Diffusionsschweißen von Metallschäumen zur Anwendung in Latentwärmespeichern für fahrzeuggerechte Thermoelektrische Generatoren

Mirko Klein Altstedde^{1,*}, Thomas Gietzelt², Tim Martin¹, Volker Toth² und Raouf Jemmali³

Thermoelektrische Generatoren ermöglichen die Nutzung von Abgaswärme von Verbrennungsmotoren durch direkte Wandlung in elektrische Energie. An die Langzeitbeständigkeit der verwendeten Werkstoffe und Konstruktionen werden hohe Anforderungen gestellt und das wechselnde Wärmeangebot muss über geeignete Maßnahmen vereinheitlicht wer den, bpsw. durch latente Wärmespeichermaterialien. Ein System zur Aufnahme dieses Speichermaterials, für das offenpori ge Metallschäume unterschiedlicher Porenweite aus austenitischem Edelstahl als Stützstrukturen mittels Diffusionsschwei ßen mit Gehäusestrukturen gefügt wurden, wird vorgestellt.

Schlagwörter: Diffusionsschweißen, Energierückgewinnung, Heißgas, Metallschaum, Phasenwechselmaterial, Thermoelektrischer Generator

Diffusion Welding of Metal Foams for the Usage in Latent Energy Storage Systems of Thermoelectric Generators

Thermoelectric generators enable the use of waste heat of combustion engines by direct transformation into electric ener gy. High demands are made on long term stability of the used materials and constructions and the alternating heat flux has to be made consistent by suitable measures, e.g., by the use of phase change materials (PCMs). A system for incorpo rating this PCM, which consists of open pore metal foams of different pore sizes made by diffusion welding of austenitic stainless steel as a supporting structure, is presented. The assemblage of the foam with the housing is realized by diffusion bonding.

Keywords: Diffusion welding, Energy recuperation, Hot gas, Metal foam, Phase change material, Thermoelectric generator

1 Einleitung

Trotz zunehmender Elektrifizierung der Fahrzeugantriebe ist zu erwarten, dass verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge bzw. Hybride noch über Jahrzehnte die Haupt last im Personen und Güterverkehr tragen werden [1]. Dabei gewinnt deren Energieeffizienz gerade vor dem Hin tergrund steigender Primärenergiekosten sowie der notwen digen Reduktion des CO_2 Ausstoßes zunehmend an Bedeu tung. Zwar wurden in der Vergangenheit bereits beachtliche Erfolge erzielt, dennoch gehen nach wie vor ca. 2/3 der Kraftstoffenergie in Form von Wärme verloren. An dieser Stelle setzt die thermoelektrische Abwärmenutzung an [2]. Sie wandelt einen Teil der Verlustwärme in elektrische Ener gie. Diese kann direkt dem elektrischen Fahrzeugbordnetz zugeführt werden, was die Lichtmaschine des Verbren nungsmotors entlastet und somit indirekt den Kraftstoff nutzungsgrad erhöht bzw. die Schadstoffemission reduziert. Als Wärmequelle dient in dem hier beschriebenen Fall das Abgas des Verbrennungsmotors.

¹Mirko Klein Altstedde, Tim Martin

mirko.kleinaltstedde@dlr.de

- Deutsches Zentrum fur Luft und Raumfahrt (DLR), Institut fur Fahrzeugkonzepte, Pfaffenwaldring 38 40, 70569 Stuttgart, Deutschland.
- ²Dr. Thomas Gietzelt, Volker Toth
- Karlsruhe Institut fur Technologie, Campus Nord, Institut fur Mikroverfahrenstechnik, PF 3640, 76021 Karlsruhe, Deutschland. ³Raouf Jemmali
- Deutsches Zentrum fur Luft und Raumfahrt (DLR), Institut fur Bauweisen und Strukturtechnologie, Pfaffenwaldring 38 40, 70569 Stuttgart, Deutschland.

Zur technischen Anwendung dieser effizienzsteigernden Technologie wird ein Verbund aus speziellen Wärmeüber trägern und sogenannten thermoelektrischen Modulen (TEM) zu einem thermoelektrischen Generator (TEG) ver schaltet, der integriert in die Abgasanlage die direkte Wand lung von Wärme in elektrische Leistung ermöglicht. Unter Berücksichtigung fahrzeugseitiger Wechselwirkungen errei chen simulativ ausgelegte TEGs Spitzenleistungen von 400 W bei Wandlungswirkungsgraden um ca. 8 % [3]. Be rechnungen prognostizieren, dass durch die thermoelektri sche Energiewandlung bisher nicht genutzter Abwärme zu künftig bis zu 5 % Kraftstoff eingespart werden können [4].

Bisherige Hindernisse für die serientechnische Verwen dung thermoelektrischer Generatoren waren zum einen die mangelnde Verfügbarkeit langzeitstabiler, effizienter und kostengünstiger TEMs für den Einsatz bei hohen Tempera turen (T > 500 °C) wie auch Schwierigkeiten in der fahr zeuggerechten und gesamtsystemischen Auslegung der TEG Systeme. Beides äußerte sich in der Vergangenheit in zu geringen Systemwirkungsgraden bzw. zu hohen Kompo nentenkosten. Eine weitere Schwierigkeit ist der im Real fahrbetrieb stark wechselnde Abgaszustand, was zum einen bauteilschädigende thermomechanische Wechselbelastung hervorruft und zum anderen die wärmetechnische Ausle gung des TEG deutlich erschwert.

2 Thermoelektrische Energiewandlung bei transientem Wärmeangebot

Eine Herausforderung bei der TEG Auslegung ist das hoch transiente Wärmeangebot im Betrieb eines Kraftfahrzeugs. Bisherige TEGs wurden auf einen Designpoint ausgelegt, was bedeutet, dass die wärmeübertragende Struktur der Heißgaswärmeüberträger so ausgeführt wurde, dass bei genau einem stationären Betriebszustand die maximale Heißseitentemperatur der thermoelektrischen Module er reicht wird. Dies führt jedoch dazu, dass aus Gründen des Bauteilschutzes in Lastzuständen oberhalb des Designpoints ein Teil des Massenstroms über einen Bypass ungenutzt an dem TEG vorbeigeleitet wird und bei Lastzuständen unter halb des Designpoints nicht das maximale Temperaturpo tenzial des Abgases ausgenutzt werden kann. Konventionel le thermoelektrische Generatoren arbeiten also im realen Fahrbetrieb nur einen Bruchteil der Betriebszeit am optima len Betriebspunkt.

Eine attraktive Möglichkeit, das Wärmeangebot zu ver einheitlichen, besteht in der Integration von Phase Change Material (PCM) in den Schichtverbund des TEG. Hierdurch könnte bei nahezu konstantem Temperaturniveau Wärme aufgenommen und wieder abgegeben werden. Abb. 1 zeigt schematisch diese Integration. Oberstes Grafikelement ist der von Heißgas durchströmte Heißgaswärmeübertrager, thermisch kontaktiert mit der angrenzenden PCM Schicht. Die thermoelektrischen Wandlermodule sind als drittes Grafikelement von oben dargestellt und der wärmeab führende Kühlwasserwärmeüberträger als unterstes Grafik element.

Kommt es im Betrieb des TEG zu einem Überangebot an Wärme (hoher Lastpunkt des Verbrennungsmotors), kann diese im Phasenwechselmaterial zwischengespeichert wer den und in Fahrzuständen geringeren Wärmeangebots wie derum den TEMs zugeführt werden. Es kommt also zu einer Vereinheitlichung des Wärmeangebots und somit indirekt auch zu einer Reduktion der thermomechanischen Wechsellasten im TEG Verbund.

Als potenzielle Speichermaterialien für den Einsatz im Schichtverbund des TEG, sind metallische Legierungen auf Basis von Zink, Aluminium, Kupfer und Magnesium identi fiziert worden. Bedingt durch die im Vergleich zu anderen Materialklassen wie bspw. Salzen sehr hohe Wärmeleitfähig keit kann bei Verwendung von metallischem PCM (mPCM) eine gute thermische Leistungsfähigkeit der Wärmespei cherschicht erreicht werden.

Erste Simulationsrechnungen zeigen, dass durch die Integration von mPCM in den Schichtverbund des TEG die Energieausbeute während eines Prüfzyklus um bis zu 30 % gesteigert werden kann [5]. Hervorgerufen wird diese Stei gerung durch eine Reduktion des notwendigen Bypass Massenstroms und den Betrieb der TEM in ihrem idealen thermischen Funktionsbereich.

3 Anforderungen und Randbedingungen aus Systemsicht

Wie in Abschn. 2 beschrieben, findet die Integration der PCM Schicht in den Verbund des TEG zwischen Heißgas wärmeüberträger und den TEMs statt. In Abb. 2 ist dies schematisch dargestellt. Der Verbund aus Heißgaswärme überträger und PCM Schicht wird in diesem Fall stoff schlüssig ausgeführt und die TEMs sind mittels konstruktiver



Abbildung 1. Schematische Darstellung der Integration von Phase Change Material in den Schichtverbund eines thermoelektrischen Generators.



Abbildung 2. Schnittdarstellung von PCM Schicht und Warmeubertragerstruk tur.

Maßnahmen mechanisch verspannt. Diese Verspannung resultiert in einer Flächenpressung von minimal 0,5 MPa.

Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen sowie betriebsrelevanter Eigenschaften ergeben sich technische Anforderungen an den Verbund, die sich wie folgt unter teilen lassen.

3.1 Thermodynamische Anforderungen

Bedingt durch unterschiedliche Wärmeausdehnungen von Einhausung und mPCM sowie durch phasenwechselbeding te Volumenänderungen kann es im Betrieb des TEG zur Spaltbildung und daraus resultierenden Wärmewiderstän den kommen. Diese würden zum einen die thermische Leis tungsfähigkeit des Wärmespeichers reduzieren, zum ande ren könnten sie zu einem erhöhten Temperaturabfall über der PCM Schicht beitragen. Dieser Temperaturabfall hätte einen direkten negativen Einfluss auf den exergetischen Wirkungsgrad des TEG.

3.2 Mechanische Anforderungen

Thermoelektrische Wandlermodule sind meist stoffschlüssi ge Verbundkörper mit beidseitig elektrisch isolierenden Auflageflächen auf keramischer Basis. Sobald eine Uneben heit der PCM seitigen Auflageflächen vorliegt, besteht gro ße Gefahr der Schädigung bedingt durch die Flächenpres sung im Betrieb des TEG. Die Gewährleistung der Ebenheit und Planparallelität der Oberflächen 1 und 2 (auch über dem Phasenwechsel) ist also von großer Bedeutung für einen langzeitstabilen Betrieb des TEG.

3.3 Sicherheitstechnische Anforderungen

Für den Betrieb eines TEG mit integriertem Hochtempera tur Latentwärmespeicher ist es notwendig, das ungewollte Austreten des PCM zu verhindern. Speziell die Verwendung von Metalllegierungen als PCM stellt hier große Anforde rungen hinsichtlich diffusiver Wechselwirkungen der jewei ligen Materialpaarungen. Zur Erfüllung der gestellten Anforderungen wurde eine ausführliche Konzeptentwicklung, angelehnt an die VDI Richtlinie "VDI 2223 Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte" durchge führt. Ergebnis dieser Konzeptentwicklung ist die Verwendung eines offenporigen Metall schaums als PCM Trägermaterial (s. Abb. 3). Der Metallschaum soll hierbei stoffschlüssig an die wärmeeintragende und wärmeaustragende Fläche angebunden werden, wobei nach Möglich keit auf die Einbringung von Fügemitteln ver zichtet werden soll. Der abschließend mit mPCM

infiltrierte Metallschaum kann somit im Betrieb des TEG oben gestellte Anforderungen aus thermischer, mechanischer und sicherheitstechnischer Sicht bedienen. Im Folgenden werden erste experimentelle Untersuchungen zur Darstel lung des entwickelten Integrationskonzepts beschrieben.



Abbildung 3. Schematische Darstellung der stoffschlussigen Integration von offenporigem Metallschaum in die PCM Schich ten eines thermoelektrischen Generators.

4 Experimentelle Untersuchungen

4.1 Verwendete Materialien

Verwendet wurden zwei Metallschäume aus dem austeni tischen Edelstahl 1.4401, deren mittleren Maschengrößen 1,5 bzw. 3 mm betrugen. Hergestellt wurden die Metall schäume durch Beschichtung eines Polymerschaumes mit einer Metallpulversuspension. Nach Verdunstung des Trä germediums führen Polymerbestandteile zu einem festen Gerüst der Pulverpartikel. Anschließend kann der Schaum ausgebrannt und das Metallpulvergerüst zu einem stabilen Schaum versintert werden. Als Gehäuse kam Blech von 1 mm Dicke ebenfall aus austenitischem Edelstahl 1.4401 zum Einsatz.

4.2 Diffusionsschweißen

Diffusionsschweißen ist ein geeignetes Fügeverfahren, mit dem vollflächige, auch innenliegende Verbindungen herge stellt werden können. Dabei erfährt das gesamte Bauteil eine Wärmebehandlung, sodass keine lokal unterschiedliche Wärmeeinflusszone erkennbar ist. Es wird ohne Zusatz

werkstoff gefügt. Voraussetzungen sind eine sehr gute Sauberkeit der zu fügenden Teile sowie eine geringe Ober flächenrauheit ohne tiefe Kratzer, wenn die Verformung beim Diffusionsschweißen gering gehalten werden soll. Hauptparameter sind Fügetemperatur, Fügedauer und Flächenpressung, wobei stark nichtlineare Zusammenhänge hinsichtlich der resultierenden Verformung vorliegen. Zudem besteht ein gewisser Einfluss des jeweiligen Designs (effektive, durchgehende Fügefläche) bzw. des Aspektver hältnisses, da zwischen dem zu schweißenden Teil und den kraftaufbringenden Stempeln Reibung auftritt. Großen Ein fluss auf die Verformung bei sonst gleichen Parametern können auch die Korngröße sowie der Gittertyp haben [6]. Insbesondere bei Mikrostrukturen, bei denen die Abmes sungen im Bereich der Korngröße liegen, was auch bei den Stegen im Metallschaum zutrifft, muss mit einem domi nierenden Einfluss des Korngrenzengleitens als Verfor mungsmechanismus gerechnet werden.

Diffusionsschweißen erfolgt bei Fügetemperaturen um 80 % der Schmelztemperatur des Werkstoffs, berechnet in Kelvin. Notwendige Voraussetzung für eine Verbindungsbil dung ist eine ausreichende Beweglichkeit der Atome durch Wärmeschwingungen, um durch Diffusion eine stoffschlüs sige Verbindung über Fügeebenen herstellen zu können.

Je nach Literatur wird der Fügeprozess in mehrere Phasen unterteilt [7,8]. Die historische Modellentwicklung des Dif fusionsschweißens wird umfassend in [9] dargestellt. An fangs werden Rauheitsspitzen der Oberflächen eingeebnet. Dort setzt lokale Diffusion und Kornwachstum ein während zwischen den Kontaktstellen anfangs noch Poren verblei ben. Diese werden im Fortschritt durch Volumendiffusion geschlossen. Im Idealfall ist nach Abschluss des Fügeprozes ses die ehemalige Fügeebene nicht mehr erkennbar und es ist ein monolithischer Körper mit Kornwachstum über die Fügeebene entstanden.

4.2.1 Probenvorbereitung

Die Metallschäume wurde mittels Drahterodieren auf 9 mm Dicke bearbeitet. Die lateralen Abmessungen betru gen 60×60 mm². Um die Rückstände des Erodierdrahtes zu entfernen, insbesondere Zink, wurden die Schäume in 20%iger Salpetersäure für 1 h ultraschallgereinigt. Anschlie ßend wurden die Metallschaumstücke und die Bleche vor dem Diffusionsschweißen in mit Spülmittel versetztem Was ser im Ultraschall gereinigt, mit deionisiertem Wasser zwei fach gespült und zuletzt mit Ethanol 99,9 % gespült. Ab schließend erfolgte die Trocknung mit einem Heißluftfön.

Die untere Grenze der regelbaren Kraft der Diffusions schweißöfen beträgt ca. 5 % der Maximalkraft. Dies ent spricht bei dem kleinsten Diffusionsschweißofen mit 20 kN Maximalkraft etwa 1 kN. Aufgrund der unbekannten Stabi lität der Metallschäume bzw. da es nicht möglich war, eine effektive Fügefläche zu berechnen, wurde vermutet, dass eine konstante Belastung dieser Höhe eine zu große Defor mation bei der für austenitische Edelstähle typischerweise verwendeten Fügetemperatur von T = 1075 °C zur Folge haben würde. Daher wurden alle Diffusionsschweißver suche mit einer statischen Belastung mit Molybdän bzw. Tantalgewichten von 10 kg durchgeführt, was nur ca. 10 % der minimal regelbaren Kraft entspricht. Zusätzlich wurde ein Rahmen verwendet, der die max. mögliche Verformung auf 1 mm, entsprechend ca. 10 %, begrenzte (Abb. 4b). Die Verbindung des Metallschaumes mit dem Rahmen wurde vermieden, indem 0,3 mm dünne Tantalbleche an den Sei ten mittels Laser angeheftet wurden (Abb. 4a).



Abbildung 4. Rahmen um die Probe zur Begrenzung der mog lichen Verformung.

4.2.2 Diffusionsschweißprozess

Für das Diffusionsschweißen wurde ein Ofen der Firma MAYTEC verwendet. Es handelt sich um eine Sonderanfer tigung, die eine umgebaute Zugprüfmaschine, bei der der Kraftstrang mit einem elektrisch beheizbaren Ofen umman telt ist, darstellt. Die Stempel zur Kraftaufbringung besitzen eine vakuumdichte Durchführung in den Ofen. Die maxi male Fügekraft der Anlage beträgt 20 kN. Beheizt wird mit Metallheizern aus Molybdän. Die maximal mögliche Füge temperatur beträgt 1300 °C.

Zum Schutz der Heizer erfolgt der Fügeprozess aus schließlich unter Hochvakuum. Der Diffusionsschweißofen ist mit einem zweistufigen Pumpsystem ausgestattet, das aus einer Kombination von Drehscheiber und Turbopumpe besteht und ein Vakuum im Bereich von $10 \cdot 10^{-5}$ Pa ermög licht. Typischerweise wird nach Einbau der Proben und Eva kuierung des Rezipienten eine Vorkraft von 0,5 kN aufge bracht. Erst wenn ein Vakuum von $1 \cdot 10^{-5}$ mbar erreicht wird, startet der Heizvorgang mittels Widerstandsheizung. Er wird automatisch unterbrochen, falls durch Desorptions vorgänge der Druck über $8 \cdot 10^{-4}$ mbar ansteigt und fortge setzt, wenn wieder ein Vakuum von $6 \cdot 10^{-4}$ mbar erreicht wird. Steigt der Druck über $1 \cdot 10^{-3}$ mbar an, wird der Füge vorgang abgebrochen.

Für die Versuche wurde eine Fügedauer von 4 h zuzüglich einer gewissen Durchwärmezeit verwendet, siehe Abb. 5.

Da die Kraftaufbringung über Keramikrohre erfolgt, wird die Heizrate auf 10 K min⁻¹ beschränkt um zu große ther mische Spannungen, die zum Reißen der Rohre führen können, zu vermeiden. Da der Wärmeübergang im Hoch vakuum schlecht ist, wird nach Erreichen der Solltempera tur eine von der Größe der Bauteile abhängige Durchwärm



zeit abgewartet, bevor normalerweise die volle Fügekraft aufgebracht wird. Für kleine Teile sind 10 min ausreichend. Bei der Abkühlung unterschreitet die natürliche Abstrah lung ab ca. 700 °C die programmierte Temperaturrampe von 10 K min⁻¹ (s. Abb. 5).

Es wurden insgesamt drei Diffusionsschweißungen durchgeführt (Abb. 6, Tab. 1). Dazu wurden je eine ca. 9 mm dicke Scheibe Metallschaum mit je einem 1 mm dicken Blech aus 1.4401 oben und unten als Stapel in den massiven Rahmen eingelegt. Gemessen wurde die Gesamt dicke des Aufbaus vor und nach dem Diffusionsschweißen.

Im Fall der Schäume mit verschiedener Porengröße und erodierter Oberfläche wurden 10 kg als Belastung gewählt. Es wurde davon ausgegangen, dass die erodierte Oberfläche aufgrund der Entladungseffekte beim Erodiervorgang sehr zerklüftet ist und mehr Einebnung erfolgt. Zum Vergleich wurde in Versuch 3 die Oberfläche eines Schaumes mit 1,5 mm Porenweite beidseitig geläppt und anschließend erneut gereinigt um die späteren Kontaktflächen mit den Blechen bereits einzuebnen. Da in diesem Fall mit geringe rer Verformung gerechnet wurde, wurde die Belastung um 20 % auf 12 kg erhöht.

Erwartet wurde, dass die Verformung des kleinporigeren Schaumes geringer ausfallen würde. Es wurde angenom men, dass aufgrund von mehr Stegen pro Flächeneinheit Abbildung 5. a) *T t* Verlauf der Diffusionsschweißung des Schaums mit 1,5 mm Porenweite. Obere T Kurve: Thermoelemente der Ofen Widerstandsheizung, un tere T Kurve: Bauteil Ther moelemente. b) Vakuum verlauf uber der Zeit.



Abbildung 6. Blick in den Diffusionsschweißofen, Metall schaum mit 1,5 mm Porengroße, mit einem Gewicht von 10 kg.

die Stabilität größer wäre. Dies bewahrheitete sich nicht. Vielmehr war die Verformung in Versuch 2 mit 2,3 % größer als die in Versuch 1 mit dem 3 mm Schaum mit 1,6 % Ver formung. Allerdings ist festzustellen, dass die Verformung

Tabelle 1. U	Jbersicht uber	die durc	hgefuhrter	n Diffu	usionsscl	hweißversuche.
--------------	----------------	----------	------------	---------	-----------	----------------

Probe Nr.	Porengröße [mm]	Höhe vor Diffusions schweißung [mm]	Höhe nach Diffusions schweißung [mm]	Verformung [%]	Bemerkung
1	3	10,892	10,714	1,63	Last 10 kg, Schaum erodiert
2	1,5	10,991	10,662	2,28	Last 10 kg, Schaum erodiert
3	1,5	10,962	10,837	1,14	Last 12 kg, Schaum geläppt

generell recht gering ist. Möglicherweise sind auch Rand effekte und statistische Streuungen der Stegverteilungen auf grund der geringen Probengröße und der geringen Belastung mit verantwortlich für diesen Befund. In keinem Fall erfolgte eine Begrenzung der Verformung durch den massiven Rah men. Bei Probe 3 mit geläpptem Metallschaum war die resul tierende Verformung mit 1,14 % nochmals geringer als bei den Schäumen mit erodierter Oberfläche, wozu offenbar die bessere Anlage der Stegquerschnitte an den Blechen beiträgt. Selbst eine 20 % höhere Belastung konnte diesen Effekt nicht kompensieren. Dies unterstreicht den Optimierungs bedarf beim Diffusionsschweißen hinsichtlich eines Einsat zes in der Serienfertigung. Alle Verbunde wiesen bei einem ersten Test jedoch ausreichende mechanische Festigkeit auf, weshalb metallografische Schliffe angefertigt wurden.

4.3 Metallografische Untersuchung

Abb. 7a zeigt deutlich die zerklüftetere Oberfläche des ero dierten Schaums. Im Fall des geläppten Schaums (Abb. 7b) sind ebene Stegflächen erkennbar. Ebenfalls gut sichtbar ist, dass die Stege selbst, bedingt durch den Herstellungspro zess, teilweise hohl sind.

Der Nachteil metallografischer Querschliffe der Proben be steht darin, dass je nach Schliffebene nur ein punktueller Be fund der Verbindungsqualität möglich ist. Beim Ätzen wur den Metallschaum und Blech unterschiedlich angegriffen.

In Abb. 8 ist ein Hohlraum eines Steges erkennbar. Durch den relativ hohen Kohlenstoffanteil kommt es während des



Abbildung 7. Gegenuberstellung von a) erodiertem Schaum und b) gelappter Oberflache, Porenweite je 1,5 mm.



Abbildung 8. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen eines Querschliffs an Metallschaumproben mit 1,5 mm Porenweite.

Abkühlprozesses unterhalb von 800 °C zu einer Ausschei dung von Chromkarbiden, die auf den REM Bildern als weiße Punkte zu erkennen sind. Es sind ausreichend viele stoffschlüssige Kontaktstellen zwischen dem Metallschaum und den Deckelblechen feststellbar, die eine hinreichende mechanische Festigkeit des Verbundes gewährleisten, wenngleich die Fügequalität noch weiter optimiert werden könnte.

4.4 Charakterisierung mittels Röntgen-Mikrofokus-Computertomographie

Für die Untersuchung der Schweißqualität in den metalli schen Sandwichstrukturen eignet sich die Röntgen Mikro fokus Computertomographie (μ CT), da dieses Verfahren zerstörungsfrei, kontaktlos, relativ schnell und vor allem 3D bildgebend ist. Die CT Analysen wurden am DLR Stutt gart mit der Anlage v | tome | x L (GE Sensing & Inspection Technologies GmbH) durchgeführt, deren Aufbau in Abb. 9 schematisch dargestellt ist. Die verwendete Mikrofokus Röntgenquelle (Direktstrahler mit Wolfram Target) erreicht eine maximale Beschleunigungsspannung von 240 kV (max. Leistung 320 W). Der Bildempfänger ist ein 16 bit Flächen detektor (Matrix aus amorphem Silizium und Lanex Szintillator) und hat eine Größe von 2048×2048 Pixeln à 0,2 mm [10].

Die in einem Dreibackenfutter eingespannte Probe wurde während der CT Aufnahme um 360° in Schritten von 0,18° gedreht. Dabei wurde bei jedem Schritt ein Röntgenbild

> aufgenommen. Die Röntgenröhre wurde bei 210 kV und 120 μ A entsprechend einer Leistung von ca. 25 W betrieben und die Belichtungszeit des Detektors betrug 2000 ms. Eine Voxelgröße von 0,012 mm wurde erzielt. Die so aufgenom menen 2000 zweidimensionalen Durchstrah lungsbilder wurden mit einem speziellen Rekonstruktionsalgorithmus (bekannt als gefil terte Rückprojektion) zu einem 3D CT Volumen gerechnet. Das Ergebnis der CT Analyse ist exemplarisch anhand eines vereinzelten Proben teils der Probe Nr. 1 (Abmaße: 30 mm \times 30 mm \times 10 mm) in Form einer 3D Grauwertdarstellung visualisiert (Abb. 10).

> Im Weiteren wurden von dem erzeugten CT Datensatz Bilderstapel entlang der z Richtung erstellt (s. Abb. 11a). In jedem Schnittbild wurde der Materialflächenanteil berechnet. Hierfür wurde das Bild in zwei Phasen separiert: Mate rial und Luft. Dieser wichtige Schritt wird als Binarisierung oder Segmentierung bezeichnet. Es wurde der bedienerunabhängige Schwell wertalgorithmus nach Otsu verwendet [11]. Abb. 11b zeigt für die Probe Nr. 1 exemplarisch den Verlauf des Flächenmaterialanteils zwischen den zwei Deckschichten in z Richtung.



Abbildung 9. Schematischer Aufbau der verwendeten CT Ausrustung.



Abbildung 10. Gerendertes 3D CT Bild eines vereinzelten Pro benteils der Probe Nr. 1 in Grauwertdarstellung.

Wie zu erwarten war, ist zu erkennen, dass bedingt durch die ungleichmäßige Struktur des offenporigen Metall schaums und die vergleichsweise große Porenweite, der Materialflächenanteil über der Schichtdicke (z Richtung) variiert. Auffällig ist jedoch ein Abfall der Materialflächen anteile an den Kontaktflächen zwischen Schaum und den beidseitig verschweißten Metallblechen auf Werte von 7 % (links) bzw. 7,2 % (rechts). Dieser Abfall deutet auf eine

nicht vollständige Flächenfügung zwi schen Schaum und Metallblech hin, da bei flächigem Stoffschluss ein direkter Übergang von Materialflächenanteil Metallschaum zum Vollmaterial (100%) des Einhausungsmaterials zu erwarten gewesen wäre. Im Vergleich mit den metallurgischen Schliffbildern (s. Abb. 8) bestätigt sich diese Annahme. Es ist zu erkennen, dass nicht der gesamte Steg stoffschlüssig mit dem Grundmaterial verbunden ist, sondern nur eine punk tuelle stoffschlüssige Fügung stattgefun den hat. Nach quantitativer Auswertung dieser CT Analyse lässt sich somit eine flächenspezifische Fügequalität von ca. 80 % abschätzen.

5 Diskussion und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass sich mittels Diffusionsschwei ßen innere Stützstrukturen in Wärmespeichersysteme, zur Abwärmenutzung von Verbrennungsmotoren, integrieren lassen. Insbesondere die Erzeugung innenliegender Verbin dungen ist mit keinem anderen Schweißverfahren erreichbar. Im Gegensatz zum Löten kann auf artfremde Werkstoffe, die unter Umständen ein Problem mit Flüssigmetallkorrosion und Langzeitstabilität verursachen, verzichtet werden. Au ßerdem konnte im Rahmen der Untersuchungen gezeigt werden, dass die µCT Analyse ein attraktives Verfahren zur zerstörungsfreien und schnellen Analyse optisch nicht direkt zugänglicher Fügestellen darstellt. Speziell die bei Beurtei lung gefügter offenporiger Metallschäume auftretenden Schwierigkeiten, bedingt durch eine ungleichmäßige Steg geometrie und Stegverteilung, konnten mittels digitaler Schnittbilderstellung und Berechnung der Fügeflächenantei le umgangen werden. Abschließend konnte exemplarisch eine flächenspezifische Fügequalität quantifiziert werden.

Zugleich ist aus den oben genannten Befunden ersicht lich, dass für das Diffusionsschweißen hinsichtlich einer Massenfertigung noch Optimierungsbedarf besteht. Ins



Abbildung 11. Bewertung der Schweißqualitat mittels hochaufgeloster μ CT. a) Verlauf der Material flachenanteile (logarith mische Darstellung) in z Richtung, b) 2D CT Schnittbild. besondere eine etwas größere Verformung könnte toleriert werden und zu besseren Anbindungsergebnissen führen, wobei die innere, teils hohle Struktur der Metallschaum stege nicht vernachlässigt werden darf.

Zu untersuchen wäre ferner die Herstellung deutlich größerer Fügeflächen bzw. Stapel vieler Bauteillagen, um zukünftig die hohen Verfahrenskosten senken zu können. Ebenfalls sollte anstelle der statischen Belastung eine Belas tung mittels Kraftsteuerung erfolgen.

Um das Ergebnis der Anbindung zu den Blechen zu ver bessern, könnten amorphe Folien auf Eisen oder Nickel basis verwendet werden, die eine temporäre flüssige Phase ausbilden. Somit würde während der Diffusionsschweißung ein erheblich höherer Diffusionskoeffizient vorliegen, ohne dass anschließend eine zweite Phase, die die Korrosions beständigkeit mindern würde, auftritt.

Besonderer Dank gilt dem Institut für Mikroverfahrens technik des Karlsruher Instituts für Technologie, für die Durchführung der Diffusionsschweißversuche, sowie der Probenpräparation und Schliffbilderstellung.

Literatur

- B. Propfe, D. Luca de Tena, *The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS 25)*, Shenzhen, November 2010.
- [2] H. E. Friedrich, M. Schier, C. Häfele, T. Weiler, ATZ, Automobil tech. Z. 2010, 112 (4), 292.
- [3] M. Kober, L. Heber, J. Heuer, F. Rinderknecht, J. König, H. E. Friedrich, *RExTEG Neuartiger Thermoelektrischer Generator zur Steigerung der Effizienz von Range Extender Fahrzeugen*, Projekt bericht, Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, Stuttgart 2015. http://elib.dlr.de/98080/
- [4] Thermoelektrik: Strom aus Abwärme, Themeninfo I/2016, BINE Informationsdienst, Bonn 2016.
- [5] M. Klein Altstedde, F. Rinderknecht, H. E. Friedrich, J. Electron. Mater. 2014, 43 (6), 2134 2140. DOI: 10.1007/s11664 014 2990 z
- [6] H. J. Frost, M. F. Ashby, *Deformation Mechanism Maps*, Pergamon Press, Oxford 1982.
- [7] M. W. Mahoney, C. C. Bampton, in *Welding, Brazing, and Soldering*, ASM Handbook, Bd. 6, ASM International, Materials Park, OH **1995**, 156 159.
- [8] N. F. Kazakov, in *Diffusion Bonding of Materials* (Ed: N. F. Kaza kov), Mir Publishers, Moskau 1985, Kap. 2.
- [9] S. Jahn, Technologieentwicklung zur Herstellung variantenreicher innenstrukturierter Bauteile und Werkzeuge, 1. Aufl., Verlag Mainz, Aachen 2007, 38.
- [10] R. Jemmali, Quantitative Bewertung von Verbundwerkstoffen auf der Basis von tomographischen Bildern, BT Institutsvortrag, Stuttgart 2015.
- [11] N. Otsu, IEEE Trans. Syst. Man Cybern. 1979, 9 (1), 62 66.





Repository KITopen

Dies ist ein Postprint/begutachtetes Manuskript.

Empfohlene Zitierung:

Klein Altstedde, M.; Gietzelt, T.; Martin, T.; Toth, V.; Jemmali, R. <u>Diffusionsschweißen von Metallschäumen aus austenischem Edelstahl zur Abwärmenutzung</u> <u>mittels Wärmetauschern</u>. 2016. Chemie - Ingenieur - Technik. doi: 10.5445/IR/1000064924

Zitierung der Originalveröffentlichung:

Klein Altstedde, M.; Gietzelt, T.; Martin, T.; Toth, V.; Jemmali, R. <u>Diffusionsschweißen von Metallschäumen aus austenischem Edelstahl zur Abwärmenutzung</u> <u>mittels Wärmetauschern</u>. 2016. Chemie - Ingenieur - Technik. doi:10.1002/cite.201600011

Lizenzinformationen: KITopen-Lizenz