

AIF-Schlussbericht

FV-Nr.: 14.959 N

Gestaltung und Kontrolle des Nahtdurch- hangs beim Strahlschweißen

Projektleiter: Dipl.Ing. P. Berger

Bearbeiter: Dr. V. Avilov

Projekt-Nr.: FV 14.959 N

Laufzeit: 01.01.2007 – 31.12.2008

Berichtsdatum: 31.03.2009

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	I
	Kurzzusammenfassung	III
2	Problemstellung	1
3	Stand der Technik	2
3.1	Konventionelle Systeme zur Nahtstützung und Einflüsse auf die Nahtgeometrie.....	2
3.2	Schmelzbadbeeinflussung durch elektromagnetische Kräfte	3
3.2.1	Laserstrahlschweißen mit stationärem Magnetfeld	5
3.2.2	Laserstrahlschweißen mit zwei unabhängigen stationären Feldern ..	7
3.2.3	Laserstrahlschweißen mit einem extern angelegten und einem selbstinduzierten Feld	9
3.2.4	Nutzung von Magnetfeldern beim Beschichten, Umschmelzen und Dispergieren.....	14
4	Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels	14
5	Konduktives System.....	15
5.1	Charakterisierung und Optimierung:	15
5.2	Bau des konduktiven Systems.....	18
5.3	Parameteroptimierung Magnet und Stromzuführung	20
5.4	Applikationsorientierte experimentelle Untersuchung der Prozessparameter	25

6	Induktives System.....	28
6.1	Charakterisierung und Optimierung	28
6.2	Parameteroptimierung des Magnets	29
6.3	Bau des induktiven Systems.....	36
6.4	Applikationsorientierte experimentelle Untersuchung der Prozessparameter.....	39
7	Messung der Impedanz zur Kontrolle der Bauteilgeometrie	49
8	Gepulstes induktives System zum Elektronenstrahlschweißen	51
8.1	Entwicklung des Puls-Betriebes.....	51
8.2	Bestimmung der Remanenz und des Abklingverhaltens	52
8.3	Applikationsorientierte experimentelle Untersuchung der Prozessparameter.....	61
9	Zusammenfassung.....	63
10	Literaturverzeichnis	65

Das IGF-Vorhaben Nr. 14.959 N / DVS 6.061 der Forschungsvereinigung, Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie auf Grund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.
Für diese Unterstützung sei gedankt.

Kurzzusammenfassung

Mit dem Forschungsvorhaben wurde das Wissen erarbeitet, wie für konkrete Schweißaufgaben angepasste elektromagnetische Systeme auszulegen, aufzubauen und zu betreiben sind, mit denen der Nahtdurchhang und die Nahtüberhöhung beim Schweißen mit Laser- und Elektronenstrahlen gezielt beeinflusst bzw. beseitigt werden können. Für einige Schweißaufgaben konnte die Funktion und Wirkungsweise in sicheren Schweißprozessen nachgewiesen werden.

Um angepasste Lösungen für Schweißungen unterschiedlich dicker Werkstücke bereitstellen zu können, wurden zwei unterschiedliche Systeme eingehend untersucht: 1.) ein konduktives System, bei dem ein Magnetfeld mit Dauermagneten erzeugt und Strom mit Schleif- bzw. Rollkontakten durch das Werkstück geleitet wird und 2.) ein induktives System, dessen mit Spulen erzeugtes, hochfrequentes Magnetfeld Ströme im Werkstück induziert.

Das konduktive System wurde als mit dem Bearbeitungskopf mitbewegtes System ausgelegt, aufgebaut und bei Schweißungen bis 3 mm Blechstärke erfolgreich getestet. Weitere Systemvarianten für Rohrlängs- und -umfangsschweißungen wurden designed. Das induktive System wurde als Stand-alone-System, das unter dem Werkstück platziert wird, in zwei Varianten aufgebaut: für Verschweißungen von Blechen aus elektrisch hoch-leitfähigem Material (z. B. Aluminium-Legierungen) bis etwa 5 mm Dicke und für schlechter leitfähige Metalle (wie Edelstahl) bis 40 mm Dicke. Erfolgreiche Tests konnten bei der verfügbaren Laserleistung (bis 8 kW) bis zu Blechdicken von 12 mm durchgeführt werden. Für das induktive System wurde auch ein Pulsbetrieb entwickelt, der den Einsatz beim Elektronenstrahlschweißen ermöglicht.

Die Stärke des Nahtdurchhangs kann sowohl mit dem konduktiven als auch mit dem induktiven Verfahren nach Wunsch eingestellt werden. Die entwickelten Systemkomponenten können bestehende ergänzen. Lösungen für spezielle Aufgaben sind bis zu Blechdicken von 40 mm bei Stahl- und mindestens 80 mm bei Aluminium-Werkstücken möglich und mit dem erlangten Wissen leicht zu entwerfen.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

2 Problemstellung

Strahlschweißverfahren – Elektronenstrahl- und Laserstrahlschweißen – haben aufgrund ihrer Zuverlässigkeit, Effizienz und Qualität der produzierten Nähte in vielen metallverarbeitenden Branchen Fuß gefasst und erleben derzeit eine zunehmende Verbreitung. Neben Leistungsgrenzen und unerwünschten prozessbedingten Problemen wie Poren-, Rissbildung und Bauteilverzug können auch die geometrischen Eigenschaften der Naht wie **Wurzelüberhöhung** (Nahtdurchhang), **Nahtüberhöhung** und **Randkerben** den Einsatz der Verfahren begrenzen. Beim Durchschweißen dicker Platten kann es zu einem **Ausfluss der Schmelze** aus der Fuge kommen, wenn die Oberflächenspannung nicht mehr ausreicht, den hydrostatischen Druck des flüssigen Metalls zu kompensieren. Während Hohlräume und Kerben die Festigkeit des Bauteils schwächen, können Überhöhungen auf der Nahtvorder- oder -rückseite allein durch die Geometrie Passprobleme mit benachbarten Bauteilen verursachen. Dies macht eine – i.d.R. teure – mechanische Überarbeitung erforderlich, falls es die Zugänglichkeit überhaupt erlaubt.

Die oben genannten Ziele sollten mit Hilfe eines elektromagnetischen Systems erreicht werden, das direkt im Schmelzbad Lorentz-Kräfte erzeugt, die durch ihre integrale Wirkung die Schmelze anheben oder absenken sowie durch ihre lokal unterschiedliche Stärke und Richtung das Strömungsverhalten in der Schmelze verändern (siehe Abbildung 1).

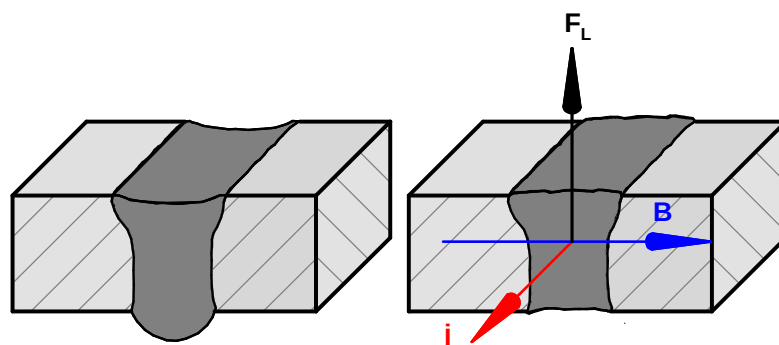


Abbildung 1: Schmelzbad ohne Wirkung elektromagnetischer Kräfte (links) und (rechts) mögliche Anordnung von Magnetfeld (magnetische Induktion B) und Strom (elektrische Stromdichte j) mit daraus resultierender Lorentz-Kraft F_L zum Anheben der Schmelze (grau).

Durch den solchermäßen veränderten Wärme- und Schmelztransport kann gezielt Einfluss auf die Nahtgeometrie und Nahtoberraupengestalt einschließlich der Nahtkerben genommen werden. Zwei prinzipiell unterschiedliche Systeme zur Erzeugung von Lorentzkräften sollten im Rahmen des hier vorgestellten Forschungsvorhabens untersucht werden: ein konduktives System und ein induktives System. Beim ersten kann ein sehr einfacher Dauermagnet verwendet werden, jedoch muss Strom über Klemm-, Schleif- oder Rollkontakte durch das Werkstück geleitet werden, beim zweiten ist ein deutlich aufwendigerer AC-Magnet erforderlich, der jedoch direkt Ströme im Werkstück induziert, womit auf die Stromkontaktierung des Werkstücks verzichtet werden kann. Diese zweite Verfahrensvariante sollte auch für den gepulsten Betrieb aufgebaut werden, wodurch der Einsatz beim Elektronenstrahlschweißen ermöglicht wird. Schließlich sollte noch untersucht werden, in wie weit sich der induktive Magnet für eine Kontrolle der Nahtgeometrie nutzen lässt.

Die Systeme sollten aus handelsüblichen (preisgünstigen) Komponenten aufgebaut werden und eine möglichst geringe Leistungsaufnahme im Betrieb sollte sichergestellt werden.

3 Stand der Technik

3.1 Konventionelle Systeme zur Nahtstützung und Einflüsse auf die Nahtgeometrie

Um den Nahtdurchhang und ein Ausfließen der Schmelze zu verhindern, sind verschiedene Techniken gebräuchlich. Dazu gehören

- ◆ die Verwendung von Unterlagen (Badstützen) auf der Bauteilrückseite, die entweder nicht aufgeschmolzen werden (beim Schweißen mit CO₂-Lasern sind dies oft Kupferplatten) oder nachträglich z.B. durch Fräsen oder Drehen wieder vom Bauteil abgetrennt werden müssen, und
- ◆ die Nutzung eines Gasstroms, der eine Kraft auf die Nahtwurzel ausübt. Diese greift jedoch nur an der Oberfläche an und neigt deshalb im Gegen-

satz zu elektro-magnetischen Kräften, die im Volumen angreifen, zu Rayleigh-Taylor-Instabilitäten des Schmelzbades. Darüber hinaus sind beim Elektronenstrahlschweißen Beeinflussungen durch Gasströmungen auf „Non-Vac“-Verfahren begrenzt.

- ◆ Oft wird auch versucht, den Gravitationseinfluss auf die Schmelze durch Drehen des Werkstückes bei horizontaler Strahlführung zu umgehen
- ◆ oder man geht über zur Mehrlagenschweißung.
- ◆ Eine begrenzte Beeinflussungsmöglichkeit der Nahtform einschließlich des Nahtdurchhangs und der Größe und Form der Nahtoberraupe ist jedoch ferner auch durch die eingestellten Prozessparameter und die Wahl der Verfahrensvariante (Prozessgestaltung) gegeben. Gängige Verfahrensvarianten sind gekennzeichnet durch:
 - ◆ Verwendung von Zusatzwerkstoffen und geeigneter Schutzgasmischungen,
 - ◆ den Einsatz mehrerer Foki (Doppelfokustechnik),
 - ◆ Strahlpendeln (wobbeln),
 - ◆ Kombinationen unterschiedlicher Verfahren (Hybridverfahren, z.B. Laser-MIG, -MAG, Dioden- und Nd:YAG-Laser)
 - ◆ sowie durch gepulste Betriebsweise der Strahlquelle.

3.2 Schmelzbadbeeinflussung durch elektromagnetische Kräfte

Da sowohl im IFSW als auch in anderen Forschungseinrichtungen zahlreiche Untersuchungen mit Magnetfeldern zur Beeinflussung der Schmelze beim Schweißen stattfanden, sollen diese zur klaren Definition und Abgrenzung der einzelnen Verfahrensvarianten ausführlich vorgestellt werden.

Es ist allgemein bekannt, dass **bei allen Schweißverfahren, bei denen durch Anlegen einer elektrischen Spannung ein elektrischer Strom durch das Schmelzgut fließt**, selbstinduzierte Magnetfelder entstehen, die in Wechselwirkung mit der lokal variierenden Stromdichte Lorentzkräfte verursachen. Bei ausreichender Größe des Schmelzbades kommt es durch die im Allgemeinen inho-

homogene Verteilung der Lorentzkräfte in der Schmelze zu einer heftigen Rührbewegung.

Beim Laserstrahlschweißen können durch Anlegen eines äußeren Magnetfeldes und/oder einer elektrischen Spannung, die Ströme im Schmelzbad verursacht, dort ebenfalls Lorentzkräfte erzeugt werden. Aufgrund der Gestaltungsfreiheit bei der Stromführung und beim Anlegen eines Magnetfeldes können die Richtung, die räumliche Verteilung und die Stärke der Lorentzkraft in weiten Bereichen frei gewählt werden.

Folgende Techniken wurden am IFSW eingesetzt, um die Potenziale des elektromagnetisch gestützten Laserstrahlschweißens auszuloten [1,2,3]:

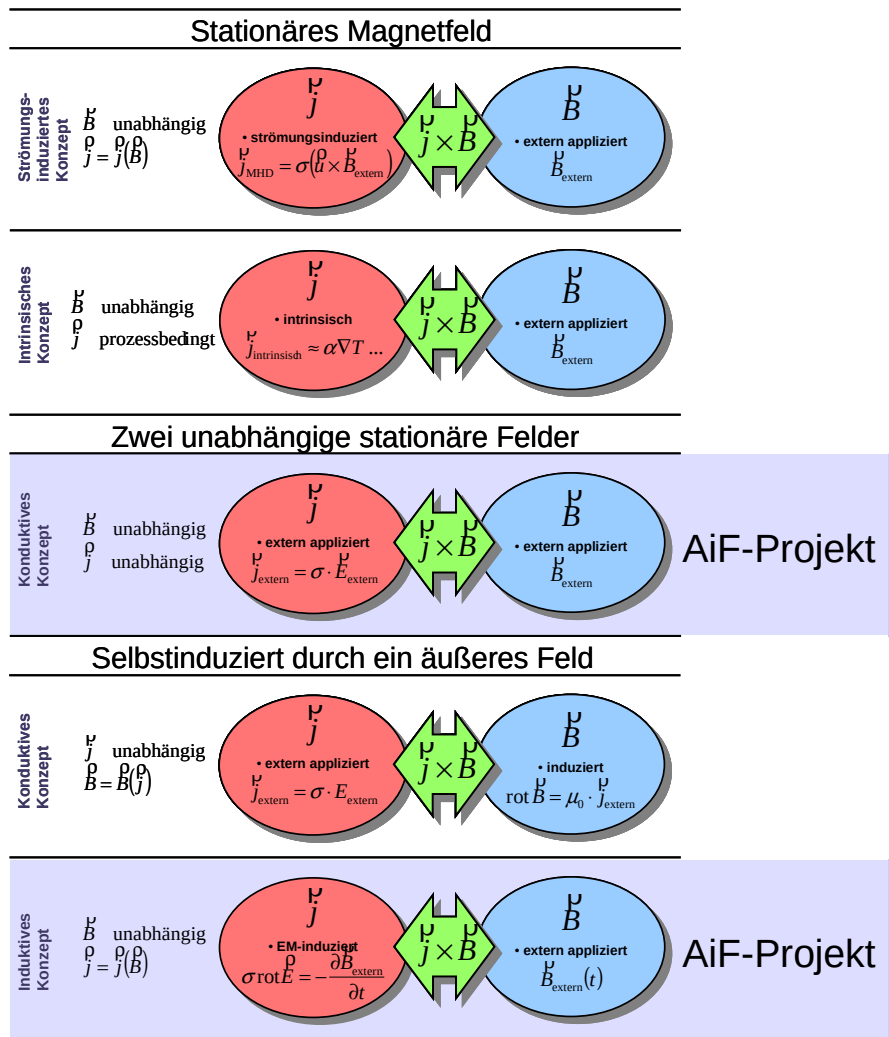


Abbildung 2: Verfahrensvarianten zur Erzeugung von Lorentzkraften beim Laser- und Elektronenstrahlschweißen (nach [1])

3.2.1 Laserstrahlschweißen mit stationärem Magnetfeld

Bei den ersten Versuchen am IFSW, den Laserschweißprozess mit Magnetfeldern zu beeinflussen, wurde 1996/97 nur ein Magnetfeld angelegt. Deutliche Effekte, die auf Lorentzkräfte zurückgeführt werden konnten, wurden bei Schweißungen mit einem CO₂-Laser beobachtet. Als Ursache dieses Effektes wurde die Wechselwirkung eines durch das Schmelzbad fließenden thermoelektrischen Stromes mit dem angelegten Magnetfeld identifiziert [4-14]. Der dazu erforderliche elektrische Strom im Schmelzbad kann auf Grund zweier Mechanismen entstehen.

◆ Nutzen strömungsinduzierter elektrischer Ströme

Strömungsinduzierte elektrische Ströme entstehen, wenn sich elektrisch leitfähiges Material – hier Metallschmelze – in einem Magnetfeld bewegt. Bisher wurden nur sehr geringe Effekte strömungsinduzierter elektrischer Ströme beobachtet.

◆ Nutzen eines „intrinsischen“, durch die Plasmafackel verursachten elektrischen Stroms

Neueste Untersuchungen, die im Rahmen eines von der DFG geförderten Vorhabens [15, 16] durchgeführt wurden, zeigen einen vom Plasma getriebenen Ringstrom (siehe Abbildung 3), der durch Skineffekte an der Werkstückoberfläche bzw. mittels des Elektronendruckes im Plasma erklärt werden kann [1, 16-18]. Deutliche Auswirkungen des intrinsischen Stroms auf den Schweißprozess wurden bisher nur beim Schweißen mit CO₂-Lasern (Wellenlänge 10,6 µm) festgestellt. Bei Festkörperlasern (Wellenlänge 1,06 µm bzw. 1,03 µm) ist die Elektronendichte in der Metaldampffackel nicht groß genug.

Zu den beobachteten Effekten zählen eine Beruhigung der Plasmafluktuationen, eine Verminderung der Spritzerneigung, eine Nahtquerschnittsänderung (V- oder A-Form, auch als Amphorenform beschrieben) in Abhängigkeit von der Orientierung des Magnetfeldes und damit einhergehend ei-

ne Änderung der nahtformabhängigen Neigung zur Rissbildung sowie eine Verminderung der Neigung zum Humping (siehe Abbildung 4).

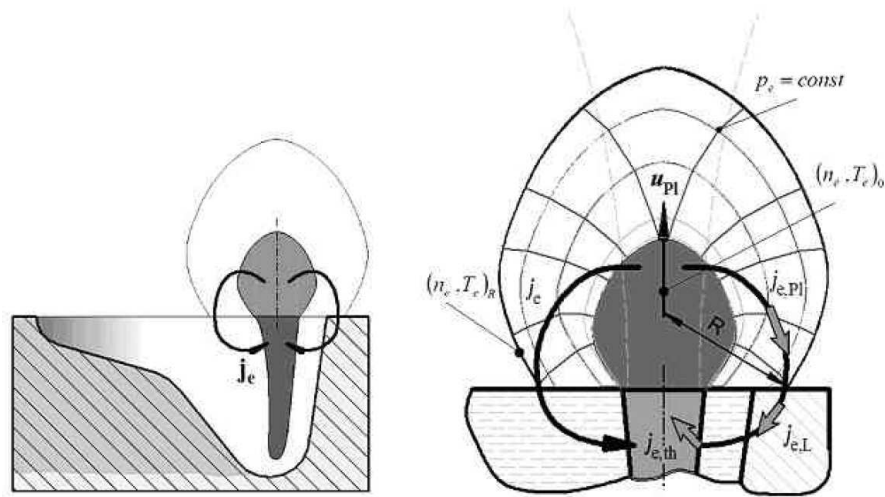


Abbildung 3: Ringstrom durch die Plasmawolke beim Schweißen mit CO₂-Lasern

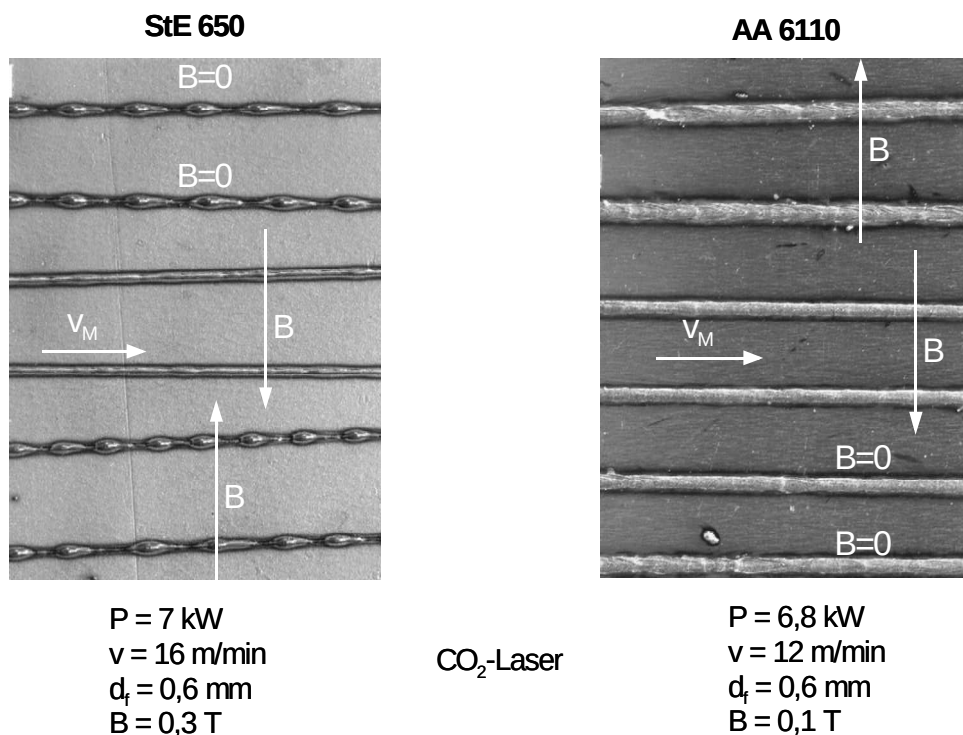


Abbildung 4: Erste Schweißversuche mit externem Magnetfeld. Als Ergebnis wurde eine Beeinflussbarkeit der Neigung zum Humping gefunden [6]

1999 wurden die aus diesen Beobachtungen abgeleiteten Anwendungen von der Universität Stuttgart patentiert [2].

3.2.2 Laserstrahlschweißen mit zwei unabhängigen stationären Feldern

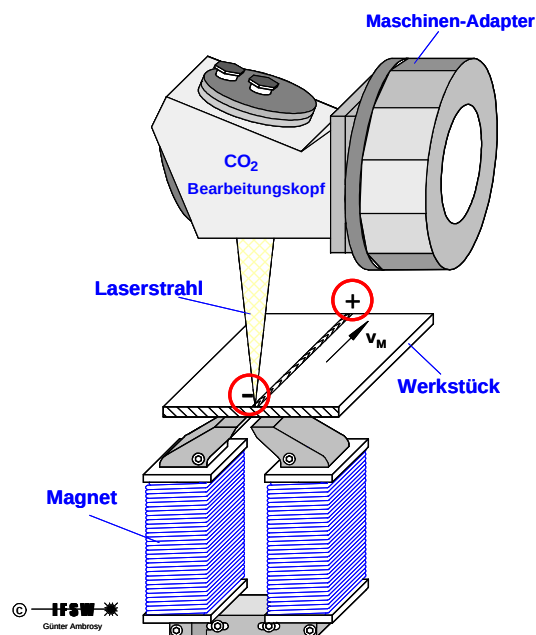


Abbildung 5: Nutzung eines Permanentmagneten zur Schmelzbadbeeinflussung, Stromführung mittels Klemmen durch das Werkstück

Im IFSW wurde zum Laserstrahlschweißen mit zwei unabhängigen Feldern (Magnetfeld und elektrisches Feld zum Erzeugen von Strömen im Werkstück) in Grundlagenuntersuchungen ein mit Gleichstrom betriebener Elektromagnet benutzt, dessen Magnetfeldstärke über die Stromstärke des durch die Spulen des Magneten fließenden Stroms geregelt werden konnte (siehe Abbildung 5). Der Strom im Werkstück wurde über Klemmen an den Blechenden der Werkstücke ein- bzw. ausgeleitet. Während dieser Versuche wurden Erfahrungen mit der Stromführung durch das Werkstück gesammelt. Ursache für die beobachteten großen Unterschiede sind die im Vergleich zu typischen Widerständen innerhalb der Bleche vergleichsweise großen Kontaktwiderstände und die große Variation des spezifischen Widerstandes zwischen kaltem Material und kapillarnaher Schmelze (Unterschied etwa eine Größenordnung). Eine Stromführung durch das

Oberblech war hinsichtlich Naht- und Oberraupengestalt sowie Porenreduktion / -vermeidung am erfolgreichsten (siehe Abbildung 6) [15, 16]. Eine wichtige Voraussetzung für die Stromführung des in Abschnitt 4 beschriebenen „konduktiven Systems“. Auch das Anheben und Absenken der Schmelze und damit der Naht konnte mit dieser Verfahrensvariante beim Durchschweißen nachgewiesen werden.

Die Stromführung war immer parallel zur Schweißnaht und ein stillstehender DC-Elektromagnet war unter dem Blech montiert, über das der Bearbeitungskopf mit dem Laser bewegt wurde. Bei Durchschweißungen, die als Blindschweißungen ausgeführt wurden, konnte ein Heben und Senken der Naht beobachtet werden, das in diesem Vorhaben genutzt werden sollte [4, 9-14].

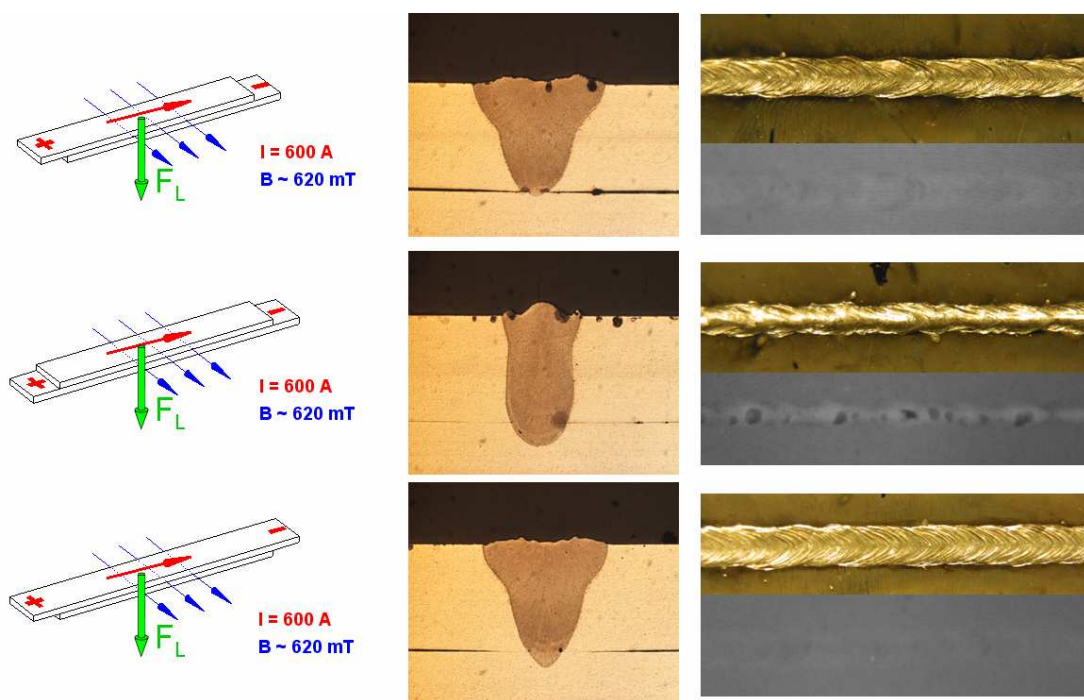


Abbildung 6: Einfluss der Stromführung auf das Schweißergebnis

Für das Schweißen in Überkopf- und vertikaler Position beschreibt Manabe in einem US-Patent eine spezielle Ausgestaltung der Nutzung von Magnetfeld und elektrischem Strom, um das Auslaufen der Schmelze bei der ersten Spur einer Mehrlagenschweißung zu verhindern [19]. Dabei wird der Strom über Schleifkon-

takte in Schweißrichtung durch die Naht geführt und ein Magnetfeld senkrecht dazu angeordnet. Ein ähnliches US-Patent [20], das im Jahr 2000 erteilt wurde, betrifft das Schweißen in horizontaler Position mit analoger Strom- und Magnetfeldanordnung. Im Jahr 2002 wurde das erstgenannte Patent auch als europäisches Patent gewährt [21]. Beide Patente gehen auf ein japanisches Patent mit Priorisierung aus 1996 zurück.

Die Patente von Manabe sprechen zum einen nur das Schweißen in ausgezeichneten Lagen an und zum anderen nur die konduktive Variante des Verfahrens. Letztere auch nur in der Ausgestaltung, dass ein Strom in Schweißrichtung geführt wird.

3.2.3 Laserstrahlschweißen mit einem extern angelegten und einem selbstinduzierten Feld

Zu dieser Verfahrensart gibt es wieder zwei Varianten:

- ◆ Laserstrahlschweißen mit Hilfe von eigenmagnetischen Kräften (nur externer Strom),

Die Zufuhr des elektrischen Stroms muss bei dieser Variante in der unmittelbaren Nähe des Schmelzbades erfolgen, damit die induzierten Magnetfelder einen nennenswerten Effekt hervorrufen. Eine Zufuhr des Stroms über einen Zusatzdraht direkt in das Schmelzbad oder über eine schleifende Wolfram-Elektrode in den Bereich unmittelbar vor dem Schmelzbad scheint am Erfolg versprechendsten. Das den Draht bzw. die Elektrode umgebende Magnetfeld ist dabei von ausreichender Stärke, um in unmittelbarer Umgebung des Drahtes ohne ein externes Magnetfeld in der Schmelze Volumenkräfte zu erzeugen, die die Schmelze in die Tiefe treiben. Damit konnte die Einschweißtiefe deutlich gesteigert und die Durchmischung mit dem Zusatzwerkstoff verbessert werden (siehe Abbildung 7).

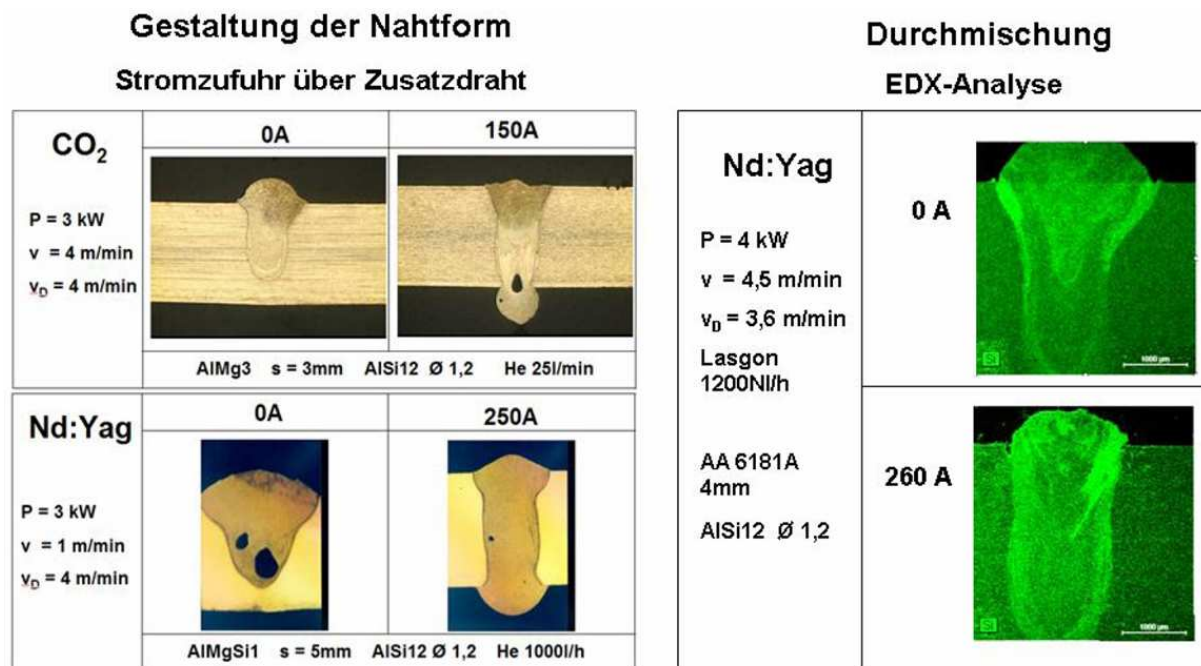


Abbildung 7: Einfluss auf Einschweißtiefe und Durchmischung bei Stromzufuhr über Zusatzdraht

Diese Effekte sind denen beim Lichtbogenschweißen ähnlich, jedoch ist im Gegensatz zum Lichtbogenschweißen die durch den Strom eingebrachte Energie aufgrund einer sehr kleinen angelegten Spannung (kleiner 0,1 V) verschwindend gering [4, 14, 22, 23]. 2002 wurde zu dieser Verfahrensvariante ein zweites Patent von der Universität Stuttgart zum magnetisch beeinflussten Schweißen, das überwiegend auf das Überkopfschweißen ausgerichtet ist, angemeldet [3].

◆ Laserstrahlschweißen mit Hilfe von Wechsel-Magnetfeldern.

Am IFSW wurde als letztes untersucht, ob auch die durch ein veränderliches Magnetfeld induzierten Ströme genutzt werden können. Dazu wurde ein etwa 20 kg schwerer Experimentalmagnet benutzt, der aufgrund seines geblechten Kerns bis zu Frequenzen von einigen Kilohertz eingesetzt werden kann. Mit ihm wurde ein Experiment durchgeführt, bei dem die Wandung eines Aluminiumbehälters durchgeschweißt wurde, der mit zuvor erhitztem flüssigem Zinn gefüllt war. So lange der Magnet eingeschaltet war, konnte das Zinn bis zu einer Höhe von 25 mm vor dem Auslaufen be-

wahrt werden. Dies entspricht wegen der hohen Dichte des verwendeten Zinns etwa einer Höhe von 75 mm flüssigen Aluminiums [24 - 27].

Mit dem Laserstrahlschweißen unter magnetischer Beeinflussung beschäftigt sich seit geraumer Zeit nun auch eine zweite deutsche Forschungsstelle, in deren Veröffentlichungen die Steigerung der Durchmischung des Schweißguts durch elektromagnetisches Rühren im Vordergrund stand [28 - 30].

Da der zu dieser Verfahrensvariante im IFSW gebaute Magnet sehr modular aufgebaut ist, kann er an verschiedene Gegebenheiten angepasst werden und dient daher auch als Ausgangsbasis für das in diesem Bericht vorgestellte induktive Magnetsystem. Die ungewöhnliche Größe störte die Industriepartner keineswegs, da er zum Schweißen dicker Platten – mit Laser bis 12 mm und mit Elektronenstrahl bis 20 mm – eingesetzt werden sollte.

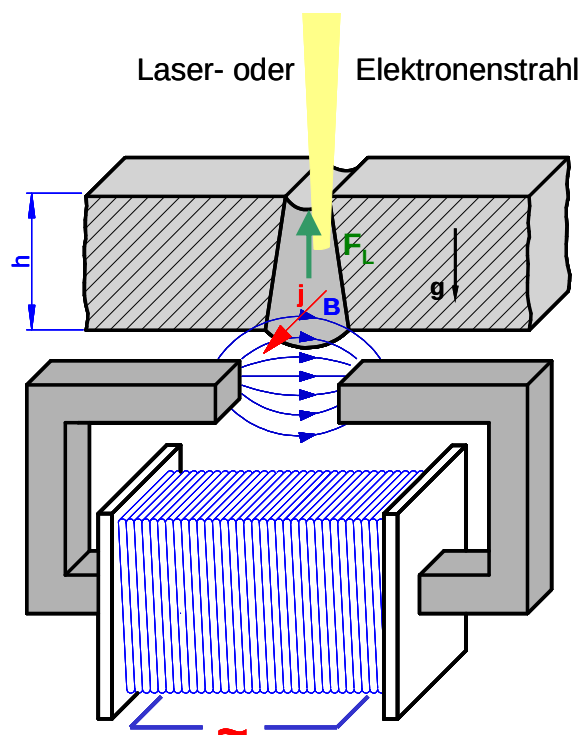


Abbildung 8: Anordnung eines induktiven Systems relativ zum Werkstück

Da mit einem induktiven System, bei dem nur die induzierten Ströme im Werkstück mit dem Magnetfeld wechselwirken, nur Druckkräfte erzeugt werden, muss der Magnet unter dem Werkstück platziert werden (zum Prinzip siehe Abbildung 8).

Der üblicherweise angegebene „ideale“ elektromagnetische Druck ergibt sich nach Literaturangaben zu

$$p_m = B_0^2 / (4\mu_0) . \quad (1)$$

Dabei ist B_0 die Amplitude des AC-Magnetfeldes und μ_0 die Permeabilitätskonstante. Dieser Druck wird jedoch bei realen Aufbauten im Werkstück nicht erreicht. Bei $B_0 = 1,6$ T, was ohne all zu großen technischen Aufwand realisiert werden kann, läge er beispielsweise bei 5 bar. Das entspräche für Stahl einer Schmelzbadsäule von 7 m.

Tatsächlich ist der reale elektromagnetische Druck im Schmelzbad p_f

$$p_f = f_{\text{geom}} f_{\text{sigma}} p_m \quad (2)$$

wesentlich kleiner. Zum einen kann das Werkstück im Allgemeinen nicht direkt zwischen den Polschuhen platziert werden, was einen Geometriefaktor bedingt. Berechnete Werte für den Geometriefaktor sind der Abbildung 9 zu entnehmen.

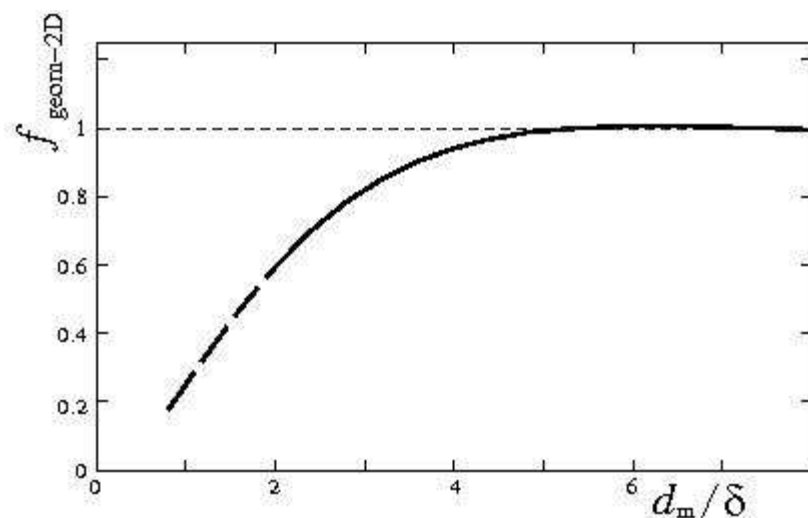


Abbildung 9: Geometriefaktor f_{geom} , berechnet in zweidimensionaler Näherung, in Abhängigkeit vom auf die Skinschichtdicke δ (siehe Abbildung 10) bezogenen Polschuhabstand d_m

Die in Abbildung 9 eingehende Schichtdicke δ , die so definiert ist, dass in ihr das magnetische Feld auf $1/e \approx 1/3$ abfällt, kann aus Abbildung 10 in Abhängigkeit von der Frequenz des Systems und dem zu bearbeitenden Werkstoff abgelesen werden.

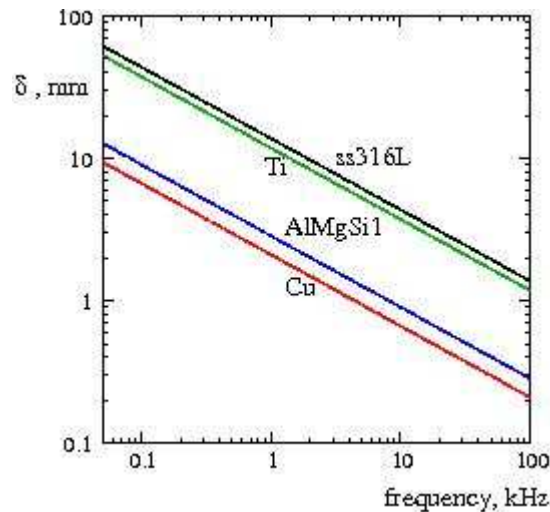


Abbildung 10: Zusammenhang zwischen der Frequenz des Magnetfeldes und der Eindringtiefe in das Werkstück (Skinschichtdicke δ) in Abhängigkeit vom Material

Zum zweiten ist die Stromdichte im Schmelzbad auch abhängig von der lokalen Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit im Werkstück. Bei Metallen ist diese in der Schmelze in der Regel sehr viel kleiner als im kalten Festkörper. Der Strom „umfließt“ daher zum großen Teil den Schmelzbereich (siehe Abbildung 11).

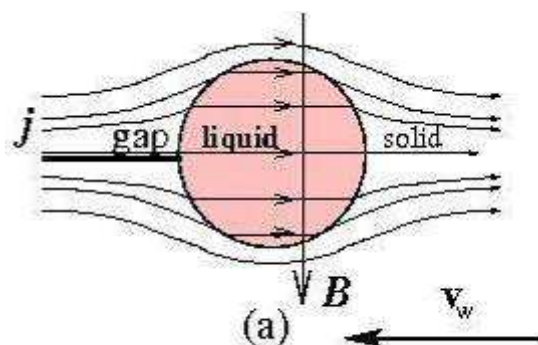


Abbildung 11: Ein durch das Werkstück fließender Strom umfließt zum großen Teil das Schmelzbad (rosa Bereich innerhalb des Kreises), da die Leitfähigkeit von Metallen in der Schmelze deutlich geringer ist als im Festkörper. Dieser Effekt bedingt den Leitfähigkeitsfaktor f_{sigma}

3.2.4 Nutzung von Magnetfeldern beim Beschichten, Umschmelzen und Dispergieren

Von anderen Forschungsstellen und Unternehmen in Deutschland wurden ähnliche Untersuchungen mit externem DC-Magnetfeld zum Beschichten [31, 32] und das Oberflächendispergieren [33] veröffentlicht. Beim Beschichten erzeugen die Temperaturgradienten entlang des Kontaktes zwischen Grundwerkstoff und Beschichtungsmaterial Thermospannungen von beachtlicher Größe. Diese von der Strahlquelle unabhängigen Ströme können mit einem externen Magnetfeld zur Gestaltung der Beschichtungsraupe verwendet werden [32]. Der Effekt kann verstärkt werden, wenn ein extern zugeführter Strom durch die Schmelze geleitet wird [32]. Beim Dispergieren wird die erzeugte bzw. modifizierte Schicht zur Minimierung von Poren gegen den Grundwerkstoff gedrückt [33].

4 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Der in diesem Projekt verfolgte Lösungsansatz ist entsprechend dem Projektantrag wie folgt:

Zum Stützen der Naht kommen im Sinne dieses Projektes – zuverlässiges Verfahren, bei kmU einsetzbar – zwei Konzepte in Betracht:

- Konduktives elektromagnetisches System zur Schmelzbadunterstützung, bei dem ein externer Strom durch das Schmelzbad geschickt wird und mit einem äußeren Magnetfeld wechselwirkt. Dieses Verfahren wird in einem Patent [21] für das Mehrlagen-Schweißen in einer speziellen Anordnung beschrieben und in [4] in einer anderen geometrischen Anordnung für das Laserstrahlschweißen exemplarisch vorgestellt. Im Vergleich zu der aus Vorversuchen bereits bekannten Anordnung soll insbesondere eine Anordnung getestet werden, bei der die Stromführung quer zur Vorschubrichtung erfolgt. Gegenüber einer Längsanordnung ist eine wesentlich höhere Stromdichte im Schmelzbad zu erwarten. Darüber hinaus sollte sie nach

analytischen Abschätzungen inhomogener ausfallen. Deshalb kommt es vermutlich zu Rührbewegungen im Schmelzbad, die möglicherweise eine gleichzeitige Steigerung der Durchmischung mit sich bringt.

- Induktives elektromagnetisches System zur Schmelzbadunterstützung, bei dem die induzierten Wirbelströme im Schmelzbad mit dem AC-Magnetfeld wechselwirken. Dieses elektromagnetische System kann sowohl im cw-Betrieb als auch gepulst betrieben werden.
- Im gepulsten Betrieb eines hochfrequenten AC-Magnetfeldes erfolgt in den Pulspausen ein schneller und praktisch vollständiger Abbau des Magnetfeldes. Dieses Verhalten schafft die Voraussetzung für den Einsatz eines solchen Systems auch beim Elektronenstrahlschweißen. Bedingung ist jedoch, dass der Elektronenstrahl gepulst betrieben wird und das Magnetfeld im Wechsel mit dem Elektronenstrahl eingeschalten wird. Das Konzept dazu wurde im IFSW erarbeitet. Die Machbarkeit wurde durch das Verhindern des Auslaufens von flüssigem Zinn aus einer Öffnung, die mit einem CO₂-Laser in ein Aluminiumblech eingebracht wurde, nachgewiesen [34, 24, 25]. Dabei wurden mit einem AC-Magneten Drücke bis 4 kPa erzeugt. Das entspricht einem hydrostatischen Druck von ca. 170 mm flüssigen Aluminiums.

Beide Systeme sollen dahingehend getestet und optimiert werden, dass aufgrund der Kräfte- und Geschwindigkeitsverteilung im Schmelzbad die Nahtkerben minimiert werden.

5 Konduktives System

5.1 Charakterisierung und Optimierung:

Nach Voruntersuchungen zur Ermittlung der in der Schmelzzone maximal erreichbaren Flussdichte (etwa 300 mT) und der ins Werkstück über Schleifkontakte einleitbaren Stromstärke (etwa 200 A) konnten die Dimensionen des Magnet-systems festgelegt werden.

In Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurde ein an einem Laserbearbeitungskopf befestigbares System entworfen und gebaut. Der komplette Magnetkörper besteht aus einem, bzw. mehreren Dauermagneten und Weicheisenteilen, die mit Kupferblech vor Hitze und Schweißspritzern geschützt wurden. Als Elektroden wurden Wolframdrähte gewählt, die mit Federn an das Werkstück gedrückt werden (siehe Abbildung 12).

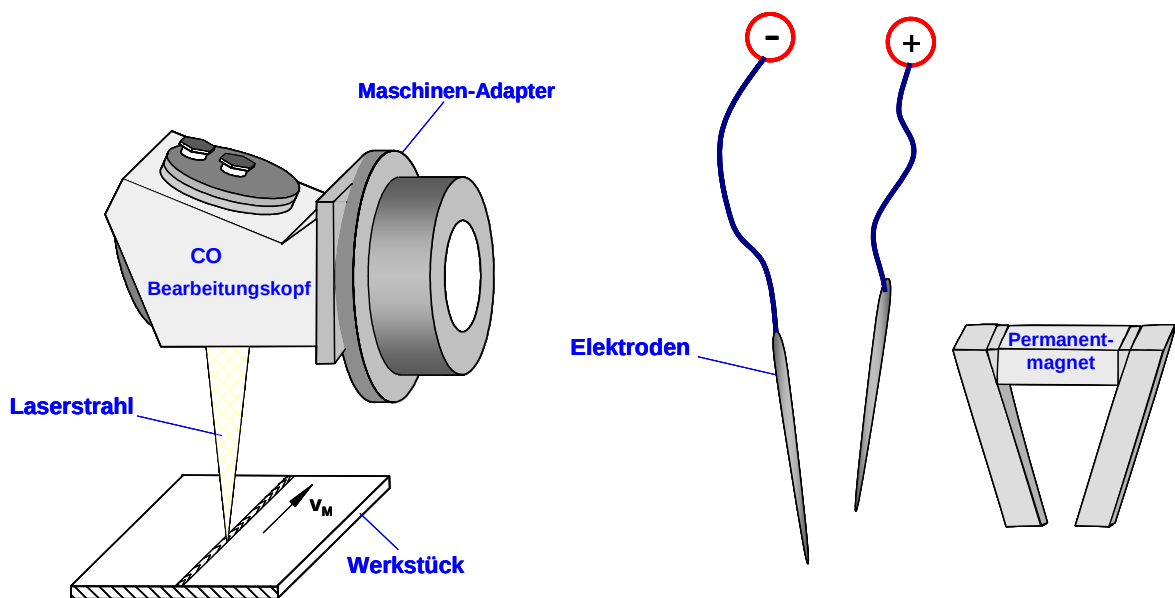


Abbildung 12: Bearbeitungskopf für 10- μ m-Strahlung, Elektroden und Permanentmagnet

Das Konzept zeichnet sich durch folgende Vor- und -Nachteile aus:

- + Preiswerte Permanentmagnete sind verfügbar (ein Satz ist für 100 € erhältlich),
- + Weicheisen ist leicht bearbeitbar und ebenfalls preiswert (im Bereich einiger 100 €),
 - d. h. die Polschuhe sind an die Geometrie anpassbar,
- jedoch sind Schleifkontakte erforderlich,
- dadurch ist die Stromstärke begrenzt und
- es können Spuren auf den Werkstücken entstehen.

Da das konduktive System eher für geringe Blechstärken geeignet ist (siehe unten), können im Vergleich zum induktiven System, das für große Blechstärken ausgelegt wurde, geringere Polabstände eingestellt werden. Als praxistauglich

erwiesen sich 10 mm. Bei diesem Abstand ist auch 3 bis 5 mm unterhalb der Pole noch eine ausreichende Flussdichte vorhanden und der Abstand zum Schweißprozess ist groß genug, um die Polschuhe ausreichend zu kühlen. Die Beschränkung auf dünnere Bleche (wir haben Versuche bis 3 mm Dicke durchgeführt) resultiert einerseits aus der Beschränkung der Remanenz erhältlicher Dauermagnete (maximal etwa 1,4 T) und der gleichzeitigen Beschränktheit der Stromstärke, die über Schleifkontakte ins Werkstück geleitet werden kann.

Der Elektrodenabstand auf dem Werkstück wurde bei den am IFSW durchgeführten Versuchen ebenfalls zu 10 mm gewählt (5 mm Abstand zum Laserstrahl). Dieser Abstand ist ausreichend, damit sich der Strom im Bereich der Schmelze gleichmäßig über die Werkstückdicke verteilt, aber nicht zu sehr in die Breite ausweicht.

Als Anordnung kommt bei den verwendeten Schleifkontakten (Wolfrahmdrähte) nur die in Abbildung 13, rechts gezeigte in Frage, da nur so ein sicherer Kontakt zwischen Schleifer und Werkstück hergestellt werden kann. Mit einer Magnetfeldorientierung in Vorschubrichtung waren zuvor noch keine Versuche gemacht worden. Diese Anordnung erwies sich aber in den Versuchen (siehe unten) als unproblematisch.

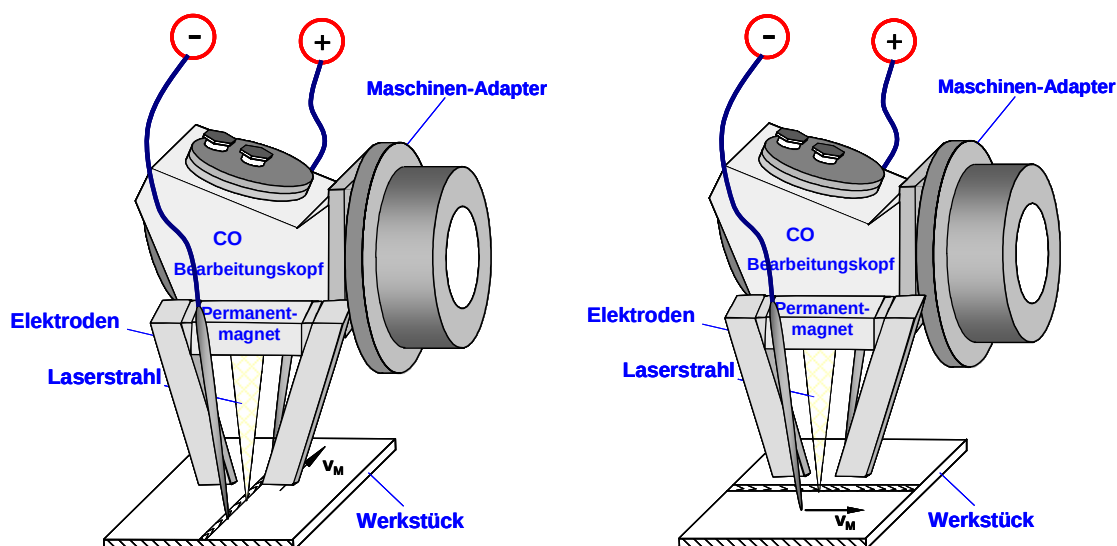
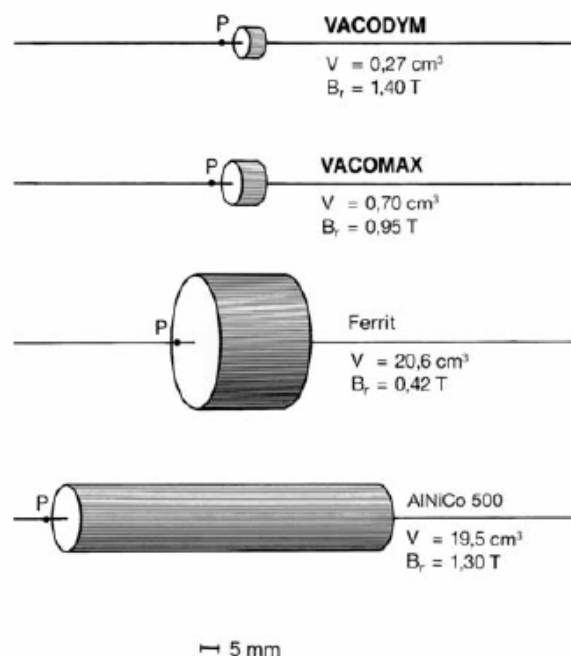


Abbildung 13: Zwei mögliche Anordnungen relativ zur Schweißnaht

5.2 Bau des konduktiven Systems

Der Werkstoff des Permanentmagneten sollte eine möglichst hohe Remanenz ermöglichen. Magnete aus Nd Fe B, Co Sm und Al Ni Co erscheinen deshalb besonders geeignet. Deren Remanenz liegt im Bereich von einem Tesla. Beispielsweise erreicht Ferrit im Vergleich dazu nur etwa 0,4 T. Der Vergleich der Baugrößen verschiedener Magnete in Abbildung 14 lässt ferner erkennen, dass auch wegen der Platzverhältnisse im Umfeld eines Laserbearbeitungskopfes nur die Seltenerd magnete aus Nd Fe B oder Co Sm in Frage kommen.



*Abbildung 14: Anschauliches Beispiel für die Volumenreduzierung bei Verwendung von VACODYM (Nd Fe B-Magnet) und VACOMAX (Kobalt-Samarium-Magnet): Die Magnete sind jeweils so dimensioniert, dass im Abstand von 5 mm von der Polfläche ein Feld von 100 mT erzeugt wird. [35] *) VACODYM und VACOMAX sind Produktbezeichnungen der Firma Vacuumschmelze*

Zwar liegt die Remanenz von Nd Fe B-Magneten um 20 bis 30 Prozent höher als die von Co Sm-Magneten, doch sind sie deutlich empfindlicher bezüglich Temperaturänderungen (siehe Tabelle 1). So nimmt ihre Remanenz mit steigender Temperatur etwa dreimal so schnell ab wie die der Co Sm-Magnete (vergleiche die Temperaturkoeffizienten). Deshalb liegt die maximale Anwendungstempera-

tur deutlich niedriger. Alternativ muss man mit einer Verringerung der Remanenz rechnen. Abbildung 15 verdeutlicht dies für eine Temperatur von 120°C. Die anfänglich um etwa 30% höhere Remanenz der Nd Fe B-Magnete gegenüber Co Sm-Magneten vermindert sich nach 150 Stunden unter den Bedingungen von Abbildung 15 auf etwa 12%. Auch die Curie-Temperatur, also die Temperatur, ab der eine bleibende Schädigung eintritt, ist mit 310 bis 370 °C bei den Nd Fe B-Magneten recht niedrig.

Tabelle 1: Eigenschaften von Nd Fe B- und Kobalt-Samarium-Magneten nach Angaben der Firma Vacuumschmelze GmbH & Co. KG (VAC)

		Nd Fe B	Sm ₂ Co ₁₇	Sm Co ₅
Typische Remanenz B_r	T	1,08 - 1,47	0,90 - 1,12	
Koerzitivfeldstärke H_{cB}	kA/m	885 - 1115	660 - 820	
Temperaturkoeffizient	%/°C	-0,115 - -0,08	-0,030 - -0,040	
Max. Anwendungstemperatur	°C	50 - 220	250 - 350	
Curie-Temperatur T_C	°C	310 - 370	800 - 850	700 - 750
Spez. Wärme c_p	J/kg K	350 - 550	300 - 500	300 - 500
Wärmeleitfähigkeit k	W/m K	5 - 15	5 - 15	5 - 15

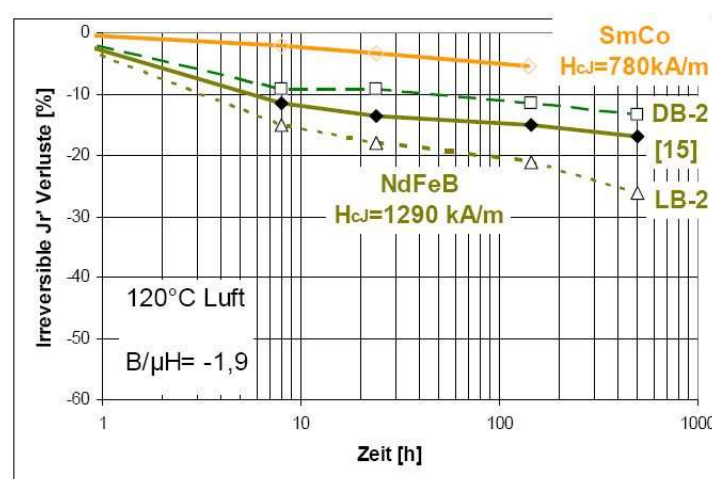


Abbildung 15: Irreversible Verluste der scheinbaren Remanenz J_r' bei 120°C an Luft von anisotropen Nd-Fe-B und Sm-Co Pressmagneten. Nd-Fe-B DB-2 und LB-2 kaltgepresst, (durchgezogene Linie) warmgepresst (gestrichelt). [36]

5.3 Parameteroptimierung Magnet und Stromzuführung

Eine Anordnung der Dauermagnete, wie sie in Abbildung 13 zu sehen ist, hat sich als nicht geeignet herausgestellt. Zwar sind die Magnete durch die Anordnung oben im Joch relativ gut geschützt vor Hitzeentwicklung und Spritzern, jedoch verliert man bei einer schlanken Bauweise etwas mehr als die Hälfte der magnetischen Flussdichte durch Streuung des Magnetfeldes zwischen den Schenkeln. Mit zwei Magneten im unteren Bereich der Schenkel konnte dieses Problem überwunden werden.

Da der Magnet wegen der schrägen Anordnung (siehe Abbildung 13) im unteren Bereich abgeknickt sein sollte oder die Schenkel über dem Werkstück passend geformt sein sollten, Dauermagnete jedoch nur sehr schwer zu bearbeiten sind, wurde für das untere Ende des Magneten (Polschuhe) ein anderer Werkstoff vorgesehen.

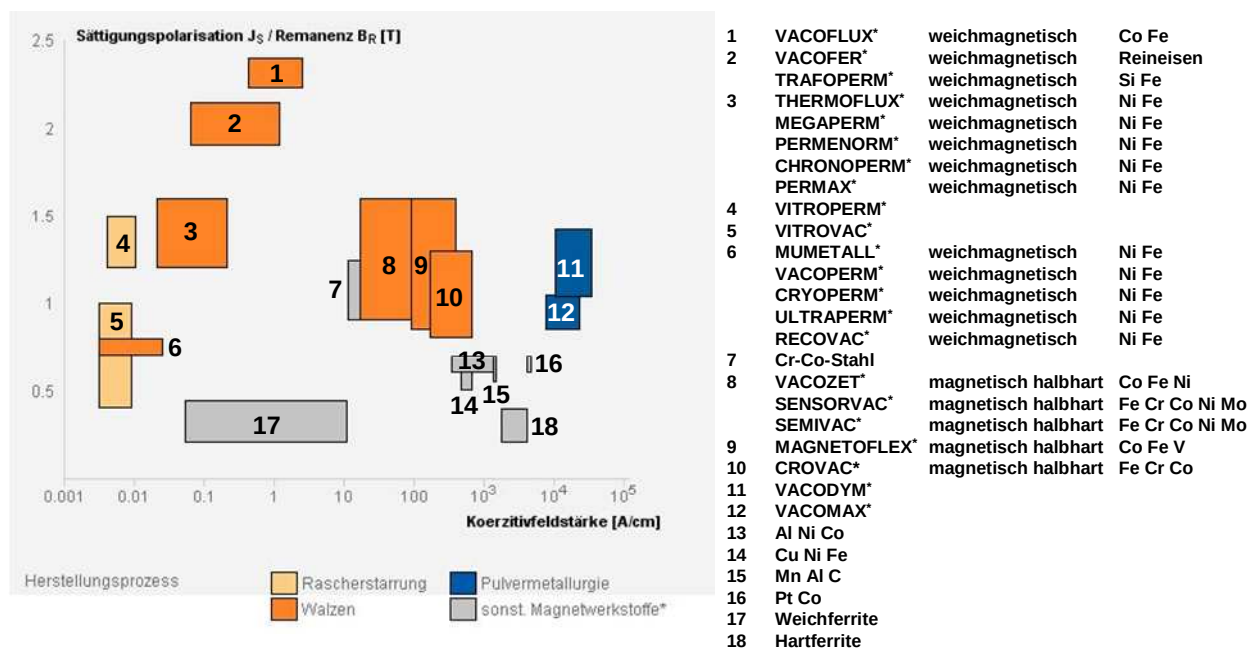


Abbildung 16: Werkstoffe für Magnetkerne der Firma Vacuumschmelze GmbH & Co. KG (VAC) *) Produktbezeichnungen der Firma Vacuumschmelze

Abbildung 16 zeigt Werkstoffe, die üblicherweise für Magnetkerne eingesetzt werden. Um die Schenkel nach unten etwas schlanker gestalten zu können (Bün-

delung der Magnetfeldlinien und verbesserte Zugänglichkeit) sollte wie bei den Magneten ein Werkstoff mit hoher Remanenz gewählt werden. Weichmagnetische Materialien aus Co Fe oder Weicheisen weisen eine Remanenz auf, die mit 2 bis 2,4 T deutlich über der der Dauermagnete liegt. In dem Verhältnis der Remanenzen von Weicheisen und Dauermagnet kann dann der Querschnitt im Polschuh verringert werden. Zum Schutz vor Wärmeentwicklung und Spritzern hat es sich als empfehlenswert herausgestellt, den Dauermagneten einschließlich der Polschuhe mit Kupferblech zu schützen. So konnte im Vergleich zum induktiven System (siehe unten), bei dem mit einem Polabstand von 25 mm gearbeitet wird, hier ein Polabstand von 10 mm realisiert werden. Damit wurde eine Flussdichte von etwa 300 mT im Bereich der Schmelze erreicht.

In Voruntersuchungen waren zunächst Stapelversuche mit Seltenerd-magneten und Vergleiche zwischen Messungen und Berechnungen durchgeführt worden.

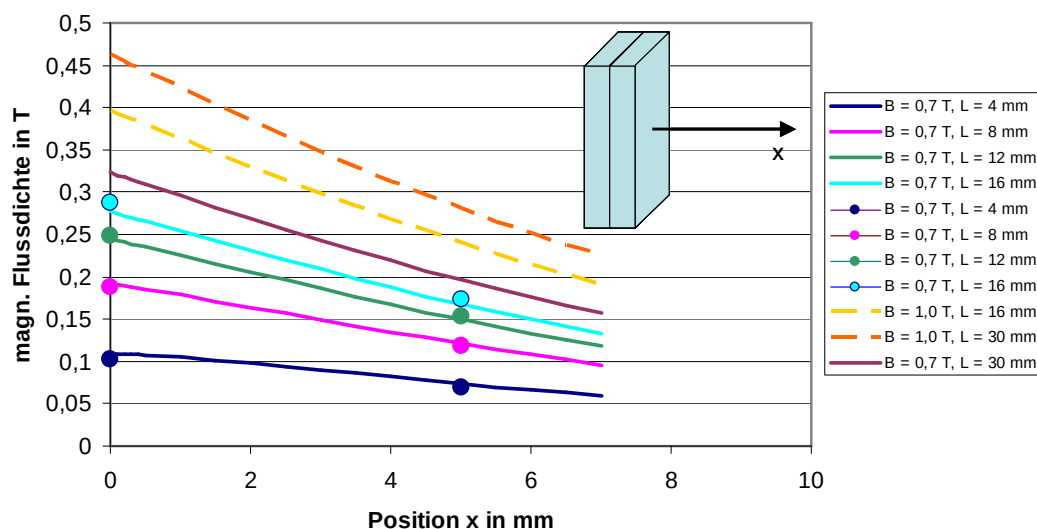


Abbildung 17: Magnetische Flussdichte unter einem Stapel von Seltenerd-magneten. Die einzelnen Magnete hatten eine Querschnittsfläche von 19 mm x 36 mm und eine Dicke in Stapelrichtung von 4 mm. Die Punkte sind Messungen und die durchgezogenen Linien dazugehörige Rechnungen (Remanenz: 0,7 T); die gestrichelten Linien sind die Ergebnisse von Rechnungen baugleicher Magnete mit einer Remanenz von 1 T. L ist die gesamte Dicke des Stapels.

Mit vier Dauermagneten der Remanenz 0,7 T waren im Abstand von 5 mm zum Magnet (auf der eingezeichneten x-Achse) maximal 173 mT zu erzielen. Verbin-

det man die vier Dauermagnete mit Weicheisenquadrern zu einer Ringstruktur mit Luftspalt der Breite 10 mm (siehe Abbildung 18), misst man in der Mitte des Luftspalts (je 5 mm Abstand zu den Magneten) 423 mT. Unterhalb des Magneten (positive x-Richtung) fällt die magnetische Flussdichte jedoch sehr schnell auf einige 10 mT ab.

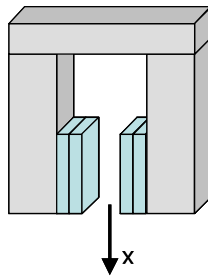


Abbildung 18: Anordnung 1 von vier Seltenerd-magneten mit drei Weicheisenquadrern (grau)

Eine einsatzfähige Anordnung wird zusammen mit den gemessenen magnetischen Flussdichten in Abbildung 19 gezeigt.

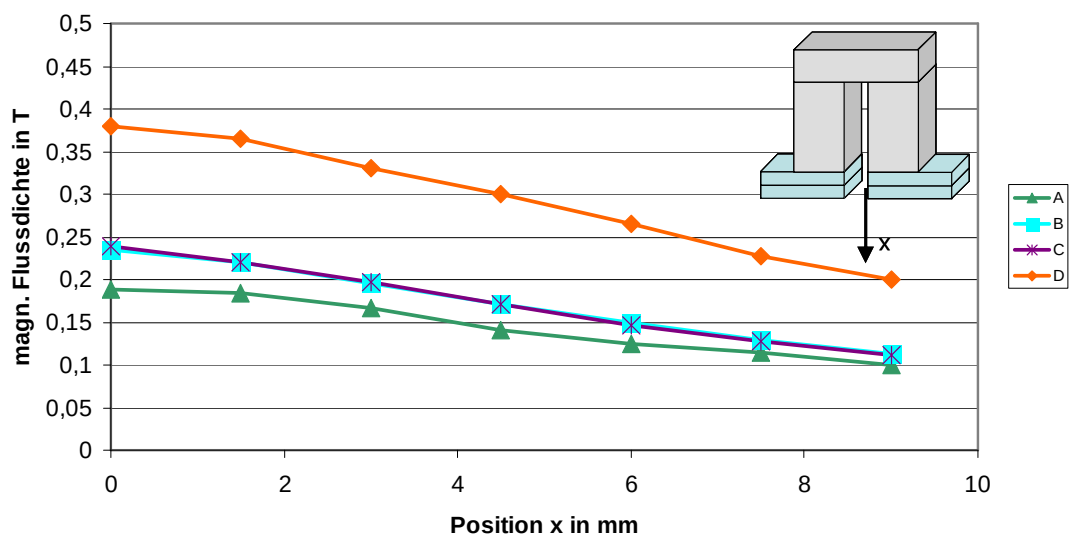


Abbildung 19: Magnetische Flussdichte unterhalb eines Hufeisenmagnets; A: bei einem Luftspalt von 12,5 mm; B und C: mit einem Luftspalt von 10 mm (C: gewichtsoptimierte Größe der Weicheisenquader) bei $B_r = 0,7$ T; D: letztlich realisierter Magnet mit Dauermagneten der Remanenz 1 T

Abbildung 20 zeigt zweidimensionale Varianten der dreidimensional gefalteten konstruktiven Ausgestaltung (Abbildung 21). Die Abbildung macht deutlich, dass weitere Steigerungsmöglichkeiten der magnetischen Flussdichte im Bereich der Schweißung möglich sind.

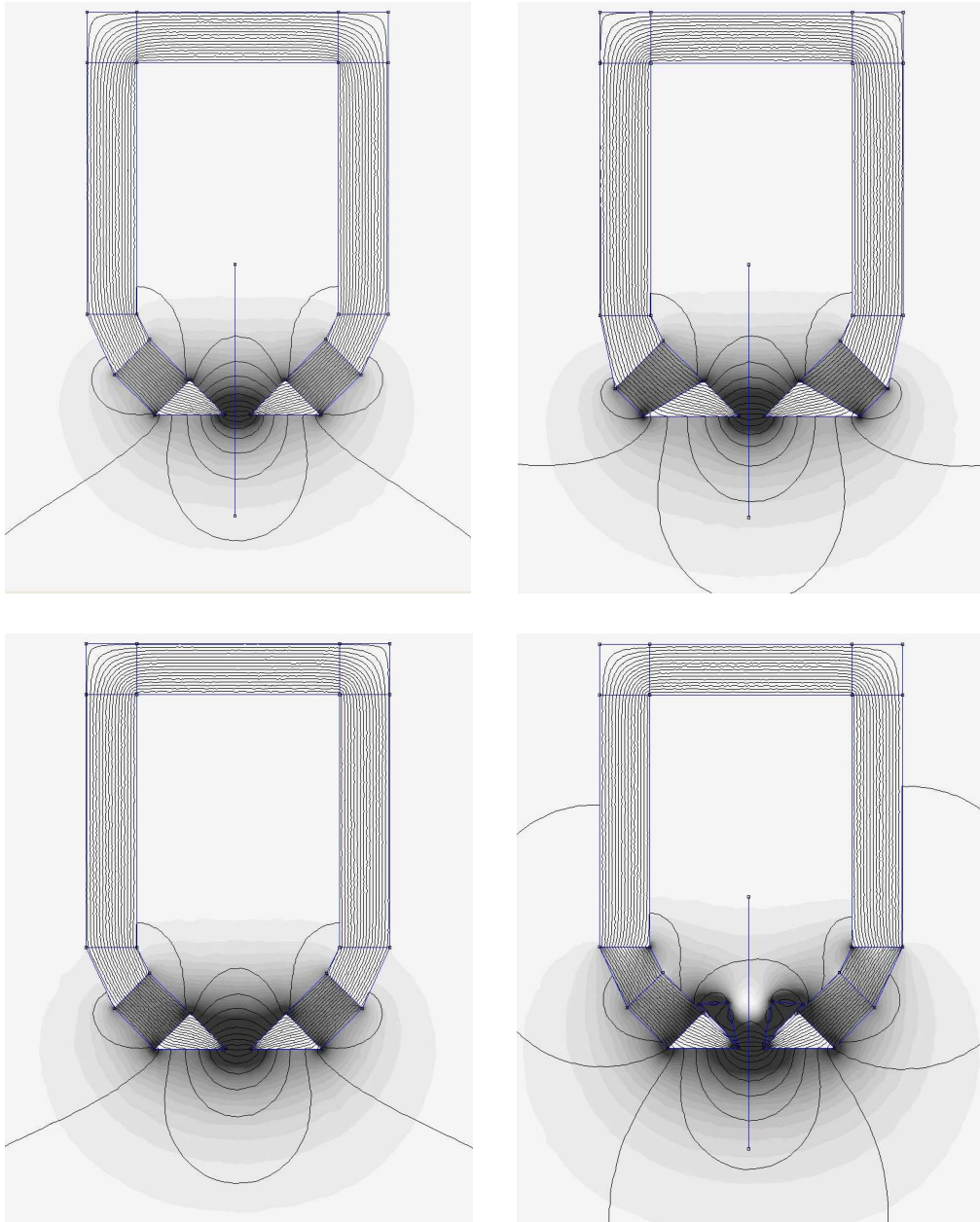


Abbildung 20: Designstudie des Permanentmagneten: oben: Co-Sm-Dauermagnete, unten: Ni-Fe-B-Dauermagnete, links: jeweils einfache Ausgestaltung mit einer Breite von 20 mm, rechts oben: Verbreiterung der Magnete auf 30 mm; rechts unten: zwei zusätzliche Magnete, die das Streufeld im Innenbereich vermindern; Magnetische Feldstärke H in 20 Graustufen zwischen 0 und 300.000 A/m

Ausgehend von der Konfiguration links oben mit Co Sm Magneten kann die Flussdichte durch Verwendung breiterer Magnete (rechts oben), durch anderes Magnetmaterial (links unten), das allerdings ein optimiertes Kühlkonzept erfordert, und durch den Einsatz geformter zusätzlicher Magnete zur Minimierung des Streufeldes zwischen den Schenkeln gesteigert werden. Die letztlich realisierte Konfiguration ist in Abbildung 21 dargestellt. Der verwendete Fokussierspiegel hatte eine Brennweite von 200 mm und bestimmte den freien Raum unterhalb des Bearbeitungskopfes. Als Abstand zwischen Werkstück und Unterseite des Bearbeitungskopfes ergaben sich 86 mm.

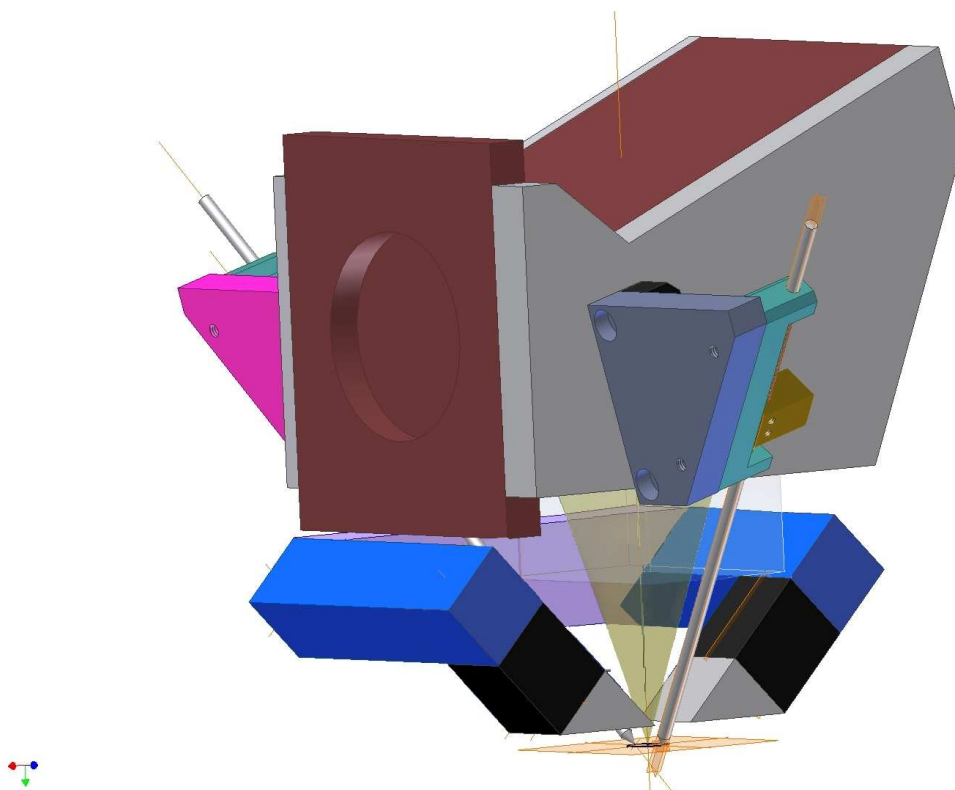


Abbildung 21: Bearbeitungskopf für 10-µm-Laserstrahlung mit Elektroden und Permanentmagnet

Für die erforderlichen Schleifkontakte wurden zwei verschiedene Anpressvarianten erprobt: a) mit einer Feder in einer Hülse wird eine Kraft in Längsrichtung des Stifts ausgeübt (siehe Abbildung 21 und Abbildung 22, links), b) mit einer Feder wird der Stift senkrecht zu seiner Achse gegen das Werkstück gedrückt (ohne Abbildung). Obwohl beide Varianten in Kontaktierungsversuchen problemlos funktionierten, erscheint Variante a) aufgrund der günstigeren Hebelverhältnisse

geeigneter zu sein. Die besten Ergebnisse wurden mit einem zugespitzten Stift (siehe Abbildung 22, rechts) gemacht.



Abbildung 22: Schleifkontakt; links: Halterung mit Druckfeder (nicht sichtbar) und Wolframstift; rechts: Wolframstift mit spitzer Form

5.4 Applikationsorientierte experimentelle Untersuchung der Prozessparameter

Mit der Konfiguration aus Abbildung 21 wurden Schweißversuche mit CO₂-Lasern durchgeführt. Dabei kamen Bleche aus der Aluminium-Legierung AlMgSi1 und dem Stahl 1.4310 mit den Dicken 2mm und 3mm zum Einsatz. Der Magnet erzeugte im Bereich der Naht eine maximale magnetische Flussdichte von etwa 300 mT und die Stromstärke wurde bis zu 200 A gewählt. Die Laserleistung betrug 5 kW, die Beugungsmaßzahl der Strahlquelle betrug knapp 2 und der Fokussdurchmesser 300 µm. Als Schweißgeschwindigkeit wurden 4m/min bis 6 m/min gewählt. Ohne magnetische Beeinflussung ergaben sich in diesem Geschwindigkeitsbereich Durchschweißungen. Beim Werkstoff AlMgSi1 und einer Geschwindigkeit von 6 m/min wurde die Durchschweißgrenze bei einer Anhebung der Naht mit dem konduktiven System teilweise unterschritten, so dass die einzelnen Nähte nicht über die gesamte Nahtlänge durchgeschweißt wurden. In den Bereichen, die durchgeschweißt wurden, ergab sich im unteren Bereich eine sehr schmale Naht. Bei niedrigerer Geschwindigkeit und bei Stahl wurden diese Effekte nicht beobachtet. In diesen Fällen blieb die Nahtquerschnittsform – außer der ge-

wünschten Anhebung bzw. Absenkung – praktisch unverändert (siehe Abbildung 23).

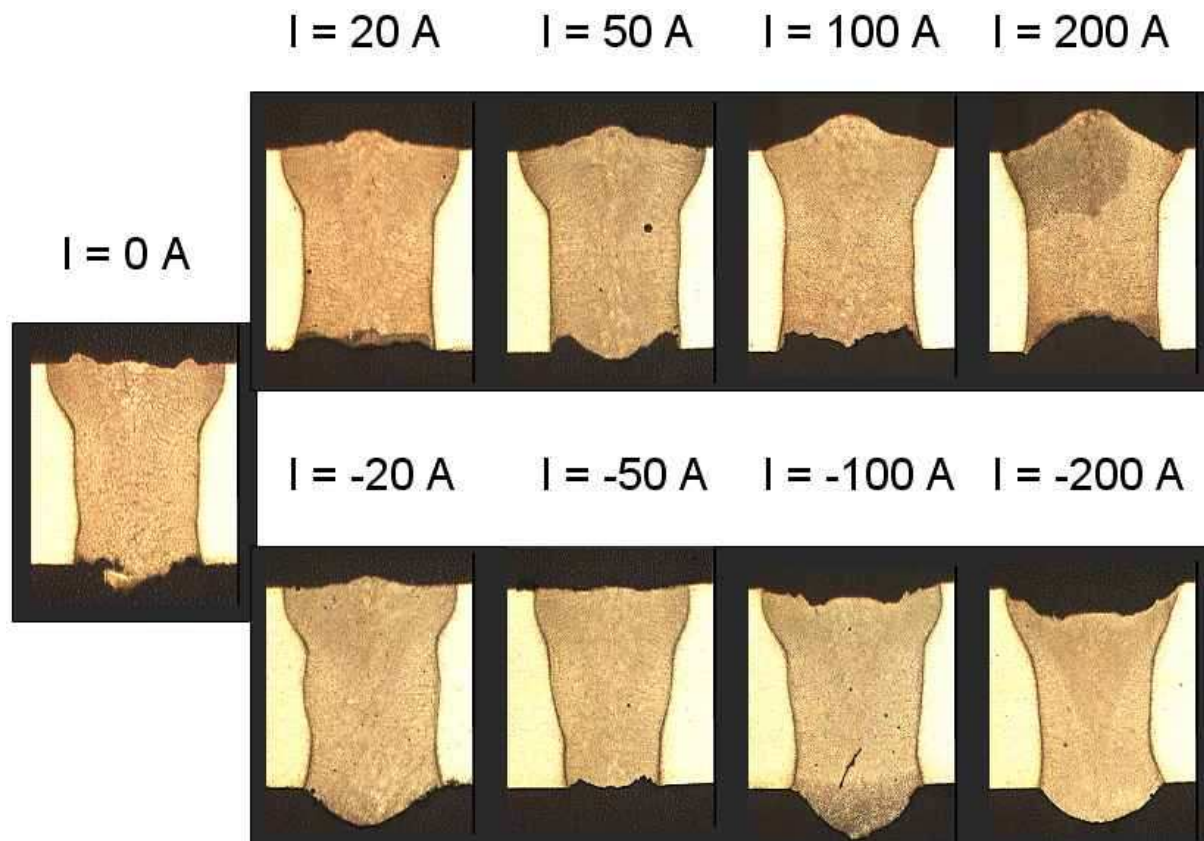


Abbildung 23: Querschliffe von Schweißungen mit magnetischer Unterstützung; $B = 300\text{ mT}$, Strom über die Schleifkontakte, Laser: HL 4006D, Wellenlänge: 1064 nm , $PL = 3,7\text{ kW}$, Brennweite: 150 mm , Brennfleckdurchmesser: $300\text{ }\mu\text{m}$, Schweißgeschwindigkeit: 4 m/min

Die Anhebung erwies sich in Abhängigkeit der Stromstärke sowohl bei Stahl als auch bei Aluminium als nahezu linear (siehe Abbildung 24). Für den Aluminium-Werkstoff wurden außer Blindschweißungen auch I-Nähte am Stumpfstoß durchgeführt, die sich wenig von den Blindschweißungen unterschieden. Lediglich zu Nahtanfang, wenn der gesamte Strom durch die Schmelze fließen muss, kam es zu wesentlich stärkerer Nahtanhebung bzw. Absenkung. Für eine industrielle Umsetzung ist hierfür eine Stromstärkenregelung vorzusehen.

Für das Verschweißen von Rohren wurden zwei spezielle Designs des konduktiven Systems entworfen. Für das Schweißen in Umfangsrichtung kann das Magnetsystem aus Abbildung 21 zum Einsatz kommen, wobei die Stromstärke (ein-

schließlich der Stromrichtung) in Abhängigkeit der Position geregelt wird (siehe Abbildung 25).

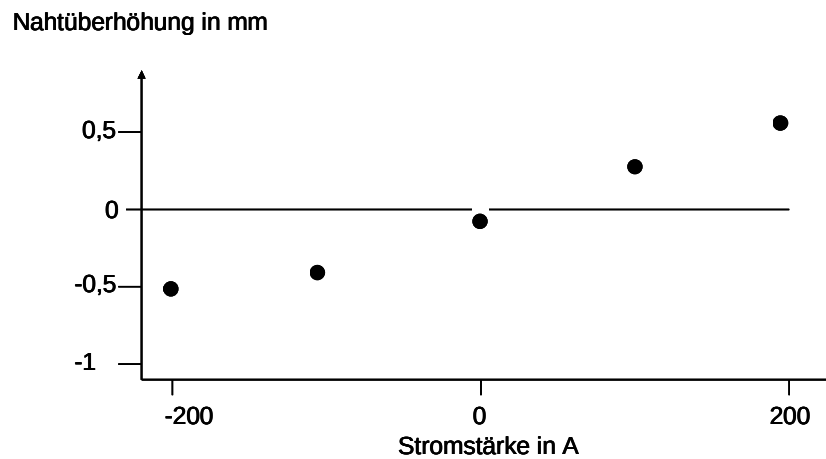


Abbildung 24: Erzielte Nahtüberhöhung beim Schweißen von Aluminium, Dicke: 3 mm, 290 mT

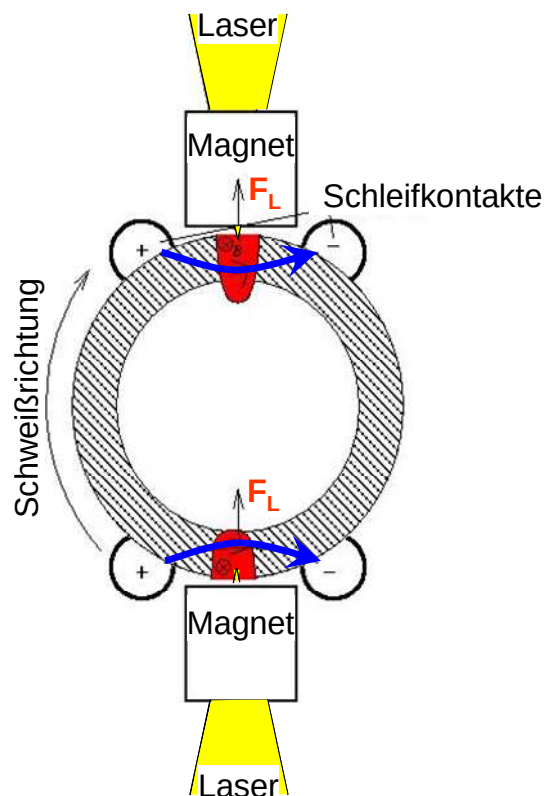


Abbildung 25: Design eines konduktiven Systems, optimiert für Rohr-Umfangsschweißungen

Hierbei kann der Vorteil des konduktiven Systems genutzt werden, dass sowohl Druck- als auch Zugkräfte in Abhängigkeit der Orientierung des Stroms erzeugt werden können.

Eine weitere Ausgestaltung für Rohr-Längsschweißungen zeigt Abbildung 26. Hierbei wird der Magnet auf einer Art Lanze im Inneren des Rohres geführt. Dabei ist zur Erzielung einer ausreichenden magnetischen Flussdichte (geringe Streuverluste) darauf zu achten, dass die Dauermagnete analog zu Abbildung 20 nahe an den Polschuhen platziert werden.

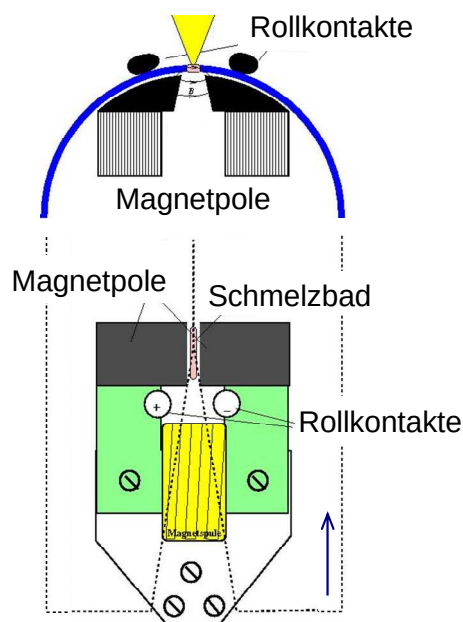


Abbildung 26: Design eines konduktiven Systems, optimiert für Rohr-Längsschweißungen

6 Induktives System

6.1 Charakterisierung und Optimierung

Während das konduktive System für das Verschweißen dünnerer Bleche im Bereich weniger Millimeter ausgelegt wurde, lag der angestrebte Anwendungsbereich des induktiven Systems bei größeren Materialstärken. In Absprache mit den

Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses wurde das induktive System für zwei typische Anwendungsfälle aufgebaut. Zum einen für das Schweißen von dicken Stahlplatten (8 bis 20 oder auch 30 mm) und zum Schweißen von Aluminiumblechen im Bereich von 3 bis 10 mm. Die Frequenzen des Schwingkreises des Magneten wurden dazu passend nach Abbildung 10 für eine Eindringtiefe des Magnetfelds in das Werkstück von 8 mm im Fall von Edelstahl und von 3 mm für Aluminiumlegierungen gewählt. Das bedeutet für das Schweißen von Edelstahl etwa 3 kHz und für Aluminium 600 Hz. Die Polschuhe wurden leicht verstellbar angebracht und ihr Abstand in Schweißversuchen optimiert. Für die Versuche mit Stahl wurden schließlich 23 bis 26 mm gewählt. Für die dünneren Aluminiumbleche waren geringere Abstände günstiger. Um die Elektroden vor Streustrahlung, Spritzern und Hitze schützen zu können, wurden dann aber dennoch 23 mm Polabstand vorgesehen. Wie bereits im Abschnitt 3.2.3 erwähnt, wurde ein im Vorfeld des Projekts im IFSW aufgebauter induktiver Magnet als Ausgangspunkt der Untersuchungen gewählt.

6.2 Parameteroptimierung des Magnets

Um das Produkt $f = f_{\text{geom}} \cdot f_{\text{sigma}}$ der in Abbildung 9 und Abbildung 11 angesprochenen Faktoren experimentell bestimmen zu können, wurde ein Verfahren benutzt, das im Vorfeld des Projekts entwickelt wurde. Dazu werden die Geometrien von Ober- und Unterraupen von Schweißversuchen mit und ohne magnetische Unterstützung mit einem Lichtschnittsystem über eine Länge von jeweils 90 mm vermessen. Aus der Blechdicke h_0 , der gemessenen mittleren Nahtüberhöhung (oben) h_1 und dem mittleren Nahtdurchhang (unten) h_2 wurde mit der Erdbeschleunigung g und der Dichte des flüssigen Metalls ρ der hydrostatische Druck p_h

$$p_h = \rho g (h_0 + h_1 + h_2) \quad (3)$$

ermittelt. Ferner wurden mit den Krümmungsradien der Oberflächen, die aus den Nahtbreiten oben d_1 und unten d_2 sowie den Höhen h_1 und h_2 zu

$$r_i = \frac{\frac{d_i^2}{4} + h_i^2}{2 h_i}, i = 1, 2 \quad (4)$$

bestimmt wurden, die durch Oberflächenspannung erzeugten Drücke p_{s1} und p_{s2} mittels

$$p_{si} = \gamma / r_i, i = 1, 2 \quad (5)$$

berechnet. Dabei ist γ der aus den Schweißungen ohne Magnetfeld bestimmte Oberflächenspannungskoeffizient; $\gamma = 1,5 \text{ N/m}$. Dieser liegt im Bereich der in der Literatur gefundenen Werte.

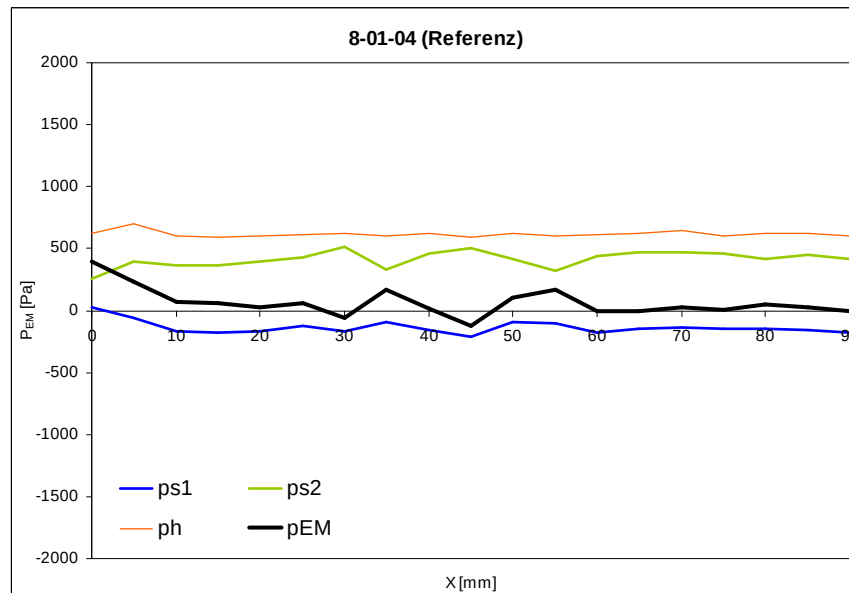


Abbildung 27: Hydrostatischer Druck p_h und die durch Oberflächenspannung verursachten Drücke p_{s1} und p_{s2} sowie der daraus resultierende Druck des elektro-magnetischen Systems p_{EM} für eine Referenzschweißung in 8 mm starkem Edelstahl (5 kW Laserleistung, 10 μm Wellenlänge, 0,3 m/min Schweißgeschwindigkeit)

In Abbildung 27 sind die so ermittelten Drücke über der Länge der Schweißnaht für den Referenzfall aufgetragen. Der elektromagnetische Druck muss sich dabei zu 0 ergeben, was im Mittel erfüllt ist, wie man deutlich erkennt (Die ersten 10 mm sollte man wegen eines auftretenden Anfangsaufwurfs unberücksichtigt lassen) [37]. In Abbildung 28 sind zwei analoge Messungen von Versuchen, bei denen die magnetische Unterstützung eingeschaltet war, wiedergegeben.

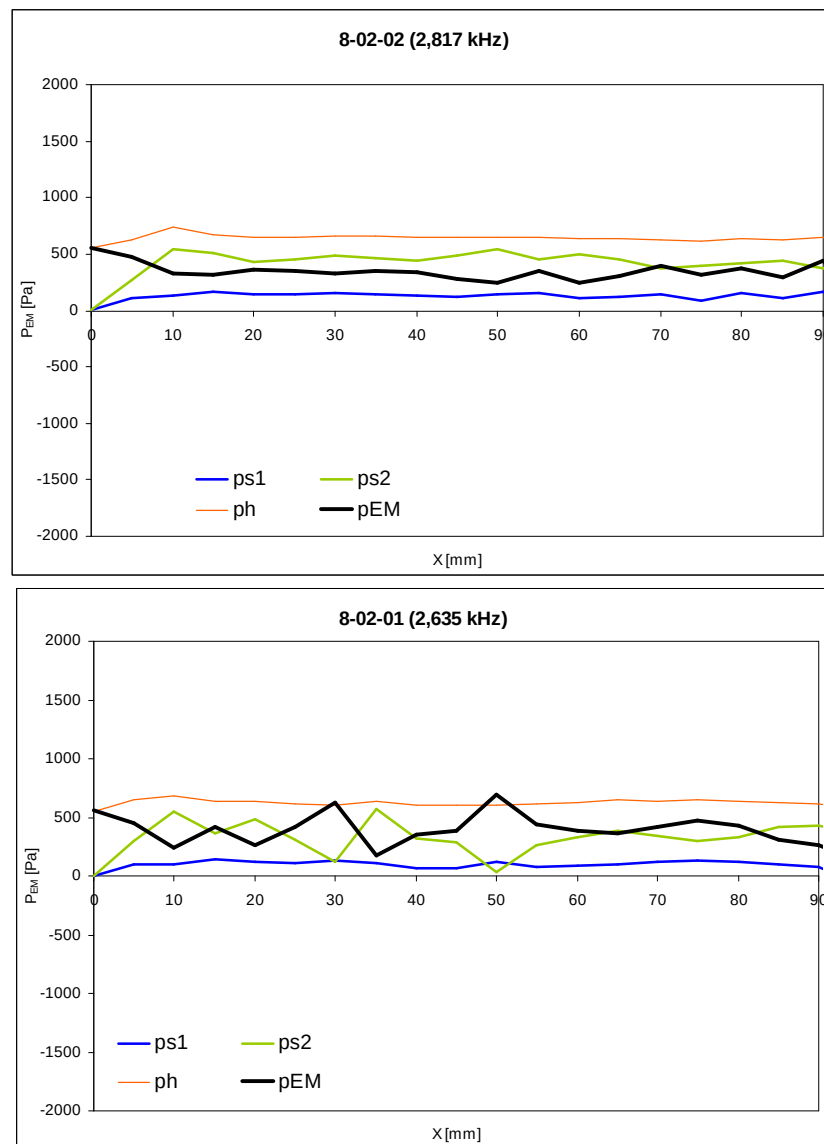


Abbildung 28: Hydrostatischer Druck p_h und die durch Oberflächenspannung verursachten Drücke p_{s1} und p_{s2} sowie der daraus resultierende Druck des elektro-magnetischen Systems p_{EM} für eine Schweißung in 8 mm starkem Edelstahl (5 kW Laserleistung, 10 μ m Wellenlänge, 0,3 m/min Schweißgeschwindigkeit; Magnet: oben: 2817 Hz, 1025 W; unten: 2.635 Hz, 1250 W)

Aus dem Vergleich des gemessenen magnetischen Drucks p_f mit dem idealen magnetischen Druck p_m (siehe Gleichung (2)) ergibt sich der von den Versuchsparametern abhängige Faktor f (siehe Abbildung 29).

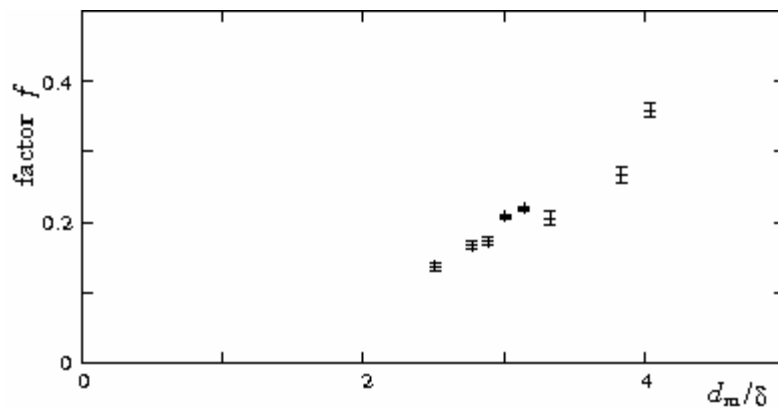


Abbildung 29: Gemessener Faktor f

Eine gegenüber dem Messbereich in Abbildung 29 weitere Vergrößerung der Skinschicht δ (Reduzierung von d_m/δ) verursacht nach Berechnungen wieder steigende induktive Verluste. Ferner muss beachtet werden, dass bei sehr kleinen Skinschichtdicken die Neigung zu Reighleigh-Instabilitäten stark zunimmt. Die Skinschichtdicke sollte folglich auf jeden Fall deutlich größer sein als die Schmelzbadbreite bzw. -länge. Als Auslegungswert wurde daher ein Verhältnis von $d_m/\delta \approx 3$ gewählt. Damit ergibt sich der Faktor f des aufgebauten Systems zu 0,2 (siehe Abbildung 29).

Der gemessene magnetische Druck p_f lässt sich auch zur Berechnung des Effizienzfaktors $w = P_M / p_f$ heranziehen. Dabei ist P_M die vom Magnetsystem aufgenommene elektrische Leistung. Der Effizienzfaktor w gibt also die benötigte AC-Leistung pro Pascal EM-Druck in der Schmelze an. Die Werte sind für zwei unterschiedliche Anschlussvarianten des Schwingkreises an den Verstärker in Abbildung 30 dargestellt. Für beide Systeme ergibt sich eine optimale Frequenz von 3 kHz, jedoch variiert der Effizienzfaktor nur wenig im untersuchten Parameterbereich, so dass der Magnet ohne großen Leistungsverlust auch bei anderen Frequenzen betrieben werden kann.

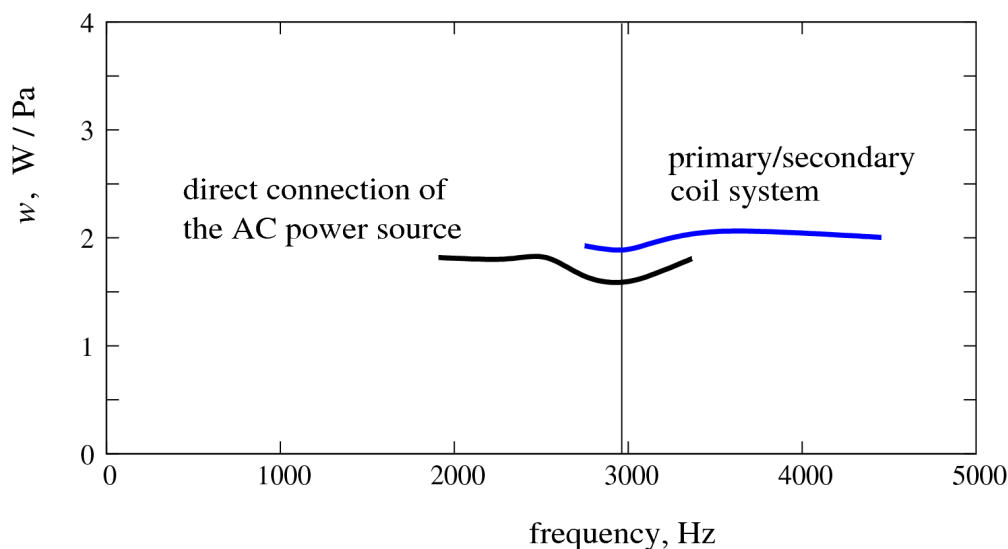


Abbildung 30: Abhängigkeit der Leistungsaufnahme des induktiven Systems von der Frequenz des Magnetfeldes; (der Faktor w gibt die elektrische Leistung pro erzeugtem Druck an)

Aus den festgelegten geometrischen Größen zusammen mit den Leistungsdaten der Komponenten können nun die optimalen Betriebsparameter berechnet werden. Diese sind für des Schweißen von Edelstahlplatten in Tabelle 2 zusammengestellt. Tabelle 3 enthält die entsprechenden, aus Skalierungsgesetzen abgeleiteten Größen für hoch-leitfähige Materialien wie Aluminium.

Tabelle 2: Parameter des induktiven Systems für Edelstahl als Werkstück

EM-Schmelzbadunterstützung, 3 kW AC-Quelle @ 3 kHz

Edelstahl 1.4404

($\sigma_s = 1,33 \text{ Si}/\mu\text{m}$)

• optimale Zahl der Windungen der Primärspulen	13 (12,3)
• maximale Spannung an der Kapazität C ($C = 25 \mu\text{F}$)	375 V
• maximaler Strom über der Kapazität C	176 A
• maximales Magnetfeld	196 mT
• maximale Druck in der Flüssigmetallsäule	1635 Pa
• maximale Höhe in der Flüssigmetallsäule h_0	23,8 mm

Will man die induktive Schmelzbadunterstützung auf dickere Edelstahlplatten anwenden als mit dem System aus Tabelle 2 möglich ist ($h_0 > 23,8 \text{ mm}$), muss ein leistungstärkerer Verstärker (PA: Power Amplifier) gewählt werden. Will man preiswerte Technologie einsetzen, können auch zwei oder vier Verstärker zusammengeschaltet werden. Die Doppelhufeisenform des Magneten mit jeweils

zwei Primärspulen, also insgesamt vier Primärspulen ermöglicht dies (siehe Abbildung 31 und Abbildung 32). Da im Institut zwei gleichartige Verstärker mit einer Nennleistung von jeweils 3 kW verfügbar sind, konnte das induktive System im Institut für Strahlwerkzeuge mit einer Verschaltung nach Abbildung 31 bis 6 kW getestet werden.

Tabelle 3: Parameteränderung des induktiven Systems für hochleitfähige Materialien

Skalierung – hochleitfähige Metalle: Cu, Al, ...

z. B. AlMgSi1 mit $\sigma_s = 31 \text{ Si}/\mu\text{m}$

$$k = \sigma_s (\text{AlMgSi1}) / \sigma_s (\text{E-Stahl}) = 23$$

Die benötigte AC-Leistung: $P_{AC} := P_{AC} (\text{E-Stahl}) / k$

Die benötigte Frequenz: $f_0 := f_0 (\text{E-Stahl}) / k$

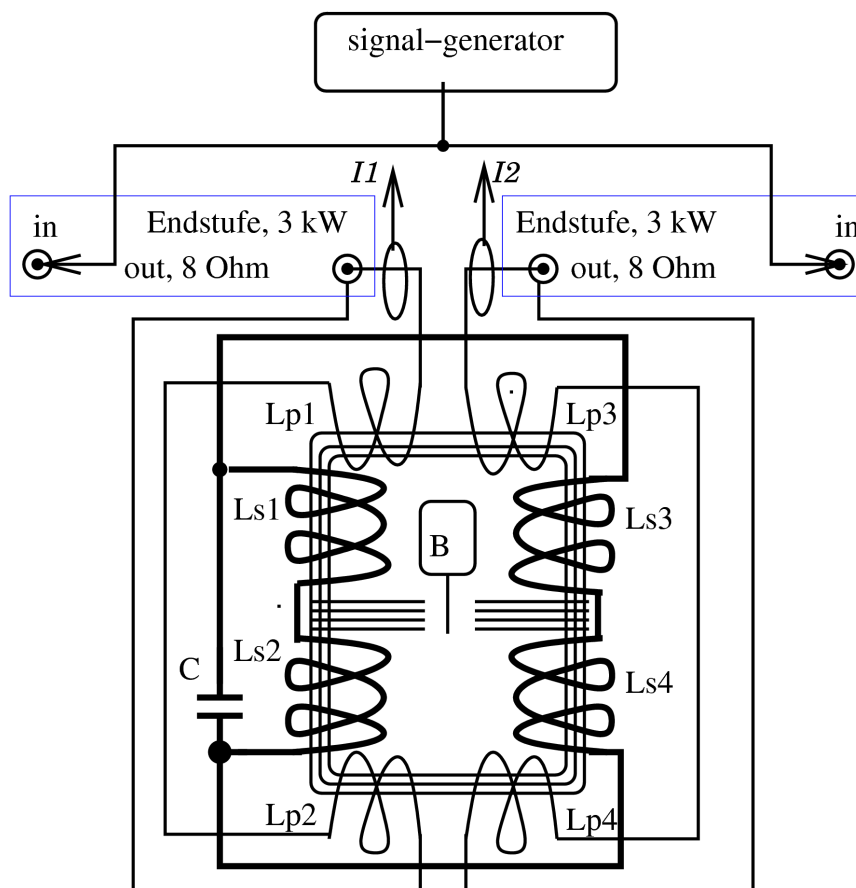


Abbildung 31: Induktives Magnetsystem mit zwei Verstärker-Endstufen

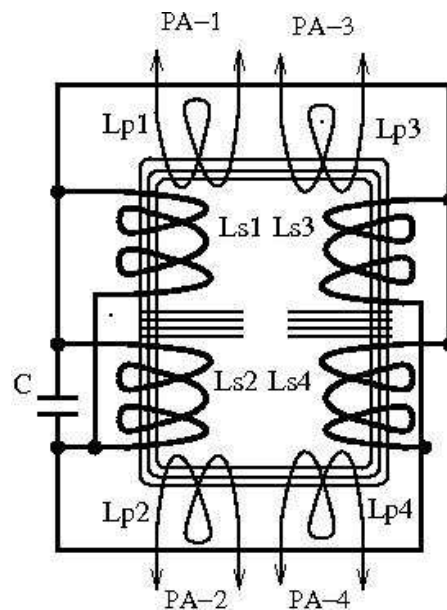


Abbildung 32: Induktives Magnetsystem, anzuschließen an vier Verstärker (PA-1 bis PA-4)

Analog zu Tabelle 2 sind in Tabelle 4 die optimalen Betriebsparameter für den Betrieb mit mehreren Verstärkern zusammengestellt.

Tabelle 4: Parameter für das induktive System bei Nutzung von zwei bzw. vier Verstärkern @ 3 kW

Maximale Werte für 2 x 3 = 6 kW AC-Leistung	
optimale Zahl der Windungen der Primärspulen	9 (8,7)
maximale Spannung an der Kapazität C	530 V
maximaler Strom über der Kapazität C	250 A
maximales Magnetfeld	277 mT
maximaler Druck in der Flüssigmetallsäule p_f	3,27 kPa
maximale Höhe in der Flüssigmetallsäule h_0	47,6 mm
Maximale Werte für 4 x 3 = 12 kW AC-Leistung	
optimale Zahl der Windungen der Primärspulen	13 (12,3)
maximale Spannung an der Kapazität C (C = 100 μ F)	374 V
maximaler Strom über der Kapazität C	704 A
maximales Magnetfeld	392 mT
maximaler Druck in der Flüssigmetallsäule p_f	6,5 kPa
maximale Höhe in der Flüssigmetallsäule h_0	95,2 mm

Für Laseranwendungen sollte entsprechend den Leistungsgrenzen derzeit verfügbarer Laserstrahlquellen ein Verstärker mit 3 kW ausreichen. In naher Zukunft sind bei weiterer Steigerung der Laserstrahlleistung auch zwei Verstärker denkbar. Für den Einsatz mit einem Elektronenstrahl erscheint auch die Vier-Verstärker-Version realistisch.

6.3 Bau des induktiven Systems

Während der Weicheisenkern und die Kupferabdeckung von einem im Vorgang zu dem hier beschriebenen Projekt aufgebauten Magneten übernommen werden konnten, wurden fast alle anderen Komponenten neu entworfen oder zumindest neu hergestellt. Dabei wurde darauf geachtet, dass hitzebeständige Materialien zum Einsatz kamen. Zur Befestigung der Kerne, Spulen und Polschuhe wurden hochtemperaturfeste Kunststoffe eingesetzt. Der zunächst vom Vorgängermagnet übernommene Keramikeinsatz aus dem leicht zu bearbeitenden Werkstoff Kalzium-Silikat (Markenbezeichnung „Duratec“) zwischen den Polschuhen erwies sich als problematisch. Bei einigen Schweißungen wurde er so heiß, dass offenbar Ausgasungen auftraten, die zu einer porösen Naht im Bereich der Unterraupen führten. Versuche mit harten Hölzern waren ebenfalls nicht erfolgreich. Hierbei kam es zu Schmauchentwicklung, die ebenfalls die Qualität der Unterraupen störte. Schließlich wurden Versuche mit verschiedenen Steinen durchgeführt, die am erfolgreichsten verliefen.

Als Polschuhe wurden quaderförmige Elemente aus geblechtem Material eingesetzt, die in ihren Eigenschaften dem Magnetkern angepasst wurden. Die einzelnen Bleche sind 0,002 " (etwa 0,05 mm) dick und bestehen aus „Microsil“, das eine Sättigungsflussdichte von 1,6 T aufweist. Aufgrund der geblechten Struktur mit dazwischen liegenden Isolationsschichten erreichen die Quader eine Sättigungsflussdichte von 1,4 T. Das Material zeichnet sich durch eine sehr geringe Hysterese aus, so dass auch nur sehr geringe Verluste in ihnen auftreten. Auf ein spezielles Design wurde aus Kostengründen verzichtet, da nicht standardisierte Designs nur durch Sonderanfertigungen beim Hersteller gefertigt werden können, während eine nachträgliche Bearbeitung wegen der Entstehung von Kurzschlüssen

sen zwischen den einzelnen Blechen kaum möglich ist. Die Spulen wurden im Gegensatz zu den ersten Spulen im Voräufermagneten, die von Hand gewickelt wurden, von einem Spulenhersteller nach Angaben des IFSW gefertigt.

Für den mobilen Einsatz in verschiedenen Anlagen des Instituts sowie bei Industriepartnern wurde der Magnet mit den Kondensatoren des Schwingkreises in eine Metallbox integriert (siehe Abbildung 34). Ferner wurde eine leicht zu bedienende Steuerbox erstellt (siehe Abbildung 35), die neben einer Not-Aus-Betätigung Ein- und Aus-Taster sowie Kontroll-Leuchten für Betriebsbereitschaft, Störung und Überhitzungsgefahr enthält. Um eine Überhitzung sicher vermeiden zu können, wurden Temperatursensoren zwischen den Spulen platziert, die bei Überschreiten eines kritischen Wertes das Abschalten des Systems bewirken (siehe Abbildung 33). Während der Schweißversuche im IFSW und bei den Industriepartnern ist dieser Fall jedoch nie aufgetreten. Zur Überwachung der erzeugten magnetischen Flussdichte wurde an den Polschuhen jeweils eine kleine Spule, bestehend aus drei Windungen integriert. Die Signale von den Spulen werden zusammen mit anderen Messsignalen an die Steuerbox geleitet. Diese besitzt auf ihrer Rückseite zahlreiche Signalausgänge, so dass etliche Funktionen des Systems – darunter Magnetfeldstärke, Temperatur, Strom- und Spannung im Schwingkreis – mit Hilfe eines Anzeigegeräts (z.B. Oszilloskop) überwacht werden können.

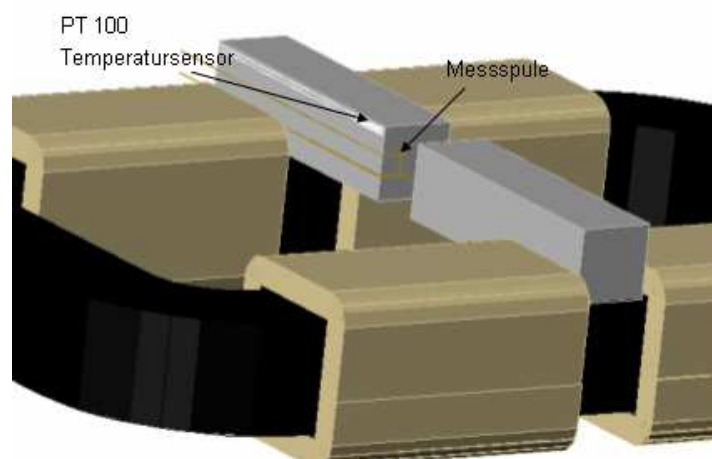


Abbildung 33: Integration eines Temperatursensors und einer Messspule zur Bestimmung der magnetischen Flussdichte

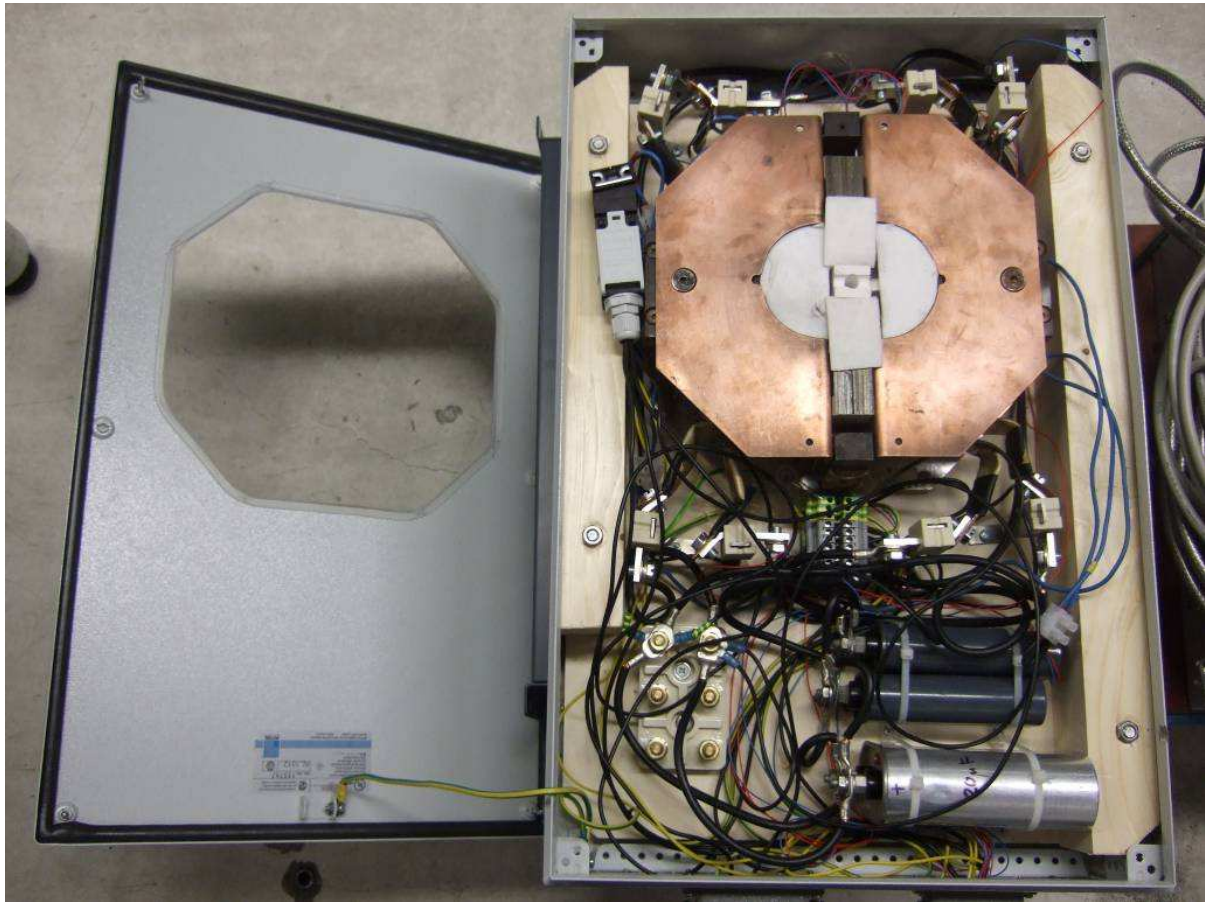


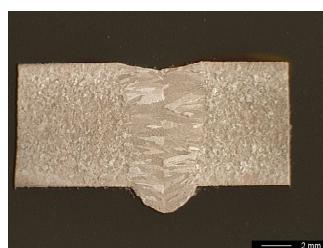
Abbildung 34: Integration des Magneten und des Schwingkreises in ein Gehäuse



Abbildung 35: Aufbau einer leicht zu bedienenden Steuerbox

6.4 Applikationsorientierte experimentelle Untersuchung der Prozessparameter

Neben den Tests zur Optimierung der Polabstände (siehe Abschnitt 6.1), zur Bestimmung der k -Faktoren (siehe Abschnitt 6.2) und zur Variation des Materials des zentralen Schutzwürfels (siehe Abschnitt 6.3) wurden Funktions- und Leistungstests mit dem System durchgeführt. Zunächst kam dazu am Institut für Strahlwerkzeuge ein CO₂-Laser mit einer maximalen Leistung von 5 kW zum Einsatz. Damit konnten Stahlbleche mit einer maximalen Dicke von 10 mm verschweißt werden. Da von Anwendern bekannt war, dass vor allem bei breiten Schweißnähten Probleme mit unerwünschtem Nahtdurchhang auftreten, wurde besonderes Augenmerk auf diesen Parameterbereich gelegt (siehe Abbildung 36 und Abbildung 37).



5 kW CO₂ Laser (TRUMPF TLF 5000T)
He: 15 l/min
Vorschub: 0,3 m/min
Fokusslage: 0

08-01-04.tif
B = 0



08-03-02.tif
4040 Hz
663 W



08-02-03.tif
3115 Hz
928 W



08-02-01.tif
2635 Hz
1250 W

Abbildung 36: Schliffe von Laserschweißversuchen von 8 mm dicken Stahl-Platten (1.4404) in der Bearbeitungsstation TLC des IFSW; oben: Referenzschweißung ohne Magnetfeld, unten: Einstellbares Anheben der Schmelze in Abhängigkeit von der Leistung des AC-Magneten. Man beachte die Formänderung: ohne Magnetfeld: U-förmig, mit Magnetfeld: V-förmig

Es zeigte sich, dass der Betrag, um den die Schmelze angehoben werden sollte, sehr genau über die Amplitude des Verstärkerstroms eingestellt und reproduzierbar erreicht werden kann. Es erwies sich auch, dass das hochfrequente Magnetfeld eine leichte systematische Änderung der Nahtquerschnittsform bewirkt. Die bei eingeschaltetem Magnet geschweißten Proben zeigten alle im unteren Bereich eine etwas schlankere Naht. Die zwischen 2000 Hz und 4500 Hz variierte Frequenz hatte darauf kaum einen Einfluss.

Eine ähnliche Formänderung war bereits von Schweißungen mit CO₂-Lasern bei konstanten Magnetfeldern bekannt. Dort waren die Ergebnisse allerdings von der Richtung des Magnetfeldes abhängig. Bei Schweißungen mit einem Magnetfeld, das bei einem Blick in Schweißrichtung nach links orientiert ist, ergeben sich – unabhängig davon, ob ein externer Strom durch das Werkstück geleitet wird oder nicht – A-förmige Nähte, die im oberen Bereich eine leichte Taillierung aufweisen, während man bei einer Orientierung nach rechts V-förmige Nähte mit etwas größerer Nahtfläche erhält.



B = 0

5 kW CO₂ Laser (TRUMPF TLF 5000T)

He: 20 l/min

Vorschub: 0,3 m/min

Fokusslage: 0



B = 96 mT @ 3,36 kHz

P_{AC} = 840 W



B = 141 mT @ 3,38 kHz

P_{AC} = 1935 W



B = 164 mT @ 2,91 kHz

P_{AC} = 2200 W

Abbildung 37: Schliffe von Laserschweißversuchen von 10 mm dicken Stahl-Platten (1.4404) in der Bearbeitungsstation TLC des IFSW; oben: Referenzschweißung ohne Magnetfeld, unten: Einstellbares Anheben der Schmelze in Abhängigkeit von der Leistung des AC-Magneten. Man beachte die Formänderung: ohne Magnetfeld: U-förmig, mit Magnetfeld: V-förmig



Abbildung 38: Nahtoberraupe (oben) und -unterraupe einer Blindschweißung einer 8-mm-Platte (Edelstahl 1.4404), rechts zugehöriger Querschliff; Laserleistung: 5 kW (10,6 μm), Fokusslage: 0, Vorschub: 0,3 m/min, induktives Magnetsystem: 2817 Hz, 1025 W.



Abbildung 39: Nahtoberraupe (oben) und -unterraupe einer Blindschweißung einer 8-mm-Platte (Edelstahl 1.4404), rechts zugehöriger Querschliff; Laserleistung: 5 kW (10,6 μm), Fokusslage: 0, Vorschub: 0,3 m/min, kein Magnetfeld (Referenz)

Die Raupen weisen über die gesamte Nahtlänge eine konstante Breite auf. Beim Vergleich der Unterraupen zwischen Referenzschweißung (Abbildung 39) und Schweißung in Abbildung 38 (1025 W Leistung des Magnetsystems) wird die Änderung der Nahtbreite durch den Übergang von der U-Form zur V-Form bereits durch bloßes Betrachten unmittelbar nach der Schweißung deutlich.

Bei der Firma TRUMPF GmbH & Co KG konnte das induktive System sowohl mit einem Festkörperlaser als auch mit einem CO₂-Laser bei 8 kW Laserleistung getestet werden. Es wurden Schweißungen in 8, 10 und 12 mm dicken Platten (Edelstahl 1.4301, Baustahl S235) durchgeführt. Dabei handelte es sich ausschließlich um Blindschweißungen. Die Schweißungen fanden in einer TLW-Station statt, bei der das Blech mit einem Tisch bewegt wurde, während Bearbeitungskopf und Magnet fest standen. Abbildung 40 zeigt einen Blick in die Station mit aufgebautem Magnet und zum Schweißen vorbereitetem Werkstück.

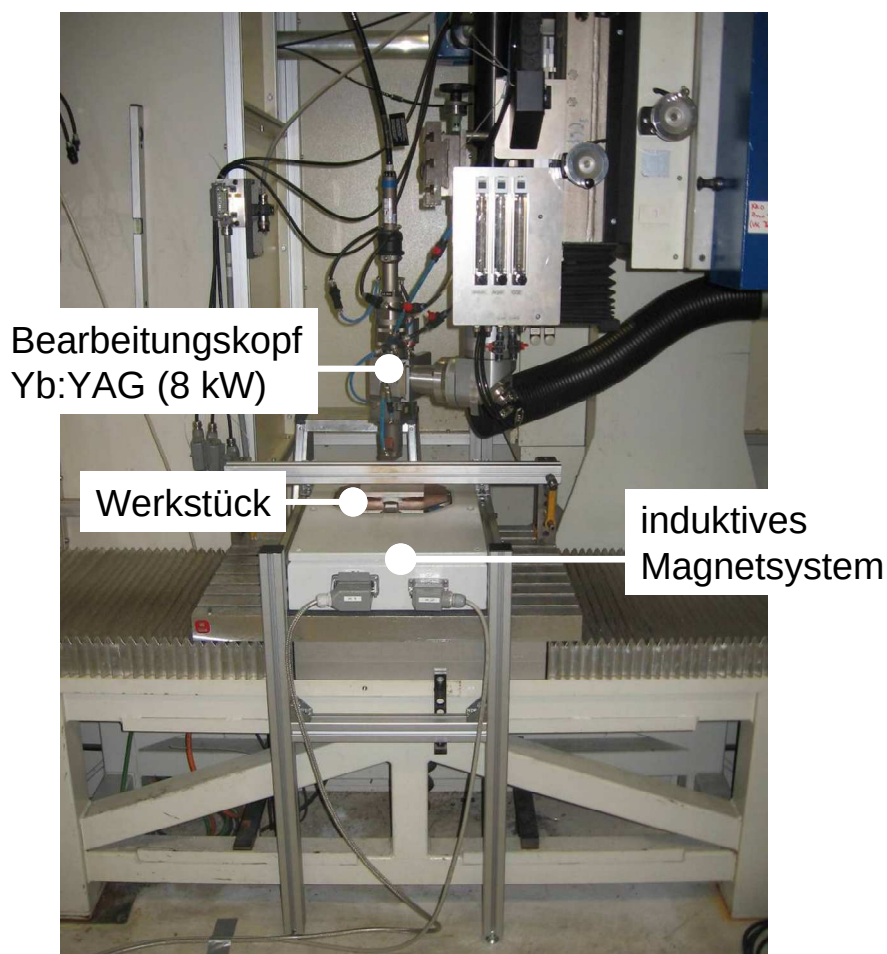


Abbildung 40: AC-Magnet in Schweißstation (TLW, TRUMPF)

Der Magnet wurde auf einem Gestell montiert, das auf dem Boden stand. Dadurch blieb der Magnet wie auch der Bearbeitungskopf ortsfest, während das an einer Brücke hängende Werkstück mit dem Tisch bewegt wurde.

Abbildung 41 gestattet einen besseren Blick auf die beiden eingesetzten Bearbeitungsköpfe für 1- μ m- und 10- μ m-Strahlung. Im linken Teilbild ist auch ein an einer Brücke hängendes Werkstück zu erkennen.

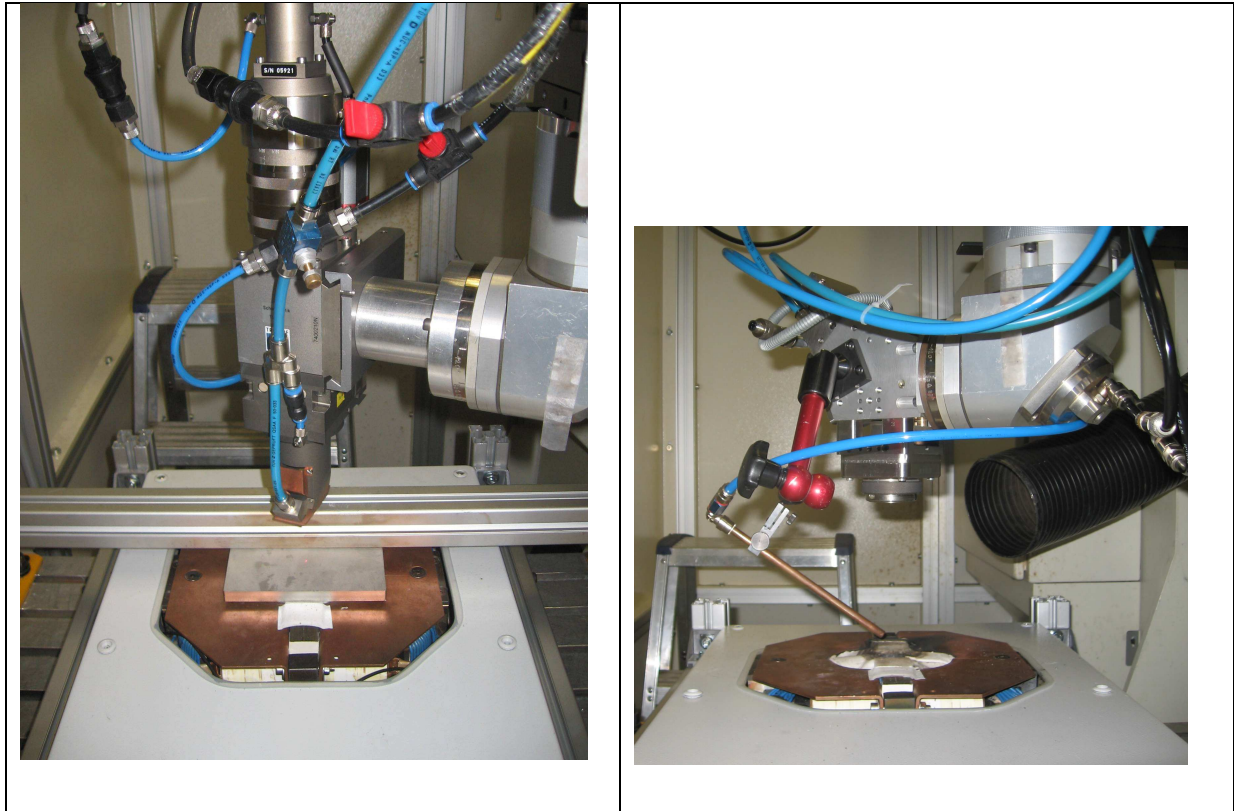


Abbildung 41: Versuchsaufbau links: Bearbeitungskopf des Festkörperlaseres mit Werkstück und Magnet; rechts: Bearbeitungskopf des CO₂-Lasers mit Magnet, beim Schweißen mit CO₂-Laser wurde ergänzend Schutzgas eingesetzt

Abbildung 42 zeigt die für die Versuche erforderlichen Steuer- und Versorgungskomponenten: Steuerbox, Signalgenerator und Verstärker. Außerdem ist ein Oszilloskop aufgebaut, mit dem einige Funktionen des Magneten überwacht wurden.

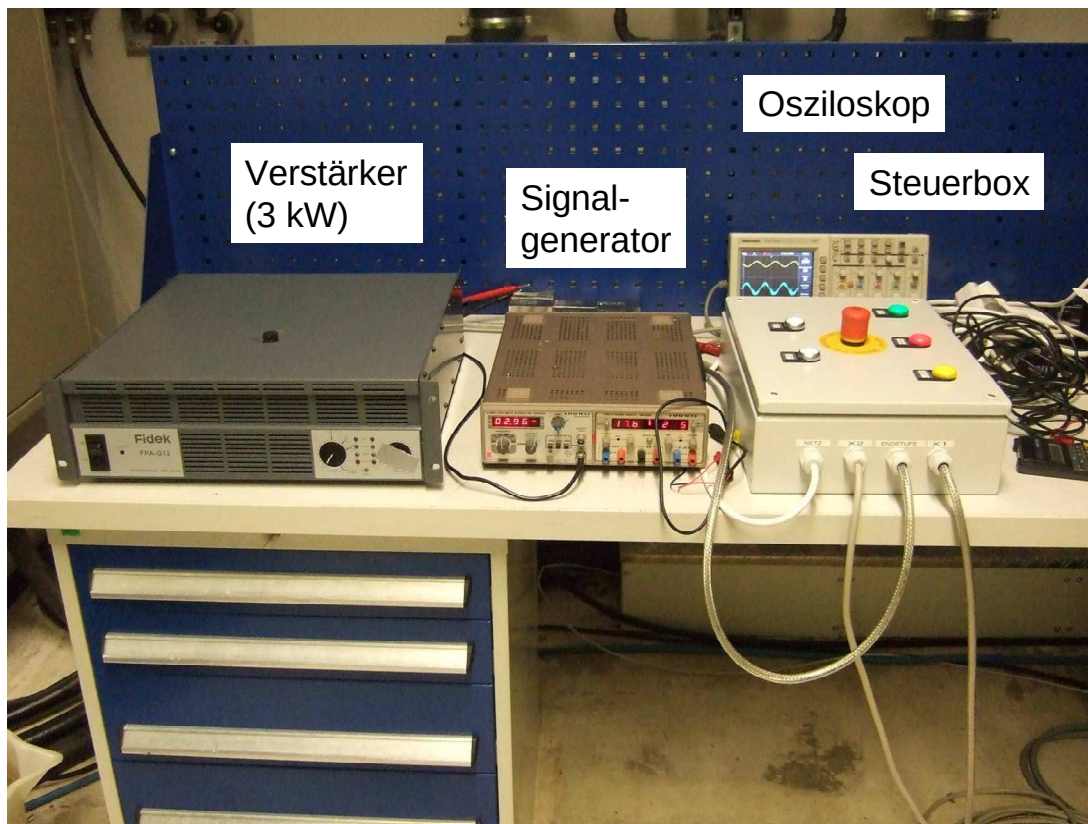


Abbildung 42: Komplette Steuereinheit im Versuchslabor von TRUMPF

Von den Versuchen im Applikationslabor der Firma TRUMPF sollen hier in den Bildern die Versuche mit Festkörperlaser vorgestellt werden, da die Ergebnisse der Versuche mit dem 8-kW-CO₂-Laser den im IFSW durchgeführten Versuchen sehr ähnlich sind. Abbildung 43 zeigt typische Probleme, die beim Schweißen ohne Unterstützung auftreten: Bei einer Verminderung der Schweißgeschwindigkeit kommt es ab einer bestimmten Geschwindigkeit (hier etwa 0,8 m/min) zum Durchschweißen. An dieser Übergangsstelle von Ein- zum Durchschweißen tritt an der Unterseite eine größere Menge Schmelze aus. Danach kommt es auf der Oberseite zu einem weitgehend konstanten, deutlichen Nahteinfall und auf der Unterseite zu einem unregelmäßigen Nahtdurchhang.

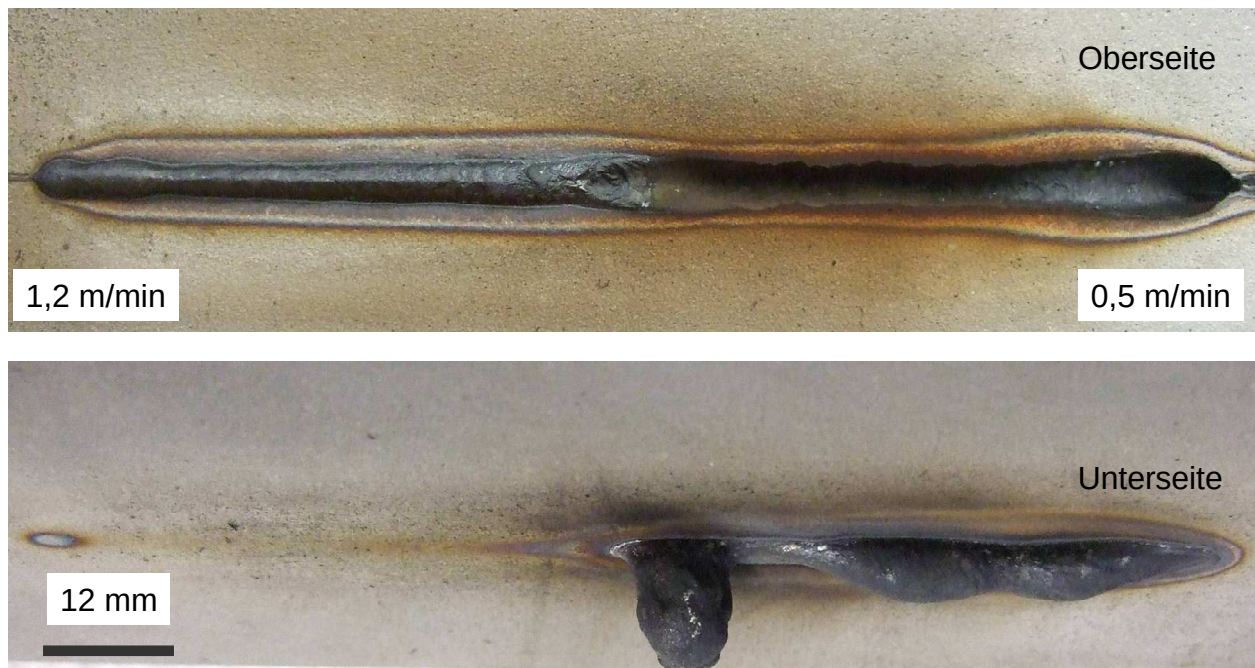


Abbildung 43: Werkstück: Edelstahl 1.4301, 12 mm
Schweißparameter: P_L : 8 kW, Yb:YAG (Scheibenlaser), d_f : 360 μm ,
Magnet: ohne Magnet (Referenz)

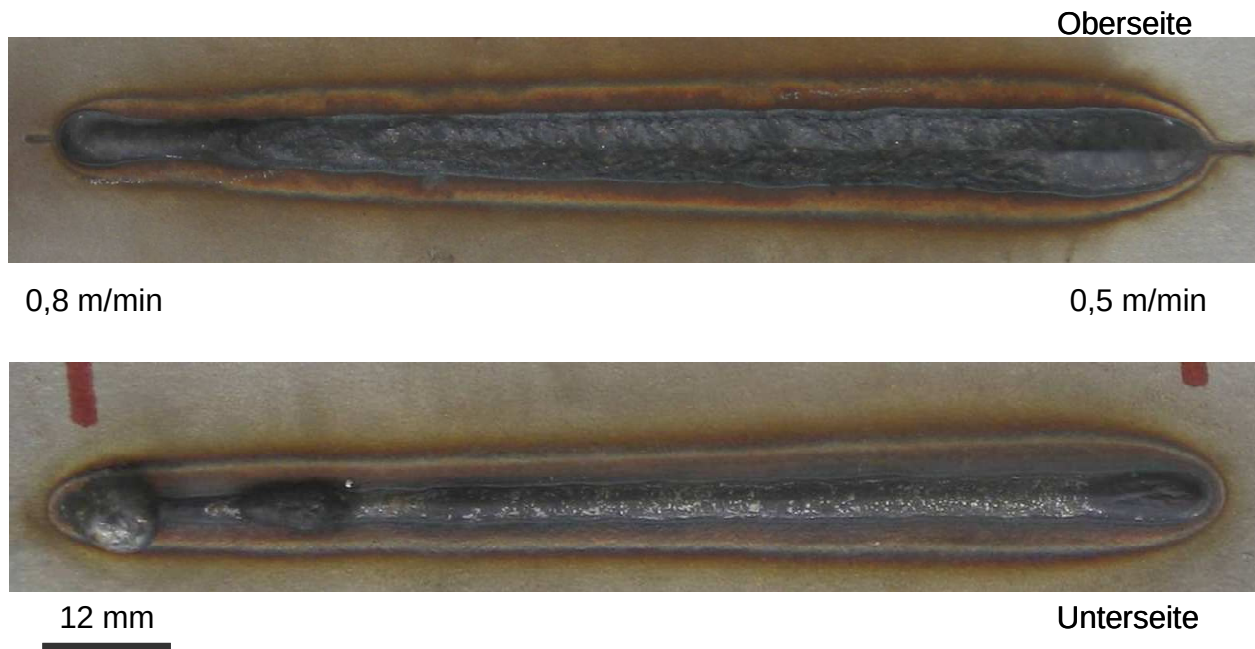


Abbildung 44: Werkstück: Edelstahl 1.4301, 12 mm
Schweißparameter: P_L : 8 kW, Yb:YAG (Scheibenlaser), d_f : 360 μm ,
Magnet: f : 3,18 kHz, P_M : 2,5 kW.

Mit der magnetischen Unterstützung konnte der im Moment des ersten Durchschweißens auftretende starke Materialaustrieb nach unten zwar nicht völlig beseitigt, aber zumindest deutlich verkleinert werden. Nach kleinen Anfangsschwankungen war die Unterraupe sehr gleichmäßig und ohne Nahtdurchhang. Die Oberraupe zeigte keinerlei Nahteinfall oder sonstige Unregelmäßigkeiten.

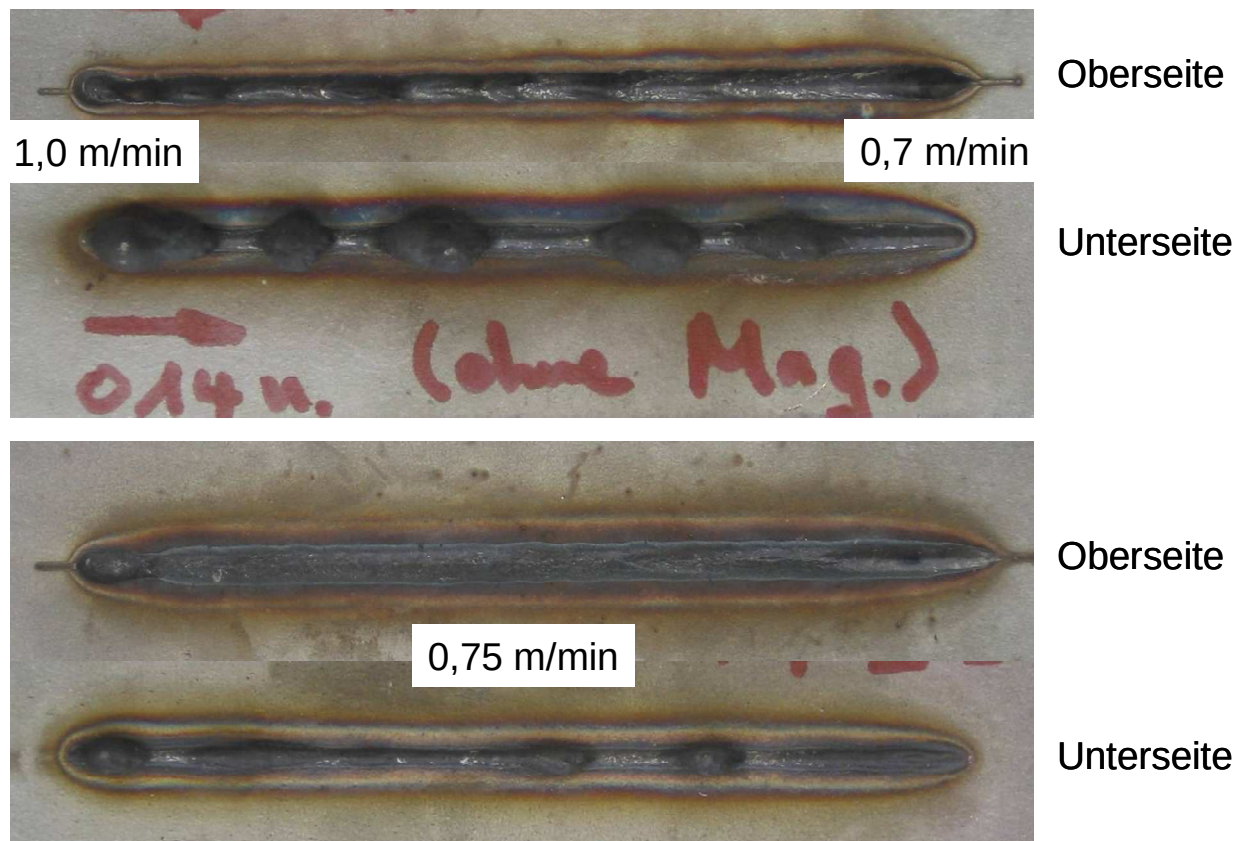
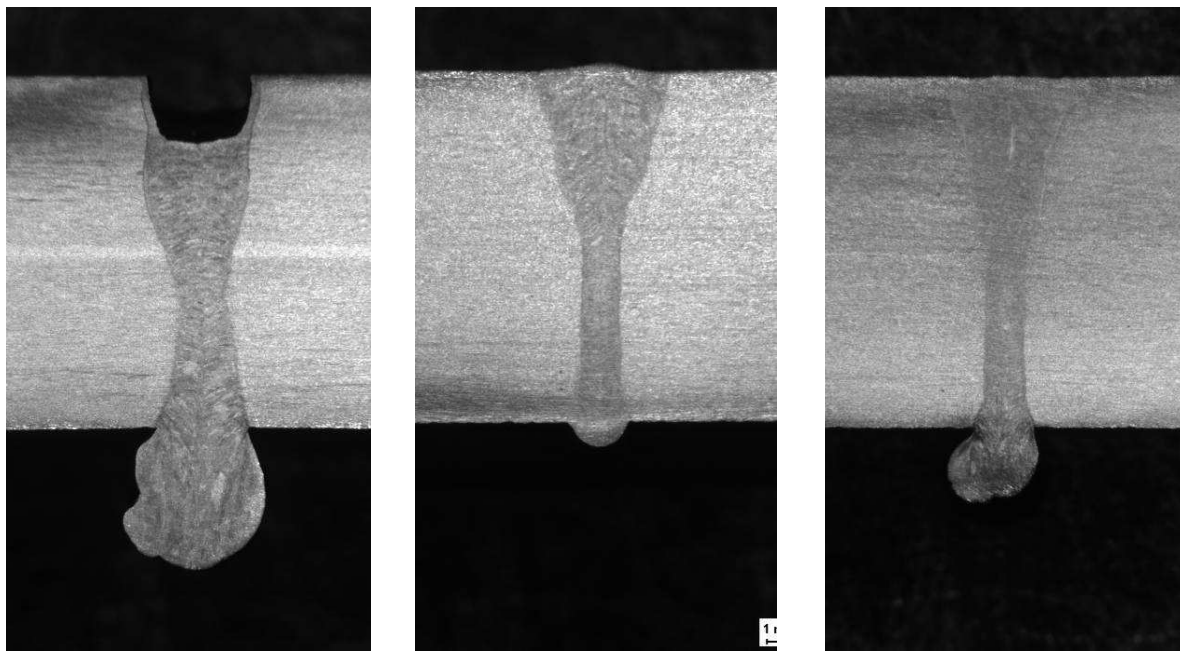


Abbildung 45: Werkstück: Edelstahl 1.4301, 12 mm
Schweißparameter: P_L : 8 kW, Yb:YAG (Scheibenlaser), d_f : 360 μm ,
Magnet: oben: ohne Magnet unten: f : 3,18 kHz, P_M 2,5 kW.

In einigen Fällen geriet die magnetische Schmelzbadunterstützung allerdings auch an ihre Grenzen. So konnten bei den in Abbildung 45 verwendeten Schweißparametern die ohne Unterstützung auftretenden Nahtdurchhänge nur wesentlich vermindert, aber nicht ganz beseitigt werden. Allein durch den Gravitationseinfluss können diese an der Unterseite auftretenden Unregelmäßigkeiten nicht erklärt werden. Vielmehr müssen hier die Ursachen wohl im Schweißprozess selbst gesucht werden. Diese sind offenbar deutlich stärker als die Gravitationsef-

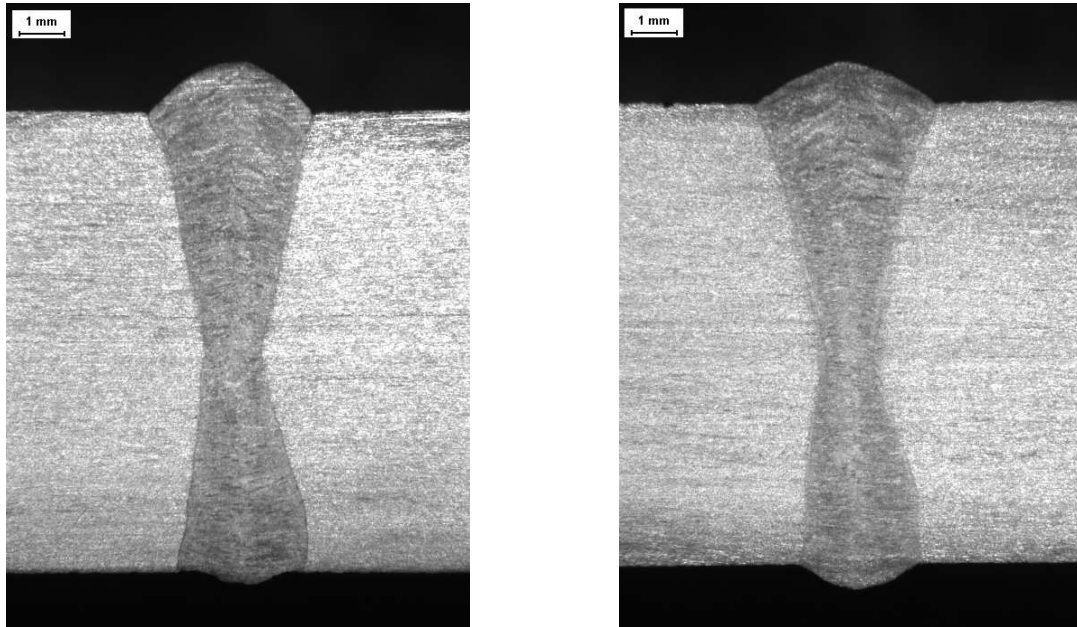
fekte. Darauf war das Magnetsystem leider nicht vorbereitet. Ein Aufbau nach Abbildung 31 mit einem zweiten Verstärker wäre hier vermutlich hilfreich gewesen. In der Zeit, in der die Anlage beim Industriepartner zur Verfügung stand, war eine Umrüstung jedoch leider nicht möglich. Abbildung 46 verdeutlicht aber, dass auch in diesem Fall mit den begrenzten 2,5 kW Leistung des Magnetsystems deutliche Verbesserungen der Nahtqualität erzielt wurden. Ein Nahteinfall wurde außer im Bereich des Endkraters, der auch deutlich kleiner ausfiel, über die gesamte Länge vermieden.



*Abbildung 46: Werkstück: Edelstahl 1.4301, 12 mm
Schweißparameter: P_L : 8 kW, Yb:YAG (Scheibenlaser), d_f : 360 μm ,
 v : 0,75 m/min
Magnet: links: ohne Magnet Mitte und rechts: f : 3,18 kHz, P_M : 2,5 kW,*

In Abbildung 47 sind zwei Nahtquerschnitte zu sehen, die in einem Parameterbereich gemacht wurden, in dem mit der magnetischen Unterstützung der Nahtdurchhang sehr gut regelbar ist. Im Gegensatz zu den in Abbildung 36 bis Abbildung 39 zu beobachtenden Veränderungen des Nahtquerschnitts (V-Form) durch die magnetische Schmelzbadunterstützung, sind bei Schweißungen mit der 1- μm -Wellenlänge keine solchen Formänderungen zu beobachten. Die Naht ist

wie bei Schweißungen ohne Unterstützung tailliert, wobei die engste Stelle knapp unterhalb der Mitte liegt (siehe Abbildung 47).



*Abbildung 47: Werkstück: Edelstahl 1.4301, 10 mm
Schweißparameter: P_L : 8 kW, Yb:YAG (Scheibenlaser), d_f : 360 μm ,
 v : 1,1 m/min
Magnet: f : 3,1 kHz, links: P_M : 2,5 kW, rechts: P_M : 1,8 kW*

Im Gegensatz zu den Versuchen nach Abbildung 6, die im Rahmen eines DFG-Projekts durchgeführt wurden, wurden bei den hier durchgeführten Versuchen keine Einflüsse auf die Nahtkerben festgestellt. Aus dem Vergleich mit allen bereits durchgeführten Schweißungen kann man die Vermutung ableiten, dass ein deutlicher Effekt auf die Nahtoberraupe nur bei Einschweißungen, bei denen ein großer, homogener Druck auf die Schmelze ausgeübt wird, eintritt. Vermutlich wäre prinzipiell ein ähnlicher Effekt bei Durchschweißungen durch beidseitiges Drücken möglich, was jedoch zu aufwendig für eine industrielle Umsetzung erscheint.

7 Messung der Impedanz zur Kontrolle der Bauteilgeometrie

Die im Bauteil induzierten Ströme beeinflussen den Widerstand im Schwingkreis. Beobachtet man dessen Strom- und Spannungsverlauf, kann man Änderungen der induzierten Ströme detektieren. Da diese von der Geometrie des Werkstücks abhängen, können prinzipiell Rückschlüsse auf die Geometrie gezogen werden. In Abbildung 48 ist eine Versuchsanordnung zu sehen, bei der zwei Bleche mit Spalt über dem induktiven Magnetsystem platziert wurden. Auf einem Oszilloskop wurde der Strom über der Spannung aufgetragen. Sind beide in Phase, ergibt sich ein Geradenstück als Bild auf dem Display. Ist die Frequenz des Schwingkreises nicht optimal abgestimmt, ergeben sich Abweichungen (z. B. eine Ellipse).

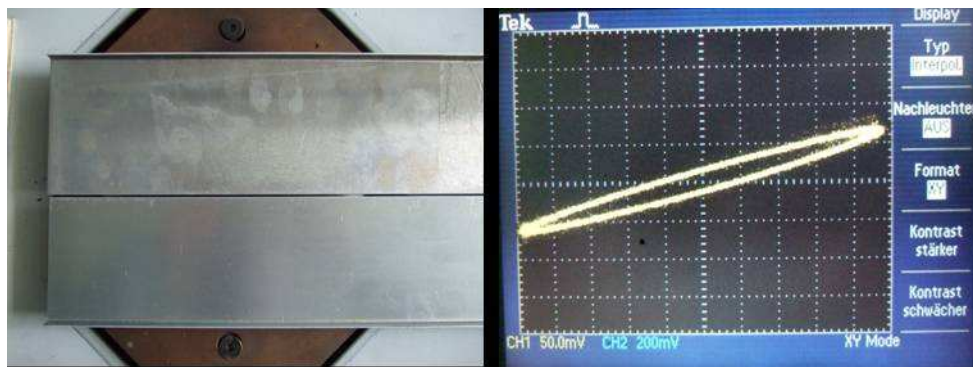


Abbildung 48: Links: zwei Bleche in Stumpfstoß-Anordnung mit Spalt über dem Magneten; rechts: Auftragung von Strom und Spannung am Ausgang des Verstärkers zur Bestimmung der Phasenverschiebung

Verschiebt man den Spalt, sollten sich Änderungen des Bildes ergeben. Leider hat sich herausgestellt, dass diese so gering sind, dass sie im Rauschen des Systems untergehen. Die Ursache dürfte in der Größe des Magnetsystems zu suchen sein, wodurch Ströme großräumig induziert werden. Das erschwert die Detektion lokaler Veränderungen. Selbst die Wirkung eines Spalts ist daher kaum zu erkennen. Lediglich großräumige Veränderungen des Werkstücks sind sicher zu detektieren. Abbildung 49 verdeutlicht dies. Im dort abgebildeten Versuch wurde ein Blech (Aluminium) im Abstand von 2 mm über den Magneten bewegt. Im linken Teilbild befindet sich die Kante exakt über der Mitte des Magneten. Als optimale

Frequenz ergaben sich hier 628 Hz. Das Oszilloskop zeigt eine Linie. Verschiebt man das Blech um einige Millimeter bis Zentimeter, zeigt sich nur eine sehr geringe, kaum erkennbare Änderung des Bildes auf dem Oszilloskop. Stellt man die Frequenz nach, ergeben sich nun 626 bis 627 Hz. Entfernt man das Blech völlig, führt dies zu einer deutlichen Änderung des Bildes. Die zugehörige optimale Frequenz beträgt dann 619 Hz. Bei einer Anordnung, bei der der Magnet um 90° gedreht ist, erhält man ähnliche Ergebnisse. Bei Stahlblechen fallen die Ergebnisse aufgrund der schlechteren Leitfähigkeit etwas deutlicher aus.

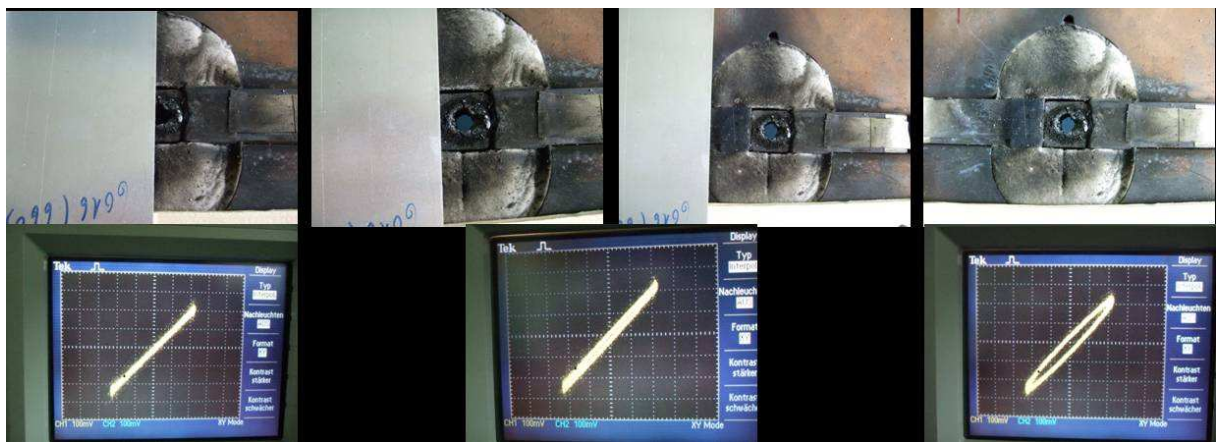


Abbildung 49: Oben: unterschiedliche Positionen eines Blechs über dem Magneten; unten: jeweils zugehörige Strom-Spannungs-Diagramme.

Dennoch muss man leider feststellen, dass sich der Magnet selbst als Detektionswerkzeug bestenfalls dazu eignet, festzustellen, ob sich ein Werkstück im Einflussbereich des Magneten befindet. Um eine bessere Ortsauflösung zu erreichen, müsste ein miniaturisierter Magnet (z.B. eine Spule mit Ferritkern) eingesetzt werden. Dazu liefen aber parallel zu diesem Forschungsvorhaben Untersuchungen, so dass dieses Thema hier nicht verfolgt wurde.

Immerhin ist es möglich, dass die optimale Frequenz automatisch gefunden wird. Der Schaltkreis nach Abbildung 57 ist dazu in der Lage (vergleiche auch Abbildung 58). Dies ist bei Fahrten in der Nähe von oder über Kanten von Werkstücken hinweg sicher hilfreich. So musste beispielsweise bei den Versuchen zu Abbildung 43 bis Abbildung 47 der 3-kW-Verstärker auf 2,5 kW begrenzt werden, da sich ohne Nachregelung beim Überfahren der Werkstückkanten die optimale Frequenz so sehr änderte, dass es aufgrund von Leistungsreflexionen bei

einem Betrieb oberhalb von 2,5 kW zu automatischen Abschaltungen des Verstärkers kam. Diese Methode wurde allerdings nur mit einem Testverstärker erprobt. Bei den Schweißversuchen kam sie nicht zum Einsatz.

8 Gepulstes induktives System zum Elektronenstrahlschweißen

8.1 Entwicklung des Puls-Betriebes

Das Elektronenstrahlschweißen mit elektromagnetischem Stützsystem ist nur in einem abwechselnden Betrieb zwischen Elektronenstrahl und Magnetsystem möglich (Prinzip siehe Abbildung 50). Das induktive elektromagnetische System zum Laserstrahlschweißen muss deshalb für einen Puls-Betrieb erweitert werden.

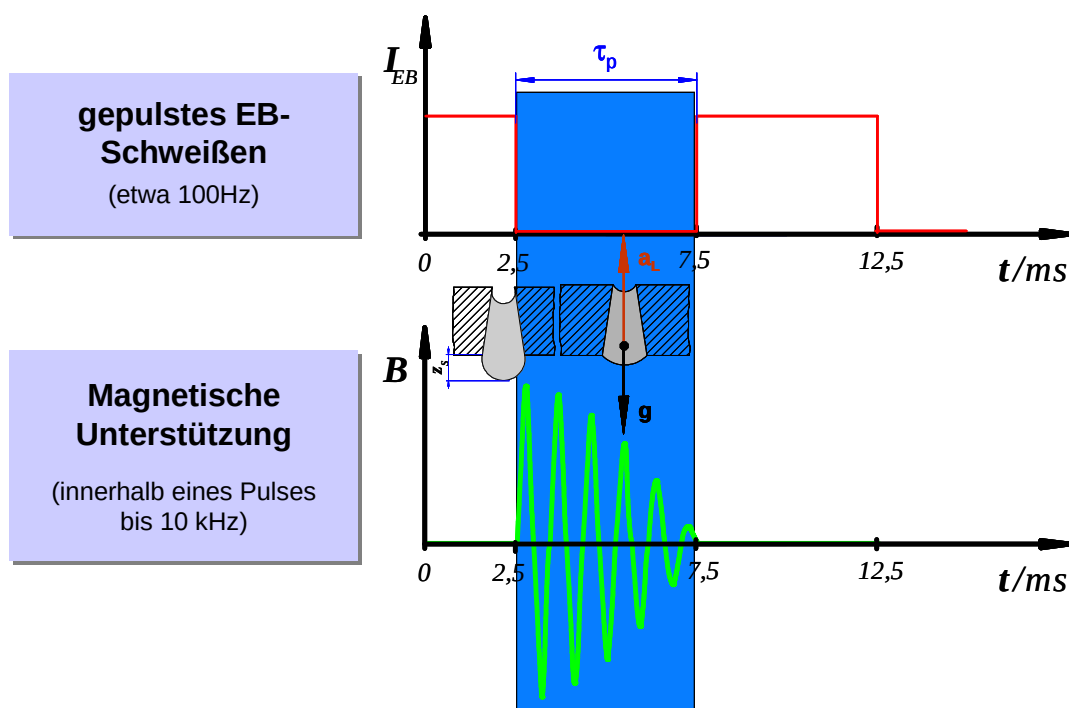


Abbildung 50: Prinzip des gepulsten Betriebs des Magnetfelds im Zusammenspiel mit gepulstem Elektronenstrahlschweißen

Der gepulste Betrieb funktioniert wie folgt: Die Schmelze befinde sich zum Zeitpunkt 0 in Ruhe. Nach 2,5 ms hat sie im freien Fall 30 μm zurückgelegt (Reibung und Oberflächenspannung vernachlässigt) und erreicht dabei eine Geschwindigkeit von 2,5 cm/s. Die nächsten 2,5 ms werden bei eingeschalteter magnetischer Unterstützung benötigt, um die Schmelze abzubremesen. Dabei legt sie weitere 30 μm zurück. Die zweite Hälfte der Unterstützungsphase wird zur Beschleunigung der Schmelze nach oben genutzt und in der ersten Hälfte ohne Unterstützung kommt die Aufwärtsbewegung wieder zum Erliegen. Danach beginnt der Prozess von vorn. Das bedeutet, dass sich die Schmelze bei einer Frequenz von 100 Hz selbst bei Vernachlässigung von dämpfenden Faktoren nur um ca. 60 μm hin- und herbewegt.

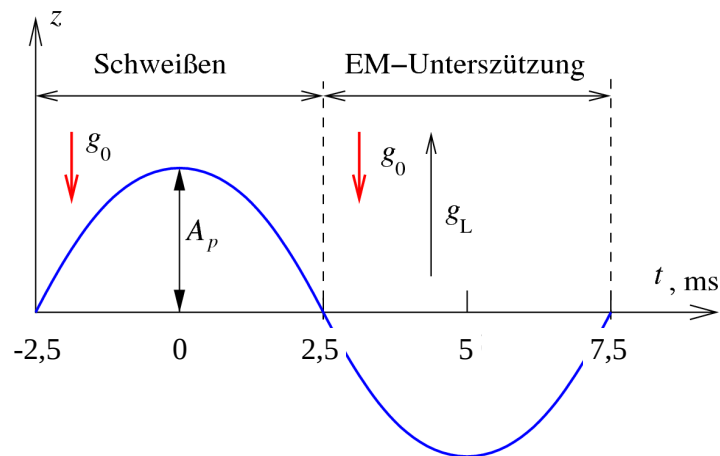


Abbildung 51: Oszillation des Schmelzbades unter der Wirkung einer pulsierenden Unterstützungskraft

8.2 Bestimmung der Remanenz und des Abklingverhaltens

Grundvoraussetzung für den gesicherten Betrieb zwischen Elektronenstrahl und dem elektromagnetischem Stützsystme ist, dass zu Beginn eines jeden Elektronenstrahlpulses das Magnetfeld durch geeignetes Abschaltverhalten des AC-Magneten entmagnetisiert wird. Gleichzeitig ist die Remanenz des Systems zu minimieren.

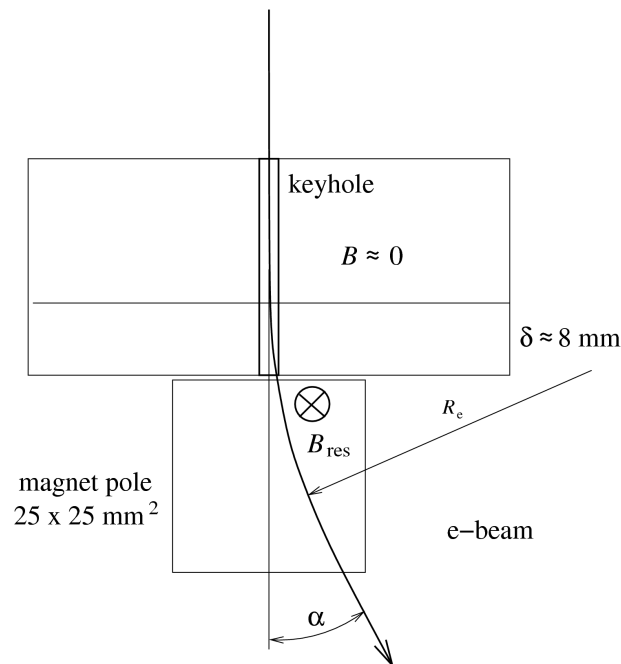


Abbildung 52: Prinzipbild der Ablenkung eines Elektronenstrahls im Bereich der Eindringtiefe des Magnetfelds in das Werkstück δ sowie im Bereich der Magnetpole. Bei angenommenem konstantem Magnetfeld in diesem Bereich ergibt sich ein Giro-Radius R_e

Den Giro-Radius R_e von bewegten Elektronen im Magnetfeld kann man aus

$$R_e = 1,7 \cdot 10^{-3} (\gamma^2 - 1)^{1/2} / B \quad (6)$$

berechnen mit $\gamma = 1 + E_e / m_e c^2$, wobei E_e die Strahlenergie ist. Um den Ablenkwinkel der Elektronen auf 13° zu begrenzen, muss der Giro-Radius bei den in Abbildung 52 dargestellten geometrischen Verhältnissen mindestens 200 mm betragen. Abbildung 53 zeigt den Zusammenhang aus Formel (6).

Aus dieser Abbildung kann man die für einen bestimmten Giro-Radius maximal zulässige magnetische Flussdichte ablesen. Für den oben angegebenen Giro-Radius R_e des Elektronenstrahls von 200 mm und einen 35-keV-Elektronen-Strahl muss also die Restmagnetisierung der AC-Magnetpole kleiner als 3 mT sein. Für einen 140-keV-Strahl reicht eine Verminderung der magnetischen Flussdichte auf 7 mT.

Das bedeutet, dass die Stromstärke in den Spulen am Ende jedes Pulses der magnetischen Unterstützung (vergleiche Abbildung 50) um etwa zwei Größenordnungen reduziert werden muss. Bei dem in Abbildung 50 gezeigten Schema ist die magnetische Unterstützung jeweils für 5 ms eingeschaltet, was bedingt, dass der Ausschaltvorgang einen Bruchteil davon betragen muss, also etwa 0,5 ms bis 1 ms.

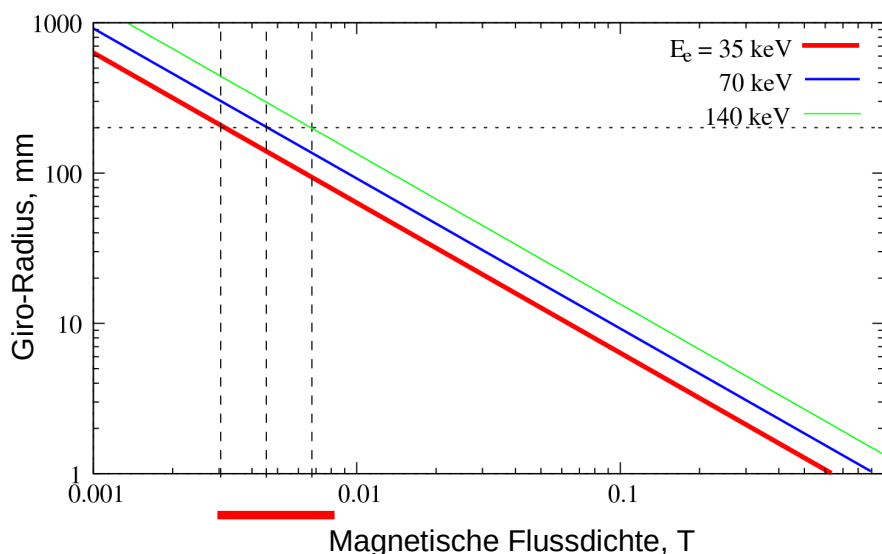


Abbildung 53: *Giro-Radius des Elektronenstrahls in Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte*

Eine prinzipiell einfache Möglichkeit, das Ein- und Ausschalten im gepulsten Betrieb zu realisieren, zeigt Abbildung 54. Ein entsprechender Aufbau diene als Ausgangspunkt der Untersuchungen. Hier wurde noch auf einen Verstärker verzichtet, weil zunächst die reinen Schaltvorgänge untersucht werden sollten. Auf der rechten Seite des Schaltplans ist der Netzanschluss zu erkennen, der mit der Netzfrequenz von 50 Hz den Ablauf steuert. Die Funktionsweise ist wie folgt: Zunächst ist im IGBT Kontakt 1 mit 3 verbunden, 2 ist offen (weder mit 1 noch mit 3 verbunden). Dadurch lädt sich der Kondensator des Schwingkreises (20 μ F) über die Diode (unten rechts). Nach einer halben Periode (bei 50 Hz nach 10 ms) sperrt die Diode und der IGBT schaltet um, so dass Kontakt 2 mit 1 verbunden ist, während Kontakt 3 offen ist. Dadurch ist der Schwingkreis in Betrieb, der Magnet arbeitet.

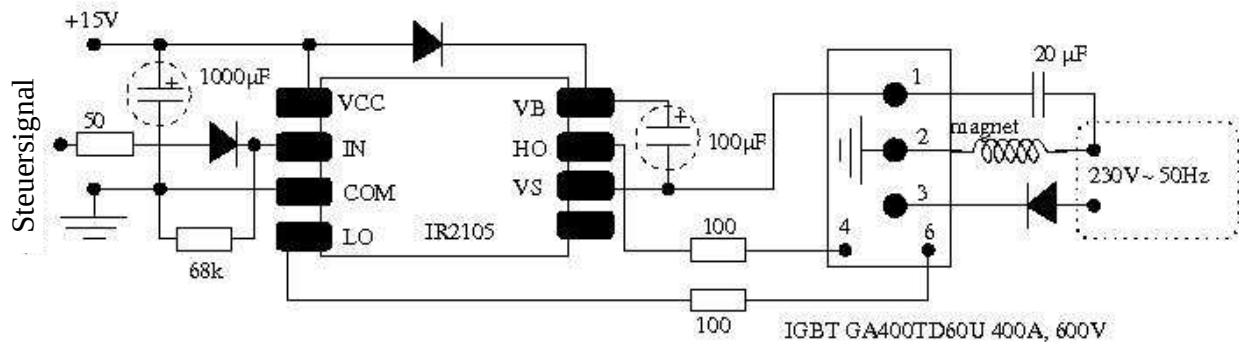


Abbildung 54: Entwurf eines Schaltplans zum Laden und Entladen des Kondensators im Schwingkreis des Magneten mit der Netzfrequenz 50 Hz; rechts der Netzanschluss, daneben der Schwingkreis des Magneten, als drittes Bauteil von rechts ein schneller Schalter (IGBT); ganz links die Kommunikation mit der Elektronenstrahlsteuerung

Abbildung 55 zeigt den sich im Schwingkreis ergebenden Verlauf der Spannung über der Zeit. Als natürliche Abklingzeit τ (Abfall des Signals auf das $1/e$ -fache des Anfangswertes) kann aus Abbildung 55 1,3 ms abgelesen werden.

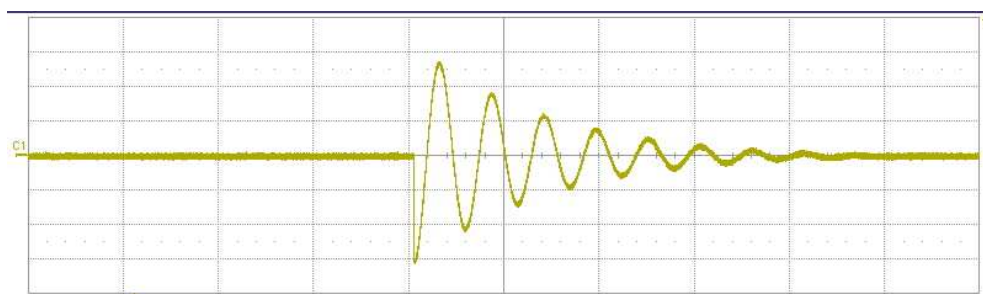


Abbildung 55: Zeitlicher Spannungsverlauf im Schwingkreis des Magneten (Kontakt 1 und 2 in Abbildung 54 verbunden); 0,5 ms/Teilung

Für einen Abfall um zwei Größenordnungen wird folglich ein Zeitintervall von $4,6 \tau = 6 \text{ ms}$ benötigt, was den Anforderungen nicht genügt.

Beim Überkopfschweißen, was hier aber nicht zum Untersuchungsumfang gehört, sind die Anforderungen noch härter. Da der Elektronenstrahl beim Überkopfschweißen durch den Magneten geführt werden muss, sollte die magnetische Flussdichte um mindestens drei Größenordnungen abgefallen sein, was $6,9 \tau$ entspricht. Nach Aussage der Firma pro beam sollte in manchen Fällen das Magnet-

feld sogar geringer als das Erdmagnetfeld sein, was einem erforderlichen Abfall um 4 Größenordnungen ($9,2 \tau$) entspricht.

Da jedoch in den Anwendungsfällen des hier beschriebenen Projekt das Magnetfeld im Magnetsystem (im wesentlichen zwischen den Polschuhen) und im unteren Bereich des Werkstücks konzentriert ist, sollte ein Unterschreiten der oben berechneten 3 mT bis 7 mT ausreichend sein, was eine Zeitperiode von $4,6 \tau$ erfordert. Das wiederum bedingt eine Abklingzeit $\tau \leq 0,2 \text{ ms}$.

Um einen schnelleren Abfall als den mit dem Aufbau nach Abbildung 54 erreichen zu realisieren, wurde auf ein weiteres Konzept zurückgegriffen (siehe Abbildung 56), das prinzipiell bekannt ist. Dabei wurde auf Anraten des projektbegleitenden Ausschusses darauf geachtet, dass auf Schalter im Schwingkreis des Magnetsystems, wie sie in Abbildung 54 zu finden sind, verzichtet wird, da dort sehr hohe Ströme fließen und sie sich während des Schweißens mit dem Magnetsystem im Vakuum befinden müssten. Bei dem Konzept nach Abbildung 56 wird mit einem programmierbaren Signalgenerator sowohl eine passende Anstiegs- als auch Abklingsequenz vorgegeben. Beide sollten in der Größenordnung von 1 ms liegen, während für die konstante mittlere Phase 3 ms verbleiben. Der Verstärker (power amplyfier PA der Marke Fidek in Abbildung 56) gibt das verstärkte Signal über einen Trenntrafo an den Schwingkreis des Magneten (AC magnet) weiter.

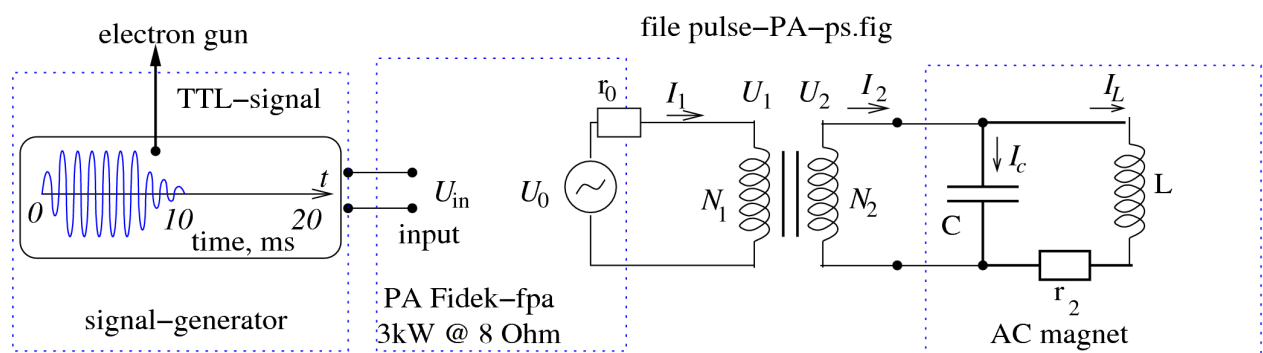
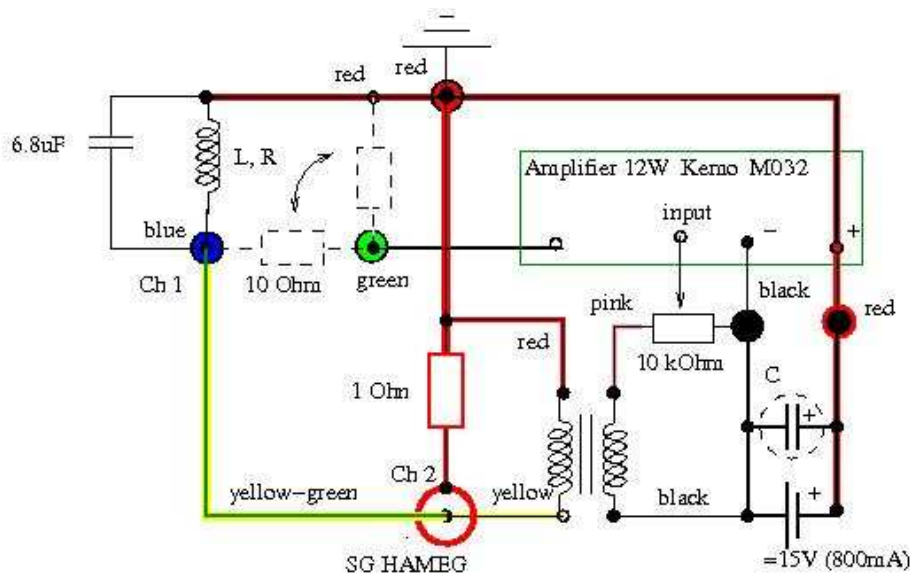


Abbildung 56: Schema der AC-Pulsstromversorgung

Die Anstiegsphase ist problemlos in etwa 1 ms realisierbar. Auch das Konstanthalten der Amplitude über die nächsten etwa 3 ms ist so sichergestellt. Beim Ausschalten belastet jedoch die im Schwingkreis des Magneten gespeicherte

Energie den Verstärker. Ein Verstärker, der diese Belastung verkraftet, stand aber nicht zur Verfügung. Daher musste die Abklingphase getrennt weiter untersucht werden.



Bei diesem Aufbau wurde unter anderem getestet, wie sich das System im cw-Betrieb ohne Signalgenerator verhält. Die Frequenz passt sich dabei automatisch an (siehe Abbildung 58).

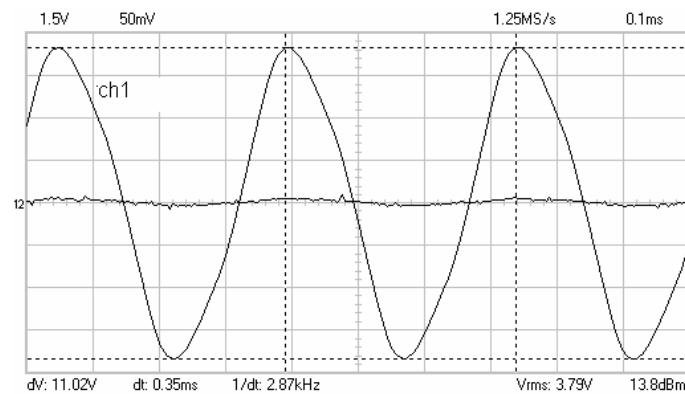


Abbildung 58: Selbst-Oszillation im Schwingkreis: der Signalgenerator (SG) ist AUS. Der Verstärker ist mit der Last verbunden.

Im zweiten Schritt (siehe Abbildung 59) wurde der Verstärker wieder direkt an den Schwingkreis des Magneten angekoppelt. Der Eingang des Verstärkers ist jetzt aber über eine Rückkopplungsspule mit dem Schwingkreis des Magneten verbunden. Dadurch kann auf den Transformator zur Trennung der Gleichstromquelle vom Signalgenerator verzichtet werden. Im dritten Schritt wurde dann eine induktive Kopplung des Verstärkers mit dem Magneten realisiert (siehe Abbildung 60, vergleiche auch Abbildung 30 bezüglich Messung der Leistungsaufnahme).

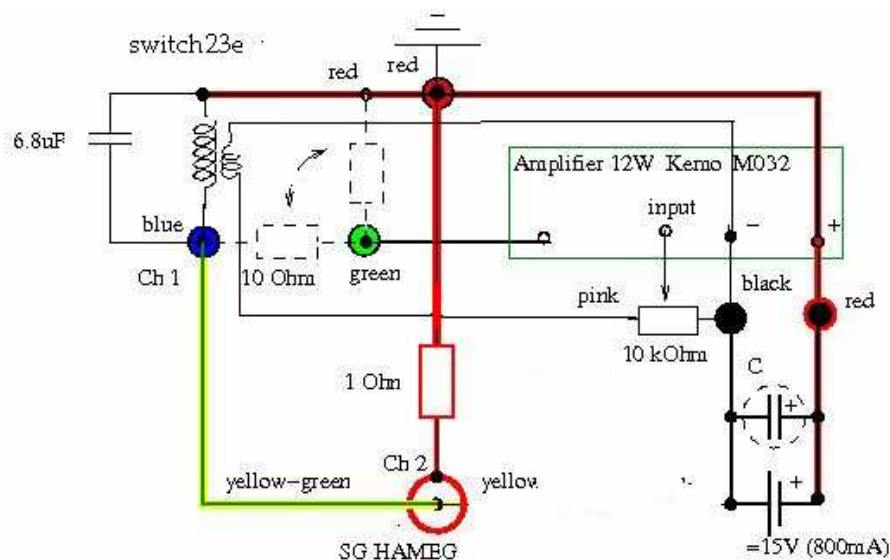


Abbildung 59: Zweiter Schaltkreis zum Test der Impedanz: Das Magnetsystem ist direkt an den Verstärker angekoppelt, der Verstärkereingang ist induktiv an den Magneten gekoppelt

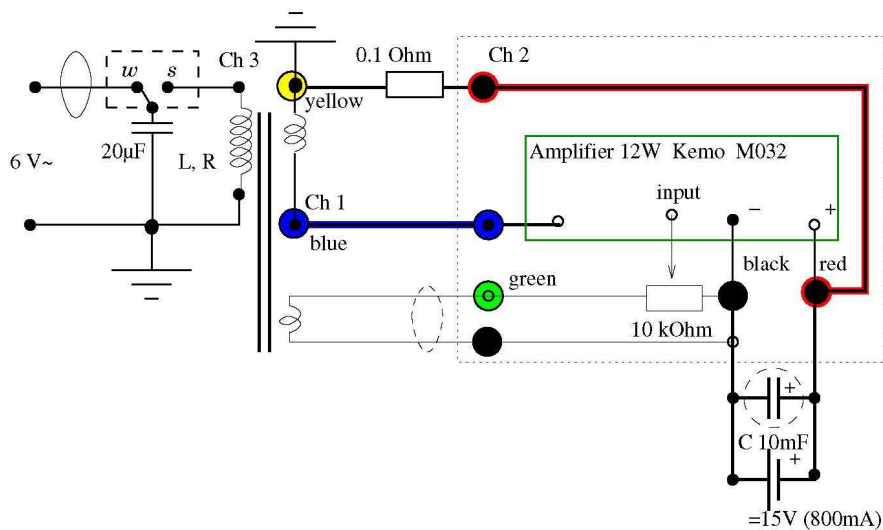


Abbildung 60: Dritter Schaltkreis zum Test der Impedanz. Sowohl Verstärkerausgang wie -eingang sind induktiv an den Schwingkreis gekoppelt; allerdings befand sich bei diesen Versuchen noch ein Schalter, wie in Abbildung 54 im Schwingkreis

Die folgende Abbildung 61 dient der Ermittlung der Impedanzen bei einem Betrieb des Aufbaus nach Abbildung 59, wobei zum einen der Verstärker ausgeschaltet war und im zweiten Fall arbeitete.

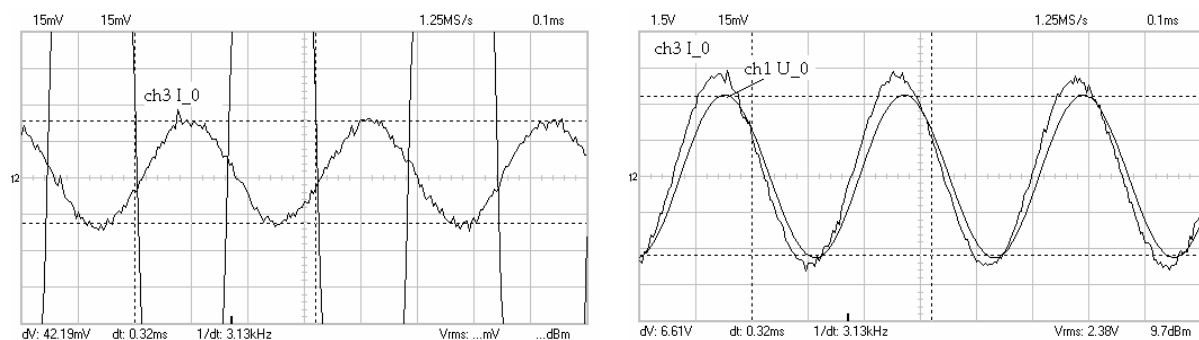


Abbildung 61: Links: der Verstärker ist ausgeschaltet; CH1: $U_{load} = 0,94 V_{pp}$ CH2 = CH3: ($R_{shunt} = 1 \text{ Ohm}$): $I_{load} = 42 \text{ mA}_{pp}$; $Z = U_{load} / I_{load} = 22 \text{ Ohm}$; rechts: Der Ausgang des Verstärkers ist mit der Last verbunden; $U_0 = 6,61 V_{pp}$, $I_0 = 70 \text{ mA}$, $Z_{eff} = 94 \text{ Ohm}$

Aus dem Vergleich der beiden Impedanzen geht hervor, dass in diesem Fall etwa 80 % der Verluste kompensiert werden, allerdings bei einer Verlängerung von τ um den Faktor 5. Das Schema garantiert aber, dass der Verstärker ohne Überlas-

tung abgeschaltet werden kann. Zur Verkürzung der Ausschwingzeit wurde ein weiterer Ballastwiderstand eingesetzt, der etwa eine halbe Millisekunde nach Ausschalten des Verstärkers den Schwingkreis entlädt (siehe Abbildung 62). Dieser Schalter ist nun außerhalb des Schwingkreises, schaltet damit geringere Ströme und kann außerhalb der Vakuumkammer verbleiben.

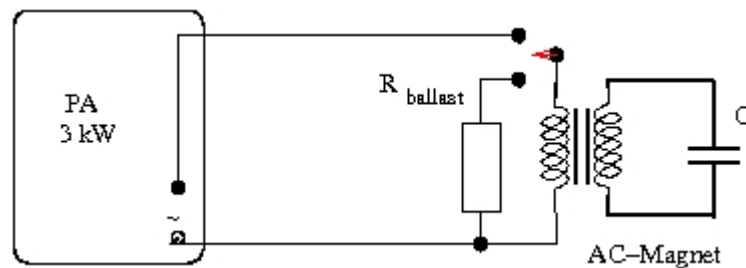


Abbildung 62: Schaltkreis für ein schnelles Abklingen des Stroms im Schwingkreis

Das prinzipielle Verhalten des Spulenstroms beim Ausschalten und Entladen über einen Ballastwiderstand ist in Abbildung 63 zu sehen.

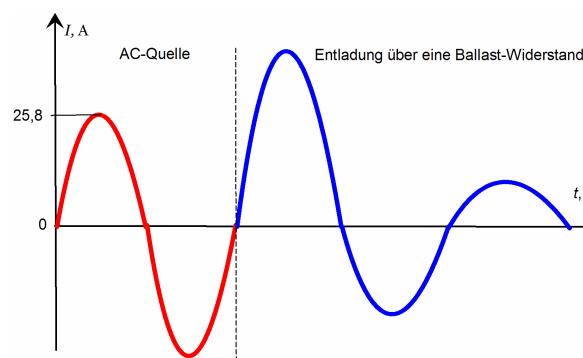


Abbildung 63: Prinzipielles Verhalten des Stroms auf der Primärseite des Schaltkreises aus Abbildung 62.

Ergebnisse von Rechnungen mit verschiedenen Widerständen zwischen 2 und 11 Ohm zeigt Abbildung 64. Im günstigsten der gezeigten 4 Fälle ergibt sich ein τ von 0,13 ms. Für eine Verminderung um drei Größenordnungen bedeutet das folglich ein Zeitintervall von $6,9 \tau (= 0,9 \text{ ms})$ benötigt (für vier Größenordnungen $(9,2 \tau = 1,2 \text{ ms})$).

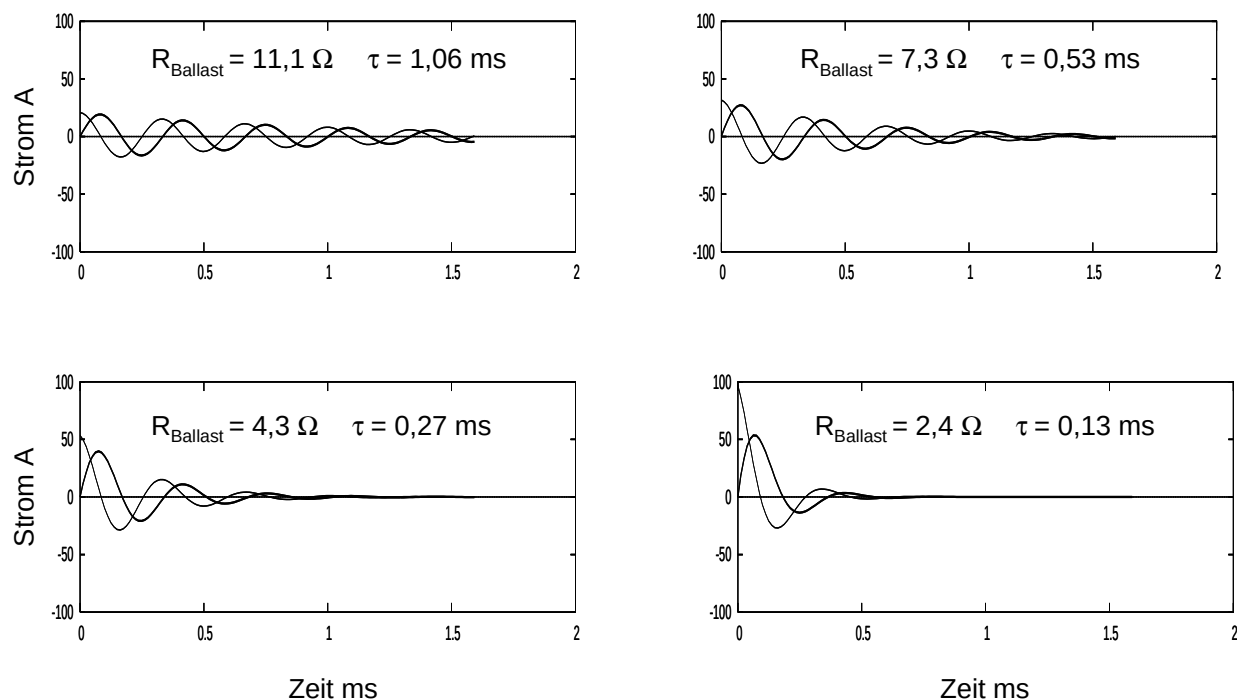


Abbildung 64: Schnelle Entmagnetisierung der Magnetpole bei der Entladung der Kapazität durch einen Ballastwiderstand R_{Ballast}

8.3 Applikationsorientierte experimentelle Untersuchung der Prozessparameter

Schweißversuche mit dem Elektronenstrahl fanden bei der Firma pro beam im Werk Planegg statt. Über einen längeren Zeitraum wurde der Pulsgenerator zur Kopplung des Magnetsystems mit dem Elektronenstrahl optimiert. In dieser Zeit wurde auch eine geeignete Durchführung durch die Kammerwand für die Stromversorgung und die Steuerung des Magnets fertig gestellt. Schließlich wurde das induktive Magnetsystem innerhalb einer Vakuumkammer platziert (siehe Abbildung 65). Signalgenerator und Verstärker standen außerhalb der Kammer. Über den optimierten Pulsgenerator war das Magnetsystem mit der Elektronenstrahlanlage verbunden. Ziel war es, mit bis zu 15 kW Elektronenstrahlleistung zunächst 30-mm-Platten aus Edelstahl zu verschweißen. Das Magnetsystem arbeitete prinzipiell einwandfrei, so dass die erwartete Stützwirkung beobachtet wurde, jedoch traten Probleme mit der Synchronisation auf, so dass der Elektronenstrahl durch das Magnetsystem gestört wurde. Die erzeugten Schweißnähte

zeigten entsprechend eine unruhige Form mit vielen Fehlern. Es wird vermutet, dass die Ursache für die fehlerhafte Synchronisation in einer elektrostatischen Aufladung des Magnetsystems durch gestreute Elektronen des Hochleistungs-Elektronenstrahls liegt. Auf den vorbereiteten Umbau des Magnetsystems auf andere Spulen und Kondensatoren zum Schweißen von Aluminium-Platten wurde aufgrund der Synchronisationsprobleme verzichtet. Leider standen für weitere Schweißversuche nach entsprechenden abschirmenden Maßnahmen keine Versuchszeiten innerhalb der Projektlaufzeit mehr zur Verfügung.

Weitere Versuche sollen nach Projektende fortgeführt werden, die zum einen eine verbesserte Abschirmung gegen statische Aufladung und zum anderen eine weitere Modifikation des Pulsgenerators betreffen.

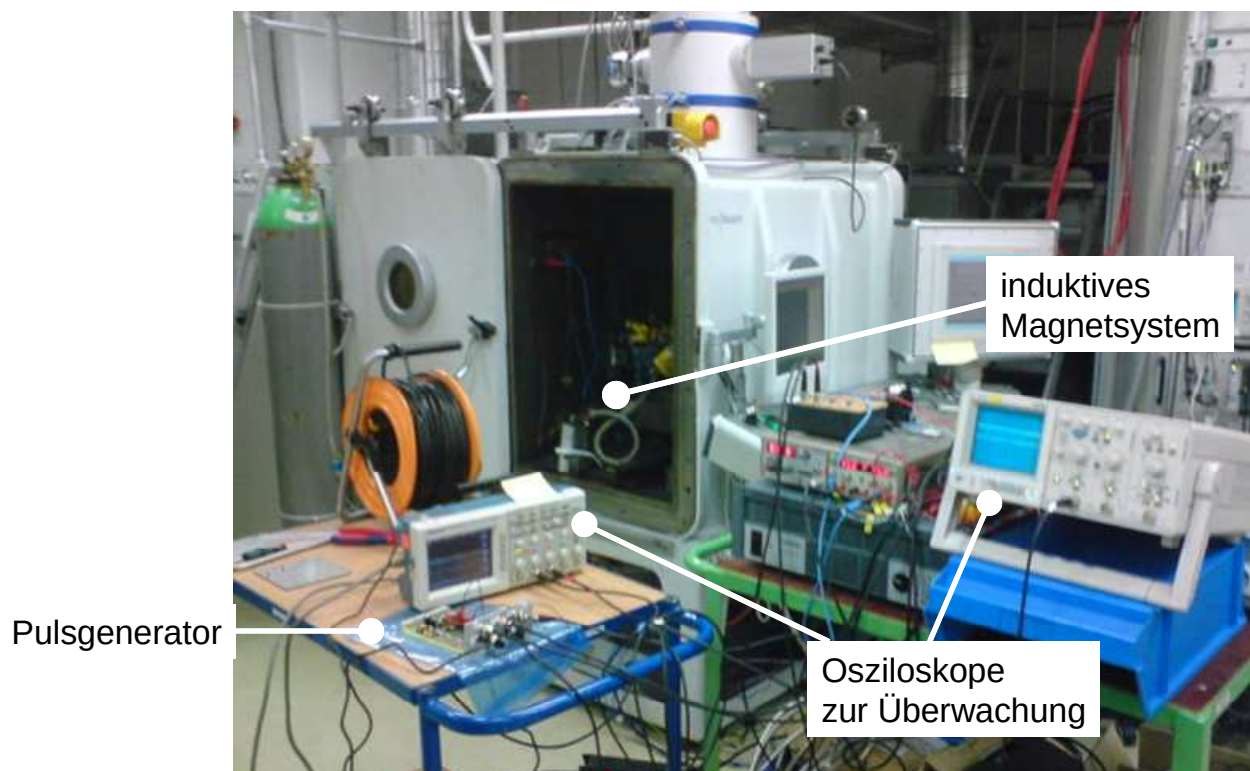


Abbildung 65: AC-Magnet mit Pulselektronik in Schweißstation der Firma pro beam

9 Zusammenfassung

Das Forschungsvorhaben beschäftigte sich mit einem konkreten Aspekt der magnetischen Beeinflussung beim Schweißen mit Laser- und Elektronenstrahlung: der Beeinflussung / Vermeidung des Nahtdurchhangs. Obwohl es zu anderen Aspekten der Nutzung elektromagnetischer Kräfte beim Laserstrahlschweißen zahlreiche Veröffentlichungen gibt, findet man zu dem hier behandelten Thema praktisch keine wissenschaftlichen Abhandlungen. Lediglich Patente einer japanischen und einer englischen Gruppe haben neben den eigenen Aktivitäten das Thema des Forschungsvorhabens zum Inhalt. Industrielle Umsetzungen sind ebenfalls nicht bekannt. Für einen solchen industriellen Einsatz sind weder die erforderlichen Systemkomponenten erhältlich noch waren zu Beginn des Projekts Kenntnisse / Erfahrungen für deren Bau und Anwendungsspektrum vorhanden.

Mit dem Forschungsvorhaben wurde das Wissen erarbeitet, wie für konkrete Schweißaufgaben angepasste elektromagnetische Systeme auszulegen, aufzubauen und zu betreiben sind, mit denen der Nahtdurchhang und die Nahtüberhöhung beim Schweißen mit Laser- und Elektronenstrahlen gezielt beeinflusst bzw. beseitigt werden können. Für einige Schweißaufgaben konnte die Funktion und Wirkungsweise in sicheren Schweißprozessen nachgewiesen werden.

Um angepasste Lösungen für Schweißungen unterschiedlich dicker Werkstücke bereitstellen zu können, wurden zwei unterschiedliche Systeme eingehend untersucht: 1.) ein konduktives System, bei dem ein Magnetfeld mit Dauermagneten erzeugt und Strom mit Schleif- bzw. Rollkontakten durch das Werkstück geleitet wird und 2.) ein induktives System, dessen mit Spulen erzeugtes, hochfrequentes Magnetfeld Ströme im Werkstück induziert.

Das konduktive System ist in seiner Leistungsfähigkeit stärker eingeschränkt, da die im Bereich der Schweißnaht erzeugte magnetische Induktion auf etwa 0,3 Tesla und der über Schleifkontakte fuhrbare Strom begrenzt sind. Daher eignet sich das konduktive System für Schweißungen bis zu einer Blechdicke von etwa 3 mm. Ein großer Vorteil des konduktiven Systems ist die Möglichkeit Zug- oder Druckkräfte erzeugen zu können. Dadurch kann der Magnet je nach Platzverhältnissen über oder unter dem Werkstück angeordnet werden. Auch ein am

Bearbeitungskopf befestigtes System ist möglich und wurde aufgebaut und getestet. Anhand dieses Systems wurden Erfahrungen zum Design des Magneten einschließlich zur Polschuhgeometrie, Anordnung der Elektroden, Auswahl der Materialien der Dauermagnete und für Schenkel, Polschuhe und Joch gesammelt.

Schweißversuche mit Blechen bis 3 mm Stärke zeigten, dass die Lorentzkraft über die Stromstärke gut einstellbar ist. Lediglich bei der Stoßart Stumpfstoß kam es am Anfang der Naht zu einer zu starken Wirkung des Systems, da am Anfang der Strom konzentriert durch das Schmelzbad geleitet wird. Für eine entsprechende Anwendung ist daher eine geeignete Steuerung oder Regelung vorzusehen.

Ein induktives System muss immer unterhalb des Werkstücks platziert werden, da nur Druckkräfte erzeugt werden können. Zur Einstellung der Eindringtiefe des Magnetfeldes und damit auch des induzierten Stroms muss die Frequenz des Systems angepasst werden. Dabei ist zu berücksichtigen, ob das Werkstück gut (z.B. Aluminium) oder schlecht (z.B. Stahl) elektrisch leitend ist. Zwei Versionen für die beiden Extremfälle wurden aufgebaut, zum einen für gut leitende dünne Bleche (Aluminium, 3 bis 5 Millimeter dick) und zum anderen für schlecht leitende dicke Bleche (Edelstahl, bis 20 Millimeter).

Schweißversuche mit Lasern konnten bis zu einer Dicke von 12 mm durchgeführt werden. Begrenzend war die zu Verfügung stehende Laserleistung (8 kW), nicht die Leistung des Magnetsystems. Lediglich bei „prozessbedingtem Nahtdurchgang“ (vermutlich hohe Drücke in der Kapillare) kam das induktive System aufgrund der begrenzten Leistung des Verstärkers (von 2,5 kW) an seine Grenzen.

Eine Nutzung des Systems zur Kontrolle der Nahtgeometrie ist nicht möglich. Aufgrund der Größe des Magneten können lediglich sehr grobe Informationen wie „Kantennähe“ oder „Blech ist nicht im Bereich des Magneten“ erkannt werden.

Das induktive Verfahren mit einem hochfrequenten Magnetfeld bietet die Voraussetzung für einen gepulsten Betrieb und damit für eine Nutzung mit Elektronenstrahlen. Mehrere Varianten gepulster Systeme wurden aufgebaut und bei einem Industriepartner getestet. Dabei zeigten sich zwei Probleme: 1.) Das Schalten großer Ströme im Schwingkreis – insbesondere bei sehr niedrigen Umgebungsdrücken – ist schwer zu beherrschen. Hierzu konnten Alternativen entwickelt

werden. 2.) Das Magnetsystem lädt sich vermutlich in einer Vakuumkammer unter dem Einfluss eines Elektronenstrahls elektrisch auf. Eine geeignete Abschirmung konnte jedoch aus Zeitgründen nicht mehr innerhalb des Projekts realisiert werden.

Auch bei Schweißungen mit einem Elektronenstrahl konnte das System seine stützende Wirkung beim Schweißen von Platten bis 20 mm unter Beweis stellen. Jedoch kam es hierbei wegen der erwähnten Aufladung zu einer Störung der Synchronisation und damit zu Schweißungen geringer Qualität. Arbeiten zur Beseitigung dieses Problems sollen nach Projektende fortgesetzt werden.

Bei Schweißungen mit einem CO₂-Laser (10,6 µm Wellenlänge) verändert sich die Nahtquerschnittsfläche etwas: Die Naht wird im unteren Bereich etwas schlanker. Bei Nutzung von 1-µm-Strahlung sind keine entsprechenden Veränderungen feststellbar. Bei Durchschweißungen sind darüber hinaus auch keine Änderungen der Nahtkerben ferkennbar. Natürlich geht mit einem Anheben der Naht eine Verkleinerung der Kerben auf der Obersite einher, dabei handelt es sich aber nicht um eine prinzipielle Formänderung. Eine flachere Nahtoberraupengestalt ohne Nahtkerben konnte bislang nur bei Einschweißungen erzielt werden.

Die Stärke des Nahtdurchhangs kann sowohl mit dem konduktiven als auch mit dem induktiven Verfahren nach Wunsch eingestellt werden. Die entwickelten Systemkomponenten können bestehende ergänzen. Lösungen für spezielle Aufgaben, z.B. für das Verschweißen von Rohren, sind möglich und mit dem erlangten Wissen leicht zu entwerfen.

10 Literaturverzeichnis

- [1] G. Ambrosy: Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte beim Laserstrahlschweißen. Dissertation, Universität Stuttgart, 2009 (im Druck).

- [2] M. Kern, P. Berger, H. Hügel: Verfahren zur Bearbeitung eines Werkstücks mit einem Laserstrahl sowie Vorrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens. Patent DE 197 32 008 C2, 14. 10. 1999.
- [3] R.S. Xiao, M. Leimser, G. Ambrosy, P. Berger, H. Hügel: Verfahren zur Bearbeitung eines Werkstücks mit einem Laserstrahl. Offenlegungsschrift DE 101 28 793 A1, 23.01.2003.
- [4] G. Ambrosy, P. Berger, H. Hügel, D. Lindenau: Improvement of laser beam welding by electromagnetic forces in the weld pool. In: Miyamoto, I.; Kobayashi, K. F.; Sugioka, K.; Poprawe, R.; Helvajian, H. (Ed.): Proceedings of the First International Symposium on High-Power Laser Macroprocessing (LAMP 2002), Bellingham (WA): SPIE, 2003, S. 175-179, (SPIE Proceedings, Vol. 4831).
- [5] M. Kern, P. Berger, H. Hügel: Magnetisch gestütztes Laserstrahlschweißen. Stuttgarter Lasertage (SLT '99) – Tagungsband. Stuttgart: ZFS, IFSW, FGSW, DLR. 1999, 12-17.
- [6] M. Kern, P. Berger, H. Hügel: Magneto-Fluid Dynamic Control of Seam Quality in CO2 Laser Beam Welding. Welding Journal 79, 3 (2000), 72s -78s.
- [7] M. Kern, P. Berger, H. Hügel: Beeinflussung der Schweißnahtqualität beim CO2-Laserstrahlschweißen durch magnetofluidynamische Effekte. Schweißen & Schneiden 52, 3 (2000), 140 - 148.
- [8] M. Kern, P. Berger, H. Hügel: Using magnetofluiddynamic effects in order to influence the weld quality in the case of CO2 laser-beam welding. Welding & Cutting 52, 3 (2000), E 42 - E 46.
- [9] H. Hügel, E. Roos, U. Schumacher, G. Ambrosy, P. Berger, M. J. Greitmann, G. Dodel: Grundlagen des magnetisch unterstützten Laserstrahlschweißens. Abschlussbericht zum Forschungsschwerpunktprogramm des Landes an den Universitäten. Stuttgart: IFSW, Universität Stuttgart, 2001.
- [10] G. Ambrosy, D. Lindenau, P. Berger, H. Hügel: Effects of magnetically supported laser beam welding of aluminium alloys. In: Lasers in Manufacturing 2001. WLT-Konferenz München (Juni 2001) S. 416-426.
- [11] G. Ambrosy, P. Berger, H. Hügel, D. Lindenau: Effects of magnetically supported laser beam welding of aluminium alloys. Proc. Int. Sem. On Electromagnetic Control of Liquid Metal Processes. Coventry: Coventry University (UK), 27. 06. 2001, S.135-146.
- [12] D. Lindenau, G. Ambrosy, P. Berger, H. Hügel: Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweißen. In: Dausinger, F.; Hügel, H.; Müller, M.; Weick, M. (Hrsg.): Stuttgarter Lasertage (SLT '01) - Tagungsband. Stuttgart: ZFS, IFSW, FGSW, DLR, 2001, 39-42.

- [13] G. Ambrosy, P. Berger, H. Hügel: Magnetisch unterstütztes Laserstrahlschweißen. LaserOpto 33 (2001), Nr. 6, S. 48-50.
- [14] G. Ambrosy, P. Berger, H. Hügel, D. Lindenau: The use of electromagnetic body forces to enhance the quality of laser welds. In: Abramski, K.M.; Pliński, E.F.; Woliński, W. (Editors): XIV International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers (GCL, 25-30 Aug. 2002, Wrocław). Bellingham (Wa): SPIE, 2003, S.596-600 (Proc. SPIE 5120).
- [15] H. Hügel, P. Berger, G. Ambrosy: Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte zur gezielten Gestaltung der Nahtgeometrie und Erhöhung der Prozessstabilität beim Laserstrahlschweißen. Zwischenbericht zum DFG-Projekt HU 463/6-1 im SPP 1139. Stuttgart: Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW), Universität Stuttgart, 2003.
- [16] H. Hügel, F. Dausinger, P. Berger, G. Ambrosy, R. Schuster: Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte zur gezielten Gestaltung der Nahtgeometrie und Erhöhung der Prozessstabilität beim Laserstrahlschweißen. Abschlussbericht zum DFG-Projekt HU 463/6-1 im SPP 1139. Stuttgart: Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW), Universität Stuttgart, 2008.
- [17] G. Ambrosy, V. Avilov, P. Berger, H. Hügel: Laser induced plasma as a source for an intensive current to produce electromagnetic forces in the weld pool. Sixteenth International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers (GCL, 4.-8. Sept. 2006, Gmunden, Österreich).
- [18] H. Hügel, F. Dausinger, P. Berger, G. Ambrosy, R. Schuster: Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte zur gezielten Gestaltung der Nahtgeometrie und Erhöhung der Prozessstabilität beim Laserstrahlschweißen. Abschlusspräsentation zum DFG-Projekt HU 463/6-1 im SPP 1139 in Vaals, Holland. Stuttgart: Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW), Universität Stuttgart, 2006 (Vortrag und Poster).
- [19] Y. Manabe et al.: Welding method in the overhead and vertical positions, US patent 5,932,121, Aug. 3rd, 1999.
- [20] Y. Manabe et al.: Method of welding in horizontal position and welding apparatus therefore, US patent 6,023,043, Feb. 8th, 2000.
- [21] Y. Manabe: Welding method in the overhead and vertical positions. Patent: EP 1 231 009 A3, 11.12.2002.
- [22] R. S. Xiao, G. Ambrosy, M. Leimser, P. Berger, H. Hügel: Effect of additional current on laser welding of aluminium alloys. In: Lasers in Manufacturing 2001. WLT-Konferenz München (Juni 2001) S. 520-522.

- [23] R. S. Xiao, G. Ambrosy, T. C. Zuo, H. Hügel: New approach to improve the laser welding process of aluminum by using an electrical current. J. of Materials Science Letters 20 (2001), S.2163-2165.
- [24] V. Avilov, P. Berger, G. Ambrosy: Simulation of weld-pool support system for power beam welding of VV sector welds. Final Report of EFDA Reference TW1-TVV/WELDSP, January 2003.
- [25] V. Avilov, G. Ambrosy, P. Berger: Elektromagnetische Schmelzbadunterstützung für das Schweißen dicker Bleche und Platten. Freiherr von Döbeneck'sche Technologie-Transfer-Stiftung 2002.
- [26] V. Avilov, G. Ambrosy, P. Berger: Intermediate results of weld pool support system for e-beam root welding of 60 mm plates. 4th Vacuum Vessel Assembly and Maintenance Meeting, Cassis (France), EFTA / EURATOM, 2002.
- [27] L. P. Jones, P. Aubert, V. Avilov, F. Coste, W. Daenner, T. Jokinen, K. R. Nightingale, M. Wykes: Towards advanced welding methods for the ITER vacuum vessel sectors. Fusion Engineering and Design 69 (2003) 215-220.
- [28] F. Vollertsen, C. Thomy, M. Schilf, J. von Beren, T. Seefeld: Improvement of Weld Quality in Laser and Friction Stir Welding of Aluminium. In: Proc. LANE 2004: Laser Assisted Net-Shape Engineering, Ed.: M. Geiger, A. Otto, Meisenbach Verlag, Bamberg 2004, Bd. 1, S. 235-246.
- [29] F. Vollertsen, C. Thomy: Magnetic Stirring during Laser Welding of Aluminium. In: Proc. ICALEO 2004, LIA Congress Proceedings CD-Rom 597, LIA, Orlando FL, 2004, Paper 203.
- [30] F. Vollertsen, C. Thomy: Influence of Magnetic Fields on Dilution during Laser Welding of Aluminium. In: Proc. SheMet 2005 - 11th International Conference on Sheet Metal, April 2005, Erlangen (im Druck).
- [31] M. Kern, S. Breitschwerdt, R. Heigl: Verfahren zur Oberflächenbeschichtung metallischer Werkstücke. Offenlegungsschrift DE 199 12 894 A1, 23.3.1999.
- [32] J. Wilden: Untersuchung des Einflusses elektromagnetischer Felder auf die Schmelzbadgeometrie beim Laserstrahlbeschichten und -generieren. Vortrag, Workshop zum DFG SPP "Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung", Aachen, 16.6.2003.
- [33] O. Velde, A. Techel, R. Grundmann: Suppression of the development of pores during laser-induced surface dispersion of TiC into aluminium, by means of a static magnetic field. Surface and Coatings Technology 150 (2002), 170-176.

- [34] V. Avilov, T. Löwer, G. Ambrosy, P. Berger, H. Hügel: Verfahren zum Behandeln, insbesondere zum Schweißen, eines Werkstücks mit einem Hochenergiestrahle. Patentanmeldung DE 102 25 781.7, 10.06.2002.
- [35] Produktkatalog „Selten-erd-dauermagnete VACODYM VACOMAX“ der Firma Vacuumschmelze GmbH & Co. KG (VAC).
- [36] G. W. Reppel: Duroplastgepresste Magnete – Werkstoffe, Verfahren und Eigenschaften, Firma Vacuumschmelze GmbH Co. KG (VAC).
- [37] R. Moldovan: Bewertung und Optimierung eines Magnetsystems für das magnetisch unterstützte Laserstrahlschweißen. Diplomarbeit, Stuttgart: Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart, IFSW 08-31, (im Druck).