

QUALITÄTSSICHERUNG FÜR DEN AUTOMATISIERTEN WIDERSTANDSSCHWEIßPROZESS VON KOHLENSTOFFFASERVERSTÄRKTEN HOCHLEISTUNGSTHERMOPLASTEN

M. Hohenreiter, Dr. S. Jarka, Dr. A. Schuster, M. Beyrle, L. Brandt, M. Endraß, F. Fischer,
M. Mayer

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Bauweisen und
Strukturtechnologie (BT), Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP), Am
Technologiezentrum 4, 86159 Augsburg, Deutschland

Zusammenfassung

Das Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie entwickelt unter anderem Prozesstechnologien zur Herstellung von thermoplastischen Hochleistungsstrukturen für die Luft- und Raumfahrt. Im Fokus dieser Forschung steht die Betrachtung einer ganzheitlichen Prozesskette, beginnend bei Designprinzipien, über Fertigungskonzepte bis hin zur automatisierten und qualitätsgesicherten Bauteilherstellung. Forschungsschwerpunkt dieser Arbeit ist die Identifizierung prozesskritischer Parameter bei einem automatisierten Widerstandsschweißprozess, sowie deren Überwachung und anschließenden Auswertung. Für diesen Prozess wird zwischen zwei Fügepartnern ein Schweißelement, bestehend aus einem Edelstahlgewebe mit angrenzenden Glasfaser/Matrix-Isolationsschichten, eingebracht. Die für die Schweißung erforderliche Wärme kann so direkt in die Fügezone eingeleitet werden. Um einen reproduzierbaren Prozess gewährleisten zu können, werden sowohl der Fügedruck als auch die Füge­temperatur während des Schweißvorganges überwacht.

1. MOTIVATION

In der Luftfahrtindustrie bestehen höchste Ansprüche bezüglich Qualität der verwendeten Materialien, Prozesssicherheit, Genauigkeit, sowie einer hohen Reproduzierbarkeit. Des Weiteren besteht der Anspruch bei der Entwicklung von neuen Flugzeugkonzepten gewichtsoptimiert und ressourceneffizient, in Hinblick auf Kosten und Zeit, vorzugehen. Ein Ansatz, eine Gewichtsoptimierung bei der strukturellen Verbindungstechnik zu betreiben, bietet die Verwendung von Schweißtechnologien für faserverstärkte Hochleistungsthermoplaste.

Thermoplastische Matrixwerkstoffe wie PEEK (Polyetheretherketon) oder PEKK (Polyetherketonketon) bergen das Potenzial, Schweißverfahren als stoffschlüssige Verbindungstechnik zu nutzen. Der Schweißprozess ermöglicht eine flächige Verbindung, die ein großes Potenzial hinsichtlich der Automatisierbarkeit bei vergleichbar kurzen Zykluszeiten bietet. Die Schweißverfahren bieten dabei die Möglichkeit, den Faserverbund materialgerecht und stoffschlüssig strukturell zu verbinden. Durch die hohen erreichbaren Festigkeiten der Schweißverbindungen kann der Einsatz

herkömmlicher Verbindungstechniken, wie Bolzen oder Nieten, reduziert werden. Damit einhergehend entfällt das Vorbohren von Nietlöchern, das zum einen eine Schädigung des Faserverbundwerkstoffes darstellt und zum anderen keine staubfreie Montage zulässt. Im Gegensatz dazu ist der Einsatz der Schweißtechnologie auch zu einem späten Zeitpunkt in der Produktionsphase denkbar. Dies ist vor allem bei einem hohen Vorrüstungsgrad der zu fügenden Komponenten von Vorteil.

In diesem Paper soll ein Qualitätssicherungskonzept für das elektrische Widerstandsschweißen als Fügeverfahren untersucht werden. Um der Forderung nach einer hohen Fertigungsrate und geringen Taktzeiten, bei einer hohen Prozesssicherheit und Reproduzierbarkeit nachkommen zu können, ist die Automatisierung dieses Schweißprozesses unumgänglich. Die Automatisierung bildet aber lediglich die Voraussetzung für einen sicheren und reproduzierbaren Prozess. Um eine Aussage über die tatsächliche Verbindungsqualität geben zu können, bedarf es einer durchgängigen, produktionsbegleitenden Qualitätssicherung. Mit der Überwachung der Schweißparameter ist nicht nur eine messbare physikalische Größe geschaffen, die einen Vergleich der einzelnen Schweißungen zulässt, sondern es ermöglicht

auch den Schweißprozess hinsichtlich Temperatur in der Fügezone und die Schweiß- bzw. Abkühlzeit gezielt beeinflussen zu können. Zusätzlich wird durch das ausgearbeitete Qualitätssicherungskonzept die Online-Überwachung ermöglicht, wodurch unter anderem bei Nichteinhalten geforderter Grenzen der Abbruch des Schweißvorgangs erfolgen kann.

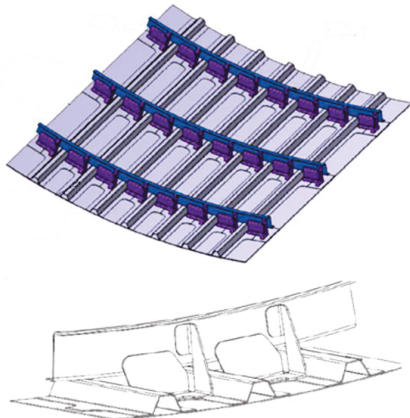


BILD 1: Ausschnitt einer Flugzeugrumpfschalenstruktur mit Fokus auf die Verbindung von Clip zu Spant [1]

Als konkretes Einsatzbeispiel wird in diesem Paper ein Qualitätssicherungskonzept für das automatisierte elektrische Widerstandsschweißen an Hand der Verbindung von Clip zu Spant bei der Fertigung einer Flugzeugrumpfschalenstruktur betrachtet.

2. STAND DER TECHNIK

Das elektrische Widerstandsschweißen beruht auf dem physikalischen Prinzip der Wärmeleitung. Ein stromdurchflossener Leiter erzeugt auf Grund des elektrischen Widerstandes Joulsche Wärme und kann so als Schweißelement für den Schweißprozess fungieren.

Entsprechend den Untersuchungen von C. Freist [2] besteht in diesem Paper das verwendete Heizelement aus einem Edeltstahlgewebe mit einem Drahtdurchmesser von 0,065 mm und einer Maschenweite von 0,3 mm. Um die elektrische Isolation zu den zu verschweißenden CFK-Bauteilen zu gewährleisten, ist dieser elektrische Leiter beidseitig von einem Glasfaser/PEEK Semipreg (GF/PEEK) bedeckt. Im Unterschied zum Prepreg ist beim Semipreg Werkstoff die Faserlage nicht von der Matrix durchtränkt. Stattdessen liegt die Matrix als Folie auf dem Fasermaterial aufgebracht vor. Um die Anbindung dieses Schweißelements an die zu fügenden CFK-Bauteile sicherzustellen und trockene Stellen zu vermeiden, ist das Glasfaser/PEEK Semipreg beidseitig von einer zusätzlichen Lage PEEK umhüllt.

Um bei dem elektrischen Widerstandsschweißen eine gleichmäßige Temperaturverteilung zu erhalten, ist auf eine reproduzierbare Kontaktierung des verwendeten Edeltstahlgewebes zu achten. Zudem muss für einen erfolgreichen Schweißvorgang neben der so erzeugten Temperatur im Fugespalt ein konstanter Fügedruck aufgebracht werden.

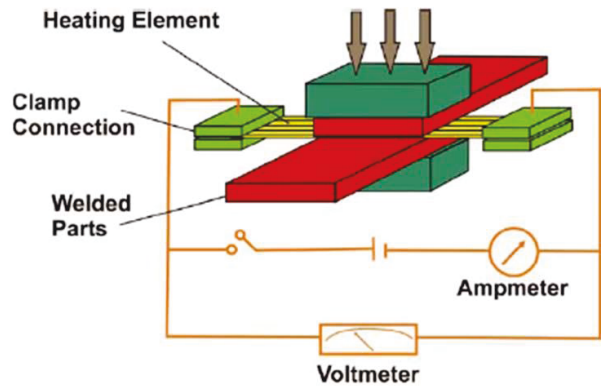


BILD 2: Schema des elektrischen Widerstandsschweißens [3]

BILD 2 zeigt den schematischen Aufbau des elektrischen Widerstandsschweißverfahrens. Zwischen den Fügepartnern wird mit einem definierten Überstand das Heizelement eingelegt und über Klemmverbindungen elektrisch kontaktiert. Durch den angelegten Gleichstrom erwärmt sich das Heizelement und schmilzt die angrenzende thermoplastische Matrix an. Durch den aufgetragenen Druck entsteht eine flächige, stoffschlüssige und hochfeste Verbindung, die zudem fertigungsbedingte Toleranzen der zu fügenden Bauteiloberflächen ausgleichen kann.

Bei all den Potentialen, die dieser Schweißprozess bietet, bestehen auch besondere Herausforderungen. So sind die stromleitenden Bereiche des Heizelements sorgfältig von den Fügepartnern zu isolieren. Denn auf Grund der elektrischen Leitfähigkeit der Kohlefaserverstärkung kann es bei einer ungewollten Kontaktierung mit dem metallischen Leiter zu Stromdissipationen kommen.

Eine weitere Schwierigkeit besteht bei der Erzeugung der für das Schweißen erforderlichen Temperatur, ohne dabei eine Überhitzung herbeizuführen. Temperaturspitzen sind vor allem in den freiliegenden Randbereichen, aufgrund der geringeren Wärmeableitung an der Luft, festzustellen (vgl. BILD 3). Dieses Phänomen wird als Randeffect bezeichnet.

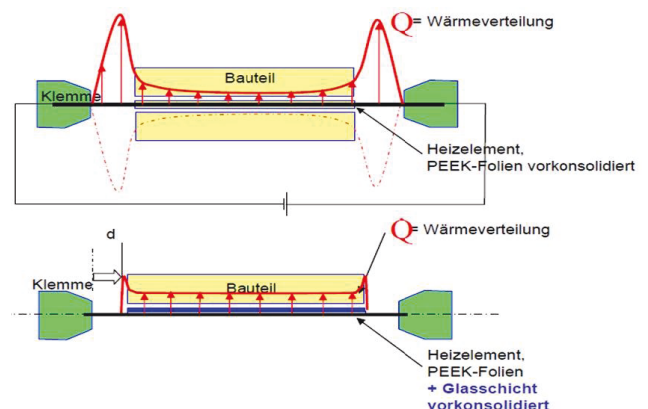


BILD 3: Schema des Randeffects in Abhängigkeit der Klemmposition [4]

Sowohl Stromdissipationen als auch ausgeprägte Randeffekte verhindern einen kontrollierten Aufwärmprozess und führen im schlimmsten Fall durch thermische Degradation zu lokalen Matrix-Zersetzungen.

Wichtige Einflussfaktoren für die Festigkeit der Verbindung bei dem elektrischen Widerstandsschweißprozess sind somit Prozessparameter, geometrische Faktoren sowie Materialeinflüsse. Zu den Prozessparametern gehören eingebrachte Energie, Schweißzeit, Klemmdruck sowohl für die elektrische Kontaktierung als auch für die Verbindung der zu fügenden Bauteile, elektrischer Widerstand und Abkühlzeit. Geometrische Faktoren beziehen sich auf die zu fügenden Bauteile, auf die Kontaktierungsflächen, auf das Schweißelement selbst und auf das Schweißwerkzeug. Der Einfluss des Materials ist durch die zu fügenden Bauteile und wiederum durch das Schweißelement selbst gegeben.

3. BESCHREIBUNG DES VERSUCHSSTANDS

Für den automatisierten Schweißprozess zur Herstellung einer Spant-Clip-Verbindung wurde ein Endeffektor entwickelt, welcher mittels KUKA LBR liwa 14 R820 manipuliert wird. Die nachfolgende Abbildung (BILD 4) zeigt den Schweißendeffektor mit seinen wichtigsten Komponenten.

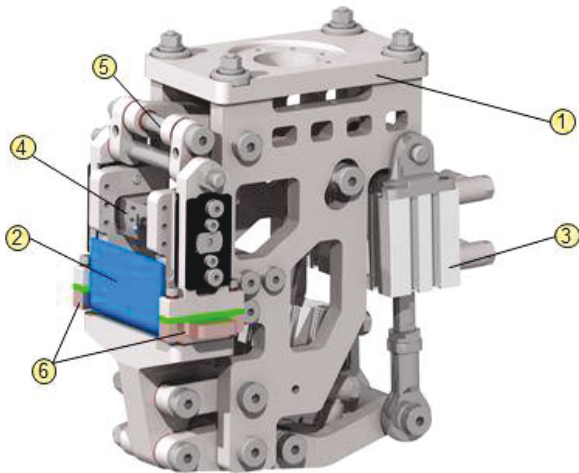


BILD 4: Schweißendeffektor mit Adapterplatte für Roboter (1), angesaugtem CF/PEEK Clip (2), Pneumatikzylinder zur Schweißkraftaufbringung (3), sowie Zentriereinheit (4), Kontaktierungseinheit (5) und elektrischen Kontaktierungsflächen (6)

Zur Bereitstellung der Zustell- und Prozesskräfte werden pneumatische Kurzhubzylinder mit 32 mm Durchmesser und 25 mm Hub, die zudem eine Positionserkennung der Kolbenstange erlauben, verwendet. Die Regelung findet über die Robotersteuerung statt. Der Prozessablauf sieht das Handling und die Positionierung eines CFK-Clips auf einer flächigen Platte aus dem gleichen Verbundwerkstoff vor.

Im ersten Schritt wird ein Winkel über Balgensauger am hinteren Ende des Endeffektors aus einem bereitstehenden Magazin entnommen und zu einer Positioniereinrichtung transportiert und abgelegt. Hier wird der Clip definiert in die Schweißzange eingelegt und über einen temperaturbeständigen Sauger gehalten.

Das Umgreifen am Endeffektor erfolgt, um das Bauteil aus dem Vorrats-Magazin mit geringer Positionsgenauigkeit in die Schweißposition mit sehr hoher Genauigkeit zu transferieren. Während dem Transport zur Schweißposition wird der Clip über die Kontaktierungsstempel zentriert. Dafür werden diese über zwei kleinere Zylinder seitlich auf die Clipenden gepresst. Anschließend wird der Endeffektor so positioniert, dass der Clip vollflächig auf seinem Schweißpartner aufliegt. Nach erfolgter Positionierung, wird über die beiden Kurzhubzylinder der Schweißdruck erzeugt. Dieser kann an die Prozessanforderungen angepasst werden. Um die Ankopplung der elektrischen Kontaktierungsflächen des Schweißelements mit hoher Prozessstabilität zu realisieren, werden zwei Kupferblöcke mit einer Kraft von jeweils 450 N angepresst. Diese Kraft ist nötig um den Widerstand zwischen Edelstahlgewebe und den elektrischen Kontaktierungsflächen zu minimieren.

Um eine fehlerhafte Kontaktierung auszuschließen, wird eine automatische Prüfung des elektrischen Widerstandes mit Hilfe eines Kontrollstroms von 1 A durchgeführt. Erst wenn die erfolgreiche Kontaktierung bestätigt werden kann, startet der eigentliche Schweißvorgang. Dabei soll die Schweißtemperatur, im Falle von PEEK ca. 380°C, möglichst schnell erreicht werden, um eine Durchwärmung der Bauteile zu minimieren. Im Anschluss an die Aufheizphase (40 A, 18 s) findet eine Haltephase (36 A, 20 s) statt, um ausreichend Schmelze in der Fügezone zu erzeugen. Nach weiteren 30 s Halte- und Abkühlzeit bei weiterhin konstant anliegendem Druck ist der Schweißvorgang beendet.

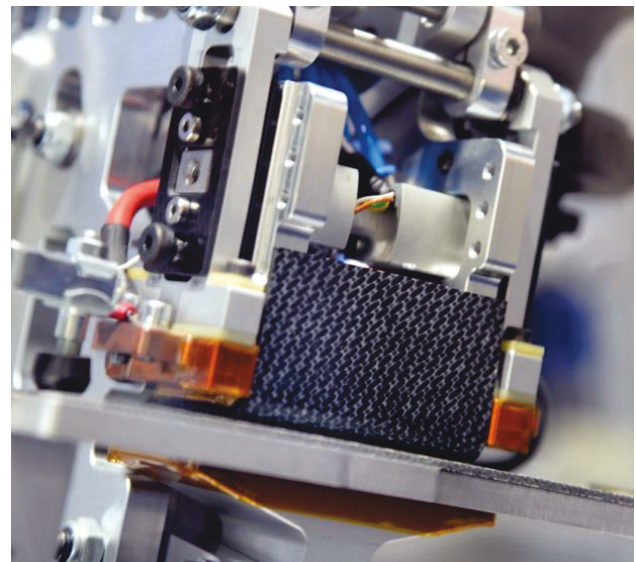


BILD 5: Endeffektor zum automatisierten Schweißen faserverstärkter Thermoplastclips

Anhand einer Messung des Übergangswiderstandes im Kontaktierungsbereich kann eine unzureichende

Kontaktierung bereits vor dem Schweißen erkannt werden und fehlerhafte Bauteile vor dem Schweißen ausgeschleust werden. Bedingt durch die sich temperaturabhängig ändernden Widerstandsverhältnisse des stromdurchflossenen Leiters besteht des Weiteren die Möglichkeit der indirekten Temperaturüberwachung in der Aufheiz-, Halte- und Abkühlphase.

3.1 Herstellung der CFK-Clips

Die zu verschweißenden L-förmigen Clips wurden in einem Ofenprozess bei 380°C für 40 min. mittels Vakuumkonsolidierungsverfahren hergestellt.

Für den Vakuumaufbau wurde eine Form mit einer hitzebeständigen Polyimid-Trennfolie ausgekleidet. Auf diesen Aufbau wurden die sechs $\pm 45^\circ$ -Lagen aus CF/PEEK Prepreg drapiert. Für diesen Preforming Schritt wurde eine Heißluftfön und ein entsprechendes Druckstück eingesetzt. Um den Rand der Preform wurde Glasbreather angebracht, damit die Luft zwischen den einzelnen Lagen entweichen kann und somit die Voraussetzungen für eine gute Konsolidierungsqualität gegeben ist. Um definierte Innen- und Außenradien zu erhalten und über das ganze Bauteil eine homogene Druckaufbringung gewährleisten zu können, wurde ein ebenfalls von einer hitzebeständigen Polyimid-Trennfolie ausgekleidetes Druckstück auf den Lagenaufbau aufgebracht. Den Abschluss des Aufbaus bildet eine Vakuumfolie. Im Anschluss an die Ofenkonsolidierung wurden die Clips auf deren Zielgeometrie zugeschnitten.

3.2 Beschreibung des Schweißelements

Das aus dem Stand der Technik bekannte Schweißelement wurde so weiterentwickelt, dass es zum einen in den automatisierten Prozess eingebunden werden kann und zum anderen eine hohe Prozesssicherheit ermöglicht.

Dabei besteht die Herausforderung sowohl in der geeigneten konstruktiven Auslegung des Schweißelements als auch des Schweißwerkzeugs. Zusammenfassend sind die im Folgenden aufgelisteten Randbedingungen durch das Schweißelement zu erfüllen, um einen stabilen und wiederholbaren Fügeprozess zu ermöglichen:

- Vollständige elektrische Isolierung zu den Fügepartnern
- Freiliegende, ausreichend dimensionierte Kontaktflächen des integrierten Stromleiters
- Ermöglichung einer enganliegenden Kontaktierung zur Vermeidung von Temperaturspitzen
- Geringe Toleranzen für eine wiederholbare Kontaktierung mit geringem Übergangswiderstand

Um diese Kriterien erfüllen zu können, wurde ein asymmetrischer Aufbau des Schweißelements entwickelt. (vgl. BILD 6). Das metallische Gitter ist rundum von

Glasfasergewebe und Matrixwerkstoff umschlossen. Die Geometrie ist exakt auf die Kontaktierung des Werkzeugs und das Bauteildesign abgestimmt, um so Kurzschlüsse und thermische Überhitzungen zu vermeiden. Lediglich in den Kontaktierungsbereichen liegt der elektrische Leiter frei.



BILD 6: Schweißelement für die Anwendung im automatisierten Fügeprozess

Die Herstellung der Schweißelemente erfolgt durch Vakuumkonsolidierung. Ein besonderes Augenmerk ist hierbei, neben einer ausreichend hohen Kompaktierung, auf die konstante Dickenverteilung der Glasfaser-Matrix-Schichten zu legen. Hier erzeugte Unregelmäßigkeiten führen beim Schweißen schnell zu isolierend wirkenden Luftspalten zwischen den Fügepartnern und dem Schweißelement und somit zu ungewollten, starken Abweichungen der Temperaturgleichmäßigkeit im Fügebereich.

4. QUALITÄTSSICHERUNGSKONZEPT

Ziel der Qualitätssicherung ist eine definierte Aussage über die gefertigte Schweißgüte geben zu können. Eine Möglichkeit die Qualität eines Prozesses wie das Widerstandsschweißen zu beurteilen, beruht auf einer nachgeschalteten zerstörungsfreien Prüfung wie Ultraschalluntersuchungen oder Computertomographien. Dieses Vorgehen ist sowohl zeit- als auch kostenintensiv und kann daher nicht für jede einzelne Schweißung durchgeführt werden.

Um der Nachfrage nach einer hinreichenden Prozessabsicherung inklusive automatisierter, lückenloser Dokumentation Rechnung zu tragen, wurde für das automatisierte Widerstandsschweißen ein Prozessmonitoring entwickelt. Um die geforderte Aussage über die Schweißqualität treffen zu können, ist vor allem die Überprüfung der wichtigsten Prozessparameter von Bedeutung. Diese sind der Setzweg, die Temperatur in der Fügezone sowie der Fügedruck.

Der Fügedruck wird über den an den Pneumatikzylindern eingehenden Druck und die Übersetzung auf die Klemmbacke definiert. Zur Messung des Setzweges nehmen zwei Positionstransmitter [5] die Kolbenstellung der Pneumatikzylinder während eines Schweißvorgangs auf. Diese Positionsinformation wird in Form einer Ausgangsspannung zwischen 2 und 10 V als analoges Ausgangssignal aufgezeichnet (vgl. BILD 8 Nr.3). Über das Übersetzungsverhältnis am Greifer kann so der Klemmbackenabstand überprüft und ausgewertet werden.

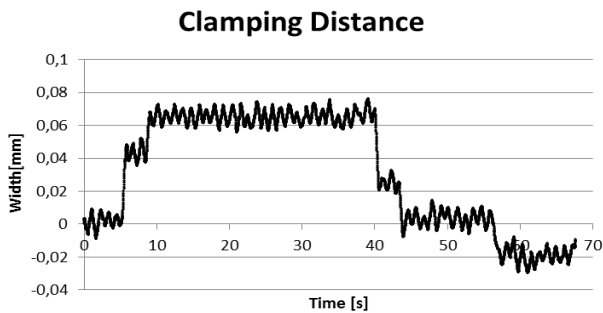


BILD 7: Klemmbackenabstand während eines Schweißvorgangs

BILD 7 zeigt den aufgezeichneten Verlauf der Klemmbackenstellung während eines Schweißvorgangs. Zum Zeitpunkt 0 s wird der Klemmbackenabstand für den bereits gegriffenen und positionierten Clip auf 0 mm gesetzt und mit der Bestromung begonnen. Während eines einzelnen Schweißvorgangs erfolgt die Bestromung für 18 s mit 40 A, gefolgt von einer Bestromung mit 36 A für 20 s. Innerhalb dieser 38 s kann aufgrund von thermisch bedingter Ausdehnung des Matrixmaterials ein Weg von $\sim 65 \mu\text{m}$ aufgezeichnet werden. In der Abkühlphase (30s) wird durch den konstant anliegenden Druck ein Setzweg aufgezeichnet, der, wie in BILD 7 erkenntlich, einen Wert $\sim 20 \mu\text{m}$ unterhalb des Ausgangsniveaus erreicht. Dies ist durch Kompaktierung, Ausgleich von Oberflächenrauigkeiten und den Quetschfluss der Matrix zu erklären. Es bleibt zu erwähnen, dass der verwendete Positionstransmitter [5] inklusive der Übersetzung des gewählten Versuchsaufbaus eine Auflösung von $\sim 20 \mu\text{m}$ besitzt, wodurch eine quantitative exakte Aussage über den Setzweg derzeit nicht möglich ist.

Aufgrund der fehlenden Zugänglichkeit der Fügezone zur Messung der aktuellen Temperatur scheiden sowohl optische Messverfahren wie die Thermografie, als auch taktile Messverfahren, wie die Messung mittels Thermoelementen aus. Aus diesem Grund wird für die Überwachung der Fügetemperatur die temperaturabhängige Widerstandsänderung des verwendeten Edelstahlgewebes genutzt. Für diese Messgröße werden sowohl die Schweißspannung als auch der Schweißstrom während eines Schweißvorgangs aufgezeichnet.

Bei dem Versuchsstand wird am Schweißendeffektor die Spannung direkt an den Klemmbacken gemessen. Der Schweißstrom wird mittels Spannungsabfallmessung über einen bekannten Messwiderstand ($1 \text{ m}\Omega$) gemessen. Mittels Ohm'schen Gesetz kann somit für das Schweißelement ein durchschnittlicher Ersatzwiderstand errechnet werden, welcher über eine Temperatur-Widerstandskennlinie in eine aktuelle Temperatur übersetzt werden kann.

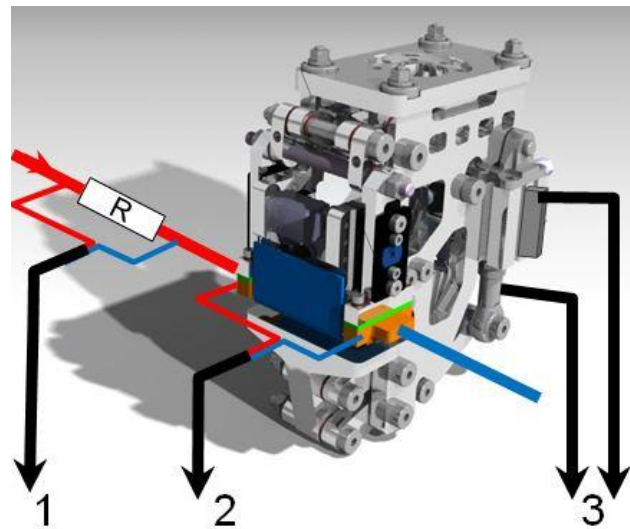


BILD 8: Datengewinnung am Endeffektor für das automatisierte Widerstandsschweißen

BILD 8 zeigt den konstruktiven Aufbau des Endeffektors für das elektrische Widerstandsschweißen. In dieser Abbildung ist das Schema der Datengewinnung integriert. Aufgezeichnet und ausgewertet werden Schweißstrom (1), Schweißspannung (2) und die analogen Signale von zwei Positionstransmittern (3).

Um dem gemessenen Widerstand eine Temperatur zuordnen zu können, wurde mit Hilfe von Vorversuchen eine Kalibrierkurve erstellt. Dazu wurde ein Schweißelement mit Thermoelementen versehen und mit einer Schrittweite von 0,5 A beginnend bei 1 A bestromt. Nach erfolgtem Einschwingen wurden die Temperaturwerte den entsprechenden Widerstandswerten zugeordnet. Über die auf diese Weise entstandene Temperaturkalibrierkurve kann so während einer Schweißung dem gemessenen Widerstand eine Temperatur zugeordnet werden.

Das nachfolgende Diagramm (BILD 9) zeigt den linearen Zusammenhang zwischen Temperatur und Widerstand, der für die Überwachung des automatisierten Schweißprozesses genutzt wird, um mit Hilfe des gemessenen Stroms und der gemessenen Schweißspannung eine Aussage über die Fügetemperatur treffen zu können.

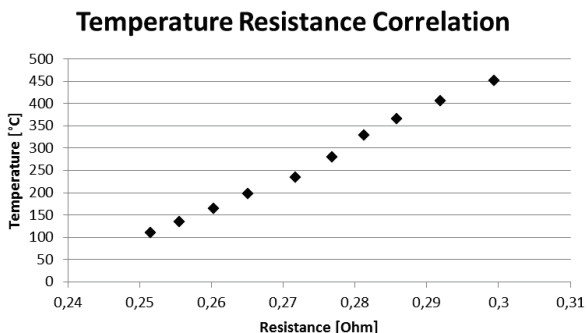


BILD 9: Zusammenhang zwischen Temperatur und elektrischem Widerstand

Der ausgewertete Widerstand ist eine Summe aus Leitungswiderständen, Klemmwiderständen und Widerstand des Edelstahlgewebes. Da sowohl Leitungswiderstände als auch der Materialwiderstand des verwendeten Edelstahlgewebes im defektfreien Zustand konstant sind, kann bei einer Abweichung des Gesamtwiderstandes vor dem Schweißen auf eine unzureichende Kontaktierung geschlossen werden. Faktoren, die einen Einfluss auf den Klemmwiderstand besitzen, sind sowohl die Größe als auch der Anpressdruck der Kontaktflächen. Durch die Automatisierung des Schweißprozesses kann anlagenseitig ein reproduzierbarer Kontaktierungszustand gewährleistet werden.

Wie Voruntersuchungen ergeben haben, ist ein sicherer Schweißprozess mit 40 A für 18 s gefolgt von 36 A für 20 s mit anschließenden 30 s Abkühlphase möglich. Für diesen Stromverlauf zeigt BILD 10 die ermittelte Temperatur in der Fügezone.

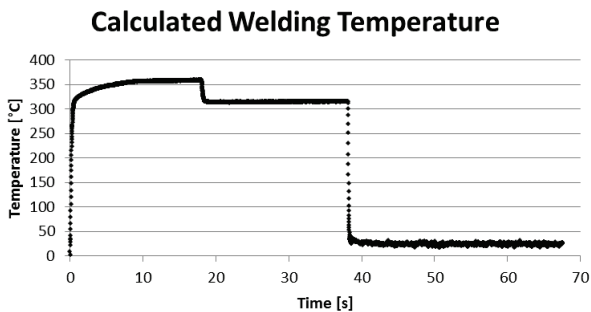


BILD 10: Ermittelter Temperaturverlauf einer Schweißung

Der Temperaturverlauf bezieht sich dabei auf das eingebettete Edelstahlgewebe. Sobald die Stromstärke verringert wird, ist demnach auch unmittelbar ein Temperaturrückgang zu verzeichnen. Da die Spannungs- und Schweißstromwerte zeitgleich zur Schweißung aufgenommen werden, kann mit dieser Vorgehensweise die Online-Temperaturüberwachung erfolgen.

5. ERGEBNISSE

Um die Plausibilität der ermittelten Temperatur in der Fügezone zu überprüfen, wurde ein Versuch zum

elektrischen Widerstandsschweißen durchgeführt, bei dem die Temperatur mithilfe von Thermoelementen mitaufgezeichnet wurde. Der Versuchsaufbau ist in BILD 11 abgebildet. Zu erkennen ist der Endeffektor für das automatisierte Widerstandsschweißen, sowie drei Thermoelemente, die elektrisch isoliert direkt am Schweißelement angebracht wurden.

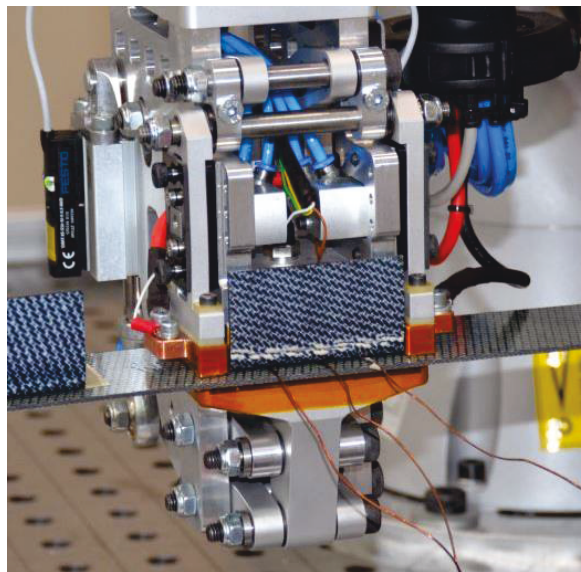


BILD 11: Messen der Schweißtemperatur mittels Thermoelementen

Der Temperaturverlauf während eines Schweißvorgangs ist in BILD 12 für das zentral angebrachte Thermoelement dargestellt.

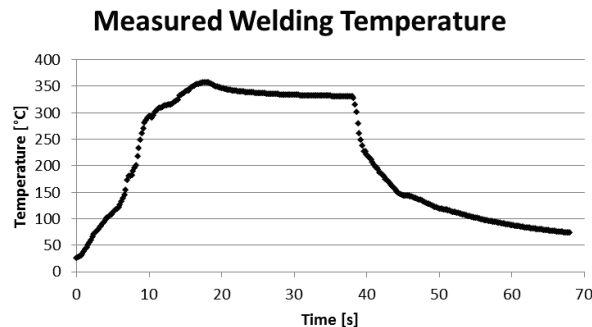


BILD 12: Gemessener Temperaturverlauf einer Schweißung

Ähnlichkeiten in den Temperaturverläufen von ermittelter Temperatur zu gemessener Temperatur sind sowohl in der erreichten Höchsttemperatur von ca. 360°C als auch in dem Plateau, das sich von 18 bis 38 s ausbildet, zu erkennen. Offensichtlicher Unterschied besteht in der Aufheiz- und Abkühlphase, die bei dem gemessenen Graphen deutlich langsamer stattfindet. Eine Erklärung hierfür findet sich bei näherer Betrachtung der Messstelle. Während bei der errechneten Temperatur direkt das Edelstahlgewebe betrachtet wird, wird bei der gemessenen Temperatur das Aufschmelzen der ersten Matrixlage nach der Glasfaserschicht betrachtet. Analog verhält sich die Abkühlphase. Während das Edelstahlgewebe die Wärme extrem schnell an die

angrenzenden Kontaktierungsflächen abgeben kann, ist das Abkühlverhalten der Matrix für die gemessene Temperatur zeitlich verzögert.

Um die Qualität der Schweißung optisch beurteilen zu können, wurden Schliffbilder der geschweißten Clips angefertigt.

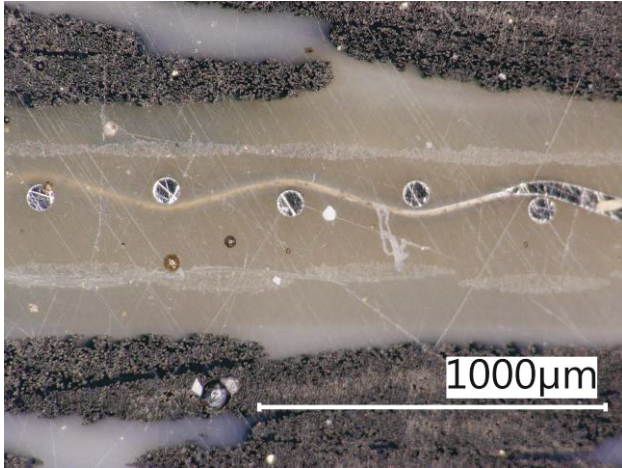


BILD 13: Schliffbild der Fügezone

Der Schliff zeigt das verbundene Schweißelement mit Edelstahlgewebe in der Symmetrieebene und den jeweiligen Glasfaserisolationsschichten. Zu erkennen ist eine gute Konsolidierung der gefügten Verbindung. Das Erreichen der Prozesstemperatur kann durch das vollflächige Anschmelzen der thermoplastischen Matrix bestätigt werden. Eine thermische Degradation kann nicht festgestellt werden, woraus sich der Rückschluss ergibt, dass keine ungewollten Temperaturspitzen, wie sie etwa bei einem lokalen elektrischen Durchschlag auftreten würden, erreicht wurden.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Arbeit konnte ein Ansatz zur produktionsbegleitenden Qualitätssicherung für das automatisierte Widerstandsschweißen gezeigt werden. Es zeigte sich, dass die Kontaktierung des elektrisch leitenden Heizelements für die Prozessüberwachung von größter Bedeutung ist. Für eine reproduzierbare Schweißqualität und deren Überwachung ist daher die Automatisierung des Schweißprozesses eine Grundvoraussetzung. Mit der Automatisierung einhergehend konnte ein prozessbegleitendes QS-Konzept umgesetzt werden, das sowohl die Temperatur in der Fügezone als auch verfahrensbedingte Setzwege aufzeichnet. Die Überprüfung der getroffenen Aussagen konnte durch die Messung der Temperatur über Thermoelemente bestätigt werden. Zudem konnte durch angefertigte Schliffproben eine optische Beurteilung der Konsolidierung für den automatisierten Schweißvorgang erfolgen.

Für einen Ausblick liegt ein weiterer Schritt in der Automatisierung des Widerstandsschweißprozesses in der Prozessregelung. So soll die Temperatur in der Fügezone

nicht nur überwacht werden, sondern als Regelgröße den Schweißprozess aktiv steuern.

Weitere Arbeiten auf dem Feld der Qualitätssicherung des automatisierten Schweißens von thermoplastischen CFK Bauteilen betreffen sowohl Konzepte für kontinuierliches Schweißen als auch Qualitätssicherungskonzepte für verwandte Verfahren wie das Ultraschallschweißen und das Induktionsschweißen.

7. DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchten wir uns bei unseren Kollegen für den Erfolg und die Effektivität bei der Umsetzung dieser Thematik bedanken. Besonders zu erwähnen sind Georg Doll, Michael Vistein, Thomas Stefani, Philipp Gänswürger und Christoph Frommel.

8. QUELLENVERZEICHNIS

[1] TUM, <https://www.lcc.mw.tum.de/lehre/praktika/praktikum-zu-composite-bauweisen/>, am 03.08.2017

[2] C. Freist, Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Widerstandsschweißen endlosfaser- und kurzfaserverstärkter thermoplastischer Hochleistungsstrukturen, Stuttgart, 2013.

[3] D. Stavrov, Resistance welding of thermoplastic composites - an overview, Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, 2004

[4] L. Häberle, Widerstandsschweißen mit VA-Mesh, Stuttgart, 2015

[5] Datasheet, Position Transmitting Sensors SMAT-8E, for T-slot. Festo, 2015