

Lichtbogenbasierte Additive Fertigung zur Karosserieverstärkung im Automobilbau

A. Josten & M. Höfemann

Zusammenfassung

Die lichtbogenbasierte Additive Fertigung ist eine kostengünstige Fertigungstechnologie, die nachweislich hochwertige Bauteile herstellen kann. Es wird vorgeschlagen, dieses Herstellungsverfahren in der Automobiltechnik zu verwenden, um Karosserieteile durch das Erzeugen von Versteifungselementen zu verstärken. Vorteile dieser Methode könnten eine höhere Biegesteifigkeit bei vergleichsweise geringerem Materialvolumen sein. In dieser Studie wurde das Lichtbogenbasierte Additive Fertigen (WAAM = Wire Arc Additive Manufacturing) mit einem fortschrittlichen Kurzlichtbogenschweißverfahren mit geringer Streckenenergie ausgewählt. Das eine Ziel der Arbeit war es zu prüfen, ob es möglich ist, durch additive Fertigung ein Knotenblech auf verzinkten Karosserieteilen zur Verstärkung geformter dünner Stahlbleche zu erzeugen. Das andere Ziel bestand darin, die Biegesteifigkeit der Bleche durch Aufbringen von Schweißgut in Gitterform zu erhöhen. Biegetests der Bleche zeigten eine erhöhte Biegesteifigkeit im Vergleich zum Ausgangsmaterial. Dieses Produktionsverfahren und die Ergebnisse der Studie werden auf die Automobiltechnik bezogen, können jedoch auch für andere Anwendungen verwendet werden. Es soll aufgezeigt werden, wie diese Ziele erreicht werden können, welche Schwierigkeiten und Einschränkungen bestehen und wo weitere Forschungsarbeiten eingeleitet werden könnten.

Schlagwörter

Schweißen, Additive Fertigung, Automobilbau

1 Einleitung – Lichtbogenbasierte Additive Fertigung

Die „Lichtbogenbasierte Additive Fertigung (WAAM)“ wurde inzwischen als relativ schnelle und kostengünstige Alternative zur Erzeugung von Metallbauteilen anerkannt [1]. Hohe Abschmelzleistung und geringere Investitions- und Betriebskosten im Vergleich zu pulverbasierten additiven Herstellungsverfahren sind für die Herstellung großvolumiger Komponenten von besonderem Interesse [2]. Die Verwendung von WAAM wurde durch die Entwicklung energiereduzierter, digital gesteuerter Kurzlichtbogenverfahren und die vereinfachte Verwendung von Industrierobotern für die Brennerbewegung erleichtert [1]. Additive Fertigung bedeutet häufig die Erzeugung vollständiger Bauteile durch schichtweises Hinzufügen von Schweißgut. Es gibt einige Verfahren, die für diesen Zweck angewendet werden können. Von besonderem Interesse für die additive Fertigung sind die digital gesteuerten Kurzlichtbogenverfahren, mit denen thermisch induzierte Eigenspannungen reduziert werden können. Um dies zu erreichen, werden bestimmte Strom- und Spannungskurven teilweise in Kombination mit definierten Drahtbewegungen vorgegeben. Dies führt zu einem besonders energiearmen Materialübergang bei relativ hohen Abschmelzleistungen (allgemein in der Literatur: 1–4 kg/h). Für die additive Fertigung sind die Besonderheiten lichtbogenbasierter Schweißverfahren derzeit Gegenstand intensiver Forschung und müssen berücksichtigt werden. Eine hohe Streckenenergie und ein hoher Materialeintrag aufgrund des Lichtbogens führt zu

thermisch induzierten Eigenspannungen [2]. WAAM scheint eine der vielversprechendsten Technologien für die additive Fertigung zu sein. Es ist bekannt für hohe Produktivität, hohe Energieeffizienz und niedrige Werkstoffkosten [3]. Im Vergleich zu anderen metalladditiven Fertigungsverfahren ist mit WAAM eine gute Zugänglichkeit der Schweißstelle gegeben. Weitere Vorteile sind Flexibilität in Form und Material des Bauteils, Materialeinsparungen im Vergleich zu Schmiedeteilen, keine notwendigen Umformwerkzeuge, das mögliche kurzfristige Umrüsten für andere Formen und Materialien, eine hohe Materialqualität aufgrund der Wärmebehandlung in Verbindung mit dem mehrschichtigen Schweißverfahren, insbesondere gleichmäßige und isotrope Eigenschaften sowie das Hinzufügen von Material zu einem bereits vorhandenen Werkstück [1]. Trotz aller Vorteile verzögern oder hemmen einige Nachteile die Verbreitung in der Industrie. Einige zu klärende Fragen sind z. B.: die Schichtaufbaustrategie (Reduzierung von Restspannungen und Dehnungen), die Gewährleistung einer konstanten Höhe für jede Schicht sowie die Anpassung an die erforderliche Geometrie [3] (und ihre erforderliche Genauigkeit), die häufig aufgrund des „Treppenstufeneffekts“ beeinträchtigt wird [4].

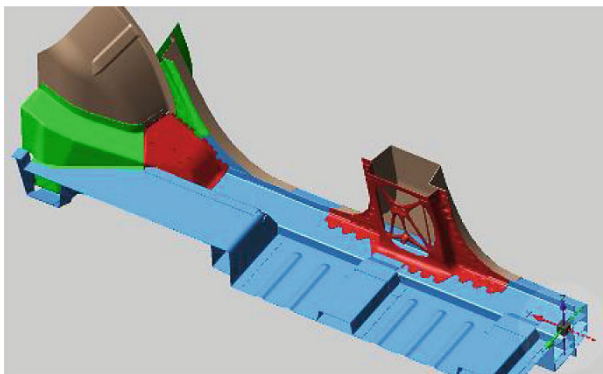


Bild 1 Laser-additiv gefertigtes (LAM) Teil der Mittelsäule eines Autos

2 Karosserieverstärkung in der Automobiltechnik

Zur Materialeinsparung und Versteifung können additiv gefertigte Teile beispielsweise im Automobilbau eingesetzt werden, wie in Abb. 1 dargestellt. Anstatt ganze Komponenten zu generieren, kann Material durch additive Fertigung zu einem vorhandenen Bauteil hinzugefügt werden. In der Automobiltechnik könnte WAAM dazu beitragen, Karosserieteile nur durch die Erzeugung von Versteifungselementen zu verstärken (Abb. 2). Um flache Bereiche des Karosserieblechs zu versteifen, ist es möglich, ein Gitter aus Schweißgut aufzubringen. Zur Versteifung von Winkeln kann ein Knotenblech aus Schweißgut erzeugt werden. Theoretisch sollten die Querschnittsänderungen sowie die Wärmebehandlung durch Schweißen die Steifigkeit erhöhen. Zusätzlich zu den oben beschriebenen Punkten könnten die Vorteile dieses einfachen und modifizierbaren Verfahrens eine höhere Biegesteifigkeit bei vergleichsweise geringem Materialeinsatz sein, sowie die Möglichkeit der Verwendung des Systems für viele andere Anwendungen, da es schnell modifiziert werden kann.

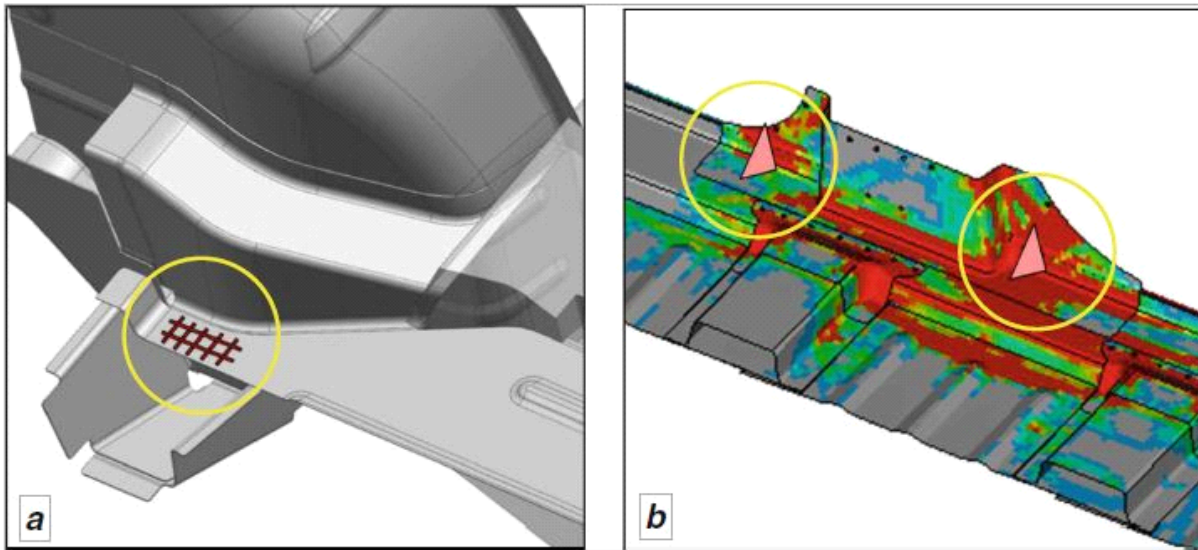


Bild 2: Mögliche Anwendungen der lichtbogenbasierten additiven Fertigung im Automobilbau: Schweißgitter (a), Knotenblech (b)

3 Versuchsdurchführung

3.1 Schweißprozess

Bei der Fertigung dreidimensionaler Komponenten wird ein Schweißverfahren mit niedrigem Energieeintrag benötigt. Standardverfahren können bei der geringen erforderlichen Schweißenergie instabil sein, und die Spritzerbildung kann ein Problem sein. In dieser Studie wurde ein fortschrittliches, wellenförmig gesteuertes Kurzlichtbogenschweißverfahren mit geringer Streckenenergie und sehr stabilem Lichtbogen ausgewählt und untersucht. Das Besondere an diesem Verfahren sind die bidirektionale Drahtbewegung während des Schweißens für eine bessere Tropfenablösung, nahezu keine Spritzerbildung und ein stabilerer Lichtbogen. In jedem Zyklus tritt eine Tropfenablösung auf. Die Drahtelektrode wird vorwärts geführt, bis die Spannung fast den Wert 0 erreicht (Kurzschluss). In diesem Moment geht der Tropfen in das Schmelzbad über. Der Kurzschluss wirkt als Auslöser, um den Draht auf definierte Weise rückwärts zu bewegen. Das Tröpfchen wird sauber abgelöst, was zu deutlich weniger Schweißspritzern führt. Der Draht wird weiter zurückgeführt, bis eine bestimmte (eingestellte) Lichtbogenlänge erreicht ist und der Zyklus wiederholt wird (Abb. 3).

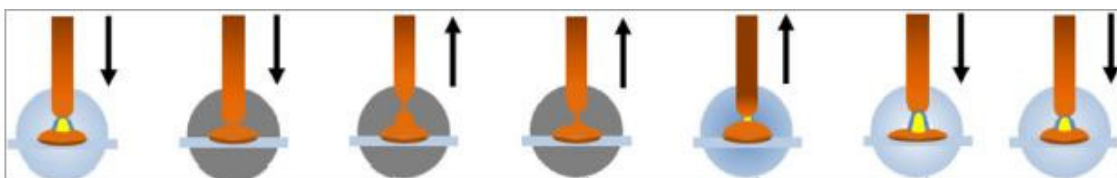


Bild 3: Ein Zyklus der Tropfenübergabe beim Schweißverfahren "MoTion Control Weld" [6]

Dies wird durch einen besonders leistungsstarken Motor (Abb. 4, „MoTion Drive“ in der Nähe des Schweißbrenners) realisiert, der die kleinen hochfrequenten Bewegungen des Drahtes ermöglicht. Infolgedessen können Lichtbogenbrenndauer und Wärmeenergie auf ein Minimum reduziert werden. Die „MoTion Control Unit“ (Abb. 4) dient als Drahtpuffer, aus dem der Drahtantrieb den Draht nach Bedarf ziehen und wieder einschieben kann. Als Schweißstromquelle wurde eine „CLOOS Qineo NexT“ verwendet (Abb. 4b, Tabelle 1). Diese experimentellen Schweißversuche wurden in zwei grundlegende Themen unterteilt. Das erste war, die prinzipielle Machbarkeit der Erzeugung eines Knotenblechs durch

additive Fertigung zur Verstärkung eines rechten Winkels geformter, dünner Stahlbleche auf Karosseriebereichen zu überprüfen. Das zweite Thema war, die Biegesteifigkeit der Bleche durch gitterförmig aufgetragenes Schweißgut zu erhöhen. Ein anschließender Biegetest wurde verwendet, um zu zeigen, ob und in welchem Ausmaß eine Festigkeitssteigerung erreicht werden konnte.

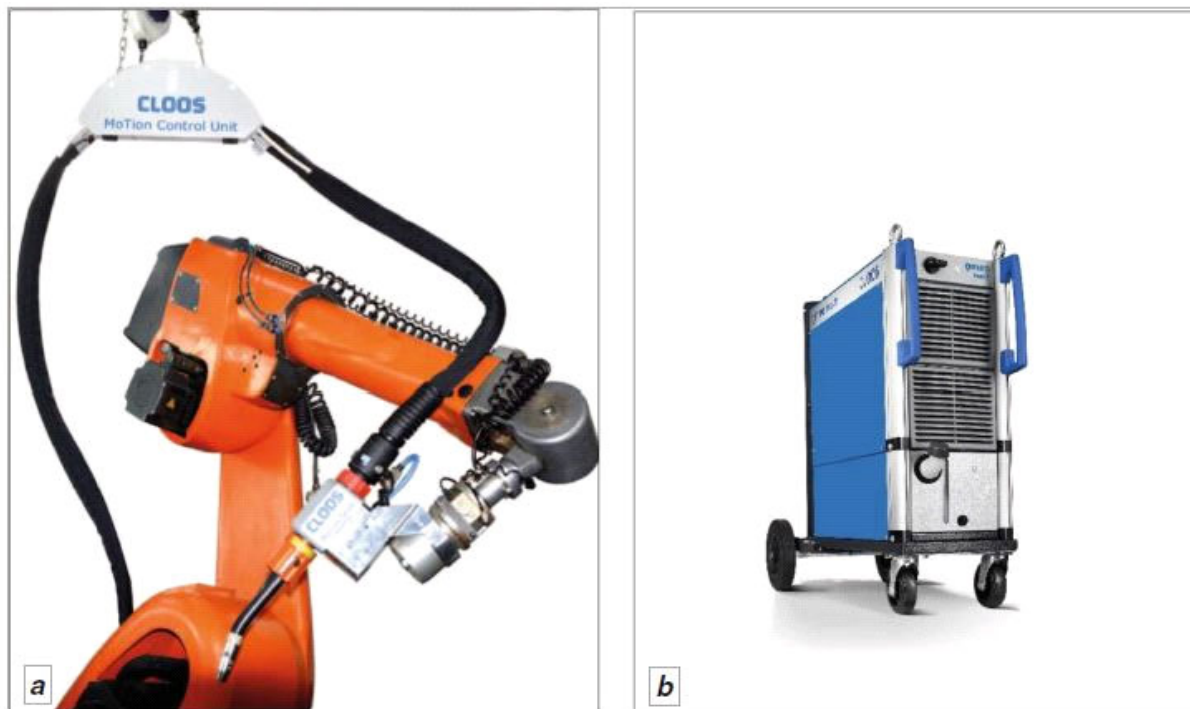


Bild 4: Hauptkomponenten des Schweißsystems mit bidirektionaler Drahtbewegung: "MoTion Control Unit" und "Motion Drive" (a) Schweißstromquelle "Qineo NexT" (b)

Tabelle 1 Details Schweißmaschine

Typ	Serialnr.	Schweißbereich	Leerlaufspannung
Qineo NexT 452	101	25 A/15 V–450 A/36.5 V	80 V
Einschaltdauer	40%	60%	100%
	450 A	450 A/36.5 V	350 A/31.5 V

3.2 Knotenblech

Vergangene Schweißversuche (Abb. 5a, b) an unbeschichteten und verzinkten Stahlblechen mit einer Dicke von 2 mm zeigten, dass das Schmelzschweißen Wannenlage und mit einer Pause von etwa 2 Sek. nach jeder Schweißnaht die besten Ergebnisse zu erzielen scheint. In diesen experimentellen Tests wurde festgestellt, dass das Umkehren der Schweißrichtung nach jeder Schweißraupe zu einem geringeren Verzug führte. Simulationen des Temperaturprofils zeigen, dass beim Mehrlagenschweißen die gleiche Schweißrichtung bei allen Schweißraupen zu einem wesentlich größeren Verzug führt als entgegengesetztes Schweißen [7]. Dies wurde daher auf die Karosserieteile angewendet. Die minimal erreichbare Raupenbreite hängt hauptsächlich vom Durchmesser der verwendeten Drahtelektrode ab. Der Drahtdurchmesser betrug 1,0 mm und die Dicke der Versteifungsstrebe (Knotenblech) betrug etwa 2,8 mm. Der Schweißstrom wurde mit zunehmender Anzahl von Schichten reduziert, so dass die Abkühlzeit gleich bleiben konnte. Dieses Verfahren wurde dann an Karosserieteilen getestet (Tabelle 2). Diese waren elektrolytisch oder feuerverzinkt und 0,7 mm dick.

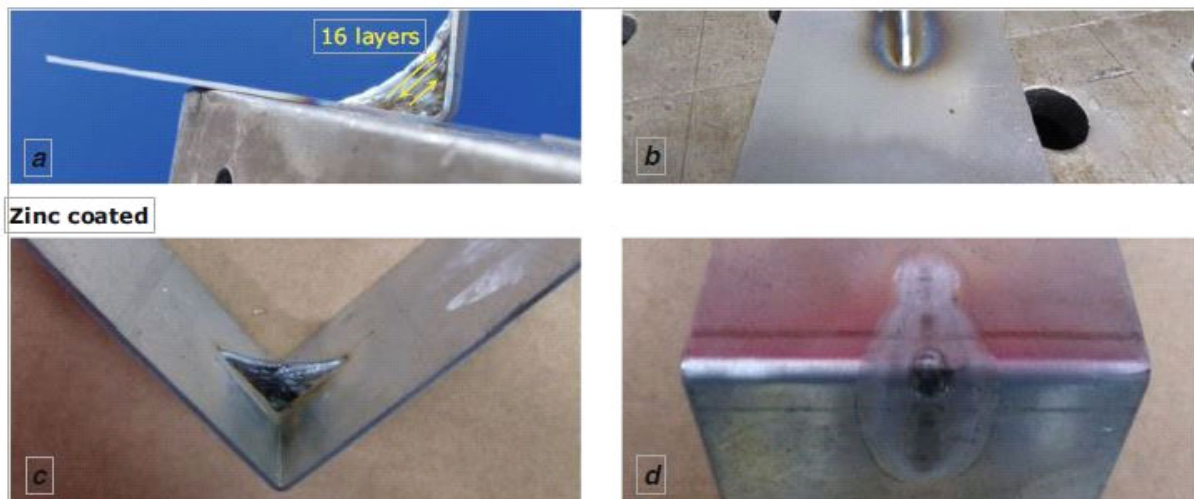
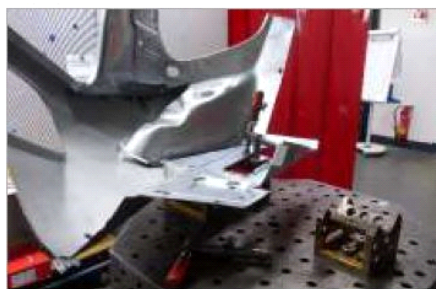


Bild 5: Schweißergebnisse der additiven Herstellung eines Knotenblechs auf Stahlblechen von 2 mm Dicke: unbeschichtet (a und b), verzinkt (c und d)

Tabelle 2 Versuchsanordnung und Parameter zum Schweißen eines Knotenblechs an Karosserieteilen



Lage Nr.	1-3	4-9
Schweißstrom	73 A	52 A
Spannung	12,1 V	11,6 V
Schweißgeschwindigkeit	80 cm/min	
Wärmeeintrag	53 J/mm	36 J/mm
Drahtvorschubgeschwindigkeit	1,2 m/min	1,5 m/min
Schutzgas	92 % Ar + 8 % CO ₂	
Zusatzwerkstoff	G3Si1, Ø 1,0 mm	
Grundwerkstoff	Stahl, elektrolytisch verzinkt 0,8	
Thermischer Wirkungsgrad		

3.3 Gitter

3.3.1 Schweißversuche an unbeschichteten Stahlblechen

Vorversuche an Stahlblechen mit einer Dicke von 2 mm zeigten, dass richtungswechselndes Schweißen in Wannenlage mit einer Pause von etwa 2 Sek. nach jeder Schweißnaht zu einem geringeren Verzug im Vergleich zum Schweißen in dieselbe Richtung führte. Nach einer Studie von A. Nickel [8] wird der Verzug auch maßgeblich von der Ausrichtung der Schweißnähte auf dem Blech beeinflusst. Das Erzeugen von Längsraupen führt zu einem stärkeren Verzug (Abb. 6) als Querraupen.

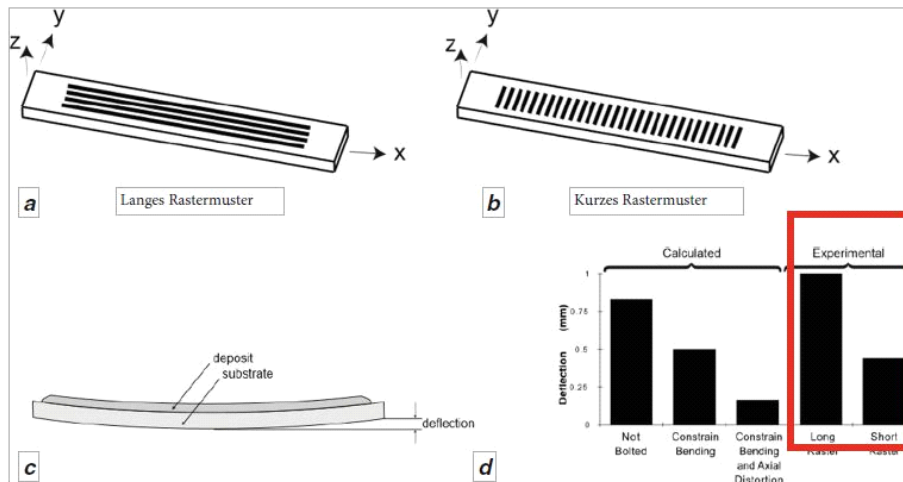


Bild 6: Ergebnisse einer Studie zur Formdeposition in Abhängigkeit von der Schweißrichtung [8]: langes Rastermuster (a), kurzes Rastermuster (b), Darstellung der Durchbiegung (c), experimentelle Durchbiegung von langem und kurzem Rastermuster (d)

Ein Biegeversuch gemäß VDA-238 wurde durchgeführt. Um die Ausrichtung des Gitters im Vergleich zur Biegeachse beurteilen zu können, wurden zusätzlich diagonale Gitter geschweißt. Es wurden drei Probentypen untersucht (Abb. 7): Basismaterial, orthogonales Gitter und diagonales Gitter. Der Abstand zwischen den einzelnen Schweißnähten wurde konstant gehalten. Um einwandfreien Einbrand an den Schnittpunkten zu erreichen, wurde die Schweißleistung für die zweiten Lagen höher gewählt. Die Schweißparameter sind in Tabelle 3 aufgeführt.

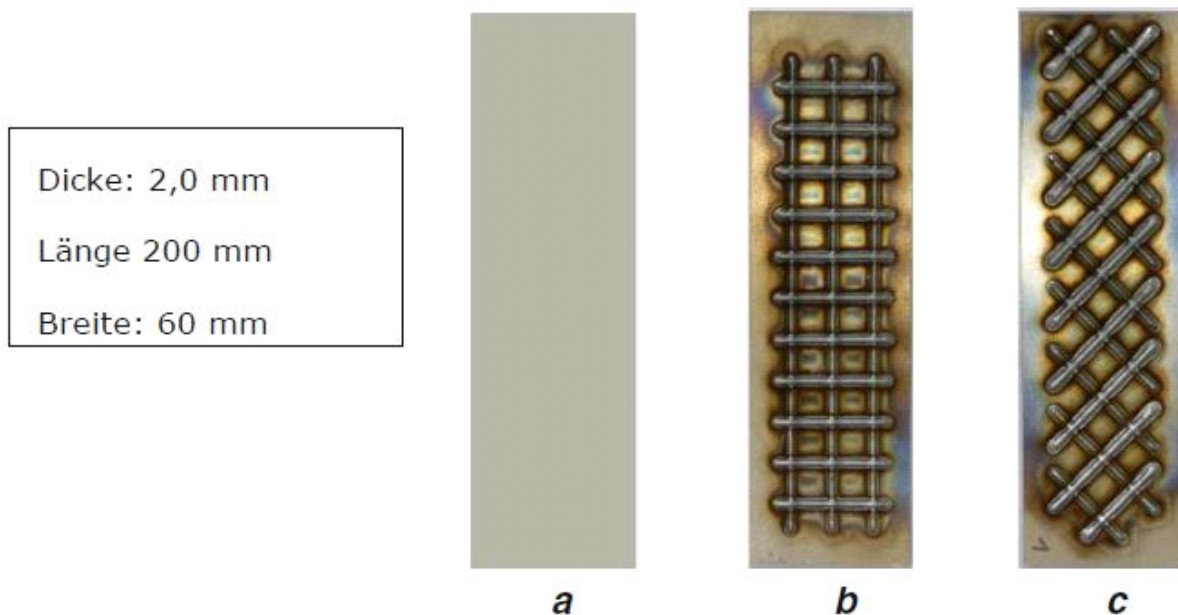


Bild 7: Drei Muster für den Biegeversuch: ohne Gitter (a), orthogonales Gitter (b), diagonales Gitter (c)

Tabelle 3 Parameter zum Schweißen eines Gitters auf unbeschichtete Stahlbleche

	Lange Raster	Kurze Raster
Schweißstrom	120 A	104 A
Spannung	13 V	16 V
Drahtvorschubgeschwindigkeit	4,1 m/min	3,4 m/min
Schweißgeschwindigkeit	150 cm/min	120 cm/min
Wärmeeintrag	50 J/mm	67 J/mm
Schutzgas	92 % Ar + 8 % CO ₂	
Zusatzwerkstoff	G3Si1, Ø 1.0 mm	
Grundwerkstoff	Steel	
Thermischer Wirkungsgrad	0,8	

3.3.2 Schweißversuche an verzinkten Stahlblechen

Um die Anwendbarkeit auf verzinkten Stahlblechen beurteilen zu können, wurde auch an diesen Werkstoffen geschweißt (Abb. 8). Die Querräupen wurden zuerst geschweißt.



Bild 8 a, b: Schweißergebnisse der additiven Herstellung eines Gitters auf verzinktem Stahlblech von 2 mm Dicke: Drei Muster für den Biegeversuch: ohne Gitter (a), orthogonales Gitter (b), diagonales Gitter (c)

3.3.3 Schweißversuche an verzinkten Karosserieteilen

Das Slicing der Modelle, wie man es von großen Bauteilen kennt, ist nicht erforderlich, nur die Schweißreihenfolge ist wichtig, damit sich die dünnen Karosserieteile nicht zu stark verformen. Darüber hinaus war keine komplizierte Programmierung erforderlich. Einfache Linien waren ausreichend. An den Karosserieteilen wurden zuerst die Längsräupen geschweißt. Die Parameter in Tabelle 4 wurden für das Schweißen an den Karosserieteilen eingestellt (Versuchsaufbau wie oben).

Tabelle 4 Parameter für das Schweißen eines Gitters auf Karosserieteile

	Lange Raster	Kurze Raster
Anzahl Schweißnähte pro Gitter	3	6
Schweißstrom	45 A	35 A
Spannung	15.3 V	14.6 V
Drahtvorschubgeschwindigkeit	1.0 m/min	0.7 m/min
Schweißgeschwindigkeit	100 cm/min	60 cm/min
Wärmeeintrag	33 J/mm	41 J/mm
Schutzgas	92% Ar + 8% CO ₂	
Zusatzwerkstoff	G3Si1, Ø 1.0 mm	
Grundwerkstoff	Steel, galvanized	
Thermischer Wirkungsgrad	0.8	

3.4 Biegetest

Die unbeschichteten Stahlbleche wurden in einem Dreipunkt-Biegeversuch nach VDA 238-100 untersucht. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 9 dargestellt.

Ein ebenes Blech wird zu einem abgewinkelten Blech gebogen, bis ein bestimmter Biegewinkel erreicht ist und die Biegekraft nach Erreichen des Maximums wieder abnimmt. Die maximal ertragbare Kraft stellt die Biegesteifigkeit dar.

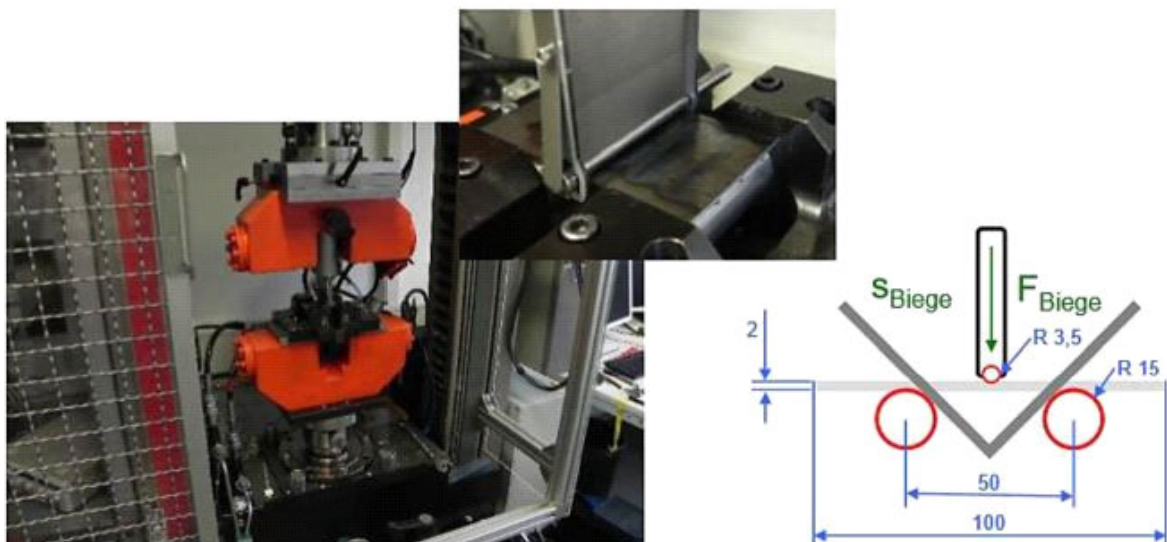


Bild 9: Versuchsaufbau Biegetest gemäß VDA-238 [9]

4 Ergebnisse

4.1 Knotenblech

Das Generieren eines Knotenblechs wurde auf verzinkten Karosserieteilen getestet (Abb. 10). Diese 0,7 mm dicken Bereiche waren entweder feuerverzinkt oder elektrolytisch verzinkt. Grundsätzlich ist es möglich, ein Knotenblech zu erzeugen. Die Schweißnähte sind optisch ansprechend. An der Rückseite des Knotenblechs (wo sich die Wurzel befindet) ist die Zinkbeschichtung aufgrund der hohen Streckenenergie in diesem kleinen Bereich beschädigt. Ein Verziehen der Blechwinkel beim Schweißen kann nur durch eine geeignete Spannvorrichtung verhindert werden. Für die Implementierung in der Automobilindustrie müssen die Aspekte der beschädigten Zinkbeschichtung und des möglichen Verzugs weiter untersucht werden.



Bild 10 a, b: Schweißergebnisse der additiven Herstellung eines Knotenblechs im Karosseriebereich von 0,7 mm Dicke

4.2 Gitter: unbeschichtete Stahlbleche

Zu Beginn der experimentellen Tests wurden Schweißversuche an blanken Stahlblechen mit einer Dicke von 2,0 mm durchgeführt, um herauszufinden, ob es möglich ist, über Schweißnähte hinweg zu schweißen und an den Schnittpunkten einen vollständigen Einbrand zu erreichen. Die Schweißnähte waren 2,5 mm breit und verengten sich an den Schnittpunkten auf etwa 0,8 mm (Abb. 11). Untersuchungen an Querschliffen (Abb. 12) zeigen im Allgemeinen einen guten Einbrand und eine gute Schichtstruktur. Außerdem ist an den Schnittpunkten zu erkennen, dass die erste Lage sehr gut wiederaufgeschmolzen wurde und keine besonders große Nahthöhe vorliegt. Ein Anlasseffekt, wie bei mehrlagigen Schweißnähten üblich, ist an den Schnittpunkten nicht deutlich sichtbar. Die Schweißleistung der zweiten Lage wurde bewusst höher gewählt, damit die Schnittpunkte korrekt verschweißt werden. Die Wärmeeinflusszone (WEZ) erstreckt sich deutlich bis zur Unterseite des Blechs, was auch bei den 0,7 mm dicken Karosserieteilen der Fall ist. Schlussendlich sind die Schweißnähte optisch ansprechend.

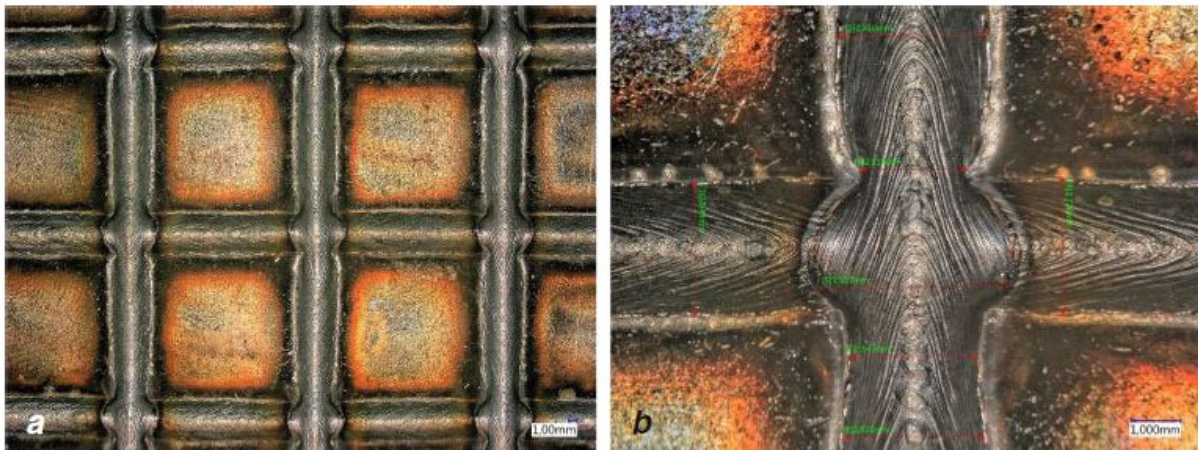


Bild 11: Schweißergebnisse der additiven Herstellung eines Gitters auf unbeschichteten Stahlblechen: Nahaufnahme eines Schweißgitters (a), Nahaufnahme eines Schnittpunktes (b)

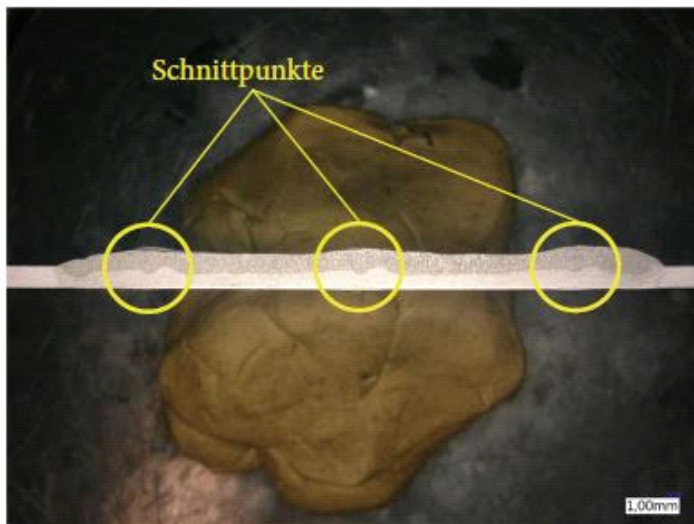


Bild 12: Makroschliff der Schweißergebnisse der additiven Herstellung eines Gitters auf unbeschichteten Stahlblechen

4.3 Biegetest

Wie in Tabelle 5 gezeigt, wurden insgesamt 7 verschiedene Untersuchungspunkte definiert. Das Ausgangsmaterial ohne Schweißnähte ist orange gekennzeichnet. Die orthogonalen Gitter wurden zwischen und auf den Schnittpunkten (schwarz und blau) untersucht. Die kleinen diagonalen Gitter wurden an einem oder zwei Schnittpunkten (grün und gelb) und die großen diagonalen Gitter auf zwei oder drei Schnittpunkten (rot und grau) untersucht. Die Biegetests der Gitterbleche zeigten eine deutlich erhöhte Biegesteifigkeit im Vergleich zum Ausgangsmaterial (Abb. 13). Die Biegekraft konnte um mindestens ca. 50 % (gelb) erhöht werden. Die maximale Erhöhung der Biegesteifigkeit betrug etwa 90 % (blau). Im Allgemeinen scheinen mehr Schnittpunkte zu einer höheren Biegesteifigkeit zu führen, wobei jedoch ein größeres Gitter nicht unbedingt die gleiche Steifigkeit erreicht. Die blaue Kurve zeigt an, dass die Steifigkeit erheblich von der Lastrichtung in Relation zur Gitterausrichtung abhängt. Dies sollte beim Entwurf/Design der Komponente berücksichtigt werden. In diesen Biegetests wurden keine Risse gefunden.

Tabelle 4 Parameter für das Schweißen eines Gitters auf Karosserieteile

	Lange Raster	Kurze Raster
Anzahl Schweißnähte pro Gitter	3	6
Schweißstrom	45 A	35 A
Spannung	15.3 V	14.6 V
Drahtvorschubgeschwindigkeit	1.0 m/min	0.7 m/min
Schweißgeschwindigkeit	100 cm/min	60 cm/min
Wärmeeintrag	33 J/mm	41 J/mm
Schutzgas	92% Ar + 8% CO ₂	
Zusatzwerkstoff	G3Si1, Ø 1.0 mm	
Grundwerkstoff	Steel, galvanized	
Thermischer Wirkungsgrad	0.8	

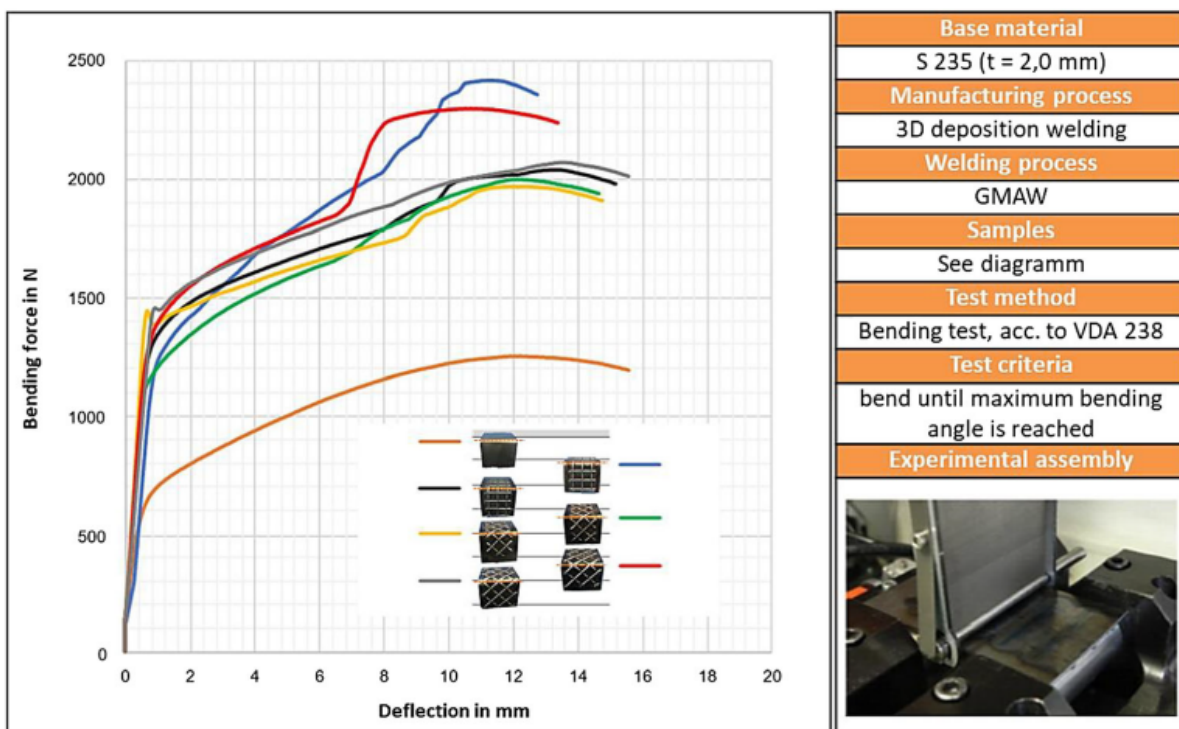


Bild 13: Biegeergebnisse der unbeschichteten Gitterblätter [9]

4.4 Gitter: verzinkte Karosserieteile

Die Erzeugung von Gittern aus Schweißgut wurde an Karosserieteilen getestet (Abb. 14). Diese 0,7 mm dicken Bereiche waren feuerverzinkt. Bei diesem Entwicklungsstand waren die Schweißnähte im Gegensatz zu den Auftragsschweißungen auf blanken Stahlblechen optisch nicht ansprechend. Auf der Rückseite der Teile wird die Zinkbeschichtung durch die hohe Streckenenergie (im Verhältnis zu den dünnen Teilen), die für einen guten Einbrand erforderlich ist, beschädigt. Der Verzug der Teile während des Schweißens kann nur durch eine geeignete Spannvorrichtung oder eine perfekt abgestimmte Schweißreihenfolge,

Schweißnahtlänge und entsprechende Parameter verhindert werden. Für die Implementierung in der Automobilindustrie müssen die Aspekte der beschädigten Zinkbeschichtung und des möglichen Verzugs untersucht und verhindert werden. Dies war nicht Gegenstand dieser Untersuchungen. Darüber hinaus ist es schwierig, genügend Energie einzubringen, um die Zinkbeschichtung auf der Vorderseite zu durchbrechen und einen guten Einbrand zu erreichen, während die Zinkbeschichtung auf der Rückseite unbeschädigt bleibt.

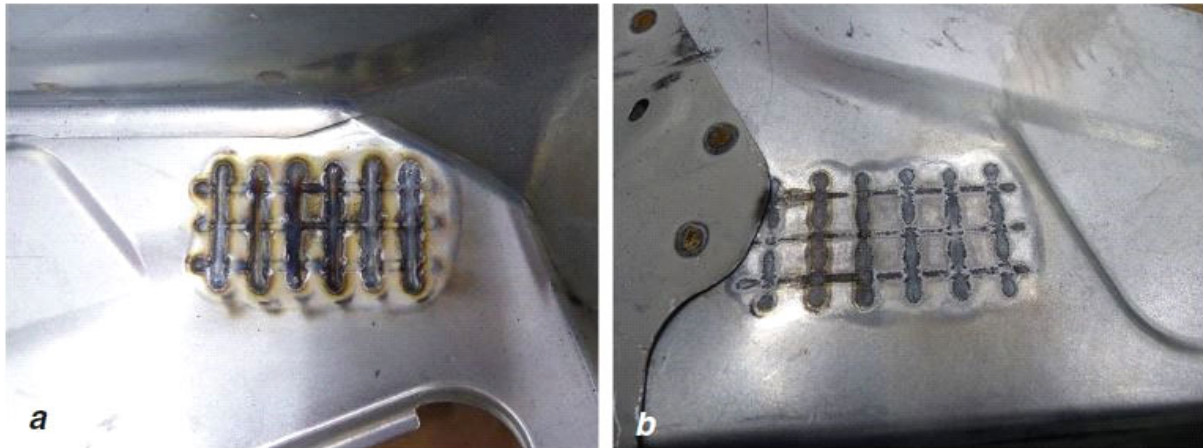


Bild 14: Schweißergebnisse der additiven Herstellung eines Gitters im Karosseriebereich von 0,7 mm Dicke: Schweißseite (a), Rückseite (b)

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das WAAM-Verfahren ist eine neue Technologie zur Erzeugung von 3D-Teilen. Das Hinzufügen von Schweißgut zu einem vorhandenen Bauteil wird häufig als Reparaturtechnik verwendet, kann jedoch auch zur Verbesserung der Funktionalität eines vorhandenen Designs eingesetzt werden. Es gibt viele Anwendungsbereiche, in denen diese Technologie vorteilhaft genutzt werden könnte. In der Automobilindustrie könnten beispielsweise fertigungstechnische Methoden überprüft werden. Als eine Anwendung könnte das WAAM zur Erzeugung lokaler Versteifungselemente verwendet werden, um kritische Karosserieteile zu verstärken. Einerseits können gezielt flache Oberflächen und auch komplex dimensionierte Bauteile durch einlagiges Schweißen (in Form eines Gitters, einer Beschriftung usw.) lokal versteift werden. Andererseits können kleine, effektive Versteifungsrippen unter Verwendung lokaler WAAM-Mehrlagennähte in die Karosseriekontur eingeschweißt werden. Der Vorteil dieser Lösung ist ihre hohe Flexibilität. Beim robotergeführten Schweißen können die Versteifungselemente zur Oberflächenversteifung oder für komplexe Strukturen in Form und Abmessungen frei programmiert und an die definierte Belastungssituation angepasst werden. Es ist möglich, einzelne Rippen oder komplexe Gitterstrukturen anzuschweißen. Dieses Verfahren soll die Biegesteifigkeit eines Bauteils auf einfache Weise und mit einer nur leichten Gewichtszunahme bzw. mit einem vergleichsweise geringeren Materialvolumen (und Gewicht) bei verringertem Ausgangsmaterialvolumen durch Versteifungselemente erhöhen. Gegenüber herkömmlichen Schweißverfahren bietet das spezielle WAAM-Verfahren enorme Vorteile beim Wärmemanagement. Die spezielle Steuerung stellt sicher, dass der Schweißprozess eine minimale Streckenenergie erfordert. Einerseits wird die Streckenenergie benötigt, um das Material auf der Lichtbogenseite zu schmelzen und eine Verbindung zur Schweißnaht herzustellen. Die Herausforderung besteht jedoch darin, so wenig Wärme wie möglich einzubringen, um eine Beschädigung der Zinkschicht und sichtbare Auswirkungen auf der Rückseite der Schweißnaht zu vermeiden, die zu unerwünschtem Aufwand hinsichtlich Nacharbeit führen würden. Darüber hinaus eignet

sich das Verfahren nicht nur für verzinkte Werkstoffe, sondern insbesondere für dünne Stahlbleche. Es ist möglich, diese Gitter nicht nur auf verzinkte Bleche, sondern auch auf dünne Karosserieteile zu schweißen. Bei dem derzeitigen Entwicklungsstand waren die Schweißnähte im Gegensatz zu den Auftragsschweißungen auf blanken Stahlblechen optisch nicht ansprechend. Für die Implementierung in der Automobilindustrie müssen die Aspekte der beschädigten Zinkbeschichtung und des möglichen Verzugs weiter untersucht werden.

Die in dieser Studie durchgeführten Biegetests an unbeschichteten Gitterblechen zeigen eine deutlich erhöhte Biegesteifigkeit von bis zu 90 % mehr Biegekraft im Vergleich zum Grundmaterial. Im Allgemeinen scheinen mehr Schnittpunkte zu einer höheren Biegesteifigkeit zu führen, ein größeres Gitter jedoch nicht zwangsläufig. Die Steifigkeit scheint von der Lastrichtung in Relation zur Gitterausrichtung abzuhängen. Dies sollte beim Entwurf der Komponente berücksichtigt werden. Bisher wurden in diesen Biegetests keine Risse gefunden. Mehr Lichtbogenleistung führt zu einer erhöhten Abschmelzleistung, und eine höhere Schweißgeschwindigkeit führt zu einer schmaleren WEZ. Obwohl eine höhere Abschmelzleistung mit mehr Lichtbogenleistung und höherer Schweißgeschwindigkeit erreicht werden kann, erhöht dies die Einbrandtiefe erheblich [10], was bei sehr dünnen Karosserieblechen kontraproduktiv sein kann, sobald die Einbrandtiefe höher als die Dicke des Blechs ist. Es gibt jedoch noch einige Aspekte, die genauer untersucht werden sollten, insbesondere um zu klären, inwieweit sich der Einfluss der veränderten Streckenenergie oder der Gitterformen auf den Verzug und das Versagensverhalten im Test der Bauteile auswirkt, z. B. aufgrund unterschiedlicher Grobkornanteile in der Mikrostruktur, insbesondere bei hochfesten Stählen für die Automobilindustrie. Dies ist noch nicht hinreichend bekannt. Trotz der beschriebenen Vorteile sind weitere Untersuchungen erforderlich, um aktuelle Anwendungen zu realisieren. Der Aspekt der Eigenspannungen muss ebenfalls untersucht werden, um die Sicherheit von geschweißten Produkten zu bewerten. Derzeit wird davon ausgegangen, dass die Kombination von Struktur- und Querschnittsänderungen zu einem optimalen Ergebnis führt. Dies bedeutet, dass weder die alleinige Anwendung eines Gitters noch der Strukturänderung allein zu diesen Ergebnissen führen würden. Das Rastermaß könnte ebenfalls wichtig sein. Die Erkenntnisse über die Anwendbarkeit dieser Produktionstechnologie können bereits bei der Konstruktion und Entwicklung komplexer Komponenten berücksichtigt und in die Methoden einbezogen werden.

Danksagung

Diese Untersuchungen sind Teil des Förderprojekts „Additive Fertigungsprozesse für komplexe Produkte in variantenreichen und hochfunktionalen Stahlbauweisen (StaVari)“, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Programms „Innovationen für Produktion, Dienstleistungen und Zukunftsarbeit“ finanziert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) unterstützt wird. Wir bedanken uns bei unseren Partnern im StaVari-Projekt, insbesondere bei der EDAG Engineering GmbH und der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH (SZMF), die uns bei der Durchführung der Untersuchungen maßgeblich unterstützt haben.

Offener Zugang

Dieser Artikel ist im Rahmen einer Creative-Commons-Attribution-4.0-International-Lizenz lizenziert, welche die Verwendung, Weitergabe, Anpassung, Verbreitung und Reproduktion in jedem Medium oder Format ermöglicht, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle entsprechend angeben, einen Link zur Creative-Commons-Lizenz bereitstellen und kennzeichnen, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die Bilder oder anderes Material von Drittanbietern in diesem Artikel sind in der Creative-Commons-Lizenz des Artikels enthalten, sofern nicht anders angegeben. Wenn das Material nicht in der Creative Commons-Lizenz des Artikels enthalten ist und Ihre beabsichtigte Verwendung nicht durch gesetzliche Bestimmungen zulässig ist oder die zulässige Verwendung überschreitet, müssen Sie die Genehmigung direkt vom Inhaber des Urheberrechts einholen. Eine Kopie dieser Lizenz finden Sie unter <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.