Laserstrahlschweißen von Kupfer unter reduziertem Arbeitsdruck

Reisgen, U.; Olschok, S.; Jakobs, S.; Turner, C. (1)

Kupfer ist in der heutigen Zeit als einer der wichtigsten Werkstoffe nicht mehr wegzudenken. Die angestrebte Energiewende oder die Elektrifizierung des Automobils sind ohne den massiven Einsatz von Kupfer undenkbar und auch im Anlagen- oder Apparatebau findet Kupfer Anwendung. Die eingesetzten Werkstoffdicken liegen in einem weiten Bereich von dünnsten Folien bis zu Dickblech, wie beispielsweise bei Kühlplatten mit 60 mm Blechdicke. Aus dieser Vielzahl von Einsatzgebieten ergeben sich unmittelbar zahlreiche Anwendungen für das Fügen von Kupfer mittels Schweißen. Dies ist jedoch aufgrund der spezifischen Eigenschaften, wie der hohen Wärmeleitfähigkeit, mit einem erheblichen Aufwand verbunden.

Zum Lösen dieser komplexen Fügeaufgabe eignen sich aufgrund der hohen erreichbaren Energiedichte in besonderem Maße die Strahlschweißverfahren Laser- und Elektronenstrahlschweißen. Das Elektronenstrahlschweißen weist gegenüber dem Laserstrahlschweißen verfahrensbedingte Nachteile (Hochvakuum nötig, Erzeugung von Röntgenstrahlung) auf und hat mit Akzeptanzproblemen und hohen Markteintrittsbarrieren zu kämpfen. Das Laserstrahlschweißen hingegen ist weit verbreitet und es besteht eine große industrielle Nachfrage nach dem Fügen von Kupfer mit dem Laserstrahl. Im industriellen Einsatz können bisher jedoch nur vergleichsweise geringe Einschweißtiefen erreicht werden, da eine ausreichende Prozesssicherheit zumeist nur bei sehr hohen Schweißgeschwindigkeiten sichergestellt werden kann. Im Rahmen aktueller Forschung wird am Einsatz sog. grüner Laser, von Lasern höchster Stahlqualität und der Erweiterung des Einsatzgebietes des Laserstrahlschweißens unter Vakuum auf Kupfer geforscht.

Laserstrahlschweißen unter Vakuum

Die ersten Untersuchungen im Bereich Laserstrahlschweißen unter reduziertem Arbeitsdruck „LaVa“ gehen zurück auf die 1980er und 1990er Jahre. Das Ziel dieser Arbeiten bestand in der Reduktion der entstehenden Plasmafackel beim Schweißen mittels CO_2-Laser. [1, 2, 3]. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde 2010 am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik der RWTH Aachen University die Arbeit in diesem Bereich unter Verwendung moderner Festkörperlaserstrahlerzeuger (Single-Mode Faserlaser) aufgenommen [4]. In der nachfolgenden Weiterentwicklung der Anlagentechnik und der Anwendungsmöglichkeiten der Verfahrensvariante wurden am ISF bemerkenswerte Ergebnisse im Bereich des Dickblechschweißens von Stahlwerkstoffen erzielt, Bild 1. An unlegiertem Stahl wurden einlagige Verbindungsnähte bis zu einer Blechdicke von 50 mm und in Lage-Gegenlage Technik Verbindungsnähte bis 110 mm Blechdicke realisiert, [5, 6]. Auch im Bereich hochlegierter Stahlwerkstoffe und Nickelbasis-Legierungen konnten einlagige Verbindungsschweißungen im Blechdickenbereich 30 bis 40 mm erfolgreich umgesetzt werden [7] und die Umsetzung von ersten industriellen Anwendungen wird durch das ISF und die Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft Fügetechnik FEF GmbH vorangetrieben [8].

Die bisher erzielten Ergebnisse und die große Resonanz seitens der Industrie spiegeln das große Potential dieser Verfahrensvariante wieder. Insbesondere bei niedrigen Schweißgeschwindigkeiten können hohe Einschweißtiefen bei gleichzeitig hoher Nahtqualität erzielt werden. Die Spritzerbildung auf der Nahtoberseite wird stark reduziert, es können sehr feinschuppige Oberraupen erzeugt werden und die Neigung zur Porenbildung wird durch erleichtertes Ausgasen im Unterdruck reduziert, [9]. Das Ziel des zugrunde liegenden Forschungsvorhabens „LaVaCu3+“ (IGF 18.707 N, Forschungsvereinigung DVS) besteht in der Nutzbarmachung dieser Verfahrensvariante zum prozesssicheren Fügen von Kupfer im Blechdickenbereich 3 bis 10 mm bei vergleichsweise niedrigen Schweißgeschwindigkeiten.

Die wissenschaftliche Untersuchung und Anwendung des Effektes der Reduktion des Umgebungsdrucks ist Gegenstand aktueller Forschung. Als Hauptgründe werden die Unterdrückung einer Plasma- bzw. Metalldampffackel sowie die Absenkung des Siedepunktes angesehen. Durch Reduktion des Arbeitsdrucks ist die Dichte des emittierten Metalldampfes deutlich reduziert und in der Arbeitsatmosphäre befinden sich weniger Partikel. Bei gängigen Konstruktionswerkstoffen,

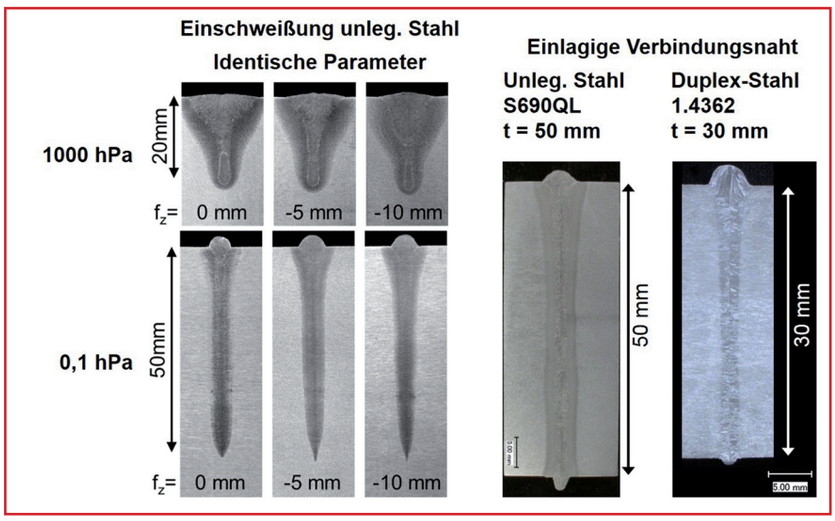

Bild 1: Potentiale Laserstrahlschweißen unter Vakuum

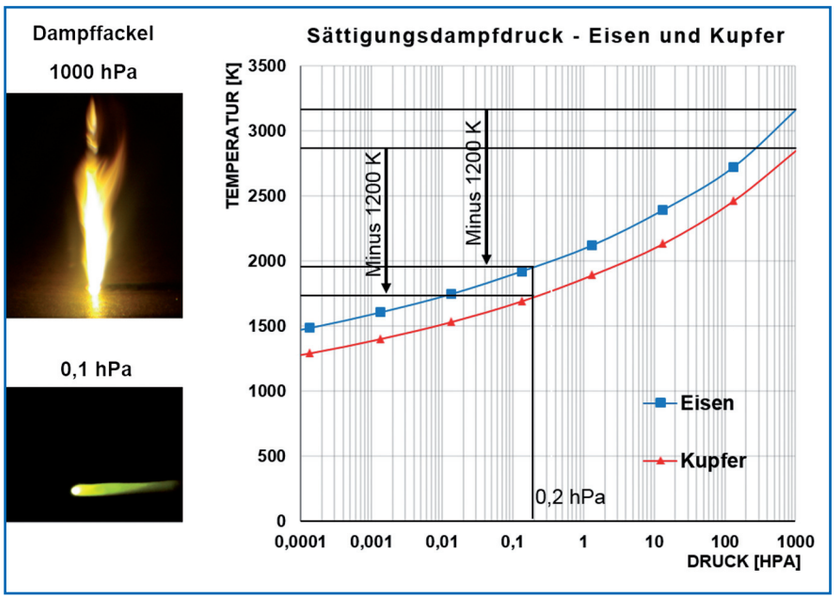

Bild 2: Dampffackel und Siedepunkt – Atmosphäre und Unterdruck [10]

wie Stahl oder Kupfer, besteht eine starke Abhängigkeit des Siedepunktes vom Druck, wohingegen der Schmelzpunkt nahezu unabhängig vom Druck ist. Durch Reduktion des Siedepunktes wird weniger Laserleistung benötigt, um Werkstoff zum Aufbau des Keyholes zu verdampfen und durch den kleineren Gradienten zwischen verdampftem Material und umgebenden Schmelzmantel ist dieser dünner und die Keyholestabilität wird erhöht, Bild 2.

Laserstrahlschweißen unter Vakuum von Kupfer

Als Strahlerzeuger wird ein Scheibenlaser der Firma Trumpf mit einer Maximalleistung von 16 kW (TruDisk 16002) genutzt. Die Prozessfaser hat einen Durchmesser von 200 µm. Die Strahlformung wird außerhalb der Vakuumkammer durch eine Linsenoptik der Firma Precitec realisiert. Mit der eingesetzten Konfiguration wird ein Fokuspunktdurchmesser von 0,3 mm erreicht. Der Schutz des Einkoppelfensters vor den Prozessemissionen erfolgt durch ein am ISF entwickeltes System (OptiShield), wodurch die Standzeit der Einkoppelfenster auf über 1000 Schweißungen pro Fenster gesteigert werden kann.

Die Vakuumerzeugung erfolgt über eine Vierkammer Taktanlage der Firma PTR, welche ursprünglich für den Einsatz zum Elektronenstrahlschweißen vorgesehen war und in Zusammenarbeit mit dem ISF für den Zweck Laserstrahlschweißen unter Vakuum umgebaut wurde. Aufgrund des Anlagenaufbaus werden hauptsächlich Rundnähte geschweißt. Durch den Einsatz eines leistungsfähigen dreistufigen Pumpenstrangs kann Schweißbereitschaft (0,2 hPa) bereits in unter 10 s hergestellt werden, Bild 3.

Laserstrahlschweißen von Kupfer – Atmosphärendruck und Unterdruck

Beim Laserstrahlschweißen von Kupfer an Atmosphäre kommt es zur Bildung von eruptionsartigen Auswürfen von Schweißgut, welche kritische Nahtdefekte darstellen. Diese resultieren aus Instabilitäten des Keyholes und verstärken sich mit abnehmender Geschwindigkeit und Leistung. Aus diesem Grund wird in industriellen Anwendungen zumeist mit sehr hohen Geschwindigkeiten von über 10 m/min gearbeitet, woraus geringe Einschweißtiefen resultieren. Im Rahmen aktueller Forschung wurde gezeigt, dass diese Prozessgrenzen mittels Hochleistungs-Multimode Lasern zu Schweißgeschwindigkeiten zwischen 2 m/min (10 kW) und 4 m/min (16 kW) verschoben werden können, [11].

Erfolgt eine weitere Reduktion der Schweißgeschwindigkeit und der Laserleistung ist ein Schweißen an Atmosphäre ohne die Bildung von Auswürfen nicht möglich. Die vergleichenden Untersuchungen an Cu-DHP mittels Laserstrahlschweißen unter Vakuum (Arbeitsdruck 0,2 hPa) und an Atmosphäre (Schutzgas Argon) belegen, dass durch Absenkung des Umgebungsdrucks eine deutliche Stabilisierung des Schweißprozesses erfolgt, Bild 4. Bereits bei Laserleistungen ab 8 kW und Schweißgeschwindigkeiten ab 1,5 m/min wird die Bildung von Auswürfen verhindert und eine feinschuppige Oberraupe gebildet. Bei weiter reduzierten Schweißgeschwindigkeiten unter 1 m/min wird die Nahtqualität bei 8 kW bis 12 kW ebenfalls deutlich verbessert. Durch Schweißspritzer ergibt sich jedoch eine grobschuppige und teilweise unregelmäßige Nahtoberraupe und bei 8 kW Laserleistung ist diese teilweise

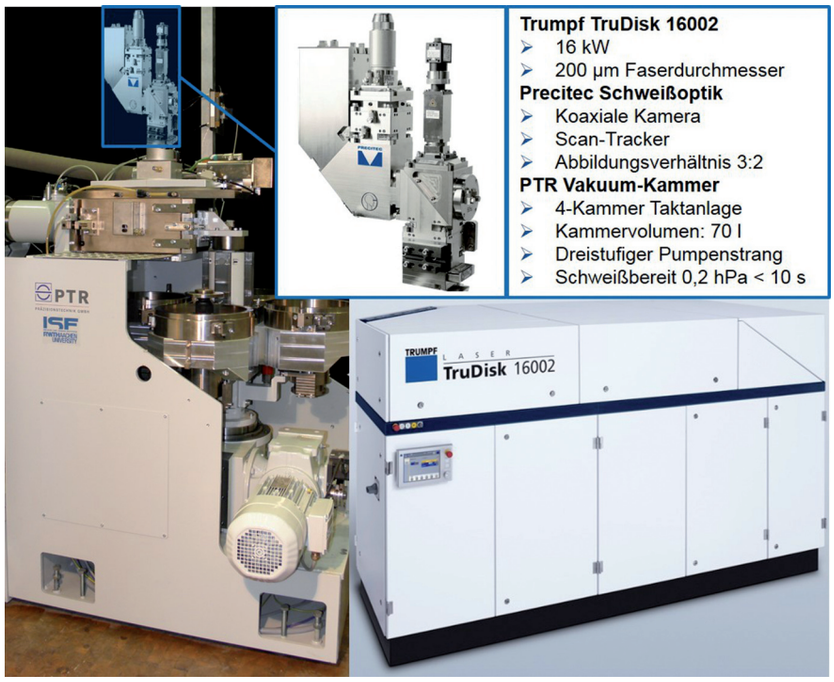

Bild 3: Anlagenaufbau LaVa ISF-PTR

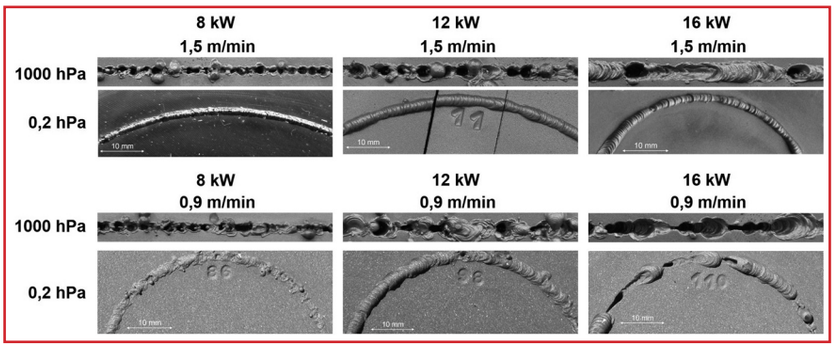

Bild 4: Schweißgutauswürfe bei niedrigen Schweißgeschwindigkeiten

sehr flach. Schweißgutauswürfe mit einer kritischen Tiefe treten nicht auf. Bei einer Leistung von 16 kW und Geschwindigkeiten unter 1 m/min werden auch unter reduziertem Arbeitsdruck kritische Nahtdefekte erzeugt.

Durch die beim Schweißen von Kupfer an Atmosphäre benötigte hohe Laserleistung und die hohen Schweißgeschwindigkeiten, sind selbst für vergleichsweise kleine Blechdicken von 2 bis 4 mm hohe Investitionskosten notwendig. Wird prozesssicheres Fügen von Kupfer bei niedrigen Geschwindigkeiten und niedrigen Laserleistungen ermöglicht, können die Investitionskosten für Strahlerzeuger hoher Leistung und für schnelle und genaue Verfahreinrichtungen drastisch reduziert werden.

Im Zuge der Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass bereits bei 4 kW Laserleistung eines Multimode-Lasers und der damit verbundenen geringen Intensität (aufgrund des im Vergleich zu Single-Mode Lasern großen Fokusdurchmessers) Einschweißtiefen von 3,5 mm an Cu-DHP erzielt werden können, wenn der Druck auf 0,2 hPa reduziert wird. Die Nahtoberraube ist aufgrund von Materialverlust durch Schweißspritzer leicht unterwölbt. Es treten jedoch keine Schweißgutauswürfe auf, welche zu kritischen Nahtdefekten führen, Bild 5. Ab Leistungen von 12 kW können an Cu-DHP Einschweißtiefen deutlich über 10 mm mit sehr hohem Aspektverhältnis (Nahttiefe zu Nahtbreite) realisiert werden, Bild 5. Die Porosität ist sowohl bei 4 kW Leistung als auch bei 12 kW Leistung vergleichsweise gering und es gibt keine Anzeigen für innere Nahtdefekte. Die Bildung von Kratern durch Schweißgutauswürfe wird auch bei der hohen Leistung von 12 kW stark reduziert. Das Auftreten von kleinen und lokalen Nahtunterwölbungen bzw. flachen Nahtoberraupen kann jedoch auch in diesem Fall bisher noch nicht vermieden werden.

Nach aktuellem Stand müssen die bei Durchschweißungen entstehenden Unterwölbungen auf der Nahtoberseite und Nahtunterseite mechanisch abgearbeitet werden. Durch entsprechende Parameterwahl sind in diesem Fall Verbindungen größer 10 mm Dicke und hoher innerer Nahtqualität (hohes Aspektverhältnis, geringe Porosität, keine Anzeichen von kritischen Nahtdefekten, nahezu parallele Flanken) können auf diesem Weg umgesetzt werden.

Fazit

Die bisher erzielten Forschungsergebnisse bestätigen, dass die Prozessstabilität (Bildung von Auswürfen) bei Schweißgeschwindigkeiten unter 2 m/min durch Reduktion des Umgebungsdrucks gesteigert werden kann. Darüber hinaus können mittels dieser Verfahrensvariante bereits mit niedrigen Intensitäten (P = 4 kW, df = 0,3 mm) und niedrigen Schweißgeschwindigkeiten (1 m/min) Einschweißtiefen von über 3 mm erreicht werden. Bei hohen Leistungen von 12 bis 16 kW werden bei Geschwindigkeiten um 1 m/min Einschweißtiefen von über 12 mm erzielt. Durch geeignete Parameterwahl können Nähte mit hohem Aspektverhältnis realisiert werden und Krater durch Schweißgutauswurf treten nicht auf.

Im weiteren Verlauf werden der beobachtete Effekt und die Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern und dem Arbeitsdruck auf der einen Seite und der Bildung von Auswürfen und der Nahtgeometrie auf der anderen Seite weiter wissenschaftlich untersucht. In diesem Zusammenhang erfolgt der Einsatz von Lasern höchster Strahlqualität (Single-Mode) und Hochleistungs-Multimode Lasern, sowie der Aufbau einer industrietauglichen Anlage zum Laserstrahlschweißen unter Vakuum für die flexible Fertigung von Kupferbauteilen in Zusammenarbeit mit der Firma FOCUS GmbH.

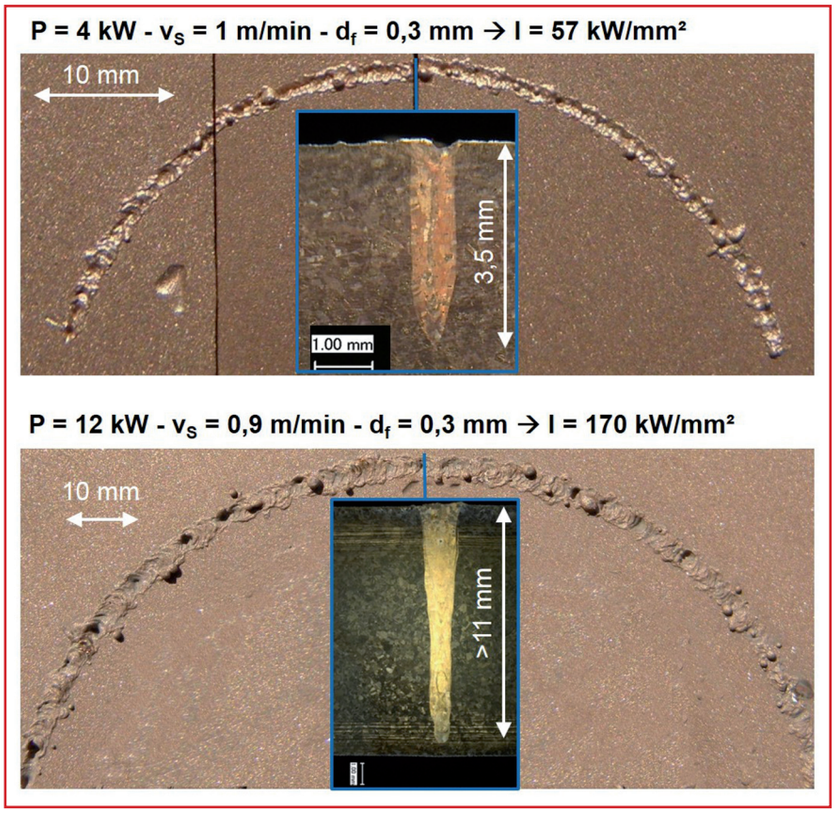

Bild 5: Schweißen von Kupfer im Vakuum bei niedrigen Geschwindigkeiten

Danksagung

Das IGF-Vorhaben IGF 18.707 N der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren E.V. DVS, Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

[1] Arata et al.: Fundamental phenomena during vacuum laser welding, Proceedings, Materials Processing Symposium Icaleo, 1985, S. 1-7

[2] Verwaerde, Fabbro: Experimental study of continuous CO_2 laser welding at subatmosheric pressures, Journal of Applied Physics 78, 1985, S. 2981-2984

[3] Katayama et al.: Effect of vacuum on penetration and defects in laser welding, Journal of Laser Applications 13, 2001, S. 187-192

[4] Longerich: Untersuchung zum Laserstrahlschweißen unter Vakuum im Vergleich mit dem Elektronenstrahlschweißen, Aachener Berichte Fügetechnik 3, 2011, Shaker, Aachen

[5] Reisgen et al.: Laserstrahlschweißen unter Vakuum – nur eine Modeerscheinung?, Proceedings, 9th Conference Beam Technology, 2013, Halle, S. 19-25

[6] Reisgen et al.: Laser beam welding in vacuum of thick plate structural steel, Proceedings, 32nd International Conference on Applications of Lasers & Electrooptics Icaleo, 2013, Miami FL, S. 341-360

[7] Jakobs: Laserstrahlschweißen im Vakuum – Erweiterung der Prozessgrenzen für dickwandige Bleche, Aachener Berichte Fügetechnik, Shaker, phd thesis, publication planned for 2015

[8] Reisgen et al.: Potentiale des Laserstrahlschweißens unter Vakuum, DVS-Berichte Band 296, 2013, S. 384-389

[9] Börner et al.: Process characteristics of laser beam welding at reduced ambient pressure, Proceedings, SPIE, 2013, San Francisco CA

[10] Honig, Kramer: Vapor pressure data for the solid and liquid elements, RCA Laboratories Review Band 30, David Sarnoff Research Center, 1969, Princeton NJ, S285-305

[11] Graf et al.: High-Power Lase Sources Enable High-Quality Laser Welding Of Copper, Proceedings, Icaleo, 2014, Volume 33, Paper #401

(1) Uwe Reisgen, Simon Olschok, Stefan Jakobs, Christoph Turner; Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik ISF, RWTH Aachen University, Aachen/ Deutschland

Kupferdraht in OFE-Qualität und Sonderlegierungen – MKM investiert in Drahtproduktion

Die Mansfelder Kupfer und Messing GmbH (MKM), Hettstedt, hat eine neue Produktionsanlage für Gießdraht in Betrieb genommen.

Mit dieser Investition erhöht MKM die Wertschöpfungstiefe, schafft zusätzliche Flexibilität und erweitert die Kapazität für Spezialprodukte um rund 6.000 Tonnen pro Jahr. Durch die neue Produktionsanlage wird das Unternehmen künftig den Gießdraht für Spezialanwendungen wie etwa sauerstofffreien, hochleitfähigen Kupferdraht mit einem Kupferanteil von mehr als 99,95 % selbst herstellen.

„Den Gießdraht formen wir unmittelbar bei MKM in einem kontinuierlichen Prozess in Spezialprofile für die Elektro- und Automobilindustrie sowie die Telekommunikation und können so eine ausgezeichnete Qualität garantieren“, so Produktionsleiter Patrick Leidenroth.

Die Investition mit einem Volumen von 1,2 Mio. Euro ist Teil eines umfassenden Innovationsprogramms von MKM, für das insgesamt rund 40 Mio. € vorgesehen sind. „Diese Anlage ist Teil eines auf drei Jahre angelegten großen Investitionsprogramms in neue Technologien, um unser Produktportfolio gezielt auszubauen und unseren Kunden neue Anwendungen in Top-Qualität anbieten zu können“, betont Roland Harings, Vorsitzender der Geschäftsführung von MKM.

Foto: MKM

Produktionsanlage für Gießdraht