

Schneiden und Schweißen von Kupfer mit dem Nonvakuum-Elektronenstrahl

Murray, N.; Konya, R.; Beniyash, A.; Bach, Fr.-W.; Hassel, Th. (1)

Die Materialbearbeitung mit dem Elektronenstrahl zeichnet sich materialunabhängig durch eine hohe Energieeffizienz und -konzentration aus. Gerade im Hinblick auf die Bearbeitung von Kupfer mit seiner hohen Wärmeleitfähigkeit verfügt dieses Strahlverfahren über großes Potential auch und gerade im Vergleich zum Laser. Es wird ein Überblick über die Technologie gegeben. Anschließend werden die Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens für das Schweißen von Kupfer erläutert und einige Versuchsergebnisse präsentiert. Im zweiten Teil werden die Verfahrensvarianten des Nonvakuum-Elektronenstrahlschneidens (Non-vacuum electron beam cutting, NVEBC) beschrieben und einige vielversprechende Resultate der Schneidversuche an Kupfer am Institut für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover gezeigt.

Die Nonvakuum Elektronenstrahltechnik

Der Elektronenstrahl ist ein fokussierter Teilchenstrahl aus Elektronen, welche ihre kinetische Energie durch Kollisionen an das Werkstück abgeben. Die Beschleunigung der Elektronen erfolgt in einem elektrischen Feld im Strahlerzeugerraum. Die Strahlerzeugung findet im Hochvakuum bei Drücken unterhalb von $1 \cdot 10^{-4}$ mbar statt. Bei der klassischen Elektronenstrahlbearbeitung bleibt der Elektronenstrahl im Vakuum [1].

Die Nonvakuum Elektronenstrahltechnik ist eine Verfahrensvariante, bei der der Elektronenstrahl ebenfalls im Vakuum erzeugt wird, aber im Anschluss über ein Druckstufensystem an die Atmosphäre angekoppelt wird. Die Werkstückbearbeitung erfolgt unter atmosphärischen Bedingungen ohne die Notwendigkeit einer Vakuumkammer. Die genutzte NVEB Anlage vom Typ NV-EBW 25-175 TU der Firma PTR hat eine Strahlleistung von ca. 25 kW mit einer Hochspannung von 175 kV, durch die die Elektronen auf ca. $2/3$ der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. Die hohe Beschleunigungsspannung wirkt dabei der Streuung der Elektronen entgegen. Zum Schutz des Strahlerzeugerraumes vor dem Eindringen von Schweißstäuben und Spritzern beim Schweißen gibt es im Druckstufensystem zwei Gasströmungen, die als gasdynamisches Fenster wirken. Um die Streuung des Elektronenstrahls weiter zu reduzieren wird als Gas Helium verwendet. Helium streut aufgrund seiner geringen Atomgröße den Elektronenstrahl weniger als Luft. Das Helium wirkt als Strahlführungsgas und flutet das Druckstufensystem. Es wirkt dabei nicht als Schutzgas beim Fügen. Die Schweißung erfolgt unter atmosphärischen Bedingungen [2]. Um die Schweißstelle von der Atmosphäre abschirmen zu können ist am Institut für Werkstoffkunde eine zusätzliche Schutzgaszufuhr aufgebaut worden [3].

sches Fenster wirken. Um die Streuung des Elektronenstrahls weiter zu reduzieren wird als Gas Helium verwendet. Helium streut aufgrund seiner geringen Atomgröße den Elektronenstrahl weniger als Luft. Das Helium wirkt als Strahlführungsgas und flutet das Druckstufensystem. Es wirkt dabei nicht als Schutzgas beim Fügen. Die Schweißung erfolgt unter atmosphärischen Bedingungen [2]. Um die Schweißstelle von der Atmosphäre abschirmen zu können ist am Institut für Werkstoffkunde eine zusätzliche Schutzgaszufuhr aufgebaut worden [3].

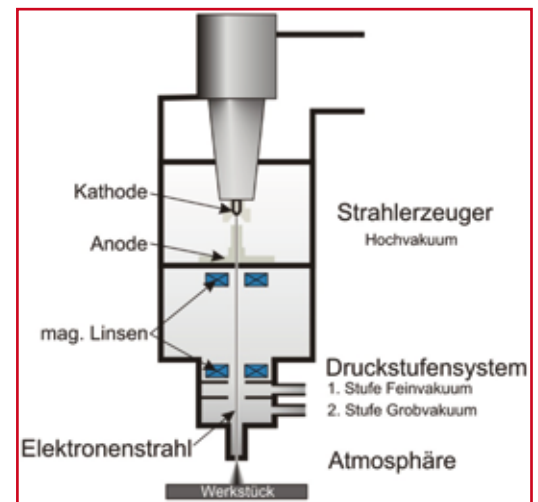


Bild 1: Prinzip einer NVEB-Anlage

Schweißen von Kupfer

Beim Schmelzschweißen von Kupfer müssen die besonderen Grundeigenschaften des Kupfers beachtet werden. Eine wesentliche physikalische Eigenschaft ist dabei die hohe Wärmeleitfähigkeit [4]. Diese führt zu einer erhöhten Abfuhr der Wärme in das Werkstück. In Bild 2 ist dargestellt welche Streckenergien eingesetzt werden müssen, um 3 mm dicke Kupferbleche mittels NVEB durchzuschweißen. Dabei ist die Streckenergie beim Nonvakuum-Elektronenstrahlschweißen wesentlich von der Schweißgeschwindigkeit abhängig. Vergleicht man die notwendige Nennstreckenenergie von $0,46$ kJ/mm bei $0,5$ m/min so kann diese bereits bei einer Schweißgeschwindigkeit von 4 m/min auf ca. ein Drittel ($0,17$ kJ/mm) reduziert werden. Der hohe Wirkungsgrad, die mate-

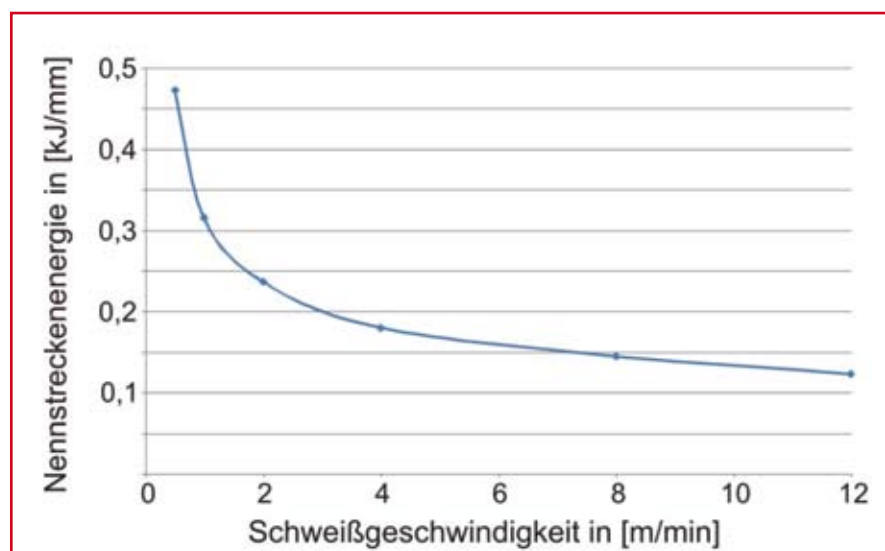


Bild 2: Streckenenergie zum Durchschweißen von 3 mm Kupferblechen in Abhängigkeit von der Schweißgeschwindigkeit

rialunabhängige Energieeinkopplung in Verbindung mit einer hohen verfügbaren Gesamtleistung und Leistungsdichte ermöglichen es, hohe Schweißgeschwindigkeiten zu realisieren. Der Vorteil einer hohen Schweißgeschwindigkeit kann auch anhand der unterschiedlichen Einbrandtiefen am Nahtanfang bei kaltem Werkstück und am Nahtende bei aufgewärmter Probe verdeutlicht werden. Zu diesem Zweck sind Blindschweißungen auf Proben (100 mm x 45 mm x 6 mm) durchgeführt worden und jeweils vom Nahtanfang und -ende Querschnitte entnommen worden. Für die Versuche sind jeweils dieselben Strahlparameter wie für die Schweißungen an 3 mm dicken Blechen verwendet worden. In Tabelle 1 sind die ermittelten Einbrandtiefen aufgeführt. Ab einer Schweißgeschwindigkeit von 4 m/min konnte

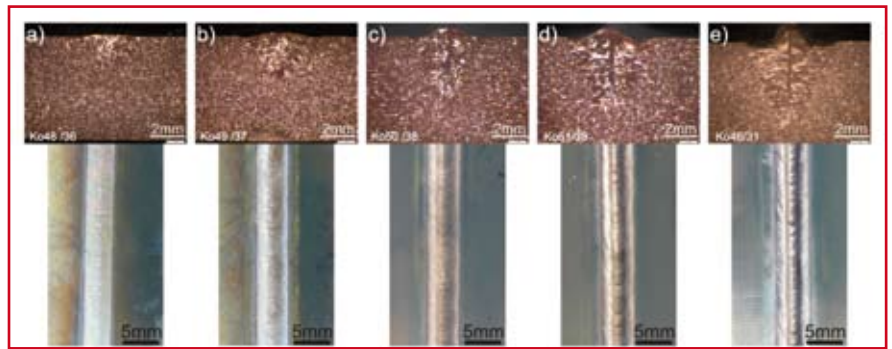


Bild 3: Einfluss zunehmender Einbrandtiefe (t) auf die Form der Nahtraupe, v_s 3 m/min, Arbeitsabstand 20 mm; a) P 9,6 kW, t 1,9 mm; b) 12,2 kW, t 2,5 mm c); 14,9 kW, t 3,8 mm; d) 16,1 kW, t 4,5 mm; e) 17,5 kW, t 5,5 mm

mit einer geringen Streckenenergie bei einer hohen Schweißgeschwindigkeit. Die Schweißgeschwindigkeit und Einbrandtiefe beeinflussen auch die Ausprägung der Schweißraupe. Mit zunehmender Einbrandtiefe erfolgt die Bildung von Randkerben. Bei einer weiteren Steigerung der Einbrandtiefe formt sich mittig in der Schweißnaht eine Nahtüberhöhung aus. Bestimmt wird dies neben der Einbrandtiefe und der Schweißgeschwindigkeit auch durch den Arbeitsabstand. Der Arbeitsabstand ist beim Nonvakuum-Elektronenstrahlschweißen ein wesentlicher Parameter, da dieser den Grad der Streuung und damit die Leistungsdichte und den Strahldurchmesser beeinflussen. Bild 3 veranschaulicht die Entwicklung der Nahtüberhöhung und Randkerbenbildung für eine Schweißgeschwindigkeit von 3 m/min und einem Arbeitsabstand von 20 mm.

Erhöht man die Einbrandtiefe und/oder die Schweißgeschwindigkeit weiter, kann sich eine Schmelzbadinstabilität einstellen, die zur Bildung von Humping führt. Beim Humping handelt es sich um eine periodische Tropfenbildung der Schweißnaht, die in Bild 4 dargestellt ist. Bei 3 mm dicken, durchgeschweißten Blechen ist keine Humpingbildung beobachtet worden, wobei Schweißgeschwindigkeiten bis 12 m/min betrachtet worden sind. Bei Einbrandtiefen im Bereich von 5 mm konnte bei einem Arbeitsabstand von 10 mm bei einer Schweißgeschwindigkeit von 3 m/min und bei einem Arbeitsabstand von 20 mm bei 4 m/min die Bildung von Humping beobachtet werden. Grundsätzlich entsteht Humping aus der Schmelzbadynamik heraus, so dass Faktoren, die die Dynamik beeinflussen auch auf die Humpingbildung eine Auswirkung haben können. Dazu zählt auch der Arbeitsabstand als Parameter, der den Strahldurch-

messer und die Leistungsdichte über die Streuung an der Atmosphäre beeinflusst. Im Rahmen der Untersuchungen sind Kupferbleche von 3 mm, 6 mm und 10 mm untersucht worden. 10 mm Kupferbleche konnten bei einer Schweißgeschwindigkeit von 2 m/min mit 24,5 kW Leistung durchgeschweißt werden. Aufgrund der geringen Viskosität bildet Kupfer eine dünnflüssige Schmelze, die zum Ausfließen aus der Schweißnaht neigt. Bei den 3 mm Blechen ist ein Absacken der Schweißnaht von 0,2 mm bis 0,3 mm zu beobachten. Bei 6 mm und 10 mm Blechdicken muss entweder eine Badstütze genutzt werden oder statt einer Durchschweißung eine Einschweißung gewählt werden. Beim konventionellen Nonvakuum-Elektronenstrahlschweißen erfolgt der Schweißprozess unter atmosphärischen Bedingungen ohne Schutzgasabdeckung. Da Sauerstoff einen Einfluss auf die Eigenschaften der Fügeverbindung wie zum Beispiel Poren- oder Rissbildung hat, ist abschließend die Aufnahme von Sauerstoff am Beispiel des sauerstoffhaltigen Kupfers Cu-ETP (2.0060) betrachtet worden. Gegenüber dem Grundwerkstoff mit 89 ppm Sauerstoffgehalt konnte eine Erhöhung im Schweißgut auf ca. 225 ppm Sauerstoffgehalt festgestellt werden. Zusätzlich sind Versuche unter einer Schutzgasatmosphäre aus Argon durchgeführt worden. Wobei nur eine geringfügige Erhöhung des Sauerstoffgehaltes in der Schweißnaht auf ca. 108 ppm Sauerstoff festgestellt worden ist.

Schweißgeschwindigkeit [m/min]	Einbrandtiefe am Nahtanfang [mm]	Einbrandtiefe am Nahtende [mm]
1	0,9	1,7
2	2,3	2,9
4	3,0	2,9
8	3,5	3,3
12	2,7	3,0

Tabelle 1: Unterschiede in der Einbrandtiefe am Schweißnahtanfang und Schweißnahtende in Abhängigkeit der Schweißgeschwindigkeit

unter gegebenen Randbedingungen kein signifikanter Unterschied zwischen Einbrandtiefe am Nahtanfang und am Nahtende mehr festgestellt werden. Durch die hohe Schweißgeschwindigkeit kann also eine geringere Wärmebringung in das Werkstück bei gleicher Einbrandtiefe erreicht werden. Die Eigenschaften des Elektronenstrahls ermöglichen das Fügen

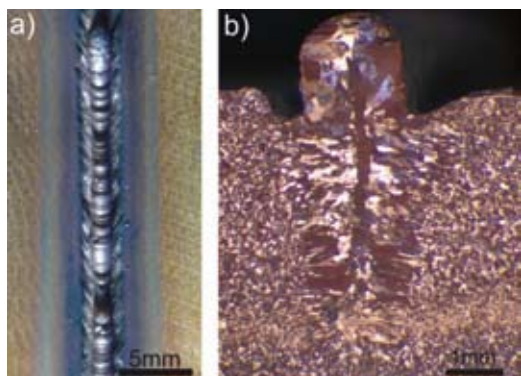


Bild 4: Humping beim Schweißen von Kupfer, v_s 3 m/min, P 12,7 kW, Arbeitsabstand 10 mm, Einbrandtiefe

NVEB-Schneiden von Kupfer

Die Effizienz der Energieumwandlung bei der Wechselwirkung von einem Elektronenstrahl mit Materie ist nahezu unabhängig von der Art des Material, so gibt es etwa keine Verluste durch Reflexion,

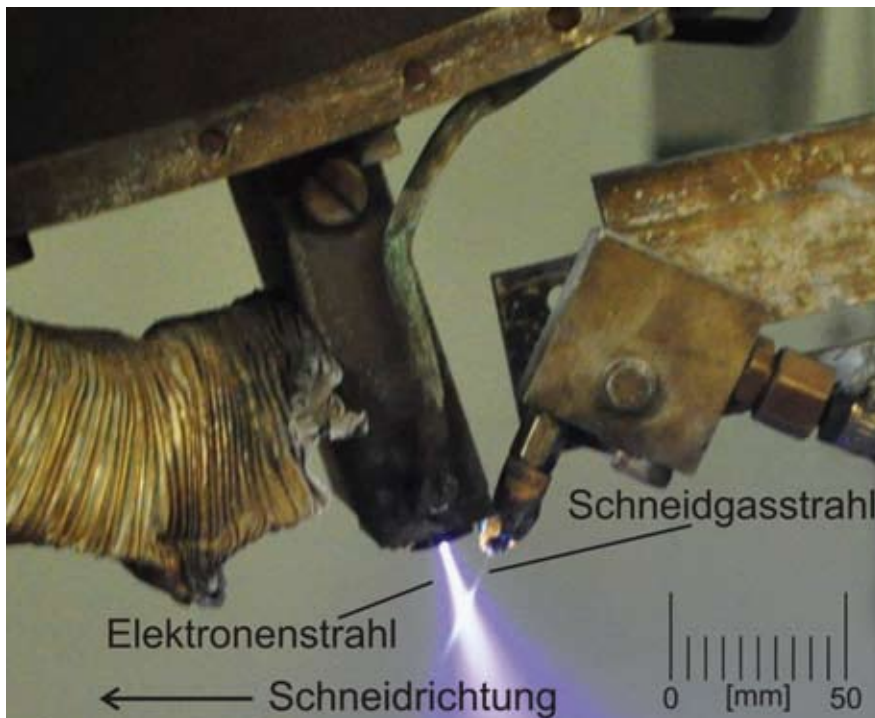


Bild 5: Nonvakuum-Elektronenstrahl mit seitlich angebrachter Zufuhr einer Austreibgasströmung. Das Schneidgas (hier: Argon) wird durch den Elektronenstrahl zur Lumineszenz angeregt.

wie dies bei der Materialbearbeitung mit dem Laserstrahl der Fall ist. Das Institut für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover identifizierte dazu die Non-Vakuum Elektronenstrahltechnik als vielversprechenden technologischen Ansatz für ein im Hause entwickeltes neues Schneidverfahren.

Die hohe Leistungsdichte des Elektronenstrahls macht diesen zu einer hervorragenden Energiequelle für das atmosphärische Elektronenstrahlschneiden (Non-vacuum electron beam cutting, NVEBC). Das Aufweiten des Elektronenstrahls in der Atmosphäre wird während des Schneidprozesses in der Schnittfuge analog zum sogenannten Tiefschweißeffekt verhindert, so dass der Werkstoff auch bei dicken Blechen innerhalb von geraden Flanken aufgeschmolzen werden kann. Um die Schmelze aus der Schnittfuge zu entfernen, ist die Bereitstellung einer austreibenden Gasströmung notwendig, die in verschiedenen Ausführungen am IW untersucht wird [5].

Schneiden mit zusätzlicher Gasdüse

Andere thermische Schneidverfahren haben gemein, dass neben einer konzentrierten Energiequelle zum Aufschmelzen des Werkstücks auch stets eine Gasströmung zum Ausblasen der Schmelze eingebracht wird. Eine Ausnahme stellen hierbei

die Varianten des autogenen Brennschneidens dar, bei denen ein Sauerstoffstrahl gleichzeitig als Energiequelle und Austreibströmung dient. Als Partikelstrahl bringt der Elektronenstrahl zwar einen Impuls mit sich, dieser reicht aufgrund der geringen Elektronenmasse jedoch nicht aus, um als austreibendes Medium wirksam zu sein.

Als nächstliegende Lösung, um mit dem Elektronenstrahl ein Schneidverfahren zu realisieren, wird eine Gasdüse an der

NVEB-Anlage integriert. Aus konstruktiven Gründen war es hierbei am zweckmäßigsten, eine externe Düse nah an den Auftreffpunkt des Elektronenstrahls zu positionieren (Bild 5). Dieser Aufbau bietet zwar keine technisch einfache Lösung für gekrümmte Schnitte, allerdings ermöglicht er im Rahmen der Prozessentwicklung den Einfluss vieler Parameter insbesondere der Winkelanstellungen von Elektronenstrahl und Gasstrahl zum Werkstück als auch untereinander sowie die Wirksamkeit verschiedener Gasdüsentypen zu untersuchen. In diesen Vorversuchen wurden die besten Ergebnisse mit herkömmlichen Düsen für das autogene Brennschneiden erzielt, es sind jedoch mit speziell an das NVEBC angepassten Düsen weitere Fortschritte zu erwarten. Als Schneidgase wurden Argon und Stickstoff verwendet. Versuchsergebnisse für Kupfer liegen mit dieser Verfahrensvariante nicht vor, für 1.4301 Edelstahl mit 2,5 mm Dicke lag die erreichte Schnittgeschwindigkeit bei 10 m/min. Die Schnitte waren bei diesen Vorversuchen jedoch von keiner besonders hohen Qualität. Dies wird darauf zurückgeführt, dass die Entfernung von Schmelzfront und Einwirkort der Austreibströmung beim dargestellten Aufbau zu groß war. Zur weiteren Verbesserung werden zurzeit Änderungen an die Konstruktion des Druckstufensystems der NVEB-Anlage untersucht, um die Austreibgasströmung näher am Elektronenstrahl führen zu können. Auch ein koaxialer Aufbau wird untersucht, der aus Sicht eines möglichen Anwenders sicherlich Vorteile bietet, da er auf einfache Weise auch nicht-gerade Schnitte erlaubt.

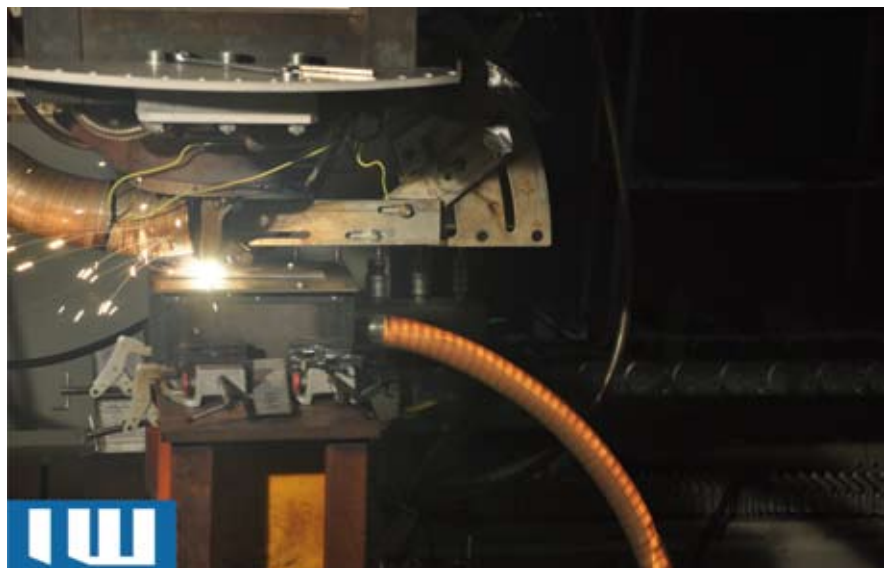


Bild 6: NVEBC mit Absaugung der Schmelze. Die angesaugte Schmelze wird in einem Filter abgeschieden.

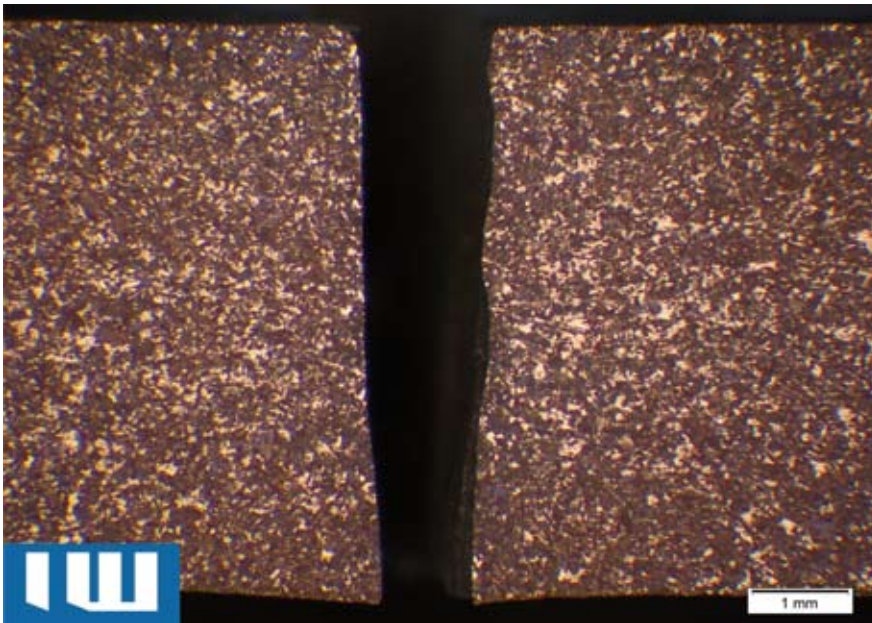


Bild 7: Makroschliff eines NVEB-Schnittes durch 6 mm dickes Kupferblech, Schnittgeschwindigkeit 9 m/min.

NVEB-Schneiden mit Absaugung der Schmelze

Eine andere, vielversprechende Methode die Schmelze aus der Schnittfuge zu entfernen, ist ebenso Inhalt der Forschung am IW. Hierbei wird auf der Unterseite des Werkstücks ein Unterdruck erzeugt und die Schmelze nach unten abgesaugt. Der Unterdruck wird im Versuchsaufbau durch eine Pumpe aus der Vakuumspanntechnik verwendet. Zum Schutz der Pumpe dienen ein Prallblech und Filtermatten. Als Nebeneffekt des Aufbaus wird keine weitere Spanntechnik benötigt, um das Werkstück während des Schnittes zu fixieren. Gekrümmte Schnittbahnen sind ohne weiteres möglich (Bild 6).

Dieses Verfahren zeichnet sich durch sehr hohe erreichbare Schneidgeschwindigkeiten aus und verfügt zugleich über gute Schnittqualität. Es kommt zum Tragen, dass die Materialbearbeitung mit dem Elektronenstrahl über einen sehr hohen Wirkungsgrad bei hoher Leistungsdichte verfügt. Dieser Vorteil ist besonders beim Bearbeiten von Kupfer mit seiner hohen Wärmeleitfähigkeit wichtig. Der Elektronenstrahl findet zudem besonders gute Voraussetzungen für seine Ausbreitung in der Schnittfuge vor, die Schmelze wird im Moment ihrer Entstehung sofort abgesaugt und zugleich ist der Druck in der Fuge reduziert.

Für Kupfer und auch für andere Werkstoffe konnten dabei Schnitte mit hoher Qualität bei sehr hohen Schnittgeschwindigkeiten

realisiert werden - beispielsweise sei hier eine Schnittgeschwindigkeit von 9 m/min für 6 mm dickes Kupferblech herausgestellt (Bild 7). Die Wärmeinbringung ins Material ist sehr gering, die Versuchsbleche werden im Schneidversuch nur leicht erwärmt und können direkt danach angefasst werden. Die Rauheitswerte für diese Schnitte liegen bei $RZ = 270 \mu\text{m}$. Schnittversuche an 10 mm dickem Kupferblech ergaben eine Schnittgeschwindigkeit von 3,5 m/min und eine Rauheit von $RZ = 300 \mu\text{m}$. Die Rauheitswerte wurden anhand von Oberflächenscans der Schnittkanten mit einem 3D-Laserscan-Mikroskop ermittelt.

Als weitere Herausforderungen auf diesem Gebiet wird eine lokal verschiebbare Absaugvorrichtung entwickelt. Hierzu werden der notwendige Unterdruck in Abhängigkeit von Material und Materialdicke ermittelt und geeignete Konzepte für die Abdichtung erarbeitet. Insgesamt erfordern beide gezeigten Varianten des Schneidens mit dem Non-Vakuumelektronenstrahl noch weitere Untersuchungen, die bisherigen Ergebnisse zeigen aber schon jetzt, welches Potential in dieser Technologie steckt.

Zusammenfassung

Der Elektronenstrahl ist aufgrund seiner Eigenschaften ein sehr gutes Werkzeug zum Schmelzschweißen von Kupfer. Es können blechdickenabhängig hohe Schweißgeschwindigkeiten erreicht werden. Mögliche Grenzen bei der Steigerung

der Schweißgeschwindigkeit sind neben der verfügbaren Anlagenleistung durch die Randkerben- und Humpingbildung gegeben. Beim Schweißen an Atmosphäre konnte eine Erhöhung des Sauerstoffgehaltes um etwas das 2,7fache beobachtet werden, womit der Werkstoff innerhalb der Grenzen des nach DIN EN maximalen zulässigen Gehaltes an Sauerstoff von 400 ppm bleibt. Durch den Einsatz von Schutzgasen kann der Sauerstoffgehalt in der Schweißnaht deutlich reduziert werden und liegt nur geringfügig über dem des unbeeinflussten Grundwerkstoffes.

Es wurde gezeigt, dass der atmosphärische Elektronenstrahl neben der Schweißanwendung auch für ein neuartiges Schneidverfahren geeignet ist. Als besondere Vorteile dieses Verfahrens sind gerade für die Bearbeitung von Kupfer die sehr hohe Schweiß- und Schneidgeschwindigkeit und die geringe Wärmeinbringung zu nennen.

Literatur

- [1] Szelagowski, A.: Beitrag zur Nonvakuum-Elektronenstrahltechnik, Dissertation, Fortschr. Ber. VDI Reihe 2 Nr 627, Düsseldorf: VDI Verlag, 2003
- [2] Lau, K.: Nonvakuum-Elektronenstrahlfügen von beschichteten Stahlfeinblechen und Stahl-Aluminium-Mischverbindungen, Dissertation, Berichte aus dem IW, Band 02/2006, ISBN-13: 978-3-939026-15-0, Hrsg. Fr.-W. Bach, PZH-Verlag, 2006
- [3] Lau, K.; Konya, R.; Bach, Fr.-W.: Untersuchungen der Eignung des Elektronenstrahl-schweißens an Atmosphäre zur Verarbeitung von höherfesten, verzinkten Karosseriebaustählen: DVS-Berichte Band 250, ISBN 978-3-87155-256-4, S. 246-251, 2008
- [4] Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen, 5. Auflage, Deutsches Kupfer-Institut, 1978
- [5] N. Murray, A. Beniyash, R. Konya, Fr.-W. Bach, Th. Hassel: Non-Vacuum Electron Beam Cutting; International Electron Beam Welding Conference, FABTECH International and AWS Welding Show, Chicago, 17.-18. Nov. 2009

(1) Dipl. -Phys. Nils Murray, Dipl. -Ing. Rudolf Konya, Dipl. -Ing. (FH) Alexander Beniyash, Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Friedrich-Wilhelm Bach, Dr. -Ing. Thomas Hassel, Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover