-- LIZENZIERT FÜR: DVS Media GmbH --

ELEKTRONENSTRAHLSCHWEISSEN DES KÜHLSYSTEMS EINES „FORMEL-E"-MOTORSPORTFAHRZEUGS

Gut gekühlt ist halb gewonnen

Peter Schmidt, Rudolfstetten/Schweiz

Wenn voraussichtlich am 10. Juni 2018 für die *Formel-E" ein bedeutendes Straßenrennen in der Schweiz über die Bühne geht, ist auch eine kleine Firma aus Rudolfstetten in der Schweiz mit Ihrer Technik vom Start bis zum Ziel dabei. Die SwissBeam AG hat sich auf dem Gebiet des Elektronenstrahlschweißens und auf alle damit verbundenen Tätigkeiten spezialisiert. Für die Formelwagen schweißte das Unternehmen mithilfe des Elektronenstrahls auf hohem Qualitätsniveau prozesssichere Kühlsysteme in Flachbauweise

Voraussichtlich diesen Sommer findet für die Formel-E ein Strassenrennen in Zürich statt. Der Zürcher Stadtrat hat die entsprechende Bewilligung für das erste „Formel-E"-Strassenrennen der Schweiz in der Zürcher Innenstadt mit Auflagen erteilt. Die „Formel E" ist die Königsdisziplin im Rennsport für Formelwagen mit Elektromotoren, die weltweit auf Stadtkursen ausgetragen wird. Die Fahrzeuge mit Elektromotoren (**Bild1**) leisten maximal 220 kW (299 PS) dabei ist die Höchstgeschwindigkeit auf 225km/h begrenzt. Gleichzeitig sind diese Motorsportfahrzeuge bei der Entwicklung und Einführung zukünftiger Technologien eine wichtige Plattform mit spannenden Innovationen.

Prozesssicherer Kühler in Flachbauweise

Bei diesen Fahrzeugen besteht die Notwendigkeit in thermischen Prozessen Kühlungen vorzunehmen um die vorhandenen Einflüsse auf die umliegenden Baugruppen, beispielsweise elektronische Teile, zu reduzieren. Gefordert ist ein prozesssicherer Kühler möglichst in Flachbauweise, der hinsichtlich seiner Dichtigkeit langzeitstabil ist und durch seine konstruktive Gestaltung eine möglichst effektive Kühlung sicherstellt. Hierfür werden Kühlplatten eingesetzt, die im Grundkörper (Dicke 12mm) einseitig mit Kühlkanälen in Form einer Schnecke versehen sind. Die Kühlkanäle werden durch ein Deckblech (Dicke 2 mm) aus artgleichem Material verschlossen, damit ein flüssiges Medium darin strömen kann und somit ein geschlossener Kühlkreislauf bildet. Dank dieser Flachbauweise ist ein hochgradiger thermischer Wirkungsgrad sichergestellt.

Die Verbindung zwischen Grundkörper und Deckblech stellt wegen der mechanischen (Schub-, Zug- und Druckspannungen) sowie der thermischen Belastungen hohe Anforderung an die Fügetechnologie. Kleben oder Löten kann hinsichtlich der prozessstabilen Dichtigkeit zu deutlichen Problemen führen. Wolfram-Inertgas(WIG)-Schweißen hat eine zu grosse Wärmeeinbringung, damit entsteht unter anderem ein hochgradiger Verzug der kompletten Schweißbaugruppe. Das Laserstrahlschweißen ist wohl in der Lage, zur Versteifung der Deckplatte Überlappnähte auf den Deckblech zwischen den Kühlkanälen auszuführen, jedoch stellt sich die Frage: Wie bekommt man prozesssicher das erforderliche Schutzgas auch im Inneren des Kühlers zu den Fügespalten der Überlappnähte?

Nur das Elektronenstrahl-Schweißverfahren ist als einziges Fügeverfahren in der Lage, dieses breite Anforderungsspektrum komplett und wirtschaftlich abzudecken. Das Elektronenstrahlschweißen kann Nähte bilden, die die erforderlichen mechanischen und technologischen Gütewerte erfüllen. Dies gilt sowohl für Nähte im Bereich eines I-Stoßes als auch für die notwendigen Blindnähte.

▲ Bild 1. Die Fahrzeuge mit Elektroantrieb für die „Formel E" leisten maximal 220 kW (299 PS), die Höchstgeschwindigkeit ist auf 225 km/h begrenzt.

Technik der Elektronenstrahlerzeugung

Der Elektronenstrahlerzeuger bildet zusammen mit der Hochspannungsversorgung als Elektronenstrahl-Generator eine eigenständige Einheit. Der Elektronenstrahlerzeuger erzeugt und steuert den Strahl nach dem Triodenprinzip (**Bild 2**). Aus einer auf 2500°C geheizten Wolframkathode werden negativ geladene Elektronen ausgesendet und durch Anlegen einer Hochspannung (bis 150 KV) zwischen Kathode und Anode auf ca. 2/3 der Lichtgeschwindigkeit in Richtung der zu verschweißenden Werkstücke beschleunigt.

-- LIZENZIERT FÜR: DVS Media GmbH --

Eine Steuerelektrode zwischen Anode und Kathode steuert mit einer Differenzspannung von etwa 2000 V gegenüber der Kathode den Strahlstrom. Zwischen Strahlerzeugung und der Werkstückoberfläche wird der Elektronenstrahl im Vakuum mit Hilfe eines elektromagnetischen Linsensystems zu einem präzisen und feinen Brennfleck (Durchmesser 0,1 mm) mit einer sehr hohen Leistungsdichte (bis zu 10 MW/cm^2) geformt. Die Wärme entsteht nicht wie üblich durch Wärmeleitung, sondern von Umwandlung kinematischer Energie der Elektronen in Wärme der Rest emittiert in Form von Röntgenstrahlung.

Ein wesentlicher Vorteil des Elektronenstrahlschweißens ist die evakuierte Arbeitskammer (<10^{-4} mbar), die eine Bearbeitung von reaktiven Metallen zulässt, die sonst mit den Umgebungsgasen unerwünschte Verbindungen eingehen und ihre Eigenschaften verändern würden. Das Verfahren ermöglicht das Schweißen verschiedenster Werkstoffe und Werkstoffkombinationen. Der Vorgang wird durch eine computernumerisch gesteuerte Elektronenstrahl-Schweißmaschine ermöglicht. Dadurch lassen sich Bauteile mit komplexen Strukturen Schweißen, was dem Elektronenstrahlschweißen den Ruf eines sehr zuverlässigen Fügeverfahrens mit einer hohen Prozessreproduzierbarkeit bei hohen Schweißgeschwindigkeiten eingebracht hat.

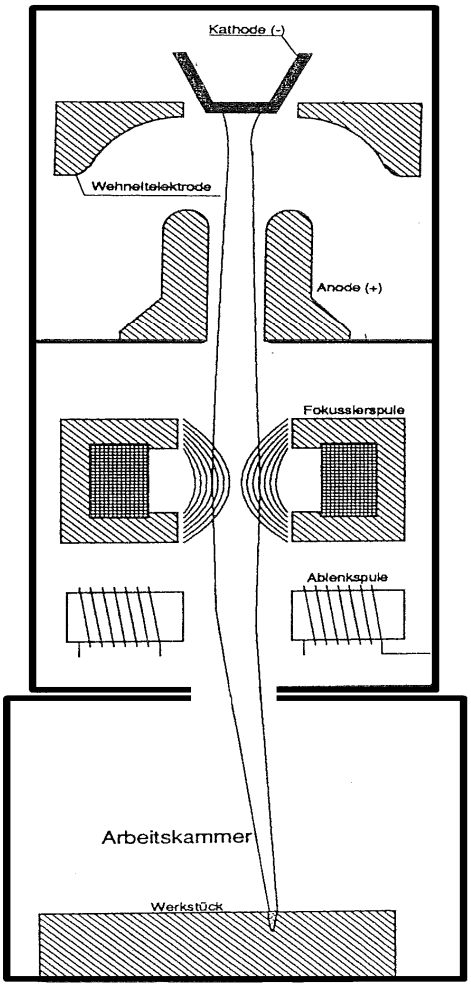


Bild 2. Prinzip einer Elektronenstrahl-Schweißanlage

Anzeige

-- LIZENZIERT FÜR: DVS Media GmbH --

Anspruchsvolle Werkstoffwahl

Die Leichtbauweise führt bei dynamisch beanspruchten bzw. mobilen Konstruktionen zu geringen Massenkräften und geringfügigen Verschleiß bei hoher Betriebssicherheit. Die Eigenschaften von Aluminiumllegierungen machen diesen Werkstoff somit zu einem begehrten Gebrauchsmetall mit folgenden Vorzügen:

- hohe Wärmeleitfähigkeit bei magnetischer Neutralität.
- niedriges spezifisches Gewicht bei gleichzeitig hoher mechanischer Festigkeit,
- bei tiefen Temperaturen gute Zähigkeitseigenschaften ohne Versprödungserscheinung, bei naturharten Aluminiumlegierungen kubisch-flächenzentrierte Gitterstruktur ohne Gitterumwandlung bei Abkühlung, das heißt, es bildet sich beim Schweißen kein Aufhärtungsgefüge in der Wärmeeinflusszone,
- gute Zerspanbarkeit, woraus sich günstige Verarbeitungskosten ergeben,
- beste Hitzebeständigkeit durch Oberflächenoxidbildung,
- durch „Eloxieren" lassen sich Oberflächen elektrochemisch verdichten, wodurch sie eine widerstandsfähige Korrosionsschicht erzielen lässt; gleichzeitig kann eine farbliche Gestaltung vorgenommen werden,
- hervorragend elektrisch leitend.

Grundsätzlich sind beim Elektronenstrahlschweißen von Aluminium die metallurgischen Vorgänge im Schmelzbad weitgehend mit denen von konventionellen Schweißverfahren identisch. Um für die Kühlplatte den geeigneten Werkstoff auszuwählen, genügt es nicht allein, die Festigkeitskennwerte zu ermitteln, sondern es sollte dabei auch Betriebssicherheit, Zähigkeit, Porenbildung und Rissneigung des Werkstoffs (**Tabelle 1**) berücksichtigt werden.

Auf Grund des Erstarrungsverhaltens beim Elektronenstrahlschweißen gibt es Aluminiumlegierungen, die zu Heißrissen neigen. Dieses Problem lässt sich nur über metallurgische Maßnahmen wie die Zugabe von Legierungselementen in Form von zum Beispiel Folien lösen. Besser ist die konsequente Verarbeitung von Aluminiumlegierungen mit guten Schweißeignungen. Gerade die weit verbreiteten 5000er (AlMg)-Legierungen zeigen mit dem Elektronenstrahlschweißverfahren beste Eigenschaften.

▼ Tabelle 1. Schweißeignung von Aluminium-Werkstoffen

Legierungsgruppe	Werkstoff Nr.	Kurzname DIN 1700	Bez.nach EN	Schweiss-eignung	Porenbildung	Heissriss-neigung
nichtaushärtbare Knetwerkstoffe	3.0255	Al 99,5	EN AW-1050A	gut		
	3.0515	AlMn 1	EN AW 3103	gut		
	3.3535	AlMg 3	EN AW-5754	mäßig		möglich
	3.3547	AlMg 4,5 Mn	EN AW-5083	gut	geringe Mg-Ausdampfung	
	3.3555	AlMg 5	EN AW-5019	gut	geringe Mg-Ausdampfung	
aushärtbare Knetlegierungen	3.2315	AlMgSi 1	EN AW-6082	Bedingt		hoch
	3.1355	AlCuMg 2	EN AW-2024	gut		
	3.4365	AlZnMgCu 1.5	EN AW-7075	möglich	Zn- & Mg-Ausdampfung	möglich
nicht aushärtbare Knetlegierungen	3.2581	G-AlSi12	EN AC 44200	gut		
	3.2163	G-AlSi, 9 Cu 3	EN AC 46200	gut		
	3.3561	G-AlMg 5	EN AC 51300	gut	geringe Mg-Ausdampfung	
aushärtbare Gusslegierungen	3.2371	G-AlSi 7 Mg0.3	EN AC 42100	gut		
	3.3261	G-AlMg 5 Si	EN AC 51400	gut	geringe Mg-Ausdampfung	
	3.1841	G-AlCu 4 Ti	EN AC 21100	schlecht		hoch
	3.2163	GD-AlSi 8 Cu 3	EN AC 46200	möglich	sehr stark	

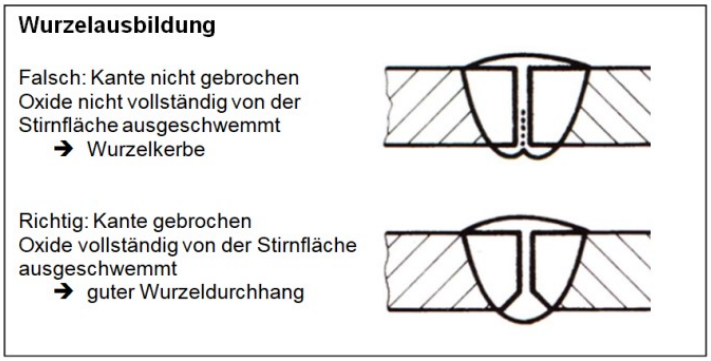
Aluminiumlegierungen sind:

- 1000er (Al 99,5%, niedrige mechanische Eigenschaften und gute Schweißeignung),
- 2000er (AlCu, Cu ist Hauptlegierungsanteil, schlechte Schweiißeignung und Schweißfestigkeit),
- 3000er (AlMn, Mn ist Hauptlegierungsanteil, exzellente Schweißeignung und Schweißfestigkeit),
- 4000er (AlSi, Si ist Hauptlegierungsanteil, exzellente Schweißeignung und Schweißfestigkeit),
- 6000er (AlMgSi, dieser Gruppe enthält Silicium und Magnesiumlegierungen, bei denen Bestandteile mit niedriger Siedetemperatur sich vorzeitig verflüchtigen),
- 7000er (AlZn, Zink kann in der Schmelze zu anderen Werkstoffzusammensetzung führen, was einem schlechten Einfluss auf die Schweißfestigkeit hat; schlechte Schweißeignung)

Vorbereitung der Fügezone

In Zusammenarbeit mit einem Dienstleister für das Elektronenstrahlschweißen werden vorhandene Konstruktionen unter dem Gesichtspunkt einer für das Elektronenstrahlschweißen optimierten Fügestelle überarbeitet oder Neukonstruktionen schon im Entwicklungsstadium optimiert, um kostengünstige und qualitativ hochwertige Ergebnisse zu erzielen. Eine ideale Fugenvorbereitung bedeutet: Die Fügespaltweite entspricht einem technischen Nullspalt, und zur Vermeidung von Wurzelkerben sind die Kanten im Bereich der Wurzel zu brechen (**Bild 3**).

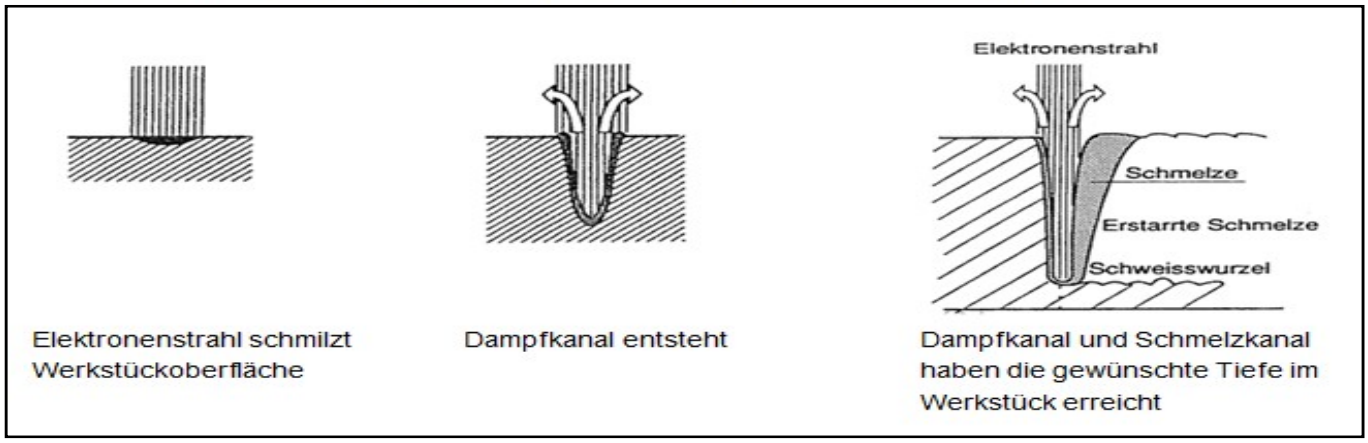
In der Schweißpraxis können typische Fehler wie Wurzel- und Flankenbindefehler, starke Spritzerbildung, Rissbildungen oder unerwünschte Porenbildungen auftreten. Zur Vermeidung dieser Problematik ist zum einen eine besondere Vorbereitung der Bleche für das Schweißen von Aluminiumwerkstoffen erforderlich, das bedeutet ein ordentliches Entfetten der Oberfläche im gesamten Fugenbereich ist unumgänglich.



▶ Bild 3. Zur Vermeidung von Wurzelkerben sind die Kanten im Bereich der Wurzel zu brechen.

-- LIZENZIERT FÜR: DVS Media GmbH --

▼ Bild 4. Das Elektronenstrahlschweißen von Aluminium ermöglicht Nahttiefen von 0,1 mm bis 300 mm in einem Arbeitsgang.



Aluminium produziert eine Oxidschicht, wenn es mit Sauerstoff in Verbindung kommt. Diese Oxidhaut ist nach Diamanten das härteste Material. Wenn die Oxidschicht beschädigt wird, erneuert sie sich selbständig. Aluminiumoxide (Al_2O_3) sind schwerer als reines Aluminium und können im Schmelzbad nach unten sinken und damit Porosität oder Risse verursachen. Ebenso bindet das Oxid Feuchtigkeit was zu Poren führen kann.
Beim Herstellen hochwertiger Schweißverbindungen soll zwischen dem mechanischen Bearbeiten und dem Elektronenstrahl-Schweißen keine beliebig lange Zeit (< 24 h) verstreichen. Ein Beizen der Oberflächen im Fügebereich vor dem Sschweißen verbessert die Fließeigenschaften und führt bei geminderter Porenzahl zu sehr guten Nahteigenschaften.

Das Elektronenstrahlschweißen ist ein ideales Verfahren um die Schmelzpunktunterschiede zwischen Oxidhaut (ca. 2050°C) und dem Grundwerkstoff (ca. 660°C) zu kompensieren. Die bei anderen Schweißverfahren störende hochschmelzende Oxidhaut kann mithilfe eines Elektronenstrahls leicht zerstört werden. Das Schweißtiefen-Spektrum ermöglicht Nahttiefen in Aluminium von 0,1 mm bis 300 mm in einem Arbeitsgang dank Tiefenschweißeffekt (**Bild 4**)

Die besondere Herausforderung beim Schweißen von Aluminium liegt darin, Gaseinschlüsse in der Schmelze und damit Bindefehler innerhalb der Konstruktion zu vermeiden. Desweiteren ist eine sorgfältige Wahl der Schweißparameter und vor allem die richtige Schweißreihenfolge zur Gewährleistung einer hohen Prozesssicherheit notwendig.

▲ Bild 5. Die geschweißten Kühlplatten sind im Rennbetrieb Kräften bis 5 g ausgesetzt. (Bilder: SwissBeam)

Elektronenstrahlschweißen der Kühlkörper

Obwohl die meisten Aluminiumlegierungen gut Schweißeigeeignet sind, führen die werkstoffspezifischen Eigenschaften auch gegenüber anderen Metallen zu grundsätzlichen Verarbeitungsunterschieden. So tritt eine Neigung zur Porosität durch eingelagerte Wasserstoffverbindungen in der Oxidschicht auf. Die hohe Wärmeausdehnung führt hauptsächlich bei Dünnblechen zu starkem Verzug und die hohe Wärmeleitfähigkeit erfordert trotz des nur bei etwa bei 660 °C liegenden Schmelzpunktes eine etwa gleich hohe Wärmeeinbringung wie bei Stahl.

Bei Schweißverbindungen liegt die Frage nahe, mit welcher Festigkeit beziehungsweise Härte im Vergleich zu der des Grundwerkstoffs zu rechnen ist. Zumal die geschweißten Kühlplatten in der Antriebstechnik (**Bild 5**) Kräften bis 5 G im Rennbetrieb ausgesetzt sind. Dabei spielt bei Aluminiumwerkstoffen der Unterschied zwischen nicht aushärtbaren und aushärtbaren Legierungen eine erhebliche Rolle. Kaltverfestigte (walzhart) und aushärtbare Aluminiumlegierungen verlieren in der schmalen Schmelzzone einen Teil ihrer Härte. Kaltauslagernde Legierungen erfahren nach dem Schweißen und anschliessenden längeren Lagern bei Raumtemperatur wieder einen Härteanstieg, der aber nicht an den Wert des unbeeinflussten Grundwerkstoffs herankommt.

Im Gegensatz zu Stahl tritt bei Aluminium mit seiner kubisch-flächenzentrierten-Atomgitterstruktur keine Gitterumwandlung

-- LIZENZIERT FÜR: DVS Media GmbH --

▶ Tabelle 2. Empfohlene Vorwärmtemperaturen von Aluminium-Werkstoffen

Werkstoff	Materialstärke (mm)	max. Temperatur (°C)	max. Dauer (min)
AlMgSi0.5	>7	180	60
AlMgSi 1	>10	200	30
AlZnMgCu 1.5	>6	150	30
AlMg 4,5 Mn	>8	170	20

bei der Abkühlung statt. Solch eine Gitterumwandlung im Stahl führt in der Wärmeeinflusszone zu einem Aufhärtungsgefüge, dessen Härte ein Vielfaches des Grundwerkstoffes betragen kann. Dagegen erfolgt bei naturharten Aluminiumwerkstoffen nach dem Schweißen während der Abkühlung keine Aufhärtung beziehungsweise bei tiefen Temperaturen keine Versprödung.

Neben der schweißgerechten Konstruktion und der sorgfältigen Legierungsauswahl kommen oft noch zusätzlich spezielle Wärmebehandlungsverfahren, wie Vorwärmen oder verzögertes Abkühlen zum Einsatz. Bei dickeren Blechen wird ein Vorwärmen (**Tabelle 2**) empfohlen: Kleinere Werkstücke können in einem Ofen oder mit dem Elektronenstrahl prozesssicher vorgewärmt werden

Die hohe Affinität des Schmelzbades zu atmosphärischen Gasen, insbesondere zu Wasserstoff, verstärkt die Gefahr einer erhöhten Porenbildung. Die Löslichkeit der eingeschlossenen Gase im Aluminium ins besondere in der Oxidschicht nimmt mit höherer Temperatur zu. Dies bewirkt das während des Schweiißprozesses das Gas in die Schmelze diffundiert, und da diese vom Rand her abkühlt, übersteigt in der Folge der Gasgehalt die Löslichkeitsgrenze und bildet Poren. Durch mehrmaliges Schweißen oder einem Einsatz einer Mehrbadtechnik kann eine Ausgasung des Wasserstoffs unterstützt werden, so dass die Poren verschwinden.

Bei Aluminium - Werkstoffen ist besonders darauf zu achten, dass während der Erstarrung der Schmelze keine durch Schrumpfbehinderung entstehenden Zugspannungen auftreten.

Die in der Lohnfertigung mit dem Elektronenstrahl geschweißten Kühlsysteme werden alle einer Dichtigkeitsprüfung in Form von einem He- Lecktest mit einer Leckrate < 1 x 10^{-8} mbar l/s unterzogen. Dies bedeutet, dass innerhalb von 42 Jahren max. 1,5 ml entweichen können, was einem 1/10 von einem Esslöffel entspricht. So kann ein hohes Qualitätsniveau im Auslieferzustand mit einer auußerordentlichen Prozesssicherheit beim Einsatz der Kühlsysteme sichergestellt werden. ■

Peter Schmidt,
Geschäftsleiter,
SwissBeam AG,
Rudolfstetten/Schweiz,
peter.schmidt@swissbeam.ch

DVS MEDIA

App zu Schweißer-Prüfungsbezeichnungen nach DIN EN ISO 9606-1

Sie haben eine Schweißaufgabe und benötigen eine Vorgabe für eine gültige Prüfungsbezeichnung? Oder wollen Sie den Aufbau der Prüfungsbezeichnungen nach Norm intensiv kennenlernen und verschiedenste Varianten durchspielen? Dann ist die neue App von DVS Media genau das richtige für Sie! Unsere App leitet Sie Schritt für Schritt durch die Details einer Schweißaufgabe. Aus den gewählten Vorgaben wird die normgerechte Prüfungsbezeichnung zusammengestellt. Das Ergebnis kann direkt aus der App als Email verschickt werden. Nach und nach werden folgende Bereiche abgefragt:

- Schweißprozess
- Produktform
- Nahtart
- Zusatzwerkstoffgruppe
- Schweißzusatztyp
- Abmessungen
- Schweißposition
- Nahteinzelheiten

Alle Eingaben werden über Auswahlmenüs gesteuert. Über Navigationsbuttons kann man jederzeit zu einem vorherigen Schritt zurückkehren und Änderungen der getroffenen Auswahl vornehmen.

Die App ist sowohl für die Smartphone-Betriebssyteme Android und IOS als auch für Windows10 verfügbar.

DVS Media GmbH • Aachener Straße 172 • 40223 Düsseldorf
T +49 211 1591-162 • F +49 211 1591-250 • vertrieb@dvs-hg.de • www.dvs-media.eu

Google play
Laden im App Store