute Umformeigenschaften) hat sich für die Herstellung dieser *Tailored Blanks* das Laserstrahlschweißen etabliert.

Beim Laserstrahlschweißen von AZ31 liegen jedoch Problemstellungen vor, die beim Laserstrahlschweißen von konventionellen Stahl- und Aluminiumwerkstoffen als weniger kritisch zu bewerten sind. Zu den Problemstellungen zählen im Wesentlichen:

- ➔ geringe Spaltüberbrückbarkeit beim Laserstrahlschweißen (siehe Abb.1)
- ➔ geringe Qualität der Schnittkanten beim Scherschneiden
- ➔ geringe Möglichkeit für die Detektierung der Schweißfuge beim
- ➔ Schweißen im technischen Nullspalt

Die automatisierte Herstellung von *Tailored Products* aus der Legierung AZ31 ist aktuell daher nicht/nur eingeschränkt möglich. Im Rahmen des Projektes sollen daher Möglichkeiten untersucht werden, die Herstellung von *Tailored Products* aus dem Magnesiumwerkstoff AZ31 zu optimieren. Dazu sollen insbesondere innovative Technologien zum Laserstrahlschweißen mit- und ohne Zusatzwerkstoff untersucht werden (z.B. eine diskontinuierliche, Spaltbreite angepasste Schweißzusatzwerkstoffzufuhr). Zusätzlich soll ein Konzept für ein auf Wirbelstrom basierendes Schweißnahtverfolgungssystem erarbeitet werden, welches im Vergleich zu den bestehenden Systemen zum *Tailored-Blank* Schweißen von Magnesiumwerkstoffen anwendbar sein soll.

Zur Bewertung der Anwendungsgrenzen von Baugruppen aus Magnesium sollen die im Rahmen des ersten TeMaK-Verbundprojektes erarbeiteten Eigenschaften von Magnesiumwerkstoffen bzw. deren Schweißverbindungen erweitert werden. Da insbesondere im Kraftfahrzeugbau die Crashesicherheit eine übergeordnete Rolle spielt, soll im Rahmen des Projektes die Crashesicherheit von Schweißverbindungen aus AZ31 bewertet werden. Dies soll anhand von zerstörenden Fallturmversuchen von Hutprofilen erfolgen.

Darüber hinaus sollen Möglichkeiten eines Qualitätssicherungskonzeptes erarbeitet werden. Dazu soll insbesondere die Anwendbarkeit einer online-Prozessüberwachung zur Erkennung von Schweißnahtfehlern in Echtzeit untersucht werden.

Abschließend soll anhand der spezifischen Werkstoffeigenschaften von AZ31 ein geeigneter Demonstrator ausgewählt werden, der zum einen das enorme Leichtbaupotenzial der Legierung AZ31 verdeutlicht und der zum anderen die im Rahmen des Gesamtprojektes erarbeiteten Verarbeitungstechnologien integriert. Dieser soll entsprechend der Kompetenzen der Projektpartner hergestellt und im Rahmen des Teilprojektes 3.2 gefertigt werden

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Projektbearbeitung wurde planmäßig am 01. Juli 2011 begonnen am 30. Juni 2014 beendet.

Die Abarbeitung der Arbeitspläne des Teilprojektes TP 3.2 „*Darstellung von Tailored Products (Blanks and Tubes)*“ erfolgte weitestgehend identisch mit dem Arbeits- und Zeitplan. Alle geplanten Arbeitsschritte wurden durchgeführt. Die experimentellen Untersuchungen wurden mit Ausnahme von Punkt B6 alle im Fraunhofer IWU durchgeführt. Die experimentellen Schweißversuche erfolgten im Institut mit einem diodengepumpter Scheibenlasers *TruDisk 6002* (Laserleistung von 6000 Watt).

Im Rahmen der Projektlaufzeit erfolgte insbesondere eine enge und konstruktive Zusammenarbeit mit den Projektpartner des Verbundprojektes zum Fügen von Magnesium-Knetlegierungen“:

- imq Ingenieurbetrieb für Materialprüfung, Qualitätssicherung und Schweißtechnik GmbH Crimmitschau
- Teilprojekt 2.1 „Profile, Rahmen und Gestelle aus Mg-K“

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung und der Ablauf des Vorhabens erfolgten durchgehend entsprechend der Arbeits- und Zeitpläne der Antragsunterlagen und sind dort ausführlich beschrieben.

Die Arbeitspakete des „*Darstellung von Tailored Products (Blanks and Tubes)*“ waren wie folgt definiert:

- B1 Potenzialanalyse diverser Produktgruppen, einschließlich deren Eigenschaftsprofile
- B2 Konzipierung und Auslegung der Demonstratoren
- B3 Erstellung der Prozessketten für die Fertigung des Demonstrators
- B4 Technologieentwicklungen und Untersuchungen zur Vergrößerung der Spaltüberbrückbarkeit beim Laserstrahlschweißen ohne Zusatzwerkstoff
- B5 Erweiterung der Anwendungsgrenzen und Optimierung der Nahtigenschaften beim Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff
- B6 Entwicklung eines Konzeptes für ein Nahtverfolgungssystem für das Laserstrahlschweißen von Tailored Products
- B7 Ermittlung der Eigenschaften von Laserschweißnähten hinsichtlich einer nach gelagerten Umformung bzw. von Laserstrahlschweißnähten an umgeformten Halbzeugen
- B8 Kennwertermittlung und Festigkeitskonzept
- B9 Entwicklung eines Qualitätssicherungskonzeptes
- B10 Fertigungsplanung für die Herstellung des Demonstrators
- B11 Herstellung des geplanten Demonstrators und Optimierung der maßlichen und funktionalen Parameter
- B12 Bewertung der Wirtschaftlichkeit der neuen Technologien sowie Nachweis der Energie- und Ressourceneffizienz

Tabelle 1: Zeitplan für das Projekt Darstellung von Tailored Products (Blanks and Tubes)

		I.Q.	II.Q.	III.Q.	IV.Q.	V.Q.	VI.Q.	VII.Q.	VIII.Q.	IX.Q.	X.Q.	XI.Q.	XII.Q.	h/AP	MM
AP	MA														
V3.2.B1	Ih	40												40 h	0,3
	Th														
V3.2.B2	Ih	40												40 h	0,3
	Th														
V3.2.B3	Ih	20												20 h	0,1
	Th														
V3.2.B4	Ih		10	20	90	60	30	60						270 h	2,0
	Th		60	60	50	80	80							250 h	1,8
V3.2.B5	Ih				40	40	70	30	40					280 h	2,0
	Th				100	40	80	40	40					300 h	2,2
V3.2.B6	Ih				30	30	30	40	40	30				200 h	1,5
	Th				10	10	10	10	10	10				60 h	0,4
V3.2.B7	Ih				30	30	30	30	40	30	30			220 h	1,6
	Th				30	30	30	50	50	40	40			270 h	2,0
V3.2.B8	Ih				30	30	30	20	30	30	30	30		200 h	1,5
	Th				10	20	20	20	20	20	20			110 h	0,8
V3.2.B9	Ih									10	20	20	20	70 h	0,5
	Th														
V3.2.B10	Ih									30				30 h	0,2
	Th														
V3.2.B11	Ih									20	20	20	20	80 h	0,6
	Th									40	40	40	40	160 h	1,2
V3.2.B12	Ih												40	40 h	0,3
	Th														
	Σ	100 h	70 h	80 h	380 h	280 h	410 h	360 h	270 h	260 h	200 h	110 h	120 h	2640 h	19,3
h	Ih	100 h	10 h	20 h	190 h	190 h	190 h	240 h	150 h	150 h	100 h	70 h	80 h	1490 h	
	Th	60 h	60 h	190 h	90 h	220 h	120 h	120 h	110 h	100 h	40 h	40 h	40 h	1150 h	
MM	Ih	0,7	0,1	0,1	1,4	1,4	1,4	1,8	1,1	1,1	0,7	0,5	0,6	10,9	
	Th	0,4	0,4	1,4	0,7	1,6	0,9	0,9	0,9	0,8	0,7	0,3	0,3	8,4	

Glossar
 Verbundprojekt 3:"Fügen" AP Arbeitspaket Th Technikerstunden
 Teilprojekt 3.2:"Tailored Products" MA Mitarbeiter MM Mannmonat
 Ih Ingenieurstunden h Stunden

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn

1.4.1 Laserstrahlschweißen von Magnesiumfeinblechen

Beim Schweißen von Magnesiumlegierungen ergeben sich aufgrund der physikalischen und chemischen Eigenschaften der Magnesiumknetlegierung folgende Probleme:

- Die niedrige Verdampfungstemperatur von Magnesium ($T_V = 1090 \text{ °C}$) führt beim Schweißen zur Bildung von Gasblasen und im rasch erstarrenden Schweißgut aufgrund der unzureichenden Entgasung zu Poren [4].
- Magnesium bildet ebenso wie Aluminium eine fest anhaftende Oxidschicht auf der Oberfläche, die den Schweißprozess negativ beeinflussen kann [4].
- Die hohe Oxidationsneigung der Magnesiumschmelze erfordert eine absolut inerte Schutzgasabdeckung, um eine Entzündung der Schmelze und Einschlüsse von höherschmelzenden Magnesiumoxiden im Schmelzbad zu verhindern [5, 6].
- Der im Vergleich zu anderen Metallen (z. B. Aluminium) höhere thermische Ausdehnungskoeffizient und die geringere Wärmeleitfähigkeit führen zu entsprechend höherem Verzug und Eigenspannungen durch das Schweißen. Insbesondere bei langen Schweißnähten und bei Bauteilen mit hohen Anforderungen an die Maßhaltigkeit muss dies berücksichtigt werden.
- Magnesiumlegierung neigen aufgrund des großen Schmelzintervalls von ca. 200 °C mit zunehmendem Anteil an Aluminium und Zink zur Bildung von Heißrissen.
- Die niedrige Schmelzbadviskosität und Oberflächenspannung führt beim Schweißen häufig zu einem Durchsacken des Schmelzbades und grenzt das Parameterfenster stark ein [7].

Das Schweißen von Magnesium mit konventionellen Verfahren, wie dem Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG) oder dem Metall-Inertgas-Schweißen (MIG) ist möglich, wird teilweise angewendet und ist in zahlreichen Veröffentlichungen dokumentiert [8, 9, 10, 11]. Bedingt durch die geringe Schmelzbadviskosität ist die Anwendung dieser Verfahren mit dem großflächigen Wärmeeintrag aber im Fein- bzw. Dünoblechbereich (Blechkdicke: < 2 mm) stark eingeschränkt [9] oder nicht möglich.

Das Laserstrahlschweißen als Alternative zu den konventionellen Lichtbogenschweißverfahren zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- hohe Prozessgeschwindigkeit,
- konzentrierte Energieeinbringung,
- geringe Streckenenergie,
- leichte Integrierbarkeit in automatisierte Fertigungslinien,
- gute Eignung für heißrissempfindliche Werkstoffe, Werkstoffe mit hohem Wärmeausdehnungskoeffizient sowie für Bauteile mit hohen Anforderungen an die Nahtqualität und Maßhaltigkeit.

Für das Schweißen von Magnesiumlegierung können diese Vorteile gezielt genutzt werden, um im Vergleich zu den Lichtbogenschweißverfahren eine bedeutend höhere Produktivität zu erzielen. Die erreichbaren Fügegeschwindigkeiten liegen dabei weit über denen der Lichtbogenschweißverfahren (bis zu 8 m/min im Dünoblechbereich [12]). Nachteilig sind allerdings die geringe Spaltüberbrückbarkeit und die daraus resultierenden hohen Anforderungen an die Nahtvorbereitung und die engen Parameterfenster [13]. Die Spaltüberbrückbarkeit kann durch die Zuführung von drahtförmigem Zusatzwerkstoff in gewissen Grenzen gesteigert werden.

In jüngster Zeit wird durch verschiedene Ansätze versucht die Spaltüberbrückbarkeit zu steigern, wie zum Beispiel mit Zwei- oder Mehrfokus-Techniken sowie Hybridverfahren oder prinzipiell neuen Strahlquellen [14,15].

Zum Laserstrahlschweißen von Magnesiumfeinblechen im Blechdickenbereich unter 2 mm sind dem Antragsteller kaum Veröffentlichungen bekannt. Dies dürfte hauptsächlich darin begründet sein, dass diese Blechdicken erst seit relativ kurzer Zeit industriell verfügbar sind. Auch sind, bis auf eigene erste Untersuchungen (s. Abschnitt 2.4), keine Untersuchungen zum Verhalten von laserstrahlgeschweißten Magnesiumknetlegierung bei einer nachgelagerten Umformung bekannt.

1.4.2 Nahtverfolgung und Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen von Feinblechen

Beim Laserstrahlschweißen von dünnen Magnesiumfeinblechen mit sehr langen Nähten bzw. von 3D-Konturen ist die exakte Positionierung des Laserstrahls von entscheidender Bedeutung für die entstehende Nahtqualität. Für die laterale Lageerkennung der Schweißnaht existieren eine Vielzahl von Lösungsansätzen, die grob in optische und nichtoptische Messverfahren unterteilt werden können [16].

Für die Detektierung der lateralen Lageposition von Schweißnähten bzw. Stoßkanten kommen in den aktuell kommerziell verfügbaren Systemen hauptsächlich das in Abbil-

dung 3 dargestellte Lichtschnittverfahren als Vertreter der optischen Verfahren (z. B. Precitec [17]) bzw. die taktile Nahtverfolgung (z. B. Scansonic [18]) zum Einsatz. Beide Techniken benötigen jedoch prinzipbedingt einen geometrisch abweichenden Kanten- oder Spaltverlauf zur Positionserkennung und sind deshalb bei Stumpfstößen ohne Spalt, wie es beim Laserstrahlschweißen von Magnesiumfeinblechen bei Blechdicken unter 2,0 mm erforderlich ist, ungeeignet. Diese Problematik ist aktuell noch ungelöst.

1.4.3 Kennwerte und Festigkeitskonzepte für die Auslegung von Magnesiumfeinblechschweißverbindungen

Die Kenntnisse zum Festigkeitsverhalten von laserstrahlgeschweißten Magnesiumstrukturen im Feinblechbereich sind aktuell noch sehr lückenhaft. Zur Schwingfestigkeit sind eine Reihe von Veröffentlichungen bekannt, die jedoch fast ausschließlich das Festigkeitsverhalten von lichtbogengeschweißten Magnesiumverbindungen bzw. Verbindungen an Magnesiumgusslegierungen betrachten. Hierzu sind insbesondere die Veröffentlichungen [20, 21, 22] zu nennen, welche die Grundlagen für die entsprechenden FAT-Klassen für Magnesiumschweißverbindungen (Blechdicke: > 3mm) in der IIW-Empfehlung [23] als internationale Richtlinie zur Schwingfestigkeitsbewertung von Schweißverbindungen bilden. Die in [1] durchgeführten Untersuchungen an Magnesiumknetverbindungen konnten die Werte der IIW-Empfehlung auch für laserstrahlgeschweißte Feinblechverbindungen bestätigen, wobei, bedingt durch die verschiedenen entstehenden Nahtformen, eine Abhängigkeit der Schwingfestigkeit von dem gewählten Schweißverfahren festgestellt wurde.

Untersuchungen zum Verhalten von geschweißten Magnesiumfeinblechverbindungen bei schlagartiger Beanspruchung (Crash) sind aktuell nicht bekannt, werden jedoch für einen breiten Einsatz in der Automobilindustrie dringend benötigt.

Auf der Basis einer Patent- und Schutzrechtrecherche, einschließlich offengelegte Anmeldungen, kann festgestellt werden, dass die eigenen geplanten Entwicklungen davon nicht betroffen sind und somit der eigenen Ergebnisverwertung nichts entgegen steht.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) in Chemnitz arbeitete eng mit der HS-Mittweida zusammen. Im Rahmen von zwei Diplomarbeiten am Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik wurden insbesondere schweißmetallurgische Untersuchungen durchgeführt und die Zusammenarbeit mit der HS Mittweida intensiviert. Studentische Hilfskräfte der HS Mittweida waren durchgehend über die gesamte Bearbeitungszeit des Projektes in wissenschaftliche Arbeiten integriert.

2 Fachbericht

2.1 Erzielte Ergebnisse

2.1.1 Optimierung der Herstellung der Tailored Blanks

2.1.1.1 Charakterisierung der Problemstellung und Erarbeitung von Lösungswegen

Bei der Herstellung von *Tailored Blanks* aus Magnesium durch Laserstrahlschweißen liegen drei wesentliche Problemstellungen vor:

- ➔ geringe Spaltüberbrückbarkeit beim Laserstrahlschweißen (siehe Abb.1)
- ➔ geringe Qualität der Schnittkanten beim Scherschneiden
- ➔ geringe Möglichkeit für die Detektierung der Schweißfuge beim Schweißen im technischen Nullspalt

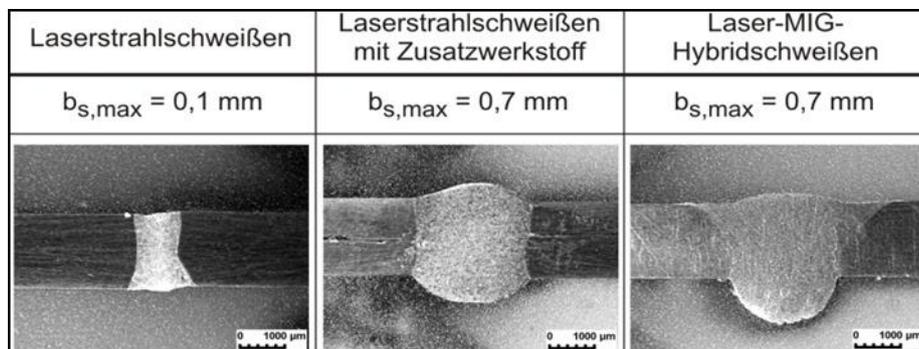


Abbildung1: Spaltüberbrückbarkeit beim Laserstrahlschweißen von AZ31

Aufgrund der geringen Spaltüberbrückbarkeit beim Laserstrahlschweißen sowie der geringen Kantenqualität von Magnesium beim Scherschneiden müssen die Stoßkanten der Bleche aktuell vor dem Schweißen plangefräst werden, woraus erhöhte Produktionszeiten sowie erhöhten Fertigungskosten resultieren. Ziel soll es sein, eine Technologie zu entwickeln, bei der die Stoßkanten der Bleche nicht vor dem Laserstrahlschweißen gefräst werden müssen.

Im Folgenden werden zwei Ansätze weiter verfolgt:

1. Technologieentwicklungen und Untersuchungen zur Vergrößerung der Spaltüberbrückbarkeit beim Laserstrahlschweißen ohne Zusatzwerkstoff (AP: B4)
2. Erweiterung der Anwendungsgrenzen und Optimierung der Nahteigenschaften beim Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff (AP: B5)

Ein weiterer Schritt zur Optimierung der Herstellung von Tailored Produkts ist die Verwendung von Nahtverfolgungssystemen. Da die aktuell auf dem Markt erhältlichen Systeme aufgrund der hohen Reflexion von Magnesium nicht oder nur eingeschränkt einsetzbar sind, soll im Rahmen des Projektes ein innovatives Konzept für ein Nahtverfolgungskonzept entwickelt werden:

3. Entwicklung eines Konzeptes für ein Nahtverfolgungssystem für das Laserstrahlschweißen von Tailored Products (AP: B6)

2.1.1.2 B4- Technologieentwicklung und Untersuchungen zur Vergrößerung der Spaltüberbrückbarkeit beim Laserstrahlschweißen ohne Zusatzwerkstoff

Dieser Arbeitspunkt umfasst die Entwicklung einer innovativen Technologie zum Laserstrahlschweißen von Magnesiumfeinblechen mit einer vorgelagerten Laserbearbeitung der Stoßkanten.

Ziel ist es, die mittels Scherschneiden hergestellte Stoßkanten vor dem Schweißen so zu bearbeiten, dass für das Laserstrahlschweißen optimale Bedingungen generiert werden und somit in gewissen Grenzen eine Unabhängigkeit von dem verwendeten Zuschnittverfahren der Bleche erreicht werden kann.

Da hierfür die Stoßkanten zunächst mittels Laserstrahlschneiden beschnitten werden sollen, wurden im ersten Arbeitsschritt durch systematische Laserschneidversuche geeignete Schneidparameter ermittelt. Die hergestellten Laserstrahlschnitte wurden hinsichtlich der Schnittflächenqualität (Grathöhe und gemittelte Rautiefe) bewertet.

Das Diagramm in Abbildung 2 verdeutlicht, dass sowohl die Grathöhe, als auch die gemittelte Rautiefe der erzeugten Schnitte bei einer Schnittgeschwindigkeit von 5 m/min am geringsten sind. Daher wird bei den noch folgenden Laserstrahlschneidversuchen eine Schnittgeschwindigkeit von $v_s = 5$ m/min festgelegt. In weiteren Prozessparameterstudien wurden hinsichtlich der gemittelten Rautiefe und der Grathöhe mit den Prozessparametern von Laserleistung $P_L = 1,5$ kW, sowie einem Gasdruck von $p = 13$ bar die besten Ergebnisse erzielt.

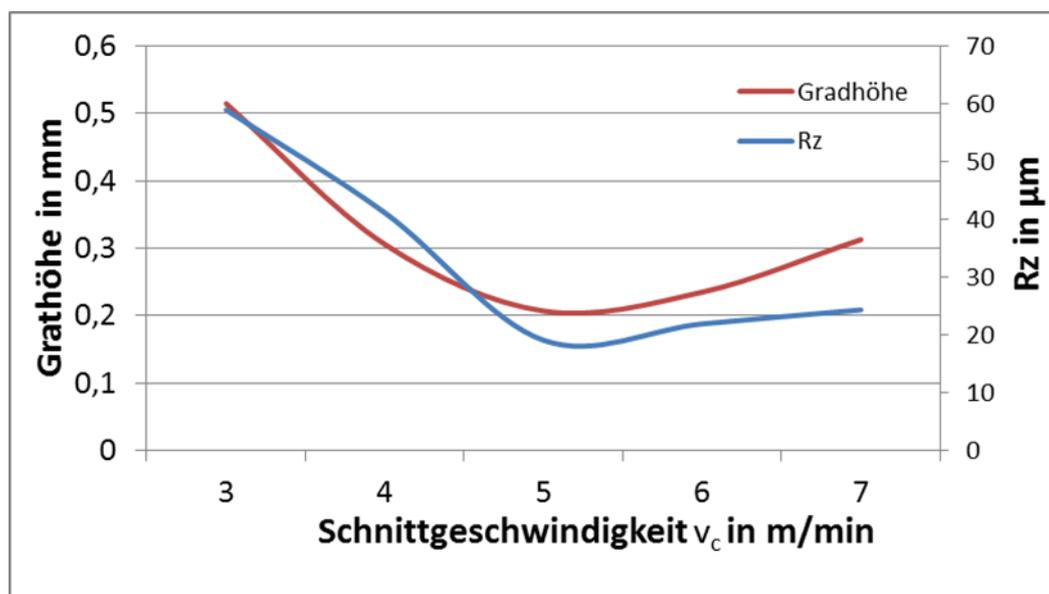
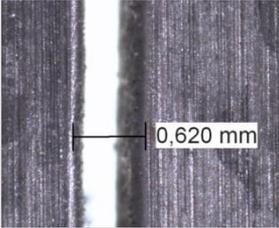
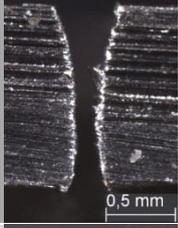
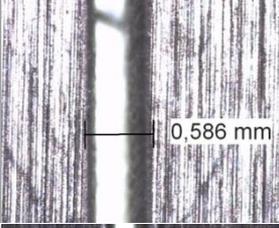
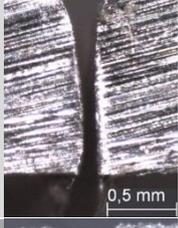
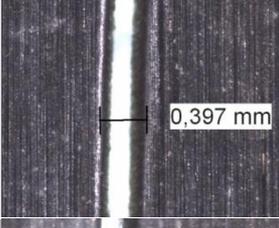
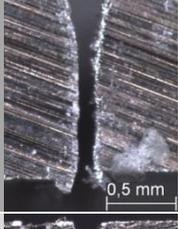
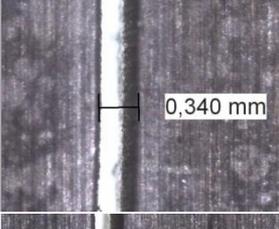
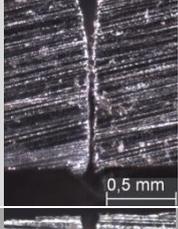
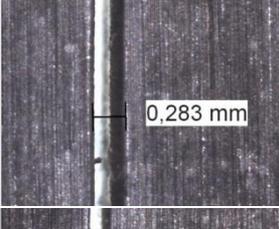
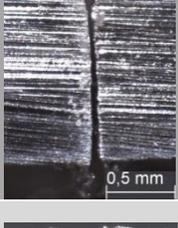
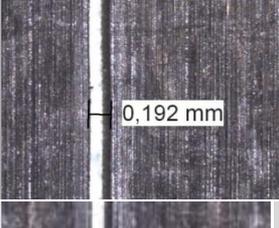
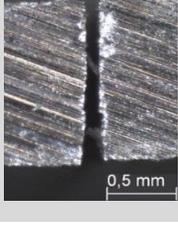
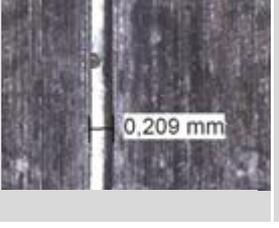


Abbildung 2: Ermittelte Grathöhe und gemittelte Rautiefe Rz in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit beim Laserstrahlschneiden

Die Ermittlung der optimalen Fokusslage f in Abhängigkeit der Schnittspaltgeometrie ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Einfluss der Fokusslage auf die Schnittspaltgeometrie beim Laserstrahlschneiden

Fokusslage [mm]	Spalt	Rechtwinkligkeitsabweichung [mm]	Draufsicht auf Spalt	Spaltbreite
+3		0,1361 mm Bewertungsklasse: 2		0,620 mm
+2		0,1009 mm Bewertungsklasse: 2		0,586 mm
+1		0,1063 mm Bewertungsklasse: 2		0,397 mm
0		0,0603 mm Bewertungsklasse: 2		0,340 mm
-1		0,06574 mm Bewertungsklasse: 2		0,283 mm
-2		0,04684 mm Bewertungsklasse: 1		0,192 mm
-2,6		0,0392 mm Bewertungsklasse: 1		0,209 mm

Es wurde ermittelt, dass die optimale Fokuslage zum Laserstrahlschneiden von Magnesiumblechen bei Verwendung der entsprechenden Anlagentechnik -2 mm beträgt. Bei geringer Abweichung der Rechtwinkligkeit wurden Schnittspaltbreiten von $\leq 0,2$ mm erzielt. Um die laserstrahlgeschnittenen Schnittflächen mit den bisher untersuchten, konventionell hergestellten Schnittflächen (gefräst, Scherschnitt) vergleichen zu können, wurden deren gemittelte Rautiefen Rz gegenübergestellt (siehe Bild 3 oben). Aus dem Diagramm geht hervor, dass die Oberflächengüte der Laserstrahlschnitte bezüglich der gemittelten Rautiefe zwar schlechter als die durch Fräsen hergestellten Bauteilkanten sind, jedoch eine deutlich höhere Qualität als die durch Scherschneiden hergestellten Schnittflächen aufweisen. Um theoretisch herleiten zu können, ob die entsprechenden Schnittflächen durch Laserstrahlschweißen gefügt werden können, wurde die sich aus der Schnittflächenqualität ergebende Spaltbreite vermessen (siehe Bild 3 unten). Um diese zu vermessen, wurden jeweils zwei 300mm lange Bleche nebeneinandergelegt und der sich ergebende Spalt mikroskopisch vermessen.

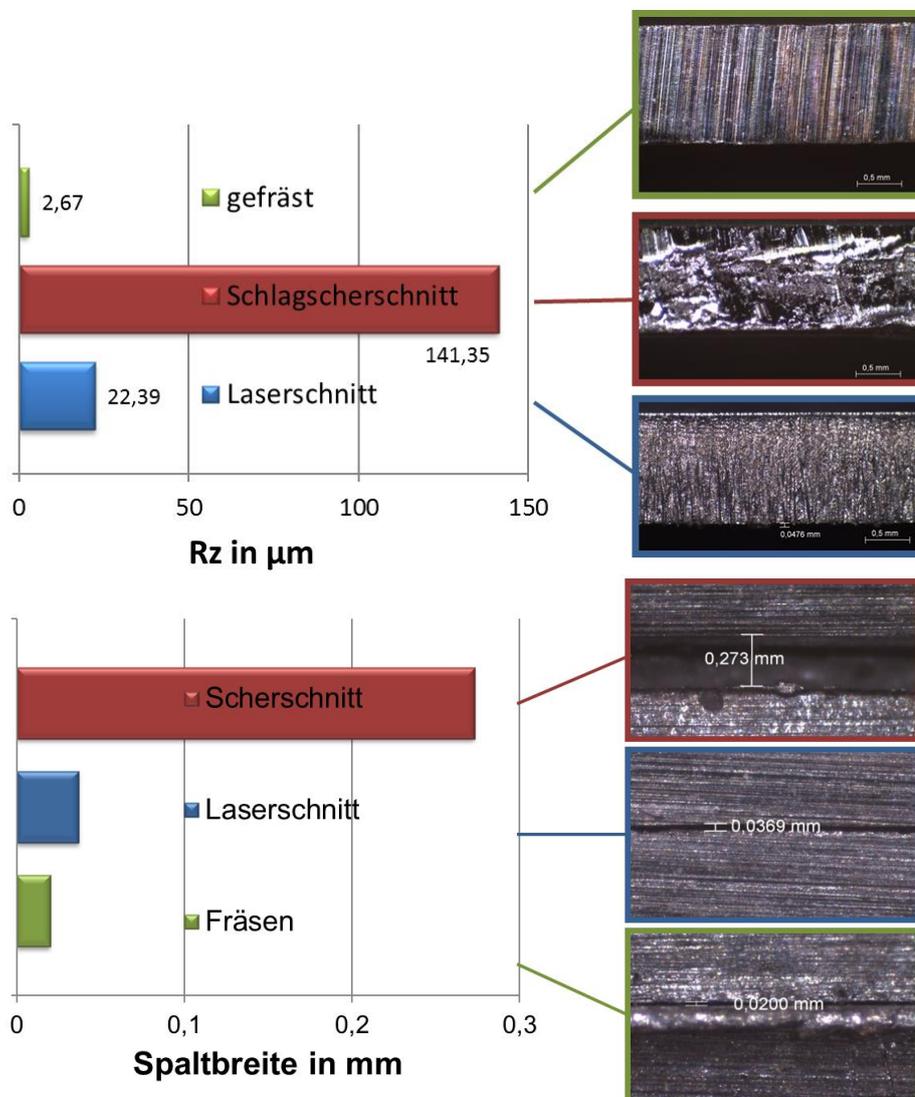


Abbildung 3: Gemittelte Rautiefe der Kanten (oben) und sich daraus ergebende Spaltbreite der Bleche (unten) in Abhängigkeit von dem Trennverfahren

Als Grenze der Spaltüberbrückbarkeit beim Laserstrahlschweißen ohne Zusatzwerkstoff wurde ein Wert von 0,1 mm ermittelt (vgl. Abb. 1). Aufgrund der geringen Schnittqualität ist die Spaltbreite der schergeschnittenen Bleche mit $\approx 0,27$ mm (siehe Abbildung 3 unten) zu groß, um diese durch Laserstrahlschweißen ohne Zusatzwerkstoff zu verschweißen. Sowohl die gefrästen-, als auch die lasergeschnittenen Bleche weisen aufgrund der hohen bzw. sehr hohen Schnittqualität Spaltbreiten von 0,037 bzw. 0,020 mm auf. Damit wird die Grenze der Spaltüberbrückbarkeit von 0,1 mm nicht überschritten, sodass das Laserstrahlschweißen der Bleche möglich ist.

Um die Eignung der Schneid-Schweiß-Technologie abschließend zu bewerten, wurden experimentelle Schneid-Schweißversuche durchgeführt. Dazu wurden die zuvor ermittelten optimalen Prozessparameter verwendet. Durch die experimentellen Untersuchungen wurde bestätigt, dass die laserbeschnittenen Proben gleichermaßen wie die gefrästen Proben ohne Einbuße der Schweißnahtqualität (siehe Abbildung 4) gefügt werden können. Anhand der Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass die zerspanende Schweißnahtvorbereitung für das Laserstrahlschweißen von Magnesiumfeinblechen durch das Laserstrahlschneiden substituiert werden kann.

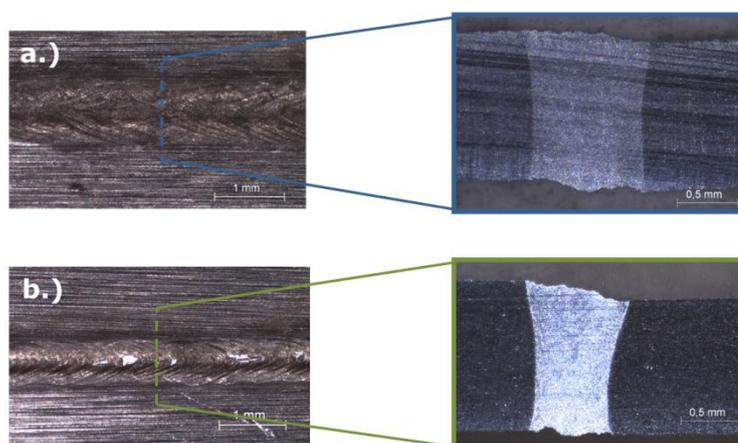


Abbildung 4: Makroschliff einer laserstrahlgeschweißter Verbindungen aus AZ31 Abhängigkeit von der Schweißnahtvorbereitung:

- a.) lasergeschnittene Fügekannte
- b.) gefräste Fügekannte

Durch die Schweißnahtvorbereitung mittels Laserstrahlschweißen ergeben sich Vorteile wie kürzere Prozesszeiten durch höhere Bearbeitungsgeschwindigkeiten und ein geringer Spanaufwand. Beim Fräsen besteht die Gefahr, dass durch den Kontakt mit dem Fräser Stahlpartikel auf der Magnesiumoberfläche verbleiben. Bereits geringste Mengen von metallischen Einschlüssen würden das Korrosionsverhalten der Verbindung negativ beeinflussen. Da das Laserstrahlschneiden ein berührungsloses Verfahren ist, kann dieser Nachteil gänzlich ausgeschlossen werden. Des Weiteren können beim Laserstrahlschneiden auch Kurven oder Radien ausgeschnitten werden, die anschließend durch Laserstrahlschweißen verschweißt werden können. Dieses in Abbildung 5 dargestellte Verfahren wird auch als „Tailored Engineered Blanks“ bezeichnet. Die Anwendungsgrenzen der Magnesium Flachprodukte werden durch die Umsetzung dieser Prozessvariante erweitert. Mit den auf diese Weise hergestellten Laserstrahlschnitten wurden im nächsten Arbeitsschritt die Anwendungsgrenzen der Verfahrenskombination untersucht. Zunächst wurde eine ca. 1700 mm langer und 2 mm dicke Probe AZ31 durch Laserstrahlschneiden getrennt und anschließend durch Laserstrahlschweißen gefügt. Die Schweißnaht erfüllt die Kriterien der Nahtgüte „B“ in Anlehnung an die Norm DIN EN 13919-2. Das

Schneid-Schweißen von so genannten *Tailored-Engineered-Blank* ist ebenfalls möglich (siehe Abbildung 5 unten). Dazu wurde eine Sinuswelle durch Laserstrahlschneiden ausgeschnitten und diese anschließend durch Laserstrahlschweißen gefügt.

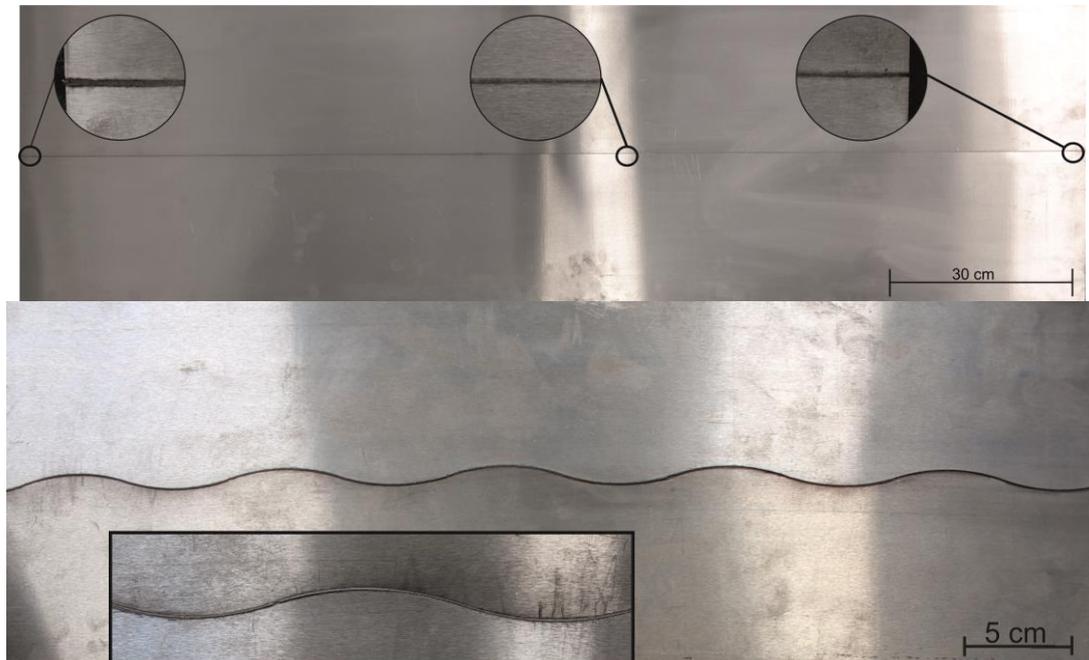


Abbildung 5: Beispiel für hergestellte Tailored Blanks (oben) und für hergestellte Tailored-Engineered-Blanks (unten)

2.1.1.3 B5- Erweiterung der Anwendungsgrenzen und Optimierung der Nahteigenschaften beim Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff

Das Ziel des Arbeitspunktes besteht darin, den Zusatzdraht beim Laserstrahlschweißen diskontinuierlich, angepasst an die jeweilige vorliegende Spaltbreite, zuzuführen. Dadurch können bei unterschiedlichen Spaltbreiten Schweißverbindungen mit gleichbleibender Qualität erzeugt werden (ohne unzulässige Nahtüberhöhungen bzw. Naht-einfall).

Zunächst wurden Untersuchungen durchgeführt, um die Prozessstabilität- und die Spaltüberbrückbarkeit beim Laserstrahlschweißen durch eine an die schwankende Spaltbreite angepasste, diskontinuierliche Zusatzwerkstoffzuführung im Schweißprozess zu ermitteln. Dazu wurden optimale Prozessparameterfenster (Fokuslage, Laserleistung, Schweißgeschwindigkeit, Drahtvorschubgeschwindigkeit) in Abhängigkeit der Spaltbreite ermittelt und bewertet. Die Spaltbreite wurde jeweils um Schritte von 0,1 mm erhöht und die entsprechenden Prozessparameter angepasst, bis die Schweißverbindungen die erforderliche Güte erreichten. Als Bewertungsrichtlinie wurde dafür auf die Norm DIN EN 13919-2 zurückgegriffen. Es wurden Parameterkombinationen angestrebt, bei denen die Naht-, bzw. die Wurzelüberhöhung möglichst gering sind.

Anhand dieser Parameterfenster wurden im nächsten Arbeitsschritt systematisch Algorithmen für die diskontinuierliche Parameteranpassung bei veränderlichen Spaltbreiten abgeleitet.

Schweißgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Spaltbreite:

Um die während des Schweißprozesses zu regelnden Prozessparameter einzuschränken, wurde die Schweißgeschwindigkeit auf 3 m/min festgelegt. Das hat den Vorteil, dass bei Korrekturen der Prozessparameter nicht in die in die Steuerung des 6-Achs-Industrieroboters eingegriffen werden muss.

Drahtgeschwindigkeit und Laserleistung in Abhängigkeit der Spaltbreite:

Um den Grundwerkstoff aufzuschmelzen und eine als „gut“ zu bewertende Schweißverbindung herzustellen, ist je nach Blechdicke eine gewisse Mindestlaserleistung notwendig. Je nach Spalt kommt es zu Verlusten, da ein Teil des Laserstrahls durch den Spalt entweicht und somit nicht vom Bauteil absorbiert wird. Die Laserleistung muss daher in Abhängigkeit mit steigender Spaltbreite erhöht werden.

Da bei größer werdendem Spalt auch das zu füllende Nahtvolumen steigt, muss entsprechend auch die Fördergeschwindigkeit des Zusatzdrahts steigen.

Es ergibt sich für die Laserleistung und Drahtgeschwindigkeit ein linearer Zusammenhang in Abhängigkeit der Spaltbreite (s. Abb. 6).

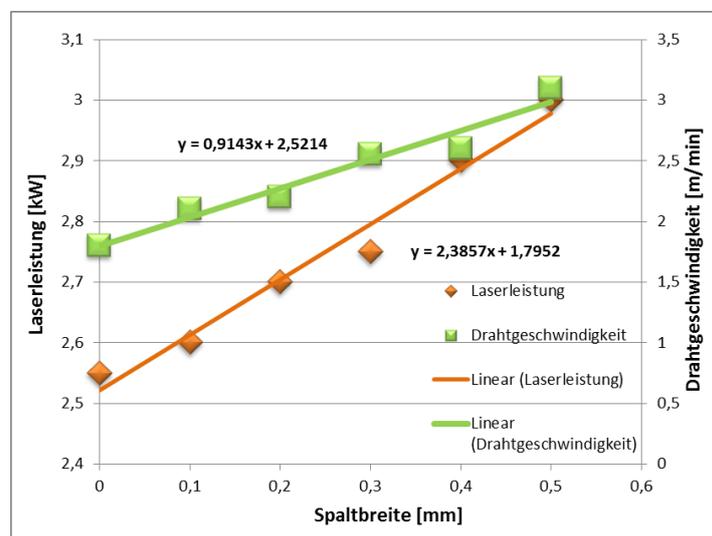


Abbildung 6: Laserleistung und Drahtgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Spaltbreite

Es wurden folgende Zusammenhänge der Prozessparameter in Abhängigkeit der Spaltbreite ermittelt:

$$v_{zw} = [1,8 + 2,5 \times b_{sp}] \text{ m/min}$$

$$P_L = [2,5 + b_{sp}] \text{ kW}$$

(v_{zw} = Geschwindigkeit Zusatzwerkstoff, b_{sp} = Spaltbreite, P_L = Laserleistung)

Fokusslage in Abhängigkeit von der Spaltbreite:

Um die Bauteilkanten aufzuschmelzen, muss mit steigender Spaltbreite auch der Brennfleckdurchmesser des Laserstrahls steigen. Daher muss die Fokusslage ebenfalls spaltbreitenabhängig vergrößert werden. Zunächst wurden theoretische Betrachtungen vorgenommen, um den Zusammenhang zwischen Brennfleckdurchmesser und Fokusslage zu untersuchen. In Bild 7 ist der Zusammenhang zwischen der Fokusslage und dem Brennfleckdurchmesser, der so genannten Strahlkaustik, dargestellt. Ab einer Fokusslage von 2 mm ist die Strahlkaustik quasi linear ($y = 0,1554 \times x + 0,06$). Mit geringfügigen Abweichungen kann die Fokusslage als direkt proportional zum Brennfleckdurchmesser ($y \approx 0,16 \times x$) angenommen werden (siehe Bild 7).

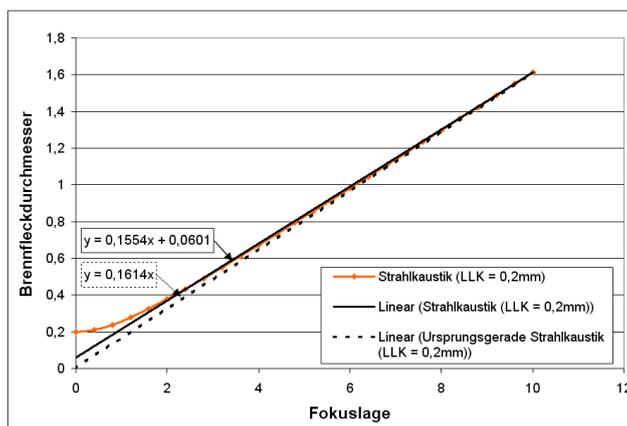


Abbildung 7: theoretischer Zusammenhang zwischen dem Brennfleckdurchmesser und der Spaltbreite

Daraus kann abgeleitet werden, dass die Fokusslage in erster Näherung proportional zur Spaltbreite vergrößert werden muss. Diese theoretischen Vorbetrachtungen wurden durch experimentelle Untersuchungen bestätigt. Es wurde folgender Zusammenhang zwischen Fokusslage und Spaltbreite ermittelt:

$$f = [10 \times b_{sp}] \text{ mm}$$

In einem weiteren Arbeitsschritt soll ein Messsystem in die Schweißperipherie integriert werden, das die Kanten der zu fügenden Bauteile erkennt und online die Spaltbreite ermittelt. Ziel ist es, die ermittelten Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern und der Spaltbreite mit dem Messsystem zu koppeln, sodass im Schweißprozess eine automatische, spaltbreitenabhängige Anpassung der Prozessparameter erfolgt. Dazu wurde entsprechende Hardware ausgewählt, die zur Erfassung der Spaltbreite in Echtzeit geeignet ist. Gewählt wurde der Laser-Profilscanner-System LJ-V 7000 der Firma Keyence. Das System besteht aus folgenden Komponenten (siehe Bild 8):

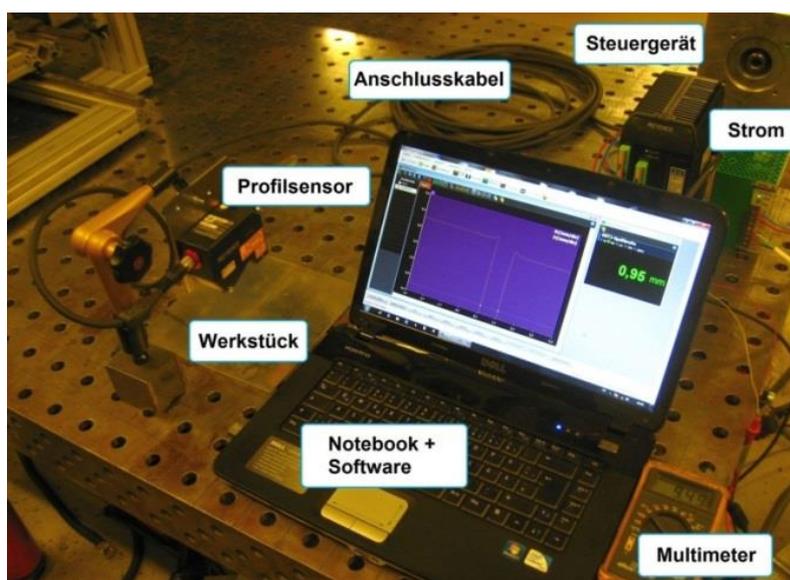


Abbildung 8: Versuchsaufbau des Laser-Profilscanner-Systems LJ-V 7000 der Fa. Keyence zur online Spaltbreitenerfassung

- Scan-Einheit, bestehend aus Profilsensor und Anschlusskabel
 - Erzeugung eines Laserstrahls (405 nm) und Aufweitung zu einer Linie
 - Diffuse Reflexion von Messoberfläche und Fokussierung durch vorgelagerte Optik
 - Abbildung auf CMOS-Chip, Signalverarbeitung und Datenübermittlung an Steuergerät
- Control-Einheit, bestehend aus Steuergerät und Stromversorgung
 - Speichern, Lesen und Ausgabe (digital, analog) von Datensätzen
 - Übertragung der Daten an Notebook zur Visualisierung
- Anzeige-Einheit, bestehend aus Notebook und spezifischer Software
 - Darstellung und Vermessung des erfassten Profils (in 2D/3D)
 - Einstellung von Mess-, Korrektur-, Positionsgrößen

Bei diesem System besteht die Möglichkeit, den Messwert in verschiedenen Formen auszugeben. Dies kann digital über Ethernet, USB und RS-232C, sowie analog als Spannung erfolgen. Als erster Lösungsansatz wird die Ausgabe als analoge Spannung näher betrachtet. Sie kann mit Hilfe von Ausgangsbedingungen unterschiedlich linear skaliert werden. Dadurch ist es möglich, die Kennlinie an die anzuschließenden Komponenten anzupassen (siehe Abbildung 9).

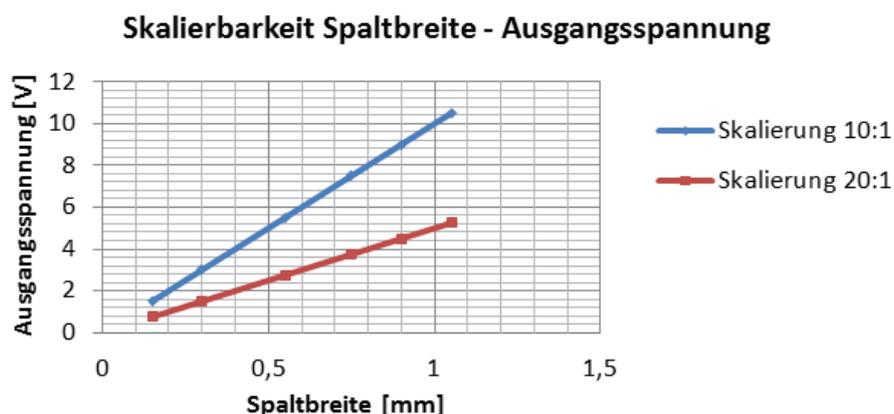


Abbildung 9: Zusammenhang zwischen der Ausgangsspannung des Linienlasers und der vorliegenden Spaltbreite

Um die experimentellen Versuche durchführen zu können, wurde im nächsten Arbeitsschritt eine Vorrichtung konzipiert, welche die Montage des Profilsensors ermöglicht und darüber hinaus weitere, für das Projekt relevante Anforderungen, erfüllt:

- a) Einstellbare Drahtzuführung
- b) Schutzgaszufuhr
- c) Integrationsmöglichkeit eines Laserprofilscanners
- d) Integrationsmöglichkeit für das Online-Qualitätssicherungskonzept „WeldEye“

a) + b): Einstellbare Drahtzuführung + Schutzgaszufuhr

Grundsätzlich sollte beim Laserstrahlschweißen von Magnesium eine optimale Schutzgasabdeckung der Schweißnaht bzw. der schweißnahtnahen Bereiche erfolgen (siehe Bild 10 mitte/rechts). Dazu ist eine Schutzgaszuführung schleppender Anordnung erforderlich. Beim konventionellen Versuchsaufbau erfolgt die Zusatzdrahtzuführung beim Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff von der entgegengesetzten Seite (siehe Bild 10 Mitte). Hinsichtlich des Schweißprozesses hat das zur Folge, dass der Zusatzdraht stechend zugeführt wird. Prozesstechnisch resultieren dadurch jedoch erhebliche Nachteile: Wenn der Zusatzwerkstoff nicht vollständig aufgeschmolzen wird, dann wird das freie Drahtende mit Schweißgeschwindigkeiten von bis zu 7 m/min in das Blech „geschoben“, was zu erheblichen Schäden an der Peripherie führen kann. Um hinsichtlich der Schutzgasabdeckung und der Drahtzuführung optimale Bedingungen zu schaffen, wurde eine koaxiale Schutzgaszuführung in die Vorrichtung integriert (siehe Bild 10 rechts). Dazu wurden Standard-Düsen der Fa. Fronius International GmbH aus dem MSG-Bereich verwendet. Der Vorteil besteht darin, dass diese zum einen langzeiterprobt sind und zum anderen in verschiedensten Durchmessern kostengünstig und schnell beschafft werden können.

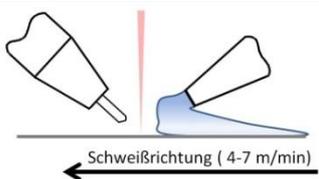
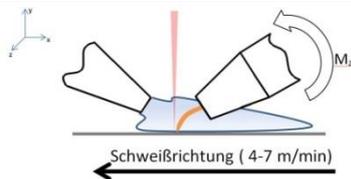
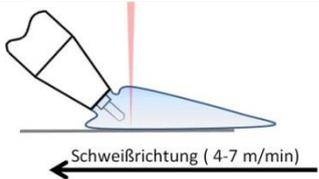
nicht geeignet (Zusatzdraht schleppend- SG-Düse Stechend)	nicht geeignet (SG-Düse schleppend- Zusatzdraht Stechend)	geeignet (SG-Düse und Zusatzdraht schleppend)
		
unzureichende Schutzgasabdeckung	großes Gefahrenpotential beim Verkanten/ Anschweißen des Drahtes	gute Schutzgasabschirmung, optimale Drahtzuführung

Abbildung 10: Vor- und Nachteile der Positionierungsmöglichkeiten von Schutzgas- und Zusatzdrahtzuführung

Bei der konventionellen Zusatzdrahtzuführung werden nach dem Positionieren des Zusatzdrahtes die Klemmschrauben an der Vorrichtung angezogen. Durch das Anzugsmoment der Klemmschrauben verändert sich jedoch die Position der Drahtzuführung, was ein iteratives Neueinstellen zur Folge hat. Um dies zu vermeiden wurde die Zusatzdrahtzuführung mit stufenlos verstellbaren Positioniertischen der Fa. Norelem Normelemente KG ausgestattet. Durch diesen Versuchsaufbau wird gewährleistet, dass die Position Zusatzdraht präzise eingestellt werden kann. Durch die entsprechende Skala an den Positioniertischen wird ein reproduzierbares Positionieren der Zusatzdrahtzuführung sichergestellt. In Bild 11 ist links die konventionelle Anlagentechnik der Zusatzdraht- und Schutzgaszuführung dargestellt, und im Vergleich dazu rechts die im Rahmen des Projektes weiterentwickelte Variante.

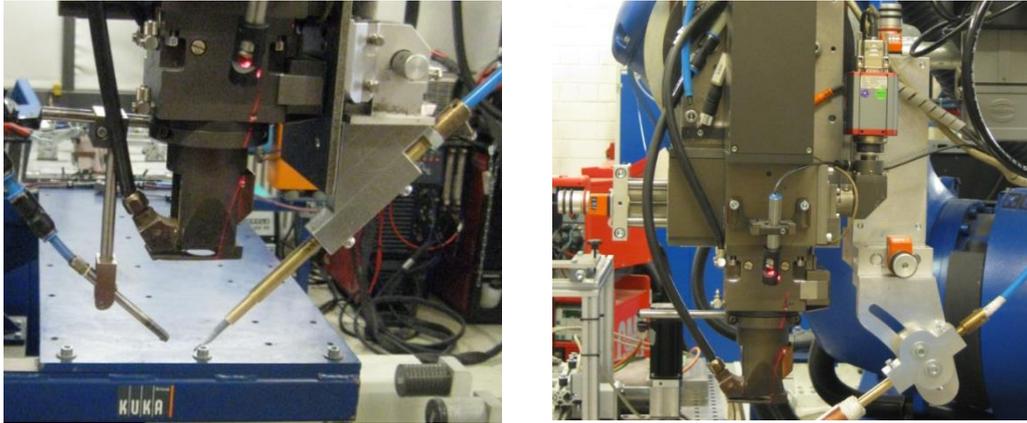


Abbildung 11: konventioneller Versuchsaufbau mit stechender Schutzgaszuführung und schleppender Zusatzdrahtzuführung (oben rechts); optimierter Versuchsaufbau mit stufenlos einstellbaren Positioniertische und schleppender Zusatzdrahtzuführung und koaxiler Schutzgasabdeckung (oben links)

c + d: Integrationsmöglichkeit eines Laserprofilscanners und des Online-Qualitätssicherungskonzepts „Weld-Eye“

Konstruktive Anbindung der Sensoren an die Schweißoptik:

Bisher werden der Profilsensor und das „Weldeye-System“ getrennt voneinander an der Schweißoptik montiert. Dabei stellte sich als großer Nachteil heraus, dass zum einen die Störkörpergeometrie signifikant in ihren Abmessungen wächst. Ein sicheres Arbeiten ohne Kollision mit Spannmitteln o.Ä. ist nicht, oder nur stark eingeschränkt möglich. Zum anderen kann die jetzige vorhandene Halterung nicht angebaut werden, wenn die Zusatzdrahtzuführung montiert ist, da gleiche Fixierungspunkte benutzt werden. Jedoch ist die problemlose Befestigung aller benötigten Komponenten von essentieller Bedeutung, um die Versuche durchführen zu können. Aus diesem Grund erfolgte die in Abbildung 12 dargestellte Neukonstruktion der Halterung unter folgenden Gesichtspunkten:

- schnelle und einfache Montage / Demontage
- fester Halt und optimale Position der einzelnen Komponenten
- schnelle Justierung der einzelnen Komponenten
- schlankes Design für beengte Arbeitsverhältnisse
- keine Beeinträchtigung vorhandener Anbauten

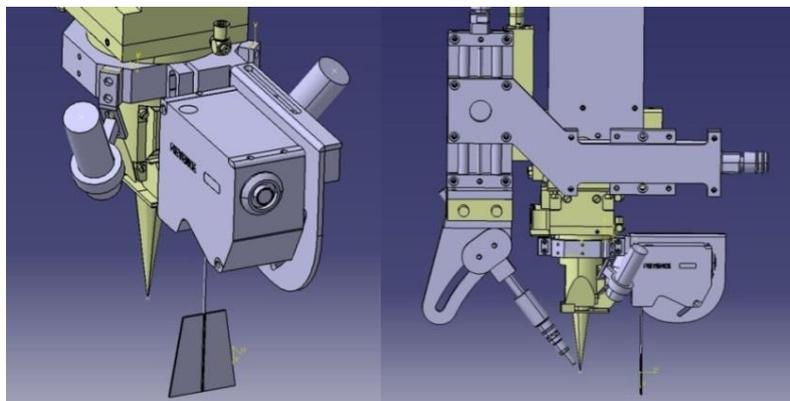


Abbildung 12: Integration des Laserprofilscanners und der Zusatzbeleuchtung für das „Weldeye“ System der Fa. Lessmüller an die Schweißoptik

Das Lösungskonzept zur Entwicklung einer diskontinuierlichen, spaltbreitenabhängigen Zusatzdrahtförderung sieht abschließend die Einbindung des Laser-Profilensensor-Systems in die vorhandene Robotersteuerung vor. Da dabei die Drahtfördergeschwindigkeit in Abhängigkeit der Spaltbreite gesteuert werden soll, muss die Spaltbreite als Regelgröße in die Robotersteuerung integriert werden. Dies kann durch die an Abbildung 13 dargestellten Varianten V1 – V3 erfolgen. Die verschiedenen Varianten haben Vor- und Nachteile hinsichtlich der Datenverarbeitungsgeschwindigkeit, der Integrationsmöglichkeit in die Roboterprogrammierung, der Funktionalitäten sowie dem benötigten finanziellen Aufwand.

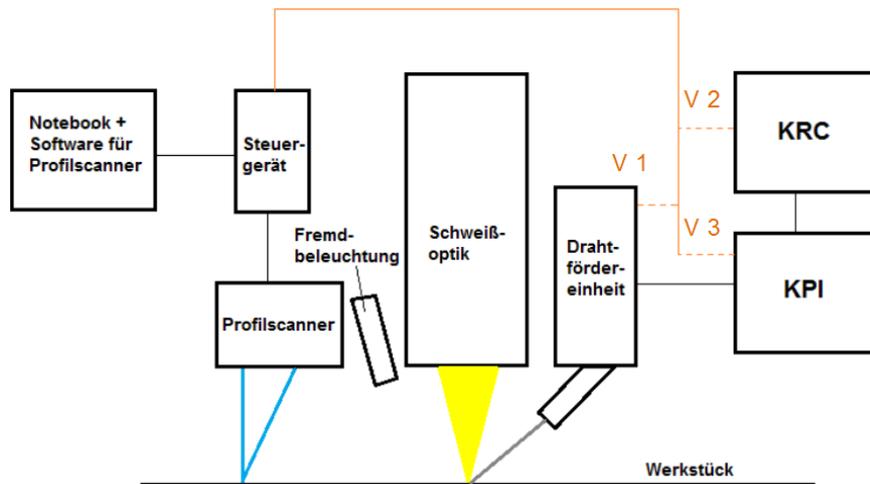


Abbildung 13: Integrationsmöglichkeiten der Regelgröße „Spaltbreite“ in die Robotersteuerung für die Ansteuerung einer diskontinuierlichen Zusatzdrahtzuführung

Die jeweiligen Integrationsvarianten V1-V3 wurden intensiv geprüft. Da die Drahtfördereinheit in ein geschlossenes BUS-System integriert ist, kann die zunächst favorisierte Variante 1 nicht umgesetzt werden. Aufgrund der Verarbeitungszeiten, die durch die hohen Schweißgeschwindigkeiten beim Laserstrahlschweißen sehr gering sein müssen, ist Variante 3 ebenfalls ungeeignet. Die einzige theoretische Möglichkeit bei Nutzung der vorhandenen Anlagentechnik prozessgerecht die Drahtfördergeschwindigkeit zu beeinflussen ist in Variante 2. Zur Realisierung dieser Variante müssen die digitalen Eingänge der Steuerung erweitert werden. Infolge dessen muss ein Softwareupdate des Industrieroboters durchgeführt und der neue Eingang entsprechend in die Steuerung integriert werden. Die durchzuführenden Arbeitsschritte sind im Rahmen des Projektes weder finanziell, noch zeitlich zu stemmen, weswegen die finale Umsetzung des Systems nicht realisiert werden konnte.

Unabhängig davon wurde systematisch ein Konzept erarbeitet, das eine diskontinuierliche, an die Spaltbreite angepasste Zusatzdrahtzuführung ermöglicht. Es wurde gezeigt, dass die Spaltbreite online vermessen, und die Daten entsprechend weitergegeben werden können. Des Weiteren wurden die Prozessparameterfenster in Abhängigkeit der Spaltbreite ermittelt, welche die Grundlage für das System darstellen. Aufgrund der zeitlich aufwändigen und äußerst komplexen Einbindung des ermittelten Parameters der Spaltbreite in das Bussystem der Robotersteuerung konnte im Rahmen des Projektes allerdings keine vollständige Regelung generiert werden, die den Zusatzwerkstoff in Abhängigkeit der online vermessenen Spaltbreite fördert.

2.1.1.4 B6- Entwicklung eines Konzeptes für ein Nahtverfolgungssystem für das Laserstrahlschweißen von Tailored Products

In dem Arbeitspunkt B6 soll gemäß Arbeitsplan ein Konzept für ein Nahtverfolgungssystem zum Laserstrahlschweißen von Tailored Products aus Magnesium entwickelt werden. Die wichtigsten Anforderungen an das System sind dabei zum einen das Schweißen bei technischem Nullspalt, wodurch der Spalt optisch nur schlecht/nicht wahrnehmbar ist, und zum anderen die prozesssichere Spalterkennung auch bei hohen Schweißgeschwindigkeiten, woraus die Anforderung einer entsprechenden Dynamik des Systems resultiert. In den bisherigen Untersuchungen wurden bereits verschiedene Konzepte analysiert und hinsichtlich deren Eignung verglichen. Als geeignete Alternative zu den konventionellen optischen und taktilen Nahtverfolgungssystemen kommt der Einsatz eines neuartigen, berührungslos arbeitenden Systems in Frage, welches auf dem Messprinzip der Wirbelstromtechnik basiert.

Da die Fa. IMQ-Ingenieurbetrieb für Materialprüfung, Qualitätssicherung und Schweißtechnik- GmbH bereits über vertieftes Know-How auf dem Gebiet der Wirbelstromtechnik verfügt, wurden die Forschungstätigkeiten in diesem Arbeitspaketes überwiegend von der Fa. IMQ durchgeführt.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde ein realitätsnaher Laboraufbau zur Ermittlung der Anwendungsgrenzen hinsichtlich Funktionalität, Beeinflussung des Systems durch die Stoßgeometrie und den Materialeigenschaften sowie der Anwendbarkeit des Systems unter industriellen Bedingungen konzipiert. Die Geräteeinstellungen des verwendeten MAT Wirbelstromsensors sind Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3: Kennwerte des verwendeten Wirbelstromsensors

Frequenz:	50kHz
Vorverstärker:	12 dB
Hauptverstärker:	36 dB
Y-Spreizung:	5 dB
Phase	331°
Tiefpass	100Hz
Hochpass	stat.

In den Versuchen wurde ermittelt, dass der Arbeitsabstand zwischen Wirbelstromsensor und Blech 5 mm nicht übersteigen darf. Zur Stoßauffindung ist der Imaginärteil des Messsignals geeignet. Der Realteil kann für eine Abstandsüberwachung genutzt werden (siehe Bild 14 oben), womit ebenfalls eine automatische Abstandsregelung realisierbar wäre. Der zu fügende Spalt ist, wie in Bild 14 unten dargestellt, auch bei verschiedenen Störeinflüssen noch prozesssicher detektierbar. Für die praktische Umsetzung des Systems, hinsichtlich der Anordnung der Sensoren, wurden zwei Möglichkeiten näher betrachtet. Zum einen der Einsatz von einem Wirbelstromsensor, der quer zum Stoß fährt, und zum andern der Einsatz zweier Wirbelstromsensoren, die längs zum Stoß fahren. Die Variante der Nutzung von nur einem Wirbelstromsensor bietet den Vorteil, dass ein Sensor eingespart werden kann. Zusätzlich kann unabhängig von Geometrie und Material der zu fügenden Bauteile gearbeitet werden. Der wesentliche Nachteil ist jedoch, dass die maximal mögliche Schweißgeschwindigkeit durch ein zwingend erforderliches Pendeln des Sensors über dem Fügespalt eingeschränkt wird. Bei der Variante mit der

Verwendung von zwei Sensoren ist hingegen eine sehr schnelle Regelung möglich, weswegen diese Variante für die weiteren Untersuchungen ausgewählt wurde.

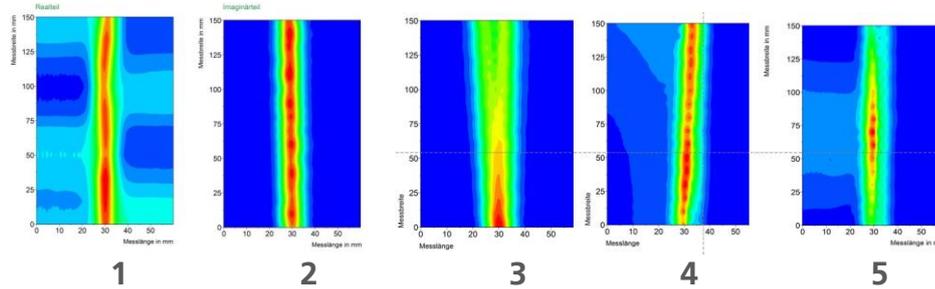


Abbildung 14: Detektion des Fugespaltes mittels Wirbelstrommesstechnik gemessener Realteil (1) und Imaginärteil (2) bei technischen Nullspalt Ermittelter Spalt unter diversen Störeinflüssen: aufweitender Spalt (3), überlappende Bleche (4) und durchhängendes Blech (5)

Es wurde ein Versuchsaufbau mit regelbarer Linearachse und entsprechender Steuerung entwickelt (siehe Bild 15). Der Sensor verfährt zunächst quer zum Stoß und detektiert die Stoßposition der Bauteile. Der Anfangspunkt der Naht wird dadurch automatisch gefunden. Die Regelgröße der Linearachse ist dabei das Sensorsignal, dass sehr empfindlich auf Änderungen der Stoßposition reagiert. Änderungen der zu schweißenden Bahn werden berührungslos vom Sensor erfasst und die das Messsignal entsprechend an die Steuerung weitergegeben. Dort werden die Daten in Echtzeit verarbeitet und die Linearachse weitergegeben. Die verfährt entsprechend und Positioniert den Sensor entsprechend des ermittelten Sollwertes.

Das berührungslos arbeite Systems zur Erfassung von zu verschweißenden Bauteilkanten wurde auf die Funktionalität entsprechend der gestellten Anforderungen seitens erprobt und seitens der Fa. IMQ-Ingenieurbetrieb für Materialprüfung, Qualitätssicherung und Schweißtechnik- GmbH den entsprechenden Projektbearbeitern des Fraunhofer IWU präsentiert. Weiterführende Untersuchungen zur Anwendbarkeit des Systems bei industriellen Bedingungen (Schmauch, Staub, etc.) sowie der Ermittlung der Anwendungsgrenzen hinsichtlich der maximal möglichen Schweißgeschwindigkeiten werden in Folgeprojekten außerhalb des Wachstumskerns weiter verfolgt.

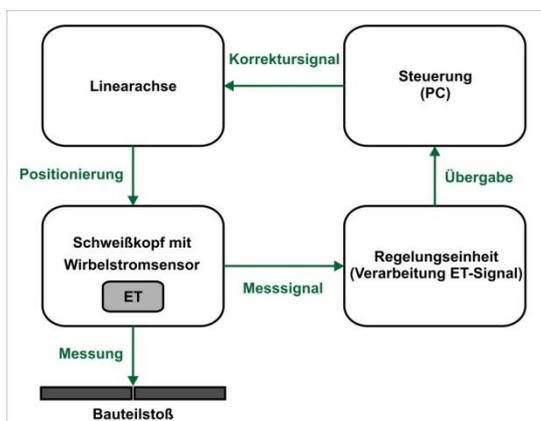


Abbildung 15: Regelungskonzept (links) und Versuchsaufbau mit steuerbarer Linearachse (rechts)

2.1.2 Eigenschaftsermittlung

2.1.2.1 B8- Entwicklung der Eigenschaften von Laserschweißnähten hinsichtlich einer nachgelagerten Umformung bzw. von Laserstrahlschweißnähten an umgeformten Halbzeugen B9- Kennwertermittlung und Festigkeitskonzept

Der Schwerpunkt dieses Arbeitspunktes stellt die Erstellung eines Festigkeitskonzepts für den Werkstoff AZ31 bzw. dessen Schweißverbindungen dar. Das wesentliche Ziel besteht darin, Aussagen zum Verhalten bei erhöhten Beanspruchungsgeschwindigkeiten zu treffen und dadurch die Crashesicherheit von Schweißverbindungen aus dem Werkstoff AZ31 zu ermitteln und zu bewerten.

Um die Crashesicherheit von Verbindungen zu bewerten, wurden Hutprofile zerstörend mit dem Fallhammersversuch untersucht. Da es sich bei Hutproben um umgeformte Bauteile handelt, die anschließend verschweißt werden, wurden die entsprechenden Arbeitspunkte B8 und B9 zusammengefasst. Aktuell existiert keine Norm, in der die geometrischen Abmessungen für die Hutproben für den Werkstoff Magnesium festgelegt werden. Um diesbezüglich eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde auf das DVS Merkblatt 0938 „Lichtbogenlöten“ zurückgegriffen. Sowohl die Probengeometrie, als auch der Versuchsaufbau werden in dieser Norm definiert (siehe Abbildung 16 links).

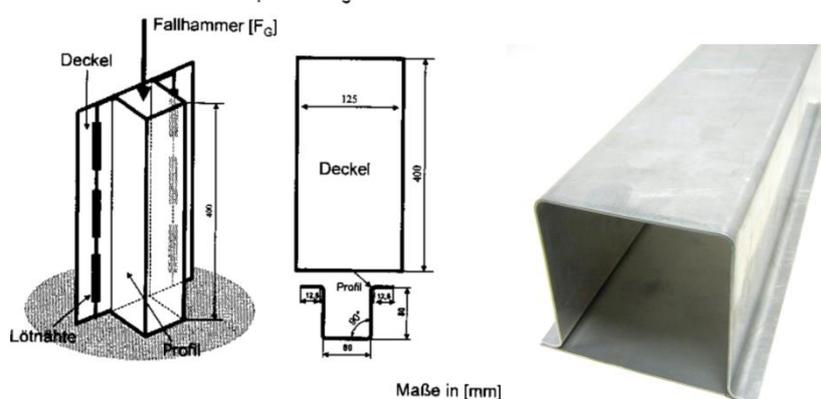
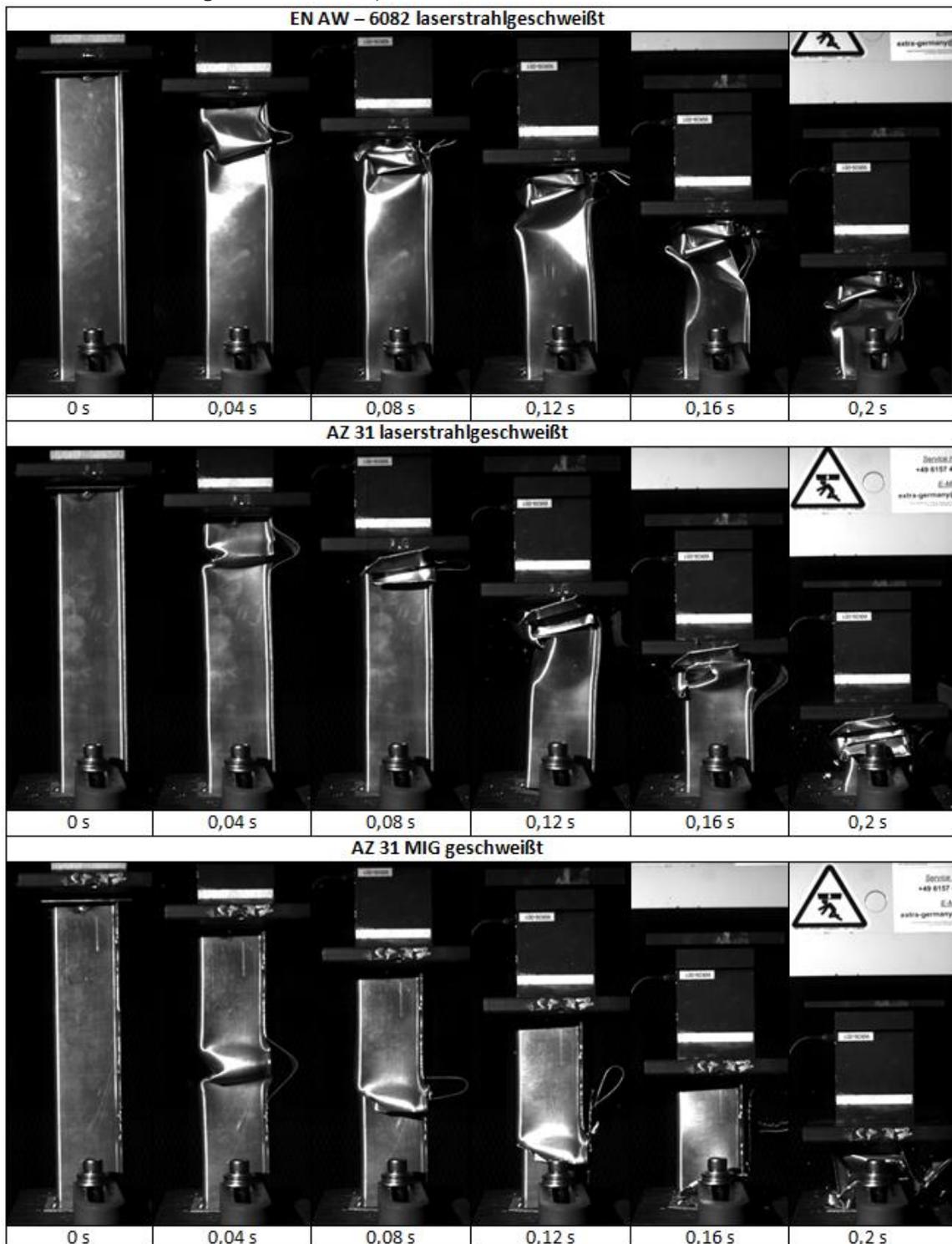


Abbildung 16: Hutprobengeometrie nach DVS Richtlinie 0938 (links) sowie Hutprobe aus dem Werkstoff AZ 31 (rechts)

Um die Hutproben aus dem Werkstoff AZ31 herstellen zu können, mussten eigens für die Versuche spezielle Biegewangen mit entsprechenden Radien hergestellt werden. Eine fertig gebogene Hutprobe ist in Abbildung 16 (rechts) dargestellt. Insgesamt wurden 8 geometrisch identische Hutproben aus AZ31 hergestellt, wovon 4 durch Laserstrahlschweißen- und 4 durch MIG-Schweißen gefügt wurden. Um einen Vergleich zu im Karosseriebereich etablierten Legierungen generieren zu können, wurden 4 ebenfalls geometrisch identische Hutproben mit gleicher Blechdicke aus dem Werkstoff EN AW-6082 hergestellt und untersucht. Die Legierung EN AW-6082 stellt bei vergleichbaren Festigkeitswerten, jedoch höherer Dichte ein Pendant zu AZ31 im Leichtbaubereich dar. Um die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können, wurden den von mit einer High-Speed-Kamera aufgenommen Sequenzen der Fallturmversuche an den jeweiligen Zeiten die entsprechenden Bilder entnommen und zusammengefasst. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Fallturmversuche an lasergeschweißten Hutproben aus EN AW-6082 (oben) und AZ31 (mitte) sowie an MIG-geschweißten Hutproben aus AZ31 (unten)



Die Hutproben der Aluminiumlegierung EN AW-6082 versagen duktil. Die Verformung der Hutproben erstreckt sich bis weit vor den Bereich des Wirkbereiches des Fallhammers. Die kinetische Energie des Hammers wird vollständig durch plastische Verformung der Hutproben abgebaut. Im Vergleich dazu ist bei der Magnesiumlegierung AZ 31 das Bruchverhalten deutlich spröder. Die kinetische Energie des Fallhammers wird teilweise durch plastische Verformung, jedoch zum größten Teil durch Bersten und Brechen der

Hutproben abgebaut. Dies führt unter anderem dadurch, dass sich während des Zerstörens der Hutprobe Splitter aus den Bereichen mit hoher Umformung lösen (siehe Bild 17).

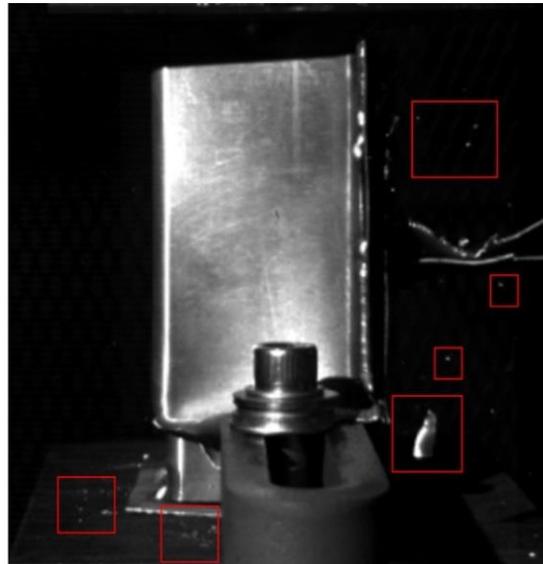


Abbildung 17: Detailaufnahme beim Fallturmversuch einer MIG-geschweißten Hutprobe aus AZ 31

Trotz des spröderen Materialversagens von AZ31 sind Energieaufnahmen der lasergeschweißten Hutproben aus EN AW-6082 und AZ31 miteinander vergleichbar (siehe Bild 18). Der dafür benötigte plastische Knautsch-Weg ist jedoch bei den Hutproben aus dem Werkstoff AZ31 größer als bei EN AW-6082. Dies ist in Tabelle 3 anhand der Position des Fallhammers in Bezug der jeweiligen Zeit erkennbar.

Die Energieaufnahme der Hutproben aus MIG-geschweißtem AZ31 ist im Vergleich zu den lasergeschweißten Hutproben etwa 20 % geringer. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die MIG-Nähte spröde versagen und infolge dessen die Gesamtsteifigkeit durch das Ablösen der Rückwand sinkt. Das Ablösen der Rückwand von der MIG-geschweißten Hutprobe aus AZ31 geht aus Tabelle 3 unten hervor.

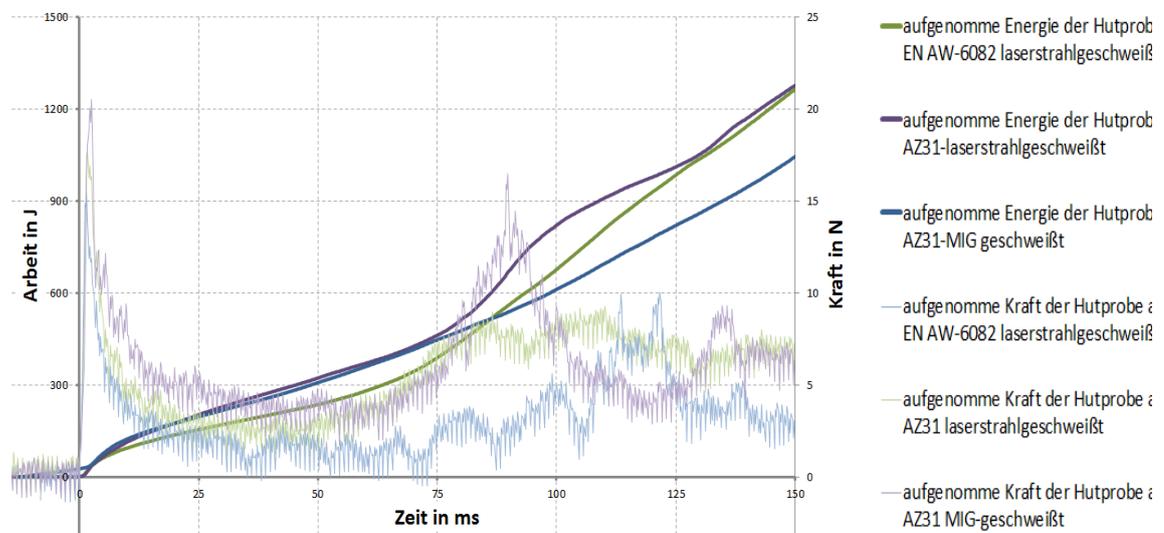
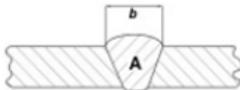
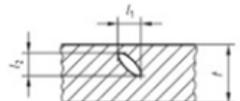
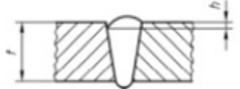
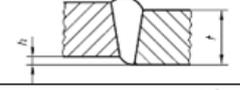


Abbildung 18: Energie- und Kraftaufnahme der Hutproben beim Fallhammerversuch

2.1.3 Entwicklung eines Qualitätssicherungskonzepts

Im Arbeitspunkt B9 soll die Eignung eines Qualitätssicherungskonzepts zum Laserstrahlschweißen von *Tailored Blanks* aus Magnesium untersucht werden. Dazu sollen zunächst die qualitativen und quantitativen Kriterien zusammengefasst werden. Da es derzeit noch keine Norm für das Schweißen von Magnesium gibt, wurde zunächst auf die Norm DIN EN ISO 13919-2 „Schweißen - Elektronenstrahl- und Laserstrahl-Schweißverbindungen; Richtlinie für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten - Teil 2: Aluminium und seine schweißgeeigneten Legierungen“ zurückgegriffen. Die relevanten Bewertungskriterien sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Fehlerkatalog beim Schweißen von Tailored-Blanks aus Magnesium

Bewertung in Anlehnung an die DIN EN ISO 13919 – 2:2001 Bewertungsgruppe B			
Nr.	Bild	Unregelmäßigkeit/Benennung	Grenzwert
0		Nahtfläche, Nahtbreite	ca.
2		Porosität und Poren	$l \leq 0,36 \text{ mm}$ $f \leq 3\%$
11		Randkerben	$h \leq 0,06 \text{ mm}$
14		Kantenversatz	$h \leq 0,12 \text{ mm}$
12		Nahtüberhöhung	$h \leq 0,38 \text{ mm}$
13		Wurzelüberhöhung	$h \leq 0,38 \text{ mm}$
16		Nahtunterwölbung	$h \leq 0,06 \text{ mm}$
Bewertungsklasse			

Das größte Problem beim Herstellen von *Tailored Blanks* aus Magnesium stellt das Entstehen von Löchern insbesondere beim Schweißen von großen Längen in der Schweißnaht dar. Obwohl deren Durchmesser in den meisten Fällen 1/10 mm unterschreitet, sind diese als unzulässig zu bewerten. Das Detektieren dieser Löcher ist sehr kompliziert und vor allem zeitaufwändig. Um das Qualitätsmanagement zu optimieren, wurde ein online-Prozessüberwachungssystem der Firma Lessmüller hinsichtlich der Eignung als geeignetes Mittel zur Qualitätssicherung zum Schweißen von Tailored-Blanks aus Magnesium untersucht.

Das online-Prozessüberwachungssystem „Weldeye-System“ der Firma Lessmüller setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Beleuchtungssystem, bestehend aus Konverter und Zusatzbeleuchtung
 - Erzeugung einer Laserstrahlung bestimmten Wellenlänge (806 nm)
 - Aufweitung zu einer definiert großen Beleuchtungsfläche auf der Werkstückoberfläche
- Empfängersystem, bestehend aus dichroitischem Spiegel und Hochgeschwindigkeitskamera
 - Filterung der reflektierenden Gesamtstrahlung (Passierbereich ca. 805 ± 5 nm)
 - Erfassung der gefilterten Strahlung und Weitergabe der Bilddaten zur Auswertung
- Auswerteeinheit, bestehend aus Notebook und spezifischer Software
 - Verarbeitung und Visualisierung der Bilddaten → Livebildentstehung (in Graustufen)
 - Aufzeichnung und Speicherung der Videos → Schweißprozessanalyse
 - Möglichkeit der Fehleranalyse und Online-Prozessüberwachung

Integration des Qualitätssicherungskonzepts in die Laserbearbeitungszelle:

Bisher erfolgt die Positionierung der Schweißoptik durch eine Beobachtungskamera, einen seitlich angebrachten Linienlaser und dem Programmierpanel. Die Visualisierung der programmierten Schweißbahn erfolgt auf einem konventionellen Monitor. Durch die Einbindung des „Weldeye-Systems“ in die Laserzelle kann das Programmieren der Schweißbahn mit abgedeckt und der Funktionsumfang erweitert werden. Die Hochgeschwindigkeitskamera, Typ CM 1.0, wird anstelle der herkömmlichen Beobachtungskamera montiert und angeschlossen. Der Konverter wird ebenfalls an der Hochgeschwindigkeitskamera befestigt. Die Zusatzbeleuchtung wird durch eine eigens für die Versuche angefertigte Vorrichtung mit der Schweißoptik verbunden (siehe Abbildung 12). Durch feststellbare Kugelgelenke lässt sich die Fremdbeleuchtung optimal auf den zu erfassenden Bereich einstellen. Eine Justierung der Feldgröße und Bildschärfe ist ebenso möglich und durchführbar, jedoch nur mit einer spezifischen Laserschutzbrille gestattet, da die für das menschliche Auge nicht sichtbare Laserstrahlung der Fremdbeleuchtung Netzhautverletzungen verursachen kann. Es besteht Erblindungsgefahr (Laserklasse 3b)! Aus diesem Grund müssen die vorgeschriebenen Sicherheitsmaßnahmen eingehalten werden.

Nach erfolgreicher Einbindung des „Weldeye-Systems“ kann das Programmieren der Schweißbahn sowohl in der Laserzelle auf dem bisherigen Monitor, als auch im Steuerungsraum auf dem Notebook, bzw. TV Panel erfolgen.

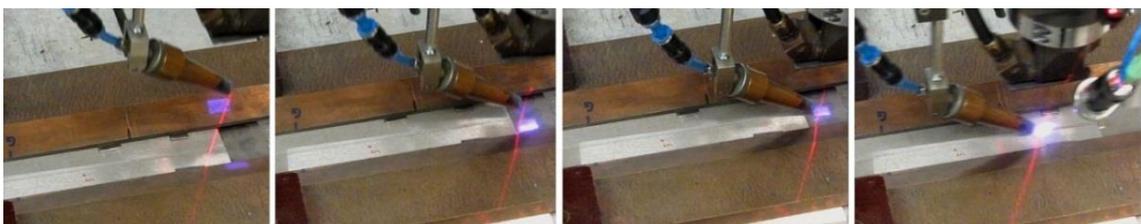
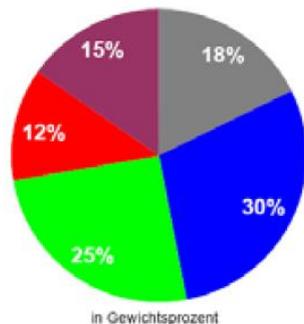


Abbildung 19: Positionierung Optik und Beleuchtungsfeld

2.1.4 Auswahl und Fertigung des Demonstrators

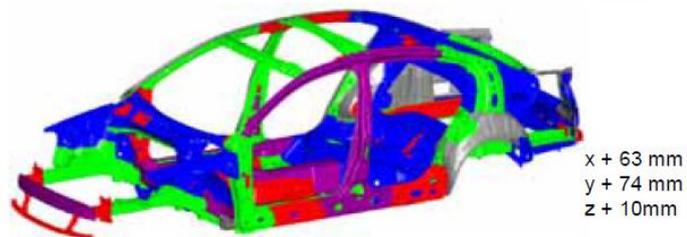
2.1.4.1 B1- Potentialanalyse diverser Produktgruppen, einschließlich deren Eigenschaftsprofile

Im ersten Arbeitspunkt B1 wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Produktgruppen bewertet, die durch den Werkstoff AZ31 ersetzt werden können. Die Festigkeit von dem Magnesiumwerkstoff AZ31 beträgt etwa 250 MPa. Aus diesem Grund wurde die Substitution von Karosseriekomponenten, die aktuell aus hoch- und höchstfesten Stählen bestehen, nicht näher betrachtet. Dazu zählen insbesondere die Bestandteile der Fahrgast-Sicherheitszelle wie Schweller, Mitteltunnel und B-Säule, sowie die der Stoßstangenträger (siehe Abbildung 20, rote und violette Bereiche). Da die Prozessgrenzen zur Herstellung von Komponenten aus Magnesium von möglichst vielen Umform- und Fügeprozessen ermittelt werden sollen, wurden ebenfalls Komponenten ausgeschlossen, die zwar durch Magnesium substituierbar wären, mit deren Herstellung jedoch nur ein geringer Nutzen erzielt werden würde. Dazu zählen u.a. Komponenten wie Kotflügel oder die Bodengruppe.



Streckgrenze $R_{p0.2}$

- ≤ 140 MPa
- 180 - 240 MPa
- 260 - 300 MPa
- 300 - 420 MPa
- ≥ 1000 MPa



Gewicht Kastenrohbau: 296 kg

Quelle: Cordes

Abbildung 20: Kraftfahrzeugkarosserie nach Festigkeit der jeweiligen Komponenten

Aufgrund der hohen industriellen Relevanz und des möglichen Einsparpotenzials hinsichtlich des Gewichtes fiel die Wahl auf eine Automobil-Rücksitzlehne, die bisher mit wenigen Ausnahmen ausschließlich als Stahlkonstruktionen verbaut wird. Zum einen werden durch die Substitution des Stahls durch Magnesiumwerkstoffe erhebliche Gewichtseinsparungen realisiert, zum anderen werden bei der Herstellung der Baugruppe viele umformende und fügende Prozesse untersucht. Die hohe industrielle Bedeutsamkeit wurde von mehreren Industriepartnern bestätigt.

2.1.4.2 B2- Konzipierung und Auslegung des Demonstrators

In enger Abstimmung mit den umformtechnischen Teilprojekten wurde für den Demonstrator eine Konstruktion erarbeitet, welche die Festigkeit und fertigungstechnischen Besonderheiten der verwendeten Magnesiumlegierung berücksichtigt. In Abbildung 21 ist die Baugruppe mit den jeweiligen Fertigungsprozessen der einzelnen Komponenten dargestellt. Zur Ermittlung der optimalen Lage, Anzahl und Dimension (Anbindungsquerschnitte) der Komponenten und Fügstellen wurden umfangreiche numerische Simulationen zur Bewertung der Crashesicherheit durchgeführt, welche dem Abschlussbericht von Teilprojekt TP2 zu entnehmen sind.

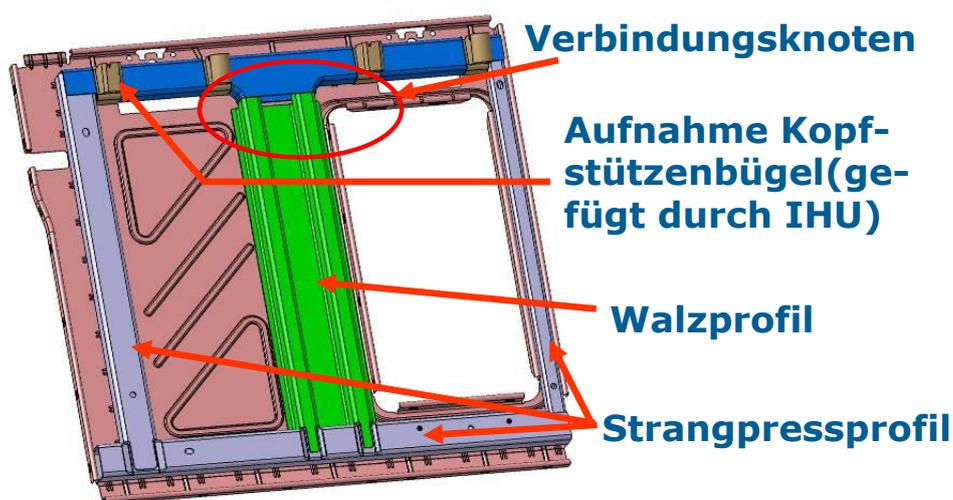


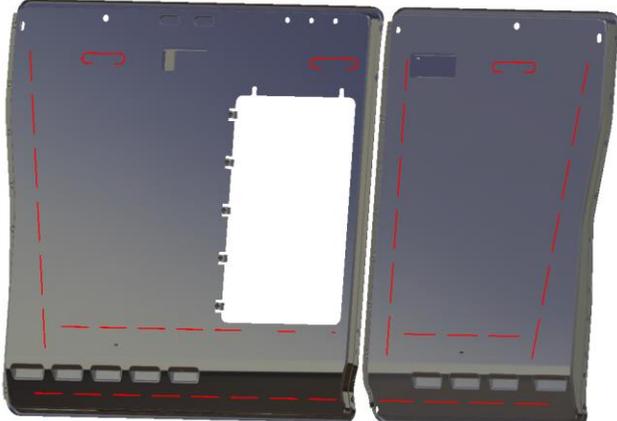
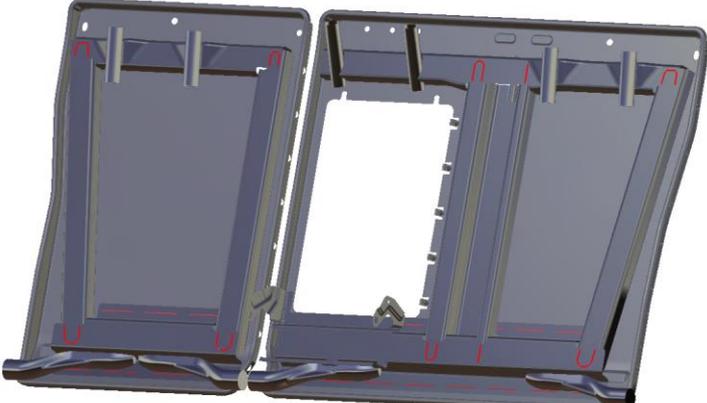
Abbildung 21: Konzipierter Demonstrator

2.1.4.3 B3- Erstellung der Prozessketten für die Fertigung des Demonstrators

Schwerpunkt des Teilprojektes TP 3.2 ist die Optimierung des thermischen Fügens von der Magnesiumlegierung AZ31. Aus diesem Grund umfasst die relevante Prozesskette die Generierung der Montage- und Schweißfolge sowie die Auswahl der optimalen Schweißverfahren zur Herstellung des Demonstrators. Die erarbeitete Prozesskette ist in Tabelle 5 dargestellt.

Im ersten Schritt werden die Profilbleche durch Laserstrahlschweißen ohne Zusatzwerkstoff miteinander verbunden (siehe Tabelle 5 oben). Im nächsten Schritt werden die tiefgezogenen Deckbleche an die Profile geschweißt. Da die Profile eine größere Materialdicke als die Deckbleche haben, empfiehlt es sich die Schweißnähte von der anderen Seite einzubringen (siehe Tabelle 5 Mitte). Im letzten Schritt werden sowohl die Führungen der Kopfstützen, als auch die Drehbolzen der Rücksitzkonstruktion mittels des CMT-Schweißverfahrens mit den entsprechenden Profilblechen verbunden (siehe Tabelle 6 unten). In diesem Arbeitsschritt werden, sofern erforderlich, auch die entsprechenden Kehlnähte, die die Knotenpunkte verstärken, geschweißt.

Tabelle 6: Schweißfolge des Demonstrators

<p><u>Schritt 1:</u> Laserstrahlschweißen der Profilbleche</p>	
<p><u>Schritt 2:</u> Laserstrahlschweißen des Backpanels</p>	
<p><u>Schritt 3:</u> CMT-Schweißen der Drehbolzen und Kopfstützenführungen</p>	

2.1.4.4 B10- Fertigungsplanung für die Herstellung des Demonstrators

Im Arbeitspunkt B10 wurde die für die Fertigung des Demonstrators relevanten Einflussgrößen geplant. Dies betrifft insbesondere die Generierung der Schweißfolge sowie die Planung des Vorrichtungskonzeptes. Die Position der Schweißnähte sowie die Schweißfolge wurden offline mit der CAD/CAM Software *TrutopsCell* programmiert. Abbildung 22 zeigt das Backpanel der Rücksitzlehne (blau), die Schweißnähte (gelb) und die Schweißbahn (lila) der Schweißoptik (grau). Beim Laserstrahlschweißen ist es empfehlenswert vom dünnen- in den dicken Werkstoff zu schweißen, was bei der Generierung der Schweißfolge beachtet wurde. Da die zu schweißende Stückzahl an Demonstratoren sehr gering ist, wäre die Konstruktion und Fertigung einer angepassten Schweißvorrichtung weder wirtschaftlich, noch technologisch notwendig gewesen. Zur Montage und

Fixierung der Einzelteile wurden daher standardisierte Spannelemente verwendet, die über ein Lochmuster flexibel positioniert werden können.

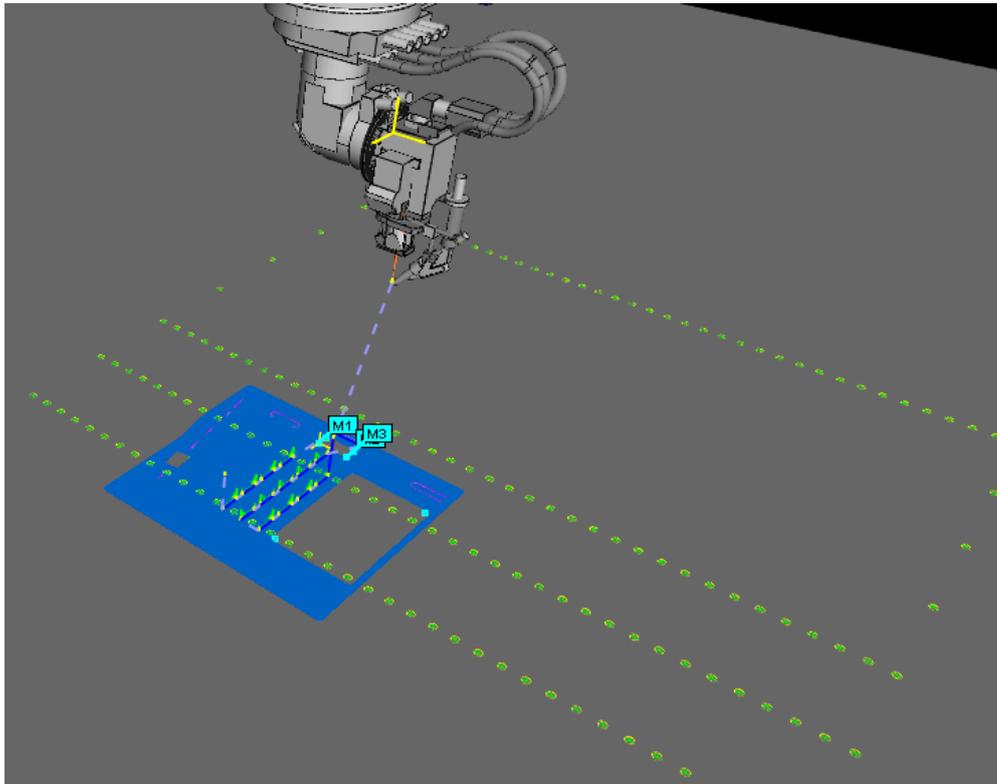


Abbildung 22: Offline programmierte Schweißfolge mit der Software „TrutopsCell“

2.1.4.5 B11- Herstellung des Demonstrators und Optimierung der maßlichen und funktionellen Parameter

Der Demonstrator wurde gemäß des Arbeits- und Zeitplans hergestellt. Dabei erwies es sich aus fertigungstechnischer Sicht als vorteilhaft, die Profile zusammenzustecken und im ersten Arbeitsschritt das Backpanel anzuschweißen. Anschließend wurden geeignete Prozessparameter ermittelt und optimiert. Dabei wurden die Parameter so gewählt, dass ein vollständiges Durchschweißen des unteren Werkstoffs der Überlappverbindung verhindert wird. Durch diese Maßnahme konnte auf den Einsatz von Wurzelschutzgas verzichtet werden. Auf Grund dessen mussten keine Wurzelschutzschienen angefertigt und montiert werden, was aufgrund der verhältnismäßig komplexen Geometrie der Baugruppe sehr aufwändig und nur schwer realisierbar gewesen wäre.

Wie bereits erwähnt, wurden die Einzelteile mit standardisierten Spannelementen positioniert und fixiert (siehe Bild 23). Dazu wurde die Position der einzelnen Bauteile auf dem Backpanel ausgemessen und entsprechend markiert. Aufgrund der hohen Genauigkeit der umgeformten Bauteile war die Montage der Baugruppe problemlos möglich. Die Herausforderung beim Schweißen der Baugruppe bestand darin, die Schweißnähte mittig in die Profile einzubringen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Profile von dem Backpanel verdeckt liegen und somit sowohl beim Programmieren der Schweißbahn, als auch bei der Positionierung der einzelnen Bauteile auf besondere Genauigkeit geachtet werden musste.

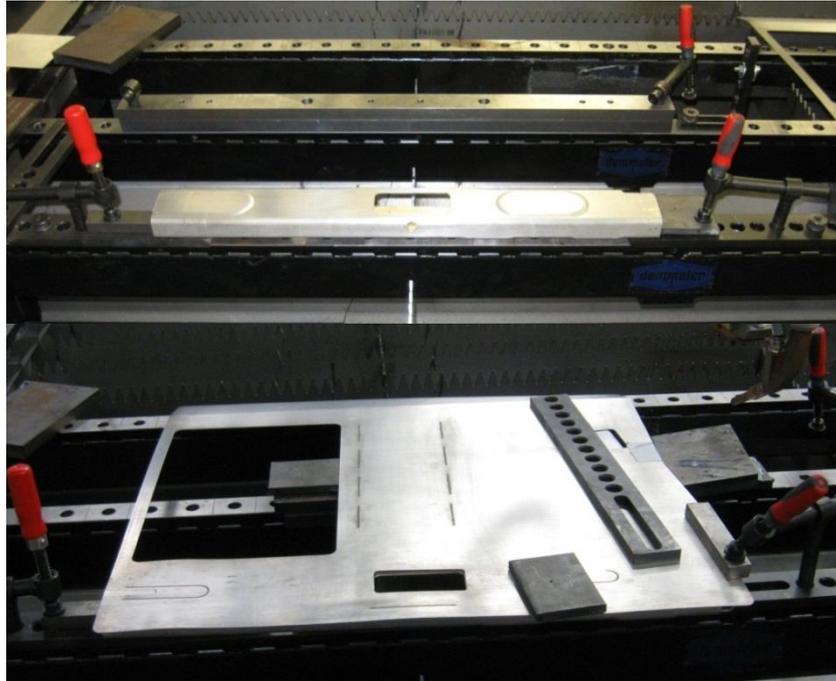


Abbildung 23: Positionierung der Einzelteile mittels Spanntechnik der Fa. Demmeler

Nachdem die Baugruppe verschweißt wurde, wurden die Patches, mit denen die Rückbank mit der Karosserie verbunden wird, montiert. Da diese aus Gründen der Festigkeit aus höherfesten Stahl gefertigt wurden, konnten diese nicht mit der Rücksitzlehnenkonstruktion aus AZ31 verschweißt werden. Stattdessen wurden diese mit Blindnieten gefügt (siehe Bild 24). Die Löcher für die Blindniete wurden vor dem Nieten manuell in die Baugruppe eingebracht. Dies garantiert eine Passgenauigkeit der Nietbohrungen zueinander.

Die Aufnahmen für den Klappmechanismus der Rücksitzbank bestehen aus höherfestem Stahl. Das Kohlenstoffäquivalent dieses Werkstoffes lässt auf eine bedingte Schmelzschweißbarkeit schließen. Aus diesem Grund wurden die Bauteile durch das MIG-Löten gefügt (siehe Bild 24 rechts). Die Bildung von Rissen im Schweißnahtgefüge konnte dadurch vermieden werden.

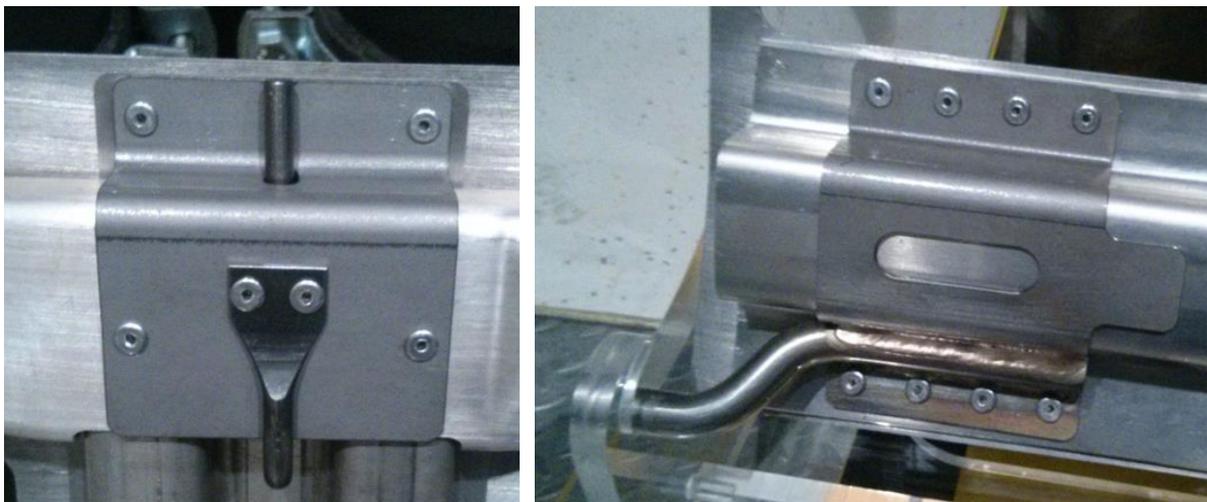


Abbildung 24: Stahlpatches an AZ31 Rücksitzlehne

Bild 25 zeigt den fertigen Demonstrator. Lediglich auf das Anschweißen der Kopfstützenhalter wurde verzichtet, da zum Zeitpunkt der Fertigstellung noch nicht genügend Versuchsteile zur Verfügung standen.



Abbildung 25: Vorder- und Rückansicht der gefügten Rücksitzlehne als Messedemonstrator aus AZ31

2.1.5 B12- **Bewertung der Wirtschaftlichkeit der neuen Technologien sowie Nachweis der Energie- und Ressourceneffizienz**

Die im Rahmen des Projektes erarbeiteten Technologiekonzepte beschränken sich in erster Linie auf die Optimierung der Herstellung von Tailored Blanks sowie auf die Entwicklung eines Qualitätssicherungskonzeptes:

- B5 Erweiterung der Anwendungsgrenzen und Optimierung der Nahteigenschaften beim Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff
- B6 Entwicklung eines Konzeptes für ein Nahtverfolgungssystem für das Laserstrahlschweißen von Tailored Products
- B7 Ermittlung der Eigenschaften von Laserschweißnähten hinsichtlich einer nach gelagerten Umformung bzw. von Laserstrahlschweißnähten an umgeformten Halbzeugen
- B9 Entwicklung eines Qualitätssicherungskonzeptes

Die in den jeweiligen Abschnitten detailliert beschriebenen Entwicklungen wurden unter den Aspekten der Wirtschaftlichkeit bewertet (s. Tabelle 7).

Tabelle 8: Bewertung der Wirtschaftlichkeit der entwickelten Technologiekonzepte

	Arbeitspakete:			
	B5	B6	B7	B9
Zeiteinsparungen durch höhere Prozessgeschwindigkeiten	+	0	0	0
Zeiteinsparung durch Entfall von Prozessschritten	++	+	++	++
Einsparung von Medien (Schmiermittel, Druckluft, etc...)	+	0	0	+
Erhöhung der Prozesssicherheit/ Reproduzierbarkeit	0	++*	++*	0
Erweiterung der Anwendungsgrenzen	++	++	+	0
Optimierung der Qualität	0	++	0	++
Reduzierung der Ausschussquote	0	++*	+	++

++ = sehr gut, + = B15 gut, 0 = neutral, - = schlecht, -- = sehr schlecht

* = Ableitend von aktuellen Stand der Entwicklungen. Es sind weitere Untersuchungen notwendig.

Die entwickelten Konzepte tragen maßgeblich zur Optimierung der schweißtechnischen Verarbeitung von Magnesium-Flachprodukten bei. Dies ist für die industrielle Verarbeitung der Leichtbaulegierung notwendig und für den serienmäßigen Einsatz der Legierung von hoher Bedeutung. Die Energie- und Ressourceneffizienz wird daher im Wesentlichen nicht über die Energieeinsparungen direkt durch die entwickelten Technologiekonzepte gesteigert, sondern indirekt durch die Optimierung der Schweißtechnologien, dem damit verbundenen steigendem industriellen Interesse, dem langfristig betrachtet steigenden Einsatz der Leichtbaulegierung bzw. der Umsetzung von innovativen Leichtbaukonzepten und den daraus resultierenden sinkenden Emission von Treibhausgasen sowie Reduzierung der Kraftstoffverbrauches von Kraftfahrzeugen.

2.2 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Der Verwertungsplan wird teilprojektübergreifend bezüglich des Gesamtprojektes jährlich entsprechend der Antragsplanung fortgeschrieben. Die Verwertung erfolgt unverändert entsprechend des Verwertungsplanes (s. Tabelle 8) und ist auch unverändert in das Gesamtkonzept von TeMaK und in das IWU-Konzept eingebunden.

Tabelle 8: Verwertungsplan

Verwertungsart	Zeitplan / Inhalte		
	bis 2017	bis 2020	nach 2015
Beitrag zum Wirtschaftswachstum	<ul style="list-style-type: none"> – Vermarktungskonzept – Akquiseplan – Publikationen – Bearbeitung von Verschiedene Industrieraufträge, unter anderem von: <ul style="list-style-type: none"> → EDAG Engineering AG → Audi AG → BMW AG 	<ul style="list-style-type: none"> – Akquise von 2 weiteren Firmen 	Mitarbeit an Serienentwicklung für verschiedenste Baugruppen
kommerzielle Umsetzung	– 0,02 Mio €/a	– 0,03 Mio €/a – + 1 MA	– 0,04 Mio €/a – + 1 MA
Kooperationspartner	Projekt dient als zusätzliches Marketinginstrument und Plausibilitätsunterstützung für die Auftragseinwerbung innerhalb TeMaK		
Meilensteine	<ul style="list-style-type: none"> – Demonstrator (2014) – erste Serienentwicklung (2016) 		

Da das Forschungsprojekt eine große Resonanz bei kleinen und mittleren Unternehmen der metallverarbeitenden Industrie und der Automobilzulieferindustrie gefunden hat, werden aktuell schon konkrete Maßnahmen für eine praktische Umsetzung der Projektergebnisse durchgeführt. Es werden Musterteile hergestellt und für erste konkrete Industrieanwendungen konkrete technologische Umsetzungen erarbeitet. Dabei wird den Unternehmen teilweise auch geholfen, den Marktzugang zu Magnesiumprodukten zu ermöglichen. Dadurch wird eine erhebliche Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen erwartet. Mit der Beherrschung des Fügens von Magnesiumknetlegierungen wird der Automobilzuliefererindustrie und anderen Unternehmen ein großer Zukunftsmarkt erschlossen.

Die Schwerpunkte der eigenen Vermarktung sind weiterhin

- die Erweiterung der entwicklungstechnischen Kompetenz in dem Bereich des Fügens von Magnesiumknetlegierungen, insbesondere bei der Herstellung von Tailored Blanks und damit die Besetzung des Zukunftsfeldes des Fügens von Magnesiumknetlegierungen,
- eine Umsatzsteigerung durch Neuaufträge für Vorentwicklungen und somit Steigerung der Wertschöpfung,
- die Schaffung und Erhaltung von Arbeitsplätzen,
- der Technologietransfer in die Unternehmen und
- anteilig die Aus- und Weiterbildung im Bereich Fügtechnik.

2.3 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Durch den ständigen Kontakt mit dem Deutschen Verband für Schweißtechnik (DVS), Herrn Prof. Matthes und Herrn Dr. Schneider (TU Chemnitz, Professur Schweißtechnik), Herrn Prof. Dr. Hübner (Hochschule Mittweida) und allen Partnern im Projekt wird sichergestellt, dass neuste FE- Ergebnisse zum Schweißen von Magnesiumknetlegierungen bekannt werden.

Nach turnusmäßiger Rücksprache mit Herrn Dr. Grigoleit (Wachstumskern TeMaK) und allen Partnern im Gesamtprojekt sind ebenfalls keine relevanten Ergebnisse bekannt geworden, die bei der Durchführung des Vorhabens im Teilprojekt 3.2 berücksichtigt werden müssen.

Veröffentlichungen von Forschungsergebnissen zum Fügen von Magnesium wurden stetig projektübergreifend verfolgt und auf Relevanz zu diesem Projekt geprüft. Dies betraf insbesondere alle Fachvorträge bzw. Literaturveröffentlichungen bezüglich des Laserstrahlschweißens und Laserstrahlhybridschweißens von Magnesiumknetlegierungen und die erzielten Eigenschaften bezüglich der Festigkeit und des Korrosionswiderstandes. Alle bekannt gewordenen Veröffentlichungen zeigten jedoch nur den gegenwärtig bekannten Stand der Technik auf dem Gebiet des Laserstrahlschweißens von Magnesiumknetlegierungen.

Der Neuigkeitsgehalt der eigenen erzielten Untersuchungsergebnisse wird auch dadurch deutlich, dass wir mit dieser Thematik zu teilweise hochwertigen Fachveranstaltungen mit der jeweiligen Bitte um ein Fachreferat über die in diesem Rahmen erzielten Forschungsergebnisse bis heute eingeladen werden (s. Abschn. 2.4).

2.4 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die Ziele, Vorgehensweise und insbesondere Ergebnisse des Wachstumskerns TeMaK im Allgemeinen wurden auf verschiedensten Wegen, wie Fachveröffentlichungen, Vortragsveranstaltungen, Workshops, Internetauftritt und Messen veröffentlicht. Das Teilprojekt 3.2 „Darstellung von Tailored Products“ mit den Verbundpartnern war im Rahmen dieser Veröffentlichungen sehr aktiv, siehe nachfolgende Übersicht:

Tagungsbeiträge

Ausstellung der Ergebnisse:

- TeMaK Anwenderworkshops 10/2012, 06/2013, 09/2014
- Blechexpo 2013
- Entwicklungstrends in der Blechwarmumformung 2014 (IWU Chemnitz)
- CBC 2014
- Euroblech 2014
- Audi Technologietag 04./05.11.2014

Publikationen:

- Schieck, F.; Drossel, W.-G.; Bräunlich, H.; et al.: Temperature-Supported Forming of Automobile Related Magnesium Components. IMECE 2013, 15.-21.11.2013, San Diego, USA
- Schieck, F.; Haase, R.; Pierschel, N., et al.: Process design appropriate for light-weight construction with magnesium alloys. SFU 2014, 3.-5.11.2014, Freiberg
- Kuhn, D.: Neue Lösungen für die Blechbearbeitung. Nachhaltige Produktion, 02.12.13
- Kuhn, D.: Neue Lösungen für die Blechbearbeitung. MaschinenMarkt, 02.12.13
- Kuhn, D.: Neue Lösungen für die Blechbearbeitung. Blechnet, 02.12.13

Insbesondere werden die Ergebnisse sowie das Potenzial, welches aus den Ergebnissen für die Firmen mit deren spezifischen Produkten erwächst, während Beratungen und Firmenvorträge u.a. im Rahmen von Projektzusammenarbeit in die einzelnen Firmen näher gebracht. Unter anderem zählen dazu:

- SONA BLW Präzisionsschmiede GmbH, München (März 2012)
- VW AG, Kassel (Mai 2012)
- Audi AG, Ingolstadt (September 2012)
- all in metal GmbH (Januar 2013)
- Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH (August 2013)
- HOERBIGER SynchronTechnik GmbH & Co. KG, Oberstenfeld (April 2014)
- Porsche AG, Bratislava (Juni 2014)

Für den Transfer der Ergebnisse in die Industrie werden auch Bildungs- und Weiterbildungsmaßnahmen genutzt. Z.B. fließen die Ergebnisse in die Vorlesungen der Professur Schweißtechnik der TU Chemnitz ein, in die studentische Ausbildung zukünftiger Ingenieure. Auch Weiterbildungsmaßnahmen im Rahmen der Lehrgänge zum Europäischen Schweißfachingenieur für praktizierende Ingenieure werden für einen Ergebnistransfer in Firmen mit schweißtechnischem Hintergrund genutzt.

Entsprechend des Verwertungsplans werden nach Projektende alle aufgeführten Maßnahmen in gleicher Intensität fortgeführt (s. auch zukünftige Termine).

Literaturverzeichnis

- /1/ Vollertsen, F.: Tailored Blanks. Bleche, Rohre, Profile, Band 42, 1995
- /2/ Jaroni, U.; Dohr, C.: Tailored blanks – von der Marktnische zur weltweiten Produktion. Stahl und Eisen, Band 118, Heft 8, 1998
- /3/ Riedel, F.; Puschmann, M.; Fischer, H.: Vergleich des Laserstrahl-, Laserstrahl-MIG und MIG-Schweißens für die Herstellung einer Magnesiumautomobiltür aus Tailored Blanks als Demonstrator. Schweißen und Schneiden 7-8 (2010), S. 408-414
- /4/ Draugelates, U.; Schram, A.; Kettler, C.: Schweißen von Magnesiumlegierungen. Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 30, S. 623-627, 1999
- /5/ Wassenhofen, J.: „Sicherer Umgang mit Magnesium“ in Kammer, C.: „Magnesium Taschenbuch“, Düsseldorf : Aluminium-Verlag, 2000, 1. Auflage
- /6/ N.N.: Laser-Hybridschweißen von Leichtmetallwerkstoffen. AiF-Ber. 13.783N, 2006
- /7/ Cao, X.; et. al.: A review of laser welding techniques for magnesium alloys. Journal of Materials Processing Technology 171, S. 188-204, 2006
- /8/ Danzer, W.: Fügen von Magnesiumlegierungen. Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 36, S. 264-269, 2005
- /9/ Haferkamp, H.; Goede, M.; Bormann, A.; Cordini, P.: Laser beam welding of magnesium alloys - new possibilities using filler wire and arc welding. Laser Assisted Net Shape Engineering 3, Proc. of the 3rd LANE 2001, (2001), S. 333-338
- /10/ Sun, Z.; Pan, D.; Wei, J.: Comparative evaluation of tungsten inert gas and laser welding of AZ31 magnesium alloy. Science and Technology of Welding and Joining. 7 (2002) 6, S. 343-351
- /11/ Herold, H.; Zahariev, S.; Wohlfahrt, H.; Jüttner, S.: Aktuelle Untersuchungen zur Weiterentwicklung und Anwendung des WIG- und des WPL-Schweißens von Magnesiumlegierungen im Automobilbau. Düsseldorf: DVS-Verlag, DVS-Berichte 204 (1999), S. 202-207
- /12/ Cordini, P.; Goede, M.; Haferkamp, H.H.: Laser beam welding of magnesium alloys. Automotive Circle Internat. Progress with Magnesium in Car Body Manufacturing. 3rd Annual Expert and 1st European Automobile Conf., Bad Nauheim, D, 18.-19. Sep, 2001., Band 10 (2001), S. 185,187-195
- /13/ Draugelates, U.; Schram, A.; Kettler, C.: Laserstrahlschweißen und Reibschweißen von Magnesiumlegierungen. Düsseldorf: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren, Düsseldorf: DVS-Verlag, DVS-Berichte, Band 194 (1998), S. 129-135
- /14/ Dausinger, F.: Prozessverständnis als Grundlage der Verfahrensentwicklung. Tagungsband SLT, 2003, S. 65-69.
- /15/ N.N.: Vergleichende Untersuchungen zum Hochleistungsstrahlschweißen von Magnesium und Aluminium. AiF-Bericht 12.7619 N, 2003
- /16/ Reck, A.: Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen. Dissertation, 1999
- /17/ Nicolay, T.; Bayer, V.: Den Schweißpunkt immer im Fokus. LaserTechnikjournal 6(09)
- /18/ Internet: <http://www.scansonic.de>. 01.02.2011
- /19/ Poprawe, R.: Lasertechnik in der Fertigung. Berlin: Springer Verlag, 2005
- /20/ Karakas, Ö.; Morgenstern, C.; Sonsino, C.M.: Schwingefeste Auslegung von Schweißverbindungen aus Magnesiumknetlegierung AZ31 mit dem Konzept der fiktiven Ersatzradien von $r_f=1,0$ und $0,05$. Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 38, S. 603-612, 2007

- /21/ N.N.: Grundlagen für die praktische Anwendung des Kerbspannungskonzeptes zur Schwingfestigkeitsbewertung von geschweißten Bauteilen aus Magnesiumknetlegierungen. Abschlussbericht AiF 13.457N, 2006
- /22/ Wohlfahrt, H; Rethmeier, M.; Draugelates, U.; Schütz, M.: Metallschutzgasschweißen von Leichtmetallwerkstoffen am Beispiel von Magnesiumlegierungen. Abschlussbericht AiF 11656, 2001
- /23/ Hobbacher, A.: Empfehlungen zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile. IIW-Dokument-1539-96/XV-845-96, DVS-Verlag, Düsseldorf 1997
- /24/ Riedel, F.; Marx, R.: Application potential of different technologies for the welding of ultrahigh-strength steels (press hardened steels – 22MnB5). Automotive Circle International – Joining in Automotive Engineering 2010, Bad Nauheim, 21. April 2010
- /25/ Riedel, F.; Marx, R.: Anwendungspotenzial verschiedener Technologien zum Schweißen höchstfester Stähle – zum Warmumformhärten geeigneter borlegierte Vergütungsstähle (22MnB5). Große Schweißtechnische Tagung 2010, Nürnberg 26.-28.09.2010
- /26/ Ahnert, M. u. a.: Bessere Umformeigenschaften und Belastbarkeit von Karosseriebauteilen durch lokales Laserstrahlverfestigen. Schweißen und Schneiden 61 (2009) 5, S. 249 – 253
- /27/ Neugebauer, R.; Riedel, F.: Entwicklung eines Konstruktionssystems für Punktnähte auf der Basis von Spannungen. Schweißen und Schneiden 61 (2009) 2, S. 81-87
- /28/ Neugebauer, R.; Riedel, F.; Marx, R.: Entwicklung eines Konstruktionssystems für punktförmige Verbindungsnahte auf der Basis von Spannungen. 30. EFB-Kolloquium Blechverarbeitung 2010 „Bauteile der Zukunft“, Bad Boll 02.-03.03.2010, Tagungsband T31, S. 95-104
- /29/ Neugebauer, R.; Dietrich, S.; Kraus, C.: Matrizenloses Clinchverfahren verkürzt Prozesszeiten beim temperierten Fügen von Magnesiumbauteilen. Paderborner Füge-symposium 2005, Tagungsband
- /30/ Neugebauer, R.; Dietrich, S.; Kraus, C.: Joining by forming with a flat counter tool – a new way of joining magnesium components. Thermec 2006, Vancouver, 4.-8.7.2006
- /31/ Mauermann, R.; Riedel, F.: Matrizenlose mechanische Fügeverfahren – Überblick und Anwendungspotenziale – Füge-Workshop „Clinchen ohne Formmatrize“, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Dresden, 06. Juni 2008
- /32/ Riedel, F.; Puschmann, M.; Fischer, H.: Comparison of laser, laser-MIG and MIG welding for the manufacture of a magnesium automobile door made of tailored blanks as a demonstrator. Welding and Cutting 9 (2010) 6, p. 378 – 384
- /33/ Scheffler, S.; Riedel, F.: Schweißen und Umformen von Magnesium-Tailored-Blanks. 8th International Conference on Magnesium Alloys and their Application, Weimar, 26.-29. Oktober 2009, Tagungsband
- /34/ Riedel, F.; Marx, R.: Application potential of different technologies for the welding of ultrahigh-strength steels (press hardened steels – 22MnB5). Automotive Circle International – Joining in Automotive Engineering 2010, Bad Nauheim, 21. April 2010
- /35/ Riedel, F.; Flock, M.; Wagenknecht, K.: Vorstellung eines Prototypen einer Magnesium-Automobiltür mit verschiedenen innovativen Fügeverfahren gefügt. Große Schweißtechnische Tagung 2010, Nürnberg 26.-28.09.2010