

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

D. Lindenau
Magnetisch beeinflusstes Laserstrahl-
schweißen

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf, Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)

Das Strahlwerkzeug Laser gewinnt zunehmende Bedeutung für die industrielle Fertigung. Einhergehend mit seiner Akzeptanz und Verbreitung wachsen die Anforderungen bezüglich Effizienz und Qualität an die Geräte selbst wie auch an die Bearbeitungsprozesse. Gleichzeitig werden immer neue Anwendungsfelder erschlossen. In diesem Zusammenhang auftretende wissenschaftliche und technische Problemstellungen können nur in partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungsinstituten bewältigt werden.

Das 1986 gegründete Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart (IFSW) beschäftigt sich unter verschiedenen Aspekten und in vielfältiger Form mit dem Laser als einem Werkzeug. Wesentliche Schwerpunkte bilden die Weiterentwicklung von Strahlquellen, optischen Elementen zur Strahlführung und Strahlformung, Komponenten zur Prozessdurchführung und die Optimierung der Bearbeitungsverfahren. Die Arbeiten umfassen den Bereich von physikalischen Grundlagen über anwendungsorientierte Aufgabenstellungen bis hin zu praxisnaher Auftragsforschung.

Die Buchreihe „Laser in der Materialbearbeitung – Forschungsberichte des IFSW“ soll einen in der Industrie wie in Forschungsinstituten tätigen Interessentenkreis über abgeschlossene Forschungsarbeiten, Themenschwerpunkte und Dissertationen informieren. Studenten soll die Möglichkeit der Wissensvertiefung gegeben werden.

Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweißen

von Dr.-Ing. Dirk Lindenau
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Als Dissertation genehmigt
von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Uwe Schumacher

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische
Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2006

D 93

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung,
des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der
Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem
Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwen-
dung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2007

ISBN 978-3-8316-0687-0

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089-277791-00 · www.utz.de

Kurzfassung der Arbeit

Für das Laserstrahl-tiefschweißen ist die Prozessstabilität eine wesentliche Voraussetzung, damit das Verfahren in der Serienfertigung eingesetzt werden kann. Während beim Schweißen von Stahlblechen hauptsächlich die Beschichtungen für den Korrosionsschutz die Nahtqualität beeinträchtigen können, sind beim Schweißen von Aluminium besonders die Form und das Verhalten der Dampfkapillare für das Ergebnis verantwortlich. Ausgehend von Berichten in der Literatur wird in dieser Arbeit bestätigt, dass der Laserschweißprozess durch elektromagnetische Kräfte beeinflusst werden kann. Es ist das Ziel dieser Arbeit, diese neuen Prozessansätze zu verstehen und auf Anwendungsmöglichkeiten in der Produktion zu untersuchen.

Aufgrund der hohen Schweißtemperaturen ist die beobachtete Wirkung weder bei Stahl noch bei Aluminium auf einen ferromagnetischen Effekt zurückzuführen. Es ist vielmehr eine Lorentz-Kraft im Schmelzbad, bedingt durch einen elektrischen Strom und ein Magnetfeld. Bei der theoretischen und experimentellen Untersuchung zeigt sich, dass im Schweißprozess aufgrund mehrerer Ursachen Ströme fließen und verschiedene Effekte aus dem Bereich der Elektrodynamik, Plasmaphysik, Magnetohydrodynamik und Thermophysik auftreten. Es wird ferner erkennbar, dass der Hauptgrund für das deutliche Auftreten der magnetischen Beeinflussung beim CO₂-Laser durch die Eigenschaften des Plasmas bedingt ist und dort ein Strom fließen muss.

Beim Dauerstrich-Festkörperlaser kann durch Zufuhr eines externen Stroms bei angelegtem Magnetfeld der Schweißprozess ebenfalls beeinflusst werden. Die vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten von Magnetfeldausrichtung, Polung und Stromzufuhr werden in einem großen Rasterversuch für Aluminium auf nützliche Fälle untersucht. Über die Lenkung der Strömung im Schmelzbad kann sowohl die Prozessstabilität erhöht, als auch der Nahtquerschnitt seitlich verschoben werden. Letzteres kann z.B. beim Schweißen von Kehlnähten den Anbindungsquerschnitt erhöhen. Als nicht sinnvoll erweist sich, den Prozess über eine periodische Anregung mit Wechselstrom in Schwingung zu versetzen.

Um einen positiven Einfluss gezielt in der Produktion zu nutzen, ist die prozesssichere Bereitstellung eines Magnetfeldes nötig. Wegen der Nähe zum heißen Schweißprozess müssen die Magnete besonders ausgelegt werden.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Kurzfassung der Arbeit | 5 |
| Inhaltsverzeichnis | 7 |
| Verzeichnis der Symbole | 11 |
| Extended Abstract | 15 |
| 1 Einleitung | 21 |
| 1.1 Laserschweißen und Prozessstabilität | 21 |
| 1.2 Stabilisierung des Prozesses durch elektromagnetische Kräfte | 30 |
| 1.3 Aufbau der Arbeit | 34 |
| 2 Klärung des physikalischen Hintergrundes | 35 |
| 2.1 Beeinflussen des Laserstrahlschweißens durch magnetische Felder | 35 |
| 2.2 Mögliche Effekte auf das Plasma | 37 |
| 2.2.1 Erzeugung und Eigenschaften von Plasma | 37 |
| 2.2.2 Beeinflussung eines Plasmas durch Magnetfelder | 41 |
| 2.2.2.1 Betrachtung von Einzelteilchen | 42 |
| 2.2.2.2 Integrale Betrachtung | 45 |
| 2.2.3 Thermionische Emission und Photoeffekt | 50 |
| 2.2.4 Modellvorstellung zum Stromfluss im Plasma | 51 |
| 2.3 Mögliche Effekte auf die Schmelze | 53 |
| 2.3.1 Grundlagen der Magnetohydrodynamik | 53 |
| 2.3.2 Beeinflussungen der Schmelze | 55 |
| 2.3.2.1 Hartmannströmung | 55 |
| 2.3.2.2 MHD-Turbulenz | 57 |
| 2.3.2.3 Induktionspumpen | 58 |
| 2.3.2.4 Elektrowirbelströmung | 59 |
| 2.3.2.5 Pincheffekt | 60 |
| 2.3.2.6 Oberflächenstabilität | 60 |
| 2.3.2.7 Kraftwirkung eines plasmainduzierten Stroms | 61 |
| 2.3.3 Beeinflussung der Erstarrung | 62 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.4 | Ursprung eines thermoelektrischen Stroms | 64 |
| 3 | Fragestellung und Zielsetzung der Arbeit | 67 |
| 4 | Untersuchung der auftretenden Phänomene | 69 |
| 4.1 | Versuchsaufbau und technische Erzeugung des Magnetfeldes | 69 |
| 4.1.1 | Entwurf und Bau eines Permanentmagneten | 70 |
| 4.1.2 | Entwurf und Bau eines Elektromagneten | 73 |
| 4.2 | Beeinflussen der Schweißung durch ein Magnetfeld | 75 |
| 4.2.1 | Versuche mit dem CO ₂ -Laser | 75 |
| 4.2.2 | Versuche mit dem Festkörperlaser | 78 |
| 4.3 | Messen des prozesseigenen Stroms ohne zusätzliches Magnetfeld | 81 |
| 4.3.1 | Versuchsaufbau | 81 |
| 4.3.2 | Versuche mit dem Nd:YAG-Laser | 83 |
| 4.3.3 | Versuche mit dem CO ₂ -Laser | 87 |
| 4.4 | Messen eines aus der Kapillare austretenden Stroms | 90 |
| 4.5 | Messen eines induzierten Stroms bei einem zusätzlichen Magnetfeld | 92 |
| 4.6 | Zusammenfassung der untersuchten Phänomene | 95 |
| 5 | Einfluss von Magnetfeldern und externem Strom | 97 |
| 5.1 | Varianten der elektromagnetischen Beeinflussung | 97 |
| 5.2 | Versuchsaufbau und Referenzprozesse | 99 |
| 5.3 | Konstantes Magnetfeld und Gleichstrom bei schleppender Drahtzufuhr | 104 |
| 5.3.1 | Kraftwirkung in Schweißrichtung | 107 |
| 5.3.2 | Kraftwirkung entgegen der Schweißrichtung | 110 |
| 5.3.3 | Kraftwirkung zur Seite | 112 |
| 5.4 | Konstantes Magnetfeld und Gleichstrom bei stechender Drahtzufuhr | 115 |
| 5.4.1 | Kraftwirkung in Schweißrichtung | 116 |
| 5.4.2 | Kraftwirkung entgegen der Schweißrichtung | 117 |
| 5.4.3 | Kraftwirkung zur Seite | 120 |
| 5.5 | Konstantes Magnetfeld und Wechselstrom bei schleppender Drahtzufuhr . | 125 |
| 5.5.1 | Versuchsaufbau mit zusätzlichem Wechselstrom | 125 |
| 5.5.2 | Pendelnde Kraftwirkung entlang der Schweißrichtung | 126 |
| 5.5.3 | Pendelnde Kraftwirkung zur Seite | 128 |
| 5.6 | Konstantes Magnetfeld und Wechselstrom bei stechender Drahtzufuhr | 131 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.6.1 | Pendelnde Kraftwirkung entlang der Schweißrichtung | 131 |
| 5.6.2 | Pendelnde Kraftwirkung zur Seite | 135 |
| 5.7 | Zusammenfassung des Einflusses externen Stroms | 138 |
| 6 | Zusammenfassung | 141 |
| A | Anhang Magnettechnik | 145 |
| A.1 | Grundlagen der Magnettechnik | 145 |
| A.2 | Randbedingungen für den Einsatz von Magneten in der Schweißtechnik... | 149 |
| A.3 | Einsatz von Elektromagneten | 150 |
| A.3.1 | Berechnung eines Magnetkreises nach der Netzwerkmethod | 151 |
| A.3.2 | Auswahl eines weichmagnetischen Werkstoffes | 159 |
| A.4 | Einsatz von Dauermagneten | 162 |
| A.4.1 | Grundlagen hartmagnetischer Werkstoffe | 162 |
| A.4.2 | Auswahl eines hartmagnetischen Werkstoffes | 163 |
| | Literatur- und Quellenverzeichnis | 165 |

Verzeichnis der Symbole

| Symbol | Beschreibung |
|---------------------------|---|
| α | Absorptionskoeffizient |
| α_1, α_2 | Winkel |
| $\gamma_E(Z)$ | Korrekturfaktor im Term der Spitzer-Leitfähigkeit |
| δ | Luftspaltweite |
| ε_0 | Dielektrizitätskonstante |
| ε_r | Dielektrizitätszahl |
| η | dynamische Viskosität |
| θ | Winkel |
| Θ | Durchflutung |
| λ | Lichtwellenlänge |
| λ_s | Mittlere freie Weglänge |
| μ | Permeabilität |
| μ_r | Permeabilitätszahl |
| μ_0 | Magnetische Feldkonstante |
| μ_4 | Permeabilität bei $H = 4 \text{ mA/cm}$ |
| ν_c | Elektronenstoßfrequenz |
| ν_{cg} | Stoßfrequenz Elektron-Neutralteilchen |
| ν_{Zg} | Stoßfrequenz Elektron-Ion |
| π | Kreiszahl |
| ρ | Dichte |
| ρ_{Π} | Dichte des Fluids |
| σ | Wirkungsquerschnitt |
| σ | Elektrische Leitfähigkeit |
| σ_{Pl} | Elektrische Leitfähigkeit Plasma |
| τ | Zeitdauer |
| Φ | Magnetischer Fluss |
| $\Phi_{\text{Streupfad}}$ | Magnetischer Fluss eines Streupfades |
| ω | Lichtfrequenz |
| ω_m | Zyklotronfrequenz |
| ω_p | Plasmafrequenz |
| ω_m / ν_c | Hallparameter |

| | |
|-------------------------|--|
| a | Tiefe |
| a | Beschleunigung |
| A | Fläche |
| A_m | Mittlere Querschnittsfläche |
| A_n | Durchflutete Fläche in einer Spule |
| AP | Arbeitspunkt |
| $A_{\text{Streupfad}}$ | Mittlere Querschnittsfläche eines Streupfades |
| b | Breite |
| B | Magnetische Feldstärke (Flussdichte) |
| B_{extern} | Extern angelegte Magnetfeldstärke |
| B_{Hartmann} | Magnetfeldstärke des Hartmann-Stroms |
| $B_{\text{horizontal}}$ | Horizontale Magnetfeldkomponente |
| B_i | Induzierte Gegenmagnetfeldstärke |
| B_m | Feldstärke im Punkt maximaler Energiedichte |
| $(BH)_{\text{max}}$ | Maximale Energiedichte |
| B_r | Remanenzflussdichte |
| B_{Res} | Resultierende Feldstärke |
| B_s | Sättigungsflussdichte |
| $B_{\text{Streupfad}}$ | Mittlere magnetische Feldstärke in einem Streupfad |
| B_{vertikal} | Vertikale Magnetfeldkomponente |
| B_t | Tangentiale Magnetfeldkomponente |
| B_z | Magnetfeld in z-Richtung |
| c | Lichtgeschwindigkeit |
| D, d | Durchmesser |
| D | Dielektrische Verschiebung |
| d_f | Fokusedurchmesser |
| e | Elementarladung |
| e^- | Elektron |
| E | Elektrische Feldstärke |
| E | Energie |
| E_0 | Elektrische Leerlaufeldstärke |
| f | Brennweite |
| f | Frequenz |
| F | Kraft |
| g | Index Teilchensorte |
| G_{Eisen} | Magnetischer Leitwert des Eisenkerns |
| $G_{\text{Luftspalt}}$ | Magnetischer Leitwert des Luftspaltes |
| G_m | Magnetischer Leitwert |

| | |
|------------------------|---|
| $G_{\text{Streupfad}}$ | Magnetischer Leitwert eines Streupfades |
| h | Probendicke, Höhe |
| H | Magnetische Feldstärke H aufgrund freier Ströme |
| H_a | Hartmannzahl |
| H_C | Koerzitivfeldstärke |
| H_m | Magnetische Feldstärke H im Punkt maximaler Energiedichte |
| I | Stromstärke |
| I | Intensität |
| I_{Hartmann} | Induzierter Hartmannstrom |
| I_k | Kurzschlussstrom |
| j | Stromdichte |
| j_k | Kurzschlussstromdichte |
| J_c | Stromstärke außerhalb Probe |
| J_p | Stromstärke innerhalb Probe |
| k | Boltzmannkonstante |
| l | Länge |
| l_1, l_2 | Längen |
| l_d | Länge Dauermagnet |
| l_m | Mittlere Flussweglänge |
| $\ln(\Lambda)$ | Coulomblogarithmus |
| L | Induktivität |
| L | Länge |
| L_D | Debyesche Länge |
| m | Masse |
| m_e | Elektronenmasse |
| M | Magnetisierung oder Polarisierung |
| n | Brechungsindex |
| n | Anzahl Spulenwicklungen |
| N | Nordpol |
| N | Teilchendichte |
| N_a | Neutralteilchendichte |
| N_e | Elektronendichte |
| N_s | Stuartzahl |
| N_Z | Besetzungsdichte der Z -ten Ionisationsstufe |
| p | Druck |
| p_B | Magnetischer Druck |
| P_1, P_2 | Elektroden |
| P_L | Laserleistung |

| | |
|----------------|---|
| q | Ladung |
| r | Radius |
| r_1, r_2 | Teilwiderstand in Probe |
| r_1, r_2 | Einzelradien |
| R | Radius |
| R_B | Magnetische Druckzahl |
| Re | Reynoldszahl |
| R_L | Lamorradius |
| R_L | Lastwiderstand |
| R_m | Magnetischer Widerstand |
| R_m | Magnetische Reynoldszahl |
| R_p | Teilwiderstand Plasma |
| s_M | Blechdicke |
| S | Südpol |
| T | Temperatur |
| T | Dicke |
| t | Zeit |
| t_1, t_2 | Zeitpunkte |
| T_1, T_2 | Temperaturen |
| T_C | Curie-Temperatur |
| T_e | Elektronen-Temperatur |
| U | Elektrische Spannung |
| U_0 | Elektrische Leerlaufspannung |
| v | Geschwindigkeit |
| v_c | Schneidgeschwindigkeit |
| v_d | Drahtgeschwindigkeit |
| v_{fl} | Strömungsgeschwindigkeit |
| v_M | Geschwindigkeit des Materials |
| v_r | Geschwindigkeit rechtwinklig zur Feldrichtung |
| v_S | Schweißgeschwindigkeit |
| $v_{Schmelze}$ | Strömungsgeschwindigkeit der Schmelze |
| v_x | Geschwindigkeit in x-Richtung |
| Z | Ionisationsstufe |
| z_f | Fokuslage |

Extended Abstract

Process stability during laser-beam deep welding of aluminum is greatly affected by the shape and behavior of the metallic vapor capillary. On the one hand, it represents an obstacle around which the molten metal must flow. On the other hand, it can also expand, become constricted, fluctuate or burst. Due to the effects on the route of the flow and its heat transport, it also influences the melted seam cross-section.

The pertinent literature specifies the possibility of influencing the process during welding with a CO₂ laser by means of magnetic fields. The weld-in depth can be increased, the cross-section changed and the periodic seam defect called "humping" can be suppressed. This is possible not only with steel, but also with the paramagnetic aluminum. As a result, this cannot be a ferromagnetic effect. On the contrary, the Lorentz effect acts here, which stems from the interaction of current with a magnetic field in the vectorial cross product.

Reproduction of the experiments from the literature confirm the directional dependence of the effect of a connected magnetic field during the CO₂ laser welding process. With solid-state lasers, a directionally dependent effect only appears with very narrow seams, like those that can be produced as of late with the disk laser. This difference in the directional dependency indicates a special aspect of this process when using a CO₂ laser, which does not occur in this form with lamp pumped solid-state lasers. The main differences between the welding processes of CO₂ and solid-state lasers are the temperature and the degree of ionization of the plasma or metal vapor due to the wavelength of the laser light.

The search for possible effects of magnetic fields on the complex laser welding process and the theoretical estimation of the strength shows that several influences can exist at the same time. The plasma in the capillary and just above it consists of charged particles. Their movement and distribution in space can be influenced by electric and magnetic fields. This could then affect the optical refraction and absorption of the incident laser beam.

These considerations and experiments lead to the assumption that as yet undescribed interactions take place within the laser welding plasma, causing a current to flow in the workpiece and, therefore, also in the molten bath. For this purpose, a plausible model

concept was developed in this work which, however, could not be proven experimentally.

Two effects are possible as driving forces for this current flow. The temperature distribution in the plasma results in a differing electron density. Its gradient leads to an electron flow from hotter to colder areas in the plasma. The second possible driving force would be the emission of electrons with different temperatures or a differing strength of the photo effect at various points on the surface of the molten bath. These would be caused by temperature differences in the surface or different local intensities of the incident laser radiation. If these points are electrically connected not only via the molten metal, but also by a conductive plasma, then a current could flow. In this case the partially shorter-wave radiation, which results from the plasma itself and strikes the wall, may play a supporting role here. Its photons would transfer a considerably higher energy level to the electrons, so that the local spectral distribution may also be important. This model concept could be refined if the temperature and intensity distributions, especially near the walls, were to be considered more closely and combined with the thermionic emission of electrons from liquid or boiling metals.

A conductive plasma is required for a current to flow at all. And so that this current can also flow through the molten metal and the workpiece, where free electrons exist in a sufficient amount. In this work, attention is focused for the first time on the thermionic emission as a necessary link for the continuity of the electron flow.

As this current flow is generated by the plasma or is dependent on the presence of a conductive plasma, this explains the absence of this current during welding with Nd:YAG lasers. The electrode densities are insufficient in this case.

This current flow, which always occurs during laser welding processes in the presence of a plasma, could be altered by the magnetic pressure in the presence of an external magnetic field. Deflecting the plasma within or outside the keyhole would change the course of the current in the plasma and consistently in the molten metal and the workpiece. In addition, there is also a small current which is induced in the plasma flowing out from the keyhole, depending on the direction of the external magnetic field.

Influencing the molten metal by magnetic fields is possible if a current flows in it at the same time. These effects described in magneto-hydrodynamics include a pumping effect, a braking effect, a laminarization of the molten metal flow and even a stabilization of surfaces. An interaction of the current with its own magnetic field is

also possible. This leads to an electric eddy current or acceleration of the fluidic conductor. As already previously assumed by KERN, a current of approximately 4 A induced by the molten metal movement in the magnetic field was proven in the welding process. This direction-independent Hartmann effect is viewed as the cause for the shown influence during welding with a disk laser. With stronger magnetic fields up to 1 Tesla, this effect could be demonstrated even more clearly, however, the technical generation of the field is considerably more complicated. Other effects familiar from metallurgy, such as grain refining when the molten metal solidifies in a magnetic field or degassing through induced cavitation were not observed.

The thermoelectric current in the laser welding process was also experimentally proven to approximately the same magnitude with a CO₂ laser and Nd:YAG laser, however, not to the magnitude previously described in other publications. The direction of the current in steel was reproduced in the experiment. However, with aluminum the current was shown to have the opposite direction, which contradicts the previous assumption. The amperage is higher when the materials to be welded have differing thermal potentials. With the tested aluminum alloys, this was provided by silicon in the filler wire. However, the estimated amperage of a maximum of 1.5 A may not be sufficient to significantly interfere in the process. As a result, the thermocurrent is not capable of explaining the differences between the CO₂ laser and the solid-state laser.

With the solid-state laser, a clear interference in the welding process of aluminum can be achieved if an external current is supplied via the filler wire and at the same time an external magnetic field is present. The basic combinations of poling and orientation of a constant magnetic field with direct and alternating current were examined, and the effect of an alternating field was checked, too.

The occurrence of electromagnetic volumetric forces can affect the welding process. In certain cases of direct current and a constant field, the formation of pores can be suppressed. A smoother seam, an increase in the weld-in depth or a lateral deflection of the molten metal is achieved. The chance of laterally shifting the seam cross-section could be used for reliable melting of the edges of the joint gap when welding fillet welds and T-joints.

While the direction of the field is defined with the external potential, the supplied current flows within the molten bath depending on the spatial distribution of the specific resistance and the location of the ground connection. At the point of the material transition it flows normally into the molten bath, and then flows off into the

colder basic material. The spatial current density distribution can be determined more exactly with a computer-supported simulation.

A force acting in the welding direction in front of the capillary reduces large level fluctuations. A force acting against the welding direction in this region is capable of routing the fluid jet laterally in a swell past the capillary. This leads to a calming of the molten bath and a considerable reduction of the pores. A force to the side pushes the molten metal in this direction, which reduces the constriction of the capillary and produces the same effects. As a result, the tests not only demonstrate the importance of the vapor capillary, but also that of the liquid flow for the dynamics of the welding process: the capillary represents an obstacle in the flow that must be circumfused.

These effects are much more intense for the alloy AA6181A than for the alloy AA5182. The latter has a reduced surface tension due to the lower vaporization temperature of magnesium. To convert the Lorentz force effect into a deflection of the molten metal, the surface tension must be great enough to prevent the detachment of droplets. As the surface curvature increases, so does the surface tension. This produces the counterforce to the pressure by the molten metal, which must yield to the side. However, if it is insufficient, the melt continues to bend outward until a droplet detaches. This explains the increased splashing and the weaker influence when welding the alloy 5182.

The force effect of the supplied current is stronger with a prick wire feed compared to drag wire feed, because in the first case the current flow path through the melt is longer. Due to the importance of the capillary rear wall for the process stability, it is possible to intervene directly in the development of seam faults.

While usable positive effects are generated with direct current, the use of alternating current tends to lead to poorer results. Quite, in general, improvement in the process stability only resulted from effects that lead to calming of the process via a constant force effect. The flow and dynamics in the molten bath must be altered so that the capillary is stabilized. This can be achieved by deflecting molten metal from the capillary to the side or to the rear and suspending chaotic mechanisms such as the constriction of the capillary. Attempts to stabilize the process via a periodically oscillating force effect were thus unsuccessful. The process only became more instable. The melt pool appears as a highly dynamic system "constricted" by general conditions such as the vapor pressure of the capillary, the wall of the molten bath, the gravitation and the surface tension, which can only yield in the form of incompressible

liquid. Three or four aggregation states are present next to each other within a small space. This fluctuating system follows any external force effect. It does not oscillate.

The condition for the use of a magnetic effect in series production is the controlled generation of a magnetic field along the welding seam to be joined. Permanent magnets allow a compact design, however, they must be protected against corrosion and the effects of heat. Electromagnets require more space for the generation of a comparable field and are more suitable for being attached to the welding head. A field with the strength of 0.4 Tesla can be generated at reasonable expense.

If the expense is compared to the possible benefit of a magnetically influenced welding process, an application appears practical if especially high quality requirements are placed on a seam that cannot be achieved otherwise, or only with the very much higher system investments of double focus technology.

1 Einleitung

1.1 Laserschweißen und Prozessstabilität

Das Laserstrahlschweißen von Stahl und Aluminium hat im Automobilbau und in der Luftfahrt eine breite Akzeptanz als Fertigungsverfahren gefunden [Rapp96, Schin02, Gau04, Böhm04, Bern03, Muehu01]. Vorteilhaft im Vergleich zu anderen Schweißverfahren ist die tiefe, schmale Naht und ein geringer Wärmeeintrag bei hoher Schweißgeschwindigkeit. Bei entsprechender Prozessführung sind sehr gute Nahtqualitäten erreichbar. Hierzu kann zwar ein Schutzgas notwendig sein, es wird aber kein Vakuum wie beim Elektronenstrahlschweißen benötigt. Das Laserstrahlschweißen arbeitet berührungslos. Eine einseitige Zugänglichkeit an eine Fügestelle genügt [Dil94]. Obwohl der Lasereinsatz oft Mehrkosten für Laseraggregat, -schutzeinrichtungen und Spanntechnik erfordert, kann sich dies aufgrund der hohen Schweißgeschwindigkeit oder der guten Nahtqualität lohnen.

Aluminium gilt im Vergleich zu unlegiertem Stahl als schwieriger schweißbar [Dil95, Zuo89]. Als Gründe hierfür werden die größere Wärmeleitfähigkeit, der geringere elektrische Widerstand, die auf der Oberfläche vorhandene Oxidhaut, die stärkere Reflexion und die dünnflüssigere Schmelze genannt. Diese Eigenschaften wirken sich auch auf den Laserschweißprozess ungünstig aus. Dennoch kann mit geeigneter Prozessführung das Schweißergebnis sicher beherrscht werden [Nied02].

Dem Schweißanwender im Karosserie-Rohbau stehen technisch zwei Lasertypen zur Auswahl. Während früher der CO₂-Laser mit 10.640 nm Wellenlänge zum Einsatz kam, wird heute der Nd:YAG-Festkörperlaser mit der Wellenlänge 1.064 nm wegen seiner Vorteile ausgewählt. Es ist vor allem die Transportfähigkeit über Glasfasern, die flexible robotergeführte 3D-Schweißapplikationen möglich macht. Die kürzere Wellenlänge führt zu einer höheren Absorption der Leistung im metallischen Werkstoff und einer einfacheren Prozessführung bei Aluminium und Stahl.

Voraussetzung für einen Einsatz ist die **Prozessfähigkeit** des Schweißprozesses in Bezug auf die geforderte Nahtqualität. In den letzten Jahren wurde der Laserschweißprozess in zahlreichen Arbeiten untersucht, und mittlerweile können alle bestimmen-

den Phänomene und Prozesseigenschaften erklärt werden. Dazu beigetragen haben theoretische Betrachtungen und rechnerische Simulationen [Hueg92, Daus95, Beck96, Bey95, Rad99], die eng verknüpft mit experimentellen Untersuchungen verifiziert wurden [Rapp96, Schin02, Hohen03, Muel02, Schmi94]. Besonders bedeutsam hierzu war die Entwicklung von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, die es erlauben, sowohl das Geschehen an der Schmelzbadoberfläche im Detail zu verfolgen, als auch von Hochgeschwindigkeits-Röntgenaufnahmen, die Kapillar- und Schmelzbadform in der Tiefe zeigen [Hohen03, Muel02, Mat01, Kata98a, Kat02]. Basierend auf diesen Arbeiten soll nachfolgend der Schweißprozess in seinen wesentlichen Zusammenhängen erläutert werden.

Der Prozess unterteilt sich in mehrere **Teilvorgänge** (Bild 1). Dies sind vor allem die Bildung der Kapillare und des Schmelzbades, die Absorption und Brechung des Laserstrahls in und über der Kapillaren, die Wärmeverteilung und -ableitung im Werkstück, die Strömung des Gases in der Kapillaren und über dem Schmelzbad, die Strömung der Schmelze, das Aufschmelzen und Erstarren des Materials, Deformation und chemische Reaktionen an der Oberfläche der Schmelze und mechanische Spannungen und Verzug im Werkstück. Bild 1 zeigt im Schnitt einen typischen Schweißprozess mit der optionalen Zufuhr von Schutzgas und Zusatzdraht. Die Teilaspekte sind in vielfältiger Weise miteinander gekoppelt und beeinflussen sich gegenseitig [Rad99].

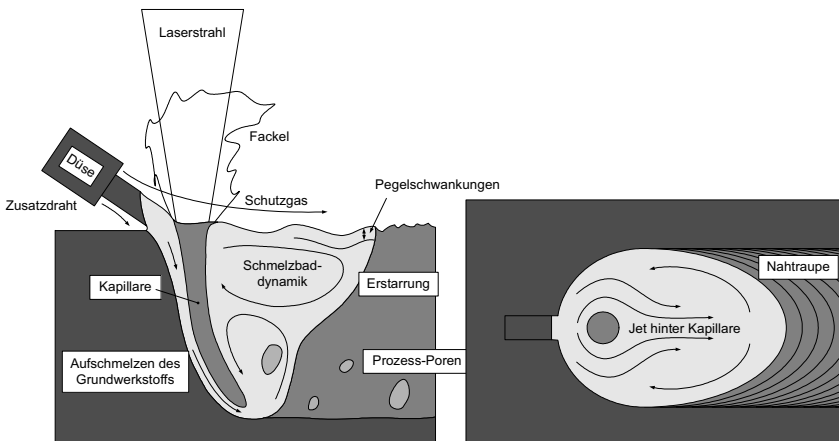


Bild 1: Laserschweißprozess mit einigen Teilvorgängen

Von der Laserstrahlung, die auf das Werkstück trifft, wird nur ein Teil absorbiert. Die **Energieabsorption** hängt generell ab von der Wellenlänge, dem Absorptionsgrad des

Materials für diese Wellenlänge, dem Auftreffwinkel, der Polarisation des Lichtes sowie der Rauigkeit und Temperatur der Oberfläche. Bei geringer Intensität des Laserlichts wird nur wenig absorbiert und der größte Teil reflektiert (Bild 2). Bei genügender Intensität erwärmt sich die Oberfläche, und es bildet sich ein Schmelzbad. Übersteigt die Intensität eine bestimmte Schwelle (Einkoppelschwelle), führt der Verdampfungsdruck an der Auftreffstelle zu einem Verdrängen der Schmelze, und es bildet sich eine Dampfkapillare als Stichloch (Keyhole) aus. Diese ist charakteristisch für den Übergang vom Wärmeleitungs- zum Tiefschweißeffekt. Sie ermöglicht die schlanken und tiefen Nahtquerschnitte. Für den Laserstrahl wirkt sie wie eine Strahlfalle, da nun durch Mehrfachreflexion an den Wänden ein Großteil der Laserleistung absorbiert wird [Daus88, Daus95].

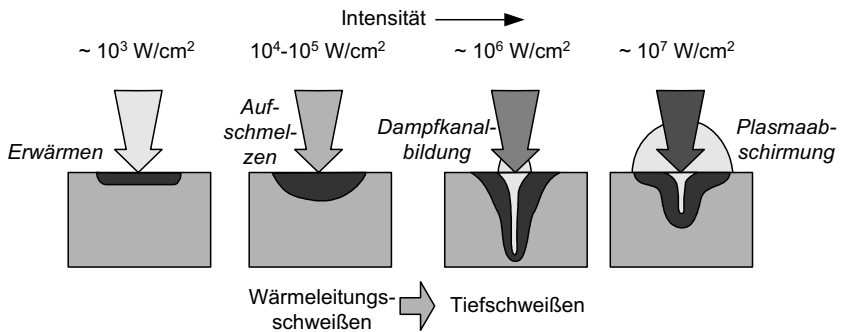


Bild 2: Übergang vom Wärmeleitungs- zum Tiefschweißen [Daus88]

Neben der Absorption an der Schmelzbadoberfläche wird ein Teil der Energie auch von dem sich bildenden **Plasma** in und über der Kapillare absorbiert („Inverse Bremsstrahlung“) und teilweise an die Schmelze übertragen. Von der absorbierten Energie fließt ein Großteil in den Grundwerkstoff ab. Ausgehend von der Laserkapillaren fällt die Temperatur nach außen durch das Schmelzbad in den Grundwerkstoff immer mehr ab. Im Schmelzbad selbst kann durch Wärme Konvektion eine ungleichmäßige Temperaturverteilung herrschen. An den Grenzlinien von Schmelz- und Verdampfungstemperatur erfolgt die Phasenumwandlung des Materials, bei der Energie aufgenommen bzw. freigesetzt wird. Ein geringer Teil der Gesamtenergie geht durch Wärmestrahlung oder abströmendes Plasma verloren. Wenn ein Zusatzdraht verwendet wird, muss auch dieser aufgeschmolzen werden.

Durch den Schweißvorschub bildet sich die **Kapillare** nach hinten geneigt aus. An ihrer Vorderseite fließt die Energie von der Kapillarwand durch den dünnen Schmelz-

film in den Grundwerkstoff. Es hat sich gezeigt, dass besonders der Quotient aus Leistung pro Fokusbereich P_L/d_f für das Erreichen der Einkoppelschwelle bestimmend ist [Gref01].

Auf die Kapillarwand selbst wirken unterschiedliche Kräfte. Der statische Druck im Inneren ist am Kapillargrund am größten und nimmt zur Kapillaröffnung hin ab. Dafür steigt mit der zunehmenden Ausströmgeschwindigkeit der dynamische Druck. Zudem werden hierbei Schubspannungen in der Kapillarwand induziert, die eine antreibende Wirkung auf die Schmelze haben [Rapp96]. Durch Verdampfung des Werkstoffes und den dadurch erzeugten Impuls entsteht ein Rückstoß auf die Wand. Die umgebende Schmelze wirkt sich auf die Kapillare mit verschiedenen Kräften aus. Die **Oberflächenspannung** wächst mit kleinerem Krümmungsradius und ist am Kapillargrund am größten. Weiterhin wirken der hydrostatische und der -dynamische Druck durch die Schmelzbadströmung auf die Kapillare [Beck96].

Die Zufuhr von Schutzgas, wie Helium oder Argon, hat die Abschirmung der Schmelze vor Sauerstoff und Stickstoff zum Zweck. Nach dem Austritt aus der Düse mischt sich das Gas am Rand der Strömung mit der Umgebungsluft. Daher sollte der unvermengte Kern der Gasströmung das Schmelzbad laminar abdecken [Kern99]. Beim CO₂-Laser dient das Gas auch zur Unterdrückung der Plasmabildung über dem Keyhole, was beim Nd:YAG-Laser nicht notwendig ist. Bei dessen Wellenlänge findet keine Absorption in der Fackel durch inverse Bremsstrahlung statt. Daher kann Stahl mit dem Nd:YAG-Laser auch sehr gut ohne Schutzgas geschweißt werden. Beim CO₂-Laser führt die Absorption innerhalb des Plasmas zu deutlich höheren Temperaturen in der Fackel und der Kapillare als beim Nd:YAG-Laser. Da sich mit der Temperatur auch der Brechungsindex verändert, kommt es zu einem thermischen Linseneffekt der Schweißfackel. Die Fokusslage des CO₂-Laserstrahls fluktuiert daher innerhalb des Keyholes [Beck96].

Die Anwesenheit von Wasserstoff, Stickstoff und Öl in der Gasumgebung kann zu Wasserstoffporen und Nitrid-Nadeln in der Schweißnaht führen [Mat95, Kata97, Mat97, Taka01, Mat03]. Dabei spielt auch die Temperatur des Plasmas eine Rolle. Beim Schweißen mit dem CO₂-Laser wird von der Oberfläche der Schmelze mehr Stickstoff absorbiert, weil dieser in dem heißeren Plasma zum Teil als freies Radikal vorliegt [Dong04].

Die **Schmelzbaddynamik** wird wesentlich durch das Impuls- und Kontinuitätsgesetz der Strömungen bestimmt. Das aufgeschmolzene Material des Grundwerkstoffes und eines eventuellen Zusatzdrahtes vor der Kapillare muss unterhalb und an der Seite

zwischen Kapillare und Schmelzbadwand durchfließen. Dabei erreicht die Schmelze sehr hohe Strömungsgeschwindigkeiten und sammelt sich dann im hinteren Teil des Bades. Hier kühlt sie weiter bis zur Erstarrung ab.

Stärker als die Gravitation hat die Oberflächenspannung einen Einfluss auf das Schmelzbad. Eine geringe Oberflächenspannung führt zu einem deutlich unruhigeren Schmelzbad, erkennbar an der Wellenbildung der Oberfläche. Die Spannung steigt mit der Krümmung an der Oberfläche. Es kommt zu einem Kräftegleichgewicht, bei dem die Oberflächenspannung einen Widerstand gegen die Bildung von Tropfen oder Gaseinschlüssen bildet. Sie hängt zudem von der Legierung mit ihren Bestandteilen ab. Leichtverdampfende Elemente, wie Magnesium im Aluminium, oder oberflächenaktive Stoffe, wie Schwefel und Phosphor im Eisen, können sie beeinflussen [Rapp96, Hammer87, Fuhr00]. Die Wellenbildung hängt auch von der Dichte der Schmelze ab [Pro01]. Ebenso geben dynamische Veränderungen der Dampfkapillare einen Impuls auf die Schmelze und verändern den Pegel des Schmelzbades.

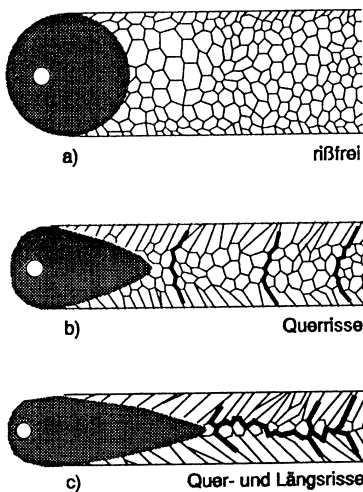


Bild 3: Erstarrung und Kristallbildung der Schweißnaht, Entstehung von Heißrisen

Je nach Verlauf der Temperaturgradienten wachsen bei der **Erstarrung** die Kristallendriten bevorzugt von der Seite oder von unten in das Schmelzbad hinein. Da zudem das Material bei der Erstarrung schrumpft, entstehen Zugspannungen, die bei geringer Nachgiebigkeit des Grundwerkstoffes und Mangel an nachfließender flüssiger Schmelze zu Erstarrungsrisen führen (Bild 3). Zudem kommt es bei bestimmten Aluminiumlegierungen bei der Erstarrung zur Phasentrennung. Wenn dann nicht genügend Material der niedriger schmelzenden Phase im Schmelzbad nachfließen kann, entstehen **Heißrisse** [Rapp96]. Diese können quer oder längs zur Nahtichtung liegen. Man kann dies in der Regel durch die Zufuhr eines geeigneten Zusatzwerkstoffes verhindern. Im Vergleich zu den

langsameren Schmelzschweißverfahren, wie dem MIG-Verfahren, ist die Abkühlgeschwindigkeit jedoch beim Laserstrahlschweißen so groß, dass deutlich kleinere Gefügestrukturen mit besseren Festigkeitseigenschaften entstehen [Wald02].

Beim Erstarren sinkt schlagartig die Löslichkeit für Wasserstoff in Aluminium. Ist zu viel Wasserstoff in der Schmelze gelöst, bilden sich Gasblasen, die von der Erstarrungsfront eingeschlossen werden (**Wasserstoffporen**) [Rapp96].

Grundvoraussetzung einer sicheren Prozessführung ist die **Konstanz und Einstellgenauigkeit** der Laserleistung, der Form, des Durchmessers und der Lage des Fokusses, der Draht- und Gaszufuhr an der Schweißstelle, des Werkstoffes und der Schweißnahtvorbereitung sowie eine geeignete Werkstückspannung. Aber selbst wenn diese Voraussetzungen erfüllt sind, treten **typische Schweißfehler** auf, die nicht auf äußere Störungen zurückzuführen, sondern **Erscheinungen des Prozesses** selbst sind. Die jeweilige Häufigkeit kann vom einzelnen Werkstoff abhängen.

Das so genannte **Humping** tritt bei Stahl bei hohen Schweißgeschwindigkeiten und schlanken Nähten auf (Bild 4) [Schmi94]. Es bilden sich periodisch Tropfen und Auswürfe auf der Schweißnaht sowie Unterscheidungen. Dies wird in [Beck90] auf die sehr hohen Strömungsgeschwindigkeiten der Schmelze um und hinter der Kapillare zurückgeführt.

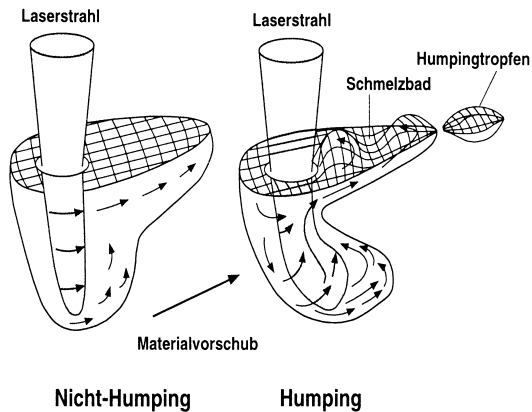


Bild 4: Humping bei Stahl [Schmi94]

Zink, das auf Stahlblechen als Korrosionsschutz aufgebracht ist, verdampft beim Laserschweißen aufgrund der geringen Siedetemperatur bevor der Stahl schmilzt. Befinden sich **Zinkschichten** zwischen den Fügepartnern und besteht keine Möglichkeit für den Zinkdampf, zur Seite zu entweichen, dann strömt dieser durch die Schmelze aus und führt zu einer löchrigen Naht mit geringem Anbindungsquerschnitt und ausgeworfenem Material (Bild 5). Da im Automobilbau üblicherweise nur noch verzinkte Stahlbleche zum Einsatz kommen, ist jede Laserschweißnaht in einer Stahlkarosse hiervon betroffen. Hochgeschwindigkeits-Röntgenaufnahmen haben gezeigt, dass das Zink aus dem Fügespalt vor allem von der Seite in das hintere Schmelzbad strömt und dort auf breiter Front die Schmelze anhebt [Kata98b].

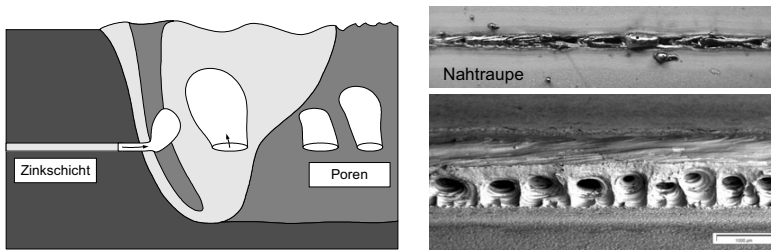


Bild 5: Seitliches Einströmen von Zink in das Schmelzbad, Bruchprobe [Kata98b, Dett02]

Die typischen Schweißfehler bei **Aluminium**, wie Prozessporen, Auswürfe, unruhige Nahtoberraupe und Spritzerbildung, können auf die Dynamik von Kapillare und Schmelzbad zurückgeführt werden. [Rapp96, Hohen03]

Im Gegensatz zu den meist kleinen Wasserstoffporen, die durch den Werkstoff bedingt sind, zeigen sich, besonders bei Legierungen mit einer geringen Oberflächenspannung, deutlich größere **Prozessporen**. Diese können die gesamte Schmelzbadbreite einnehmen. Entsprechende Hochgeschwindigkeits-Röntgenaufnahmen zeigen, dass sich die Kapillare in stochastischer Regelmäßigkeit aufbläht, um sich dann in einigen Fällen selbst abzuschneiden (Bild 6). Es bildet sich eine Gasblase, die dann im erstarrten Gefüge als Prozessspore zurückbleibt. Als Ursache kommen verschiedene Faktoren zusammen. Ein gehemmter Abstrom des Metallampfes, ein großes Schmelzbad und eine verstärkte Leistungsabsorption ermöglichen das Aufblähen der Kapillare. Das Abschnüren wird hervorgerufen bzw. erleichtert durch eine Schmelze mit einer geringen Oberflächenspannung, die dann einem Schmelzeinbruch nicht mehr entgegen-

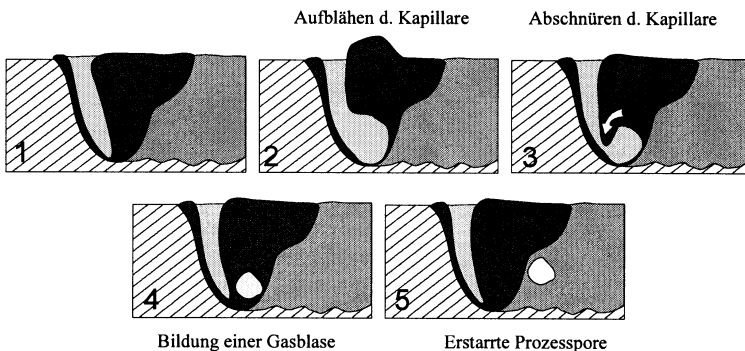


Bild 6: Bildung von Prozessporen [Hohen03]

wirkt. Eine inhomogene Leistungsverteilung in der Kapillare führt zu unterschiedlich hohen Verdampfungsdrücken. In einem Schmelzbad mit niedriger Viskosität werden Strömungen weniger stark gebremst.

Als **Schmelzbadauswürfe** werden plötzliche, explosionsartige Aushebungen der Schmelze und der daraus resultierenden Nahtfehler bezeichnet. Diese können durch Verdampfen von Verunreinigungen oder durch eingeschlossene Gase in Aluminiumdruckguss auftreten. Sie treten aber auch stochastisch beim Tiefschweißen aller Aluminiumlegierungen auf und haben eine prozessbedingte Ursache: Zu Beginn wird die Kapillare im oberen Bereich eingeschnürt (Bild 7). Darunter kollabiert sie und die absorbierte Gesamtleistung sinkt. Wenn dann das Material an der Einschnürung verdampft, wird der darunter liegende Hohlraum wieder geöffnet. Schlagartig steigt die absorbierte Leistung an und führt zu einem Druckanstieg in der Kapillare. Dieser wirft, wenn der Dampf nicht über die Öffnung abströmen kann, die Schmelze aus. In den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen erkennt man am Kapillarrand kurz vor dem Auswurf eine verstärkte Spritzerbildung.

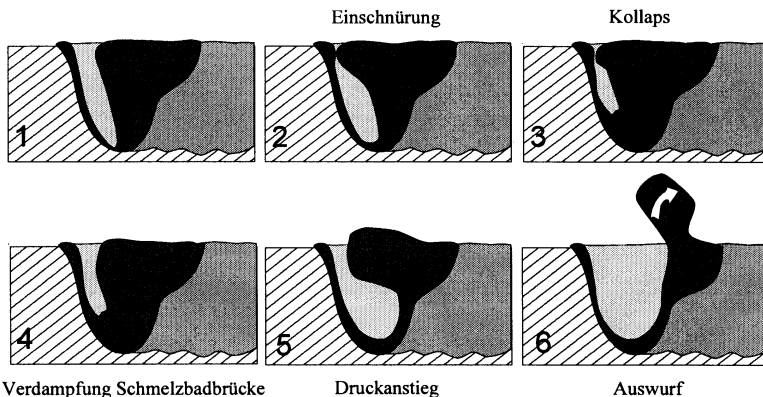


Bild 7: Bildung von Schmelzbadauswürfen [Hohen03]

Neben diesen besonderen Einzelphänomenen findet die Bildung der Nahtschuppung und das Entstehen von Spritzern ständig statt. **Spritzer** entstehen am oberen Rand der Kapillare durch die Reibung des ausströmenden Dampfes oder aus dem Schwappen der dynamischen Schmelze. Die Wellen und Pegelstandsänderungen im Schmelzbad führen zu den **Nahtschuppen** am Ende des Schmelzbades. Ein ruhiges Schmelzbad führt zu einer schwachen Schuppung, während ein häufiges Aufblähen der Kapillare mit Auswürfen und anschließendem Zufließen zu einer unruhigen und starken Schuppung führt.

Zur Steigerung der Prozessstabilität gibt es zum Eingreifen in das Prozessgeschehen eine Reihe verschiedener Ansätze. Es besteht die Möglichkeit, durch die Wahl des **Zusatzwerkstoffes** oder des **Schutzgases** den Prozess zu beeinflussen. Der Grundwerkstoff ist meist durch die Konstruktion vorgegeben. Ein Zusatzmaterial wird neben dem Füllen des Fügspaltes besonders zur Vermeidung der Heißrisse angewandt [Rapp96]. Als Schutzgas hat Helium aufgrund der Kühlwirkung einen beruhigenden Einfluss auf die Schmelze [Schin02]. Oberflächenaktive Gasmischungen können bei Stahl einen Einfluss haben [Brun02]. Jedoch wird man normalerweise im Karosseriebau bei Stahl ganz auf Zusatzgas beim Einsatz von Nd:YAG-Lasern verzichten, da es nicht notwendig ist. Bei Aluminium wird die Wirksamkeit von oberflächenaktiven Stoffen durch die Oxidhaut verhindert, die sich stets hinter der Kapillare auf der Schmelze bildet.

In zahlreichen Arbeiten wurde dem Laserschweißprozess ein schwingendes Verhalten zugeschrieben. Mittels **Modulation der Laserleistung** über mehrere 100 W im Kilohertz-Bereich wurde dann versucht, den Prozess extern anzuregen oder zu dämpfen [Otto97, Klein97]. Obwohl Effekte nachgewiesen werden konnten, hat dies keine Verbreitung gefunden.

Bei der **Zwei- oder Mehrstrahl- bzw. -fokustechnik** werden mehrere Foki nebeneinander angeordnet. Hierzu gibt es zwei Möglichkeiten. Entweder man kombiniert die Strahlen verschiedener Laser in einem Faserstecker oder man teilt die Strahlung eines Lasers über Teilspiegel in der Optik. Neben runden Laserfoki sind auch andere Fokussformen wie Ellipsen oder Ringe möglich. Die Anordnung der Foki kann hintereinander, nebeneinander oder in einer Matrix erfolgen [Rapp96, Hohen03]. Diese Technik ermöglicht es fast porenfreie Nähte prozesssicher herzustellen. Zum einen beruht dieser

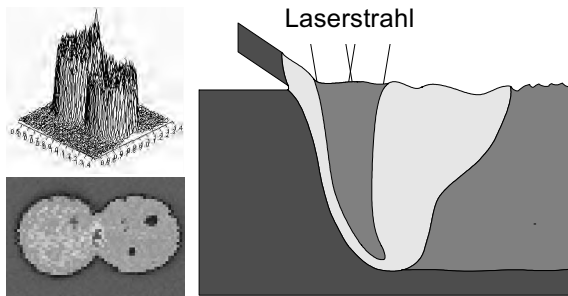


Bild 8: Vergrößern des Keyholes mittels der Mehrstrahltechnik

Effekt auf einer Vergrößerung der Kapillaröffnung und einer Stabilisierung der Kapillarrückwand. Zum anderen reduziert sich die maximale Strömungsgeschwindigkeit, weil das Schmelzbad vergrößert wird. Wenn die Foki nebeneinander angeordnet sind, erhöht sich auch die Spaltüberbrückbarkeit.

Zwei Laser zu kombinieren ist dann interessant, wenn eine erhöhte Schweißgeschwindigkeit aus metallurgischen oder Taktzeitgründen notwendig ist. Ebenso kann die Einschweißtiefe erhöht werden. Der Einsatz zweier Laser bedeutet jedoch auch einen doppelten Investitionsaufwand. Die bislang verfügbaren 4 kW-Nd:YAG-Laser reichen für die Überwindung der Einkoppelschwelle für 2 Foki mit dem Durchmesser von 0,45 mm nicht aus. Wenn 5-6 kW-Laser auf dem Markt verfügbar sind, wird die Möglichkeit, Foki mit mehr als 2,5 kW zu erzeugen, jedoch interessant.

Bei dem **Laser-MIG-Hybridschweißen** überlagern sich zwei Schweißprozesse mit ihren Charakteristiken auf vorteilhafte Weise. Der Laserstrahl sorgt für die nötige Einschweißtiefe und wird von der beim Schutzgasschweißen problematischen Oxidhaut nicht beeinflusst. Die elektrische Energie ermöglicht ein kostengünstiges Abschmelzen des Drahtes und die nötige Nahtbreite. Der Prozess hat eine gute Spaltüberbrückbarkeit und eine hohe Geschwindigkeit bei einer geringen Porenbildung durch Kapillareinschnürung. Hinsichtlich seiner Nahtbreite und seiner Streckenenergie ist er jedoch eher mit dem MIG- oder dem Plasma-Schweißen, als mit dem Laserstrahlschweißen vergleichbar [Nied02, Butt02, Pries02, Stauf02, Trom04].

1.2 Stabilisierung des Prozesses durch elektromagnetische Kräfte

Einen neuen Ansatz das Laserschweißen zu beeinflussen, haben Forschungsarbeiten von KERN gezeigt [Kern99]. Durch Anlegen zusätzlicher magnetischer Felder konnte der Laserschweißprozess eines CO₂-Lasers bei Stahl und Aluminium in verschiedenen Ausprägungen beeinflusst werden. Der Humpingeffect, wie er beim Schweißen mit CO₂-Laserstrahlung von $P_L = 7$ kW und einer Schweißgeschwindigkeit von $v_s = 16$ m/min auftritt, kann durch ein Quermagnetfeld von $B = 0,3$ T je nach Richtung des Feldes entweder verstärkt oder vermieden werden (Bild 9).

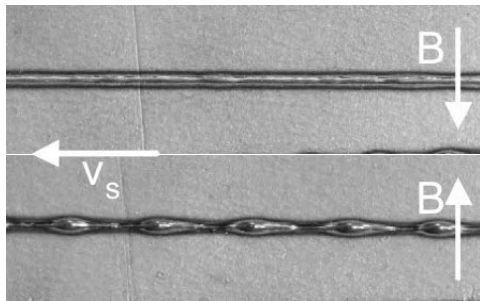


Bild 9: Einfluss der Feldrichtung auf den Humpingeffect bei Stahl CO₂-Laser; $P_L = 7$ kW; $v_s = 16$ m/min; $d_f = 0,3$ mm; $f = 200$ mm; $z_f = 0$ mm; 50 l/min He:Ar; $B = 0,3$ T [Kern99]

Es ist nicht bis ins Detail geklärt, wie dieser Effekt entsteht. Da diese Beeinflussung auch bei dem nicht ferromagnetischen Material Aluminium auftritt, handelt es sich daher nicht um die allgemein bekannte Anziehung unterschiedlicher Magnetpole ferromagnetischer Werkstoffe. Zudem verliert Eisen seine ferromagnetischen Eigenschaften oberhalb der Curietemperatur von nur 770 °C [VAC2]. In der Schmelzzone ist es jedoch um ein Vielfaches heißer. Die Wirkung muss vielmehr auf den Lorentz-Effekt zurückgehen. Dieser besagt, dass auf einen stromdurchflossenen Leiter, der quer zu einem Magnetfeld B verläuft, eine Kraft F wirkt (Bild 10). Mathematisch wird dies durch das Vektorkreuzprodukt (Gleichung 1.1) ausgedrückt, wobei in dieser Schreibweise F die Kraft auf ein Volumenelement und j die Stromdichte ist:

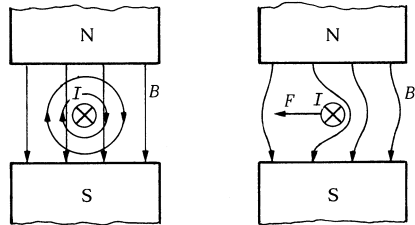


Bild 10: Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld [Hag90]

$$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B}. \quad (1.1)$$

Der Leiter kann in einem Schweißprozess das elektrisch leitfähige Plasma, die flüssige Metallschmelze oder das starre Gefüge sein. In den ersten beiden Fällen können also in

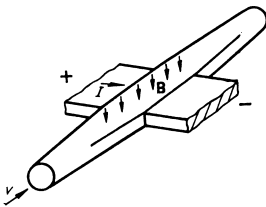


Bild 11: Magnetohydrodynamische Pumpe für flüssiges Metall [Bir86]

(Bild 11).

dem gasförmigen oder flüssigen Material durch die wirkenden elektromagnetischen Kräfte Strömungen erzeugt werden. Diese Verknüpfung der Elektrodynamik mit der Strömungslehre führt in das Fachgebiet der Magnetohydrodynamik (MHD). Eine daraus resultierende Anwendung ist zum Beispiel eine Pumpe für flüssiges Metall, welches durch einen Strom und ein Magnetfeld quer zur gewünschten Richtung gepumpt wird

In der Literatur werden für einzelne Schweißverfahren oder generelle metallurgische Prozesse zahlreiche Beeinflussungsmöglichkeiten durch magnetische Effekte genannt. Diejenigen Effekte, die sich ebenfalls auf ein Schweißplasma oder ein Schmelzbad bei einem anderen Schweißverfahren beziehen, können nur soweit herangezogen werden,

wie dieses Verfahren in seiner Funktionsweise dem Laserstrahlschweißen entspricht. Während bei den gebräuchlichsten anderen Schmelzschweißverfahren die Energie durch einen elektrischen Strom zugeführt wird, sei es als Lichtbogen oder als Elektronenstrahl, hat der Laserstrahl keine elektrische Ladung. Der für eine Wirkung mit dem Magnetfeld notwendige Strom könnte durch eine Bewegung eines Leiters im Magnetfeld induziert werden oder aufgrund anderer physikalischer Effekte im Prozess vorhanden sein.

Sehr viel ausführlicher wurde von KERN eine Reihe von Beobachtungen beschrieben, die in einem Leistungsbereich von 7 kW eines CO₂-Lasers auftraten [Kern99]. Bei Einschweißungen in StE650 trat ab einer Geschwindigkeit von 16 m/min die periodische Prozesserscheinung Humping auf. In dem in Bild 9 vorgestellten Fall konnte mit einem quer zur Schweißrichtung liegenden Magnetfeld von 0,3 T diese Erscheinung unterdrückt werden. Humping trat erst wieder ab einer Geschwindigkeit von

19,5 m/min auf. Dies bedeutet eine Steigerung der Grenzgeschwindigkeit um 20%. Für diese Unterdrückung ist das Vorzeichen des Magnetfeldes entscheidend. Eine Umkehrung des Feldes führte zu einem verstärkten Auftreten. Diese

Richtungsabhängigkeit stellte er bei allen seinen Beobachtungen mit dem CO₂-Laser fest, die im folgenden aufgeführt werden.

In Bild 12 werden Nahtquerschnitte von Einschweißungen der Aluminiumlegierung AA6110 mit 6,8 kW und 12 m/min Schweißgeschwindigkeit gezeigt.

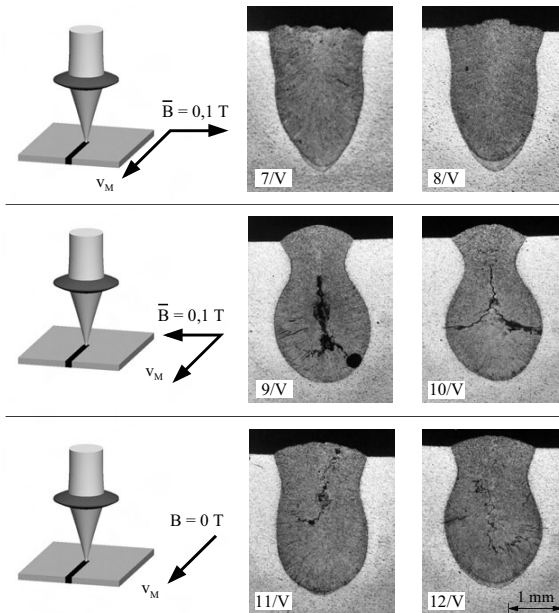


Bild 12: Einfluss auf den Nahtquerschnitt bei Aluminium AA6110; CO₂-Laser; $P_L = 6,8$ kW; $v_M = 12$ m/min; $d_f = 0,3$ mm; $f = 200$ mm; $z_f = 0$ mm; 30 l/min He/Ar; $B = 0,1$ T [Kern99]

Die Querschliffe zeigen die Auswirkung des Magnetfeldes auf die Nahtquerschnitte. Die unbeeinflusste Naht zeigt eine leichte Amphorenform (unten). Diese wird in einem Fall durch das Magnetfeld verstärkt (Mitte). Im anderen Fall hat der Nahtquerschnitt eine keilförmige Form (oben). Erkennbare Unterschiede in der Gefügestruktur führt KERN auf die veränderte Nahtgeometrie und Temperaturgradienten zurück. Zudem konnte er eine Veränderung in der Schuppung der Nahtraupe, der Spritzerbildung und in der Unruhe der Plasmafackel feststellen.

Aufgrund der Richtungsabhängigkeit der Ergebnisse schließt KERN auf einen Strom, der im Inneren des Schweißprozesses stets entgegengesetzt zu der Schweißrichtung fließt und dadurch mit dem externen Magnetfeld eine Kraftwirkung auf das Schmelzbad erzeugen kann (Bild 13). Die gezeigte Vorzugsrichtung stimmt auch mit der Anordnung von TSE [Tse98] überein.

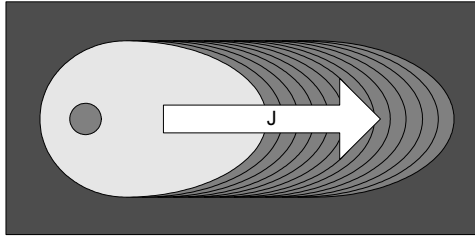


Bild 13: Von KERN postulierter Strom im Schweißprozess [Kern99]

KERN hat zudem untersucht, ob sich ein Magnetfeld auf das Schweißen von Aluminium mit Nd:YAG-Laserstrahlung mit bis zu 2,8 kW auswirkt. Weder bei Versuchen mit annähernd gleicher Schweißgeschwindigkeit wie bei den CO₂-Laser-Versuchen, noch bei Versuchen mit gleicher Streckenenergie, konnte er eine Veränderung der Oberrauten oder eine eindeutige Änderung der Nahtquerschnitte feststellen.

Obwohl sich bei KERN keine Effekte beim Schweißen mit einem Dauerstrich-Nd:YAG-Laser zeigten, gibt es dennoch einen Hinweis, dass auch bei dieser Wellenlänge ein Effekt möglich ist. Bei dem Versuch, eine handelsübliche Magnetspannplatte zum Fixieren von Stahlblechen zum Laserschweißen zu verwenden, zeigte sich bei einem gepulsten Nd:YAG-Laser (1,8 kW mittlere Leistung) eine Ablenkung der Schweißfackel [Beth00].

Zur Erklärung der von KERN beim Laserstrahlschweißen entdeckten Phänomene kann nur begrenzt auf die bekannten Effekte zurückgegriffen werden. Interessant ist vor allem die Frage, wie sich die verschiedenen Teilvorgänge des Laserstrahlschweißens Energieabsorption, Plasma, Schmelze und Erstarrung unter dem Einfluss der magnetischen Felder verhalten.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der neue Ansatz, den Laserschweißprozess mit Magnetismus zu beeinflussen, ist bislang kaum untersucht worden. Es sind nur erste Ansätze zum Verständnis des Effektes vorhanden. Anders als bei der Zweistrahlschweißtechnik und der Hybridtechnik, kommt man hier ohne zusätzliche Energieeinbringung aus. Mit geringem Zusatzaufwand kann man direkt in den Laserschweißprozess eingreifen und diesen gezielt stabilisieren.

Nach der Zusammenfassung der bisherigen Erkenntnisse und einer kurzen Einführung in die Mechanismen der Magnetohydrodynamik werden zunächst die Auswirkungen eines Magnetfeldes auf die Teilvorgänge Plasma/Metалldampf und Schmelze in Kapitel 2 näher diskutiert. Im Weiteren wird die Frage nach der Ursache des prozesseigenen Stroms näher beleuchtet, um zu verstehen, wie und wo er eine Wirkung erzeugen kann. Nach der Zusammenfassung der Erkenntnisse und Formulierung der Aufgabenstellung in Kapitel 3, soll in Kapitel 4 der Effekt nachvollzogen und durch weitere Experimente näher untersucht werden.

In der vorliegenden Arbeit soll der Frage nachgegangen werden, wie sich dieser Effekt nutzen lässt, um den Prozess zu stabilisieren oder neue Anwendungsmöglichkeiten zu eröffnen. Dies soll vor allem am Werkstoff Aluminium untersucht werden, da hier der Prozess unruhiger ist und somit eine Verbesserung ein höheres Potential bietet und deshalb von größerem Gewicht ist. Wird beim Schweißen von Aluminium ein Zusatzdraht verwendet, kann mit geringem Aufwand ein Strom eingeleitet werden. In Kapitel 5 der Arbeit sollen vielfältige Kombinationsmöglichkeiten von Prozess, Strom und Magnetfeld auf nutzbare oder hinsichtlich des Prozessverständnisses interessante Effekte hin untersucht werden.

Eine Voraussetzung für die praktische Nutzung eines magnetischen Effektes ist die einer technischen funktionierenden und wirtschaftlichen Erzeugung des Magnetfeldes. Für ein besseres Verständnis der Magnettechnik werden einige der Grundlagen im Anhang vorgestellt.

Diese Arbeit ist innerhalb eines gemeinsamen Projektes des Instituts für Strahlwerkzeuge an der Universität Stuttgart mit der DaimlerChrysler AG, Geschäftsbereich PKW, und der DASA mit den Geschäftsbereichen Airbus und Militärflugzeuge entstanden. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den Werkstoffen des Karosseriebaus, der Anwendung des Nd-YAG-Lasers und dem Einsatz einer zusätzlichen externen Stromquelle.

2 Klärung des physikalischen Hintergrundes

Nach der Recherche zur Beeinflussung des Laserschweißens durch Magnetismus sollen zunächst die zwei wesentlichen Teilphänomene des Laserstrahlschweißens, das Plasma und die Schmelze, hinsichtlich der Auswirkungen eines Magnetfeldes diskutiert werden. Zuletzt wird der Ursache des thermoelektrischen Stroms nachgegangen.

2.1 Beeinflussen des Laserstrahlschweißens durch magnetische Felder

Während es sehr ausführliche Literatur über eine magnetische Beeinflussung beim Schweißen im Allgemeinen gibt, beschreiben nur wenige Autoren den Einfluss auf das Laserstrahlschweißen. Nachstehend seien die wesentlichen Aussagen aus diesen Arbeiten ohne Kommentar kurz wiedergegeben.

Schon 1996 fiel LIU beim Schweißen von 4 mm dicken Stahlblechen mit dem CO₂-Laser eine unregelmäßig auftretende Vergrößerung der Einschweißtiefe auf, wenn ein zum Blech normales Magnetfeld mit der Stärke 10,3 mT vorhanden ist [Liu96]. Als Grund wurde eine Verdünnung der Elektronendichte des Laserplasmas durch das Magnetfeld vermutet, welche die Plasmaabschirmung und die Defokussierung des Laserstrahls reduziert und so die direkte Energieeinkopplung im Werkstück erhöht.

Ein ähnlicher Effekt wurde auch von TSE beobachtet und beschrieben [Tse98, Tse99]. Er stellte zunächst im Falle einer Schweißgeschwindigkeit von 0,7 m/min bei einem CO₂-Laser mit 1,5 kW Leistung und einem Querfeld von 20 mT fest, dass sich die Einschweißtiefe um 7% erhöht. Bei einem stärkeren Feld fällt dieser Wert wieder ab. TSE ging auch hier von einer Möglichkeit zur Kontrolle des Plasmas und damit der Energieabsorption aus. Durch die Hinzunahme eines elektrischen Feldes zu dem magnetischen Feld kann die Einschweißtiefe um insgesamt 13% gesteigert werden. Die Richtung des Magnetfeldes spielt nur eine geringe Rolle [Tse99].

Eine zwischen Schutzgasdüse und Werkstück angelegte Spannung erzeugt nach [Peng01, Zhang03] ein elektrisches Feld, welches die Ladungsteilchen über dem Keyhole axial beschleunigt. Die gesteigerte Leistungseffizienz wurde hier nur indirekt an-

hand der vergrößerten Fokusagentoleranz zur Erzeugung eines Tiefschweißeffektes gezeigt. Bei 25 V war diese am größten.

In [Thom05] wird gezeigt, dass beim Schweißen von Aluminium mit einem 5 kW-CO₂-Laser mittels Wechselfeldern von 12 Hz und 60 mT die Vermischung von Aluminium mit Kupfer im unteren Teil des Schmelzbades erhöht werden kann.

Auch einige Patente zeigen mögliche Ansätze zur Beeinflussung des Plasmas in Bezug auf das Laserschweißen. Mit axialen Magnetspulen um den Laserstrahl soll durch die zum Laserstrahl parallelen Feldlinien das Plasma verdünnt, abgelenkt [Jur87] oder im Keyhole konzentriert werden [Hit88]. In [Hit92] soll das Plasma über einen magnetischen Pol in der Nähe der Schweißung abgelenkt werden. In [Ich84] und [Kin95] sollen durch Dauermagnete statische Quermagnetfelder erzeugt werden, welche das Plasma entfernen und somit den Laserstrahl beeinflussen.

Andere Patente beschreiben Ansätze zur Beeinflussung der Schmelze: In [Sei78] verhindert ein magnetisches Feld einen zu hohen Wurzeldurchhang. In [Tsu85] soll über einen Gleichstrom im Draht und Wechselmagnetfelder das Schmelzbad gerührt werden. In [Fed94] erzeugen je ein Magnet, der wie die Statorspule eines Elektromotors gebaut ist, oberhalb und unterhalb des Bleches ein rotierendes Magnetfeld. Dieses soll die Schmelze in Rotation versetzen und unter Einfluss der Zentrifugalkraft die Kapillare erweitern. Die Einschweißtiefe soll sich erhöhen.

Die magnetische Lichtbogenablenkung, die in Zusammenhang mit Schutzgasschweißverfahren genannt wird [Dil72, Hick66, Schel85, Raz95], beruht zwar ebenfalls auf dem Lorentz-Effekt und ermöglicht eine gezielte Steuerung eines Schweißlichtbogens, sei es als seitliches Pendeln oder Rotieren entlang von Rohrflanschen. Sie ist aber nicht direkt auf das Laserstrahlschweißen anwendbar, denn es gibt hierbei keinen leicht beweglichen Lichtbogen. Lediglich sekundäre Auswirkungen, wie die Gefügebildung, könnten von Interesse sein.

Ebenso wird oft die Kombination der induktiven Erwärmung mit dem Laserstrahlschweißen genannt. Ähnlich dem induktiven Härten werden hierbei über hochfrequente Magnetfelder Wirbelströme im Bauteil induziert. Diese erzeugen einen Vorwärmeffekt beim Schweißen [Bren01, Bren02, Wind02], was bei schwer schweißbaren Legierungen notwendig sein kann [Dil95]. Auch dieser Effekt soll hier nicht von Interesse sein, da es sich um keine Besonderheit des Laserstrahlschweißens handelt.

Andere Methoden beziehen sich gar nicht auf den Schweißprozess selbst, sondern nur auf Randbedingungen. Als Beispiel sei hier die magnetische Fixierung von pulverför-

migem Schweißzusatzmaterial im Fügespalt genannt [Hiro80] oder das Auffangen der Schweißspritzer, um deren Anhaften am Bauteil zu verhindern [Kau88].

Ein Hinweis auf die Beeinflussung der Schmelze findet sich in einer Untersuchung zum Einsatz des „Magnetofforming“ zum Zwecke einer mitlaufenden Spanntechnik beim Laserstrahlschweißen [Dom93]. Dabei werden über Stoßmagnetfelder starke Ströme im Bauteil erzeugt, die ein Gegenmagnetfeld zu der erregenden Spule aufbauen. Dieses Gegenfeld führt dann zu einem Zusammenpressen der Bauteile innerhalb der Spule. Zwar wurden die Bleche leicht deformiert, aber gleichzeitig wurde die Schmelze in viel stärkerem Maße durch die wirkenden Kräfte aus dem Bad herausgeschleudert.

2.2 Mögliche Effekte auf das Plasma

2.2.1 Erzeugung und Eigenschaften von Plasma

Neben den Aggregatzuständen „fest“, „flüssig“ und „gasförmig“ wird das Plasma als vierter Zustand bezeichnet. Es entsteht, wenn ein Gas durch thermische, elektrische oder strahlungsbedingte Anregung in einem merklichen Grad ionisiert wird. Neben den neutralen Teilchen besteht es dann aus freien negativen Elektronen, positiven Ionen und in Sonderfällen auch aus negativen Ionen. Diese fliegen ähnlich einem idealen Gas frei und statistisch regellos durcheinander. Die Teilchen wechselwirken bei Stößen aufgrund von elektrischen und magnetischen Feldern oder durch Aussenden und Absorbieren von Strahlung miteinander. Der Übergang von Gas zu Plasma ist bei thermischer Anregung kontinuierlich, während bei elektrischer Anregung oder Strahlungseinfall ab einer gewissen Schwelle eine Kettenreaktion einsetzt. Die erhitzten und beschleunigten Elektronen ionisieren dann andere Teilchen, wodurch die Leitfähigkeit bzw. die Absorption des Plasmas erhöht und somit mehr Energie dem Plasma zugeführt wird. Das Plasma „zündet“. Für einen stationären Zustand eines Plasmas muss ständig Energie zugeführt werden, denn die im Plasma umgesetzte Energie wird durch Strahlung, Konvektion, Diffusion oder Wärmeleitung verringert [Schell00]. Durch Einwirkung „treibender Kräfte“, z.B. eines elektrischen Feldes, werden die freien Ladungsträger gerichtet beschleunigt, und es kann zu einem Stromtransport kommen.

Man unterscheidet Niederdruck- und Hochdruckplasmen. Bei niedrigen Drücken können die Elektronen aufgrund seltener Stöße ihre kinetische Energie nicht vollständig an die Ionen und neutralen Teilchen übergeben. Es herrschen unterschiedliche Tempe-

raturen der Teilchen vor. Steigt der Druck, treffen die Elektronen häufiger auf die schweren Teilchen, und der Temperatúrausgleich erfolgt [Mier74]. Es kann sich auch bei starker räumlicher Begrenzung eines Schweißplasmas ein lokales thermodynamisches Gleichgewicht LTE (*l*ocal *t*hermodynamic *e*quilibrium) einstellen [Schell00].

Trifft ein Laserstrahl beim Schweißen auf die Metalloberfläche, schmilzt und verdampft das Metall, und der Dampf mischt sich mit der Umgebungsatmosphäre bzw. mit einem eventuell vorhandenen Schutzgas. Sind genügend freie Elektronen (z.B. aufgrund thermischer Ionisation im Metaldampf) vorhanden, können diese durch die inverse Bremsstrahlung einen Teil der Strahlung absorbieren. Die inverse Bremsstrahlung wird in [Schitt00] als Dreierstoß zwischen einem Photon, einem Elektron und einem Ion beschrieben. Dabei dient das Ion als Stoßpartner zur Impulserhaltung. Das freie Elektron wird durch das Photon in Gegenwart des Atoms beschleunigt (Umkehrung des Bremsstrahlungsprinzips) und kann die dabei gewonnene Energie durch Stöße weitergeben. Dabei werden nicht nur die schweren Teilchen erhitzt, sondern es können auch lawinenartig weitere freie Elektronen entstehen. Das Plasma heizt sich weiter auf. Mit der Temperatur steigt wiederum die Anzahl freier Elektronen.

Die Absorption durch die inverse Bremsstrahlung hängt von der Wellenlänge der einfallenden Strahlung ab. Infrarotes Licht wird überproportional stärker absorbiert als kurzwelligeres ultraviolettes Licht [Schitt00]. Die Wechselwirkung von Licht und Plasma wird durch den Absorptionsgrad α und den Brechungsindex n beschrieben. Um später den Einfluss von magnetischen Feldern diskutieren zu können, sollen beide Größen zunächst erläutert werden.

Der Absorptionsgrad α für Licht einer bestimmten Wellenlänge λ bzw. der Frequenz ω hängt ab von der Plasmafrequenz ω_p und der Elektronenstoßfrequenz ν_c . Die Abhängigkeit wurde in [Schell00] für die auftretenden Elektronendichten $N_e < 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ näherungsweise vereinfacht zu:

$$\alpha \approx \frac{\nu_c}{c} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_c^2}. \quad (2.1)$$

Die Plasmafrequenz ω_p ergibt sich aus den kollektiven Schwingungen der leichten negativen Elektronen um die schweren positiven Ionen. Sie stellt die untere Grenze der Durchlässigkeit für die Frequenz der elektromagnetischen Wellen dar; je dichter ein Plasma ist, desto kürzer muss die Wellenlänge des Lichts sein, um das Plasma noch zu durchdringen [Mier74]:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 N_e}{m_e \epsilon_0}}. \quad (2.2)$$

Die Elektronenstoßfrequenz ν_c setzt sich aus der Stoßfrequenz der Elektronen mit den neutralen Teilchen ν_{cg} und der Stoßfrequenz der Elektronen mit den Ionen $\nu_{Z,g}$ zusammen. Dabei bezeichnen der Index g die Art der Teilchen und der Index Z ihre jeweilige Ionisationsstufe Z . Diese Stoßfrequenzen, und damit auch der Absorptionsgrad α , hängen letztlich von der Frequenz des Lichtes ω , der Temperatur T und der Elektronendichte N_e des Plasmas ab [Schell00].

$$\nu_c = \sum_g \left(\nu_{cg} + \sum_Z \nu_{Z,g} \right). \quad (2.3)$$

Der zweite wichtige Wechselwirkungsmechanismus ist die Brechung des einfallenden Laserlichts durch das Plasma. Der Brechungsindex n hängt, wie der Absorptionskoeffizient, ebenso von den Stoßfrequenzen, der Plasmafrequenz und damit letztlich von der Lichtfrequenz, der Temperatur und der Elektronendichte des Plasmas ab. Die vereinfachte Gleichung nach [Schell00] lautet:

$$n - 1 \approx -\frac{1}{2} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_c^2}. \quad (2.4)$$

Eine Zusammenfassung zahlreicher Veröffentlichungen zur Temperatur des Plasmas und der Elektronendichte beim Schweißen von Metallen findet sich in [Dul99]. Beim Einsatz des CO₂-Lasers liegen die Temperaturen bei 5.200 - 13.000 K und die Elektronendichten bei $2 \cdot 10^{16}$ - $2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Die aufgeführte Schweißung einer Aluminiumlegierung mit dem Nd:YAG-Laser zeigt eine Temperatur von nur 3.280 K und eine Elektronendichte von $1,3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. In einer neueren Untersuchung [Schell00] wurden die Temperaturen des Plasmas für den CO₂- und den Nd:YAG-Laser für verschiedene Werkstoffe und Schutzgase beim Schweißen experimentell ermittelt und daraus die Elektronendichten berechnet (Tabelle 2.1).

Beim Schweißen von Eisen oder Stahl mit dem CO₂-Laser liegt, unabhängig vom Schutzgas, eine Temperatur von 8.000 - 9.000 K vor. Deutlich höher sind die Temperaturen beim Schweißen von Aluminium. Während bei Argon als Schutzgas Temperaturen von 20.000 K vorliegen, reduziert sich die Temperatur bei Helium durch dessen Kühlwirkung auf 18.500 K. Bei Helium ist, aufgrund der niedrigeren Temperatur und der fast doppelt so hohen Ionisationsenergie, auch die Elektronendichte deutlich geringer. Aus diesen Werten wurden die Absorptionskoeffizienten für das CO₂-

Laserlicht in der Plasmawolke berechnet. Bei einer Verdünnung mit Schutzgas sind diese so klein, dass die Absorption über der Kapillare beim Schweißen von Aluminium und Eisen vernachlässigt werden kann [Schell00].

Die Plasmawolke oberhalb des Werkstücks beeinflusst das Schweißergebnis vor allem durch die Brechung des Lichts. Das Temperaturprofil der Fackel bildet über die räumliche Brechungszahlvariation einen Linseneffekt. Dieser führt zu einer Aufweitung, einer Verzerrung oder einer seitlichen Ablenkung des Fokus. Die hohe Dynamik der Fackel wirkt sich auf diese Weise negativ auf die Prozessstabilität aus. Eine Mischung des Schutzgases aus Helium und Argon im Verhältnis 3:1 minimiert bei Eisen die Abhängigkeit des Brechungsindex von der Plasmatemperatur und stabilisiert so den Prozess [Beck96, Schitt00].

| Lasertyp | Leistung kW | Leistungs- dichte 10^6 W/cm^2 | Plasma- temperatur 10^3 K | Elektronen- dichte N_e 10^{16} cm^{-3} | Material | Schutz- gas |
|-----------------|----------------|---|---|--|----------|----------------|
| CO ₂ | 4 | 4 - 6 | 18,5 | 3 | Al | He |
| CO ₂ | 4 | 4 - 6 | 20 | 7-8 | Al | Ar |
| CO ₂ | 4 | 4 - 6 | 8 - 9 | 6 | Fe | He |
| CO ₂ | 4 | 4 - 6 | 8 - 9 | 10 | Fe | Ar |
| Nd:YAG | 3 | 3,3 | 5 | < 1 | Al | - |
| Nd:YAG | 3 | 3,3 | 4 | < 1 | Fe | Ar |

Tabelle 2.1: Plasmatemperaturen und Elektronendichten [Schell00]

Beim Nd:YAG Laser sind die Temperaturen und die Elektronendichten deutlich geringer. Während beim Schweißen von Aluminium Temperaturen von 5.000 K herrschen, sind es bei Eisen nur 4.000 K. Die Absorption ist vernachlässigbar und auch die durch die Linsenwirkung bedingte Strahlaufweitung liegt unter 2% [Schell00]. Damit kann beim Nd:YAG-Laser nicht von einer Beeinflussung durch das Plasma in der Kapillare gesprochen werden.

Allerdings kann es bei Schweißprozessen mit gepulsten Nd:YAG-Lasern durch die größeren Intensitäten, besonders am Pulsbeginn, auch zu deutlich höheren Temperaturen und Elektronendichten kommen. Beim Schweißen von Edelstahl und Eisen ohne Schutzgas bei Pulsen von 1,5 bis 5 ms Dauer und einer mittleren Leistung von 500 W wurden Elektronendichten zwischen $3,5 \cdot 10^{16}$ und $6,5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ gemessen. Die

maximale Temperatur lag bei 7.150 K [Schell00, Lac97]. Damit lagen die Werte bei Stahl bei einem gepulsten Nd:YAG-Laser in dem gleichen Bereich wie bei einem CO₂-Laser.

Wenn die Dichte der geladenen Teilchen klein ist, können Elektronen und Ionen unabhängig voneinander diffundieren (freie Diffusion). Die Elektronen sind schneller und können die langsameren Ionen zurücklassen. Bei hohen Dichten bildet sich durch diese Ladungstrennung ein elektrisches Feld und damit eine Anziehung zwischen den beiden aus, die die Elektronen zurückhält und die schweren Ionen nachzieht. Sie können nur noch gemeinsam diffundieren (ambipolare Diffusion) [Rai91]. Die Art der Diffusion ergibt sich aus der Debyeschen Länge L_D im Vergleich zu den Abmessungen des Prozesses L :

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T}{2 e^2 N_e}} \quad (2.5)$$

$$L_D < L \text{ (ambipolare Diffusion)} \quad (2.6)$$

$$L_D > L \text{ (freie Diffusion)} . \quad (2.7)$$

Im letzteren Fall spricht man nicht von einem Plasma, sondern nur von einer Ansammlung geladener Teilchen. Eine kurze Länge L_D entsteht durch hohe Elektronendichten und geringe Temperaturen. Sie bedeutet einen starken Potentialabfall zwischen den Ladungsträgern und damit eine starke gegenseitige Anziehung [Mier74].

In den Fällen von Tabelle 2.1 liegen die Werte für L_D im Bereich von $1,4 \cdot 10^{-5}$ m bis $3,8 \cdot 10^{-5}$ m. Da diese Werte deutlich kleiner als die Abmessungen des Schweißprozesses ist, liegt hier ein Plasma und ambipolare Diffusion vor.

2.2.2 Beeinflussung eines Plasmas durch Magnetfelder

Da das Plasma aus freien elektrisch geladenen Teilchen besteht, können diese mit einem magnetischen Feld wechselwirken. Wird ein externes Magnetfeld angelegt, stellt sich die Frage, welche der theoretisch möglichen Effekte sich in einer erkennbaren Beeinflussung des Schweißergebnisses niederschlagen können. Es werden dabei Effekte oberhalb und innerhalb des Werkstückes betrachtet.

KERN hat das Plasma über dem Keyhole auf eine mögliche Veränderung durch ein Magnetfeld experimentell untersucht. Ein zusätzlich seitlich eingestrahelter He-Ne-

Laser wurde durch eine Änderung der Brechungseigenschaften in seiner Ablenkung beeinflusst. Es wurden bis zu einer Feldstärke von 50 mT keine Veränderung der normalen Fluktuationen festgestellt [Kern99]. Dies schließt aber Effekte innerhalb der Kapillare nicht aus. Von KERN wurde zudem die Möglichkeit einer Wirbelstrombremse im Plasma (Hartmanneffekt) und einer Laminarisierung der Plasmaströmung (siehe Kapitel 2.3) abgeschätzt. Er kommt aber zu Werten der entsprechenden Kennzahl, die diesen Schluss nicht zulassen [Kern99].

2.2.2.1 Betrachtung von Einzelteilchen

Bezogen auf einzelne Ladungsträger des Plasmas mit der Ladung q und der Geschwindigkeit v gilt für das Kreuzprodukt der Lorentz-Kraft F (Bild 14):

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}). \quad (2.8)$$

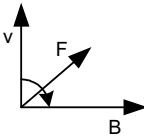


Bild 14: Beschleunigung von positiven Ladungsträgern in magnetischen Feldern [Mier74]

In einem homogenen magnetischen Feld werden die Teilchen durch die Lorentz-Kraft auf Kreisbahnen ohne Energieaufnahme beschleunigt (Bild 15 links). Der Radius der Flugbahn eines geladenen Teilchens (A) wird mit zunehmender Feldstärke immer kleiner: (1), (2) und (3). Der Radius der Bahn wird Larmorradius R_L genannt und hängt von der Masse m , der Ladung q , der Feldstärke B und von der zur Feldrichtung rechtwinkligen Geschwindigkeit v_r ab.

Eine zum Magnetfeld parallele Geschwindigkeitskomponente der Flugbahn führt dann zu einer Schraubenlinie (Bild 15 rechts). Die Frequenz der Kreisumläufe hängt bei gegebener Ladung und Masse nur von der Feldstärke ab und wird Gyro- oder Zyklotronfrequenz ω_m genannt.

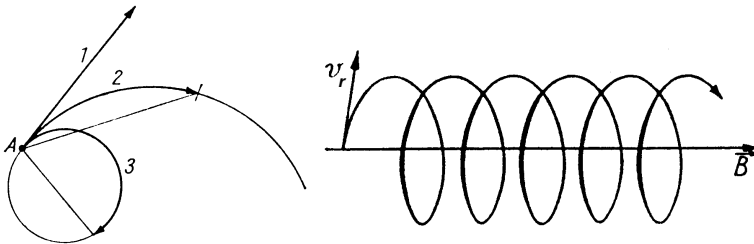


Bild 15: Beschleunigung von Ladungsträgern in magnetischen Feldern [Mier74]

$$R_L = \frac{mv_r}{qB} \quad (2.9)$$

$$\omega_m = \frac{qB}{m}. \quad (2.10)$$

Beide Werte unterscheiden sich für Ionen und Elektronen aufgrund der unterschiedlichen Werte für q/m erheblich. Die Gyrofrequenz für Elektronen ist rund $4,9 \cdot 10^4$ mal größer als die eines einfach geladenen Aluminiumions ($Z=1$). Der Larmorradius, welcher sich bei gleicher Temperatur wie die Quadratwurzel der Massen verhält (siehe Gleichung 2.8), ist für Elektronen 221 mal kleiner als für die einfach geladenen Aluminiumionen. Aus diesem Grund kann auch hier, wie in den meisten Fällen, die Wirkung auf die Ionen vernachlässigt werden. Nachfolgend soll nur noch auf die Elektronen als Ladungsträger eingegangen werden. Deren mittlere thermische Geschwindigkeit v berechnet sich zu [Mier74]:

$$v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_e}}. \quad (2.11)$$

Das rotierende Elektron erzeugt zu dem äußeren Feld B ein Gegenfeld B_i . Das Verhältnis von beiden zueinander ergibt als Kennziffer die magnetische Reynoldszahl R_m . Man spricht auch vom Diamagnetismus des Plasmas (siehe Anhang A.1). Ist $R_m \ll 1$, so wird das externe Magnetfeld durch die Plasmabewegung kaum beeinflusst. Bei $R_m \gg 1$ ist die Wechselwirkung so stark, dass die Feldlinien in der Plasmaströmung mitgeführt werden („eingefrorenes“ Feld), wie es z.B. in der Sonne geschieht [Bir86]:

$$R_m = \frac{B_i}{B} = \frac{\mu_0 q^3 B}{4\pi m_e^2 v_r}. \quad (2.12)$$

Für die in Tabelle 2.1 genannten Fälle ergibt sich R_m bei einer externen Feldstärke von 0,3 T in der Größenordnung von $10^{-10} \ll 1$. Somit kommt die Vielzahl kosmischer MHD-Effekte nicht in Betracht. Nachfolgend sollen nur diejenigen Effekte weiter untersucht werden, die unter Versuchs- und Praxisbedingungen auftreten können.

Beeinflussung durch den magnetischen Druck

Um ein Plasma von einer Wand fernzuhalten, wird der Effekt der „magnetischen Flasche“ genutzt. Die Trägerbahnen „wickeln“ sich um die magnetischen Feldlinien herum und werden dadurch von ihnen geführt. Wenn das Magnetfeld nicht homogen ist, es also einen Gradienten in der Feldstärke gibt, werden die Larmorkreise deformiert.

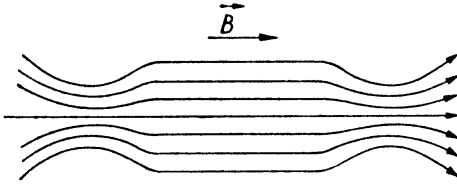


Bild 16: Magnetfeldverlauf einer „magnetischen Flasche“ [Mier74]

Auf der Seite des stärkeren Feldes ist die Ablenkung größer und der Radius wird kleiner. Die sich verengenden Feldlinien zwingen die sich heranschraubenden Teilchen zur Umkehr. Dadurch entsteht ein magnetischer Druck p_B [And90, Mier74]:

$$p_B = \frac{B^2}{2\mu_0}. \quad (2.13)$$

Im Fall einer Feldstärke von $B = 0,3 \text{ T}$ beträgt dieser $p_B = 3,6 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ normal zu den Feldlinien. Dieser ist damit von der gleichen Größenordnung wie der von BECK berechnete Druck am Kapillargrund von $3,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ [Beck96].

Die magnetische Druckzahl R_B setzt als Kennziffer den magnetischen zum dynamischen Druck in Bezug [And90]: Dabei ist ρ die Dichte des Plasmas.

$$R_B = \frac{B^2}{\rho v_{fl}^2 \mu_0}. \quad (2.14)$$

In [Beck96] wurden für die Temperaturbereiche aus Tabelle 2.1 Dichten für Al- und Fe-Plasmen in der Größenordnung von 10^{-1} bis 10^{-2} kg/m^3 errechnet. Die Geschwindigkeit des aus der Kapillare strömenden Plasmas v_{fl} wird mit 50-180 m/s für Eisen angegeben. Demzufolge ergeben sich Werte in der Größenordnung von $R_B = 20$ bis 2.800 bei einer Feldstärke von 0,3 T. Damit kann die Strömung des Plasmas im Laserschweißprozess durch das Magnetfeld beeinflusst werden. Je nach Verlauf und Gradient eines externen Magnetfeldes könnte das Plasma in die Kapillare gedrängt oder seitlich abgelenkt werden. Auch wäre eine veränderte Druckverteilung in der Kapillare möglich, mit Auswirkungen auf die Kapillarform, die Absorption oder die Strömungen im Schmelzbad.

2.2.2.2 Integrale Betrachtung

Ein weiteres Phänomen könnte eine im Plasma erzeugte Ladungsdrift sein, die sich dann z.B. durch die Schmelze entlädt. Ob dies möglich ist, soll nachfolgend anhand der verschiedenen Terme, die im verallgemeinerten Ohmschen Gesetz enthalten sind, untersucht werden. Neben der elektrischen Feldstärke E und dem Term für die induzierte elektrische Spannung $\vec{v} \times \vec{B}$ ist dies der so genannte Hallterm [And90]. Hinzu kommt der Term für einen Stromfluss aufgrund unterschiedlich hoher Ladungsdichten im Raum [Chen74, Lan84, Rai91]:

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) - \frac{\omega_m}{\nu_c B} (\vec{j} \times \vec{B}) + \sigma \frac{\nabla p_e}{e N_e}. \quad (2.15)$$

Stromfluss aufgrund der induzierten elektrischen Spannung

Ein möglicher Strom ergibt sich, weil das Plasma ein elektrischer Leiter ist, der im Magnetfeld bewegt wird. Beim magnetohydrodynamischen Generator (Bild 17) bewegt sich ein Plasma zwischen Elektroden innerhalb eines Magnetfeldes. Durch die Ablenkung im Feld erfolgt die Ladungstrennung. In Kraftwerken können so die Verbrennungsabgase in einer zusätzlichen Stufe noch vor den Wärmetauschern genutzt werden [Mier74]. Beim Laserschweißen könnte also das ausströmende Plasma in der Kapillare einen Strom in dessen Wand leiten, der dann um die Kapillare herum fließt. Die Gleichung 2.16 folgt aus dem Ohmschen Gesetz:

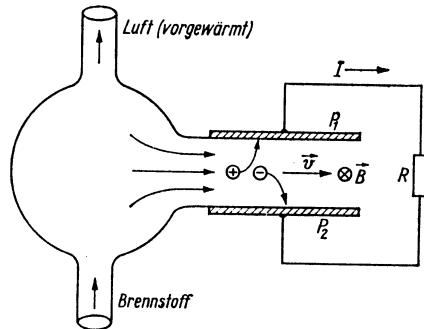


Bild 17: Prinzip eines magnetohydrodynamischen Generators [Mier74]

$$\vec{E} = -\frac{\vec{j}}{\sigma_{pl}} - \vec{v} \times \vec{B}. \quad (2.16)$$

Es ergibt sich mit den obigen Ausströmgeschwindigkeiten und einer Feldstärke B von 0,3 T die elektrische Feldstärke $\vec{v} \times \vec{B}$ im Bereich von 15 bis 54 V/m. Bei einem Kapilla-

rendurchmesser von $d = 0,3 \text{ mm}$ folgt daraus eine Spannung $U_0 = E_0 \cdot d$ von 5 bis 16 mV, die zur Kapillaröffnung hin zunimmt.

Zur Berechnung der elektrischen Leitfähigkeit σ_{pl} des Plasmas kann bei diesen hohen Elektronendichten auf die Leitfähigkeit eines voll-ionisierten Plasmas (Spitzer-Leitfähigkeit) zurückgegriffen werden. Die Leitfähigkeit hängt bis auf einen kleinen Einfluss im Coulomblogarithmus $\ln(\Lambda)$ nur noch von der Temperatur T_e ab. Dabei bezeichnet $\gamma_E(Z)$ einen Korrekturfaktor, abhängig von der Ionisation Z [Spit62, Mor90]:

$$\sigma_{pl} = \gamma_E(Z) \cdot 2,6316 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{T_e^{3/2}}{Z \ln(\Lambda)} \cdot \frac{1}{\Omega \cdot m \cdot K^{3/2}} \quad (2.17)$$

$$\ln(\Lambda) = \ln \left((4\pi \epsilon_0)^{3/2} \frac{3}{2} \frac{(k T_e)^{3/2}}{\pi^{1/2} e^3 n_e^{1/2}} \right). \quad (2.18)$$

Aus $Z=1$ folgt $\gamma_E=0,582$ [Spit62], und somit ergibt sich für die Schweißungen mit dem CO_2 -Laser in Tabelle 2.1 eine Leitfähigkeit σ_{pl} im Bereich von $3,2 \cdot 10^4$ bis $8,9 \cdot 10^4 (\Omega\text{m})^{-1}$. Mit der Bedingung $E = 0$ ergibt sich eine mögliche Stromdichte $j_k = v \cdot B \cdot \sigma_{pl}$ im Bereich von $4,9 \cdot 10^4$ bis $4,8 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$. Bei einer angenommenen Seitenfläche der Kapillare von $A = 1 \text{ mm}^2$ ergeben sich Werte für den Kurzschlussstrom von $I_k = A \cdot j_k$ in der Größenordnung von 0,049 bis 0,48 A. Dies deutet auf einen geringen, aber erwähnenswerten Strom um die Kapillare herum hin. Dieser entsteht durch die makroskopische Bewegung des Plasmas im Magnetfeld (siehe Bild 24).

Hallströme

Wenn die Elektronendichte N_e so hoch ist, dass die kreisrunden Flugbahnen (Bild 15) immer wieder durch Kollisionen mit anderen Teilchen unterbrochen werden, kann es zu einer Ladungsdrift im Plasma kommen; dieser Ladungstransport wird als Hallstrom bezeichnet. Der Hallparameter ω_m/v_c setzt die Zyklotronfrequenz ω_m in Bezug zur Kollisionsfrequenz v_c [And90] (die Ladungszahl Z der Elektronen ist 1):

$$\frac{\omega_m}{v_c} = \frac{eB}{v_c m}. \quad (2.19)$$

Die Kollisionsfrequenz v_c der Elektronen wurde in der Größenordnung von $9 \cdot 10^{11}$ bis $5 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ abgeschätzt. BECK errechnete in [Beck96] deutlich höhere Werte im Bereich von $2 \cdot 10^{13}$ bis $6 \cdot 10^{13} \text{ Hz}$ [Beck04]. Damit ergibt sich für den CO_2 -Laserschweißprozess für den Hallparameter ω_m/v_c ein Wert von $3 \cdot 10^{-4}$ bis 0,1. Somit tritt kein Strom aufgrund der Eigenbewegung des Plasmas auf.

Gradientenbasierter Elektronenfluss

Wie in Gleichung 2.15 im letzten Term ausgedrückt, kann aufgrund einer unterschiedlichen Ladungsdichte im Raum ein Strom innerhalb eines Plasmas fließen. Beim Laserschweißen wird das Plasma im Keyhole erhitzt, strömt dann aus dem Keyhole und kühlt beim Verlassen des einfallenden Lichtes sehr schnell ab. Dabei verändern sich auch die Elektronendichten im Plasma. In [Case75] wird z.B. ein Raumladungspotential aus Temperatur und Dichte definiert.

Mehrere Literaturstellen [Moon03, Kab95, Kab00, Kon84, Ari69, Apo88, Stamp71, Ask66] berichten, wie mittels gepulster Laserstrahlung ein Plasma auf der Oberfläche von Metallproben erzeugt wird und dabei ein Stromfluss in der Probe nachgewiesen werden kann. Dabei kamen CO_2 -TEA-, aber auch gütegeschaltete Rubin- oder Nd:YAG-Laser zum Einsatz. So konnte beispielsweise mittels zweier aufeinander folgender CO_2 -Laserpulse mit einer Pulsenergie von $E = 1 \text{ J}$, $d = 2 \text{ mm}$ Fokus-

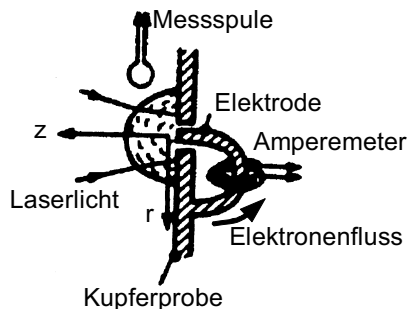


Bild 18: Erzeugen eines Stromes zwischen Probe und Elektrode [Kon84]

durchmesser, einer maximalen Intensität von $I = 10^8 \text{ W/cm}^2$ und einem zeitlichen Abstand von $\tau = 20 \mu\text{s}$ auf einer Kupferprobe mit $0,9 \text{ mm}$ Durchmesser ein Strom von 6 A zur der Elektrode erzeugt werden (Bild 18). Bei geringem Druck zeigt sich schon beim ersten Puls ein starker Stromfluss. Der zweite Puls verstärkt das Plasma des ersten Pulses, so dass nun auch bei Umgebungsdruck ein Strom fließt. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Plasmas zeigen, dass der Strom fließt, bevor die Hauptwolke des Plasmas die zweite Elektrode erreicht. Es wurde auf ein Vorplasma bestehend aus schnellen Teilchen des Hauptplasmas oder einer Ionisation der Umgebung durch emittierte Strahlung geschlossen [Kon84, Ari69].

Wenn über Gitterelektroden (Bild 19) eine mehrere hundert Volt große Spannung angelegt wird, kann, ähnlich einer Röhre oder einer Ionisationskammer, auch bei Umgebungsdruck ein Ladungstransport vom Werkstück zu der Gitterelektrode nachgewiesen werden [Mad04, Pard02, Lat98]. Die Intensitäten sind mit 10^8 bis 10^9 W/cm^2 bei diesen gepulsten Lasern allerdings ein bis zwei Größenordnungen höher im Vergleich zu einem Schweißprozess mit Dauerstrich-Lasern.

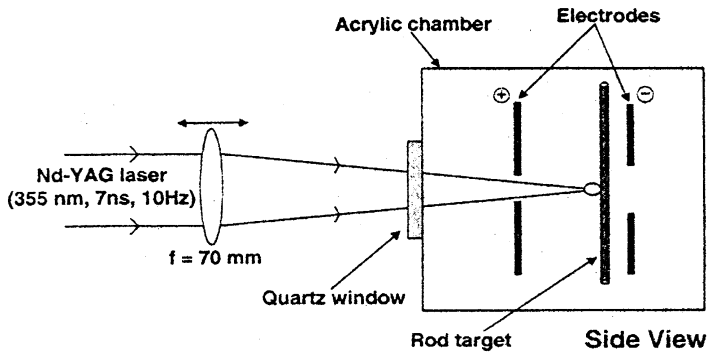


Bild 19: Nachweis von emittierten Ladungsträgern mittels Gitterelektroden [Mad04]

Beim CO₂-Laserschweißen mit $P_L = 1,8 \text{ kW}$ und $v_s = 1 \text{ m/min}$ wird ein Stromfluss von $-0,1 \text{ mA}$ von der Metallprobe zur Schutzgasdüse nachgewiesen (Bild 20) [Peng01, Zhang03]. Als Ursache werden die höheren Geschwindigkeiten der Elektronen vermutet, die mit $4,5 \cdot 10^5$ bis $5,2 \cdot 10^5 \text{ m/s}$ abgeschätzt werden. Diese sind mehr als 50 mal höher als die Geschwindigkeit des leichtesten Ions, welche mit $9 \cdot 10^3$ bis $10 \cdot 10^3 \text{ m/s}$ abgeschätzt wird. Bei zusätzlich angelegter Spannung steigt der Strom stärker an, wenn die Düse als Anode die Elektronen anzieht. Die hier genannte Erklärung lässt sich jedoch nicht mit der oben erfolgten Abschätzung der Debyeschen Länge vereinbaren, nach der es zu keiner Ladungstrennung aufgrund unterschiedlicher Diffusionsgeschwindigkeiten kommt.

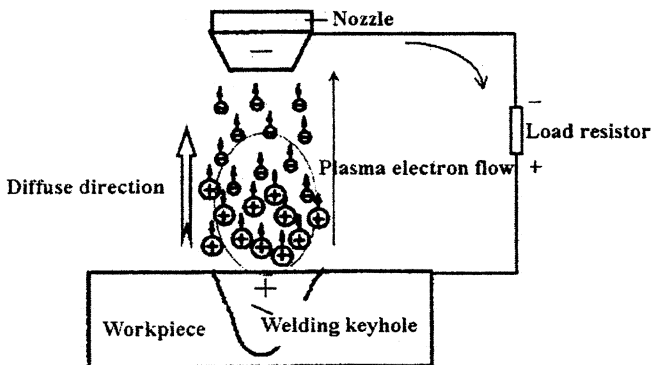


Bild 20: Unterschiedliche Geschwindigkeiten der Ladungsträger sollen zu einem Stromfluss im Plasma eines CO₂-Lasers führen [Peng01]

Auch innerhalb einer einzelnen Metallprobe kann ein Strom sowohl bei geringem Druck, als auch bei Umgebungsdruck erzeugt werden [Kab95, Kab90]. Dies gelingt aber nur, wenn entweder eine Asymmetrie des Laserfokus, der Absorptionsbedingungen an der Probe oder der Umgebungsverhältnisse neben dem Auftreffort an der Probe vorliegen (Bild 21). Alle drei Voraussetzungen führen zu einer Asymmetrie der Plasmawolke in Bezug zur nahen kalten Oberfläche. Für diesen Effekt werden zwei Mechanismen genannt. Im ersten Fall liegt aufgrund der sich ungleichmäßig ausbreitenden Ladungen im Plasma ein magnetischer Fluss durch die Oberfläche der Probe vor, der

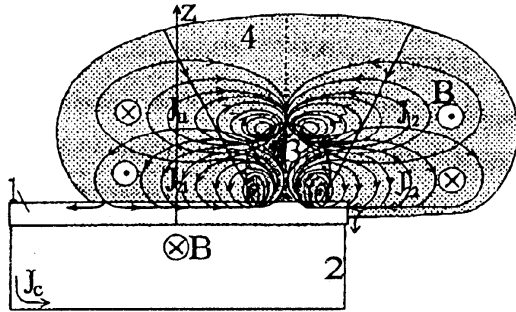


Bild 21: Schema der Erzeugung eines Stroms J und eines magnetischen Feldes B durch ein laserinduziertes Plasma (1: Probe, 2: Leiter, 3: Plasma, 4: Aura) [Kab95]

Spannungen induziert und dann je nach dem spezifischen Widerstand im Stromkreis einen Strom fließen lässt. Je dicker dabei die Probe ist, desto weniger fließt durch den externen Stromkreis. Der zweite Effekt beruhe auf einem „Kontaktmechanismus“. Die ungleichmäßige Leitungsverteilung führt zu unterschiedlich hohen Elektronentemperaturen und -dichten im Plasma entlang der Oberfläche der Probe (Bild 22) [Kab90]. Durch das entstandene elektrische Feld fließt je nach spezifischem Widerstand und Weglänge ein Strom durch das Material oder das Plasma. Die Leitfähigkeit σ von Eisen ist mit ca. $0,7 \cdot 10^6 (\Omega\text{m})^{-1}$ und bei Aluminium mit ca. $5 \cdot 10^6 (\Omega\text{m})^{-1}$ [Kern99] im flüssigen Zustand um drei Ordnungen größer, als die oben abgeschätzte Leitfähigkeit des Plasmas. Im festen Zustand ist der Unterschied noch größer. Somit fließt dieser entstandene Strom zum größten Teil durch die Metallprobe. Exemplarisch wurde bei einem Druck von 10 Torr ($1,33 \cdot 10^3$ Pa) eine Spannung von 0,2 V gemessen, während sich bei Umgebungsdruck nur noch 10-50 mV ergaben [Kab90].

Die in einem sich ausbreitenden Plasma vorhandenen Ströme können auch mit angelegten externen Magnetfeldern wechselwirken. In [Dit91] ist beschrieben, wie eine ursprünglich runde Ausbreitungsfront hierdurch deformiert wird.

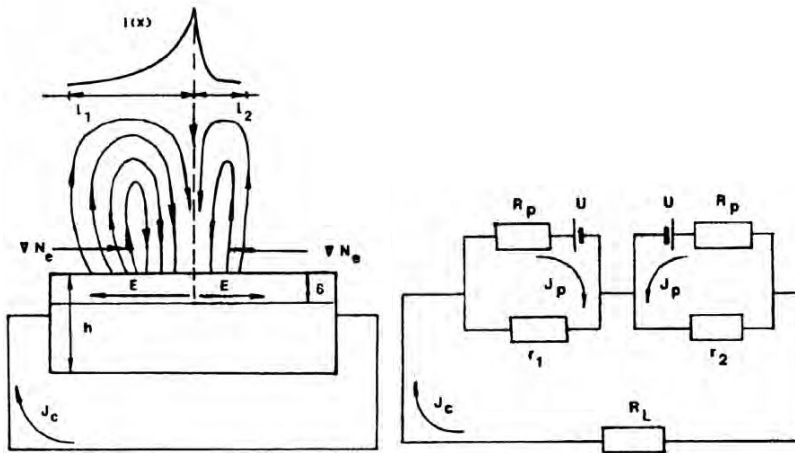


Bild 22: Schema der Erzeugung eines Stroms durch eine asymmetrische Leistungsverteilung auf der Probe und Ersatzschaltbild der Stromentstehung [Kab90]

2.2.3 Thermionische Emission und Photoeffekt

In [Stamp71] wird angenommen, dass das Plasma und die Probe gemeinsam ein thermoelektrisches Element bilden, bei dem der Auftreffort des Lasers die heiße Verbindung ist. Der Edison-Effekt, bei dem Strom von einer heißen Kathode zu einer kalten Anode fließt, wurde schon 1874 von HITTORF vorhergesagt. Er beruht auf der thermischen Emission von Elektronen aus der Oberfläche, deren temperaturabhängige Sättigungsstromdichte von RICHARDSON beschrieben wurde [Dör83]. Um die Austrittsarbeit aus der Werkstoffoberfläche zu überwinden, muss die Energie der Elektronen hoch genug sein [Kop89].

Auch wenn die Kapillarwand immer genau die Verdampfungstemperatur hat, sinkt die Oberflächentemperatur an der Öffnung beim Übergang in die Schmelzbadoberfläche ab, wodurch dort weniger Elektronen emittiert werden. Zwischen den Bereichen könnte ein Strom in der Schmelze fließen, wenn auch oberhalb der Schmelze ein leitfähiges Medium vorhanden wäre. Die emittierten Elektronen könnten zudem einen Einfluss auf die Leitfähigkeit des Plasmas haben.

Der Austritt von ein oder mehreren Elektronen kann im Photoeffekt auch durch die Absorption von Photonen geschehen. Aufgrund von Intensität, Wellenlänge und Pola-

risation des absorbierten Lichtes können verschiedene Arten von Photoeffekten auftreten. Es wird in [Far93] unterschieden zwischen Ein- und Multiphotonen-Effekten, sowie zwischen dem Oberflächen- und Volumen-Photoeffekt. Bei sehr intensiven Laserpulsen kann es auch zu einem optischen Tunneln der Photonen durch die Potentialwand kommen, welche vom Laserstrahl periodisch heruntergesetzt wird.

Die hohe Temperatur des flüssigen Metalls führt zu einer Verringerung der nötigen Austrittsarbeit und damit der für einen Austritt nötigen Photonenenergie [Far93]. Zudem handelt es sich bei den Innenwänden der Kapillare nicht um einen Festkörper, sondern um flüssiges Metall mit einer ungeordneten Struktur. Man spricht von nahezu freiem Elektronenverhalten (NFE) [Cro75]. Auch dieses könnte die Elektronenemission begünstigen.

2.2.4 Modellvorstellung zum Stromfluss im Plasma

Um die obigen Effekte auf das Laserstrahlschweißen zu übertragen, soll eine Skizze zum Prozessverständnis entworfen werden. Betrachtet man die starken Temperaturgradienten im Plasma innerhalb und oberhalb der Kapillare, die unterschiedlichen Ladungsträgerdichten im Plasma, die Austrittsarbeit der Elektronen an der siedend heißen Kapillarwand, die kältere Schmelze neben der Kapillare und die nicht rotationssymmetrische

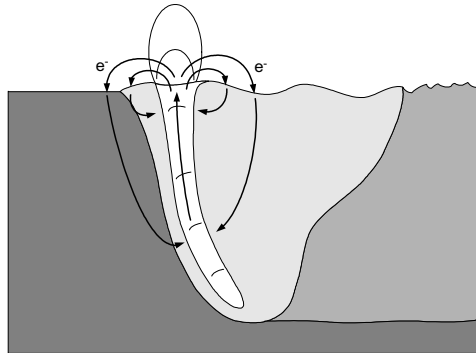


Bild 23: Modell des Stromflusses am Keyhole

Kapillar- und Schmelzbadform, erscheint ein Elektronenfluss aus der Kapillare zu dem benachbarten Schmelzbad in der in Bild 23 gezeigten Weise plausibel. Die im hinteren Schmelzbad zur Kapillare fließenden (negativen) Elektronen würden der von KERN postulierten technischen Stromrichtung entgegen der Schweißrichtung entsprechen.

Dieser Entwurf beschreibt einen bislang nicht bekannten Mechanismus in den Modellvorstellungen des Laserschweißprozesses. Hierfür ist ein leitfähiges Plasma notwendig, um überhaupt einen Stromfluss zu ermöglichen. Damit dieser Strom auch durch die Schmelze und das Werkstück fließen kann, müssen Elektronen in genügender Menge aus der Schmelze austreten. In dieser Arbeit fällt zum ersten Mal das Augen-

merk auf die thermionische Emission als notwendiges Bindeglied für die Kontinuität des Elektronenflusses.

Da dieser Stromfluss durch das Plasma erzeugt bzw. auf die Anwesenheit eines leitfähigen Plasmas angewiesen ist, erklärt sich somit das Nichtauffinden dieses Stroms beim Schweißen mit Nd:YAG-Lasern. Die Elektronendichten sind hierbei zu gering.

Nachdem in diesem Kapitel zuvor viele der denkbaren Ursachen betrachtet wurden, kommen zwei Effekte als treibende Kräfte für diesen Stromfluss in Frage. Aus der Temperaturverteilung im Plasma folgt eine unterschiedliche Elektronendichte. Deren Gradient führt zu einem Elektronenfluss im Plasma von heißeren zu kälteren Gebieten. In einer parallelen Dissertation wird ebenfalls auf diesen Gradienten hingewiesen und der Effekt näher untersucht [Hueg05, Amb06].

Die zweite mögliche treibende Kraft wäre eine unterschiedlich hohe Austrittsarbeit der Elektronen oder eine unterschiedlich hohe Stärke des Photoeffekts an verschiedenen Stellen der Schmelzbadoberfläche, hervorgerufen durch Temperaturunterschiede an der Oberfläche oder unterschiedliche örtliche Intensitäten der auftreffenden Laserstrahlung. Wenn diese Stellen nicht nur über die Schmelze, sondern auch durch ein leitendes Plasma elektrisch verbunden sind, könnte ein Strom fließen. Die zum Teil gegenüber dem Laser kurzwelligere Strahlung, die im Plasma selbst entsteht und auf die Wand trifft, kann hierbei eine unterstützende Rolle spielen. Ihre Photonen würden eine deutlich höhere Energie auf die Elektronen übertragen, so dass auch die lokale spektrale Verteilung von Bedeutung sein kann. Diese Modellvorstellung ließe sich verfeinern, wenn man die Temperatur- und Intensitätsverteilungen besonders in Wandnähe räumlich genauer betrachten und mit der Austrittsarbeit von Elektronen aus flüssigen bzw. siedenden Metallen kombinieren würde.

Dieser bei Laserschweißprozessen bei vorhandenem Plasma immer stattfindende Stromfluss könnte bei Anwesenheit eines externen Magnetfeldes durch den magnetischen Druck verändert werden. Durch eine Ablenkung des Plasmas innerhalb oder außerhalb der Kapillare würden sich der Verlauf des Stroms im Plasma und damit auch der Verlauf des Stroms in der Schmelze

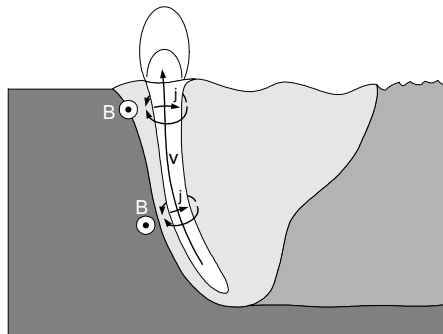


Bild 24: Beispielverlauf für einen im Plasma induzierten Strom

und dem Werkstück verändern. Hinzu kommt ein geringer Strom, der im ausströmenden Plasma je nach Richtung des externen Magnetfelds induziert wird (im gezeigten Beispiel von der Vorder- zur Rückwand der Kapillare fließend) und sich um die Kapillare in der Schmelze schließt (Bild 24).

2.3 Mögliche Effekte auf die Schmelze

Eine Beeinflussung der Schmelze infolge von Lorentz-Kräften könnte zu einer veränderten Geschwindigkeitsverteilung im Schmelzbad führen. Durch einen damit einhergehenden veränderten Wärmetransport in der Schmelze könnte sich eine veränderte Temperaturverteilung und dadurch eine veränderte Schmelzbadgeometrie einstellen. Diese und weitere Möglichkeiten der Wechselwirkung könnten somit auch Auswirkungen auf die Erstarrung der Schmelze und die sich einstellende Gefügestruktur haben.

2.3.1 Grundlagen der Magnetohydrodynamik

Der einfachste Fall einer magnetohydrodynamischen Pumpe wurde schon in Bild 11 vorgestellt. Diese Pumpenart wird z.B. in Kernreaktoren eingesetzt, um flüssiges Metall, wie Natrium, im Primärkreislauf zu fördern. Wenn im Schmelzbad ein Strom fließt und ein externes Magnetfeld vorhanden ist, wirkt eine Kraft auf die Volumenelemente der Schmelze. Beispielsweise kann so der Nahtdurchhang beim Schutzgas-schweißen von Stumpfnähten durch eine geeignete Strom- und Magnetfeldführung verringert werden [Zvo70, Kis95].

Es bleibt die Frage, woher beim Laserstrahlschweißen der Strom kommt. Neben der Möglichkeit von Plasmaeffekten (Kapitel 2.2) könnte er auch durch die Bewegung der Schmelze im Magnetfeld induziert werden. Die Effekte, die bei der Verknüpfung der Hydrodynamik mit der Elektrodynamik entstehen, werden von der Magnetohydrodynamik beschrieben (MHD). Diese umfasst kompressible und inkompressible Fluide [Sher65, Mier74].

Die Hydrodynamik wird zunächst durch die Gleichung der Massenkontinuität beschrieben:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) = 0. \quad (2.20)$$

Hierbei ist ρ die Massendichte, v die ortsabhängige Geschwindigkeit und $\text{div}(\rho v)$ die ein Volumenelement ein- bzw. ausströmende Masse.

Die zweite wichtige Gleichung ist die Impulsgleichung

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} - \text{grad } p. \quad (2.21)$$

Auf der linken Seite steht die Beschleunigung eines Volumenelementes, auf der rechten Seite die Summe aller Kräfte F auf ein Volumenelement und der räumliche Druckabfall. Die Kraft F kann sich aus Schwerkraft, Reibungskräften der viskosen Flüssigkeit und hier der Lorentz-Kraft $j \times B$ zusammensetzen. Die Oberflächenspannung wird hier vernachlässigt.

Die Elektrodynamik wird durch die Maxwell'schen Gleichungen beschrieben, die je nach betrachtetem System und Randbedingungen mehr oder weniger vereinfacht werden können [Sher65]. Die erste Gleichung beschreibt die durch eine zeitliche Änderung der Flussdichte B induzierte elektrische Feldstärke E (Faradaysches Induktionsgesetz)

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (2.22)$$

Die zweite Gleichung ist das Durchflutungsgesetz, welches den Zusammenhang zwischen elektrischen Stromdichten j und den von ihnen erzeugten Magnetfeldern B schafft (Amperesches Gesetz)

$$\text{rot } \vec{B} = \mu \vec{j}. \quad (2.23)$$

Dazu kommen die Gleichung von der Quellenfreiheit des Magnetfeldes und das erste Kirchhoffsche Gesetz

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (2.24)$$

$$\text{div } \vec{j} = 0. \quad (2.25)$$

Das Ohmsche Gesetz (Gleichung 2.15) lautet (ohne den Hall-Term und den Ladungsdichtegradienten):

$$\vec{j} = \sigma (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}). \quad (2.26)$$

Die weiteren Gleichungen beschreiben die Materialeigenschaften und sind vor allem für die Magnettechnik (siehe Anhang A) von Bedeutung. Hierbei ist D die dielektrische Verschiebung, H die Feldstärke, M die Magnetisierung, ϵ_r die Dielektrizitätszahl und μ_r die Permeabilitätszahl [Mich93].

$$\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} \quad (2.27)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.28)$$

Die Koppelung zwischen der Elektrodynamik und der Hydrodynamik findet also durch die Strömungsgeschwindigkeit v und die Kraft F auf ein Volumenelement statt. Bei kompressiblen Fluiden und Erwärmung kann es zudem über die Dichte zu Wechselwirkungen kommen [Sher65].

Die Beeinflussung eines externen Magnetfeldes durch die in der Flüssigkeit induzierten Ströme wird (analog Kapitel 2.2) durch die magnetische Reynoldszahl R_m beschrieben:

$$R_m = \mu_0 \sigma v_{fl} L. \quad (2.29)$$

Die Strömungsgeschwindigkeit wurde von BECK und FUHRICH rechnerisch untersucht [Beck96, Fuhr05]. Bei großen Schweißgeschwindigkeiten steigt die max. Strömungsgeschwindigkeit durch die Umströmung der Kapillare überproportional an und übertrifft 1 m/s. Die Länge L soll mit einer typischen Schmelzbadbreite von $L = 1$ mm abgeschätzt werden. Die Werte für R_m liegen in der Größenordnung von 10^{-3} bis 10^{-4} . Somit findet auch hier keine Beeinflussung des externen Magnetfeldes statt. Daher entfallen alle Effekte, die hierauf beruhen, wie der MHD-Dynamo oder die magneto-hydrodynamischen Alfvénwellen [Bir86].

2.3.2 Beeinflussungen der Schmelze

2.3.2.1 Hartmannströmung

Schon KERN hat die Hartmannströmung im Zusammenhang mit dem Laserstrahlschweißen genannt [Kern99]. In Bild 25 wird das Schema erläutert. Eine Flüssigkeit fließt durch einen rechteckigen Kanal der Breite L . Ohne ein externes Magnetfeld ist die Fließgeschwindigkeit in der Mitte des Kanals am größten, während sie aufgrund der Viskosität zur reibungsbehafteten Wand hin steil abfällt. In der Mitte des Kanals

wird durch das externe Magnetfeld B_z der stärkste Strom senkrecht zur Strömung und dem Magnetfeld induziert. In den langsameren Randzonen der Strömung fließt er wieder zurück. In dieser Randzone, der sog. Hartmannschicht, wird die Schmelze beschleunigt. In der Mitte wird sie abgebremst. Es stellt sich ein verändertes Profil v_x (Bild 25) der Strömungsgeschwindigkeiten ein. Die Hartmannzahl Ha vergleicht die magnetischen Kräfte mit den viskosen Reibungskräften:

$$Ha = BL \sqrt{\frac{\sigma}{\eta}}. \quad (2.30)$$

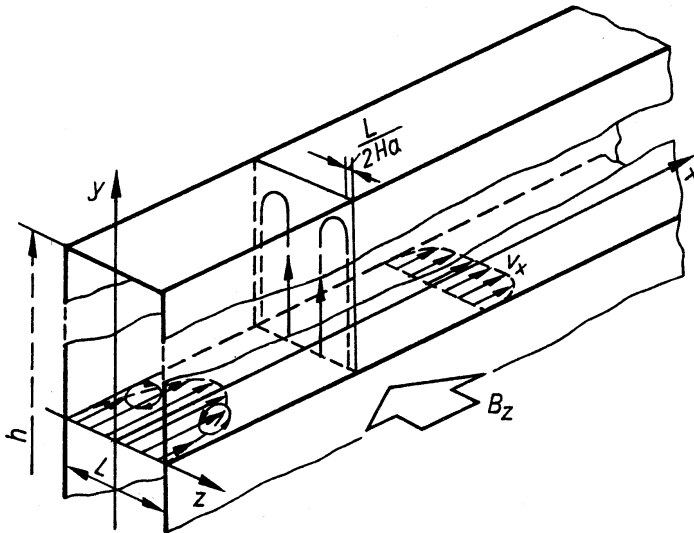


Bild 25: Schema der Hartmannströmung [Bir86]

Mit mittleren Werten für die dynamische Viskosität η von $5 \cdot 10^{-4} \text{ Ns/m}^2$ für Aluminium und $3,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$ für Stahl und bei typischen Randbedingungen schätzt KERN Werte für das Laserschweißen ab. Er erhält Hartmannzahlen, die für Stahl zwischen 1 und 10 und für Aluminium aufgrund der besseren Leitfähigkeit zwischen 10 und 100 liegen. Obwohl das Strömungsfeld beim Laserschweißen nicht laminar wie in der Modellannahme ist, kann von einer Beeinflussung der Geschwindigkeitsverteilung ausgegangen werden [Kern99].

Der Effekt des Abbremsens der Strömung in der Mitte verstärkt sich noch, wenn statt isolierender Kanalwände elektrisch leitende Wände vorliegen. Im Fall des Laser-

schweißen leitet das kalte feste Gefüge weit besser als die Schmelze. Bei unendlich leitfähigen Wänden würde sich die maximale Geschwindigkeit etwa um den Faktor 3 zusätzlich verringern [Mor90].

2.3.2.2 MHD-Turbulenz

Im Gegensatz zum Abbremsen einer laminaren Strömung kann durch die MHD der Fluss einer turbulenten Strömung durch Teillaminarisierung beschleunigt werden. Steht die Achse eines Flüssigkeitswirbels senkrecht zu den Feldlinien wie links im Bild 26, wird ein Strom j induziert, dessen Kraftwirkung zusammen mit dem Magnetfeld den Wirbel bremst und ihn damit auflöst. Liegen Wirbelachse und Feldlinien parallel zueinander, entsteht ein radialer

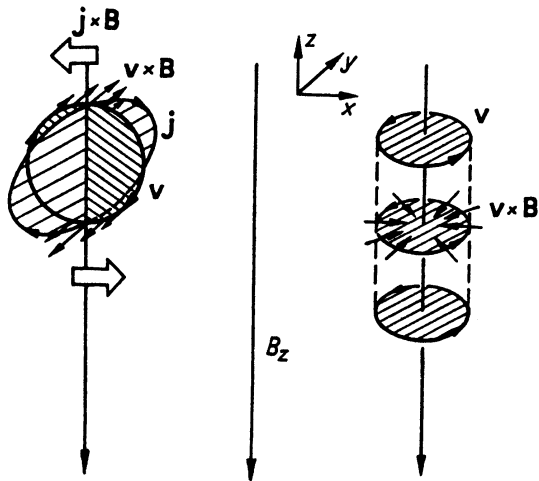


Bild 26: Entstehung einer 2-dimensionalen Turbulenz durch Auflösen der Wirbel rechtwinklig (links) und Belassen der Wirbel parallel zur Feldrichtung (rechts) [Bir86]

Strom im Wirbel, der diesen etwas bremst, aber nicht auflöst (Bild 26 rechts). Aus einer dreidimensionalen wird so eine zweidimensionale Turbulenz mit einer erhöhten Geschwindigkeit in der Mitte (Bild 27).

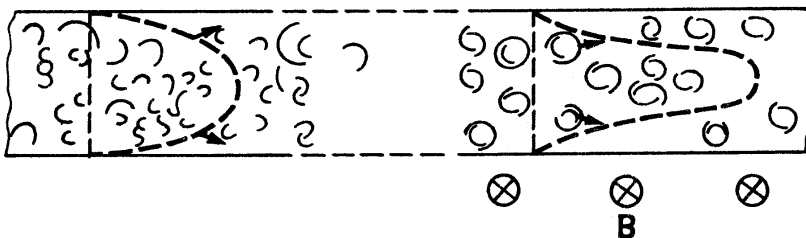


Bild 27: Dreidimensionale (links) und zweidimensionale (rechts) Turbulenz mit verändertem Geschwindigkeitsprofil im Kanal [Bir86]

KERN hat zur Bestimmung dieses Effektes die charakterisierende Stuartzahl N_s abgeschätzt. Diese Kennzahl vergleicht die Zeit, in der der Wirbel seine kinetische Energie verliert, mit der Zeit, in der der Wirbel dem Magnetfeld ausgesetzt ist. Zugleich betrachtet er die Reynoldszahl Re zur Abschätzung, ob eine turbulente Strömung vorliegt [Kern99]

$$N_s = \frac{\sigma B^2 L}{\rho_{fl} \nu_{fl}} \quad (2.31)$$

$$Re = \frac{\nu_{fl} L \rho_{fl}}{\eta}. \quad (2.32)$$

Obwohl mit steigender Schweißgeschwindigkeit die Strömungsgeschwindigkeit überproportional steigt, und damit auch die Reynoldszahl Re als Maßstab für eine turbulente Strömung, sinkt gleichzeitig die Stuartzahl N_s . Die Ergebnisse von KERN zeigen, dass bei den herrschenden Strömungsgeschwindigkeiten im Laserschweißprozess ein Effekt bei Feldstärken von 0,5 T und charakteristischen Längen L von 1 mm der Wert für N_s knapp über 1 liegen kann [Kern99]. Aber auch damit ist eine Wirkung auf die Schmelze eher gering.

2.3.2.3 Induktionspumpen

In Induktionspumpen und elektromagnetischen Rinnen werden mit Drehströmen und laufenden Magnetfeldern ebenfalls laufende Ströme in der Schmelze induziert. Zusammen mit den erregenden Feldern wird eine treibende Kraft erzeugt. Ähnlich wie bei einem Asynchronmotor läuft dabei die Phase des Magnetfelds immer schneller als die Geschwindigkeit der Schmelze [Bir86].

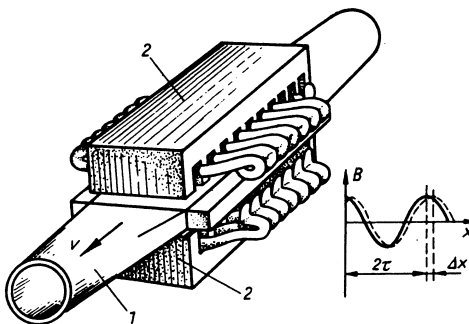


Bild 28: Prinzip einer Induktionspumpe (1: Kanal, 2: Induktoren) [Bir86]

2.3.2.4 Elektrowirbelströmung

Wenn ein Strom im Schmelzbad vorhanden ist, können weitere Effekte, wie z.B. die Elektrowirbelströmung, auftreten. Dies wird in Schmelzbädern beobachtet, wenn ein Strom halbunendlich abfließt. Er bewirkt durch die Verringerung der Stromdichte bei

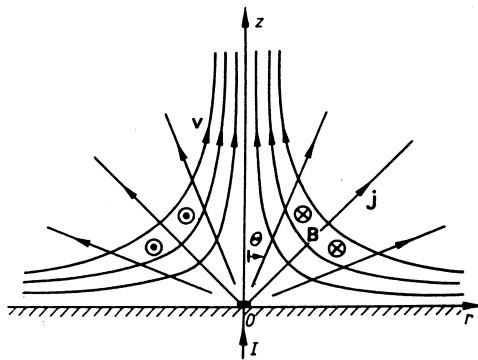


Bild 29: Elektrowirbelströmung [Bir86]

zunehmender Entfernung vom Mittelpunkt nach Gleichung 2.24 ein Magnetfeld, das die Schmelze radial zum Stromeinleitungspunkt zieht. Die Richtung der Strömung ist unabhängig von der Stromrichtung, da die Richtung des Magnetfeldes zusammen mit der Stromrichtung wechselt. Dieser Effekt wird in Aluminiumschmelzöfen beobachtet, wenn sich die Schmelze an den Elektroden absenkt.

Diese Wirbelströmung bewirkt ein Umwälzen des Schmelzbades. Bei einer runden Schmelzbadform kann es durch die Singularität in den Strömungsgleichungen zu einer Rotation im Schmelzbad kommen, ähnlich der Entstehung eines Wirbelsturms. Dies wird oft bei Schutzgas-schweißverfahren beobachtet. Die Richtung der Rotation wird von kleinen Änderungen in den Randbedingungen beeinflusst. Dies kann die Schmelzbadgeometrie oder das Magnetfeld des durch das Bauteil in verschiedene Richtungen (AB, AC, AD) abfließenden Stroms sein (Bild 30) [Lan84].

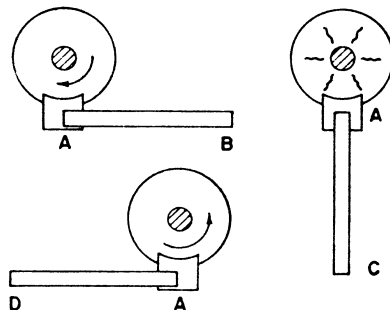


Bild 30: Beeinflussung der Schmelzbadrotation durch den Stromverlauf im Bauteil [Lan84]

2.3.2.5 Pincheffekt

Vom Metallgas-Schweißen und von der Plasma-Fusion ist der Pincheffekt bekannt, der besagt, dass ein stromdurchflossener flüssiger Leiter (oder schlauchförmiges Plasma) dazu neigt, sich selbst abzuschnüren und damit instabil zu werden. Der Effekt bewirkt beim Aufschmelzen des Schweißdrahtes das Ablösen der Tropfen. In Bild 31, rechts, wird gezeigt, wie mit zunehmender Stromstärke von (a) nach (d) eine Selbst-einschnürung erfolgt und wie das Material sich ablöst. Mit gezielten Stromspitzen kann die Tropfenbildung bewusst initiiert werden.

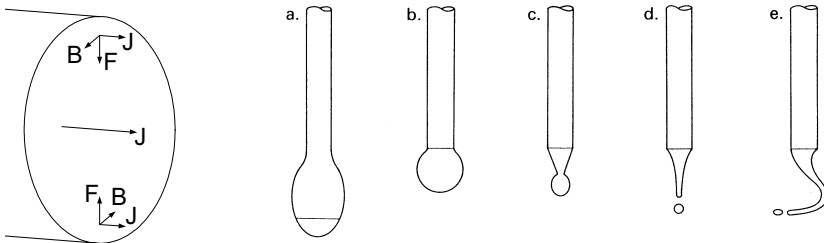


Bild 31: Pincheffekt nach [Mier74] und Varianten des Materialübergangs beim MIG-Schweißen [Lan84]

2.3.2.6 Oberflächenstabilität

Auch an der Oberfläche von flüssigen Leitern können durch Magnetfelder Effekte auftreten. In [Chen97] wird für das Laserschneiden untersucht, wie der abströmende Schmelzfilm durch ein Magnetfeld stabilisiert werden kann. Die Bartbildung an der Abrisskante kann dadurch reduziert werden (Bild 32).

Ein ähnlicher Schmelzfilm liegt an der Kapillarvorderwand (Bild 33) beim Laserstrahlschweißen vor. Beim CO_2 -Laser wurde hier eine Stufen- und Taschenbildung beschrieben [Bey95, Mat97]. Auch auf diesen Effekt könnte ein Magnetfeld einen Einfluss ausüben.

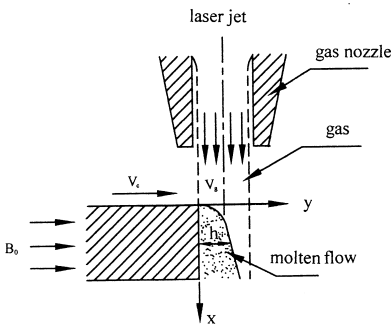


Bild 32: Physikalisches Modell zur Stabilisierung des Schmelzfilms beim Laserschneiden [Chen97]

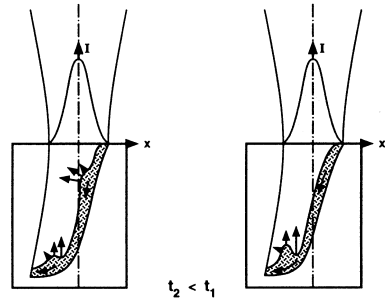


Bild 33: Stufen- und Taschenbildung an der Kapillarfront bei CO₂-Lasern [Bey95]

2.3.2.7 Kraftwirkung eines plasmainduzierten Stroms

Der in Bild 23 postulierte Strom könnte mit dem Magnetfeld innerhalb der Schmelze eine Kraftwirkung erzeugen, oder mittelbar über das Plasma auf die Schmelze wirken. In Bild 34 ist die mögliche Kraftwirkung dieses Stroms für jene Magnetfeldrichtung skizziert, welche in den Ergebnissen von KERN den Humping-Effekt unterdrückt und die Amphorenform erzeugt (Bild 9, Bild 12). Man beachte,

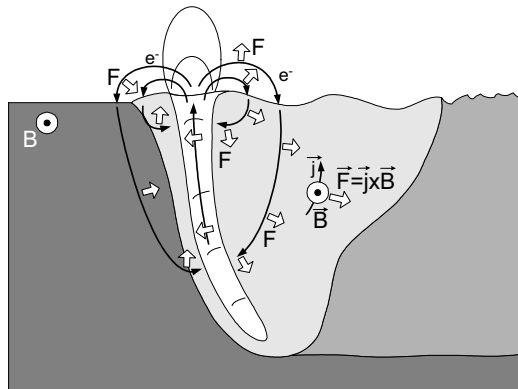


Bild 34: Kraftwirkung des angenommenen Stromflusses

dass die Richtung der „technischen“ Stromdichte \vec{j} der des physikalischen Stromtransports durch Elektronendrift (e^-) entgegengesetzt ist.

2.3.3 Beeinflussung der Erstarrung

Wie von KERN schon untersucht, kann ein Magnetfeld auch Einfluss auf die Erstarrung der Schmelze und das Gefüge der Schweißnaht haben [Kern99]. Neben dem Vermeiden von Heißrissen und der Reduktion von Poren wird eine Kornfeinerung, und damit eine Erhöhung der Nahtfestigkeit, angestrebt [Bro62, Nov75, Cher71]. Die Methoden sind besonders in der Halbzeugherstellung in der Aluminium- und Stahlindustrie beim Strangguss oder dem Erschmelzen besonderer Legierungen bekannt [Dav91, Bir86, Mor91]. Sie lassen sich in drei Gruppen einteilen:

Zunächst führt ein elektromagnetisches Rühren der Schmelze zu einem veränderten Wärmetransport in der Schmelze und damit zu einer Veränderung in der Richtung des Dendritenwachstums am Rand der Schmelze (Bild 35). Durch das Vorbeiströmen und Verdrängen der gerade im Erstarrungsprozess befindlichen Schmelze werden die Spitzen der Dendriten abgebrochen. Diese dienen dann als neue Kristallisationskeime oder werden in der Mitte der Schmelze wieder flüssig. Derartige Effekte werden beispielsweise für Edelstahl-, Aluminium- oder Titanlegierungen genannt [Vil90, Wil81, Cher72, Bas81, Bro62, Mat79, Viv96].

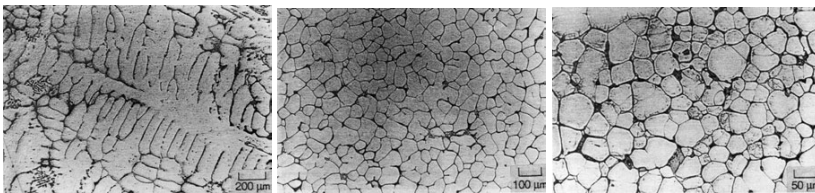


Bild 35: Al-Gussgefüge ohne (links) und mit Einfluss eines Magnetfeldes (Mitte, rechts) [Viv96]

Zweitens kann ein Magnetfeld auch auf die Durchmischung und Zusammensetzung der Schmelze vor dem Erstarren wirken. Eine Erhöhung der Auftriebskräfte auf Blasen und Partikel kann zu deren Ausgasen oder Abscheiden führen und so Nahtfehler reduzieren [Pat94, Bro62]. Eine Verringerung der Auftriebskräfte bis hin zur Quasi-Schwereelosigkeit kann die Trennung von Phasen verhindern und so die Verbindung unterschiedlicher, eigentlich nicht miteinander legierbarer Elemente, wie Aluminium und Blei, ermöglichen [Bir86].

Bei starker, hochfrequenter Anregung mittels Ultraschall oder Elektromagnetismus kann der Druck am unteren Scheitelpunkt der Schwingung so weit absinken, dass der Gasdruck leichtflüchtiger Stoffe überwiegt und über Kavitation ein Ausgasen aus der Schmelze erreicht wird (Bild 36). Somit lassen sich Poren bei der Erstarrung vermeiden [Viv96].

Drittens kann der Magnetismus auch direkt in die Erstarrungsmechanismen eingreifen. So wird das Gefüge beeinflusst, wenn die erstarrenden Dendriten eine andere magne-

tische Permeabilität gegenüber der flüssigen Schmelze haben. Schon bei einem geringen Unterschied und einem schwachen Magnetfeld richten sich die Dendriten in der Schmelze längs der Feldlinien aus [Bir86]. Bei einem Temperaturgefälle von bis zu 50 K können zwischen der Spitze und dem Fuß der Dendriten Thermoströme entstehen (Bild 37). Zusammen mit dem externen Magnetfeld führen sie zu einer Schmelzeströmung, die die bestehende Dendritenbildung letztlich stabilisiert und somit vergrößert [Bir86, Mor91].

In seinen Untersuchungen konnte KERN nur einen Einfluss aufgrund des verlagerten Temperaturgradientenfeldes auf die Gefügestruktur feststellen. Auch ohne ein zusätzliches Rühren sind die Gefüge beim Laserstrahlschweißen im Gegensatz zum MIG-Schweißen aufgrund der hohen Schweiß- und Erstarrungsgeschwindigkeit schon sehr fein [Wald02]. Es tritt keine weitere Kornfeinerung ein [Kern99].

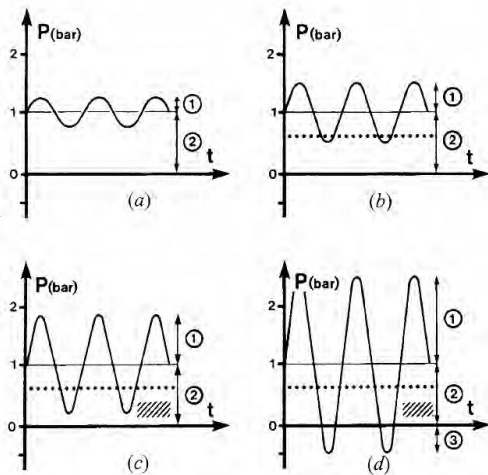


Bild 36: Einsetzen der Kavitation bei zunehmender Amplitude (1) bis zum Unterschreiten des Gasdruckes (2) [Viv96]

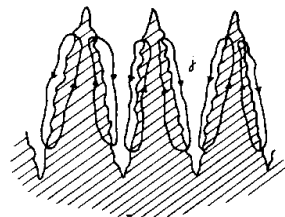


Bild 37: Bildung eines Thermoströms an den Spitzen der Dendriten [Mor91]

2.4 Ursprung eines thermoelektrischen Stroms

KERN vermutete als Ursache für die in Kapitel 2.1 geschilderte Abhängigkeit der Schweißergebnisse von der Richtung des Magnetfeldes einen Strom, der auch ohne externes Magnetfeld immer in der Schweißnaht fließt. Er wies einen thermoelektrischen Strom nach, der dann zusammen mit einem externen Magnetfeld zu einer Kraftwirkung in der Schmelze führt [Kern99].

Mittels unter der Schweißnaht angebrachter Hallsensoren maß er das vom thermoelektrischen Strom erzeugte Magnetfeld. Er stellte damit in der Nähe eines Aluminium-Schweißbades (CO_2 -Laser: $P_L = 7 \text{ kW}$, AA6110, $v_s = 12 \text{ m/min}$) eine Feldstärke von $0,54 \text{ mT}$ fest und schloß auf einen Strom von $13,5 \text{ A}$ in der Naht. Beim Schweißen mit einem Nd:YAG-Laser maß er nur eine Feldstärke von $0,11 \text{ mT}$.

Mittels Spulen fand KERN beim Schweißen mit dem CO_2 -Laser zusätzliche hochfrequente Anteile in den Signalen. Die Ursache für die beim CO_2 -Laser auftretenden und beim Nd:YAG-Laser ausbleibenden Spulensignale sah er in dem beim CO_2 -Laser vorhandenen stark ionisierten Plasma und dessen hochfrequenten Fluktuationen (siehe Kapitel 2.2)

Ursachen für einen thermoelektrischen Strom können der Seebeck- oder der Benedicks-Effekt sein. SEEBECK wies 1821 nach, dass in einem Stromkreis aus zwei verschiedenen Leitern ein Strom fließt, wenn zwischen den beiden Lötstellen eine Temperaturdifferenz besteht. Wenn sich zwei Materialien an verschiedenen Stellen mit unterschiedlichen Temperaturen berühren, treten aufgrund der unterschiedlich hohen Austrittsarbeiten Elektronen über, und ein Thermostrom fließt [Ful94, Wie69, Bosch84]. Gleichzeitig kühlt sich eine Stelle ab und die andere erwärmt sich, was jedoch beim Schweißen mit einer starken Wärmequelle vernachlässigt werden kann [Paul90]. Beim Benedicks-Effekt entsteht innerhalb eines homogenen Körpers durch eine unsymmetrische Temperaturverteilung eine elektrische Spannung [Bosch84].

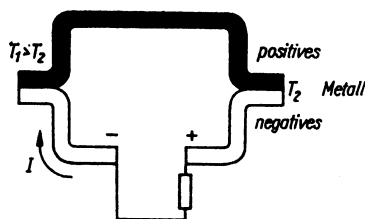


Bild 38: Seebeck-Effekt [Kuch84]

Bild 38 zeigt die technische Stromrichtung in einem Thermoelement. Das Metall mit der niedrigeren Thermospannung ist an der kälteren Stelle positiv [Kuch84]. In der thermoelektrischen Reihe (Tabelle 2.2) sind die Potentiale gegenüber Platin aufgeführt.

| Werkstoff | Thermospannung $10^{-6} \text{ V/}^{\circ}\text{C}$ |
|-------------|---|
| Selen | 1003 |
| Silizium | 448 |
| Eisen | 18,7 ... 18,9 |
| Stahl (V2A) | 7,7 |
| Kupfer | 7,2 ... 7,7 |
| Zink | 6,0 ... 7,9 |
| Magnesium | 4,0 ... 4,3 |
| Aluminium | 3,7 ... 4,1 |
| Platin | ± 0 |
| Nickel | -19,4 ... - 12,0 |
| Konstantan | -34,7 ... -30,4 |

Tabelle 2.2: Thermoelektrische Spannungsreihe bezogen auf Platin (Auszug) [Bosch84]

Neben den großen Unterschieden zwischen den Elementen haben aber auch Unterschiede in der Legierungszusammensetzung, im Gefüge und des Wärmebehandlungszustands Auswirkungen auf das thermoelektrische Potential [DKD00]. Dies kann z.B. zur Kontrolle der Legierungszusammensetzung von Proben oder der Güte von Schweißnähten genutzt werden [Ful94]. Bei Stahl haben jeweils Ferrit, Perlit, Austenit und Martensit bei verschiedenen Kohlenstoffgehalten und Temperaturen eine andere thermoelektrische Stärke [Mor70].

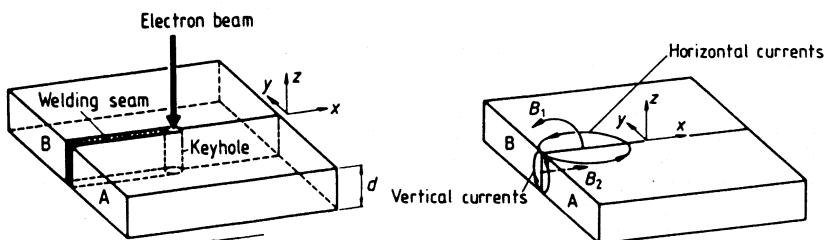


Bild 39: Thermoelektrischer Strom beim EB-Schweißen ungleicher Werkstoffe [Paul90]

Beim Verschweißen verschiedenartiger Materialien kommt es durch die unterschiedlichen Temperaturen in der Schmelze und dem erstarrten Gefüge zu starken Strömen zwischen den Fügepartnern, die sich z.B. in der Ablenkung des Elektronenstrahls [Dra02, Paul90] oder des Lichtbogens [Rich83] zeigen. Der Strom fließt, wie in Bild 39 dargestellt, um die Schweißstelle herum.

KERN hat an einer Probe aus Grundmaterial AlMgSi1 und dem daraus entstandenen Schweißgefüge bei einer Temperaturdifferenz von 50 °C eine Thermospannung von 50 µV nachgewiesen [Kern99]. Wenn anders als in Bild 39 gleichartige Werkstoffe verschweißt werden, entsteht an beiden Seiten der Schweißnaht je eine Grenzfläche. Die Stromverteilung muss daher symmetrisch sein. Für die Stromdichte aufgrund der Thermospannung zwischen Grundgefüge und erstarrtem Schweißgefüge zeichnet KERN den Verlauf in Bild 40.

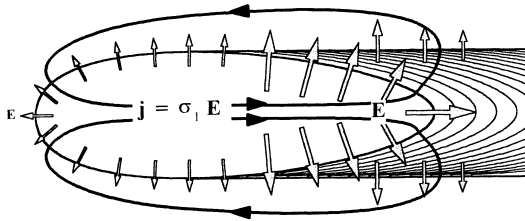


Bild 40: Thermoelektrischer Stromverlauf beim Laserschweißen nach KERN [Kern99]

Allerdings ist die Abhängigkeit des Thermostroms von den oben genannten Einflüssen sehr komplex. Die Thermospannungen sind nur innerhalb bestimmter Temperaturbereiche linear [Kuch84, DIN85, Fab93]. Die Temperaturunterschiede beim Schweißen sind hingegen sehr groß. Es existiert auch ein Potential zwischen Schmelze und Festkörper einer Legierung. So beträgt in [Las95] das Thermopotential zwischen Gefüge und Schmelze einer Cu-Ag-Legierung $5 \cdot 10^{-6}$ V/K. Die Größenordnung liegt im Bereich der Thermopotentiale zwischen unterschiedlichen Gefügeständen [Fab93].

Die resultierende Stromstärke und -verteilung im Schmelzbad hängt somit von der jeweiligen thermoelektrischen Stärke und Richtung an allen Grenzflächen und dem lokalen spezifischen Widerstand ab [Dra02].

Für die Existenz eines Stromes spricht auch die Beobachtung, dass sich nach dem Schweißen von Eisen die Ausrichtung der magnetischen Momente auch in Gebieten geändert hat, in denen die Curie-Temperatur nicht erreicht wurde [Abdu95].

3 Fragestellung und Zielsetzung der Arbeit

Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit ist die von verschiedenen Autoren in der Literatur beschriebene Möglichkeit durch den Einsatz magnetischer Felder Einfluss auf den Laserschweißprozess und damit auf die Schweißnaht zu nehmen. Wie dies funktioniert, wird bislang nur ansatzweise verstanden. Die in dieser Arbeit versuchte Klärung des physikalischen Hintergrundes lenkt das Augenmerk auf bislang im Prozessverständnis nicht berücksichtigte Effekte. Durch die hohe lokale Energiezufuhr sind beim Laserstrahlschweißen auf engem Raum drei bis vier unterschiedliche Aggregatzustände bei großen Temperaturunterschieden zu finden. Hierdurch treten physikalische Effekte in den Vordergrund, die sonst ohne Belang sind.

Es kommen mehrere Effekte und Mechanismen in Frage. Die erfolgte Abschätzung von Größenordnungen und Kennzahlen lässt offen, welche davon die dominanten und ausschlaggebenden Effekte sind, wo sie wirken und welche Folgen dies dann für das Prozessgeschehen hat. Das Plasma könnte durch das Magnetfeld abgelenkt werden und so die Brechung und Absorption des Laserlichts beeinflussen. Es könnte ferner Ursache für einen elektrischen Strom aufgrund seiner hohen Geschwindigkeiten und Temperaturgradienten sein. Für einen Einfluss auf die Schmelze dürfte der Lorentz-Effekt verantwortlich sein. Hier stellt sich die Frage, woher der Strom kommt. Es könnte ein induzierter, ein thermoelektrischer oder ein durch das Plasma verursachter Strom sein. Wenn die Ursache bekannt ist, kann untersucht werden, wie und wo er eine hydrodynamische Volumenkraft auf die Schmelze erzeugen kann. Es könnten auch Kombinationen verschiedener Effekte sein.

Insbesondere stellt sich die Frage, wie die beschriebene Vorzugsrichtung zu erklären ist. Die Ursache könnte eine Asymmetrie im Prozess sein, die zu einem von der Richtung des Magnetfeldes abhängigen Effekt führt. Es kann aber auch an der Art und Weise liegen, wie im Prozess ein Strom entsteht.

Ein deutlicher Einfluss auf das Schweißergebnis wurde bislang nur beim CO₂-Laser nachgewiesen. Für die Erklärung seiner Ursache ist bedeutsam, ob und wie der Effekt beim Schweißen auch mit dem Nd:YAG-Laser auftritt. Die Unterschiede zwischen den Prozessen liegen vor allem in der unterschiedlichen Temperatur und Elektronendichte des Plasmas, bedingt durch die Wellenlänge der Laserstrahlung. Da

sich zum heutigen Stand der Technik die beiden Lasertypen auch durch die technisch verfügbaren Leistungen und Strahlqualitäten unterscheiden, haben die üblicherweise erzeugten Schmelzbäder unterschiedliche Formen und Abmessungen. Auch dies könnte eine Rolle spielen.

Letztlich soll es das Ziel sein, die Beeinflussbarkeit des Prozesses durch Magnetfelder in Form von verbesserten Produkteigenschaften oder günstigeren Fertigungskosten zu nutzen. Festigkeit und Nahtqualität ließen sich durch eine verbesserte Schweißbarkeit der Werkstoffe, eine geringere Anzahl von Nahtunregelmäßigkeiten, eine optimierte Nahtquerschnittsfläche oder ein feineres Gefüge steigern. Die Kosten lassen sich durch eine höhere Prozess-Sicherheit, verbesserte Nahtqualität, weniger Störungen, reduzierten Energieverbrauch oder geringere Anlagenkosten senken.

Da im Karosserierohbau zunehmend der Nd:YAG-Laser eingesetzt wird, soll der Schwerpunkt auf dem Schweißprozess mit diesem Laser liegen. Hierzu muss die Wirkungsweise der Prozessbeeinflussung verstanden werden und die wichtigsten Parameter bekannt sein. Das dazu nötige Magnetfeld muss technisch erzeugt werden können. Dies begrenzt den Untersuchungsbereich der magnetischen Feldstärke. Die Untersuchungen können auch Aufschlüsse zum Verständnis des unbeeinflussten Laserschweißprozesses geben.

Für den Lorentz-Effekt muss, neben einem Magnetfeld, auch ein Strom vorhanden sein. Dies kann ein prozessinhärenter Strom sein, der bei beiden Wellenlängen durch einige Mechanismen erzeugt werden kann. Beim CO₂-Laser besteht offensichtlich ein großer Einfluss durch das Plasma. Daneben ergeben sich weitere Möglichkeiten, den Prozess zu beeinflussen, wenn dem Schmelzbad ein externer Strom zugeführt wird. Diese sollen in Kapitel 5 untersucht werden.

4 Untersuchung der auftretenden Phänomene

In diesem Kapitel sollen einige der in den vorigen Kapiteln genannten möglichen Effekte auf ihr Auftreten und ihre Bedeutung für den Schweißprozess untersucht werden. Dies beginnt zunächst mit dem Nachvollzug der in Kapitel 2.1 genannten Beobachtungen von KERN, die dann jedoch weitergeführt und ergänzt werden.

Die Untersuchungen werden mit zwei im Karosseriebau üblichen Aluminiumlegierungen und einer Stahlsorte durchgeführt. Die Legierung AA6181A (AlMg0,8Si0,9) ist warmaushärtend. Beim Schweißen neigt sie zu Heißrissen. Die Festigkeitssteigerung erfolgt über die Ausscheidung von Mg_2Si innerhalb des Gefüges bei einem nachgelagerten Wärmebehandlungsprozess. Bei AA5182 (AlMg4,5Mn0,4) handelt es sich um eine nicht aushärtbare Knetlegierung. Durch das Walzen des Bleches wird sie kaltverfestigt [Kam98]. Da der Magnesiumanteil in der Legierung bei geringeren Temperaturen als das Aluminium verdampft, ist die Einschweißtiefe bei gleicher Laserleistung und Blechdicke deutlich größer als bei der Legierung AA6181A. Beide Legierungen werden üblicherweise für innenliegende Strukturbauteile verwendet. Das Stahlblech St14 ist ein Kaltband mit weicher Tiefziehgüte. (EN 10130-DC04). Für die grundlegenden Versuche in dieser Arbeit waren alle Bleche unbeschichtet.

4.1 Versuchsaufbau und technische Erzeugung des Magnetfeldes

Unabdingbar für die Versuche war die Erzeugung eines Magnetfeldes am Ort des Schweißprozesses. Hierzu wurden für diese Arbeit mehrere Magnete entworfen und gebaut. Die Grundlagen der Magnettechnik und Kriterien zum Entwurf eines Magneten für die Schweißtechnik werden in Anhang A aufgeführt. Bei der Gestaltung der Magnete muss ein komplexer Entwurfsprozess für den jeweiligen Anwendungsfall durchlaufen werden. Die angestellten Überlegungen und Messungen haben gezeigt, dass die Erzeugung einer Feldstärke von ca. 0,4 T im Arbeitspunkt eines Laserschweißprozesses mit vertretbarem Aufwand möglich ist.

Permanentmagnete erlauben eine einfache und kompakte Bauweise. Es muss kein Strom zugeführt werden. Es besteht beispielsweise die Möglichkeit, entlang eines

Schweißpfades eine Kette von Permanentmagneten zu installieren. Insofern ist eine stationäre Anwendung mit vertretbaren Kosten umsetzbar.

Der Aufwand für **Elektromagnete** ist größer als für Permanentmagnete. Das bezieht sich sowohl auf die geometrischen Ausmaße einer Baugruppe als auch auf die notwendigen Vorkehrungen zur Stromversorgung. Zudem deckt der Spalt zwischen den Polen nur eine kurze Strecke ab, die mit einem Magnetfeld bedeckt werden kann. Die Spule nimmt viel Bauraum ein. Die effektive Nutzung des Elektromagnetfeldes ist erst durch einen bewegten Einsatz gegeben. Dies kann durch eine Integration in den Laserschweißkopf geschehen oder ein getrenntes Mitführen des Magneten zum Schweißkopf. Andererseits bieten Elektromagnete eine einfachere Möglichkeit, Wechselfelder zu erzeugen oder das Feld abzuschalten. Bei Permanentmagneten müsste dies mechanisch durch Drehen des Magneten erzielt werden.

Sobald die Schweißnahtqualität vom Einsatz eines Magnetfeldes abhängig ist, muss dieses Magnetfeld ständig in richtiger Ausrichtung und Stärke zur Verfügung stehen. Eine Prozesssicherheit kann nur durch eine robuste Auslegung der Magneteile und den Schutz ihrer Eigenschaften erreicht werden.

Sollen höhere Feldstärken erzeugt werden, steigt sehr schnell der technische Aufwand bis hin zum Einsatz gekühlter Supraleiter [Mich93]. Dies lässt sich jedoch in der Praxis nicht sinnvoll realisieren.

4.1.1 Entwurf und Bau eines Permanentmagneten

Wesentliches Ziel bei der Gestaltung ist es, den Weg der Feldlinien durch die Luft zu minimieren. Dies kann durch die Umlenkung oder gezielte Führung der Feldlinien mit Weichmagneten geschehen. In Bild 41 ist erkennbar, wie eine unterlegte Eisenplatte das Feld in der Nähe des entgegengesetzten Pols erhöht. Dieser Effekt wird Eisenrückschluss genannt [IBS].

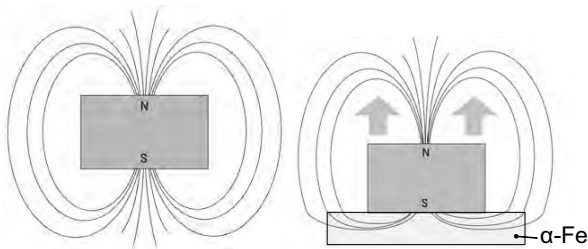


Bild 41: Verlagerung des Feldes mittels Eisenrückschluss [IBS]

Die Feldlinien an den Polflächen können mittels Weichmagneten umgelenkt oder geleitet werden. Dabei sind zwei Bauweisen üblich (Bild 42). Liegen die Pole vertikal übereinander, so hat ein Pol des Dauermagneten direkten Einfluss auf die Arbeitsumgebung. Diese Anordnung wird als Magnettopf bezeichnet. Werden die Pole horizontal angeordnet, dann führen beidseitig Eisenteile das Magnetfeld bis zum Einsatzraum. Dies ist die so genannte Sandwichbauweise.

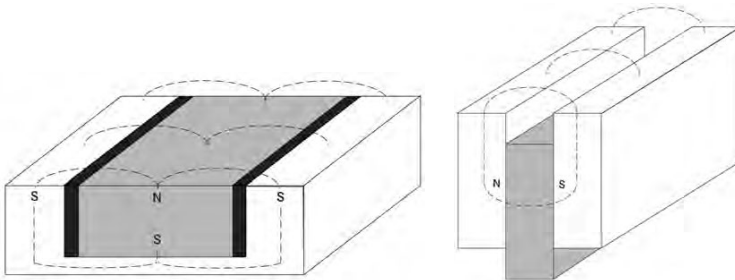


Bild 42: Magnettopf- (links) und Sandwichbauweise (rechts) [IBS]

In Bild 43 sind verschiedene Konstruktionen für den Einsatz in der Schweißtechnik dargestellt.

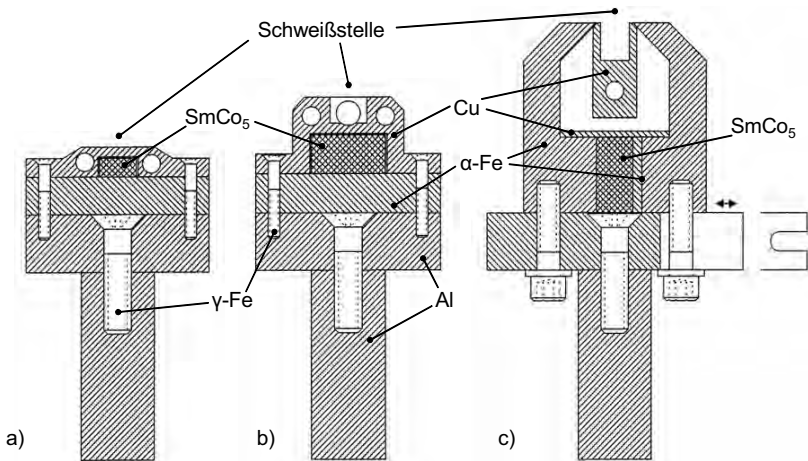


Bild 43: Konstruktionen für vertikalen (a, b) und horizontalen (c) Feldlinienverlauf

In allen Konstruktionen ist der Hartmagnet von Kupfer umschlossen und dadurch geschützt. Im Fall a) und b) wird eine Eisenrückschlussplatte (α-Fe) eingesetzt. Die Feld-

linien verlassen den Magneten in vertikaler Richtung. Bei Konstruktion c) wird mit Polschuhen links und rechts das Magnetfeld zum Schweißbereich geführt. Über einsetzbare Zwischenplatten ist der Abstand der Pole verstellbar. In allen Fällen sind Kühlbohrungen im Wurzelkanal, der Kupferabdeckung oder in den Polen erforderlich, um die Magnetwerkstoffe vor der Schweißwärme zu schützen.

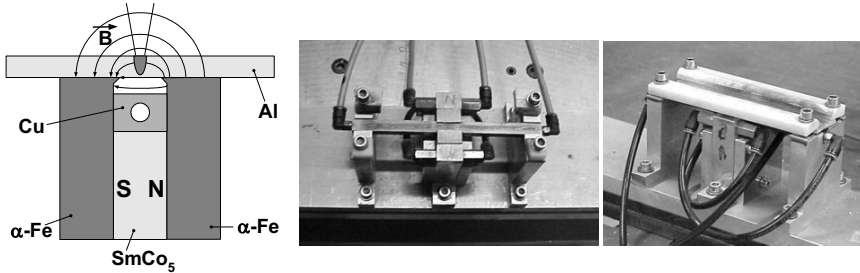


Bild 44: Vorrichtung Nr.1 mit Permanentmagnet in Queranordnung

Zur Untersuchung der Wirkung eines Magnetfeldes wurde eine einfache Spannvorrichtung (Nr. 1) erstellt, in der ein preisgünstiger Dauermagnet über Polschuhe ein Magnetfeld an der Schweißstelle erzeugt (Bild 44). Der hartmagnetische Werkstoff Samariumkobalt SmCo_5 hat den Vorteil einer hohen Energiedichte und einer hohen Curietemperatur (siehe Anhang A3). Die maximale Dauertemperatur liegt bei 250 bis 300 °C, so dass wegen der Kupferabdeckung mit Kühlung keine Schädigung des Magneten zu erwarten ist. Der Fluss wird durch die Polschuhe aus Eisen bis knapp unter die Schweißstelle geleitet und konzentriert. Bild 45 zeigt die entlang der Schweißbahn gemessene Feldstärke quer zu ihr. Der Magnet ist 20 mm breit. Die Feldstärke fällt zum Rand hin ab und liegt in der Mitte bei bis zu 430 mT.

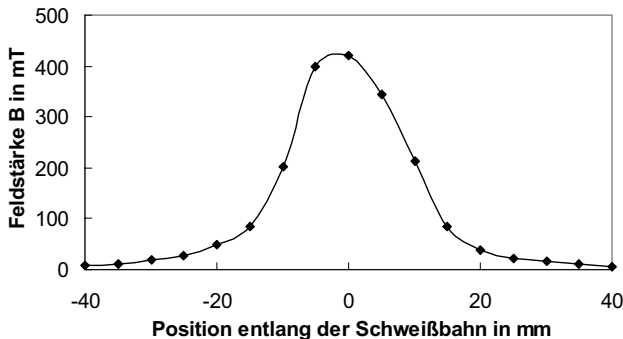


Bild 45: Feldstärke in Vorrichtung Nr. 1

4.1.2 Entwurf und Bau eines Elektromagneten

Bild 46 zeigt mögliche Orientierungen der Magnetfeldlinien im Arbeitspunkt des Schweißprozesses und mögliche Anordnungen der Magnetpole. Aufgrund des kürzeren Luftspaltes beim Hufeisenmagnet (Mitte und links) lässt sich hier sehr viel einfacher ein hoher Gesamtfluss erreichen im Vergleich zu dem langen Luftweg der entfernt voneinander liegenden Pole eines Stabmagneten (rechts).

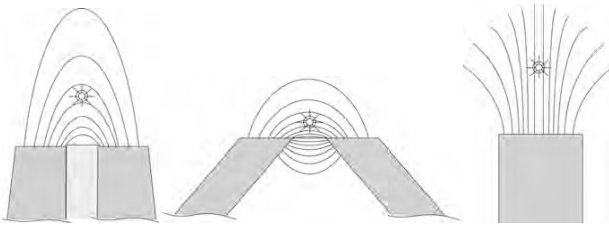


Bild 46: Mögliche Anordnung der Magnetpole und Feldlinien zur Schweißzone

Es wurde ein Elektro-Hufeisenmagnet gemeinsam mit dem IFSW entworfen und gebaut und dann in einer ferritfreien Spannvorrichtung (Nr. 2) montiert (Bild 47).

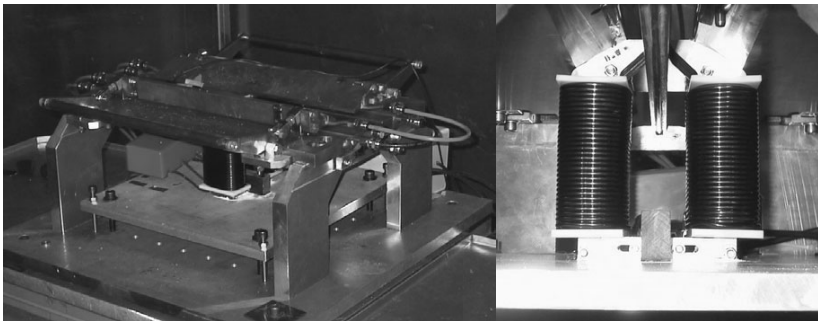


Bild 47: Ferritfreie Spannvorrichtung Nr. 2 mit Elektromagnet und Wurzelgaskanal

Der Magnetkern setzt sich aus einzelnen lasergeschnittenen Elektrolechlamellen zusammen, die mit austenitischen Schrauben zu Paketen gefügt sind. Die Pole sind so gestaltet, dass sie neben den Spannbacken und dem Wurzelgaskanal dicht an die Schweißstelle heranreichen. Der Luftspalt kann durch Verschieben der Lamellen in Langlöchern eingestellt werden. Der Spulenkörper besteht aus hochtemperaturfestem

Kunststoff, der zudem Fixierungen für die erste und letzte Spulenwicklung des Kupferdrahtes aufweist. Ein dickerer Kupferdraht lässt bei gleichem Bauraum weniger Wicklungen zu, als ein dünnerer. Es musste abgewogen werden, ob der geringere Widerstand und damit die geringere Erwärmung auch bei höheren Strömen diesen Nachteil aufwiegt. Von Vorteil ist jedoch, dass weniger Wicklungen eine geringere Induktivität bedeuten, die bei Wechselstrom aufgrund des geringeren Wechselstromwiderstands höhere Ströme ermöglicht. In diesem Fall wurde ein 3 mm dicker Kupferdraht mit hochtemperaturfester Isolation gewählt. Zwischen Kern, Grundplatte und Kupferbacken wird mittels Wärmeleitpaste ein günstiger Wärmeübergang zur Kühlung des Kerns geschaffen. Ein wassergekühlter Wurzelkanal schützt die Polenden vor direkter Beeinflussung durch den Schweißprozess. Bei einer Kernbreite von 38 mm in Schweißrichtung, wird beim Betrieb des Magneten mit Gleichstrom über eine Breite von 35 mm eine nahezu gleichbleibende Feldstärke erreicht (Bild 48).

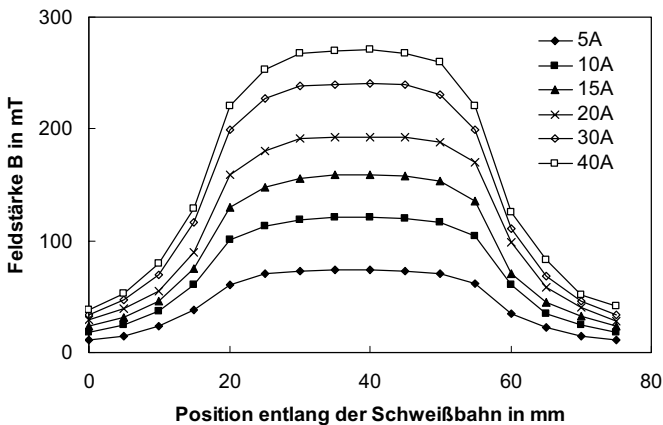


Bild 48: Feldstärke in Spannvorrichtung Nr. 2 in Abhängigkeit des Erregerstroms

4.2 Beeinflussen der Schweißung durch ein Magnetfeld

4.2.1 Versuche mit dem CO₂-Laser

Zunächst wurde untersucht, ob sich eine Beeinflussung beim CO₂-Laser zeigt. Hierzu kam Vorrichtung Nr. 2 zum Einsatz. Der CO₂-Laserschweißkopf (Bild 49) wurde von einer Portalmaschine geführt.

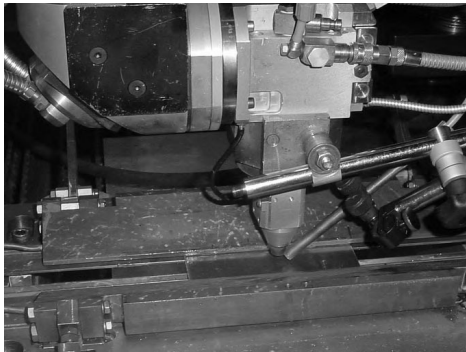
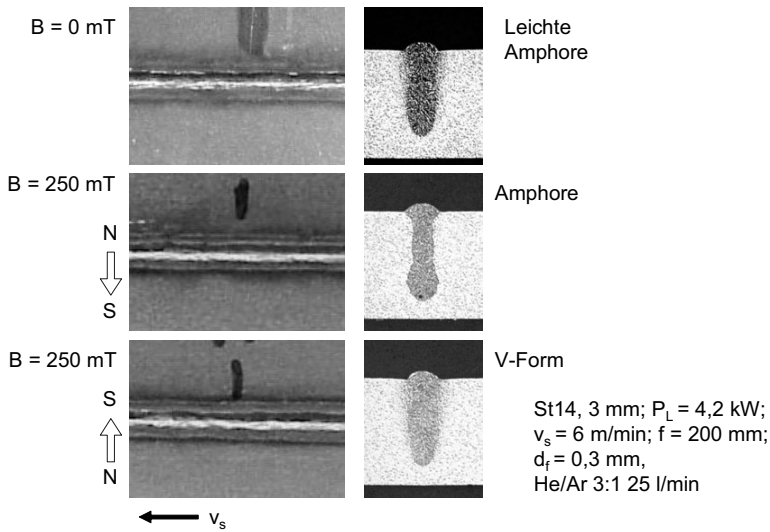
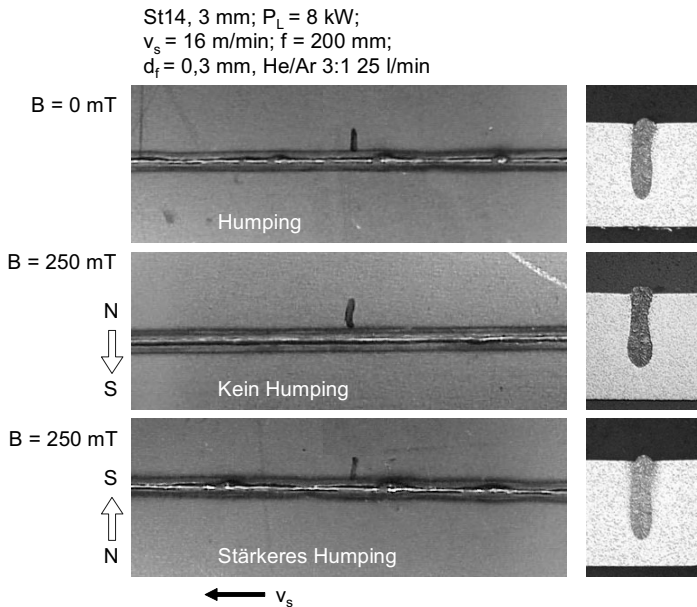


Bild 49: CO₂-Laserschweißkopf mit Spannvorrichtung Nr.2

Bei den Versuchen mit Stahl bestätigte sich der Einfluss der Feldrichtung auf den Nahtquerschnitt (Bild 50) und den Humping-Effekt (Bild 51), wie er von KERN beschrieben wurde

[Kern99]. Geht man von der postulierten Stromrichtung in Bild 13 entgegen der Schweißrichtung aus, so zeigt sich auch hier eine Wirkung entsprechend dem Kreuzprodukt nach unten bzw. nach oben. In der jeweils oberen Reihe sieht man die unbeeinflusste Naht bzw. rechts die typische Tropfenbildung beim Humping-Effekt. In der jeweils mittleren Reihe erkennt man die durch die Kraftwirkung nach unten erzeugte Amphorenform bzw. den unterdrückten Humping-Effekt. In der unteren Reihe tritt durch die Kraftwirkung nach oben eine V-Form bzw. eine verstärkte Tropfenbildung auf.

Die in Bild 50 und Bild 51 angegebenen Feldstärken an der Bearbeitungsstelle wurden ohne das eingelegte Blech gemessen. Werden aber die Pole des Magneten mit dem ferromagnetischen Stahl verbunden, verringert sich der Luftspalt deutlich, und der magnetische Fluss erhöht sich an der Schweißstelle. Wenn sich allerdings das zu schweißende Blech erwärmt und schmilzt, entsteht zwischen den Isothermen der Curietemperatur von 770 °C ein neuer „Spalt“. Diese Isotherme liegt um das Schmelzbad (Bild 52) herum im Grundwerkstoff und Erstarrungsgefüge. Die Feldstärke an der Schweißstelle hängt davon ab, wie stark das noch magnetisch leitende Grundmaterial gesättigt ist und somit die Feldlinien durch den Spalt „blasen“ (siehe Anhang A).

Bild 50: Einfluss der Feldrichtung auf den Querschnitt einer CO₂-Lasernaht.Bild 51: Einfluss der Feldrichtung auf den Humping-Effekt einer CO₂-Lasernaht.

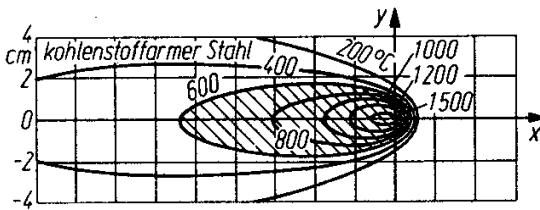
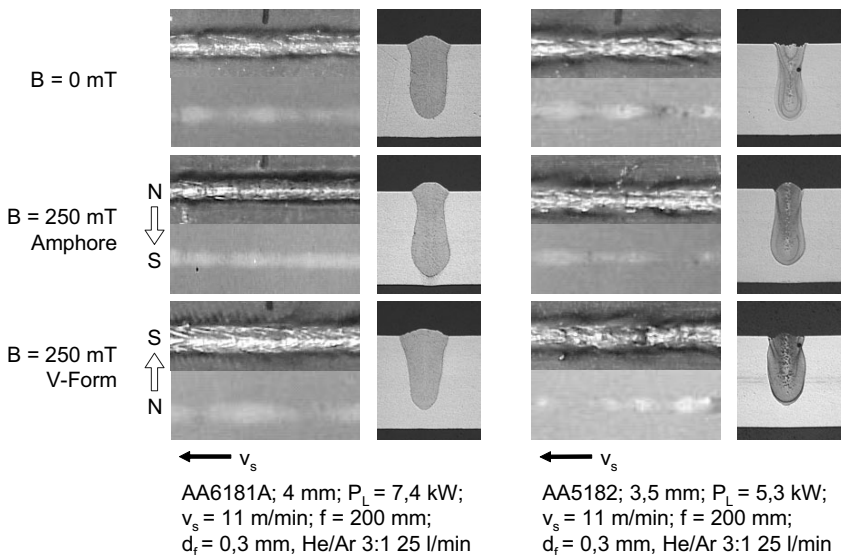


Bild 52: Temperaturverteilung beim Laserstrahlschweißen von Stahl [Scho84].

Der Einfluss auf den Nahtquerschnitt zeigte sich auch bei den beiden untersuchten Aluminium-Legierungen. Dieser ist bei der Legierung AA6181A gut zu erkennen. Der Schweißprozess bei der Legierung AA5182 ist deutlich unruhiger, lässt die Erscheinung aber auch erkennen. Da das paramagnetische Aluminium fast keinen Einfluss auf die Feldstärke hat, entspricht die im Luftspalt gemessene Feldstärke derjenigen beim Schweißen. Hinsichtlich der unregelmäßig auftretenden Porenbildung zeigte sich kein Effekt im Röntgenbild.

Bild 53: Einfluss der Feldrichtung auf den CO_2 -Laserschweißprozess bei Aluminium

Es gilt festzustellen, dass die Magnetfeldrichtung bei Stahl und auch bei Aluminium die gleiche Wirkung auf den Querschnitt hat.

4.2.2 Versuche mit dem Festkörperlaser

Die Versuche wurden mit der Vorrichtung Nr. 1 und einem Schweißkopf für Aluminium der Fa. Highyag durchgeführt (Bild 54). Der Nd:YAG-Laser hatte eine maximale Leistung von 4 kW in einer 600 μm Lichtleitfaser.

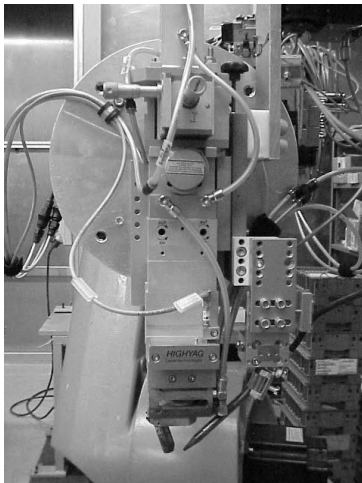


Bild 54: Aluminium-Schweißkopf für den Nd:YAG-Laser

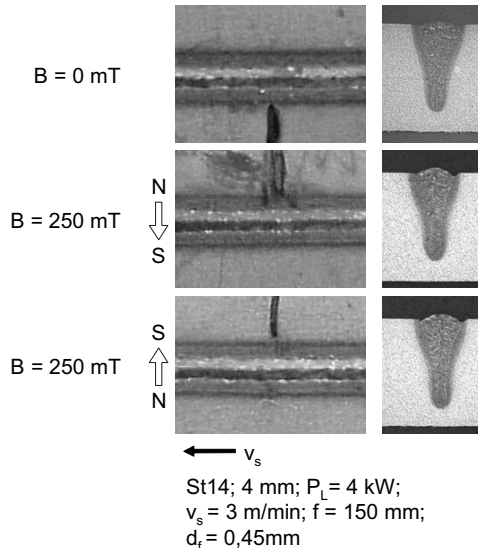


Bild 55: Kein Einfluss eines Magnetfeldes auf die Nahtform beim Nd:YAG-Laserschweißen von Stahl

Weder beim Schweißen von Stahl (Bild 55), noch von einer der beiden Aluminiumlegierungen (Bild 56) zeigte sich ein Einfluss auf Nahtform oder Querschnitt. Auch die Porenhäufigkeit in den Aluminiumnähten blieb unverändert. Der Einfluss auf den Humping-Effekt konnte nicht untersucht werden, da sich mit dieser Leistung und Strahlqualität der Effekt nicht erzeugen ließ.

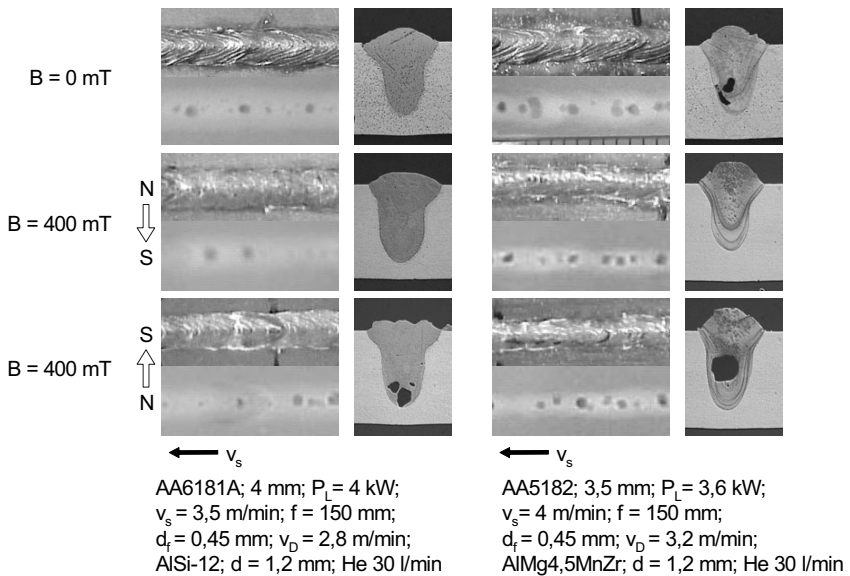


Bild 56: Kein Einfluss eines Magnetfeldes auf die Nahtform beim Nd:YAG-Laserschweißen von Aluminium

Gegenüber den CO_2 -Laserschweißungen in Kap 4.1.1 haben die obigen Schweißungen mit dem Nd:YAG-Laser aufgrund der Strahlqualität nur eine geringe Einschweißtiefe im Vergleich zur Nahtbreite. So könnten Effekte vielleicht nicht deutlich genug hervortreten. Daher wurden die Versuche mit einem Yb:YAG-Scheibenlaser mit maximal 3 kW in einer 0,15 mm Faser wiederholt. Bild 57 zeigt den verwendeten Schweißkopf. Hier kam die Vorrichtung Nr. 2 zum Einsatz.

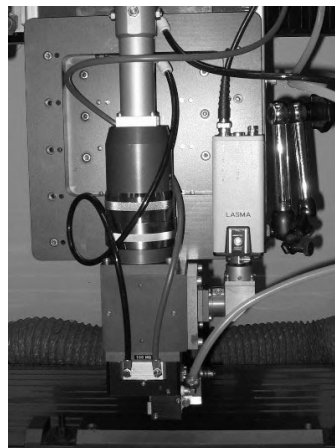


Bild 57: Verwendeter Schweißkopf für die Versuche mit dem Scheibenlaser

Die Ergebnisse bei Stahl in Bild 58 zeigen wiederum keinen Einfluss auf die Nahtform und den Humping-Effekt.

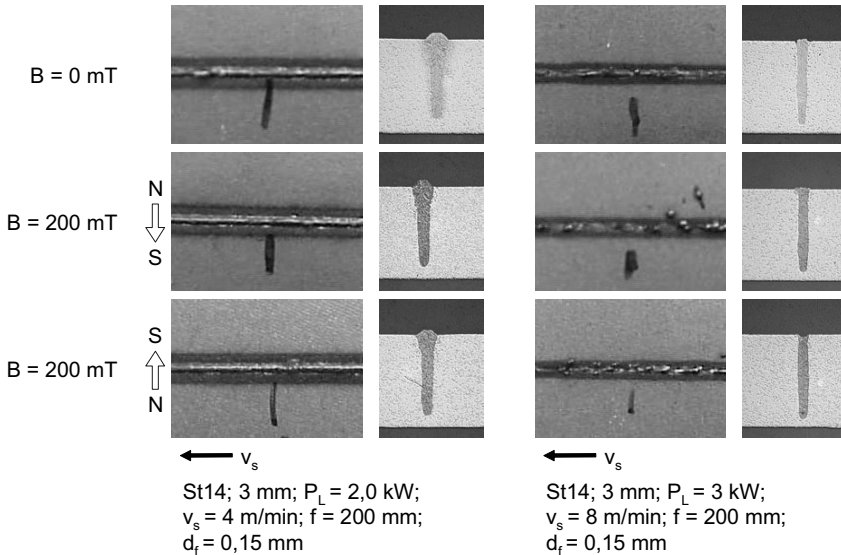


Bild 58: Kein Einfluss eines Magnetfeldes auf die Schweißnaht mit einem Yb:YAG Scheibenlaser (links) und den Humping-Effekt (rechts) bei Stahl.

Bei Aluminium in Bild 59 zeigen auch die „unbeeinflussten“ sehr schlanken Nähte eine leichte Amphorenform.

Bei der Legierung AA5182 ist bei den Schweißnähten mit einem Magnetfeld, unabhängig von der Richtung, eine etwas stärker ausgeprägte Amphorenform zu finden, als dies bei der Probe ohne Magnetfeld der Fall ist. Es scheint also auch mit dem Festkörperlaser ein Effekt vorhanden zu sein. Die dünnflüssige Schmelze der Legierung AA5182 fließt sehr schnell in dem schlanken Schmelzbad und könnte durch den Hartmanneffekt gebremst werden. Die deutliche Richtungsabhängigkeit bei der Beeinflussung durch magnetische Felder wie beim CO_2 -Laser scheint hier nicht stattzufinden.

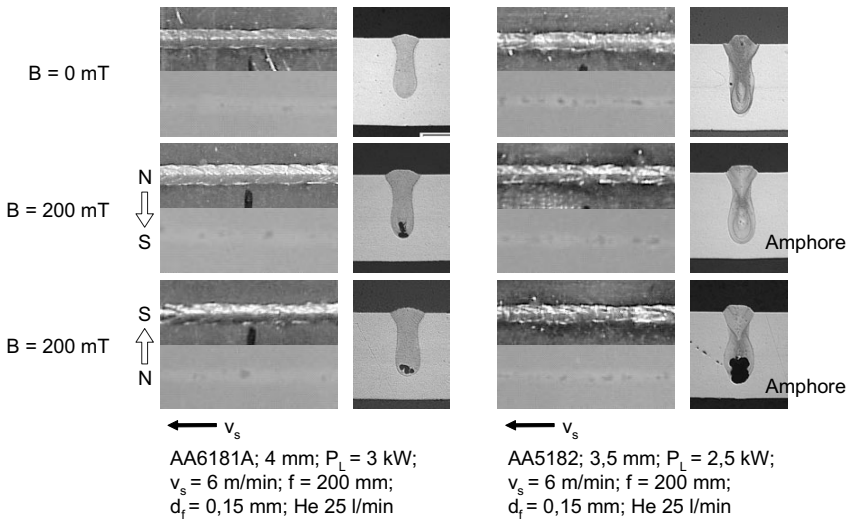


Bild 59: Kein Einfluss eines Magnetfeldes auf die Nahtform beim Yb:YAG-Laserschweißen von AA6181A und Verstärkung der Amphorenform bei AA5182

4.3 Messen des prozesseigenen Stroms ohne zusätzliches Magnetfeld

Als eine Ursache der in den Kapiteln 2.1 und 4.1 deutlich gewordenen Effekte wurde die Existenz eines prozesseigenen Stromes beim Laserschweißen genannt. Durch Erweitern des Versuchsaufbaus von KERN [Kern99] soll der Ursprung und der Verlauf dieses Stroms näher untersucht werden.

4.3.1 Versuchsaufbau

Der Strom entsteht unabhängig von der Existenz eines äußeren Magnetfeldes. Von KERN wurde die Möglichkeit beschrieben, das von dem Strom erzeugte Magnetfeld mit Hallsensoren zu messen. Bei dem Nachvollzug dieses Experiments kamen hochempfindliche Sensoren mit zugleich hoher Temperaturstabilität zum Einsatz. Der eigentliche Hall-Widerstand auf einem Keramik-Substrat war sehr klein. Über eine Verstärkerschaltung wurden die Signale von mehreren Sensoren in einem Mess-PC mit 100 kHz erfasst. Für den Versuchsaufbau ergab sich ein Messbereich

von $\pm 7,5$ mT bei einer Auflösung von 0,0037 mT. Ein Feldlinienverlauf von der flachen Seite durch den Kristall ergab einen positiven Signalausschlag.

Auf einer ausgesparten Epoxidharz-Platine wurden fünf Hallsensoren räumlich so angeordnet, dass aus dem zeitlichen Verlauf der Signale auf die räumliche Verteilung des Stroms im Schweißbereich geschlossen werden kann (Bild 60). Sensor Nr. 1 ist um 90° gekippt. Sensor Nr. 2 wurde um 180° gedreht angebracht, um ein mögliches Sig-

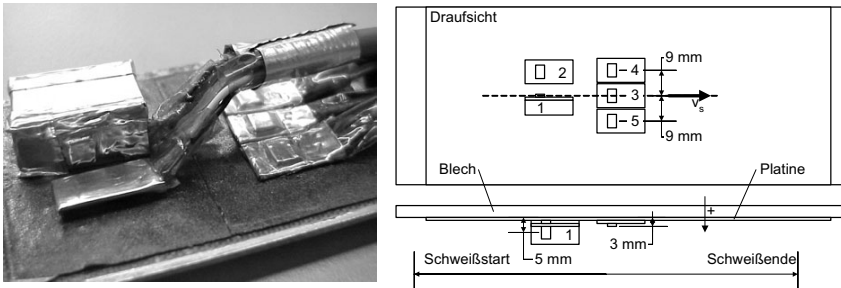


Bild 60: Räumliche Anordnung von Hallsensoren unterhalb des Bleches

nal klar identifizieren zu können. Die Platine wurde unter dem Blech mit eingespannt (Bild 61). Die feinen Sensoren reagierten sensibel auf jeden Strom oder jeden bewegten ferromagnetischen Stoff in der näheren Umgebung.

An dem verwendeten Schweißkopf wurden alle ferromagnetischen Teile durch Kupfer, Aluminium oder nichtrostenden Stahl ausgetauscht. Ebenso kam die ferritfreie Spannvorrichtung Nr. 2 zum Einsatz. Um einen beobachteten Photoeffekt des Laserlichtes auf

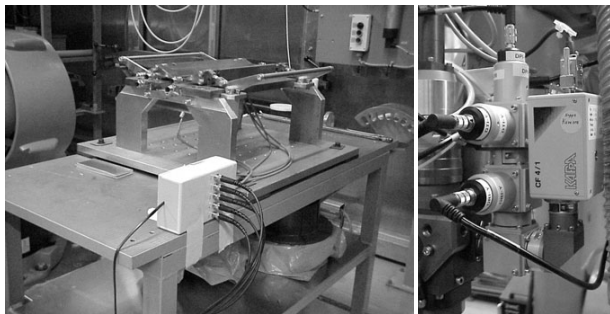


Bild 61: Spannvorrichtung und Schweißkopf mit Sensoren

die Hallsensoren zu unterbinden, wurden die Sensoren isoliert und mit Aluminium-Klebeband umschlossen. Referenzfahrten ohne Laserlicht oder mit nur wenigen 100 Watt auf dem Werkstück zeigten keinen Einfluss auf die Signalausschläge.

In dem Mess-PC wurde zusammen mit den Signalen der Hallsensoren auch die Rückreflexion, das Wärmeleuchten und das Prozessleuchten aufgezeichnet. Es wurden Sensoren der Firma Precitec verwendet (Bild 61). Neben der Analyse der Schweißprozesse konnte aus dem Zeitpunkt von Schweißbeginn und -ende, zusammen mit der Lage der Sensoren, auf die zeitliche Position des Laserstrahls geschlossen werden.

4.3.2 Versuche mit dem Nd:YAG-Laser

Hierzu wurde in ein 4 mm dickes St14-Blech mit der Leistung $P_L = 4 \text{ kW}$ ($f = 150 \text{ mm}$; $d_f = 0,45 \text{ mm}$) mit der Geschwindigkeit $v_s = 4 \text{ m/min}$ ohne Schutzgas blind geschweißt. Die Unterseite wurde gerade nicht angeschmolzen. Die Signale in Bild 62 wurden mit 50 kHz aufgezeichnet. Ein Rauschen in der Höhe von 0,035 mT nahe der Auflösung der Messkarte wurde oberhalb 200 Hz durch einen Tiefpassfilter entfernt. In den ausgefilterten hochfrequenten Signalen konnte keine Besonderheit gefunden werden. Da konstante äußere Magnetfelder je nach Orientierung der Hallsensoren im Raum zu einem konstanten Signal-Grundpegel führten, wurden diese von den Signalen abgezogen, so dass die Kurven nun nahe dem Ursprung liegen. Das Signal des Rückre-

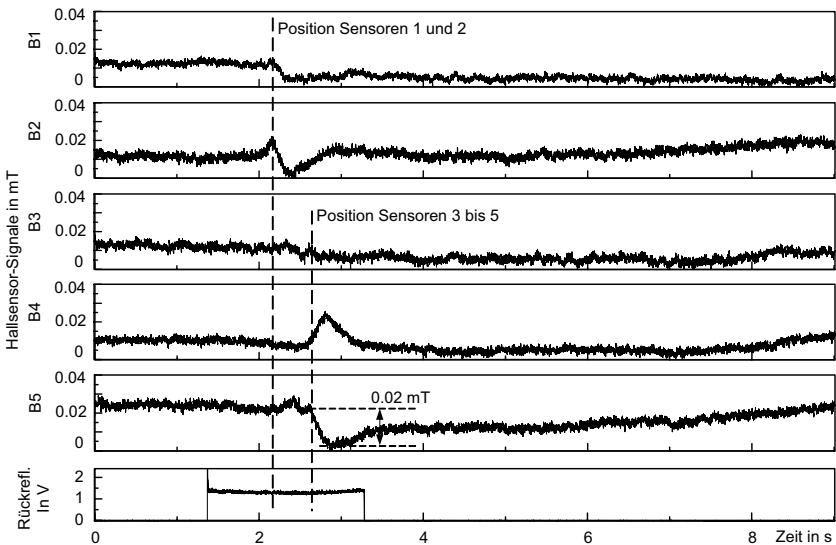


Bild 62: Signale der Hallsensoren; St14; $s_M = 4 \text{ mm}$; $P_L = 4 \text{ kW}$; $v_s = 4 \text{ m/min}$

flexionssensors lag in der durch die Verstärkung resultierenden Voltzahl vor. Das Ansteigen der Hallsignale aufgrund des Wärmeeinflusses trat durch die gute Isolierung erst deutlich verzögert nach dem Ende der Schweißung auf.

Besonders bei den Signalen der Sensoren 2, 4 und 5 sieht man einen ausgeprägten Ausschlag, dem ein kleiner, nicht immer deutlicher Gegenausschlag vorausgeht. Analysiert man den Signalverlauf und die räumliche Anordnung der Sensoren wie in Bild 63, kann man auf einen Strom schließen, der hinter dem Schmelzbad entgegen der Schweißrichtung durch das erstarrte Schmelzgefüge läuft. Die Signalspitze tritt erst nach dem Passieren des Sensors auf. Der Kapillare läuft ein Strom in der entgegengesetzten Richtung voraus. Bei Sensor Nr. 2 ist hier ein deutlicher Ausschlag zu erkennen, bei Sensor Nr. 4 ist nur ein leichtes Abfallen des Signals feststellbar. Der Ausschlag im Signal des Sensors Nr. 5 betrug 0,02 mT.

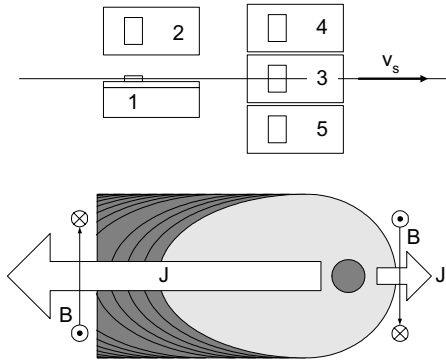


Bild 63: Rückschluss auf den Stromverlauf im Schweißbad (St14)

Der Strom in der Schweißzone erzeugt ein umlaufendes Magnetfeld. Aus der tangentialen Feldstärke B_t und dem Radius R um einen stromdurchflossenen Leiter lässt sich auf die Stromstärke I schließen [Kern99]:

$$B_t = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi R}. \quad (4.1)$$

Nimmt man den Strom in der Mitte des Bleches an, ergäbe sich bei einem Radius $R = 10,8 \text{ mm}$ und einem Winkel von 29° der Feldlinie zu Sensor Nr. 5 ein Strom von $I = 1,2 \text{ A}$. Allerdings werden die Feldlinien im ferromagnetischen Blech konzentriert und somit ist der Signalausschlag der Sensoren geringer. Es ist davon auszugehen, dass der eigentliche Strom über dem oben berechneten Wert liegt.

Die kurzzeitige Temperaturerhöhung über die Curietemperatur und der auftretende Strom führen zu bleibenden Veränderungen der Orientierungen der Elementarmagnete

im Stahlblech. Dies ist eine Erklärung für eine festgestellte Änderung der Magnetisierung im Werkstück nach dem Schweißen [Abdu95].

Bei Aluminium zeigte sich besonders dann ein anderes Verhalten, wenn unterschiedliche Materialkombinationen von Grundwerkstoff und Zusatzdraht verwendet wurden. Für die Kombinationen aus den Grundwerkstoffen AA6181A und AA5182 mit und ohne den Zusatzdrähten AlSi12 und AlMg4,5MnZr wurden jeweils Parameter ermittelt, sodass gerade nicht durchgeschweißt wurde. Das dünnere Blech aus AA5182 wurde daher mit entsprechend weniger Leistung geschweißt.

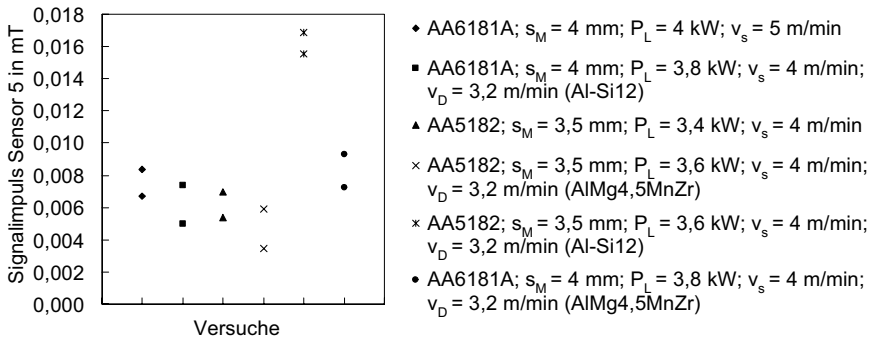


Bild 64: Signalaussschläge des Hallsensors 5 bei unterschiedlichen Aluminium-Werkstoffkombinationen

Die Signalaussschläge des Sensors 5 sind mit jeweils zwei Wiederholungen pro Kombination in Bild 64 dargestellt. Schweißt man den Grundwerksstoff ohne oder mit einem artgleichen Werkstoff, sind nur sehr schwache Ausschläge erkennbar. Exemplarisch ist in Bild 65 das Signal bei der Kombination von AA5182 mit dem artgleichen Zusatzwerkstoff AlMg4,5MnZr dargestellt. Hier ist der Ausschlag nur andeutungsweise zu erkennen. Der Ausschlag war sehr viel deutlicher, als der Zusatzwerkstoff Al-Si12 verwendet wurde (Bild 66).

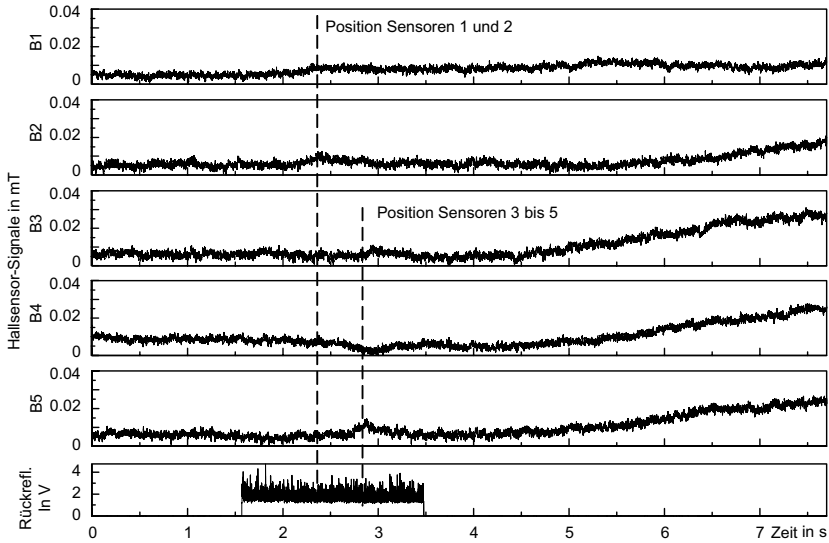


Bild 65: Signale der Hallsensoren; AA5182; $s_M = 3,5$ mm; $P_L = 3,6$ kW; $v_s = 4$ m/min; $v_D = 3,2$ m/min (AlMg4,5MnZr)

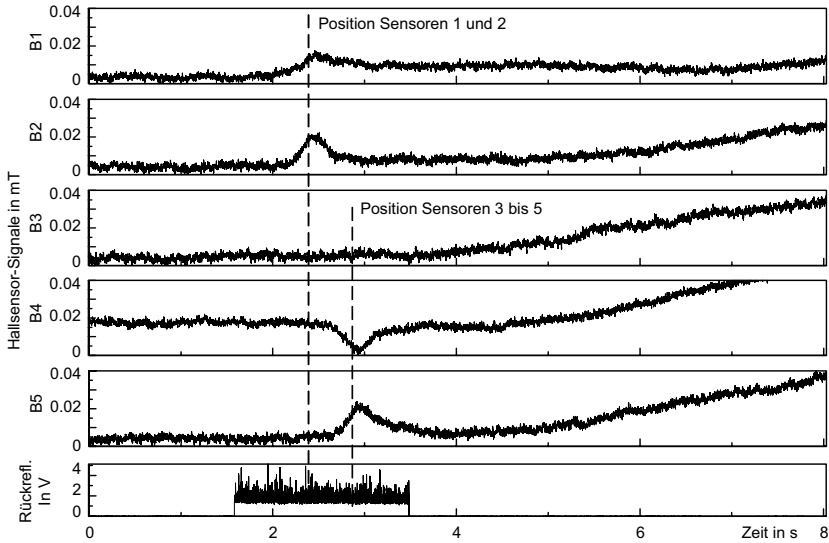


Bild 66: Signale der Hallsensoren; AA5182; $s_M = 3,5$ mm; $P_L = 3,6$ kW; $v_s = 4$ m/min; $v_D = 3,2$ m/min (Al-Si12)

Im Vergleich zu dem Beispiel mit Stahl in Bild 62 zeigten die Signalausschläge bei allen Versuchen mit Aluminium in die entgegengesetzte Richtung. Ebenso fehlte der kleine Gegenausschlag vor dem Passieren des Laserstrahls. Dies bedeutet, dass der Strom vor und hinter der Kapillare in Schweißrichtung fließt (Bild 67).

Das Maximum lag knapp hinter der Kapillare. Ein Ausschlag des Sensors 5 in Bild 66 von 0,017 mT bedeutet nun, da kein ferromagnetischer Werkstoff die Feldlinien ablenkt, einen Stromfluss von 1,1 A.

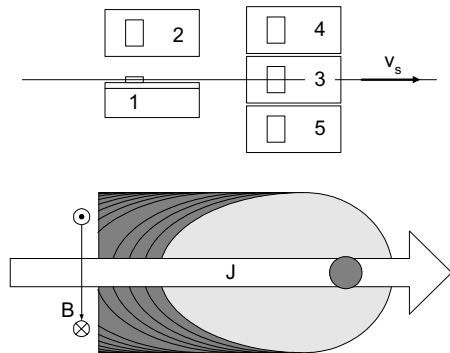


Bild 67: Rückschluss auf den Stromverlauf im Schweißbad (Aluminium)

Der Unterschied in der Stromrichtung im Vergleich zu Stahl könnte aus einem anderen thermoelektrischen Potentialverhältnis von Grundwerkstoff, Schmelze und Erstarrungsgefüge herrühren. Der stärkere Strom bei den Aluminium-Mischgefügen aus Magnesium und Silizium lässt sich durch den großen Abstand der Thermospannungen der einzelnen Elemente erklären (siehe Tabelle 2.2). Während Magnesium und Aluminium als Elemente sehr nah beieinander stehen, liegt Silizium um zwei Größenordnungen weiter entfernt. Die Existenz des Thermostroms wird durch die Untersuchungen beim Laserauftragsschweißen mit unterschiedlichen Legierungen bestätigt [Wild04].

In allen Fällen von Bild 64 ist der Signalausschlag positiv, obwohl man auch einen negativen Ausschlag erwarten könnte. In einigen Fällen wird Magnesium und Silizium zulegiert. In den Fällen ohne Zusatzdraht werden diese Legierungsbestandteile durch Abbrand reduziert. Es bleibt also die Frage offen, welche Gefüge- und Phasengrenzen für den Thermostrom verantwortlich sind.

4.3.3 Versuche mit dem CO₂-Laser

Nachdem im vorherigen Kapitel zwar eindeutige Signale für den Strom gefunden wurden, die allerdings erheblich unter den von KERN gemessenen Größen liegen, soll nun überprüft werden, ob sich für den CO₂-Laser vergleichbare Werte nachweisen lassen oder ob auch hier ein prinzipieller Unterschied besteht.

Der Versuchsaufbau (Bild 68) war aufgrund eines Sensorausfalls einfacher. Es stand kein Sensor für Prozess-Signale zur Verfügung, so dass nicht auf den Zeitpunkt der Überfahrt geschlossen werden konnte.

Bild 69 zeigt einen deutlichen Signalausschlag von 0,03 mT in etwa der gleichen Größenordnung wie im vorherigen

Kapitel beim Nd:YAG-Laser. Die Feldstärken lagen jedoch erheblich unter den von KERN gemessenen Werten von 0,54 mT [Kern99]. Die Signalausschläge von Sensor 1 und 2 zeigen, wie in Bild 63, zunächst einen Strom in Schweißrichtung, dann einen Strom entgegen dieser. Der Ausschlag bei Sensor 4 legt die Vermutung nahe, dass die Sensoren nicht genau mittig überschweißt wurden.

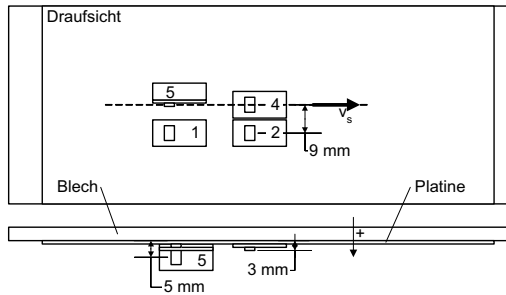


Bild 68: Anordnung der Hallsensoren bei den Versuchen mit dem CO₂-Laser

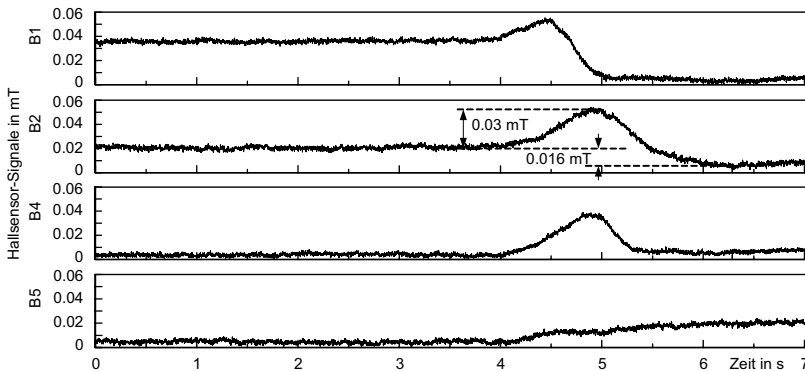


Bild 69: Signale der Hallsensoren; St14; $s_M = 4$ mm; $P_L = 3,7$ kW; $f = 200$ mm; $d_f = 0,4$ mm; $v_s = 3,6$ m/min; He:Ar 7:3 konzentrisch 17 l/min

Bei AA6181A in Bild 70 und AA5182 in Bild 71 kann bei den gewählten Parametern ein Signalausschlag nur sehr schwach erkannt werden. Die Höhe des kaum merklichen Sprungs liegt dennoch in der Größenordnung der Signalausschläge bei artgleichen Aluminiumverbindungen mit Nd:YAG-Lasern aus Bild 64. Erhöht man Leistung und Schweißgeschwindigkeit, so verringert sich der Signalausschlag und verschwindet dann vollends.

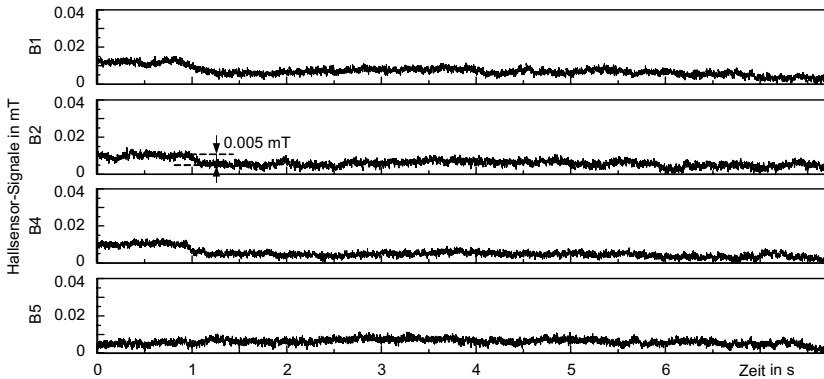


Bild 70: Signale der Hallensoren; AA6181A; $s_M = 4$ mm; $P_L = 3,7$ kW; $f = 200$ mm; $d_f = 0,4$ mm; $v_s = 3,6$ m/min; He:Ar 7:3 konzentrisch 17 l/min

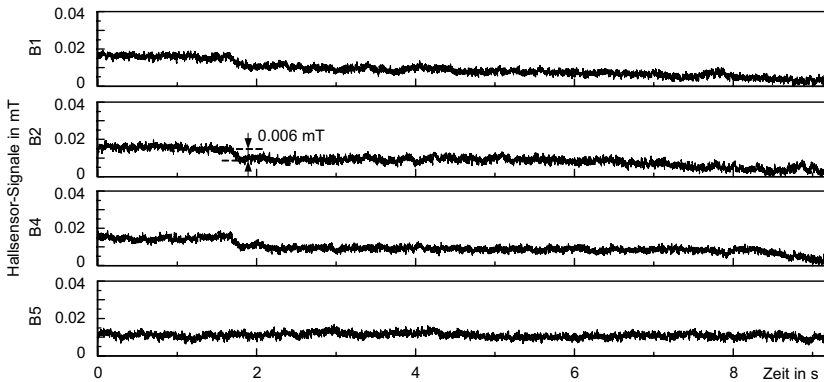


Bild 71: Signale der Hallensoren; AA5182; $s_M = 3,5$ mm; $P_L = 2,6$ kW; $f = 200$ mm; $d_f = 0,4$ mm; $v_s = 3,6$ m/min; He:Ar 7:3 konzentrisch 17 l/min

Die von KERN gemessenen Feldstärken wurden in keinem Fall erreicht, obwohl ähnliche Parameter und Bedingungen bei den Schweißungen vorlagen. Es konnte ein Strom nachgewiesen werden, dessen Richtung bei Stahl mit der von KERN gefundenen Richtung übereinstimmt. Ein triftiger Grund für die Unterschiede ist auf Anhieb nicht ersichtlich. Es könnte die Wirkung einer nicht erkannten Randbedingung sein, oder der Effekt tritt nur in einem sehr begrenzten Parameterbereich auf. Abgesehen von einer veränderten Schmelzbadform liegt an den Phasengrenzen des Schmelzbades bei einer CO₂-Laserschweißung die gleiche Temperatur vor wie bei einer Nd:YAG-

Laserschweißung. Ein thermoelektrischer Strom der zwischen Schmelze und dem starren Gefüge fließt, sollte daher in beiden Fällen der gleiche sein.

4.4 Messen eines aus der Kapillare austretenden Stroms

Nach den hier entwickelten Modellvorstellungen (siehe Bild 23 und Bild 34) erscheint die Möglichkeit einer Emission von Elektronen aus der Keyholewand und der daraus sich ergebende Strom aus der Kapillare heraus plausibel. Dies soll mit dem Versuchsaufbau in Bild 72 (Mitte) für den Nd:YAG-Laser untersucht werden. Zur Mes-



Bild 72: Aufbau zum Nachweis einer emittierten Ladung, Mitte Nd:YAG-, rechts CO₂-Laser

sung eines Stromes wird durch ein Ring-Amperemeter geschweißt. Dieses besteht aus einem Weicheisenring, der die magnetischen Feldlinien des zu messenden Stroms erfasst, einem Hall-Sensor in einem Luftspalt des Ringes und einer Kunststoffschale. Das Signal des Hallsensors wird mit einem Kabel durch den Ring kalibriert. Das Amperemeter wird mit Aluminium-Folie geschützt und am Schweißkopf knapp über dem Fokus montiert. Zwischen Amperemeter und Blech bleibt ein kleiner Spalt. Das Schutzgas wird konzentrisch zugeführt. Neben dem Rückreflexionssignal wird auch das Prozessleuchten und die Wärmestrahlung aufgezeichnet.

Bei Nd:YAG-Laserstrahlung zeigte sich weder bei AA6181A (Bild 73 links) oder AA5182 noch bei Stahl St14 ein Signal des Amperemeters. Als jedoch beim Schweißen mit CO₂-Laser (Bild 73 rechts) bei hoher Leistung und längerer Einschaltzeit der Kunststoff des Amperemeters Blasen warf und sich entzündete, trat neben einem erkennbaren Prozessleuchten und einer veränderten Rückreflexion auch ein deutlicher Strom auf. Dieser war vermutlich durch die bei der Verbrennung entstandenen Ionen verursacht worden. Daher lag die Vermutung nahe, dass das beim Schweißen mit dem CO₂-Laser entstehende Plasma zu einem Stromfluss durch das Amperemeter führen würde. Es wurden die gleichen drei Materialien mit Leistungen von $P_L = 3,8$ bis 6 kW; $f = 270$ mm, $d_f = 0,55$ mm; $v_s = 3$ m/min; He:Ar 1:1 konzentrisch 18 l/min geschweißt

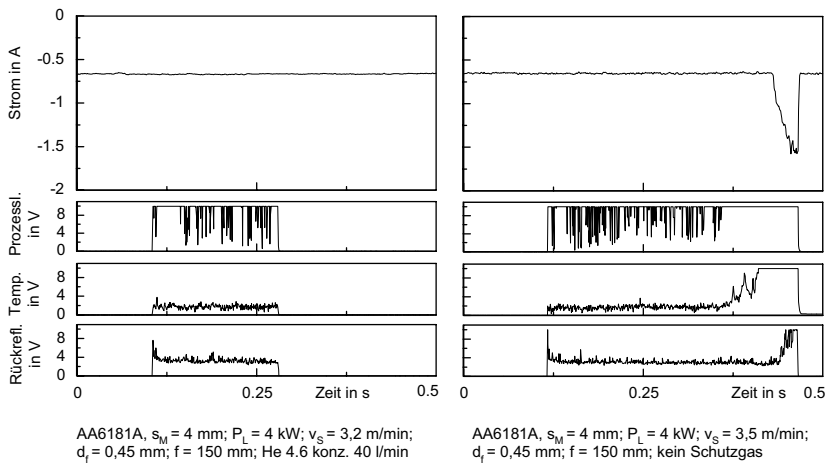


Bild 73: Mess-Signale des Amperemeters bei Nd:YAG; links: kein Stromsignal, rechts: durch brennenden Kunststoff verursachtes Stromsignal

(Bild 72, rechts). Jedoch ließ sich auch hier kein Strom nachweisen. Die Messgenauigkeit lag bei einer Auflösung von 1 mA und 33 kHz Abtastrate 8 mA. Es ist zu vermuten, dass der Elektronenstrom aus der Kapillaröffnung nur in einem sehr engen Radius existiert und so nicht zu einem Strom durch das Amperemeter führt.

In Kapitel 2.2 wurde beschrieben, wie sich ein Strom in einer expandierenden Plasmawolke bilden kann. Die Wolke wurde mit einem Laserpuls auf einem Werkstück erzeugt. Um diesen Strom zu messen, wurden die Hall-Sensoren mit einer Empfindlichkeit von 0,0037 mT neben dem Fokus des Laserstrahls angebracht (Bild 74). Mit dem CO₂-Laser wurden kurze Pulse ($P_L = 8,4$ kW; $d_f = 0,3$ mm; $f = 200$ mm; Dauer $t = 50$ ms; He:Ar 7:3) auf der Oberfläche erzeugt. Aber auch auf diese Weise ließ sich keine Veränderung des Magnetfeldes nachweisen.

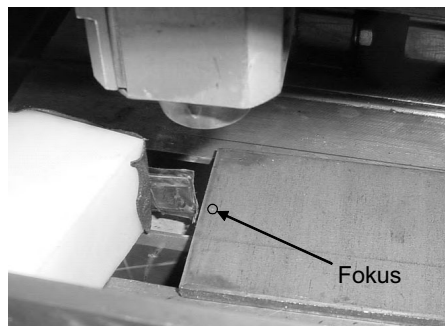


Bild 74: Aufbau zum Nachweis eines Stromes in einer Plasmawolke

4.5 Messen eines induzierten Stroms bei einem zusätzlichen Magnetfeld

In Kapitel 2.3 wurde die Möglichkeit vorgestellt, wie ein Strom in einem bewegten elektrisch leitenden Fluid induziert werden kann. Demnach wäre das externe Magnetfeld dafür verantwortlich, dass ein Strom im Schmelzbad entsteht, der wiederum mit dem externen Feld eine Wirkung auf die Schmelzbaddynamik hat. Dies könnte, wie beim Hartmann-Effekt, eine bremsende oder auch eine umlenkende Wirkung sein. Diese wäre aber unabhängig vom Vorzeichen des Magnetfeldes stets die gleiche.

In diesem Versuch soll der Strom anhand seines selbstinduzierten Magnetfeldes dieses Stromes nachgewiesen werden. Dies muss jedoch in einem starken externen Magnetfeld geschehen. Hierzu wurde die Richtungsabhängigkeit der Hallensoren genutzt. Diese messen nur den zum Messkörper normalen Vektoranteil des Magnetfeldes.

Ein Aluminiumblech wurde, wie in Bild 75 dargestellt, nah entlang der Kante geschweißt. Mittels des Elektromagneten in Vorrichtung Nr. 2 konnten unterschiedliche Feldstärken eines magnetischen Querfeldes erzeugt werden. Der Hallsensor wurde so parallel zum externen Magnetfeld gedreht, dass das Mess-Signal verschwindet. Der Sensor war mit Hochtemperatur-Isolierband und Aluminiumklebefolie vor Licht, Spritzern und Schmauch geschützt.

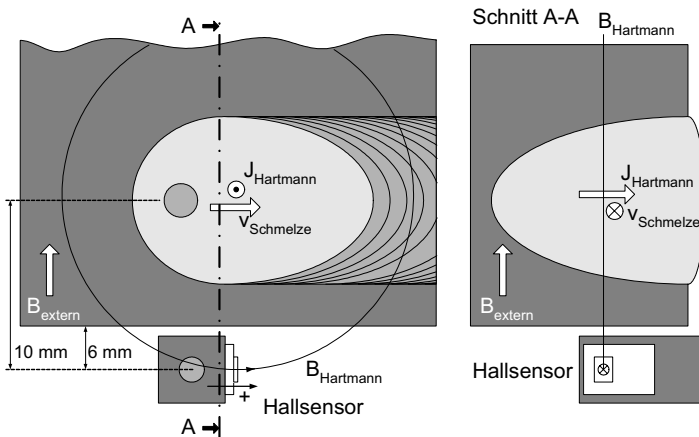


Bild 75: Messprinzip zum Nachweis eines induzierten Stroms im Schmelzbad



Bild 76: Versuchsaufbau: Nd:YAG; AA 6181A;
 $s_M = 4 \text{ mm}$; $P_L = 4 \text{ kW}$; $v_s = 4 \text{ m/min}$; He 4.6 40 l/min

Wird nun aufgrund der Strömung ein Strom im Schmelzbad induziert, erzeugt dieser wiederum ein Magnetfeld, welches nun aber am Ort des Hallensensors um 90° gedreht ist und somit erfasst werden kann. In drei aufeinander folgenden Messungen wurde einmal ohne (Bild 77), einmal mit (Bild 78) und einmal mit einem umgepolten externen Magnetfeld (Bild 79) geschweißt (Stromstärke des Elektromagneten

$I = \pm 40 \text{ A}$, $B = \pm 270 \text{ mT}$). Im ersten Fall zeigte sich kein Ausschlag, im zweiten ein deutlicher positiver Ausschlag von $0,085 \text{ mT}$ und im dritten ein deutlicher negativer Ausschlag von $-0,033 \text{ mT}$. Die Tatsache, dass sich nur bei einem externen Feld ein Signal zeigte und die Richtung von der Polung des externen Feldes abhing, lässt auf einen induzierten Strom schließen. Im Fall von Bild 78 bedeutet ein Sprung von $0,085 \text{ mT}$ nach Gleichung 4.1 eine Stromstärke von $4,3 \text{ A}$. Die Erklärung für die unterschiedliche Höhe der beiden Ausschläge muss aufgrund fehlender weiterer Versuchsreihen offen bleiben.

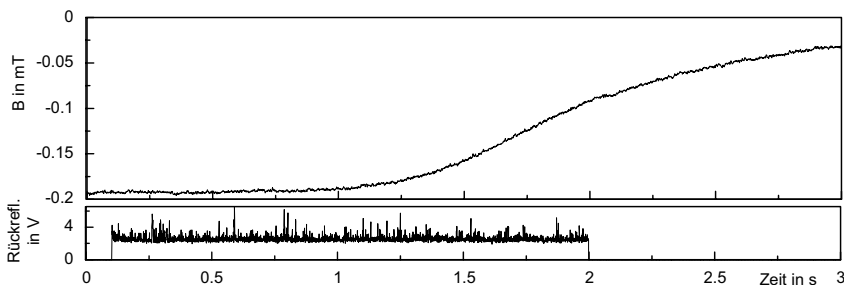
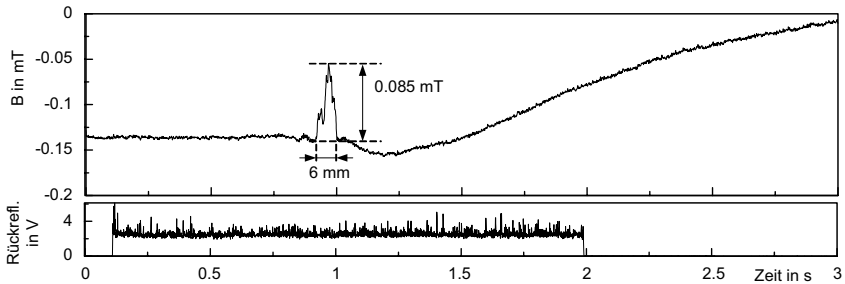
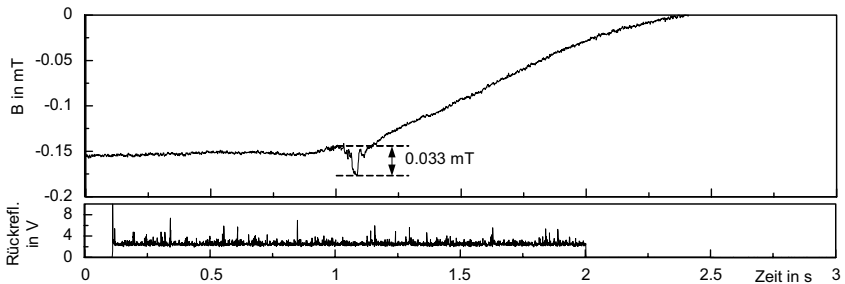


Bild 77: Signal des Hallensensors ohne externes Magnetfeld

Bild 78: Signal des Hallsensors bei einem externen Magnetfeld von $B = 270 \text{ mT}$ Bild 79: Signal des Hallsensors bei einem umgepolten externen Magnetfeld von $B = -270 \text{ mT}$

Wenn ein induzierter Strom in der Schmelze auftritt, hat er auch eine Wirkung. Diese sollte an dem Ort am größten sein, an dem die höchste Geschwindigkeit im Schmelzbad auftritt. Dies ist der Jet um die Kapillare. Die Wirkung kann aber zu gering sein, um als makroskopischer Effekt an der geschweißten Naht sichtbar zu sein. Die Versuche in Kapitel 5 werden zeigen, dass Wirkungen bei Stromstärken oberhalb von 10 A deutlich werden. Eine zwei- bis dreimal höhere Feldstärke würde einen entsprechend höheren Hartmannstrom induzieren und damit wahrscheinlich einen Effekt erkennbar werden lassen. Die Erzeugung eines derart starken Feldes ist jedoch technisch sehr aufwendig (siehe Kapitel 4.1).

4.6 Zusammenfassung der untersuchten Phänomene

Die Wirkung eines Magnetfeldes auf eine Schweißung mit dem CO₂-Laser konnte, wie von KERN beschrieben, nachvollzogen werden. Es zeigte sich bei Stahl und den untersuchten Aluminiumlegierungen die gleiche Abhängigkeit der Wirkung von der Richtung des Magnetfeldes. Hingegen war dieser Effekt bei den Schweißungen mit dem Dauerstrich-Festkörperlaser nicht vorhanden. Lediglich ein richtungsunabhängiger Effekt konnte bei der sehr schlanken Schweißnaht mit dem Scheibenlaser festgestellt werden.

Wie in Kapitel 2 diskutiert, können verschiedene Effekte infolge eines angelegten Magnetfelds auftreten. Als Erklärung des richtungsunabhängigen Effekts kommen durch das externe Feld induzierte Ströme in Frage, die nachgewiesen wurden.

Weiterhin wurden sowohl beim CO₂- als auch beim Nd:YAG-Laser beim Schweißen in Stahl und Aluminium Thermostrome gefunden, wenngleich nicht in der Höhe, wie sie von KERN beschrieben wurden. Bei Stahl unterstützt die ermittelte Richtung des Thermostroms im Schmelzbad hinter der Kapillare entgegen der Schweißrichtung auch die Annahme einer Vorzugsrichtung. Die Richtung des bei Aluminium im Nd:YAG-Prozess gefundenen Thermostroms widerspricht der postulierten Vorzugsrichtung.

Diese gefundenen Ergebnisse begründen nicht, warum beim CO₂-Laser ein so deutlicher richtungsabhängiger Effekt auftritt, während dies beim Festkörperlaser nicht der Fall ist. Da die Schmelzen in beiden Fällen nicht heißer als die Verdampfungstemperatur in der Kapillare werden können, kann es nicht nur an einem thermoelektrischen Effekt von Schmelze, Grundwerkstoff und Erstarrungsgefüge liegen. Bei der Erklärung des Effekts muss das Plasma mitberücksichtigt werden; es sei denn, es existiert ein sehr spezieller Unterschied der Schmelzbad- und Kapillargeometrien zwischen den Lasertypen, der bisher noch nie diskutiert wurde. Der wesentliche Unterschied zwischen beiden Lasertypen ist jedoch die Wellenlänge und davon abhängig die Temperatur und der Grad der Ionisierung des Plasmas bzw. des Metaldampfes in und oberhalb der Kapillare. Deshalb ist der Grund für das unterschiedliche Verhalten in noch nicht geklärten Auswirkungen des Plasmas zu suchen.

Ein Strom durch sich ausbreitende Plasmawolken konnte hier nicht experimentell nachgewiesen werden. Anhand der berechneten Kennzahlen aus Kapitel 2 können mögliche Effekte zumindest eingegrenzt werden. Die in dieser Arbeit erfolgte umfas-

sende Klärung des physikalischen Hintergrundes lässt das in Bild 23 postulierte Modell sehr plausibel erscheinen.

Die Temperaturverteilung in der Kapillare ist u.a. abhängig von der Kapillarform, Brechung, Reflexion und Absorption des Lichtes und dem Verdampfen und Ausströmen des Materials. Vor diesem Hintergrund sollten in zukünftigen Arbeiten der magnetische Druck, der Richardson-Effekt, der Photoeffekt und mögliche Potentialunterschiede im Plasma näher untersucht werden. Ebenso dürfte sich ein Effekt beim Schweißen von Stahl mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser zeigen. Diese Effekte könnten auch bei abtragenden Verfahren eine Rolle spielen.

Da der Schwerpunkt der Arbeit auf der Anwendung des Nd:YAG-Lasers für industrielle Schweißapplikationen liegt, soll im Weiteren der Frage nachgegangen werden, wie sich auch bei dessen Wellenlänge ein nützlicher Effekt durch äußere elektromagnetische Beeinflussung erzeugen lässt.

5 Einfluss von Magnetfeldern und externem Strom

5.1 Varianten der elektromagnetischen Beeinflussung

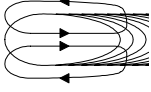
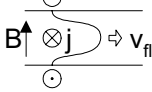
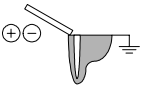
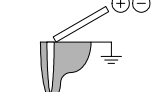
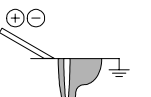
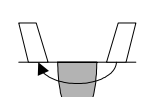
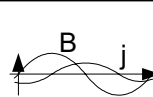
Beim Laserstrahlschweißen von Aluminium im Fahrzeugbau wird in der Regel ein Zusatzdraht zur Vergrößerung des Anbindungsquerschnitts und, je nach Legierung, auch zur Vermeidung von Heißrissen verwendet. Durch ihn kann sehr einfach ein Strom in das Schmelzbad eingeleitet werden. Variiert man die möglichen Richtungen von Magnetfeld und Strom, sowie deren zeitlichen Verlauf, so ergeben sich aus den Kombinationen zahlreiche Ansätze über elektromagnetische Volumenkräfte in den Prozess einzugreifen. Die Varianten sind in Bild 80 in Form eines morphologischen Kastens dargestellt. Es wird zwischen der räumlichen Gestalt von Magnetfeld und Stromdichte und ihrem zeitlichen Verlauf unterschieden. Jedes alternative Merkmal wird in einer Zeile unterschieden. Die Ausführungsmöglichkeiten eines jeden alternativen Merkmals werden in einer Zeile aufgeführt. Die Anregungsmöglichkeiten ergeben sich aus der Kombination der ausgewählten Felder aus je einer Zeile.

Beim Schweißen existiert zunächst der thermoelektrische prozesseigene Strom. Durch ein externes Magnetfeld kann ein Strom induziert werden, wenn ein Leiter im Magnetfeld bewegt wird. Dieser Leiter könnte die Schmelze oder das Plasma sein. Ein externer Strom kann über Elektroden nahe dem Schmelzbad in das Grundmaterial oder über den Zusatzdraht schleppend oder stechend direkt in die Schmelze geleitet werden. Ebenso können Ströme durch ein zeitlich veränderliches Magnetfeld induziert werden.

Neben dem Eigenmagnetfeld eines externen Stromes kann ein konstantes oder wechselndes Magnetfeld in drei Freiheitsgraden zur Schweißrichtung orientiert sein. Eine weitere Möglichkeit sind wandernde Felder wie bei einem Elektro- oder Linearmotor [Bir86].

Neben der Polarität von Strom und Feld können der Mittelwert, die Amplitude, die Frequenz, die Schwingungsform (Sinus, Rechteck, Dreieck, Sägezahn) variiert oder eine zusätzliche Modulation angewendet werden. Das Magnetfeld kann zeitlich konstant sein oder mit unterschiedlichen Frequenzen schwingen.

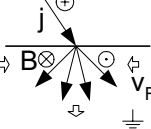
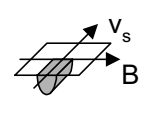
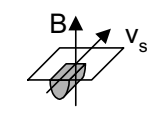
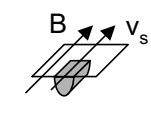
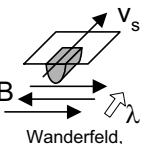
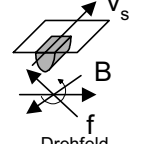
Stromzufuhr und Verlauf

| | | | |
|---|---|---|---|
|  |  |  |  |
| Prozesseigener Strom | Induziert in Schmelze oder Plasma | externer Strom in Draht, schleppend | externer Strom in Draht, stechend |
|  |  |  | |
| externer Strom in Elektrode, längs | externer Strom in Elektroden, quer | Induzierte Wirbelströme | |

Zeitlicher Stromverlauf

| | | | |
|---|-------------|-------------------------------|-------------------|
| Prozesseigener Strom (konst. oder fluktuierend) | Gleichstrom | Wechselstrom (Frequenz, Form) | Moduliert / Pulse |
|---|-------------|-------------------------------|-------------------|

Magnetfeld

| | | | |
|---|---|---|---|
|  |  |  |  |
| Eigenfeld eines externen Stroms | quer waagrecht, 2 Polaritäten | quer senkrecht, 2 Polaritäten | längs, 2 Polaritäten |
|  |  | | |
| Wanderfeld, div. Richtungen | Drehfeld, div. Achsen | | |

Frequenz Magnetfeld

| | | |
|------------|-------------|----------------|
| Gleichfeld | Wechselfeld | Gepulstes Feld |
|------------|-------------|----------------|

Bild 80: Morphologischer Kasten mit ausgewählten Einflussmöglichkeiten zur Erzeugung von Kräften in der Schmelze, die in dieser Arbeit näher betrachtet werden

Der prozesseigene Strom ist, wie in Kapitel 4.2 gezeigt wurde, beim Schweißen mit Nd:YAG-Lasern nur sehr schwach vorhanden. Ebenso ist der bei konstantem Magnetfeld induzierte Strom in der Schmelze nur sehr gering. Hinsichtlich der Erzeugung eines eigenmagnetischen Feldes durch einen starken Strom und die daraus resultierenden elektromagnetischen Kräfte sei auf die Arbeiten von XIAO und AMBROSY verwiesen [Xiao01]. Versuche mit einem Gleitfinger wurden beim CO₂-Laser ebenfalls von AMBROSY durchgeführt [Amb01].

Diese Arbeit beschränkt sich auf die in Bild 80 hervorgehobenen Orientierungen eines externen Magnetfeldes und Stromes. Letzterer wird als Gleichstrom und als sinusförmiger Wechselstrom unterschiedlicher Frequenzen variiert. Es soll der Einfluss auf jeweils einen optimierten Referenz-Schweißprozess (ohne Felder) der Legierungen AA5182 und AA6181A untersucht werden. Bei der Suche nach nützlichen Konfigurationen gilt es zunächst, einen Überblick über die Wirkungen zu erhalten. Interessant ist die Frage, ob und bei welchen Varianten sich Effekte zeigen, in welchen Parameterfenstern sie auftreten, wie sie in das Prozessgeschehen eingreifen und wie sie für Anwendungen nutzbar zu machen sind.

5.2 Versuchsaufbau und Referenzprozesse

Der Versuchsaufbau (Bild 81) bestand aus einem KUKA KR150/2 Roboter, einem Trumpf-Laser 4006 D, einem Aluminium-Schweißkopf der Fa. HIGHYAG und einem Push-Pull-Drahtfördergerät der Fa. KUKA. Über die Sensoren der Fa. Precitec konnten beim Schweißen Rückreflexion, Thermostrahlung und Prozessleuchten aufgezeichnet werden. Für Aufnahmen des Schmelzbades wurde der am IFSW entwickelte Versuchsaufbau mit Hochgeschwindigkeitskamera, Beleuchtungslaser und Triggerschaltung verwendet [Ho-

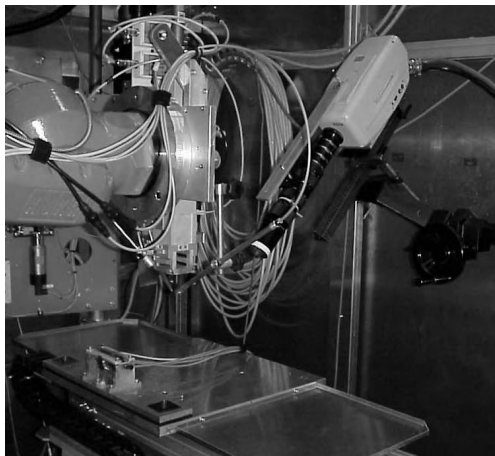


Bild 81: Versuchsaufbau mit Spannvorrichtung, Lineareinheit und Hochgeschwindigkeitskamera

hen03]. Ein enger Bandpassfilter vor dem Objektiv der Kamera ließ nur die kurzen am Schmelzbad reflektierten Blitze des Beleuchtungslasers durch. Für eine feste Position des Schweißkopfes bei der Aufnahme wurde unter die Spannvorrichtungen eine Lineareinheit installiert. Um die Messungen nicht zu verfälschen oder die Magnetfelder nicht zu beeinflussen, wurde beim Bau des Schweißkopfes und der Vorrichtungen auf ferritischen Stahl verzichtet.

Ziel war es, zunächst Schweißparameter zu finden, die zu einem stabilen reproduzierbaren Ergebnis führen, vor dem dann elektromagnetische Einflüsse aufgezeigt werden können. Es wurden zu den Legierungen passende Zusatzwerkstoffe ausgewählt. Die Drahtzufuhr erfolgte zunächst schleppend.

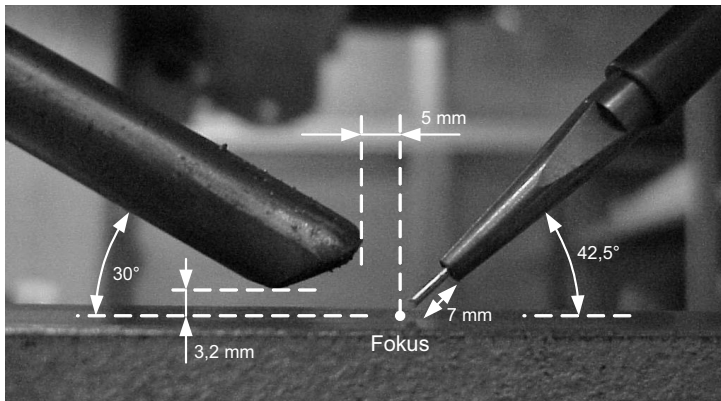


Bild 82: Draht- und Gaszufuhr

Bei maximaler Leistung wurde die Vorschubgeschwindigkeit so gewählt, dass eine Einschweißtiefe von etwa 90% der Blechdicke entstand. Dabei wurde die Drahtgeschwindigkeit auf 80% der jeweiligen Schweißgeschwindigkeit gesetzt. Weiterhin wurde die geometrische Anordnung der Draht- und Gaszufuhr sowie die Gasmenge optimiert (Bild 82). In Tabelle 5.1 sind die Parameter zusammengefasst. Bei der Legierung AA5182 wurde die Leistung etwas verringert, damit die Schweißgeschwindigkeit nicht zu groß wurde.

Die Schweißnaht der Legierung AA5182 wies eine gleichmäßige, wenn auch unruhige Schuppung auf (Bild 83). Neben der Naht hafteten Schweißspritzer. Auswürfe der ganzen Schmelze waren nicht zu sehen. Das Röntgenbild (Bildgüte BZ W16 nach EN 462-1) zeigte ebenso wie der Längsschliff, deutliche Porenketten. Im Hinblick auf ein Verständnis der Dynamik im Prozess wurden erkennbare Perioden ausgemessen. Das

Spektrum reichte von 20 Hz bei deutlichen Schuppen der Naht, über 49 bis 64 Hz der Porenketten, 186 Hz der Nahtschuppung und bis zu 297 Hz in der Erstarrungszone.

| Parameter \ Material: | AA6181A | AA5182 |
|---------------------------------------|-----------------|-----------------|
| Chemische Bezeichnung | Al Mg0,8 Si0,9 | Al Mg4,5 Mn0,4 |
| Laser | Nd:YAG | Nd:YAG |
| Blechstärke s_M | 4 mm | 3,5 mm |
| Nahtform | Blindschweißung | Blindschweißung |
| Zusatzwerkstoff | AlSi-12 | Al Mg4,5 Mn Zr |
| Drahtzufuhr | schleppend | schleppend |
| Drahtdurchmesser | 1,2 mm | 1,2 mm |
| Laserleistung P_L | 4 kW | 3,6 kW |
| Brennweite f | 150 mm | 150 mm |
| Fokusedurchmesser d_f | 0,45 mm | 0,45 mm |
| Fokusslage z | 0 mm | 0 mm |
| Schweißgeschwindigkeit v_s | 3,6 m/min | 4 m/min |
| Drahtgeschwindigkeit $v_d = 80\% v_s$ | 2,8 m/min | 3,2 m/min |
| Schutzgas und Menge | He 4.6 40 l/min | He 4.6 40 l/min |

Tabelle 5.1: Referenz-Schweißparameter

Bild 84 zeigt ein Standbild der Schweißung aus einem Hochgeschwindigkeitsfilm. Man kann den Grundwerkstoff, den Draht, die Kapillare, das Schmelzbad und die entstehende Schweißraupe erkennen. Auf dem Schmelzbad sind zum einen die hellen direkten Reflexionen des Beleuchtungslaserlichts an der metallischen Oberfläche, zum anderen die dunkle Oxidhaut zu sehen. Nicht im Bild ist das Prozessleuchten von Metaldampf und Schutzgas enthalten, da dieses vom Filter blockiert wurde. Die Schmelze erscheint im Film unruhig und dünnflüssig. Der Draht trifft an den vorderen Rand der Kapillaröffnung, so dass dieser von einem Teil der Laserleistung aufgeschmolzen wird. Wellen durchlaufen das Schmelzbad. Die Kapillare schwappt häufig zu. Vom Rand der Kapillare lösen sich Spritzer. Dies geschieht teilweise in Kombination mit starken Pegeländerungen des Schmelzbades. Diese Unruhe des Bades führt an seinem Ende zur Schuppung der Raupe.

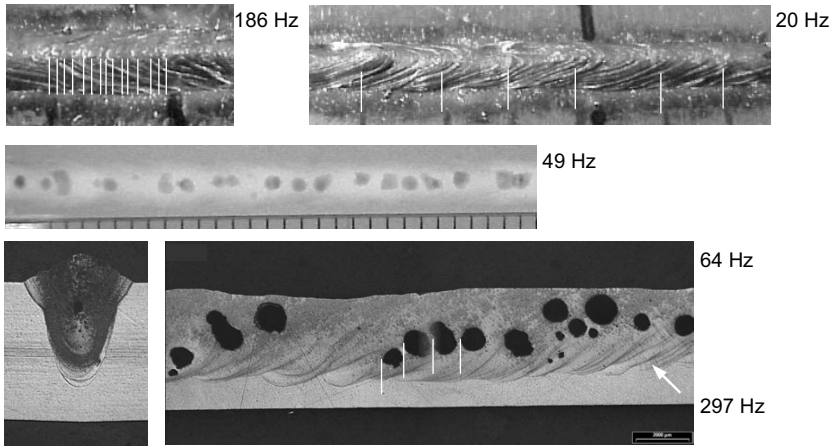


Bild 83: Referenznaht AA5182 mit erkennbaren Frequenzen

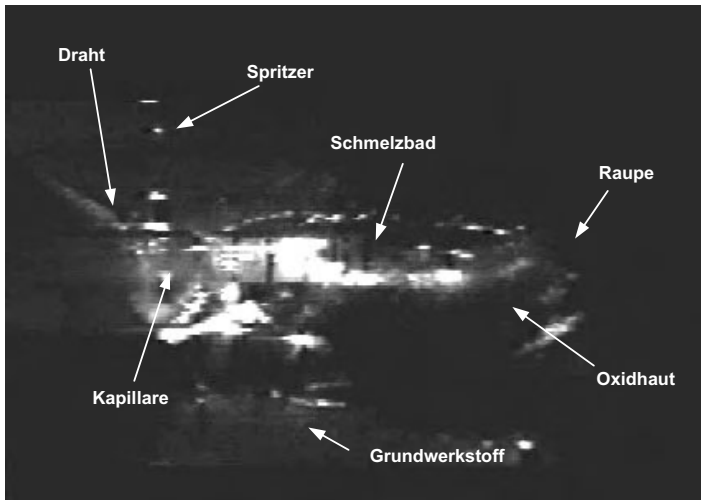


Bild 84: Standbild Schweißprozess AA5182

Bei Schweißungen der Legierung AA6181A zeigte sich eine glatte, aber immer noch leicht geschuppte Raupe (Bild 85). Es entstanden weniger und kleinere Poren. Es traten auch weniger Spritzer auf. Die Frequenz der Schuppen war etwas geringer, aber ansonsten entsprachen die Größenordnungen der Frequenzen denen beim Werkstoff AA5182 (Bild 83).

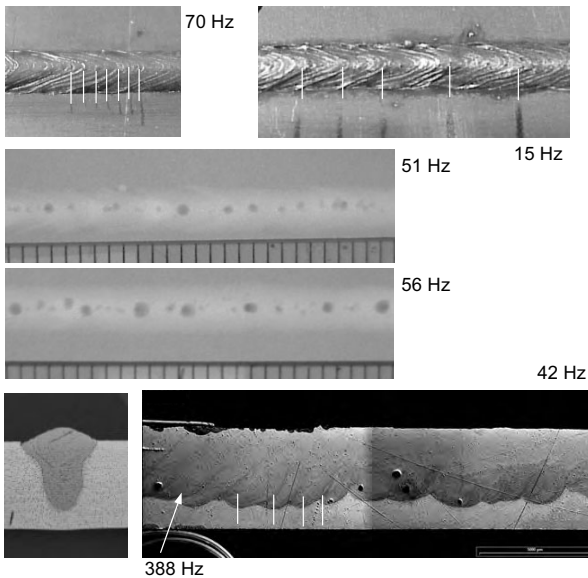


Bild 85: Referenznaht AA 6181A mit erkennbaren Frequenzen

Der Hochgeschwindigkeitsfilm, aus dem Bild 86 stammt, zeigt ein ruhigeres Schmelzbad mit nur schwachen Wellen, eine glattere Oberfläche mit dunklen Oxidflecken und nur vereinzelt Spritzern und Prozessaussetzern. Bei beiden Werkstoffen zeigten sich im Ablauf des Schweißprozesses eine innere Unruhe und verschiedene stochastisch auftretende Vorgänge.

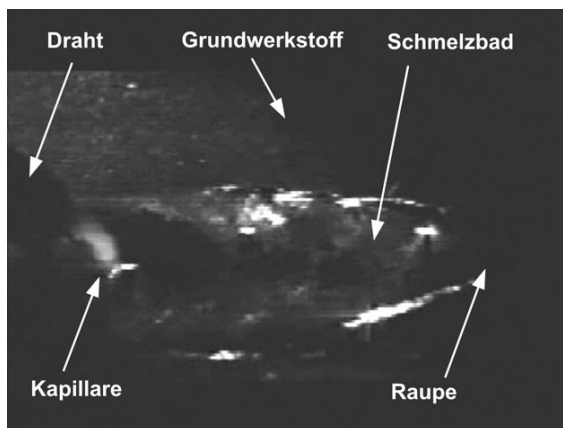


Bild 86: Standbild Schweißprozess AA6181A

Aufgrund des gleichbleibenden, einheitlich wirkenden Ergebnisses kann aber in beiden Fällen von einem makroskopisch stabilen Prozess gesprochen werden.

5.3 Konstantes Magnetfeld und Gleichstrom bei schlep- pender Drahtzufuhr

Für alle drei Grundorientierungen des Magnetfeldes (Bild 80) zur Schweißrichtung kamen Spannvorrichtungen mit Dauermagneten zum Einsatz. Für die waagerechte Anordnung quer zur Schweißrichtung wurde Vorrichtung Nr. 1 (Bild 44) verwendet. Für die beiden anderen Orientierungen wurde eine dritte Vorrichtung (Nr. 3, Bild 87) erstellt.

Mit ihr können verschiedene Richtungen des Magnetfeldes zugleich überprüft werden. Zwei verdreht hintereinander angeordnete Magnete erzeugen ein Feld, das sich entlang der Schweißbahn einmal um 360° dreht. Hierbei verkürzt eine Eisenplatte unterhalb der Magnete die Länge der Feldlinien, so dass die Flussdichte in der Schweißzone erhöht wird. Bild 88 zeigt die mit einer Hallsonde gemessene horizontale und senkrechte Komponente des Feldes und die daraus errechnete Resultierende B_{Res} .

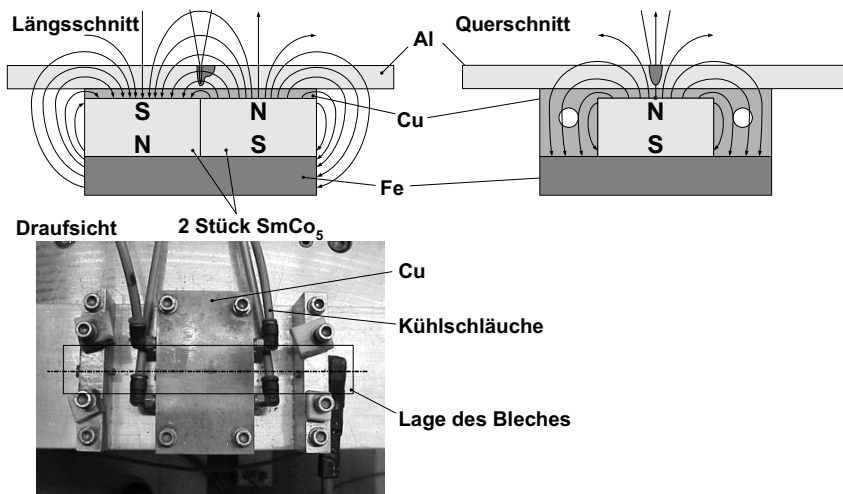


Bild 87: Vorrichtung Nr. 3 mit Permanentmagneten in Längsanordnung

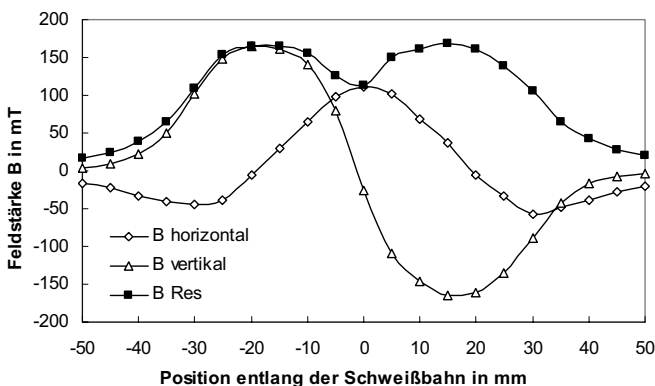


Bild 88: Feldstärke in der Magnetvorrichtung Nr. 3

Der Strom wurde über die heißdrahttaugliche Drahtzufuhr eingeleitet. Die Leerlaufspannung lag unter 10 V, so dass kein Lichtbogen gezündet wurde. Der Masseanschluss wurde am Blech nahe des Nahtanfangs angebracht. Die Stromstärke wurde jeweils auf einen konstanten Wert geregelt und wurde mit einem Ring-Stromwandler erfasst und zusammen mit den Prozess-Signalen aufgezeichnet.

Die Bildung von Tropfen oder ein Abriss im Materialübergang führt zu Unterbrechungen des Stromflusses (Bild 89). Wenn der Strom unterbrochen wird, fällt die elektromagnetische Kraft aus, bis wieder eine leitende Verbindung besteht.

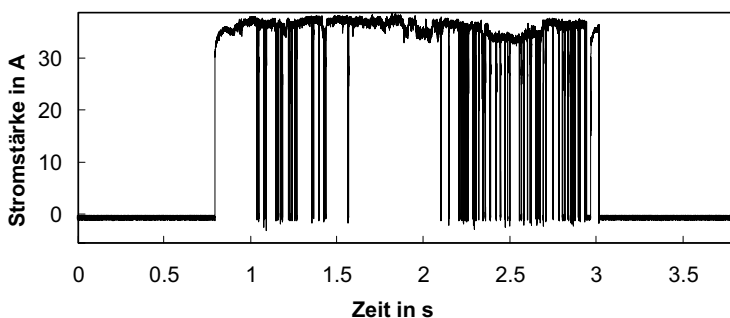


Bild 89: Unterbrochener Stromfluss bei Tropfenbildung

Die jeweils zwei möglichen Polungen eines Magnetfeldes horizontal quer zur Schweißrichtung mit der Vorrichtung Nr. 1 und die eines externen Stromes durch den

Draht ergeben vier Kombinationen. Dabei zeigten sich bei je zweien die gleichen Effekte (Bild 90). Diese entsprachen einander durch die Umkehr beider Polungen. Die ersten zwei Fälle führten bei einer Stromstärke von 25 A zu einer deutlichen Glättung der Oberraupe (Mitte). Die anderen zwei Fälle führten zu einer deutlichen Abnahme der Porenanzahl bei einer etwas unruhigeren Schuppung (unten). Ohne externen Strom zeigte sich keine Veränderung zur Referenz aus Kapitel 5.2 (oben).

Am abschmelzenden Draht fließt der Strom in verschiedene Richtungen ab. Da hier die Stromdichte am größten ist und somit die stärkste Lorentz-Kraft im Materialübergang entsteht, wurde die Hauptrichtung des Stroms als vertikal verlaufend angenommen. Mit der Richtung des Magnetfeldes zeigt die resultierende Hauptkraftwirkung damit entweder in oder entgegen der Schweißrichtung. Diese Einteilung der Ergebnisse wird auch durch die nachfolgenden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen gestützt und soll in den weiteren Unterkapiteln näher dargestellt werden. Es sei angemerkt, dass EDX-Analysen (energiedispersive Röntgenspektroskopie) keine Auffälligkeiten in der Verteilung des Elementes Silizium in den Querschliffen zeigten.

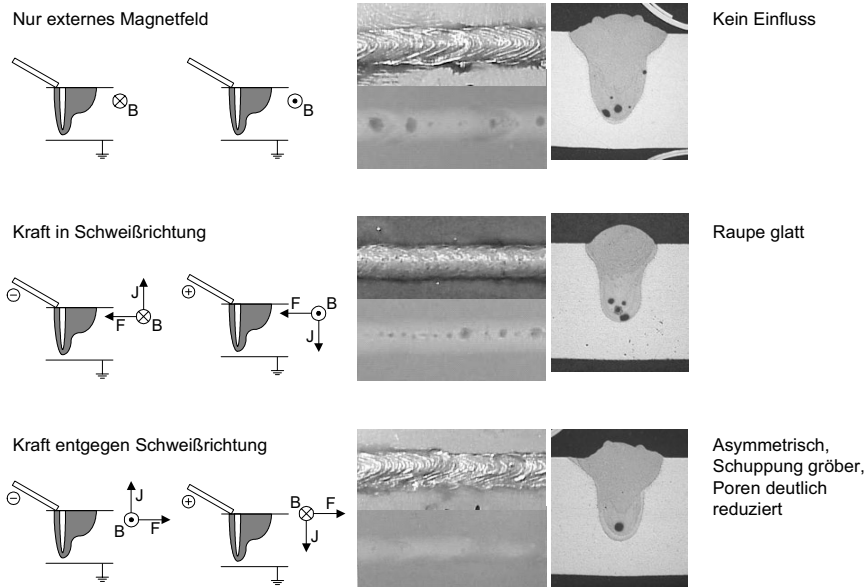


Bild 90: Wirkung einer elektromagnetischen Kraft in oder entgegen der Schweißrichtung (AA6181A)

5.3.1 Kraftwirkung in Schweißrichtung

Zunächst sollen die beiden mittleren Fälle aus Bild 90 mit der Kraft in Schweißrichtung behandelt werden. Betrachtet man die Nähte im Querschliff, fällt im Vergleich zur pilzförmigen Referenz (oben) eine etwas geringere Einschweißtiefe auf. Auf dem Röntgenfilm erkennt man, dass die Porenkette im Inneren verändert ist.

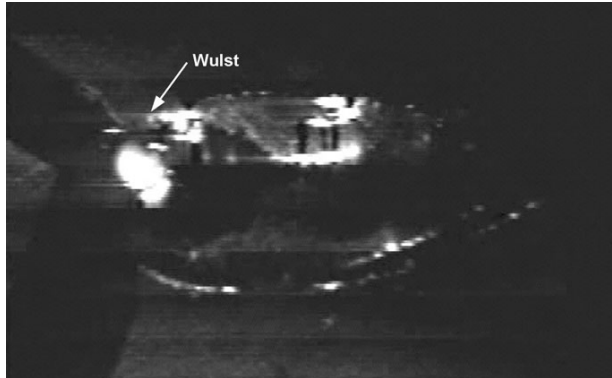


Bild 91: Wulst nahe des Keyholes und Vermeidung von Pegelschwankungen (AA6181A)

Vergleicht man die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen in Bild 91 mit der Referenz in Bild 86, fällt zunächst der Schmelzwulst nahe des Keyholes und das Ausbleiben von großen Pegelstandsänderungen im Bad auf. Bei der Referenz stammt diese Unruhe aus den in Kap 1.1 beschriebenen Phänomenen des Keyholes. Das Aufblasen der Kapillare und der anschließende Einbruch führt nicht nur zu Spritzern, sondern auch zu großen Wellen, die ans Ende der Naht laufen. Dabei zeigt der Film, dass es nicht die vielen kleinen Wellen, sondern jene selteneren großen Wellen sind, die zur Schuppung der Raupe führen. Mit dem angelegten Strom schwappt die Kapillare nach wie vor zu. Es entstehen auch Spritzer. Es wird jedoch die Unruhe des Keyholes gedämpft, was zum Ausbleiben der großen Wellen führt.

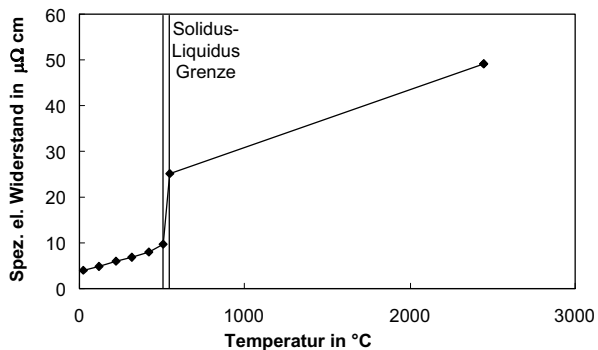


Bild 92: Temperaturabhängigkeit des speziellen elektrischen Widerstands von Aluminium [Sudnik]

Mit Kenntnis des spezifischen elektrischen Widerstandes von Aluminium (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) lässt sich ein ungefähres Bild des Stromverlaufs im Schmelzbad erstellen (Bild 93). Je wärmer das Material ist, desto größer wird der Widerstand. Ein zusätzlicher Sprung erfolgt an der Solidus-Liquidus-Grenze. In der Nähe der heißen Kapillare herrscht der größte Widerstand. Ein großer Teil des Stroms fließt unmittelbar in die kältere Wand des Grundwerkstoffs. Ein Teil fließt durch das Schmelzbad. Nach dem Kreuzprodukt von Strom und magnetischer Flussdichte ergeben sich unterschiedliche Wirkrichtungen der Kraft, je nachdem, ob der Strom nach unten, vorne oder hinten im Schmelzbad fließt.

Der Wulst neben dem Draht ist eine Folge der nach oben gerichteten Kraft vor der Kapillare. Im hinteren Verlauf des Schmelzbades zeigt die Kraft nach unten. Dies erzeugt einen Druck von hinten auf die Kapillare, welcher die Neigung der Kapillare, sich abzuschnüren, verstärkt, aber auch ein Aufblähen verhindert. Die reduzierte Einschweißtiefe könnte von einer verminderten Abwärtsströmung vor der Kapillare herrühren. Sie würde weniger Energie über die Strömung in die Tiefe leiten.

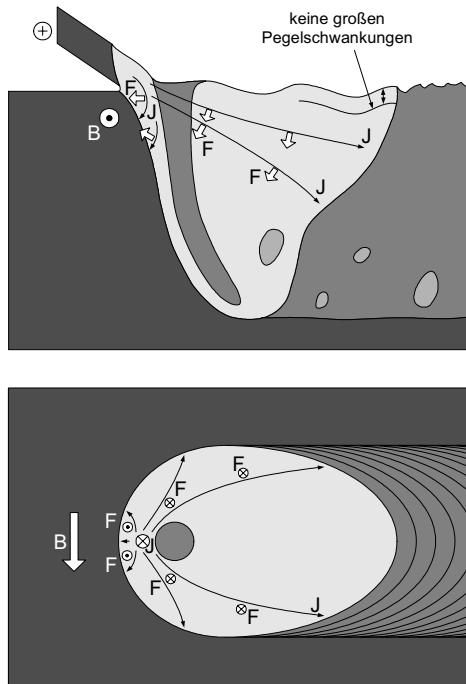
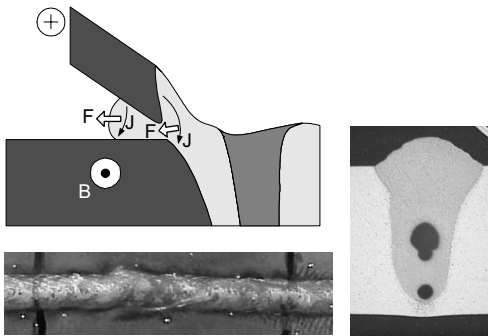


Bild 93: Stromfluss und elektromagnetische Kräfte



Erhöht man den Strom von 25 auf 50 A, wandern Tropfen unter dem Draht hindurch nach vorne, die dann wieder vom Schmelzbad eingeholt werden und seitlich hinein fließen. Gelegentlich bleiben diese auch neben der Naht liegen. Der Schmelzbadpegel ist aufgrund des fehlenden Materials tiefer und die Einschweißtiefe steigt. Die Nahtraupe ist nicht mehr glatt (Bild 94).

Bild 94: Stärkerer Strom führt zu Tropfenwanderung unter dem Draht (AA6181A)

Die Kraftwirkung im Materialübergang übersteigt offenbar die Gegenkraft der Oberflächenspannung (siehe Kapitel 1.1) und die Schmelze schnürt sich zwischen Draht und Kapillarvorderseite ein.

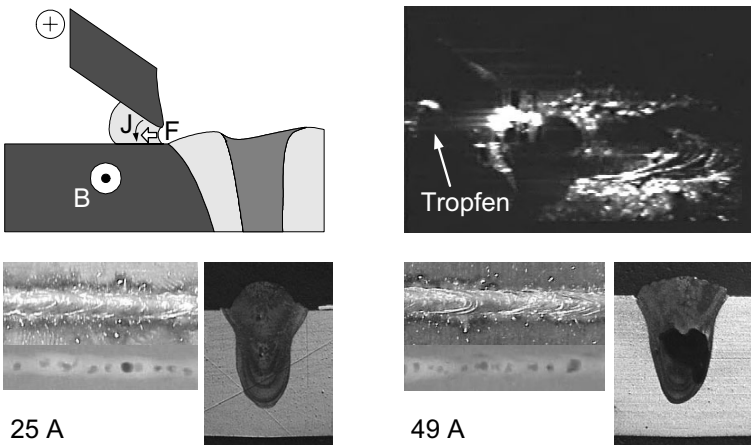


Bild 95: Kraft in Schweißrichtung führt bei AA5182 zur Bildung von Spritzern

Die Bedeutung der Kraft auf den flüssigen Leiter im Materialübergang und die geringe Oberflächenspannung zeigt sich sehr viel deutlicher beim Schweißen von AA5182. Der 5%-ige Magnesiumanteil verdampft an der Oberfläche der Schmelze stärker und reduziert somit die Oberflächenspannung [Rapp96]. Bei einer Stromstärke von sowohl 25 A als auch 50 A schießt sofort ein Tropfen nach vorne, sobald ein leitender Kontakt zwischen Draht und Schmelze besteht (Bild 95). Damit kann keine Kraftwirkung auf

das Schmelzbad ausgeübt werden. Aufgrund des Material- und Energieverlustes ist das Schmelzbad kleiner und die Naht flacher. Eine Verbesserung der Nahtqualität tritt nicht auf.

5.3.2 Kraftwirkung entgegen der Schweißrichtung

Die beiden unteren Fälle in Bild 90 zeigen eine unruhigere Raupe, die zur unbeeinflussten Schweißbahn leicht versetzt ist. Der Bereich der Wärmeleitung ist im Querschliff unsymmetrisch, und der untere tiefgeschweißte Bereich ist ebenfalls zur Mitte versetzt. Bei einer Stromstärke von 25 A und 50 A kam es bei der anzunehmenden Kraftwirkung entgegen der Schweißrichtung zu einer deutlichen Reduzierung der Porenzahl im Vergleich zur Referenzschweißung.

In der Hochgeschwindigkeitsaufnahme (Bild 96) ist zu sehen, wie Schmelze aus dem Bad über die Werkstückoberfläche gehoben wird. Diese Welle ist relativ beständig, bleibt mit dem Schmelzbad verbunden und geht neben der Kapillare vorbei. Wenn sie jedoch zu groß geworden ist, fällt sie am Ende wieder langsam ins Schmelzbad zurück.



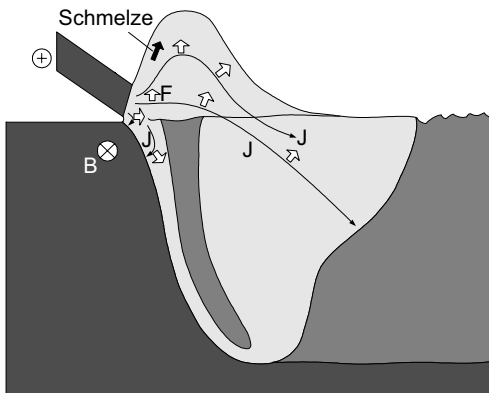
Dieses ist sehr viel ruhiger, als das der Referenzschweißung.

Es erscheint nun, als habe es

eine laminare Strömung. Sehr deutlich ist das große und stabile Keyhole erkennbar. Ein Zuschwappen der Kapillare wird verhindert und die Anzahl der Poren ist deutlich reduziert. In Einzelfällen sind gar keine Poren mehr auf dem Röntgenfilm erkennbar. Das Material welches normalerweise im Schmelzbad durch schmalen Spalt zwischen Wand und Kapillare mit hoher Geschwindigkeit strömt, wird nun oberhalb dieser Enge vorbeigeführt.

Bild 96: Schmelze wird neben Kapillare angehoben (AA 6181A)

Anhand der Hochgeschwindigkeitsaufnahme und des Stromverlaufs lässt sich dieser Effekt erklären (Bild 97): Aus dem Draht fließt der Strom entgegen der Schweißrichtung und dann nach unten ab. Dieser erzeugt mit dem waagerechten Magnetfeld eine anhebende Kraft. Vor der Kapillare fließt ein Teil des Stroms in die Wand und die resultierende Kraft beschleunigt die Schmelze nach unten. Der Teil, der in der Schmelze an der Kapillare vorbeifließt, hebt die Schmelze ebenfalls an.



Die Ursache für die Asymmetrie wurde in weiteren Versuchen ermittelt. Auf welcher Seite der Kapillare die Schmelze angehoben und abgelenkt wird, hängt von der genauen Position des Drahtes ab. Der Scheitelpunkt für den Wechsel der Welle auf die andere Seite liegt in der Mitte vor dem Schmelzbad. Für ein stabiles Verhalten wäre also in einer praktischen Anwendung ein deutlicher Versatz des Drahtes zu einer Seite sinnvoll.

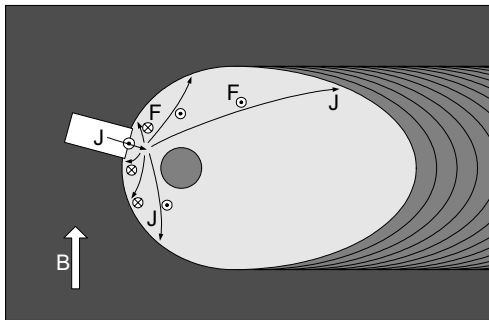


Bild 97: Entstehung der Welle durch elektromagnetische Kräfte (oben) und Entstehen der Asymmetrie

Bei der höheren Stromstärke von 50 A entstehen auch mehr Spritzer. Dies kann man ebenso anhand der Aufnahmen erklären (Bild 98). Unterhalb des Drahtes wird die Schmelze eingeschnürt und somit auch der Stromfluss umgelenkt. Es kommt zur Bildung von Bögen, die aufgrund der nach außen gerichteten Kraft schnell größer werden und schließlich aufreißen; das Material wird in Spritzern weggeschleudert. Der abschmelzende Draht schließt wieder den Kontakt mit dem Blech und der Vorgang wiederholt sich.

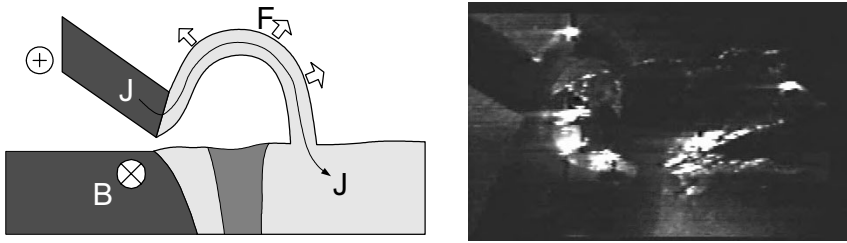


Bild 98: Peitschenartiges Ablösen des schmelzenden Drahts in Bögen bei höheren Strömen (AA6181A)

Die maximal sinnvolle Stromstärke wird also auch hier durch die Stärke der Oberflächenspannung begrenzt. Obwohl diese bei flüssigem AA5182 sehr viel geringer als bei AA6181A ist, lässt sich bei kleineren Stromstärken auch hier der Effekt der Porenreduzierung zeigen (Bild 99). Zum Teil liegt dieses allerdings an der geringeren Einschweißtiefe. Bei größeren Stromstärken entstehen mitunter Prozessaussetzer mit Löchern in der Naht.

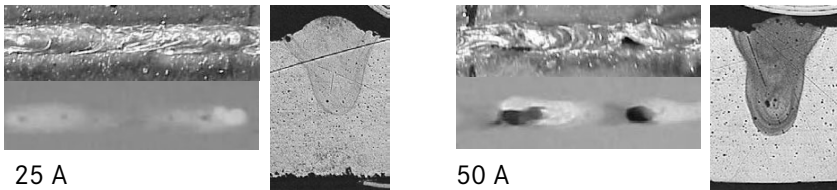


Bild 99: Einfluss eines Querfeldes und der Stromstärke auf AA5182

5.3.3 Kraftwirkung zur Seite

Bei den Versuchen mit der Vorrichtung Nr. 3 (Bild 87) zeigt sich in der Nähe der Magnetpole eine seitliche Ablenkung (Bild 100), und im Querschliff macht sich im Bereich der Pole ein deutlicher Versatz im oberen Bereich des Nahtprofils bemerkbar. Auch der Tiefschweißbereich ist nicht mehr symmetrisch. Dies lässt darauf schließen, dass mit der Umlenkung der Schmelze auch das Grundmaterial an anderer Stelle aufgeschmolzen wurde. Auf dem Röntgenfilm sind weiterhin starke Prozesssporen zu sehen.

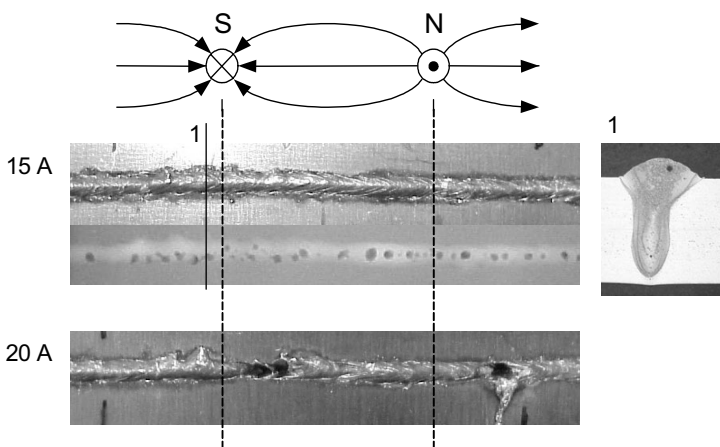


Bild 100: Seitenversatz und Spritzer zur Seite bei AA5182

Bei den höheren Stromwerten kommt es auch hier zur Spritzerbildung. Dabei treten deutliche Prozessaussetzer auf. Die Schmelze wird seitlich ausgeworfen. Die Hochgeschwindigkeitsaufnahme (Bild 101) zeigt ein Abdrängen der Schmelze zur Seite, mit dem sich das Schmelzbad und die Raupe verschieben.

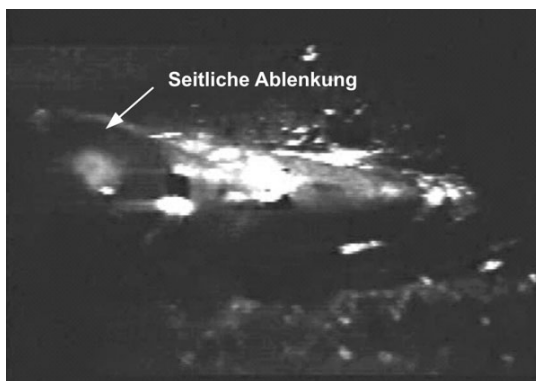


Bild 101: Seitliche Ablenkung der Schmelze bei AA5182

Diese Erscheinungen werden auf den besonderen Verlauf des Magnetfeldes zurückgeführt. Das Feld ändert über die Länge der Schweißbahn seine Orientierung. Die stärkste Auslenkung der Schmelze und die Lage der Spritzer ist nicht exakt an den Polen, sondern entlang der Schweißrichtung kurz davor. Hier stehen die Feldlinien nicht senkrecht, sondern unter einem kleinen Winkel zur Blechoberfläche. Wenn der Strom im rechten Winkel zur Feldrichtung fließt, ist nach dem Kreuzprodukt die Kraft am größten (Bild 102). Die Position der Spritzer lässt auf die Richtung des stärksten Stromflusses schließen. Dieser fließt nach dem Abschmelzen des Drahts nach hinten und von oben nach unten in den kalten Grundwerkstoff.

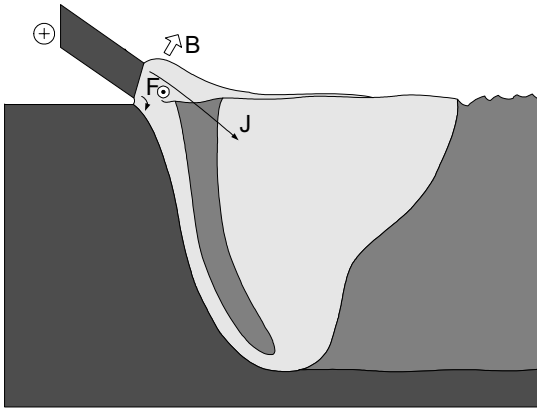


Bild 102: Maximale Kraft zur Seite bei fast vertikalem Magnetfeld

Die Ergebnisse bei AA6181A zeigen den gleichen Effekt, jedoch sind aufgrund der größeren Oberflächenspannung größere Auslenkungen und höhere Stromstärken möglich (Bild 103). Deutlich erkennbar ist die Reduzierung der Prozesssporen im beeinflussten Bereich. Die Einschweißtiefe steigt, da die Energie des Laserstrahls nun in geringerem Maße zum Aufschmelzen des Drahtes beiträgt.

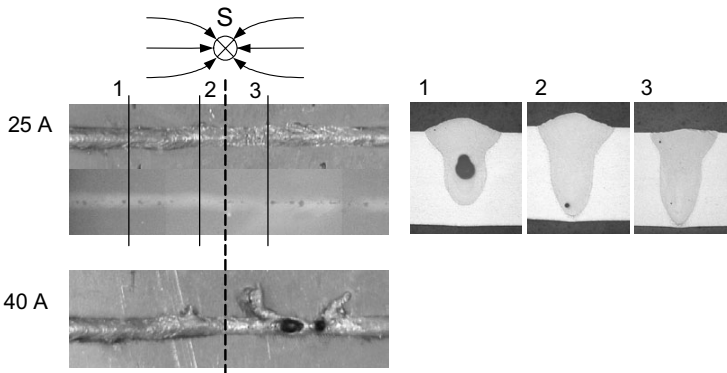


Bild 103: Seitliche Ablenkung bei fast vertikalem Feld bei AA6181A

Erst bei 40 A traten hier breite Schmelzauswürfe auf. Solange der Strom nicht über diese Grenze steigt, tritt keine verstärkte Spritzerbildung auf. Bild 104 zeigt neben der seitlichen Ablenkung auch die stärkere Beeinflussung im hinteren Bereich des Schmelzbades in Form einer langgestreckten Welle.

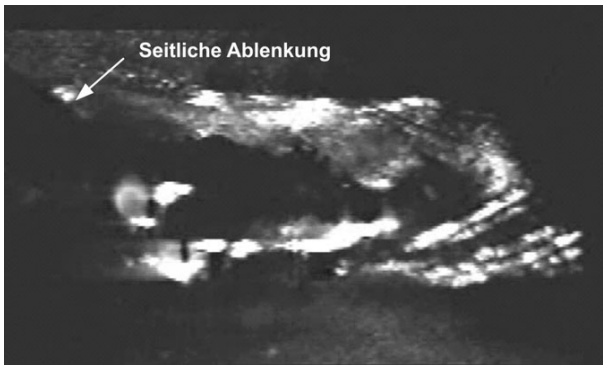


Bild 104: Seitliche Ablenkung bei AA6181A

5.4 Konstantes Magnetfeld und Gleichstrom bei stechender Drahtzufuhr

Wie im vorigen Kapitel mittels Hochgeschwindigkeitsaufnahmen gezeigt wurde, ist die Stromdichte und damit die elektromagnetische Kraftwirkung am Ende des Drahtes am größten. Während beim geschleppten Draht der Weg in den kalten Grundwerkstoff sehr kurz ist, endet ein stechend zugeführter Draht mitten im Schmelzbad hinter der Kapillare (Bild 105). Diese Zone ist, wie in Kapitel 1 beschrieben, sehr bedeutsam für die Prozessstabilität. Ein hier zugeführter Strom muss einen längeren Weg durch das Schmelzbad zurücklegen, bevor er in die kalte Wand gelangt. In diesem Kapitel soll untersucht werden, welche Beeinflussungsmöglichkeiten sich hieraus ergeben.

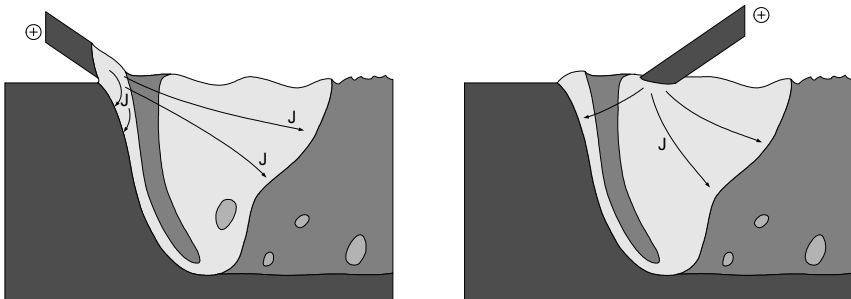


Bild 105: Vergleich Stromfluss schleppend und stechend

Die Prozessvorteile einer stechenden Drahtzufuhr wurden in [Schin02] beschrieben. Der Draht berührt nicht den Laserstrahl, sondern bezieht die Energie zum Aufschmelzen aus dem Schmelzbad. Die Einschweißtiefe steigt und weniger Schmelze muss die Kapillare umfließen.

Den Vorteilen einer stechenden Drahtzufuhr steht eine geringere Prozess-Sicherheit bei einem Einsatz in der Produktion gegenüber. Der Draht kann fest schweißen und somit die Drahtdüse abreißen. Diese Gefahr lässt sich durch eine sichere Prozessführung mit geeigneten Parametern am Schweißanfang und -ende verringern.

Um die stechende Drahtzufuhr in den Untersuchungen zu realisieren, wird lediglich die Vorschubrichtung des Lineartisches mit der Spannvorrichtung um 180° gedreht. Die Schweißparameter bleiben gleich. Auch der Schweißkopf behält seine Position.

Bild 106 zeigt für AA6181A und AA5182, wie der Draht hinter der Kapillare in das Schmelzbad taucht. Auch hier ist das Schmelzbad bei AA5182 unruhiger. In beiden Fällen ist es aber etwas ruhiger im Vergleich zu den Verhältnissen bei geschlepptem Draht. An der Häufigkeit der Prozesssporen ändert sich jedoch nichts. Die Kapillare schließt sich nach wie vor.

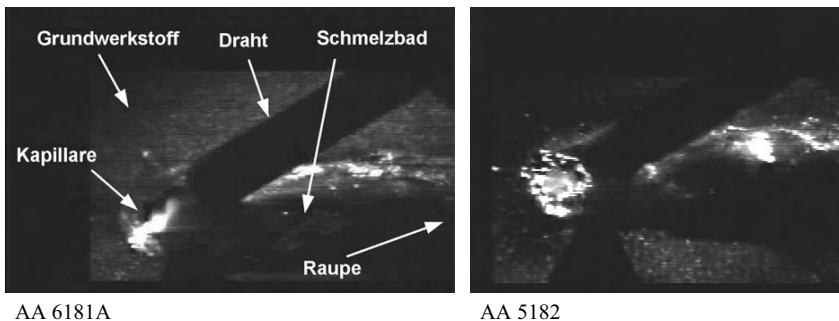


Bild 106: Standbild Referenz-Schweißprozess mit stechender Drahtzuführung

5.4.1 Kraftwirkung in Schweißrichtung

Eine in Schweißrichtung zeigende Kraft ergibt sich, wenn der Strom von oben in die Schmelze fließt und mit Vorrichtung Nr. 1 (Bild 44) ein horizontales Magnetfeld quer zur Schweißrichtung erzeugt wird. Es zeigt sich zunächst ein „Kratzen“ des Drahtes

durch die halberstarnte Schmelze (Bild 107). Gelegentlich schweißt dabei der Draht auch fest, so dass er abreißt.

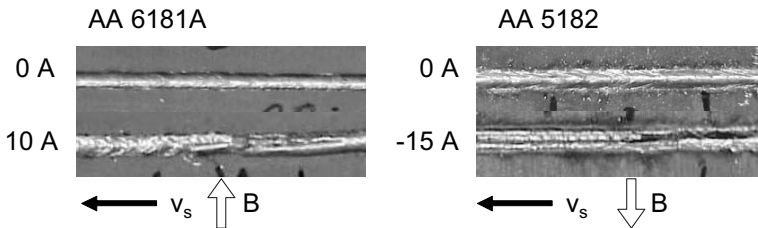


Bild 107: Zu kleines Schmelzbad verhindert Aufschmelzen des Drahtes

Im Hochgeschwindigkeitsfilm (Bild 108) kann man erkennen, wie die Schmelze in Schweißrichtung gefördert wird. Dabei gelangt sie in den Bereich des Laserstrahls und führt zu einem instabilen Keyhole. Teilweise tritt Material vor dem Schmelzbad aus. Das Schmelzbad wird so klein, dass der eintauchende Draht nicht mehr aufgeschmolzen werden kann.



Bild 108: Schmelze tritt vor Kapillare aus Schmelzbad

5.4.2 Kraftwirkung entgegen der Schweißrichtung

Dreht man die Polung des Stroms oder des Magnetfeldes um, ergibt sich wiederum eine Reduzierung der Poren. Wenn die Stromstärke nicht zu groß ist, ist an der Naht-
raupe bei der Legierung AA5182 keine Veränderung zur unbeeinflussten Naht erkenn-

bar (Bild 109). Im Röntgenbild oder im Längsschliff zeigen sich hingegen deutlich weniger Prozessporen. Die Einschweißtiefe ist leicht gestiegen.

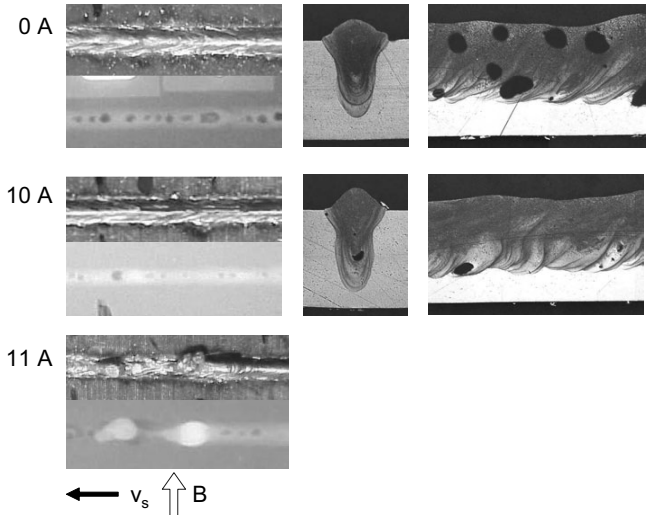


Bild 109: Abnahme der Porenzahl durch Entlasten der Kapillare bei AA5182

Ein Festkleben des Drahtes innerhalb der Schweißung findet nicht statt, da hier das Schmelzbad groß genug ist den Draht aufzuschmelzen. Ab einer bestimmten Stromstärke (hier 11 A) bildet sich am Ende des Schmelzbades ein Tropfen, da die Schmelze emporgehoben wird (Bild 110).



Bild 110: Abzug der Schmelze von der Kapillare bei AA5182

Die vermutliche Verteilung des Stroms und der Kräfte ist in Bild 111 dargestellt. Es ist erkennbar, wie die Schmelze in der Nähe des Drahtes zum Ende des Schmelzbades getrieben und angehoben wird.

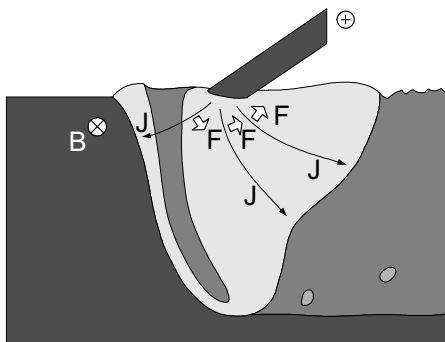


Bild 111: Abzug der Schmelze von der Kapillare

Dasselbe Bild zeigt sich bei der Legierung AA6181A (Bild 112). Hierbei kann jedoch mit einer größeren Stromstärke ein stärkerer Effekt erzeugt werden. Bei 0 bis 5 A tritt kein Effekt hinsichtlich

der Poren auf. Die Nahtoberfläche ist auch ohne Strom relativ glatt. Bei 10 A nimmt die Porenzahl deutlich ab. Die Naht wird noch glatter. Bei 25 A oder gar 50 A zeigt sich, dass die Schmelze, wie zuvor bei AA5182, nach hinten aus dem Schmelzbad getrieben wird und es zu tropfenförmigen Anhäufungen auf der Raupe kommt. Die Einschweißtiefe erhöht sich leicht. Ab 25 A erkennt man zudem eine Einbrandkerbe am Rand. Da die elektromagnetische Kraft in der Mitte des Bades wirkt, wird die Schmelze vom Rand nach hinten gefördert und in der Raupe angehäuft.

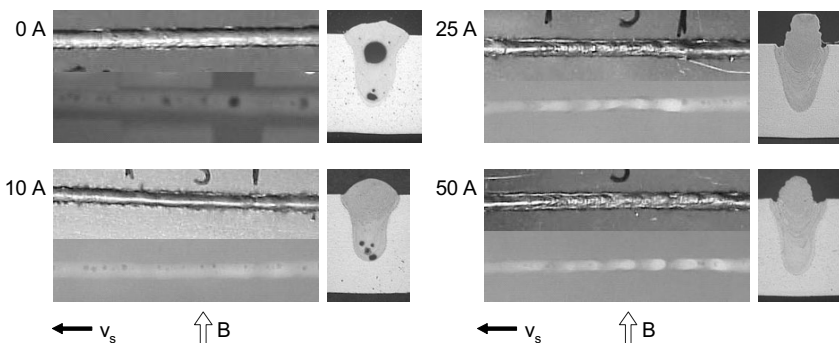


Bild 112: Reduzierung der Poren durch Entlasten der Kapillare bei AA6181A

Das Schmelzbad verhält sich in der Hochgeschwindigkeitsaufnahme sehr ruhig (Bild 113). Durch das Fördern der Schmelze weg von der Kapillare schwappt diese nicht mehr zu. Es scheint, als werde die Kapillare „entlastet“.



Bild 113: Ruhiges Schmelzbad durch „Entlasten“ der Kapillare bei AA6181A

5.4.3 Kraftwirkung zur Seite

Bei diesen Versuchen wird wieder die Spannvorrichtung Nr. 3 mit den 2 Dauermagneten verwendet (Bild 87). Bei den Versuchen mit AA6181A fällt in Bild 115 eine seitliche Ablenkung der Schmelze über den Polen und ein Wendepunkt der Ablenkung genau zwischen den Polen auf. Die Naht erscheint gleichmäßig und glatt.

Im Bereich der Ablenkung über den Polen sind keine Poren zu erkennen, und die Einschweißtiefe ist deutlich geringer. Im Wendepunkt sind kleine Poren vorhanden, und man sieht eine deutliche Asymmetrie im Querschnitt der Naht. Als Grund für die verringerte Einschweißtiefe kommen ein verringerter Einkopplungsgrad aufgrund einer



Bild 114: Seitliche Ablenkung bei AA6181A

veränderten Kapillargeometrie und die Umlenkung der wärmetransportierenden Schmelze in Frage. Wenn man den Strom von 20 A erhöht, spritzt im Bereich der

größten magnetischen Flussdichte die Schmelze aus dem Bad. Dies führt dann zum Aussetzen des Prozesses.

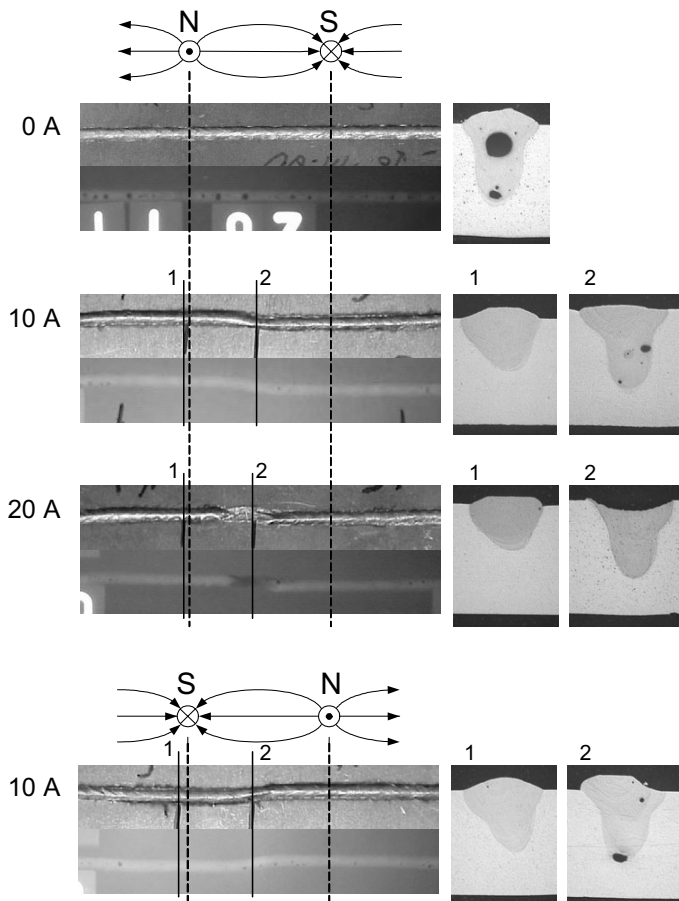


Bild 115: Seitliche Kraftwirkung mit Seitenwechsel bei AA6181A

In der Hochgeschwindigkeitsaufnahme (Bild 114) zeigt sich die ablenkende Wirkung zur in Schweißrichtung linken Seite des Schmelzbades. Auf der anderen Seite ist die verbleibende Schmelzbadwand zu erkennen, von der die Schmelze gefördert wurde.

Im Punkt des Seitenwechsels der Ablenkung zwischen den Polen verlaufen die Feldlinien horizontal parallel zur Schweißrichtung. Da hier keine seitliche Ablenkung stattfindet, muss diese ansonsten von der vertikalen Komponente des Magnetfeldes herrüh-

ren. In Bild 116 wird daher die Wirkung der vertikalen und horizontalen Komponente getrennt gezeigt:

Links in Bild 116 führt ein vertikales Magnetfeld in Verbindung mit dem Strom zu einer rotatorischen Kraftwirkung um den Draht herum. Wie die Versuche zeigen, wird die Verschiebung des Schmelzbades von der Förderwirkung vor dem Draht verursacht. Hier wird die heiße Schmelze von der Kapillare zu einer Seite abgelenkt und schmilzt dort vermehrt Grundwerkstoff auf. Rechts im Bild 116 führt ein horizontales Magnetfeld mit dem horizontal abfließenden Strom zu einer anhebenden Kraft links vom Draht in Schweißrichtung und auf der anderen Seite der Naht zu einer nach unten gerichteten Kraft. Zudem ergibt sich aus dem nach unten abfließenden Strom und dem Feld eine seitliche Kraft.

Ein ähnliches Verhalten tritt auch bei der AA5182-Legierung auf (Bild 117). Bei 10 A ist die Auslenkung gering. Es gibt eine leichte Verringerung der Poren. Bei 15 A zeigt sich eine geringe Spritzerbildung im Bereich hoher magnetischer Flussdichten, die sich bei 20 A verstärkt.

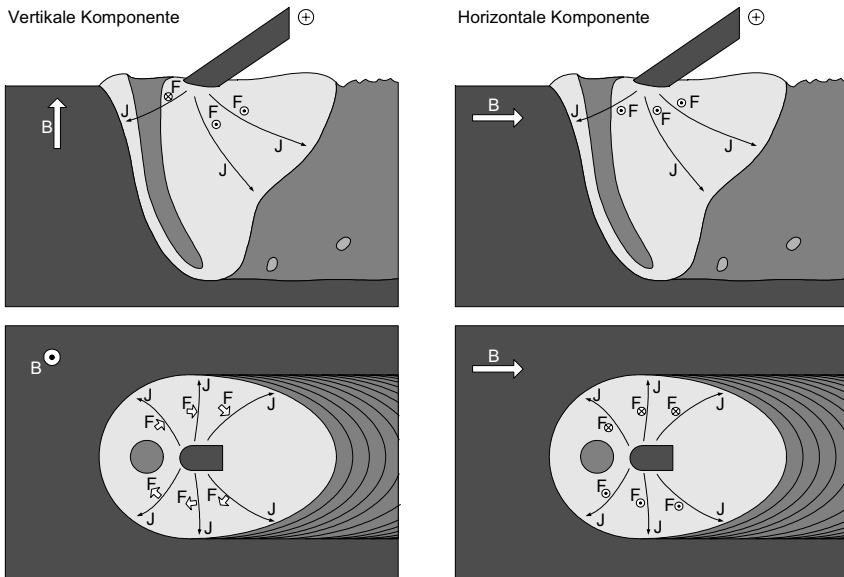


Bild 116: Kraftwirkung des Stroms und des vertikalen und horizontalen Anteils des Magnetfeldes

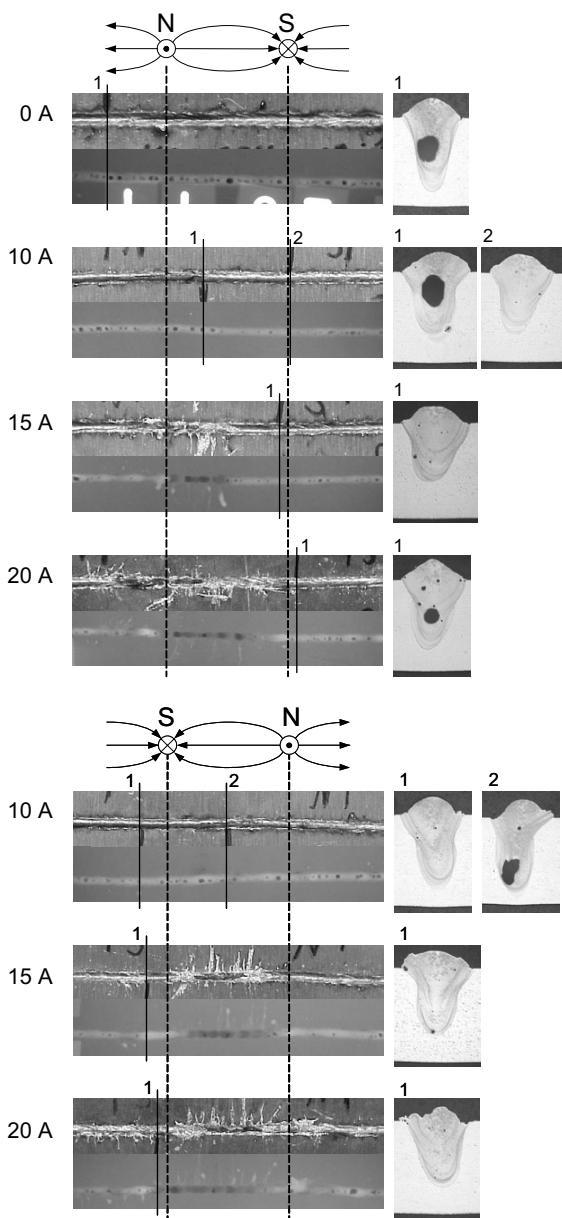


Bild 117: Seitliche Kraftwirkungen bei AA5182

In der Hochgeschwindigkeitsaufnahme (Bild 118) zeigt sich ebenso die Ablenkung zur Seite. Diese ist jedoch schwächer und das Schmelzbad ist unruhiger. Bei größeren Stromstärken kommt es zu der oben erkennbaren Spritzerbildung und dem Unterbrechen des Materialüberganges. Aufgrund der geringeren Oberflächenspannung wird die Schmelze insgesamt weniger abgelenkt.

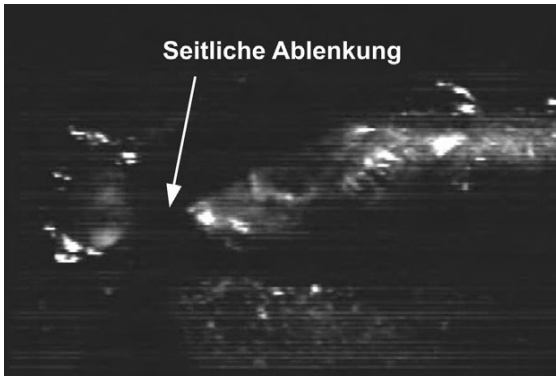


Bild 118: Seitliche Ablenkung der Schmelze bei AA5182

5.5 Konstantes Magnetfeld und Wechselstrom bei schleppender Drahtzufuhr

In den bisherigen Versuchen war die Kraftwirkung, solange der Strom nicht unterbrochen war, stets gleichförmig. In den nachfolgenden Versuchen soll diese Kraftwirkung periodisch variiert werden. Dabei soll untersucht werden, wie sich die bisher gefundenen Effekte verändern und wie die Schmelze reagiert. Es könnten neue Effekte angeregt werden, Resonanzen auftreten oder chaotische Prozesse in regelmäßige Prozesse überführt werden. Ebenso stellt sich die Frage, bei welchen Frequenzen sich ein Effekt zeigt.

5.5.1 Versuchsaufbau mit zusätzlichem Wechselstrom

Für die Versuche mit einem Magnetfeld quer zur Schweißrichtung kam die Vorrichtung Nr. 2 mit dem Elektromagnet (Bild 47) zum Einsatz. Er wurde mit einer konstanten Stromstärke von 50 A betrieben, so dass in der Schweißzone eine Feldstärke von $B = 300 \text{ mT}$ über einen längeren Weg von 35 mm verfügbar war. Dadurch ließen sich Effekte deutlicher zeigen. Für die Magnetfelder in Längsanordnung wurde weiterhin die Spannvorrichtung Nr. 3 (Bild 87) verwendet.

An die Drahtzuführung wurde statt einer Gleichstromquelle eine Wechselstromquelle angeschlossen. Versuche mit einer WIG-Stromquelle waren aufgrund der hohen Leerlaufspannung und dem Entstehen eines Lichtbogens nicht erfolgreich. Zudem ließ sich die Amplitudenform nicht frei genug einstellen. Stattdessen wurde der Wechselstrom mittels eines Frequenzgenerators und eines 4-Quadrantenverstärkers (PAS 5000, Fa. Spitzenberger & Spies) erzeugt (Bild 119). Die Amplitudenform und -frequenz wurden mit Hilfe eines Oszilloskops eingestellt und die auftretende Stromstärke mit einem Ringamperemeter bestimmt. Die Frequenz der Sinusschwingung wurde in Stufen von 25 Hz auf 2 kHz erhöht.

Nachfolgend wurde immer mit der maximal erreichbaren Stromstärke gearbeitet, die aber abhängig von der eingestellten Frequenz ist. Bei niedrigen Frequenzen war die Stromstärke durch die Leistungsfähigkeit des Verstärkers im Kurzschlussbereich begrenzt. Bei höheren Frequenzen war die Belastung des Verstärkers weniger stark, und höhere Stromstärken konnten erzielt werden. Dann stieg allerdings der Wechselstromwiderstand, so dass bei gleicher Maximalspannung der erzielbare Strom wieder absank.

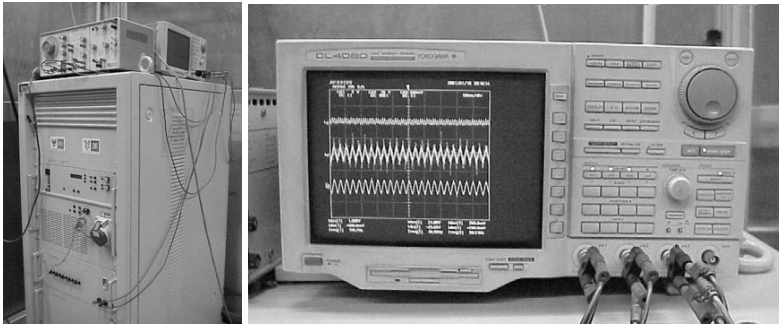


Bild 119: Elektrischer Versuchsaufbau mit Signalgenerator, Oszilloskop und Verstärker

5.5.2 Pendelnde Kraftwirkung entlang der Schweißrichtung

Ein Magnetfeld horizontal quer zur Schweißrichtung erzeugt mit einer Wechselstromdichte an der Stelle des Materialübergangs eine oszillierende Kraft parallel zur Schweißrichtung. In ihrer Wirkung ist dies die Kombination der in Kapitel 5.3.1 und 5.3.2 diskutierten Fälle. Die Polung des Magneten spielt wegen des Wechselstroms keine Rolle mehr, da die oszillierenden Kraftwirkungen nur um eine halbe Phase verschoben sind.

Die Ergebnisse bei AA6181A in Bild 120 zeigen keinen eindeutigen Effekt. Von 200 bis 1000 Hz zeigen sich vereinzelt Prozessaussetzer und eine reduzierte Einschweißtiefe. Lediglich bei 200 Hz kam es zu einer deutlichen Reduktion von Poren im Bereich des Magnetfeldes. Keiner der beiden Effekte aus Kapitel 5.3.1 und 5.3.2 hat genug Zeit zu wirken. Es kommt weder zu einer Prozessstabilisierung, noch zu dem Offenhalten der Kapillare.

Deutlichere Effekte zeigen sich bei AA5182 in Bild 121. Der Prozess wird zunächst unruhiger. Es bilden sich bei 25 Hz große Tropfen. Von 50 Hz bis 1000 Hz sinkt die Einschweißtiefe. Im unteren Bereich von 50 Hz bis 200 Hz wird der Nagelkopf verstärkt.

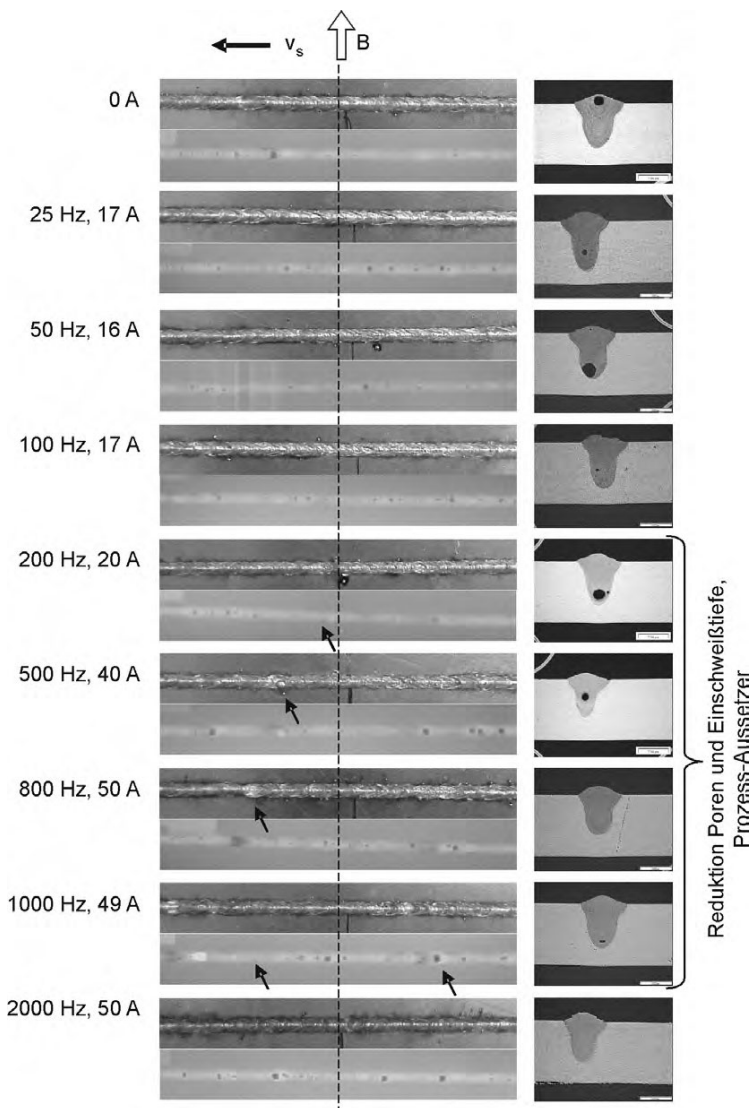


Bild 120: Versuchsergebnisse bei AA6181A bei unterschiedlichen Frequenzen und Scheitelstromstärken

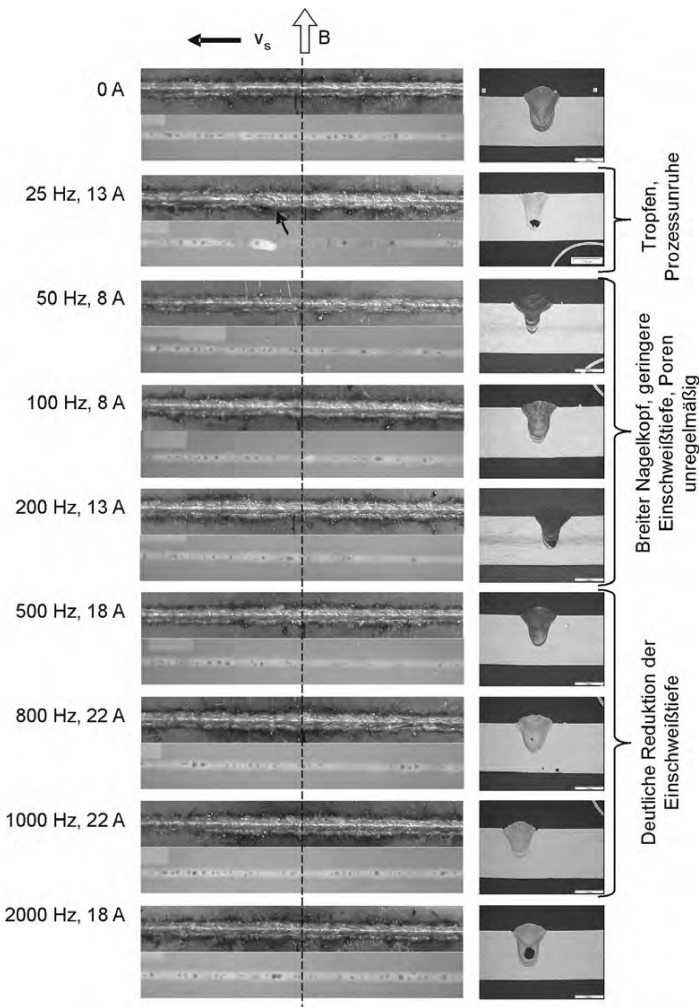


Bild 121: Versuchsergebnisse bei AA5182 bei unterschiedlichen Frequenzen und Scheitelstromstärken

5.5.3 Pendelnde Kraftwirkung zur Seite

Beim Schweißen von AA5182 mit der Vorrichtung Nr. 3 zeigen sich keine deutlichen Veränderungen der Naht (Bild 122). Bei 50 Hz ist die Naht zwischen den Polen etwas

verbreitert. Im Bereich von 100 Hz bis 1000 Hz gibt es, leicht versetzt zu den Polen, jeweils einen Bereich mit weniger Poren. Dies ist, wie in Kapitel 5.3.3, die Position mit der stärksten seitlichen Ablenkung der Schmelze.

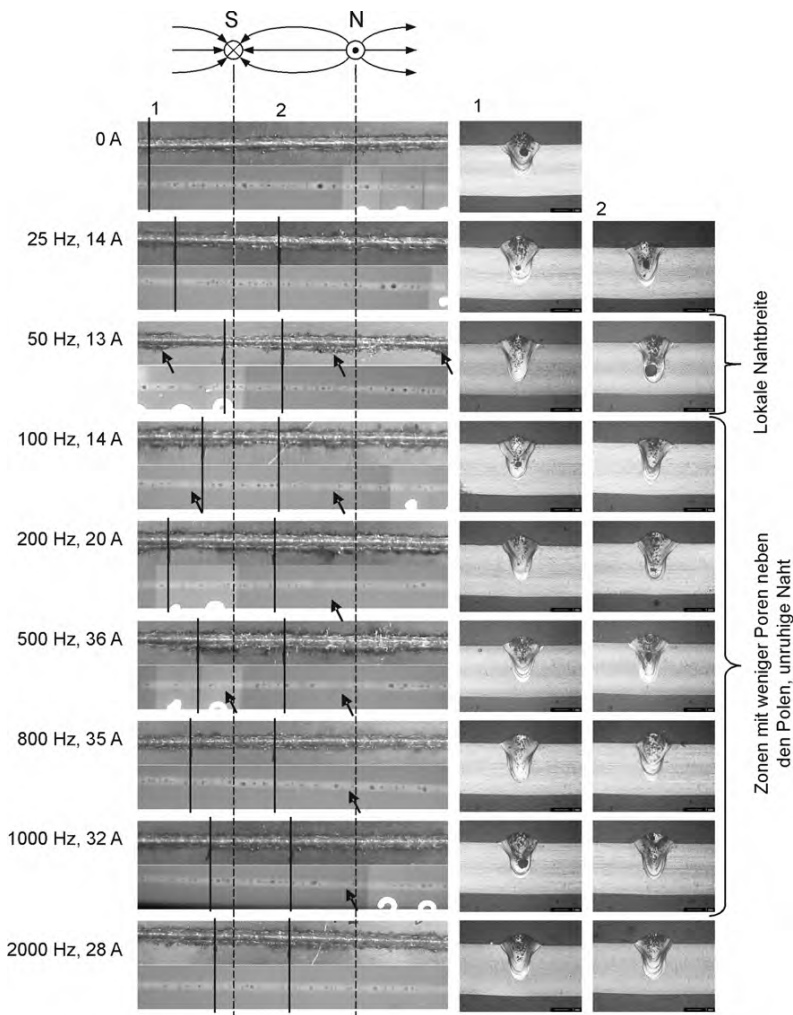


Bild 122: Versuchsergebnisse bei AA5182 bei unterschiedlichen Frequenzen und Scheitelstromstärken

Bei der Legierung AA6181A (Bild 123) zeigt sich der obige Effekt der Porenreduzierung etwas deutlicher im Bereich von 100 bis 500 Hz. Bei 25 Hz entsteht eine stärkere Schuppung und bei 50 Hz eine Reihe größerer Poren. Der Prozess wird eher gestört als beruhigt.

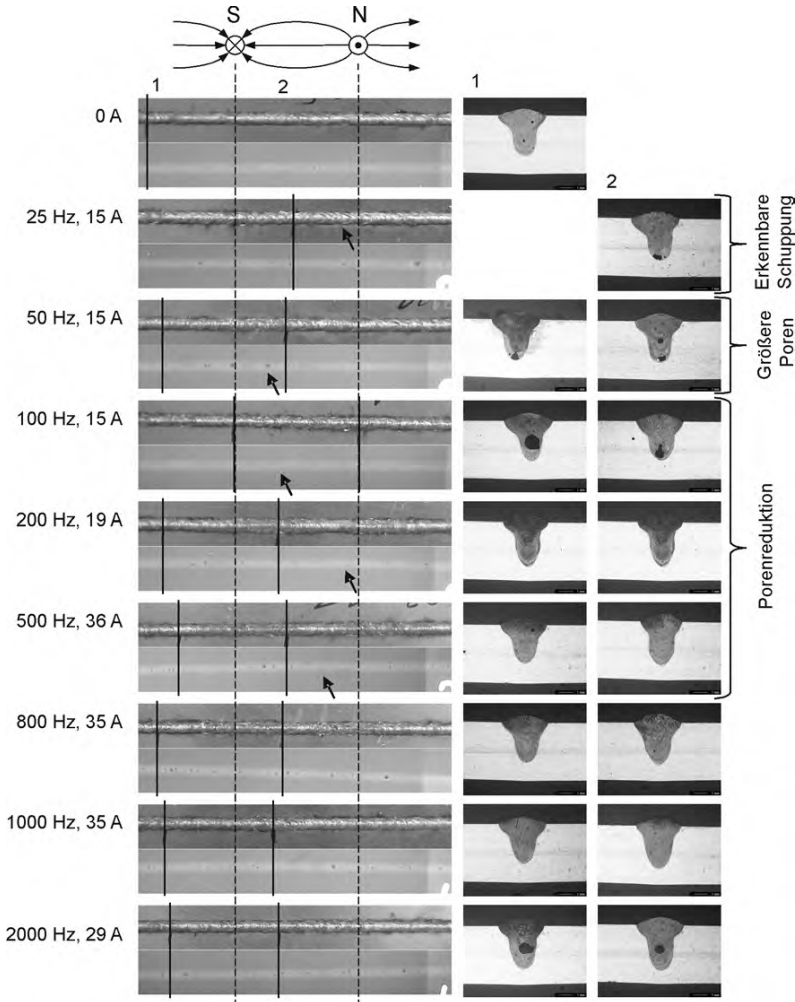


Bild 123: Versuchsergebnisse bei AA6181A bei unterschiedlichen Frequenzen und Scheitelstromstärken

5.6 Konstantes Magnetfeld und Wechselstrom bei stechender Drahtzufuhr

Wie schon bei Gleichstrom in Kapitel 5.4, wird bei der Umkehr von schleppender auf stechende Drahtzufuhr auch bei Wechselstrom ein deutlicherer Effekt erwartet. Auch hier wurde die Frequenz von 25 bis 2.000 Hz bei den Werkstoffen AA5182 und AA6181A variiert. Für alle Varianten der Feldlinienorientierung wurden die Spannvorrichtungen Nr. 1 und Nr. 3 mit den Dauermagneten verwendet (Bild 44, Bild 87).

5.6.1 Pendelnde Kraftwirkung entlang der Schweißrichtung

Beim Werkstoff AA6181A zeigen sich, wie erwartet, sehr deutliche Effekte hinsichtlich der Beeinflussung des Schmelzbades. So zeigt der Hochgeschwindigkeitsfilm (Bild 124) eine schwellende quasistationäre Verlagerung der Schmelze nach vorne und hinten. Überlagert wird dies von der normalen höheren Dynamik des Prozesses, bei der Wellen durch das Bad laufen, die Kapillare gelegentlich zuschwappt und an deren Rand Spritzer entstehen. Der abwechselnd hohe und niedrige Pegelstand am hinteren Schmelzbadende führt zu den Schuppen. Ist die Schmelze nach vorne abgelenkt, kann man im hinteren Teil eine Faltenbildung in der Oxidhaut und deren Überspannen der Schmelze erkennen.

Den Einfluss der Frequenz zeigt Bild 125: Im Bereich von 25 bis 200 Hz kommt es zu einer deutlichen Schuppung auf der Nahtraupe, verbunden mit einer reduzierten Einschweißtiefe. Man erkennt weiterhin einen Einfluss auf die Porenbildung, wobei es bei 100 und 200 Hz zu einer Reduzierung kam.

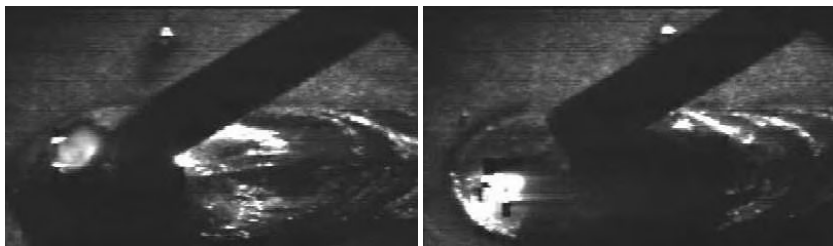


Bild 124: Schwellende Verlagerung der Schmelze bei 50 Hz (Bildabstand 26 ms): Das Schmelzbad wird in seiner Gesamtheit nach vorne bzw. hinten gefördert (AA6181A).

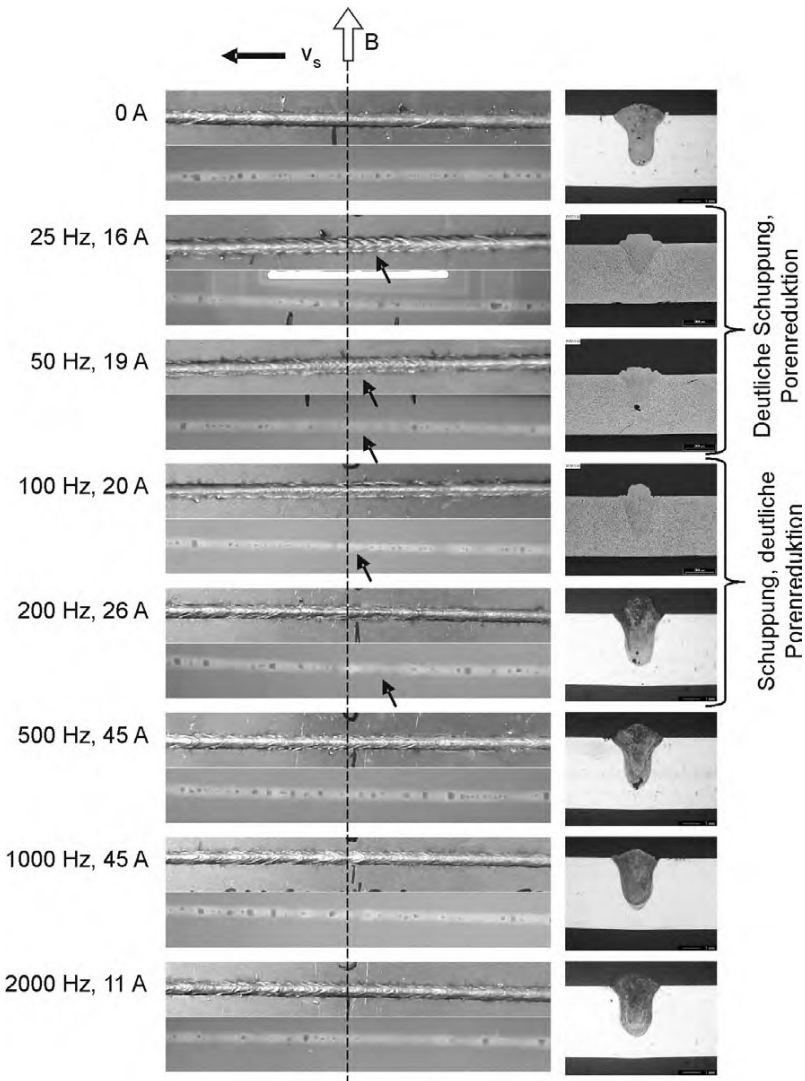


Bild 125: Versuchsergebnisse bei AA6181A bei unterschiedlichen Frequenzen und Scheitelstromstärken

Ab 200 Hz tritt kein Vor- und Zurückschwellen mehr auf, denn nun laufen stattdessen einzelne Wellen durch das Schmelzbad. Der Prozess wird unruhiger, und es sind keine Schuppen mehr erkennbar. In Bild 126 ist eine derartige Welle zu sehen. Bezieht man den Weg der Wellenfront zwischen den Bildern auf den Drahtdurchmesser von 1,2 mm, so ergibt sich eine Geschwindigkeit der Welle von 1,1 m/s. Im Bereich von 200 bis 500 Hz kann trotz der erkennbaren Wellen im Schmelzbad keine periodische Anregung eines schwingenden Systems festgestellt werden.

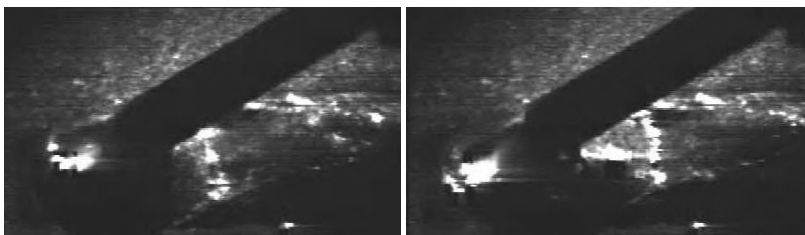


Bild 126: Nach hinten verlaufende Wellen im Schmelzbad bei 200 Hz (Bildabstand 0,88 ms, AA8161A)

Im Film zeigen sich bei 2000 Hz keine starken Wellen mehr. Die Schmelze erscheint vielmehr wie bei der unbeeinflussten Referenzschweißung. Lediglich im vorderen Teil der Schmelze, nahe der Kapillare, scheint es zu einer Beruhigung mit weniger Spritzern und seltenerem Zuschwappen der Kapillare zu kommen. Jedoch zeigt der Röntgenfilm auch hier einige Poren.

Hinsichtlich der Frage, ob durch die periodische Anregung eine Veränderung der Erstarrungsmechanismen erfolgt, ließen sich keine Veränderungen der Gefügestruktur in den geätzten Querschliffen feststellen.

Die Ergebnisse für AA5182 zeigen verstärkt Spritzer und Tropfen neben der Naht im Vergleich zur Referenz ohne Anregung (Bild 127, oben). Bei 50 Hz zeigt sich die Schuppung und der Verlust an Schmelze über Spritzer deutlich. Bei Frequenzen von 500 Hz bis 2 kHz erscheint die Porenbildung gleichmäßiger als in der Referenz.

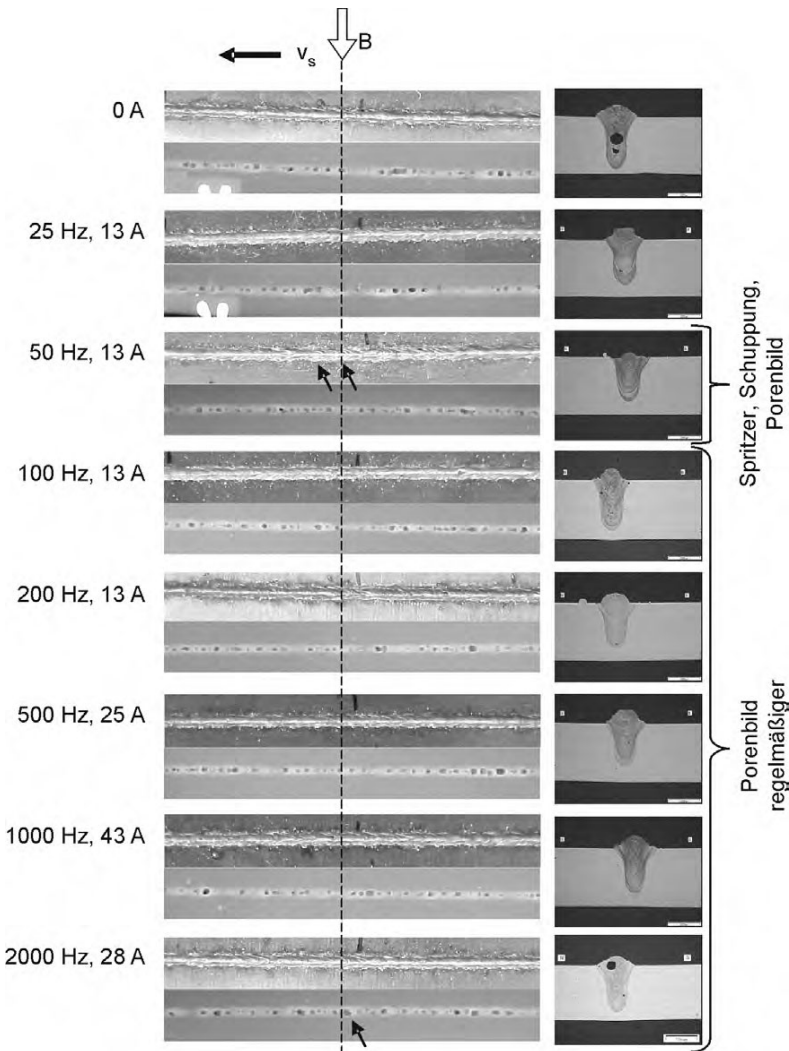


Bild 127: Versuchsergebnisse bei AA5182 bei unterschiedlichen Frequenzen und Scheitelstromstärken

5.6.2 Pendelnde Kraftwirkung zur Seite

Bei der Legierung AA6181A treten, abhängig von den Frequenzen der Stromstärke, sehr deutliche Effekte auf (Bild 128). Die Referenzschweißung in der ersten Zeile zeigt sich wiederum als glatte Naht mit vereinzelt Poren.

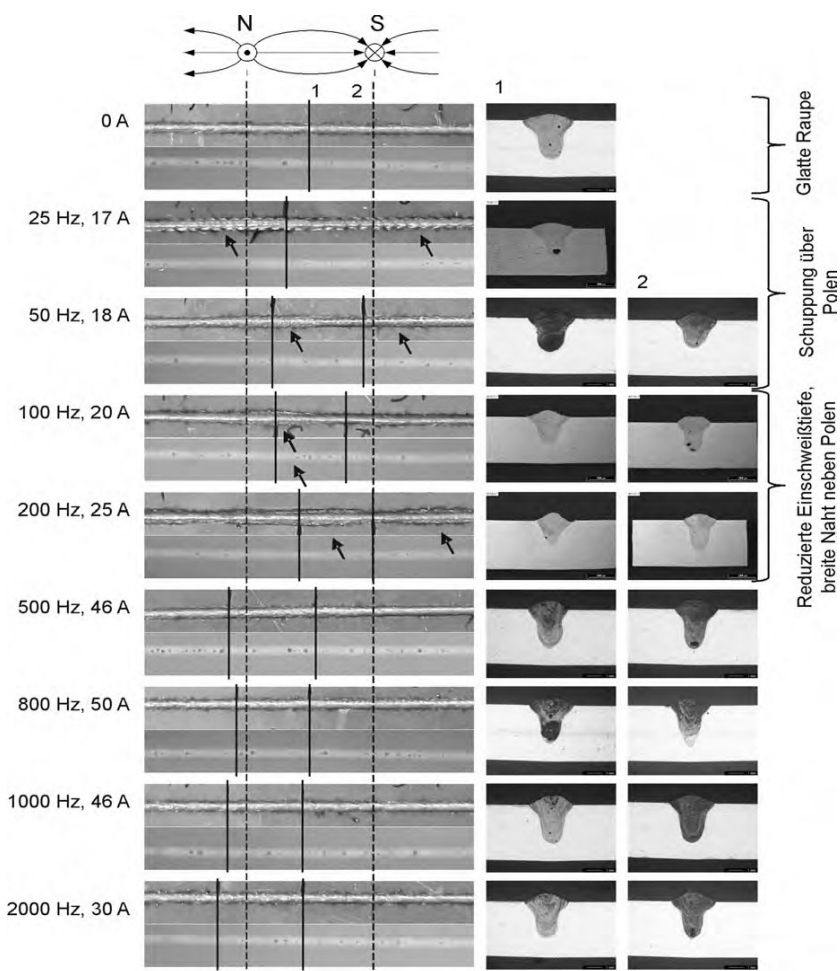


Bild 128: Versuchsergebnisse bei AA6181A bei unterschiedlichen Frequenzen und Scheitelstromstärken

Bei 25 Hz erkennt man sehr deutlich, wie die relativ langsame periodische seitliche Auslenkung der Schmelze zu einer schlangenlinienartigen Nahtform führt. Die Einschweißtiefe ist leicht reduziert. Die Bildung der Schuppen ist über den Polen am stärksten und in der Mitte am schwächsten. Dieser Effekt hängt somit von der vertikalen Komponente des Magnetfeldes ab (siehe Kapitel 5.4). In Bild 129 sieht man, wie sich Schmelze und Erstarrungsfront seitlich verlagern.

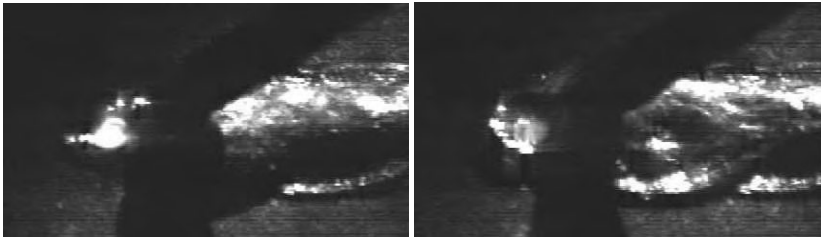


Bild 129: Periodisches Strömen der Schmelze nach links oder rechts und Schuppenbildung bei 25 Hz (AA6181A).

Bei steigenden Frequenzen hin zu 100 Hz ist die Schuppung nicht mehr so deutlich zu erkennen. Das Schmelzbad wird flacher und symmetrisch zur Mitte. Das Maximum der Breite verlagert sich von den Polen leicht neben diese, d.h. hier werden die horizontalen Anteile des Feldes wichtiger. Bild 130 zeigt die deutlich vergrößerte Oberfläche der Schmelze. In dem flachen Schmelzbad entstehen weniger Poren.

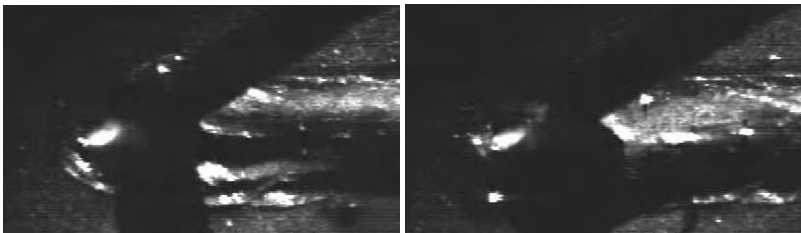


Bild 130: Abwechselndes Auslenken der Schmelze zur Seite bei 50 Hz (AA6181A).

Bei 200 Hz schwappt das Schmelzbad selbst hin und her (Bild 131). Es schmilzt eine breite Front auf, wobei die Kapillaröffnung jedoch stabil stehen bleibt. Wenn hier die Laserleistung erhöht bzw. die Schweißgeschwindigkeit gesenkt würde, könnte der Verlust an Einschweißtiefe ausgeglichen werden.



Bild 131: Auslenken der Schmelze zur Seite mit vergrößertem Schmelzbad bei 200 Hz (AA6181A).

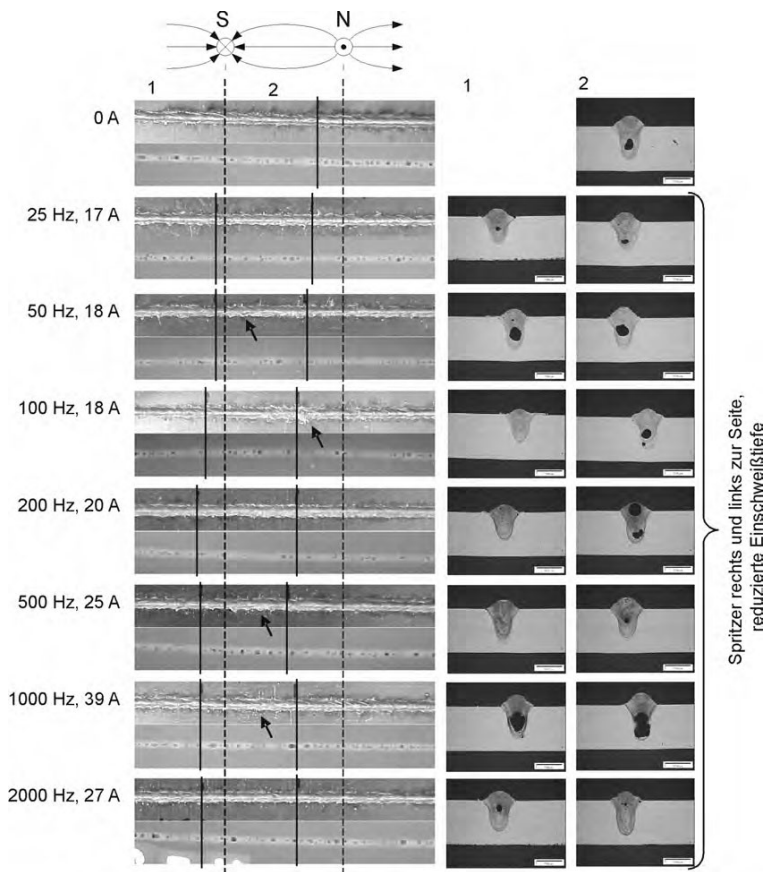


Bild 132: Versuchsergebnisse bei AA5182 bei unterschiedlichen Frequenzen und Scheitelstromstärken

Ab 500 Hz wird die Schuppung sehr fein. Außer einer größeren Unruhe ist im Hochgeschwindigkeitsfilm keine Besonderheit festzustellen. Auch bei höheren Frequenzen bis hin zu 2000 Hz ist kein Effekt erkennbar. Ebenso zeigt sich kein Effekt bei den geätzten Gefügestrukturen.

Die Ergebnisse mit AA5182 zeigen keine seitliche Ablenkung. Bei allen Stromstärken in Bild 132 bilden sich Spritzer zu beiden Seiten, analog Kapitel 5.4.3. Durch die geringe Oberflächenspannung treten links und rechts Tropfen aus dem Bad. Dabei wird der Stromfluss häufig so lange unterbrochen, bis der abschmelzende Draht den Kontakt wieder herstellt. Die Einschweißtiefe sinkt. Verringert man die Stromstärke, treten keine Spritzer mehr auf, aber es zeigt sich auch keine Veränderung der Naht mehr.

5.7 Zusammenfassung des Einflusses externen Stroms

Es wurden die grundlegenden Kombinationen von Polung und Orientierung eines konstanten Magnetfeldes mit Gleich- und Wechselstrom untersucht. Ebenso wurde die Wirkung eines Wechselfeldes geprüft.

Durch die Entstehung elektromagnetischer Volumenkräfte kann der Schweißprozess beeinflusst werden: In bestimmten Fällen des Einsatzes von Gleichstrom und einem konstanten Feld kann eine Porenbildung unterdrückt, eine glattere Naht, eine Erhöhung der Einschweißtiefe oder eine seitliche Ablenkung der Schmelze erzielt werden. Die Chance, den Nahtquerschnitt seitlich zu verschieben, könnte beim Schweißen von Kehlnähten und T-Stößen zu einem sicheren Aufschmelzen der Flanken des Fügespalts genutzt werden.

Während die Richtung des Feldes mit der äußeren Anregung definiert ist, fließt der extern zugeführte Strom abhängig von der räumlichen Verteilung des spezifischen Widerstands und dem Ort des Masseanschlusses im Schmelzbad ab. Im Ort des Materialüberganges fließt er normal in das Schmelzbad und dann in den kälteren Grundwerkstoff ab. Mit einer Computer-Berechnung ließe sich die räumliche Stromdichteverteilung genauer bestimmen.

Eine Kraftwirkung in Schweißrichtung in der Schmelze vor der Kapillare (Bild 133) verringert große Pegelschwankungen. Eine Kraftwirkung in diesem Bereich entgegen der Schweißrichtung ist in der Lage, den Flüssigkeitsjet seitlich in einer Anhebung an der Kapillare vorbeizuleiten. Dies führt zu einer Beruhigung des Schmelzbades und zu einer deutlichen Verringerung der Porenzahl und -größe. Eine Kraft zur Seite lenkt

auch die Schmelze in diese Richtung, wodurch das Einschnüren der Kapillare vermindert wird und sich die gleichen Effekte einstellen. Die Versuche zeigen also nicht nur die Bedeutung der Dampfkapillare, sondern auch die der Flüssigkeitsströmung für die Dynamik und Unruhe des Schweißprozesses auf. Die Kapillare stellt ein Hindernis dar, um das die Schmelze herum fließen

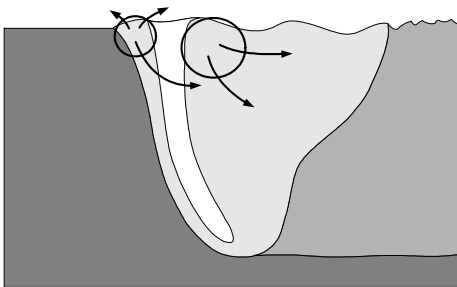


Bild 133: Nützliche Wirkorte und Krafrichtungen einer elektromagnetischen Beeinflussung

muss. Zudem kann sie sich aufblasen, einschnüren, fluktuieren oder platzen. Die in Einzelfällen vollständige Unterdrückung von Poren lässt darauf schließen, dass hier nur Prozess- und keine Wasserstoffporen vorliegen.

Diese Effekte treten bei der Legierung AA6181A deutlicher hervor als bei der Legierung AA5182. Letztere hat aufgrund der niedrigeren Verdampfungstemperatur von Magnesium eine reduzierte Oberflächenspannung. Um die Lorentz-Kraftwirkung in eine Ablenkung der Schmelze umzuwandeln, muss die Oberflächenspannung groß genug sein, um ein Ablösen von Tropfen zu verhindern (Bild 134). Mit zunehmender Krümmung der Oberfläche steigt die Oberflächenspannung und bildet so die Gegenkraft zum Druck durch die Schmelze, welche zur Seite ausweichen muss. Ist der Widerstand jedoch zu gering, krümmt sie sich weiter, bis sich ein Tropfen abschnürt. Dies erklärt die stärkere Spritzerbildung und die schwächere Beeinflussung bei den Schweißungen der Legierung AA5182.

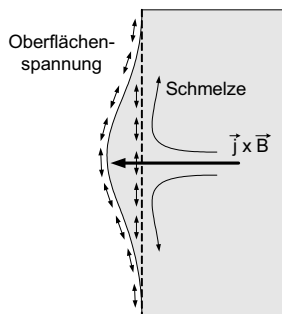


Bild 134: Umlenkung der Schmelze an der Oberfläche

Die Kraftwirkung des zugeführten Stroms ist bei einer stechenden Drahtzufuhr stärker, da dieser im Vergleich zur schleppenden Drahtzufuhr einen längeren Weg durch die Schmelze fließt. Aufgrund der Bedeutung der Kapillarrückwand für die Prozessstabilität kann unmittelbar in den Entstehungsprozess von Nahtfehlern eingegriffen werden.

Während mit Gleichstrom nutzbare positive Effekte erzeugt werden, führt der Einsatz von Wechselstrom eher zu einer Verschlechterung. Die Schmelze erscheint in den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen als hochdynamisches System, das von Randbedingungen, wie dem Dampfdruck in der Kapillare, der Schmelzbadwand, der Gravitation und der Oberflächenspannung, „eingeschnürt“ wird und als inkompressible Flüssigkeit nur ausweichen kann (Bild 135). Sie folgt jeder äußeren Kraftwirkung, aber sie schwingt nicht. Resonanzen, die instabile chaotische Erscheinungen in regelmäßige überführt hätten, wurden nicht gefunden. Obwohl eine Reduzierung der Porenzahl teilweise auch ohne verminderte Einschweißtiefe möglich war, wurde der Schweißprozess dennoch unruhiger und weniger stabil.

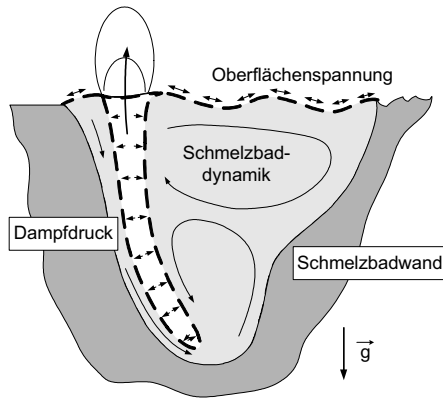


Bild 135: Randbedingungen für die Schmelzbaddynamik

6 Zusammenfassung

Die Prozessstabilität beim Laserstrahl-tiefschweißen von Aluminium wird wesentlich durch die Form und das Verhalten der Dampfkapillare beeinflusst. Zum einen stellt sie ein Hindernis dar, um das die Schmelze herumfließen muss. Zum anderen kann sie sich aufblasen, einschnüren, fluktuieren oder platzen. Durch die Auswirkungen auf den Verlauf der Strömung und deren Wärmetransport hat sie auch einen Einfluss auf den aufgeschmolzenen Nahtquerschnitt.

In der Literatur wird die Möglichkeit genannt, dieses Geschehen beim Schweißen mit einem CO₂-Laser durch magnetische Felder zu beeinflussen. Es kann die Einschweißtiefe erhöht, der Querschnitt verändert und die periodische Nahtstörung „Humping“ unterdrückt werden. Dies ist nicht nur bei Eisen, sondern auch bei dem paramagnetischen Aluminium möglich. Daher kann es sich hierbei nicht um einen ferromagnetischen Effekt handeln. Vielmehr wirkt hier der Lorentz-Effekt, nach dem ein Strom zusammen mit einem Magnetfeld gemäß dem vektoriellen Kreuzprodukt eine Kraft erzeugt.

Der Nachvollzug der Untersuchungen aus der Literatur bestätigt die Richtungsabhängigkeit der Wirkung eines angelegten Magnetfeldes beim CO₂-Laserschweißprozess. Beim Festkörperlaser zeigt sich nur bei sehr schlanken Nähten, wie sie neuerdings mit dem Scheibenlaser erzeugt werden können, ein richtungsunabhängiger Effekt. Dieser Unterschied in der Abhängigkeit von der Richtung deutet auf eine Prozessbesonderheit beim CO₂-Laser hin, die beim Festkörperlaser nicht auftritt. Die wesentlichen Unterschiede zwischen den Schweißprozessen von Festkörper- und CO₂-Laser sind die Temperatur und der Ionisierungsgrad des Metaldampfes bzw. Plasmas, bedingt durch die Wellenlänge des Laserlichtes.

Die Suche nach möglichen Wirkungen magnetischer Felder auf den komplexen Laserschweißprozess und die theoretische Abschätzung der Stärke zeigt, dass mehrere Einflüsse zugleich bestehen können. Das Plasma in und knapp oberhalb der Kapillare besteht aus geladenen Teilchen. Deren Bewegung und Verteilung im Raum können durch elektrische und magnetische Felder beeinflusst werden. Dies könnte einen Einfluss auf die optische Brechung und Absorption des einfallenden Laserstrahls haben.

Die vorgenommenen Überlegungen und Versuche führen zu der Vermutung, dass innerhalb der Kapillare bisher nicht beschriebene Wechselwirkungen stattfinden, sodass im Werkstück und damit auch im Schmelzbad ein Strom fließt. Hierzu wurde in dieser Arbeit eine plausible Modellvorstellung entwickelt, welche aber nicht experimentell bewiesen werden konnte.

Es kommen zwei Effekte als treibende Kräfte für diesen Stromfluss in Frage. Aus der Temperaturverteilung im Plasma folgt eine unterschiedliche Elektronendichte. Deren Gradient führt zu einem Elektronenfluss im Plasma von heißeren zu kälteren Gebieten. Die zweite mögliche treibende Kraft wäre eine unterschiedlich hohe Austrittsarbeit der Elektronen oder eine unterschiedlich hohe Stärke des Photoeffekts an verschiedenen Stellen der Schmelzbadoberfläche. In dieser Arbeit fällt zum ersten Mal das Augenmerk auf die thermionische Emission als notwendiges Bindeglied für die Kontinuität des Elektronenflusses. Damit ein Strom überhaupt fließen kann, bedarf es eines leitfähigen Plasmas.

Eine Beeinflussung der Schmelze durch Magnetfelder ist möglich, wenn in ihr zugleich ein Strom fließt. Diese in der Magnetohydrodynamik beschriebenen Effekte reichen von einer Pumpwirkung, einer Bremswirkung, einer Laminarisierung des Schmelzflusses bis hin zu einer Stabilisierung von Oberflächen. Ebenso ist auch eine Wechselwirkung des Stroms mit seinem eigenen Magnetfeld möglich, der zu einer Elektrowirbelströmung oder Beschleunigung des flüssigen Leiters führt. Wie schon zuvor von KERN vermutet, konnte ein durch die Schmelzbewegung im Magnetfeld induzierter Strom von etwa 4 A im Schweißprozess nachgewiesen werden. Dieser richtungsunabhängige Hartmann-Effekt wird als Ursache für den gezeigten Einfluss beim Schweißen mit einem Scheibenlaser angesehen. Mit stärkeren Magnetfeldern hin zu 1 Tesla ließe sich dieser Effekt noch deutlicher zeigen, jedoch ist die technische Erzeugung des Feldes sehr viel aufwendiger. Andere aus der Metallurgie bekannten Effekte, wie Kornfeinerung beim Erstarren der Schmelze in einem Magnetfeld oder Entgasung durch induzierte Kavitation, konnten nicht beobachtet werden.

Der thermoelektrische Strom im Laserschweißprozess konnte beim CO₂-Laser und Nd:YAG-Laser in etwa gleicher Höhe experimentell nachgewiesen werden, jedoch nicht in der Höhe wie er zuvor in anderen Veröffentlichungen beschrieben wurde. Die bereits bekannte Richtung des Stroms bei Stahl konnte im Versuch nachvollzogen werden. Bei Aluminium wurde jedoch eine entgegengesetzte Richtung des Stroms nachgewiesen, die der bisherigen Annahme widerspricht. Die Stromstärke ist größer, wenn die zu verschweißenden Materialien ein unterschiedliches Thermopotential haben. Bei den untersuchten Aluminiumlegierungen war dies durch Silizium im Zusatz-

draht gegeben. Die geschätzte Stromstärke von max. 1,5 A dürfte jedoch nicht ausreichen, um signifikant in den Prozess einzugreifen. Somit ist der Thermostrom nicht in der Lage, die Unterschiede zwischen dem CO₂-Laser und dem Festkörperlaser zu erklären.

Beim Festkörperlaser kann ein deutlicher Eingriff in das Prozessgeschehen beim Schweißen von Aluminium erzielt werden, wenn über den Zusatzdraht ein externer Strom zugeführt wird und zugleich ein externes Magnetfeld vorliegt. Es wurde eine Vielzahl von möglichen Anordnungen von Magnetfeld, Stromzufuhr, Drahtzufuhr und Polung untersucht. Dabei gelangte sowohl Gleich-, als auch Wechselstrom mit unterschiedlichen Frequenzen zur Anwendung, und es zeigten sich unterschiedliche Reaktionen. In vielen Fällen führte dies zu keiner Verbesserung. In einigen Fällen ergaben sich jedoch geringere Prozessfluktuationen und weniger Poren. In anderen Fällen führt eine Ablenkung der Schmelze zu einem veränderten Nahtquerschnitt. Um die Lorentz-Kraftwirkung in eine Ablenkung der Schmelze umzuwandeln, muss die Oberflächenspannung groß genug sein, um ein Ablösen von Tropfen zu verhindern. Bei Aluminium-Legierungen mit einem großen Anteil niedrigsiedender Legierungsbestandteile, wie Magnesium, reicht sie nicht aus.

Eine Verbesserung der Prozessstabilität ergibt sich nur bei Beeinflussungen, die über eine konstante Kraftwirkung zu einer Beruhigung des Prozesses führen. Die Strömung und Dynamik im Schmelzbad muss so verändert werden, dass die Kapillare stabilisiert wird. Dies kann geschehen, indem Schmelze von der Kapillare zur Seite oder nach hinten abgelenkt wird und chaotische Mechanismen, wie das Einschnüren der Kapillare, außer Kraft setzen. Es gelang nicht, über eine periodisch oszillierende Kraftwirkung den Prozess zu stabilisieren. Der Prozess wurde lediglich unruhiger. Die Schmelze erscheint als hochdynamisches System, das von Randbedingungen, wie dem Dampfdruck in der Kapillare, der Schmelzbadwand, der Gravitation und der Oberflächenspannung, „eingeschnürt“ wird und als inkompressible Flüssigkeit nur ausweichen kann. Drei bzw. vier Aggregatzustände liegen auf engem Raum nebeneinander vor. Dieses fluktuierende System folgt jeder äußeren Kraftwirkung, aber es schwingt nicht.

Voraussetzung für eine Anwendung eines magnetischen Effekts in einer Serienproduktion ist die prozesssichere Erzeugung eines Magnetfeldes entlang der zu fügenden Schweißnaht. Permanentmagnete erlauben eine kompakte Bauweise, müssen aber vor Korrosion und Hitzeeinflüssen geschützt werden. Elektromagnete benötigen zur Erzeugung eines vergleichbaren Feldes mehr Raum und eignen sich eher für eine mitge-

führte Anbringung am Schweißkopf. Mit vertretbarem Aufwand lässt sich ein Feld der Stärke 0,4 Tesla erzeugen.

Vergleicht man Aufwand mit möglichem Nutzen eines magnetisch beeinflussten Schweißprozesses, erscheint eine Anwendung sinnvoll, wenn besonders hohe Qualitätsanforderungen an die Naht vorliegen, die anders nicht oder nur mit den viel höheren Anlageninvestitionen der Doppelfokustechnik erzielt werden können.

A Anhang Magnettechnik

Hier im Anhang soll erläutert werden, wie ein Magnetfeld technisch erzeugt werden kann. Die verschiedenen Randbedingungen für den Schweißprozess werden diskutiert. Ein Magnetfeld kann mit einem Elektromagneten oder einem Dauermagneten aufgebaut werden; beide Ansätze werden näher beleuchtet und Möglichkeiten der Umsetzung dargelegt. Zuvor sollen für den Praktiker in kurzer Form die Grundlagen der Magnettechnik zusammengefasst werden.

A.1 Grundlagen der Magnettechnik

Jeder elektrische Strom versetzt den ihn umgebenden Raum in einen Zustand, der sich dadurch äußert, dass auf andere stromführende Leiter Kräfte ausgeübt werden [Hag90]. Ein magnetisches Feld ist ein Hilfsmittel zur Beschreibung dieser Wechselwirkung. Jede bewegte Ladung erzeugt ein magnetisches Feld. Man kann hierbei zwischen gebundenen Strömen und freien Strömen unterscheiden [Pur76].

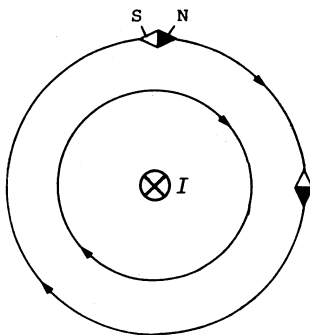


Bild 136: Feldverlauf um einen freien Strom (gerader Leiter) [Hag90]

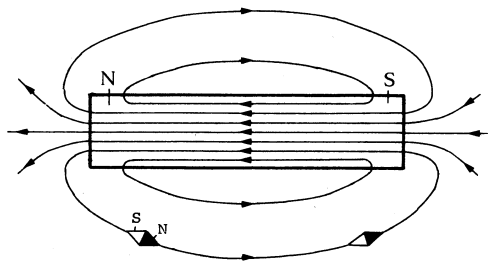


Bild 137: Feldverlauf eines gebundenen Stroms (Stabmagnet) [Hag90]

Freie Ströme sind jene gewöhnlichen elektrischen Ströme in elektrischen Leitern oder anderen makroskopischen Stromwegen, die z.B. mit einem Amperemeter gemessen

werden können und zu einem Feld um diesen Leiter führen (Bild 136). Die gebundenen Ströme (Bild 137) stehen mit den molekularen oder atomaren magnetischen Momenten sowie dem inneren magnetischen Moment von Spin-besitzenden Elementarteilchen in Zusammenhang. Diese Momente sind die Ursache der Magnetisierung M von Substanzen.

Die eigentliche Kraftwirkung, und damit die Magnetfeldstärke, wird durch die magnetische Induktion B , gemessen in Tesla, beschrieben. Sie wird neben der Bezeichnung Flussdichte B auch „Feldstärke B “ genannt. Die historisch übliche Bezeichnung H für die Feldstärke, gemessen in A/m, bezieht sich nur auf die freien Ströme. Diese wird weiterhin als „Feldstärke H “ bezeichnet. Im Vakuum ohne Materie sind beide Größen über die magnetische Permeabilität μ zueinander proportional. Innerhalb von Materie kommt die Magnetisierung M bzw. eine Permeabilitätszahl $\mu_r \neq 1$ hinzu [Pur76]. Es gilt:

$$B = H + 4\pi M \quad (\text{A.1})$$

$$B = \mu_0 \mu_r \cdot H. \quad (\text{A.2})$$

Die Pole eines magnetischen Dipols werden Nord- bzw. Südpol genannt. Gleiche Pole stoßen einander ab und ungleiche ziehen sich gegenseitig an. Das Feld wird durch in sich geschlossene Feldlinien beschrieben. Sie verlaufen außerhalb eines Dipols vom Nord- zum Südpol und innerhalb vom Süd- zum Nordpol. In einem Magnetfeld befindliche magnetische Dipole erfahren ein Moment, wodurch sie sich entlang der Feldlinien ausrichten [Hag90].

Anhand des Verhaltens der Teilchen eines Stoffes im feldfreien Zustand und unter Einfluss eines Magnetfeldes werden folgende magnetische Eigenschaften unterschieden (Tabelle A.1): [Her89, Mich93, Kall94, Boll80, Pur76]

Bei diamagnetischen Stoffen (z.B. Kupfer, Wasser) ist kein ständiges magnetisches Moment der Teilchen vorhanden. Die magnetischen Wirkungen durch Kreisströme und Elektronenspin innerhalb eines Atoms heben sich gegenseitig auf. Unter Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes werden zusätzliche Kreisströme induziert und damit Momente erzeugt. Die so erzeugten Elementarfelder wirken dem äußeren Magnetfeld entgegen. Somit werden diamagnetische Stoffe von einem Feld abgestoßen. Sie reduzieren in geringem Maße die Flussdichte B . Die Permeabilitätszahl μ_r dieser Stoffe ist kleiner 1.

Die Teilchen paramagnetischer Stoffe (z.B. Aluminium) besitzen auch ohne ein äußeres Feld ein magnetisches Moment. Sie stellen Elementarmagnete dar, sind jedoch ungeordnet und beeinflussen sich untereinander kaum. Befindet sich ein solcher Werkstoff in einem starken Magnetfeld, dann richten sich die Elementarmagnete aus. Auf diese Weise verstärken sie das äußere Feld in geringem Maße. Paramagnetische Stoffe werden von einem äußeren Magnetfeld angezogen.

| Magnetismus | Beschreibung | Werkstoffbeispiele |
|---------------------|--|---|
| Diamagnetisch | kein magnetisches Moment der Teilchen, $\mu_r < 1$ | Cu, Bi, H ₂ O, Au, N ₂ |
| Paramagnetisch | permanentes magnetisches Moment der Teilchen; wie ungeordnete Elementarmagnete, $\mu_r > 1$ | Al, Pt, O ₂ |
| Ferromagnetisch | permanentes magnetisches Moment der Teilchen; ausgerichtete Bereiche; leicht magnetisierbar, $\mu_r \gg 1$ | Fe, Co, Ni und deren Legierungen, Einteilung in hart- und weichmagnetisch |
| Antiferromagnetisch | wie ferromagnetisch, jedoch zwei gleichwertige magnetische Untergitter | Legierungen: CrSb, CrAl Metalloxide: MnO, FeO, NiO |
| Ferrimagnetisch | zwei verschiedene magnetische Untergitter | Ferrite, Granite |
| Metamagnetisch | Übergang von antiferro- zu ferromagnetisch | MnAu ₂ , FeCl ₂ , CoCl ₂ |

Tabelle A.1: Magnetisches Verhalten von Materie [Pur76]

Auch bei ferromagnetischen Stoffen besitzen die Teilchen ein permanentes magnetisches Moment. Ein erzeugtes äußeres Feld wird hier durch das hervorgerufene innere Zusatzfeld in hohem Maße verstärkt, allerdings nur bis zur Curie-Temperatur T_C , ab der eine Gefügeänderung auftritt. Auf ferromagnetische Stoffe wirkt eine große Anziehungskraft in einem Magnetfeld. In ferromagnetischen Werkstoffen existieren auch ohne Feldeinfluss ausgerichtete Bereiche. Sie werden als Weißsche Bezirke bezeichnet (Bild 138).

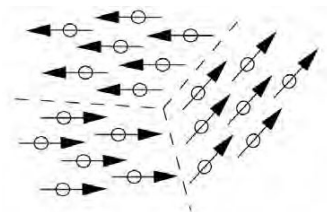


Bild 138: Weißsche Bezirke in ferromagnetischem Material [Her89]

Ferromagnetische Stoffe in einem Magnetfeld verhalten sich mit zunehmender Feldstärke wie folgt: Die magnetische Flussdichte B steigt in drei Phasen (Bild 139). Phase I ist charakterisiert durch einen allmählichen Anstieg. Es wachsen dabei solche Bereiche, deren Ausrichtung ähnlich der des äußeren Feldes ist. In Phase II folgt ein starker Anstieg der Fluss-

Die magnetische Flussdichte B steigt in drei Phasen (Bild 139). Phase I ist charakterisiert durch einen allmählichen Anstieg. Es wachsen dabei solche Bereiche, deren Ausrichtung ähnlich der des äußeren Feldes ist. In Phase II folgt ein starker Anstieg der Fluss-

dichte B , wobei ganze Bereiche in Richtung des äußeren Feldes umklappen. Bei Phase III bewirkt eine weitere Erhöhung der Feldstärke H nur noch einen geringen Anstieg der Flussdichte. Die inneren Ausrichtungen werden mit dem äußeren Feld in Übereinstimmung gebracht bis die Sättigung eintritt.

Die grafische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Feldstärke H und Flussdichte B wird Magnetisierungskennlinie oder Hystereseschleife genannt (Bild 139). Der Kurvenverlauf ist nicht linear, da μ_r nicht konstant ist. Wird die äußere Feldstärke bis auf null verringert, bleibt eine Restflussdichte zurück, auch Remanenzflussdichte B_r genannt. Um diese Remanenzflussdichte auf null zu reduzieren, muss das Feld umgekehrt werden. Die dafür notwendige Feldstärke ist die Koerzitivitätsfeldstärke H_C .

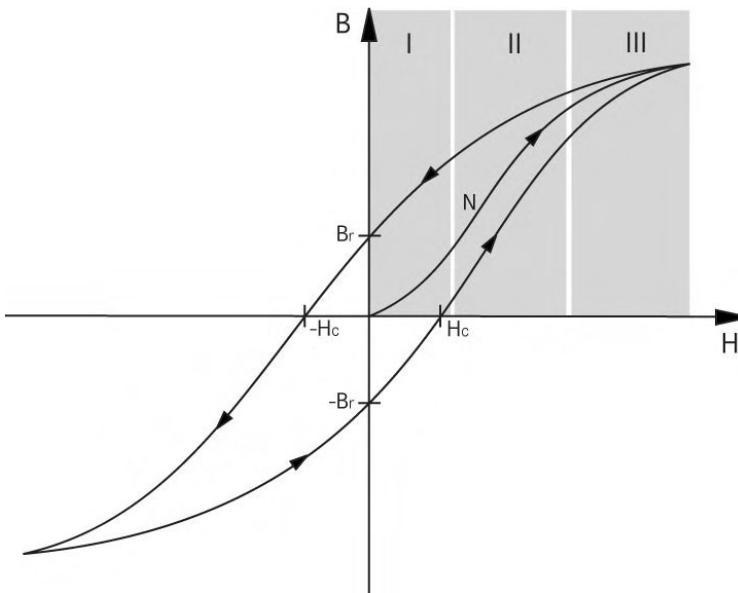


Bild 139: Hystereseschleife, Neukurve und Magnetisierungsphasen [Hag90, Her89]

Die Hystereseschleife ist für jeden Stoff charakteristisch (Bild 140). Solche mit einer schmalen Schleife (H_C minimal) werden den weichmagnetischen Werkstoffen zugeordnet. Eine breite Schleife (H_C groß) charakterisiert einen hartmagnetischen Werkstoff [Mich93].

Ohne Bedeutung für diese Arbeit sind antiferromagnetische, ferrimagnetische, metamagnetische oder verdünnte ferromagnetische Stoffe.

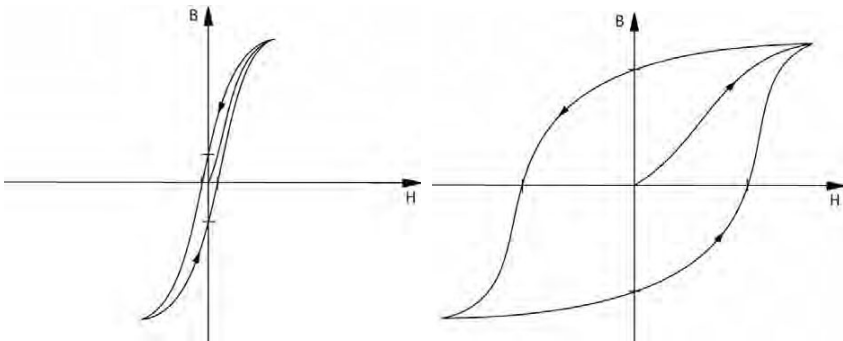


Bild 140: Hystereseschleife eines weichmagnetischen (links) und eines hartmagnetischen (rechts) Werkstoffes [Hag90]

A.2 Randbedingungen für den Einsatz von Magneten in der Schweißtechnik

Soll nun ein Magnetfeld im Schweißbereich erzeugt werden, sind eine Reihe von Bedingungen zu beachten. Die Temperatur an der Schweißstelle beträgt einige tausend Grad, so dass die sich in der Nähe befindenden Teile mehrere hundert Grad warm werden können.

- Die Magnetbauteile müssen demnach temperaturbeständig sein. Es sollte auch bei höheren Temperaturen ein konstantes Magnetfeld zu Verfügung stehen. Die Curie-Temperatur der Magneteile muss über der maximalen Betriebstemperatur liegen. Je näher die Temperatur der Bauteile an ihre Curie-Temperatur gelangt, umso mehr sinkt die Sättigungsflussdichte ab, das Magnetfeld wird schwächer und ggf. werden die magnetischen Eigenschaften zerstört.
- Besteht die Gefahr, dass Grenztemperaturen des gewählten Magnetwerkstoffes erreicht werden, so müssen geeignete Maßnahmen, wie eine Abschirmung oder Kühlung, getroffen werden. Ein möglicher Wärmestau soll durch günstige Wärmeübergänge vermieden werden.
- Zu berücksichtigen ist die direkte verschmutzende Umgebung. Dies sind vor allem Schweißspritzer oder Metaldampf, welchen die Magneteile ausgesetzt sind.

- Um einen im Sinne der diskutierten Impulserzeugung möglichst großen Einfluss im Schmelzbad zu erzielen, müssen die Magnetpole möglichst nah der Fügestelle angeordnet werden. Daraus ergeben sich zwei Probleme. Einerseits darf die räumliche Zugänglichkeit und Flexibilität des Laserkopfes nicht eingeschränkt werden. Andererseits soll genügend Freiraum für Spanneinrichtungen vorhanden sein.
- Die Kraft des erzeugten Magnetfeldes kann zu ungewollter Anziehung der Fügebleche führen, besonders bei dünneren Stahlblechen. In solchen Fällen besteht die Gefahr der Verformung der Blechteile.
- Wird ein ferromagnetischer, den magnetischen Fluss leitender Stahl geschweißt, wie z.B. Karosserieblech, dann ändert sich der magnetische Kreis. Durch Überschreitung der Curie-Temperatur in der Schweißzone ist das Schmelzbad und die Wärmeeinflusszone geringer magnetisch leitend als die nahe Werkstoffumgebung. Zum Entnehmen des Bleches muss das Feld abgeschaltet werden. Bei dem paramagnetischen Aluminium ist dies nicht notwendig.
- Elektromagneten erhitzen sich im Betrieb und beim Einsatz von Wechselstrom besonders durch die Hystereseverluste. Die im Magneten erzeugte Wärme kann sich auch auf die Fügeteile übertragen. So kann der Schweißprozess zusätzlich in gewollter oder ungewollter Form beeinflusst werden.
- Sollen magnetische Effekte im Schweißprozess genutzt werden, muss an den Fügeteilen entlang der Schweißnaht das Magnetfeld in notwendiger Richtung und Stärke erzeugt werden. In Anbetracht des fortschreitenden Fügeprozesses, stellt sich die Frage nach einer stationären oder mitfahrenden Magneteinrichtung. Eine Bewegung der Magneteile muss mit der des Laserkopfes synchronisiert werden. Möglich ist auch, Laserkopf und Magnetapplikation konstruktiv zu kombinieren. Bei einer stationären Variante sind passende Magnetelemente entlang des Fügeweges anzuordnen.

A.3 Einsatz von Elektromagneten

Die Funktion eines Elektromagneten beruht auf dem Prinzip eines magnetischen Feldes, welches um einen stromdurchflossenen Leiter entsteht. Wird nun dieser Leiter aufgewickelt, dann überlagern sich die Magnetfelder der einzelnen Leiterschleifen. Der fließende Strom hat in jeder Schleife den gleichen Richtungssinn. Die Überlagerung führt zu einer Verstärkung. Ist in diesem erzeugten Magnetfeld ein magnetisier-

barer weichmagnetischer Werkstoff vorhanden, verlaufen fast alle Feldlinien innerhalb dieses Werkstoffes [Hag90] (Bild 141).

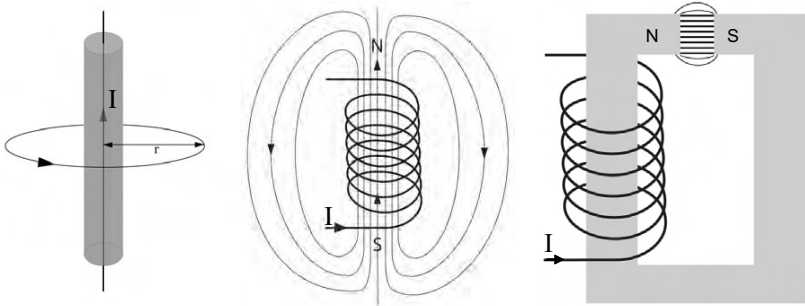


Bild 141: Prinzip eines Elektromagneten: Feld um Leiter, innerhalb Spule und Verstärkung durch Eisenkern [Nach Hag90]

Die magnetische Feldstärke H ist bei einem geraden Leiter proportional zum Strom I und indirekt zum Abstand r vom Leiter (Gleichung A.3). Innerhalb einer Spule ergibt sich die Feldstärke H aus dem Produkt der Stromstärke I mit der Anzahl Windungen n , bezogen auf die Länge der Spule l (Gleichung A.4):

Um einen geraden Leiter:
$$H = \frac{I}{2\pi \cdot r} . \quad (\text{A.3})$$

Innerhalb einer Spule:
$$H = \frac{I \cdot n}{l} . \quad (\text{A.4})$$

Elektromagnete werden im Allgemeinen für spezielle Anwendungsfälle entworfen. Bei der Auslegung für technische Applikationen wird aufgrund von vielfältigen Einflussgrößen schrittweise vorgegangen. Der anfängliche Entwurf muss im Verlauf der Auslegung immer weiter detailliert und berechnet werden.

A.3.1 Berechnung eines Magnetkreises nach der Netzwerkmethod

Zur Berechnung von Magnetkreisen gibt es verschiedene Methoden. Die wichtigste ist die Finite-Elemente-Methode (FEM). Mit ihr lassen sich Magnetkreise mit komplizierter Geometrie berechnen. Für diese ersten Dimensionierungen ist die Netzwerkmethod besonders gut geeignet. Dabei wird die Analogie zwischen elektrischen und magnetischen Kreisen zu Grunde gelegt. In diesem Kapitel sollen die notwendigen Formeln

kurz aufgeführt werden, um daraus die wichtigsten Auslegungskriterien für den Einsatz in der Schweißtechnik abzuleiten [Hag90, Mich93, Kall94].

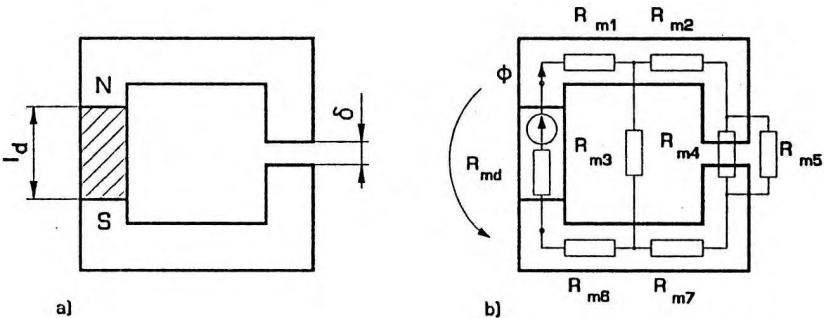


Bild 142: Magnetischer Kreis (a) und Netzwerkmodell (b) [Kall94]

Der magnetische Kreis wird zunächst durch ein Ersatzschaltbild modelliert (Bild 142). Genauso wie bei elektrischen Netzwerken kann dann mittels Spannungen und Widerständen unter Beachtung der Kirchhoffschen Gesetze der Fluss in einzelnen Zweigen des Netzwerkes errechnet werden (Tabelle A.2). Von besonderem Interesse bei der Anwendung für die Schweißtechnik ist hier der Fluss im Luftspalt in der Schweißzone.

| | Elektrischer Kreis | Magnetischer Kreis |
|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Spannungsgröße | Elektrische Spannung U | Magnetische Durchflutung Θ |
| Widerstandsgröße | Elektrischer Widerstand R_{el} | Magnetischer Widerstand R_m |
| Flussgröße | Elektrischer Strom I | Magnetischer Fluss Φ |
| Dichte der Flussgröße | Elektrische Stromdichte j | Magnetische Feldstärke B |

Tabelle A.2: Analogie zwischen elektrischem und magnetischem Kreis [Kall94]

Der elektrischen Spannung U entspricht die magnetische Durchflutung Θ des Kerns. Sie ist das Kreisintegral des Feldes H um den Kern und wird durch die anliegende Stromstärke I und die Anzahl der Windungen n der Spule bestimmt:

$$\Theta = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \cdot n. \tag{A.5}$$

Die Anzahl Windungen bestimmt ferner quadratisch die Induktivität L der Spule:

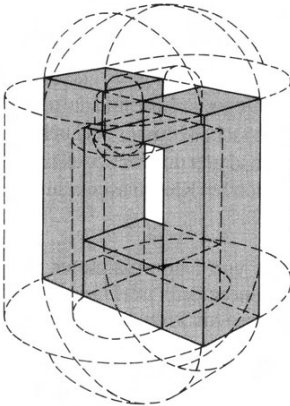
$$L = f \cdot \frac{\mu_0 \mu_r \cdot A_n \cdot n^2}{l}. \quad (\text{A.6})$$

Dabei ist A_n die durchflutete Fläche, f ein Faktor für die Streuverluste und l die Länge der Spule [Her89]. Der magnetische Fluss Φ im Eisenkreis ergibt sich analog dem Ohmschen Gesetz aus der Durchflutung Θ und dem magnetischen Widerstand R_m bzw. dem reziproken magnetischen Leitwert G_m des gesamten Netzwerkes:

$$\Phi = \frac{\Theta}{R_m} = \Theta \cdot G_m. \quad (\text{A.7})$$

Die magnetische Feldstärke B kann an einer Stelle des Magnetkreises mit der Querschnittsfläche A aus dem Fluss Φ berechnet werden:

$$B = \frac{\Phi}{A}. \quad (\text{A.8})$$



Maßgeblich für die Eigenschaften des gesamten Magnetkreises ist die Leitfähigkeit des Luftspaltes. Bei der Methode der vereinfachten Luftwege wird der Luftraum zwischen zwei Polen in einfache geometrische Grundkörper zerlegt, deren magnetische Leitfähigkeit mit Hilfe des mittleren Querschnitts A_m bzw. dem Volumen des Körpers V und der mittleren Flussweglänge l_m berechnet werden kann (Bild 143) [Kall94, Mich93]. Die Berechnung der Einzelleitwerte G_{teil} geschieht dabei auf die in Bild 144 dargestellte Weise, wo allerdings nur beispielhaft einige Streupfade veranschaulicht werden.

Bild 143: Arbeitsspalt und Streupfade
[Mich93]

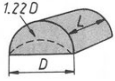
Arbeitsluftspalt



$$G_m = \mu \frac{A}{L}$$



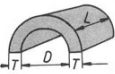
Halbzylinder: horizontal und vertikal



$$G_m = 0,264 \mu L$$



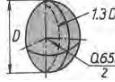
Halbhohlzylinder: oben, seitlich und, außen



$$G_m = \frac{\mu L}{\pi} \ln \left(\frac{D+T}{D} \right)$$



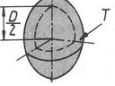
Viertelkugel



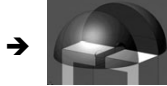
$$G_m = 0,077 \mu D$$



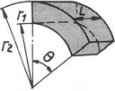
Viertelhohlkugel: außen



$$G_m = \frac{1}{4} \mu T$$



Hohlzylinderabschnitt



$$G_m = \frac{\mu L}{\theta} \ln \frac{r_2}{r_1}$$



Bild 144: Leitwerte von Teil-Streupfaden [Kall94, Mich93]

Der Gesamtleitwert $G_{\text{Luftspalt}}$ wird durch die Summe aller einzelnen Leitwerte G_m bestimmt:

$$G_{\text{Luftspalt}} = \sum G_{\text{Streupfad}} \quad (\text{A.9})$$

Danach wird der Leitwert des Eisenkerns G_{Eisen} berechnet. Hierbei wird die Permeabilität des verwendeten Werkstoffes μ_r , die mittlere Querschnittsfläche A_m und die mittlere Flussweglänge l_m verwendet:

$$G_{\text{Eisen}} = \frac{\mu_0 \mu_r \cdot A_m}{l_m} \quad (\text{A.10})$$

Aus den Einzelleitwerten G_{Eisen} und $G_{\text{Luftspalt}}$ wird schließlich der Gesamtleitwert G_m bestimmt:

$$\frac{1}{G_m} = \frac{1}{G_{\text{Eisen}}} + \frac{1}{G_{\text{Luftspalt}}} . \quad (\text{A.11})$$

Anschließend lässt sich der gesamte magnetische Fluss Φ im Elektromagneten nach Gleichung A.7 berechnen. Dann können die Teilflüsse $\Phi_{\text{Streupfad}}$ und Feldstärken $B_{\text{Streupfad}}$ in den einzelnen Maschen des Streupfades mit ihren jeweiligen Querschnitten $A_{\text{Streupfad}}$ ermittelt werden:

$$\Phi_{\text{Streupfad}} = \frac{G_{\text{Streupfad}}}{G_{\text{Luftspalt}}} \cdot \Phi \quad (\text{A.12})$$

$$B_{\text{Streupfad}} = \frac{\Phi_{\text{Streupfad}}}{A_{\text{Streupfad}}} . \quad (\text{A.13})$$

Auf diesem Wege wurden Berechnungen für eine gewählte Geometrie (Bild 145) durchgeführt. Die Abmaße orientieren sich an einem praxisnahen Versuchsaufbau. Um die Bestimmung der Streupfade zu vereinfachen, wurde im Bereich der Pole ein gerader Spalt gewählt.

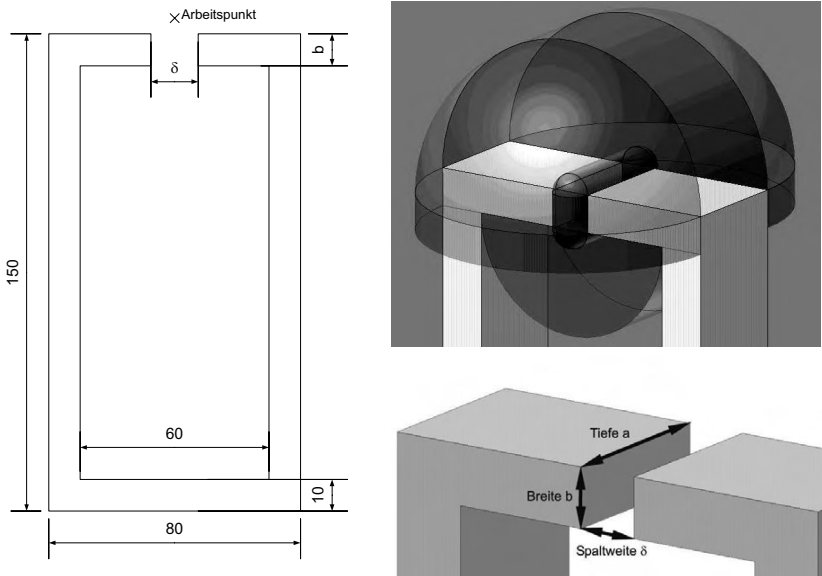


Bild 145: Geometrie des berechneten Eisenkörpers, einige Streupfade in Luftspaltnähe

Anhand von Vorversuchen wurde ein sinnvoller Ausgangspunkt für die Berechnungen gefunden. Wie in Bild 146 dargestellt, wird jeweils nur ein Parameter variiert, während die restlichen konstant auf den Ausgangspunkt gesetzt bleiben. Es wird dann jeweils die erzeugte Durchflutung Θ , der magnetische Fluss Φ und die Feldstärke in den Eisenpolen und im Arbeitspunkt oberhalb des Luftspaltes berechnet. Der Wert von 0,31 T im Arbeitspunkt entspricht in etwa der Stärke des in Kapitel 4 und 5 genutzten Elektromagneten.

| Eingangsparameter | Ausgangspunkt | Variation | Zielgrößen | Wert im Ausgangspunkt |
|------------------------------|---------------|-------------|------------------------------|-------------------------|
| Tiefe a von Spalt und Magnet | 50 mm | 20 - 100 mm | Durchflutung Θ | 4,5 kA |
| Breite Eisenpole b | 10 mm | 5 - 20 mm | Magnetischer Fluss Φ | $7,78 \cdot 10^{-4}$ Vs |
| Luftspaltweite δ | 15 mm | 5 - 25 mm | Feldstärke B im Eisenpol | 1,55 T |
| Permeabilität μ_r | 10000 | 10 - 100000 | Feldstärke B im Arbeitspunkt | 0,31 T |
| Stromstärke I | 30 A | 10 - 50 A | | |
| Anzahl Spulenwindungen n | 150 | 50 - 250 | | |

Bild 146: Variierte Eingangsgrößen und berechnete Ergebnisgrößen

Mit steigendem Eisenquerschnitt im Falle einer größeren Tiefe und breiteren Polflächen (Bild 147, Bild 148) sinkt der Widerstand des Luftspaltes und damit erhöht sich bei gleicher Durchflutung der Fluss im magnetischen Kreis. Da er sich auf eine größere Fläche verteilt und nicht proportional ansteigt, sinkt die Feldstärke im Eisenkörper. Bei zu kleinen Querschnitten übersteigt die theoretische Feldstärke die Sättigungspolarisation des Werkstoffes B_s , die je nach weichmagnetischem Werkstoff zwischen 1,6 und 2,35 T liegt (siehe Anhang A.3.2). Der Eisenkörper kann dann den Fluss nicht aufnehmen. Es kommt zu Blasverlusten. Da sich der Widerstand des Luftspaltes, die Streupfade und die Sättigung in den Polen nicht verändern, bleibt die Feldstärke im Arbeitspunkt konstant. Es kann mit einer größeren Magnettiefe a ein längerer Schweißnahtabschnitt mit einem konstanten Magnetfeld abgedeckt werden.

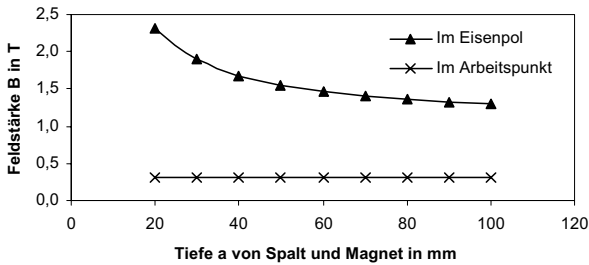


Bild 147: Einfluss der Polgeometrie (Tiefe) auf die Feldstärke

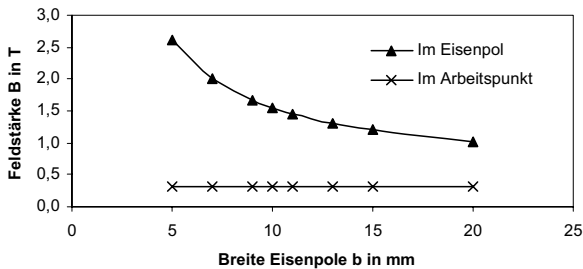


Bild 148: Einfluss der Polgeometrie (Breite) auf die Feldstärke

Wenn der Luftspalt vergrößert wird, sinkt der Leitwert des magnetischen Kreises und damit der magnetische Fluss. Auch im Arbeitspunkt sinkt die Feldstärke B , da der geringere Fluss nun volumenmäßig größere Streupfade erregen muss (Bild 149).

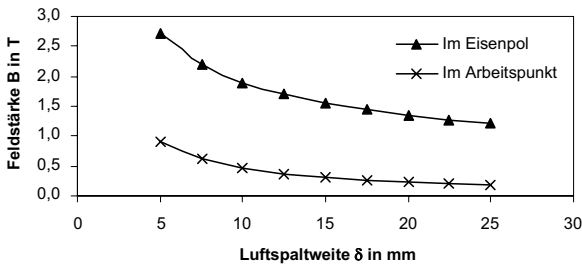


Bild 149: Einfluss der Spaltweite auf die Feldstärke

Die Möglichkeit über eine größere Durchflutung den Fluss zu steigern, wird besonders durch die Sättigung in den Polen begrenzt. Ab einer Permeabilitätszahl von etwa

5000 ist der Widerstand des Eisenkörpers gegenüber dem Luftspalt von untergeordneter Bedeutung (Bild 150). Ein höherer Wert bei der Werkstoffauswahl bringt keinen Vorteil.

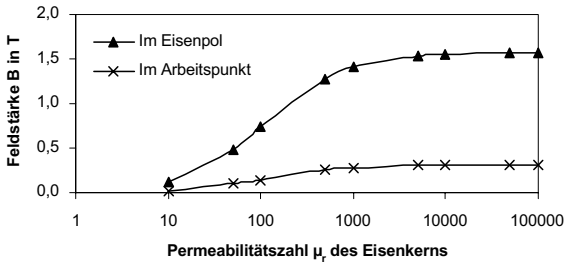


Bild 150: Einfluss der Permeabilität auf die Feldstärke

Stromstärke und Windungszahl ergeben als Produkt zusammen die Durchflutung. Eine Steigerung ist nur bis zum Erreichen der Sättigungsflussdichte im weichmagnetischen Werkstoff an den Polen sinnvoll (Bild 151, Bild 152). Die Stromstärke geht unmittelbar in die ohmsche Widerstandsleistung und damit in die Erwärmung der Spule ein. Die Windungszahl erhöht die Länge des Spulendrahtes und geht damit in den Widerstand ein. Bei gleicher Stromstärke müsste also die Spannung erhöht werden, womit ebenfalls die Erwärmung steigen würde.

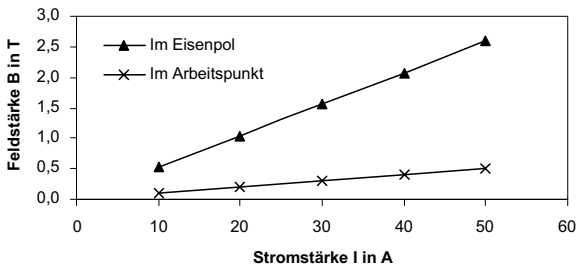


Bild 151: Einfluss der Stromstärke auf die Feldstärke

Diese Berechnung zeigt die Bedeutung der Sättigungsflussdichte, die eingeschränkte Bedeutung der Permeabilität und die Notwendigkeit, die Durchflutung entsprechend dem Widerstand im magnetischen Kreis auszulegen.

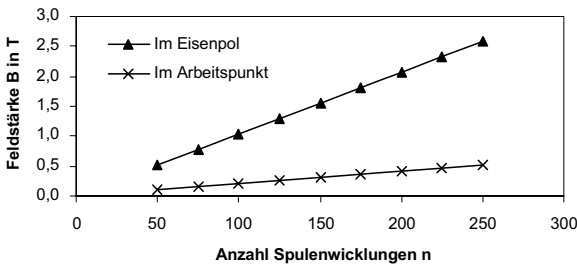


Bild 152: Einfluss der Wicklungszahl auf die Feldstärke

A.3.2 Auswahl eines weichmagnetischen Werkstoffes

Bei der Auslegung der Magnetkreise spielt der weichmagnetische Werkstoff eine wesentliche Rolle zur Leitung des Feldes in die Schweißzone. Nachfolgend sollen die Anforderungen, Auslegungskriterien [Mich93] und Eigenschaften der Werkstoffe diskutiert werden.

- Die Permeabilität μ_r , und damit die Magnetisierbarkeit, sollte möglichst hoch sein. Sie verstärkt die Wirkung der Spule und reduziert den Widerstand im Kern. Allerdings erhöht sie auch die Induktivität der Spule.
- Eine hohe Sättigungsflussdichte B_s sorgt dafür, dass ein großer Teil des Flusses nahe am Luftspalt aus dem Kern tritt. Sie verringert so die Blaswirkung an weiter entfernt liegenden Flächen. Daher werden zur Flusskonzentration oft Polschuhe aus besonders hochsättigendem Material eingesetzt.
- Die magnetischen Eigenschaften sollten auch unter Einfluss mechanischer Belastungen konstant bleiben (Magnetostriktion) [Mich93, Boll80].
- Im Hinblick auf die Konstruktion und Bauweise des Magneten ist die Lieferform der Halbzeuge wichtig. Hierzu zählen Abmaße und Dicken der Magneteile.
- Von Bedeutung ist auch der Anlieferzustand hinsichtlich des Gefüges. Die Schlussglühung kann vor oder nach der Bearbeitung erfolgen. Generell sollen die magnetischen Eigenschaften durch Bearbeitungsprozesse, wie Fräsen oder verschiedene Schneidverfahren, bei denen Wärme und mechanische Spannungen auftreten, nicht zu stark beeinflusst werden [Mor99]. Es sollte klar sein, welche Bearbeitungsprozesse notwendig sind und welche Folgen sie auf die Materialien haben.

- Die Werkstoffe sind unterschiedlich anfällig hinsichtlich Korrosion. Die notwendigen Maßnahmen, wie Beschichten durch Galvanisieren, sind zu berücksichtigen.
- Die Wärmebelastung des Werkstoffes geschieht aufgrund der Schweißwärme, der ohmschen Erwärmung der Spule und bei Wechselstrom aufgrund von Hystereses- und Wirbelstromverlusten im Kern. Der Werkstoff muss in seinen magnetischen Eigenschaften entsprechend der maximalen Temperatur stabil sein. Einen Anhaltspunkt gibt die Höhe der Curietemperatur T_C , aber auch schon unterhalb von T_C nehmen die Eigenschaften irreversibel ab.
- Die Hysterese gibt Auskunft über die Wärmeentwicklung beim Ummagnetisieren im Phasendurchgang bei Wechselstrom. Die von der Hystereseschleife eingegrenzte Fläche ist die Energie, die bei Ummagnetisierung aufgebracht werden muss (Bild 140).
- Wirbelströme können durch einen hohen spezifischen Widerstand unterdrückt werden. Zudem kann der Kern statt aus Vollmaterial, aus zueinander isolierten Lamellen aufgebaut werden.

Die Anforderungen und die Eigenschaften der Werkstoffe müssen aufeinander abgestimmt werden. Einige dieser Kriterien stehen im Widerspruch zueinander. So sind extrem hohe Permeabilitäten nur zu erreichen, wenn auf eine hohe Sättigung verzichtet werden kann und umgekehrt.

Im Wesentlichen werden die Werkstoffe Eisen (Fe), Kobalt (Co) und Nickel (Ni) zu den weichmagnetischen Werkstoffen gezählt. Dazu gehören auch deren Legierungen untereinander. Ein wichtiges Legierungselement ist außerdem Silizium (Si) [VAC2, Mich93, Boll80]. In Tabelle A.3 werden die Eigenschaften für statische Magnetfelder verglichen.

Reines Eisen hat eine sehr niedrige Koerzitivfeldstärke. Es wird dort eingesetzt, wo hohe Induktionswerte mit geringer Feldstärke erzielt werden sollen. Nachteilig ist die schlechte Korrosionsbeständigkeit und der geringe spezifische elektrische Widerstand, der einen Einsatz bei höheren Frequenzen ausschließt. Ferritwerkstoffe sind kostengünstig und einfach zu bearbeiten, da sie sehr weich und weniger korrosionsanfällig sind. Sie haben aber gegenüber den anderen Werkstoffen weniger gute magnetische Eigenschaften.

Ni-Fe-Legierungen zeichnen sich vor allem durch hohe Permeabilität bei geringer Sättigung aus. Die Permeabilität steigt stark an, wenn der Nickelgehalt auf bis zu 80%

erhöht wird, jedoch ist nur bis 60% eine sinnvolle Sättigung gegeben. Bei der Herstellung ist es möglich, sehr flache Hystereseschleifen einzustellen, so dass bei einer Koerzitivfeldstärke von 5 A/m ein verlustarmes Ummagnetisieren erreicht werden kann. Der Werkstoff ist gut temperaturbeständig und wenig korrosionsanfällig. Allerdings ist er schlecht spanend bearbeitbar.

Co-Fe-Legierungen besitzen besonders hohe Sättigungsflussdichten bei geringeren Permeabilitäten und relativ geringen Ummagnetisierungsverlusten. Da sie thermisch sehr stabil sind, können sie bei einer Arbeitstemperatur bis 400 °C eingesetzt werden. Damit sind sie sowohl bei einem Wechselstrommagneten als Polschuh nahe an der Schweißzone, als auch bei einem Gleichstrommagnet als Kern geeignet.

Si-Fe-Legierungen haben eine hohe Sättigung und eine relativ gute Permeabilität. Zudem ist der Werkstoff günstig und besitzt eine hohe Arbeitstemperatur. Trotz einer hohen Koerzitivfeldstärke sind die Ummagnetisierungsverluste gering, da der spezifische Widerstand hoch ist. In der Form von Lamellenblechen eignet er sich besonders als Kern für Wechselstrommagnete.

| Werkstoffgruppe | Reineisen Fe | Ni-Fe | Co-Fe | Si-Fe |
|---|--|--|--|--|
| Beispielwerkstoff | Vacofer S1 | PERMENORM 5000 H2 | VACOFLUX 50 | TRAFOPERM N3 |
| Max. Einsatztemperatur | k.a. | 200 °C | 400 °C | 500 °C |
| Curietemperatur | 770 °C | 440 °C | 950 °C | 750 °C |
| Permeabilität μ_4 | 2000 | 7000 | 9000 | 1000 |
| Sättigung B_s | 2,15 T | 1,55 T | 2,35 T | 2,03 T |
| Koerzitivfeldstärke H_c | 0,06 A/cm | 0,05 A/cm | 1,4 A/cm | 0,2 A/cm |
| Spez. el. Widerstand [$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$] | 0,1 | 0,45 | 0,35 | 0,4 |
| Typischer Einsatzbereich | Polschuhe, Ankerkörper, Flussleiterteile | Abschirmungen, Rotor- und Statorbleche, Speicherdrosseln | Polschuhe, starke Elektromagnete, Motoren oder Generatoren | Relaisteile, Polschuhe, Flussleiterteile |

Tabelle A.3: Vergleich weichmagnetischer Werkstoffe (statisch) [VAC2]

A.4 Einsatz von Dauermagneten

A.4.1 Grundlagen hartmagnetischer Werkstoffe

Hartmagnetische Werkstoffe besitzen eine ausgeprägte Hysterese und eine große Koerzitivfeldstärke ($H_C > 10 \text{ kA/m}$). Nach dem Aufmagnetisieren erzeugen sie ein Magnetfeld, das ohne zusätzliches Magnetfeld aufrechterhalten wird. Dieser Zustand bleibt auch in der Nähe anderer Magnetfelder bestehen [Kal194]. Ebenso bedeutsam ist die Flussdichte, die der Werkstoff ohne magnetischen Widerstand maximal erzeugen kann. Dies wird ausgedrückt durch die Remanenzflussdichte B_r .

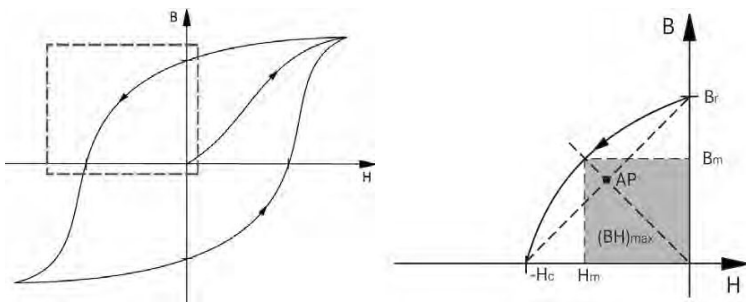


Bild 153: Entmagnetisierungskurve hartmagnetischer Stoffe mit Energiedichte und Arbeitspunkt [IBS, VAC1]

Die Entmagnetisierungskurve dient der Beschreibung der wesentlichen magnetischen Eigenschaften eines permanentmagnetischen Werkstoffes. Das Produkt aus den zusammengehörigen Werten von Flussdichte und Feldstärke an jedem Punkt der Entmagnetisierungskurve stellt eine bestimmte Energiedichte dar. Der Höchstwert dieses Produktes wird als die maximale Energiedichte $(BH)_{\max}$ bezeichnet. Die Energiedichte ist ein Maßstab für die Güte und wird als Kenngröße für jeden Werkstoff angegeben. Bei zu hoher Einsatztemperatur verliert auch der hartmagnetische Werkstoff seine Eigenschaften. Der Arbeitspunkt (AP) des magnetischen Kreises sollte in der Nähe der maximalen Energiedichte liegen [IBS].

A.4.2 Auswahl eines hartmagnetischen Werkstoffes

Bezüglich der Anwendung in der Schweißtechnik ergeben sich verschiedene Anforderungen an einen hartmagnetischen Werkstoff:

- Eine gute Temperaturbeständigkeit gegenüber der Schweißwärme ist wiederum notwendig.
- Eine hohe Energiedichte ist Voraussetzung für ein starkes Magnetfeld.
- Eine Unempfindlichkeit gegen Fremdmagnetfelder stellt konstante magnetische Eigenschaften über eine längere Nutzungszeit sicher.
- Ebenso wie bei den Weichmagneten stellt sich die Frage, in welcher Form und Größe und in welchem Gefügestand die Halbzeuge lieferbar sind. Die Bearbeitbarkeit muss bedacht werden. Hartmagnete sind oft sehr spröde.
- Je nachdem wie anfällig der Werkstoff für Korrosion ist, muss er geschützt werden können.

| Magnetwerkstoff | Bariumferrit | AlNiCo | Sm ₂ Co ₁₇ | NdFeB |
|------------------------------------|--|--|--|---|
| Max. Einsatztemp. | 200 °C | 450 °C | 300 °C | 100 - 150 °C |
| Curietemperatur T _c | 450 °C | 860 °C | 750 - 800 °C | 310 °C |
| Energiedichte (BH) _{max} | 25,5 kJ/m ³ | 36 kJ/m ³ | 195-225 kJ/m ³ | 225 – 280 kJ/m ³ |
| Remanenz B _r | 0,37 T | 1,15 T | 1 - 1,1 T | 1,1 – 1,25 T |
| Koerzitivfeldstärke H _c | 180 kA/m | 50 kA/m | 1200 – 2070 kA/m | 800 – 1120 kA/m |
| Einsatzbereich | Sensorik, Messtechnik Gleichstrommotoren, Lautsprecher | Schalter, Relais, Motoren sowie elektrische Zähler | Servo-, Schrittmotoren, Mikrofone, magnetische Kupplungen, Relais und Schalter | Computer-, Medizin-, Automobiltechnik Haftmagnetsysteme, Servomotoren, Magnetkupplungen |
| Korrosionsverhalten | Unempfindlich | Unempfindlich | Empfindlich | Empfindlich |

Tabelle A.4: Vergleich hartmagnetischer Werkstoffe [IBS]

In Tabelle A.4 werden verschiedene Werkstoffe verglichen. Hartferrite, wie Bariumferrit, scheiden bei der Auswahl wegen ihrer geringen Energiedichte aus. Die erreichbare Stärke des Magnetfeldes ist zu niedrig. Trotz seiner hohen Arbeitstemperatur ist bei einem AlNiCo-Magneten die Gefahr zu groß, dass das erzeugte Feld nicht konstant bleibt. Der Werkstoff ist zu leicht von einem Fremdfeld entmagnetisierbar. Die Gruppe der Magnete aus Seltenen-Erden erfüllt die diskutierten Bedingungen besser. Ein außerordentlich gut geeigneter Werkstoff ist Samarium-Kobalt in Form von SmCo_5 oder besser $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. Unter Temperaturbedingungen bis zu 300°C ist ein starkes Magnetfeld erzeugbar. Um ein stärkeres Feld zu erzeugen, käme ein Magnet aus Neodym-Eisen-Bor NdFeB infrage. Dieser Werkstoff ist jedoch nicht so temperaturbeständig, da schon bei 210°C die Einsatzgrenze erreicht wird [VAC1, Boll80, IBS].

Literatur- und Quellenverzeichnis

- Abdu95 ABDULLAH, H.; CHATWIN, C.; PHRIOZE D.; WATSON I.: *Magnetisation anomalies in laser welded magnetic materials*. In: ICALEO'95, Proceedings, 1995, S.932-941
- Amb01 AMBROSY, G.; LINDENAU, D.; BERGER, P.; HÜGEL, H.: *Effects of Magnetically Supported Laser Beam Welding of Aluminium Alloys*. In: Lasers in Manufacturing 2001 (Proceedings of the First International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, June 2001). AT-Fachverlag, Stuttgart, 2001, S. 416 ff
- Amb06 AMBROSY, G.: Dissertation in Vorbereitung; Universität Stuttgart
- And90 ANDERS, A.: *A formulary for plasma physics*. Akademie-Verlag, Berlin, 1990
- Apo88 APOLLONOV, V.; KONOV, V.; NIKITIN P.; PROKHOROV, A.; SOROCHENKO, V.; SHAKIR, Y.: *Probe investigations of a surface plasma created by a train of nanosecond CO₂ laser pulses*. Sov. J. Quantum Electron. 19 (4), April 1989, S. 535-537
- Ari69 ARIFOV, T.; ASKARYAN, G.; RAEVSKII, I.; TARASOVA, N.: *Laser-induced current pulses from a target in a gas*. Soviet Physics JETP, Vol. 28, No.2, Feb 1969, S. 201-202
- Ask66 ASKARYAN, G.; RABINOVIC, M.; SMIRNOVA, A.; STUDENOV, V.: *Currents produced by light pressure when a laser beam acts on matter*. JETP Lett. 5, 93, 1967
- Bas81 BASLER, B.; ERDMANN-JESNITZER, F.: *Metallschutzgasschweißung: Einwirkungen longitudinaler Magnetfelder*. Maschinenmarkt, Würzburg 87 (1981) 16, S. 267-270
- Beck04 BECK, M.: *Persönliche Mitteilung*, DaimlerChrysler AG, Ulm, 2004

- Beck90 BECK, M.; BERGER, P.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Aspects of key-hole/melt interaction in high speed laser welding*. In: SPIE Vol. 1397 Eighth International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers (1990), S. 769-774
- Beck96 BECK, M.: *Modellierung des Lasertiefschweißens*. Dissertation Universität Stuttgart, Teubner-Verlag, Stuttgart, 1996
- Bern03 BERNHARDT, R.; SCHUBERT, H.; HAUSER, S.: *Laserschweißen von Aluminium am Beispiel der Türen des neuen Maybach*. In: HÜGEL, H.; DAUSINGER, F.; MÜLLER, M. (Hrsg.): Stuttgarter Lasertage '03 (Tagungsband '03). Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge, Stuttgart 2003, S. 179 ff
- Beth00 BETHKE, U.: *Persönliche Mitteilung*, INPRO, Berlin, 2000
- Bey95 BEYER, E.: *Schweißen mit Laser*. Springer Verlag, Berlin 1995
- Bir86 BIRZVALKS, J.: *Streifzug durch die Magnetohydrodynamik*. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1986
- Bli75 BLINKOV, V.: *Influence of an electromagnetic field on the structure and properties of welded joints in high-tensile steels*. Welding Production 22/11 (1975), S.15-17
- Böhm04 BÖHM, K.; REIBEL, J.; HEIN, S.: *Der neue AUDI A3 - Laserschweißapplikationen*. In: EBERT, F. (Hrsg.): Proceedings of the European Automotive Laser Application, Bau Nauheim 2004. Technik & Kommunikation Verlags GmbH, Berlin 2004, S. 51 ff
- Boll80 BOLL, R.: *Magnettechnik*. expert Verlag Grafenau/Württ., 1980
- Bosch84 N.N.: *Kraftfahrzeugtechnisches Handbuch*, 19. Auflage, Hrsg.: Robert Bosch GmbH, VDI Verlag, Düsseldorf, 1984, S. 116-117
- Bren01 BRENNER, B.; STANDFUSS, J.; WINDERLICH, B.: *Induktiv unterstütztes Laserstrahlschweißen zum rissfreien Fügen von härtbaren Stählen*. In: DVS-Berichte 216, DVS-Verlag, Düsseldorf 2001, S. 289 ff
- Bren02 BRENNER, B.; STIELE, H.: *Kombinierte Wärmebehandlung Laser-Induktionserwärmung*. Stahl (2002) 6, S. 40 ff.

- Bro62 BROWN, D.; CROSSLEY, F.; RUDY, J; SCHWARTZBART, H.: *The effect of electromagnetic stirring and mechanical vibration an arc welds*. Welding Journal 41 (1962), S.241-250
- Brun02 BRUNE, E.; DANZER, W.: *Innovative Schutzgastechnologie ermöglicht Tiefschweißen mit dem Dioden-Laser*. Maschinenbau 2 (1966), S. 16 ff.
- Butt02 BUTTHOFF, H.; KEITEL, S.; NEUBERT, J.: *MSG-Laserstrahl-Hybridschweißen an unterschiedlichen Stoßarten*. In: DVS-Berichte 220, DVS-Verlag, Düsseldorf, 2002, S. 148 ff
- Case75 CASE, R.; SCHWIRZKE, F.: *Background gas pressure dependence and spatial variation of spontaneously generated magnetic fields in laser-produced plasmas*. Journal of Applied Physics, Vol. 46, No.4, April 1976, S. 1493-1498
- Chen74 CHEN, F.: *Introduction to plasma physics*. Plenum Press, New York, 1974
- Chen97 CHEN, C.; HUNG, C.; TSAI, J.: *Effect of a magnetic field on the stability of the flow of molten material in laser cutting processes*. J. Appl. Phys., 82 (6), Sept 1997
- Cher71 CHERNYSH, V.; KUZNETSOV, V.: *Hotcracking resistance of weld metal crystallising in conditions of mixing*. Weld. Prod., 1971, No.6, S.63-66
- Cher72 CHERNYSH, V.; SYROVATKA, V.: *Structure and properties of weld metalls in AlMg6 alloy when welds are made with electromagnetic agitation*. Automatic Welding 25 (1972), S.15-19
- Cro75 CROXTON, C.: *Introduction to liquid state physics*. John Wiley & Sons, 1975, S. 191
- Daus88 DAUSINGER, F.; BECK, M.; RUDLAFF, T.; WAHL, T.: *On coupling mechanisms in laser processes*. In: Lasers in Manufacturing (Proceedings of the 5th International Conference, September 1988, Stuttgart, S. 177 - 185
- Daus95 DAUSINGER, F.: *Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozeßeffektivität*. Habilitation Universität Stuttgart, Teubner-Verlag, Stuttgart 1995

- Dav91 DAVIDSON, P.: *Electric stirring of steel and aluminium*. Magneto hydrodynamics in Process Metallurgy, The Minerals, Metals and Materials Society, 1991, S.241-249
- Dett02 DETTINGER, T.: *Laserstrahlschweißen beschichteter Stahlbleche*. Diplomarbeit DaimlerChrysler AG, Universität Stuttgart, 2002
- Dil72 DILTHEY, U.: *Beitrag zur Lichtbogensteuerung durch transversale Zusatzmagnetfelder bei mechanisierten Lichtbogenschweißverfahren*. Dissertation RWTH Aachen, 1972
- Dil94 DILTHEY, U.: *Schweißtechnische Fertigungsverfahren. Bd.1 Schweiss- und Schneidtechnologien*. 2. Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994
- Dil95 DILTHEY, U.; TRUBE, S.: *Schweißtechnische Fertigungsverfahren. Bd.2 Verhalten der Werkstoff beim Schweißen*. 2. Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995
- DIN85 N.N.: *Elektrische Temperaturnachnehmer*. DIN 34 710. Beuth-Verlag, Berlin, 1985
- Dit91 DIMONTE, G.; WILEY, L.: *Dynamics of exploding plasmas in a magnetic field*. Physical Review Letters, Vol 67, No. 13, 1991, S. 1755-1758
- DKD00 N.N.: *Kalibrierung von Thermoelementen*. Richtlinie DKD-R 5-3, Deutscher Kalibrierdienst, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Ausgabe 12/2000
- Dom93 DOMMASCHK, R.; HAMMER, T.: *Aufrüstung mit Spanntechnik und Nahtführung*. Bericht LAS 62, INPRO, Berlin 1993
- Dong04 DONG, W.; KOKAWA, H.; TSUKAMOTO, S.; SATO, Y.; OGAWA, M.: *Mechanism governing nitrogen absorption by steel weld metal during laser welding*. Metallurgical and Materials Transactions B, Volume 35B, April 2004, S. 331-338
- Dör83 DÖRING, H.: *100 Jahre Elektronenröhren*. Nachrichtentechnische Zeitschrift, Vol. 36, 1983, S. 644-652

- Dra02 DRAGUNOV, V.; CHEPURIN, M.: *Electron beam welding of dissimilar alloys under conditions of the generation of thermoelectric current*. Welding International, 2002, 16 (5), S.466-474
- Dul99 DULEY, W.: *Laser welding*. John Wiley & Sons, 1999, S. 171
- Fab93 FABER, W.; UHLMANN, M.: *Temperaturmessung beim Widerstandsschweißen*. Schweißen und Schneiden, 45, 1993, Heft 6, S. 308-313
- Far93 FARKAS, G.; CSABA, T.: *High current density small divergence electron beam production by laser-induced various-order multiphoton photoeffect*. Optical Engineering, Vol. 32, No. 10, October 1993, S. 2469-2475
- Fed94 FEDOROVICH, A.: *Process of laser welding of metal parts and device for its implementation*. Russian Agency for Patents and Trademarks, RU 2063853 Cl
- Fuhr00 FUHRICH, T.; BERGER, P.; HÜGEL, H.: *Marangoni effect in laser deep penetration steel welding*. In: BERGER, P.; MÜLLER, M. (Hrsg.): Proceedings of the International Workshop on Stability of Laser Beam Welding, Hirschegg Feb. 2000. Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge, Stuttgart 2000, S. 263 ff
- Fuhr00 FUHRICH, T.: *Marangoni-Effekt beim Laserstrahl-tiefschweißen von Stahl*. Dissertation Universität Stuttgart, Herbert Utz Verlag, München, 2005
- Ful94 FULTON, J.; WINCHESKI, B.; NANKUNG, M.: *Automated weld characterization using the thermoelectric method*. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 13B, Brunswick, Maine, USA, 1-6 Aug. 1993, Plenum Press, New York, 1994, S.1611-1618
- Gau04 GAUSSON, C.: *Weldexpert: aeronautical application*. In: EBERT, F. (Hrsg.): Proceedings of the European Automotive Laser Application, Bad Nauheim 2004. Technik & Kommunikation Verlags GmbH, Berlin, 2004, S. 107 ff
- Gref01 GREF, W.; RUß, A.; LEIMSER, M.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Thin disc laser – a new tool for welding*. In: Lasers in Manufacturing 2001 (Proceedings of the First International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, June 2001) . AT-Fachverlag, Stuttgart, 2001, S. 38 ff

- Hag90 HAGMANN, G.: *Grundlagen der Elektrotechnik*. Aula-Verlag, Wiesbaden, 1990
- Hammer87 HAMMERSCHMID, P.: *Bedeutung des Marangoni-Effekts für metallurgische Vorgänge*. Stahl u. Eisen 107 (1987) 2, S. 61 ff.
- Her89 HERING, E.: *Physik für Ingenieure*. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1989
- Hick66 HICKEN, G.K.; JACKSON C.E.: *The effects of applied magnetic fields on welding arcs*. Welding Journal Nov (1966) S. 515 ff.
- Hiro80 HIROKAI, S.; NOBORU, N.; JUNICHIRO, T.: *Laser welding method*. Japanese Patent Office, 57106487A
- Hit88 HITOSHI, M.: *Laser welding method*. Japanese Patent Office, 01278983 A
- Hit92 HITOSHI, M.: *Laser beam welding machine*. Japanese Patent Office, 06122085 A
- Hohen03 HOHENBERGER, B.: *Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Doppelfokus-technik*. Dissertation Universität Stuttgart, Herbert Utz Verlag, München 2003
- Hueg05 HÜGEL, H.: *Persönliche Mitteilung*, Institut für Strahlwerkzeuge, Universität Stuttgart, 2005
- Hueg92 HÜGEL, H.: *Strahlwerkzeug Laser – Eine Einführung*. Teubner-Verlag, Stuttgart, 1992
- IBS *Dauermagnete Werkstoffe und Systeme*. Produktinformation der Fa. IBS Magnet, Berlin
- Ich84 ICHIRO, Y.; TSUNETAKA, H.: *Laser welding method*. Japanese Patent Office, 60240394 A
- Jur87 JURCA, M.: *Verfahren zum Schweißen oder Schneiden von Werkstücken mit Hilfe eines Laserstrahls*. Deutsches Patentamt, DE 3720249C2
- Kab90 KABASHIN, A.; KONOV, V.; NIKITIN P.; ET AL.: *Laser-plasma generation of currents along a conductive target*. J. Appl. Phys. 68 (7), October 1990, S. 3140-3146

- Kab95 KABASHIN, A.; NIKITIN P.: *New method of magnetic field and current generation outside laser plasma*. Appl. Phys. Lett. 68 (2), Jan 1996, S. 173-175
- Kall94 KALLENBACH, E.: *Elektromagnete – Grundlagen, Berechnung, Konstruktion, Anwendung*. B. G. Teubner, Stuttgart, 1994
- Kam98 KAMMER, C.: *Aluminium-Taschenbuch, Band 1: Grundlagen und Werkstoffe*. Aluminium-Zentrale Düsseldorf, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 1998, 15. Auflage
- Kata02 KATAYAMA, S.; MATSUNAWA, A.: *Microfocused x-ray transmission real-time observation of laser welding phenomena*. Welding International 16 (2002) 6, S. 425 ff.
- Kata97 KATAYAMA, S.; SETO, N.; KIM, J.; MATSUNAWA, A.: *Formation mechanism and reduction method of porosity in laser welding of stainless steel*. In: ICALEO'97, Vol. 83 Part 2, 1997, S.83-92.
- Kata98a KATAYAMA, S.; MATSUNAWA, A.: *Formation mechanism and prevention of defects in laser welding of aluminium alloys*. In: CISFFEL 6, Toulon, Juni 1998. Institut de Soudre, Paris 1998, S. 215 ff
- Kata98b KATAYAMA, S.; MATSUNAWA, A.: *Laser weldability of Zn-coated steels*. In: CISFFEL 6, Toulon, Juni 1998. Institut de Soudre, Paris 1998, S. 233 ff
- Kau88 KAUTZ, A.: *Magnetic collector for FTM laser weld debris and method*. United States Patent, 5,015,818
- Kern99 KERN, M.: *Gas- und magnetofluidodynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen*. D99, Dissertation Universität Stuttgart, Teubner-Verlag, Stuttgart, 1999
- Kin95 KINGO, A.; SHIZUMA, K.: *Laser head for laser welding*. Japanese Patent Office, 08323491 A

- Kis95 KISELEV, O.; CHERNYSHOV, G.; GRIGORENKO, V.; GLADKOV, E.; RYBACHUK, A.: *Increasing the productivity of automatic arc welding equipment when welding straight seam pipes by two-arc technology using an external magnetic field*. Welding International, 1995, 9 (9), S. 738-741
- Klein97 KLEIN, T.: *Freie und erzwungene Dynamik der Dampfkapillare beim Laserstrahlschweißen von Metallen*. Dissertation Technische Universität Braunschweig, Shaker Verlag, Aachen, 1997
- Kon84 KONOV, V.; NIKITIN P.; PROKHOROV, A.; SILENOK, A.: *Generation of magnetic fields and currents in an optical discharge in a recombining plasma*. JETP Lett., Vol. 39, No.11, June 1984, S. 609-613
- Kop89 KOPITZKI, K.: *Einführung in die Festkörperphysik*. Teubner Verlag, Stuttgart, 1989, S. 96
- Kuch84 KUCHLING, H.: *Taschenbuch der Physik*. 5. Auflage, Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt/Main, 1984, S.472
- Lac97 LACROIX, D.; JEANDEL, G.; BOUDOT, C.: *Spectroscopic characterisation of laser-induced plasma created during welding with a pulsed Nd:YAG laser*. Journal of Applied Physics 81 (10), 15 May 1997, S 6599 - 6606
- Lan84 LANCASTER, J.F. (Editor): *The physics of welding*. Pergamon Press, Oxford, 1984
- Las95 LASKOA, O.; LEHMANN, P.; MOREAU, R.; CAMEL, D.: *Modelling of the thermoelectric and magnetohydrodynamic at a cell or dendrite tip*. Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VII, London, 10-15 Sept. 1995, Minerals, Metals and Materials Society/AIME, Warrendale, 1995, S. 223-230
- Lat98 LATYSHEV, S.; CHEBLUKOV, Y.: *Ion current density in an expanding laser plasma*. Technical Physics 43 (4), April 1998, S. 373-377
- Liu96 LIU, J.; ZHANG, F.: *Research about the effect of the adding magnetic field on the penetration of laser beam welding*. In: Laser Processing of Materials and Industrial Applications, Beijing, China, 6-7 Nov. 1996, Proc. SPIE, Band 2888 (1996), S. 364-367

- Mad94 MADJID, S.; KITZAIMA, I.; KOBAYASHI, T.; LEE, Y.; KAGAWA, K.: *Characteristics of induced current due to laser plasma and its application to laser processing monitoring*. Japanese Journal of Applied Physics 43 (3), 2004, S. 1018-1027
- Mali90 MALINOWSKI-BRODNICKA, M.; OUDEN, G.; VINK, W.: *Effect of electromagnetic stirring on GTA welds in austenitic stainless steel*. Welding Research Supplement, Febr 1990, S. 52-59
- Mat01 MATSUNAWA, A.: *Understanding physical mechanisms in laser welding for mathematical modeling and process monitoring*. In: Lasers in Manufacturing 2001 (Proceedings of the First International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, June 2001). AT-Fachverlag, Stuttgart, 2001, S. 79 ff
- Mat03 MATSUNAWA, A.; MIZUTANI, M.; KATAYAMA, S.; SETO, N.: *Porosity formation mechanism and its prevention in laser welding*. Welding International 2003 17 (6), S.431-437
- Mat79 MATSUDA, F.; USHIO, M.; NAKAGAWA, H.; NAKATA, K.: *Effects of electromagnetic stirring on the weld solidification structure of aluminium alloys*. Arc physics and weld pool behaviour, London 1979, S. 337-347
- Mat95 MATSUNAWA, A.; KIM, J.; TAKEMOTO, T.; KATAYAMA, S.: *Spectroscopic Studies on laser induced Plume of Aluminium alloys*. In: ICALEO'95, Vol. 80, 1995, S.719-728
- Mat97 MATSUNAWA, A.; KIM, J.; KATAYAMA, S.: *Porosity formation in laser welding - mechanisms and suppression method*. In: ICALEO'97, Vol. 83 Part 2, 1997, S.73-82.
- Mat97 MATSUNAWA, A.; SEMAK, V.: *The simulation of front keyhole wall dynamics during laser welding*. J. Phys. D: Appl. Phys. 30 (1997), S. 798-809
- Mich93 MICHALOWSKY, E.: *Magnettechnik – Grundlagen und Anwendungen*. Fachbuchverlag Leipzig, 1993
- Mier74 MIERDEL, G.: *Was ist Plasma?* VEB Verlag Technik, Berlin 1974, Ausgabe des Aulis Verlags Deubner & Co KG, Köln

- Moon03 MOON, J.; KATAYAMA, S.; MIZUTANI, M.; MATSUNAWA, A.: *Behaviour of laser induced plasma, keyhole and reflected light during laser welding with superimposed beams of different wavelengths*. Welding International, 2003 17 (7), S. 524-533
- Mor70 MORGENER, W.; BECKER, B.; SPIES H.: *Untersuchung mikroskopischer Inhomogenitäten in Stählen durch Kontaktthermokrafftmessung*. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Otto von Guericke Magdeburg, 14, 1970, Heft 1
- Mor90 MOREAU, R.: *Magnetohydrodynamics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1990
- Mor91 MOREAU, R.: *Solidification under magnetic field: Mechanisms, expected results, challenges*. Magnetohydrodynamics in Process Metallurgy, The Minerals, Metals and Materials Society, 1991, S.15-20
- Mor99 MORGENTHAL, L.: *Laserkonturschneiden von Elektrosegmentblechen*. LaserOpto, 31(2) 1999, S. 66 ff.
- Muehu01 MÜLLER-HUMMEL P.; LANG, R.; FERSTL, S.: *Einsatz der Doppelfokustechnik beim Laserschweißen von Flugzeugstrukturkomponenten*. In: HÜGEL, H.; DAUSINGER, F.; MÜLLER, M. (Hrsg.): Stuttgarter Lasertage '01 (Tagungsband '01). Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge, Stuttgart 2001, S. 27 ff
- Nied02 NIEDERMEIER, M.: *Verbindungstechnik im Aluminium-Fahrzeugbau*. Schweizer Maschinenmarkt, 103, H43, 2002, S. 89-92
- Nov75 NOVIKOV, O.; ET. AL.: *Influence of electromagnetic stirring of the weld pool on the processes of degassing and breakdown of oxide films in welds in alloy AMg6*. Welding Production 22/11 (1975), S.20-21
- Otto97 OTTO, A.: *Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen*. Dissertation Universität Erlangen, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1997
- Pard02 PARDEDE, M.; KURNIAWAN, H.; LIE, T.; TJIA, M.; KAGAWA, K.: *Direct measurement of charge current by employing a mesh electrode in the laser plasma induced by a Nd:YAG Laser (I)*. Applied Spectroscopy 56 (08), 2002, S. 994-999

- Pat94 PATEL, A.; EL-KADDAH, N.: *On the theory of electromagnetic separation in alternating electromagnetic fields*. International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, 1994, Nagoya, S.115-120
- Paul90 PAULINI, J.; SIMON, G.; DECKER, I.: *Beam deflection in electron beam welding by thermoelectric eddy currents*. J. Phys. D, Applied Phys. 23, (5), 1990, S. 486-495
- Peng01 PENG, Y.; WUZHU, C.; CHENG, W.; GANG, B.; ZHILING, T.: *Controlling the plasma of deep penetration laser welding to increase power efficiency*. J. Phys. D, Applied Phys. 34, 2001, S. 3145-3149
- Pries02 PRIES, H.; RETHMEIER, M.; WIESNER, S.; WOHLFAHRT, H.: *Laser- und Elektronenstrahlschweißen von Aluminium-Druckguss*. In: DVS-Berichte 220, DVS-Verlag, Düsseldorf, 2002, S. 219 ff
- Pro01 PROKOSHEV, V.; ABRAMOV, D.; DANILOV, S.; KUCHERIK, A.; ARAKELIAN, S.: *Diagnostics of the high temperature hydrodynamic phenomena for laser processing of the material*. Proceedings of the Lane 2001, S. 245- 250
- Pur76 PURCELL, E.: *Elektrizität und Magnetismus, Berkeley Physik Kurs Bd. 2*, Friedr. Vieweg und Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig, 1976, S.139 ff.
- Rad99 RADAJ, D.: *Schweißprozeßsimulaiton: Grundlagen und Anwendungen*. DVS-Verlag, Düsseldorf, 1999
- Rai91 RAIZER, Y.: *Gas discharge physics*. Springer-Verlag, Berlin, 1991
- Rapp96 RAPP, J.: *Laserstrahleignung von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau*. Dissertation Universität Stuttgart, Teubner-Verlag, Stuttgart 1996
- Raz95 RAZMYSHLYAEV, A.D.: *Controlling the geometrical dimensions of the weld in arc welding and surfacing under the effect of magnetic fields*. Welding International 9 (1966) 4, S. 323 ff.
- Rich83 RICHTER, F.: *Lichtbogenablenkung durch Thermoströme beim Gleichstromschweißen von CuNi10Fe gegen CuNi30Fe*. Schweißen und Schneiden, 35, 1983, Heft 9, S. 436-438

- Schel85 SCHELLHASE, M.: *Der Schweißlichtbogen – ein technologisches Werkzeug*. DVS-Verlag, Düsseldorf, 1985
- Schell00 SCHELLHORN, M.: *CO-Hochleistungslaser: Charakteristika und Einsatzmöglichkeiten beim Schweißen*. D93, Dissertation Universität Stuttgart, Herbert Utz Verlag, München, 2000
- Scher65 SHERCLIFF, J.: *A textbook of magnetohydrodynamics*. Pergamon Press, Oxford, 1965
- Schin02 SCHINZEL, C.: *Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Automobilbau*. Dissertation Universität Stuttgart, Herbert Utz Verlag, München 2002
- Schitt00 SCHITTENHELM, H.: *Diagnostik des laserinduzierten Plasmas beim Abtragen und Schweißen*. Dissertation Universität Stuttgart, Herbert Utz Verlag, München, 2000
- Schmi94 SCHMIDT, H.: *Hochgeschwindigkeits-Schweißen von Feinstblechen mit CO₂-Laserstrahlung unter besonderer Berücksichtigung des Humping-Effektes*. Dissertation RWTH Aachen, Verlag Mainz, Wissenschaftsverlag, Aachen 1994
- Scho98 SCHOER, H.: *Schweißen und Hartlöten von Aluminiumwerkstoffen*. DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1998
- Seii78 SEIICHI, O.: *Welding of magnetic part by laser beam*. Japanese Patent Office, 54160534 A
- Spit62 SPITZER, L.: *Physics of fully ionized gases*. Interscience Publishers, New York, 2nd revised ed., 1962
- Stamp71 STAMPER, J.; PAPADOPOULOS, K.; SUDAN, R.; DEAN, S.; MCLEAN, E.; DAWSON, J.: *Spontaneous magnetic fields in laser-produced plasmas*. Physical Review Letters, Vol 26, No. 17, 1971, S. 1012-1015
- Stauf02 STAUFER, H.; RÜHRNÖBL M.; MIESSBACHER, G.: *Laser-Lichtbogenschweißen und -löten im Automobilbau*. In: DVS-Berichte 220, DVS-Verlag, Düsseldorf 2002, S. 245 ff

- Sudnik SUDNIK, W.: *DB-Lasim-Laserschweißsimulation - Materialkennwerte*. DaimlerChrysler AG
- Taka01 TAKAHASHI, K; KUMAGAI, M; KATAYAMA, S.; MATSUNAWA, A.: *Aluminium alloy welding by CO₂ laser using filler wire – AlN formation and aluminium alloy weldability*. Welding International 15 (2001) 12, S. 946 ff.
- Thom05 THOMY, C.; VOLLERTSEN, F.: *Influence of magnetic fields on dilution during laser welding of aluminium*. Sheet Metal 2005, Advanced Materials Research Vols. 6-8 (May 2005), S. 179-186
- Trom04 TROMMER, G.: *Was bringen MSG-Hochleistungsverfahren beim Aluminiumschweißen*. Praktiker 56 (2004) 1
- Tse98 TSE, H.C.; MAN, H.C.; YUE, T.M.: *Effect of magnetic field on plasma control during CO₂ laser welding*. In: ICALEO'98, Vol. 85(C), 1998, S.268-277
- Tse99 TSE, H.C.; MAN, H.C.; YUE, T.M.: *Effect of electric and magnetic fields on plasma control during CO₂ laser welding*. In: Optics and Lasers in Engineering, Band 32 (1999) Heft 1, S.55-63
- Tsu85 TSUGIO, Y.: *Laser welding method*. Japanese Patent Office, 61255784 A
- VAC1 *Selten-Erd-Dauermagnete Vacodym Vacomax*. Produktinformation PD-002 der Fa. VAC Vacuumschmelze GmbH, Hanau
- VAC2 *Weichmagnetische Werkstoffe und Halbzeuge*. Produktinformation PHT-001 der Fa. VAC Vacuumschmelze GmbH, Hanau
- Vil90 VILLAFUERTE, J.; KERR, H.: *Electromagnetic stirring and grain refinement in stainless steel GTA welds*. Welding Journal 69/1 (1990), American Welding Society, January 1990, S.1-13
- Viv96 VIVES, C.: *Effects of forced electromagnetic vibrations during the solidification of aluminium alloys: Part I. Solidification in the presence of crossed alternating electric fields and stationary magnetic fields*. Metallurgical and materials Transactions B, Vol. 27B, June 1996, S.445-455

- Wald02 WALDMANN, H.: *Vergleich der Kennwerte des MIG- und Laserstrahlschweißens von Aluminiumlegierungen, Teil I und Teil II*. Aluminium 6 (2002) S. 476 ff. und Aluminium 7/8 (2002) S. 590 ff.
- Wie69 WIESNER, P.: *Thermoelektrische Effekte in der Schweißtechnik*. Schweißtechnik 19, 1969, Heft 11, S. 489
- Wil81 WILGROSS, R.: *A practical future for em stirring of the weldpool?* Welding and Metal Fabrication 49, May 1981, S. 189-197
- Wild04 WILDEN, J.; BERGMANN, J.; DOLLES, M.: *New perspectives to improve properties of laser clad coatings applying external magnetic fields*. Laser Assisted Net Shape Engineering 4, Proceedings of the LANE 2004, S. 819-830
- Wind01 WINDERLICH, B.; BRENNER, B.; STANDFUSS, J.; FUX, V.; BEYER, E.: *Steigerung der Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen durch induktiv unterstütztes Laserstrahlschweißen*. In: DVM-Berichte 128, Deutscher Verband für Materialforschung, Berlin, 2001, S. 295 ff
- Xiao01 XIAO, R.S.; AMBROSY, G.; LEIMSER, M.; BERGER, P.; ZUO, T.C.; HÜGEL, H.: *Effect of external current on laser beam welding of aluminium alloys with filler wire*. In: Lasers in Manufacturing 2001 (Proceedings of the First International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, June 2001). AT-Fachverlag, Stuttgart 2001, S. 520 ff
- Zhang03 ZHANG, X.; WUZHU, C.; PING, J.; JING, G.; ZHILING, T.: *Modelling and application of plasma charge current in deep penetration laser welding*. Journal of Applied Physics 93 (11), 2003, S. 8842-8847
- Zuo89 ZUO, T.-C.; BINTOTH, C.; BREUER, J.: *Laserstrahlschweißen von Aluminium als Alternative zu WIG-MIG-Verfahren*. Maschinenmarkt 95 (1989) 35
- Zvo70 ZVORONO, Y.; KATLER, S.: *Arc welding with electromagnetic molten pool support*. Welding Production, Vol. 17, No.5, 1970, S. 4-6

Danksagung

Zum Abschluss dieser Dissertation möchte all denjenigen danken, mit denen ich in den langen Jahren zusammengearbeitet habe und durch die diese Arbeit möglich wurde.

Ganz besonders möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Helmut Hügel, Institut für Strahlwerkzeuge, für die Betreuung der Arbeit und die freundliche Aufnahme als externer Doktorand am Institut bedanken. Die abendlichen Diskussionsrunden werden mir unvergessen bleiben.

Bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Uwe Schumacher, Institut für Plasmaforschung, bedanke ich mich für die Übernahme des Mitberichts und für sein Interesse an meiner Arbeit.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Bertold Hopf, Leiter der Abteilung Verfahrensentwicklung Fügetechnik der DaimlerChrysler AG, für die Ermöglichung dieser Dissertation bedanken.

Bei Herrn Dr.-Ing. Ulrich Bethke und Herrn Dr.-Ing. Markus Kern, DaimlerChrysler AG, möchte ich mich für die Hilfe bei der Findung und Auswahl des Themas bedanken. Bei Herrn Dr. Roland Lang, Herrn Manfred Kullick, Herrn Jörg Schuhmacher, Herrn Dr.-Ing. Peter Müller-Hummel und Herrn Frank Palm, EADS, möchte ich mich für die Zusammenarbeit im Projekt bedanken.

Am IFSW möchte ich mich neben allen Mitarbeitern besonders bei Herrn Peter Berger und Herrn Günter Ambrosy für die gute Zusammenarbeit bedanken. Bei Herrn Dr.-Ing. Andreas Ruß möchte ich mich für die gemeinsame Zeit und Feier bedanken. Genauso möchte ich mich bei den Kollegen der DaimlerChrysler AG bedanken, neben Herrn Ralf Bernhardt und meinen Teamkollegen auch bei den Kollegen aus der Werkstatt, der Elektrik, der Metallurgie und der Messtechnik, bei Herrn Barm, Herrn Greule, Herrn Todorovic, Herrn Gann, Herrn Ade, Herrn Krause, Frau Schmidt und Herrn Schulze-Beiering. Ebenso möchte ich mich bei den Kollegen aus dem Laserteam in Untertürkheim und Herrn Dr.-Ing. Markus Beck aus Ulm bedanken.

An der BTU Cottbus danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Arnim Nethe. An der MPA Stuttgart bedanke ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Martin Greitmann, Frau Palm und Herrn Gertkämper. Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Lothar Jestädt, Fa. EDAG und meinen Diplomanden Frank Feest, Andreas Läufer und Peter Olschowsky.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern Margit und Klaus Lindenau, sowie meinen Freunden, ohne deren Rückhalt und moralische Unterstützung der Abschluss dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW von 1992 bis 1999 erschienen im Teubner Verlag, Stuttgart

Zoske, Uwe

Modell zur rechnerischen Simulation von Laserresonatoren und Strahlführungssystemen
1992, 186 Seiten, ISBN 3-519-06205-4

Gorritz, Michael

Adaptive Optik und Sensorik im Strahlführungssystem von Laserbearbeitungsanlagen
1992, vergiffen, ISBN 3-519-06206-2

Mohr, Ursula

Geschwindigkeitsbestimmende Strahleigenschaften und Einkoppelmechanismen beim CO₂-Laserschneiden von Metallen
1993, 130 Seiten, ISBN 3-519-06207-0

Rudlaff, Thomas

Arbeiten zur Optimierung des Umwandlungshärrens mit Laserstrahlen
1993, 152 Seiten, ISBN 3-519-06208-9

Borik, Stefan

Einfluß optischer Komponenten auf die Strahlqualität von Hochleistungslasern
1993, 200 Seiten, ISBN 3-519-06209-7

Paul, Rüdiger

Optimierung von HF-Gasentladungen für schnell längsgeströimte CO₂-Laser
1994, 149 Seiten, ISBN 3-519-06210-0

Wahl, Roland

Robotergeführtes Laserstrahlschweißen mit Steuerung der Polarisationsrichtung
1994, 150 Seiten, ISBN 3-519-06211-9

Frederking, Klaus-Dieter

Laserlöten kleiner Kupferbauteile mit geregelter Lotdrahtzufuhr
1994, 139 Seiten, ISBN 3-519-06212-7

Grünewald, Karin M.

Modellierung der Energietransferprozesse in längsgeströimten CO₂-Lasern
1994, 158 Seiten, ISBN 3-519-06213-5

Shen, Jialin

Optimierung von Verfahren der Laseroberflächenbehandlung mit gleichzeitiger Pulverzufuhr
1994, 160 Seiten, ISBN 3-519-06214-3

Arnold, Johannes M.

Abtragen metallischer und keramischer Werkstoffe mit Excimerlasern
1994, 192 Seiten, ISBN 3-519-06215-1

Holzwarth, Achim

Ausbreitung und Dämpfung von Stoßwellen in Excimerlasern
1994, 153 Seiten, ISBN 3-519-06216-X

Dausinger, Friedrich

Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozeßeffektivität
1995, 143 Seiten, ISBN 3-519-06217-8

Meiners, Eckhard

Abtragende Bearbeitung von Keramiken und Metallen mit gepulstem Nd:YAG-Laser als zweistufiger Prozeß
1995, 120 Seiten, ISBN 3-519-06222-4

Beck, Markus

Modellierung des Lasertiefschweißens
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06218-6

Breining, Klaus

Auslegung und Vermessung von Gasentladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1996, 131 Seiten, ISBN 3-519-06219-4

Griebisch, Jürgen

Grundlagenuntersuchungen zur Qualitätssicherung beim gepulsten Lasertiefschweißen
1996, 133 Seiten, ISBN 3-519-06220-8

Kreputat, Walter

Aerodynamische Fenster für industrielle Hochleistungslaser
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06221-6

Xiao, Min

Vergleichende Untersuchungen zum Schneiden dünner Bleche mit CO₂- und Nd:YAG-Lasern
1996, 118 Seiten, ISBN 3-519-06223-2

Glumann, Christiane

Verbesserte Prozeßsicherheit und Qualität durch Strahlkombination beim Laserschweißen
1996, 143 Seiten, ISBN 3-519-06224-0

Gross, Herbert

Propagation höhermodiger Laserstrahlung und deren Wechselwirkung mit optischen Systemen
1996, 191 Seiten, ISBN 3-519-06225-9

Rapp, Jürgen

Laserschweißseignung von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau
1996, 202 Seiten, ISBN 3-519-06226-7

Wittig, Klaus

Theoretische Methoden und experimentelle Verfahren zur Charakterisierung von Hochleistungslaserstrahlung
1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-5

Grünenwald, Bernd

Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim Einstufigen Cermet-Beschichten mittels CO₂-Hochleistungslaser
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06229-1

Lee, Jae-Hoon

Laserverfahren zur strukturierten Metallisierung
1996, 154 Seiten, ISBN 3-519-06232-1

Albinus, Uwe N. W.

Metallisches Beschichten mittels PLD-Verfahren
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06233-X

Wiedmaier, Matthias

Konstruktive und verfahrenstechnische Entwicklungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren
1997, 129 Seiten, ISBN 3-519-06228-3

Bloehs, Wolfgang

Laserstrahlhärten mit angepassten Strahlformungssystemen
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06230-5

Bea, Martin

Adaptive Optik für die Materialbearbeitung mit CO₂-Laserstrahlung
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06231-3

Stöhr, Michael

Beeinflussung der Lichtemission bei mikrokanalgekühlten Laserdioden
1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8

Plaß, Wilfried

Zerstörschwellen und Degradation von CO₂-Laseroptiken
1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6

Schaller, Markus K. R.

Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetallschichten zum Heißgaskorrosionsschutz für Molybdän
1998, 163 Seiten, ISBN 3-519-06236-4

Hack, Rüdiger

System- und verfahrenstechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO₂-Lasern im Leistungsbereich bis 5 kW
1998, 165 Seiten, ISBN 3-519-06237-2

Krupka, René

Photothermische Charakterisierung optischer Komponenten für Hochleistungslaser
1998, 139 Seiten, ISBN 3-519-06238-0

Pfeiffer, Wolfgang

Fluidodynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9

Volz, Robert

Optimiertes Beschichten von Gußeisen-, Aluminium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern
1998, 133 Seiten, ISBN 3-519-06240-2

Bartelt-Berger, Lars

Lasersystem aus kohärent gekoppelten Grundmode-Diodenlasern
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06241-0

Müller-Hummel, Peter

Entwicklung einer Inprozeßtemperaturmeßvorrichtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspänung
1999, 139 Seiten, ISBN 3-519-06242-9

Rohde, Hansjörg

Qualitätsbestimmende Prozeßparameter beim Einzelpulsbohren mit einem Nd:YAG-Slablaser
1999, 171 Seiten, ISBN 3-519-06243-7

Huonker, Martin

Strahlführung in CO₂-Hochleistungslasersystemen zur Materialbearbeitung
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5

Callies, Gert

Modellierung von qualitäts- und effektivitätsbestimmenden Mechanismen beim Laserabtragen
1999, 119 Seiten, ISBN 3-519-06245-3

Schubert, Michael E.

Leistungsskalierbares Lasersystem aus fasergekoppelten Singlemode-Diodenlasern
1999, 105 Seiten, ISBN 3-519-06246-1

Kern, Markus

Gas- und magnetofluidynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen
1999, 132 Seiten, ISBN 3-519-06247-X

Raiber, Armin

Grundlagen und Prozeßtechnik für das Lasermikrobohren technischer Keramik
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06248-8

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2000 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

Schittenhelm, Henrik

Diagnostik des laserinduzierten Plasmas
beim Abtragen und Schweißen
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-712-1

Stewen, Christian

Scheibenlaser mit Kilowatt-Dauerstrichleistung
2000, 145 Seiten, ISBN 3-89675-763-6

Schmitz, Christian

Gaselektronische Analysemethoden zur Optimierung von Lasergasentladungen
2000, 107 Seiten, ISBN 3-89675-773-3

Karszewski, Martin

Scheibenlaser höchster Strahlqualität
2000, 132 Seiten, ISBN 3-89675-785-7

Chang, Chin-Lung

Berechnung der Schmelzbadgeometrie beim Laserstrahlschweißen mit Mehrfokustechnik
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-825-X

Haag, Matthias

Systemtechnische Optimierungen der Strahlqualität von Hochleistungsdiodenlasern
2000, 166 Seiten, ISBN 3-89675-840-3

Bahnmüller, Jochen

Charakterisierung gepulster Laserstrahlung zur Qualitätssteigerung beim Laserbohren
2000, 138 Seiten, ISBN 3-89675-851-9

Schellhorn, Martin Carl Johannes

CO-Hochleistungslaser: Charakteristika und Einsatzmöglichkeiten beim Schweißen
2000, 142 Seiten, ISBN 3-89675-849-7

Angstenberger, Birgit

Fliehkraftunterstütztes Laserbeschichten
2000, 153 Seiten, ISBN 3-89675-861-6

Bachhofer, Andreas

Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Festkörperlaser für den Karoseriebau
2001, 194 Seiten, ISBN 3-89675-881-0

Breitschwerdt, Sven

Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen
2001, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0032-5

Mochmann, Gunter

Laserkristallisation von Siliziumschichten auf Glas- und Kunststoffsubstraten für die Herstellung verbesserter Dünnschichttransistoren
2001, 170 Seiten, ISBN 3-89675-811-X

Herrmann, Andreas

Fertigungsorientierte Verfahrensentwicklung des Weichlötens mit Diodenlasern
2002, 133 Seiten, ISBN 3-8316-0086-4

Mästle, Rüdiger

Bestimmung der Propagationseigenschaften von Laserstrahlung
2002, 147 Seiten, ISBN 3-8316-0113-5

Voß, Andreas

Der Scheibenlaser: Theoretische Grundlagen des Dauerstrichbetriebs und erste experimentelle Ergebnisse anhand von Yb:YAG
2002, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0121-6

Müller, Matthias G.

Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0144-5

Abeln, Tobias

Grundlagen und Verfahrenstechnik des reaktiven Laserpräzisionsabtrags von Stahl
2002, 138 Seiten, ISBN 3-8316-0137-2

Erhard, Steffen

Pumpoptiken und Resonatoren für den Scheibenlaser
2002, 184 Seiten, ISBN 3-8316-0173-9

Contag, Karsten

Modellierung und numerische Auslegung des Yb:YAG-Scheibenlasers
2002, 155 Seiten, ISBN 3-8316-0172-0

Krastel, Klaus

Konzepte und Konstruktionen zur laserintegrierten Komplettbearbeitung in Werkzeugmaschinen
2002, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0176-3

Staud, Jürgen

Sensitive Werkzeuge für ein neues Montagekonzept in der Mikrosystemtechnik
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0175-5

Schinzel, Cornelius M.

Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Automobilbau
2002, 177 Seiten, ISBN 3-8316-0201-8

Sebastian, Michael

Grundlagenuntersuchungen zur Laser-Plasma-CVD Synthese von Diamant und amorphen Kohlenstoffen
2002, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0200-X

Lücke, Bernd

Kohärente Kopplung von Vertikalemitter-Arrays
2003, 120 Seiten, ISBN 3-8316-0224-7

Hohenberger, Bernd

Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Doppelfokustechnik – Steigerung von Prozeßsicherheit, Flexibilität und verfügbarer Strahlleistung
2003, 128 Seiten, ISBN 3-8316-0223-9

Jasper, Knut

Neue Konzepte der Laserstrahlformung und -führung für die Mikrotechnik
2003, 152 Seiten, ISBN 3-8316-0205-0

Heimerdinger, Christoph

Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen für die Luftfahrt
2003, 112 Seiten, ISBN 3-8316-0256-3

Christoph Fleig

Evaluierung eines Messverfahrens zur genauen Bestimmung des Reflexionsgrades optischer Komponenten
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0274-3

Joachim Radtke

Herstellung von Präzisionsdurchbrüchen in keramischen Werkstoffen mittels repetierender Laserbearbeitung
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0285-9

Michael Brandner

Steigerung der Prozesseffizienz beim Löten und Kleben mit Hochleistungsdiodenlasern
2003, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0288-3

Reinhard Winkler

Porenbildung beim Laserstrahlschweißen von Aluminium-Druckguss
2004, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0313-8

Helmut Kindler

Optische und gerätetechnische Entwicklungen zum Laserstrahlspritzen
2004, 117 Seiten, ISBN 3-8316-0315-4

Andreas Ruf

Modellierung des Perkussionsbohrens von Metallen mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

Guido Hergenhan

Kohärente Kopplung von Vertikalemittern – Systemkonzept und experimentelle Verifizierung
2004, 115 Seiten, ISBN 3-8316-0376-6

Klaus Goth

Schweißen von Mischverbindungen aus Aluminiumguß- und Knetlegierungen mit CO₂-Laser unter besonderer Berücksichtigung der Nahtart
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0427-4

Armin Strauch

Effiziente Lösung des inversen Problems beim Laserstrahlschweißen durch Simulation und Experiment
2004, 169 Seiten, ISBN 3-8316-0425-8

Thomas Wawra

Verfahrensstrategien für Bohrungen hoher Präzision mittels Laserstrahlung
2004, 162 Seiten, ISBN 3-8316-0453-3

Michael Honer

Prozesssicherungsmaßnahmen beim Bohren metallischer Werkstoffe mittels Laserstrahlung
2004, 113 Seiten, ISBN 3-8316-0441-x

Thomas Herzinger

Prozessüberwachung beim Laserbohren von Turbinenschaufeln
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0443-6

Reiner Heigl

Herstellung von Randschichten auf Aluminiumgusslegierungen mittels Laserstrahlung
2004, 173 Seiten, ISBN 3-8316-0460-6

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2005 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

Thomas Fuhrich

Marangoni-effekt beim Laserstrahltiefschweißen

von Stahl

2005, 163 Seiten, ISBN 3-8316-0493-2

Daniel Müller

Pulsenergiestabilität bei regenerativen Kurzpuls-verstärkern im Scheibenlaserdesign

2005, 172 Seiten, ISBN 3-8316-0508-4

Jiancun Gao

Neodym-dotierte Quasi-Drei-Niveau-Scheiben-laser: Hohe Ausgangsleistung und Frequenzver-dopplung

2005, 148 Seiten, ISBN 3-8316-0521-1

Wolfgang Gref

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokussmatrixtechnik

2005, 136 Seiten, ISBN 3-8316-0537-8

Michael Weikert

Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laser-pulsen

2005, 116 Seiten, ISBN 3-8316-0573-4

Julian Sigel

Lasergenerieren metallischer Bauteile mit variab-lem Laserstrahldurchmesser in modularen Ferti-gungssystemen

2006, 132 Seiten, ISBN 3-8316-0572-6

Andreas Ruß

Schweißen mit dem Scheibenlaser-Potentiale der guten Fokussierbarkeit

2006, 142 Seiten, ISBN 3-8316-0580-7

Gabriele Seibold

Absorption technischer Oberflächen in der La-sermaterialbearbeitung

2006, 156 Seiten, ISBN 3-8316-0618-8

