

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 werden, bpsw. durch latente Wärmespeichermaterialien. Ein System zur Aufnahme dieses Speichermaterials, für das offene Metallschäume unterschiedlicher Porenweite aus austenitischem Edelstahl als Stützstrukturen mittels Diffusionsschweißen 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 energy. 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 incorporating 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 Hauptlast im Personen und Güterverkehr tragen werden [1]. Dabei gewinnt deren Energieeffizienz gerade vor dem Hintergrund steigender Primärenergiekosten sowie der notwendigen Reduktion des CO₂ Ausstoßes zunehmend an Bedeutung. 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 Energie. Diese kann direkt dem elektrischen Fahrzeugbordnetz zugeführt werden, was die Lichtmaschine des Verbren-

nungsmotors entlastet und somit indirekt den Kraftstoffnutzungsgrad 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 für Luft und Raumfahrt (DLR), Institut für Fahrzeugkonzepte, Pfaffenwaldring 38 40, 70569 Stuttgart, Deutschland.

²Dr. Thomas Gietzelt, Volker Toth

Karlsruhe Institut für Technologie, Campus Nord, Institut für Mikroverfahrenstechnik, PF 3640, 76021 Karlsruhe, Deutschland.

³Raouf Jemmali

Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR), Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie, Pfaffenwaldring 38 40, 70569 Stuttgart, Deutschland.

Zur technischen Anwendung dieser effizienzsteigernden Technologie wird ein Verbund aus speziellen Wärmeüberträgern und sogenannten thermoelektrischen Modulen (TEM) zu einem thermoelektrischen Generator (TEG) verschaltet, der integriert in die Abgasanlage die direkte Wandlung von Wärme in elektrische Leistung ermöglicht. Unter Berücksichtigung fahrzeugeitiger Wechselwirkungen erreichen simulativ ausgelegte TEGs Spitzenleistungen von 400 W bei Wandlungswirkungsgraden um ca. 8 % [3]. Berechnungen prognostizieren, dass durch die thermoelektrische Energiewandlung bisher nicht genutzter Abwärme zu künftig bis zu 5 % Kraftstoff eingespart werden können [4].

Bisherige Hindernisse für die serientechnische Verwendung thermoelektrischer Generatoren waren zum einen die mangelnde Verfügbarkeit langzeitstabiler, effizienter und kostengünstiger TEMs für den Einsatz bei hohen Temperaturen ($T > 500\text{ °C}$) wie auch Schwierigkeiten in der fahrzeuggerechten und gesamtsystemischen Auslegung der TEG Systeme. Beides äußerte sich in der Vergangenheit in zu geringen Systemwirkungsgraden bzw. zu hohen Komponentenkosten. Eine weitere Schwierigkeit ist der im Realfahrbetrieb stark wechselnde Abgaszustand, was zum einen bauteilschädigende thermomechanische Wechselbelastung hervorruft und zum anderen die wärmetechnische Auslegung des TEG deutlich erschwert.

2 Thermoelektrische Energiewandlung bei transientem Wärmeangebot

Eine Herausforderung bei der TEG Auslegung ist das hochtransiente 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 erreicht 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 unterhalb des Designpoints nicht das maximale Temperaturpotenzial des Abgases ausgenutzt werden kann. Konventionelle thermoelektrische Generatoren arbeiten also im realen Fahrbetrieb nur einen Bruchteil der Betriebszeit am optimalen Betriebspunkt.

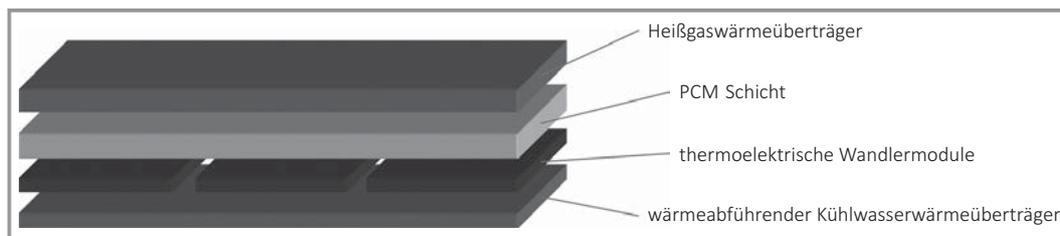


Abbildung 1. Schematische Darstellung der Integration von Phase Change Material in den Schichtverbund eines thermoelektrischen Generators.

Eine attraktive Möglichkeit, das Wärmeangebot zu vereinheitlichen, 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 Heißgaswärmeüberträger, thermisch kontaktiert mit der angrenzenden PCM Schicht. Die thermoelektrischen Wandlermodule sind als drittes Grafikelement von oben dargestellt und der wärmeabführende Kühlwasserwärmeüberträger als unterstes Grafikelement.

Kommt es im Betrieb des TEG zu einem Überangebot an Wärme (hoher Lastpunkt des Verbrennungsmotors), kann diese im Phasenwechselmaterial zwischengespeichert werden und in Fahrzuständen geringeren Wärmeangebots wieder dem TEGs 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 identifiziert worden. Bedingt durch die im Vergleich zu anderen Materialklassen wie bspw. Salzen sehr hohe Wärmeleitfähigkeit kann bei Verwendung von metallischem PCM (mPCM) eine gute thermische Leistungsfähigkeit der Wärmespeicherschicht 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]. Hervorgehoben wird diese Steigerung 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 Heißgaswärmeüberträger und den TEMs statt. In Abb.2 ist dies schematisch dargestellt. Der Verbund aus Heißgaswärmeüberträger und PCM Schicht wird in diesem Fall stoffschlüssig ausgeführt und die TEMs sind mittels konstruktiver

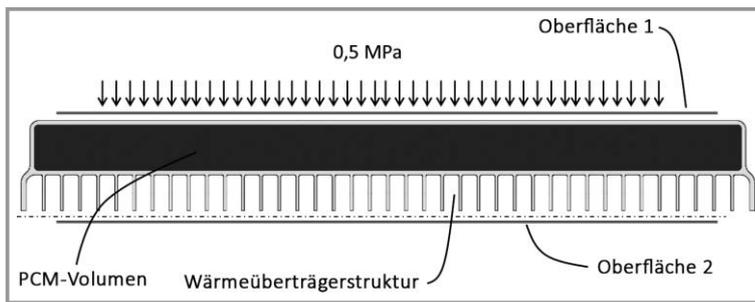


Abbildung 2. Schnittdarstellung von PCM Schicht und Wärmeübertragerstruktur.

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 unterteilen lassen.

3.1 Thermodynamische Anforderungen

Bedingt durch unterschiedliche Wärmeausdehnungen von Einhausung und mPCM sowie durch phasenwechselbedingte Volumenänderungen kann es im Betrieb des TEG zur Spaltbildung und daraus resultierenden Wärmewiderständen kommen. Diese würden zum einen die thermische Leistungsfähigkeit des Wärmespeichers reduzieren, zum anderen 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 stoffschlüssige Verbundkörper mit beidseitig elektrisch isolierenden Auflageflächen auf keramischer Basis. Sobald eine Unebenheit der PCM seitigen Auflageflächen vorliegt, besteht große Gefahr der Schädigung bedingt durch die Flächenpressung 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 Hochtemperatur Latentwärmespeicher ist es notwendig, das ungewollte Austreten des PCM zu verhindern. Speziell die Verwendung von Metalllegierungen als PCM stellt hier große Anforderungen hinsichtlich diffusiver Wechselwirkungen der jeweiligen 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“ durchgeführt. Ergebnis dieser Konzeptentwicklung ist die Verwendung eines offenporigen Metallschaums als PCM Trägermaterial (s. Abb. 3). Der Metallschaum soll hierbei stoffschlüssig an die wärmeeintragende und wärmeausstragende Fläche angebunden werden, wobei nach Möglichkeit auf die Einbringung von Fugemitteln verzichtet 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 Darstellung des entwickelten Integrationskonzepts beschrieben.

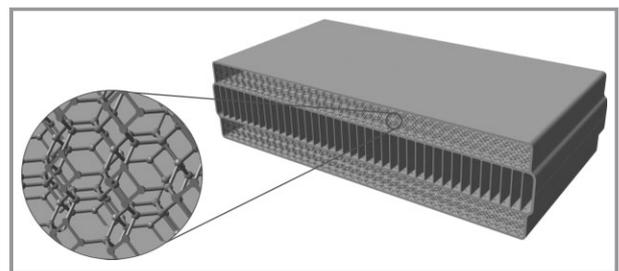


Abbildung 3. Schematische Darstellung der stoffschlüssigen Integration von offenporigem Metallschaum in die PCM Schicht eines thermoelektrischen Generators.

4 Experimentelle Untersuchungen

4.1 Verwendete Materialien

Verwendet wurden zwei Metallschäume aus dem austenitischen Edelstahl 1.4401, deren mittleren Maschengrößen 1,5 bzw. 3 mm betragen. Hergestellt wurden die Metallschäume durch Beschichtung eines Polymerschaumes mit einer Metallpulversuspension. Nach Verdunstung des Trägermediums 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 ebenfalls aus austenitischem Edelstahl 1.4401 zum Einsatz.

4.2 Diffusionsschweißen

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

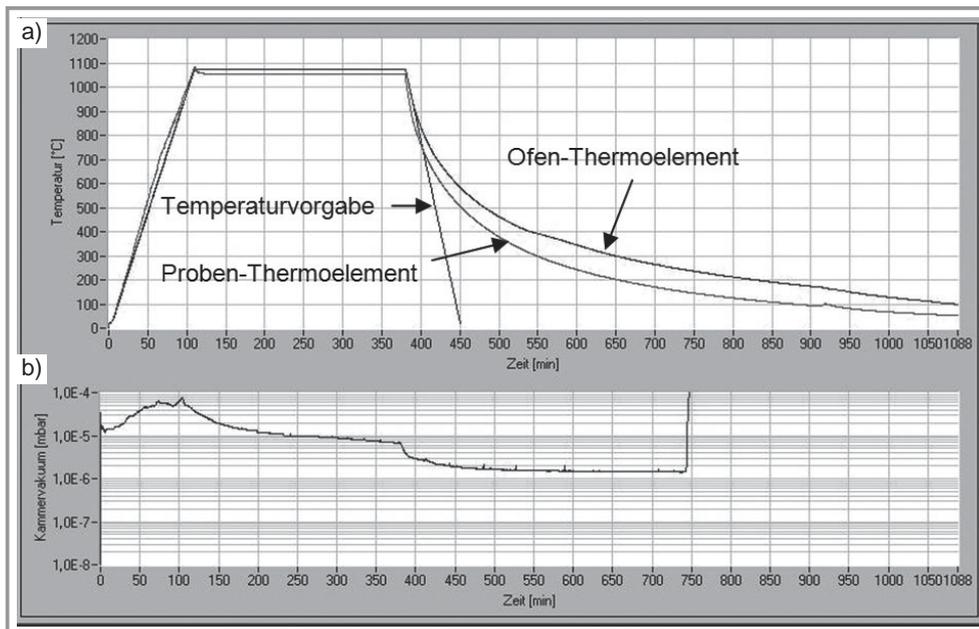


Abbildung 5. a) $T-t$ Verlauf der Diffusionsschweißung des Schaums mit 1,5 mm Porenweite. Obere T Kurve: Thermoelemente der Ofen Widerstandsheizung, untere T Kurve: Bauteil Thermoelemente. b) Vakuumverlauf über der Zeit.

zeit abgewartet, bevor normalerweise die volle Fügekraft aufgebracht wird. Für kleine Teile sind 10 min ausreichend. Bei der Abkühlung unterschreitet die natürliche Abstrahlung 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 Gesamtdicke 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 geringerer 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 angenommen, dass aufgrund von mehr Stegen pro Flächeneinheit

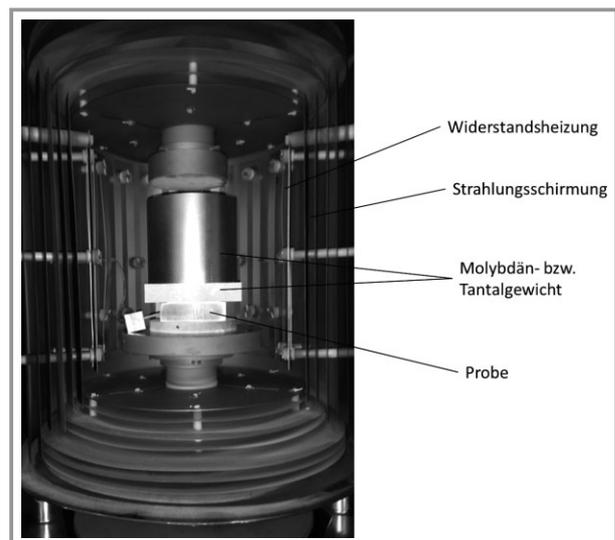


Abbildung 6. Blick in den Diffusionsschweißofen, Metallschaum mit 1,5 mm Porengröße, mit einem Gewicht von 10 kg.

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 % Verformung. Allerdings ist festzustellen, dass die Verformung

Tabelle 1. Übersicht über die durchgeführten Diffusionsschweißversuche.

Probe Nr.	Porengröße [mm]	Höhe vor Diffusionsschweißung [mm]	Höhe nach Diffusionsschweißung [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 Randeffekte und statistische Streuungen der Stegverteilungen aufgrund der geringen Probengröße und der geringen Belastung mit verantwortlich für diesen Befund. In keinem Fall erfolgte eine Begrenzung der Verformung durch den massiven Rahmen. Bei Probe 3 mit geläpptem Metallschaum war die resultierende 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 Optimierungsbedarf beim Diffusionsschweißen hinsichtlich eines Einsatzes in der Serienfertigung. Alle Verbunde wiesen bei einem ersten Test jedoch ausreichende mechanische Festigkeit auf, weshalb metallografische Schlitze angefertigt wurden.

4.3 Metallografische Untersuchung

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

Der Nachteil metallografischer Querschnitte der Proben besteht darin, dass je nach Schlitzebene nur ein punktueller Befund der Verbindungsqualität möglich ist. Beim Ätzen wurden der Metallschaum und Blech unterschiedlich angegriffen.

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

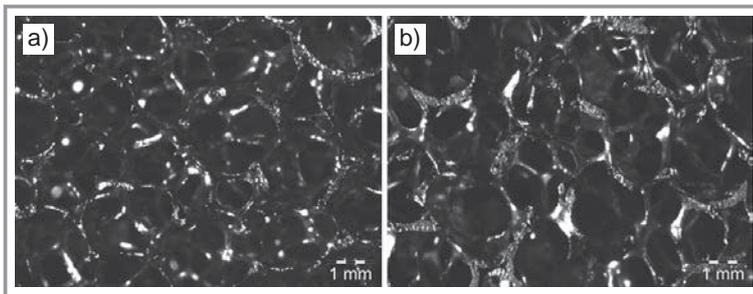


Abbildung 7. Gegenüberstellung von a) erodiertem Schaum und b) geläppter Oberfläche, Porenweite je 1,5 mm.

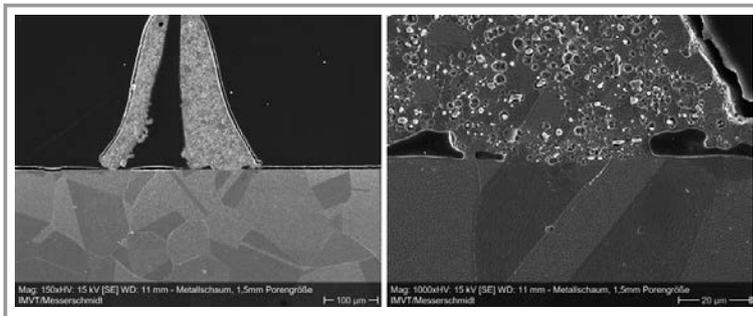


Abbildung 8. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen eines Querschnitts an Metallschaumproben mit 1,5 mm Porenweite.

Abkühlprozesses unterhalb von 800 °C zu einer Ausscheidung von Chromkarbiden, die auf den REM Bildern als weiße Punkte zu erkennen sind. Es sind ausreichend viele stoffschlüssige Kontaktstellen zwischen dem Metallschaum und den Deckblechen 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 metallischen Sandwichstrukturen eignet sich die Röntgen Mikrofokus Computertomographie (μ CT), da dieses Verfahren zerstörungsfrei, kontaktlos, relativ schnell und vor allem 3D bildgebend ist. Die CT Analysen wurden am DLR Stuttgart 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 Dreibeckenfutter 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 aufgenommenen 2000 zweidimensionalen Durchstrahlungsbilder wurden mit einem speziellen Rekonstruktionsalgorithmus (bekannt als gefilterte Rückprojektion) zu einem 3D CT Volumen gerechnet. Das Ergebnis der CT Analyse ist exemplarisch anhand eines vereinzelt Proben teils der Probe Nr. 1 (Abmaße: 30 mm×30 mm×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: Material und Luft. Dieser wichtige Schritt wird als Binarisierung oder Segmentierung bezeichnet. Es wurde der bedienerunabhängige Schwellwertalgorithmus nach Otsu verwendet [11]. Abb. 11b zeigt für die Probe Nr. 1 exemplarisch den Verlauf des Flächenmaterialanteils zwischen den zwei Deckschichten in z Richtung.

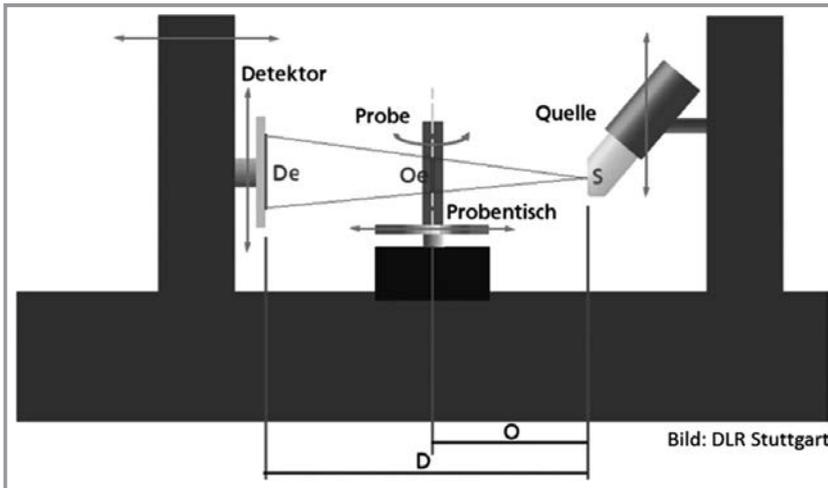


Abbildung 9. Schematischer Aufbau der verwendeten CT Ausrüstung.



Abbildung 10. Gerendertes 3D CT Bild eines vereinzelt Probe Nr. 1 in Grauwertdarstellung.

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

5 Diskussion und Ausblick

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

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

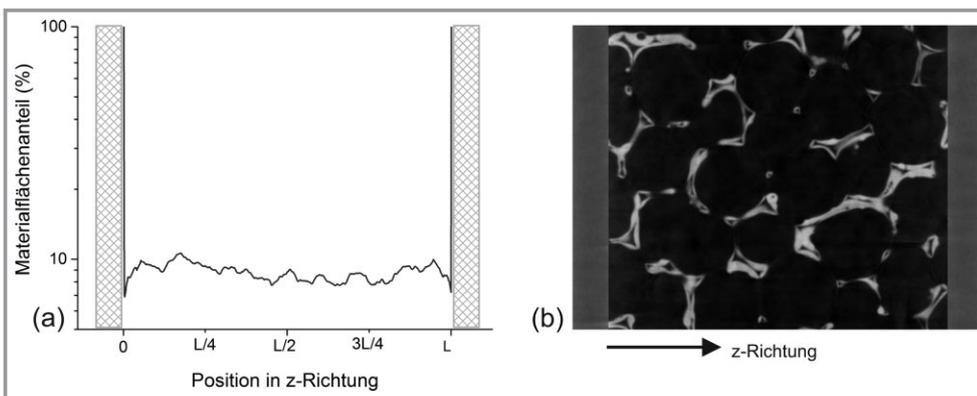


Abbildung 11. Bewertung der Schweißqualität mittels hochauflösender μ CT. a) Verlauf der Materialflächenanteile (logarithmische Darstellung) in z Richtung, b) 2D CT Schnittbild.

besondere eine etwas größere Verformung könnte toleriert werden und zu besseren Anbindungsergebnissen führen, wobei die innere, teils hohle Struktur der Metallschaumstege 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 Belastung mittels Kraftsteuerung erfolgen.

Um das Ergebnis der Anbindung zu den Blechen zu verbessern, könnten amorphe Folien auf Eisen oder Nickelbasis 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 Korrosionsbeständigkeit mindern würde, auftritt.

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

Literatur

- [1] 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, Automobiltech. 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*, Projektbericht, 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. Kazakov), 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.

[Diffusionsschweißen von Metallschäumen aus austenischem Edelstahl zur Abwärmenutzung mittels Wärmetauschern.](#)

2016. Chemie - Ingenieur - Technik.

doi: [10.5445/IR/1000064924](https://doi.org/10.5445/IR/1000064924)

Zitierung der Originalveröffentlichung:

Klein Altstedde, M.; Gietzelt, T.; Martin, T.; Toth, V.; Jemmali, R.

[Diffusionsschweißen von Metallschäumen aus austenischem Edelstahl zur Abwärmenutzung mittels Wärmetauschern.](#)

2016. Chemie - Ingenieur - Technik.

doi: [10.1002/cite.201600011](https://doi.org/10.1002/cite.201600011)

Lizenzinformationen: [KITopen-Lizenz](#)