

Fügeverfahren für das Multimaterial-Design

Jesche, F.

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Deutschland

Abstract

Das Multimaterial-Design hat aufgrund seines Potenzials zum Systemleichtbau und der Vielfalt der zur Verfügung stehenden Werkstoffe eine große Anwendungsbreite. Die Kombination der verschiedenen Materialeigenschaften in den Baugruppen stellt dabei hohe Anforderungen an die Fügeverfahren. Der vorliegende Betrag erläutert die Herausforderungen der Mischbauweise beim mechanischen Fügen und zeigt Beispiele für innovative Entwicklungen auf diesem Gebiet auf.

1 Anforderungen des Multimaterial-Design an die Fügetechnik

Im Multimaterial-Design werden Bauteile aus verschiedenen Werkstoffen in Baugruppen oder Produkten kombiniert. Die Auswahl der Werkstoffe erfolgt primär unter dem Gesichtspunkt, ein optimales Verhältnis funktionsorientierter Eigenschaften bei geringer Masse und Kosten zu erreichen. Dafür steht eine breite Palette von Werkstoffen zur Verfügung, die den Ansprüchen des Leichtbaus in verschiedener Weise gerecht werden. Sie unterscheiden sich zum Beispiel durch ihre jeweiligen Verhältnisse von Festigkeit/Dichte/Steifigkeit, den sich ergebenden Prozesszeiten und den Kosten. Die Vielfalt der Konstruktionswerkstoffe zeigt sich nicht nur in den verschiedenen Werkstoffarten wie Stahl, Aluminium, Magnesium und Kunststoff. Vielmehr werden innerhalb der Werkstoffgruppen durch Legierung oder thermische oder thermo-mechanische Behandlung die Qualitäten diversifiziert. Ergebnisse sind hochfeste Werkstoffe oder Werkstoffe mit einer ausgeprägten Duktilität.

Die Wahl des Fügeverfahrens ist bei der Konstruktion im Multimaterial-Design oftmals ein sekundärer Gesichtspunkt. Sie entscheidet jedoch mit über die Eigenschaften und die Sicherheit eines Gesamtsystems und somit über dessen Kosten in der Produktion und im Betrieb.

Für Baugruppen, bei denen Werkstücke aus artungleichen Werkstoffen miteinander verbunden werden, kommen häufig mechanische Fügeverfahren, auch in Kombination mit dem Kleben, zur Anwendung. Bei der Gestaltung dieser Fügeverbindungen im Multimaterial-Design muss den unterschiedlichen Anforderungen der Werkstoffe der zu verbindenden Einzelteile und den sich aus der Verbindung ergebenden Ansprüchen gerecht werden. Folgende Aspekte sind aufeinander abzustimmen:

- Festigkeit und Duktilität der zu verbindenden Bauteilwerkstoffe
- Festigkeit und Duktilität der Fügeelemente
- Anforderung an die Verbindung: Festigkeit, Steifigkeit, Geometrie
- Elektrochemisches Potential der Fügepartner, Korrosionsschutz
- Eigenschaften von Oberflächen, Kleb- und Dichtstoffen
- Verhalten der Baugruppe bei Temperaturänderung in der Prozesskette und im Betrieb

Diese Ansprüche erfordern häufig die Entwicklung von neuen Prozessvarianten, die Anpassung von Werkzeuggeometrien und -kinematiken oder die Auswahl angepasster Hilfsfügeteile.

Am Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik werden hierzu die einzelnen Komponenten und Prozessschritte sowie das systematische Zusammenwirken der Einflussgrößen über die Prozesskette untersucht, mit dem Ziel bedarfsgerechte Fügetechnologien zu gestalten. Ausgehend von den Eigenschaften der einzelnen Bauteile und deren Toleranzen sowie den Anforderungen an die Festigkeit der Verbindung werden die Fügetechnologien ausgewählt und die Fügewerkzeuge entworfen. Die Gestaltung erfolgt auf der Basis von Know-how, Experimenten und numerischen Simulationen. Die Sensitivität einzelner Prozessparameter und die Robustheit der Prozesse werden mittels moderner statistischer Methoden bewertet. Ziel ist die Minimierung der Prozesskosten bei einer stabilen Produktqualität. Im Folgenden werden Entwicklungen von Fügeverfahren für ausgewählte Fügeaufgaben im Multimaterial-Design vorgestellt.

2 Mechanisches Fügen von pressgehärteten Bauteilen

Pressgehärtete Bauteile sind heute im anspruchsvollen Stahlkarosseriebau nicht mehr wegzudenken. Für das Fügen dieser Bauteile mit Stahlbauteilen kommen meist thermische Fügeverfahren wie das Widerstandspunktschweißen oder das Laserschweißen zur Anwendung. In der Kombination mit Aluminiumbauteilen oder bei der Notwendigkeit zum Verzicht auf das Einbringen von Wärme stellen hier die mechanischen Fügeverfahren eine Alternative dar. Allerdings sind wegen der hohen Festigkeiten der Werkstoffe, die Zugfestigkeiten liegen im Bereich von 1500 bis 1800 MPa, auch die Möglichkeiten der mechanischen Fügeverfahren eingeschränkt.

Ein denkbare Fügeverfahren für diese Aufgabe ist das Vollstanznieten. Die Festigkeit der Vollstanznieten liegt über denen der Presshartstähle. Die Vollstanzniete müssen sich nicht bzw. dürfen sich nicht plastisch deformieren. Im Fügeprozess haben sie die Aufgabe, die Fügepartner zu lochen und anschließend eine hinter-schnittige Verbindung der Bleche zwischen Nietkopf und gefüllter Schaftnut herzustellen. Dabei sind die Prozesskräfte für das Lochen und das Füllen der Schaftnut durch eine entsprechende Werkzeuggestaltung so einzustellen, dass das Füllen der Schaftnut erst nach dem vollständigen Lochvorgang erfolgt. Hier zeigen sich die Grenzen beim konventionellen Vollstanznieten von pressgehärteten Bauteilen. Im Bild 1 auf der linken Seite sind die zu erwartenden Probleme dargestellt: Der Lochvorgang führt im stempelseitigen pressgehärteten Blech zu konischen Ausbrüchen. Beim Durchstoßen des Lochbutzens durch die Schneidmatrize entsteht ein Grat, der an der Fügestelle eingeformt wird. Die Hintereinanderfolge von Schneidvorgang und Füllen der Schaftnut ist problematisch. Damit kann das Füllen der Schaftnut nicht gesichert werden.

Eine alternative Verfahrensvariante stellt das Hochgeschwindigkeitsvollstanznieten [1] dar. Hier wird der Vollstanzniet mit Stempelgeschwindigkeiten im Bereich von 5 bis 10 m/s in die Fügestelle eingeschossen. Das Resultat einer Hochgeschwindigkeitsvollstanznietverbindung wird auf der rechten Seite im Bild 1 gezeigt. Hier sind eine zylindrische Schnittfläche und eine vollständig gefüllte Schaftnut zu erkennen. Die Festigkeit der Fügestelle liegt deutlich über der einer mit konventioneller Geschwindigkeit gefügten Vollstanznietverbindung. Die Unterschiede der Fügestellenausbildung sind auf die verschiedenen Mechanismen der Werkstofftrennung in der Schneidphase und die Wirkung von Trägheitskräften der Werkzeugelemente zurückzuführen.

Als Antriebsaggregate für die Nietanlagen werden Pneumatikzylinder und mechanische Antriebe getestet. Die geschilderten Phänomene lassen sich sinngemäß auch auf das Fügen anderer höchstfester Stahlqualitäten übertragen.

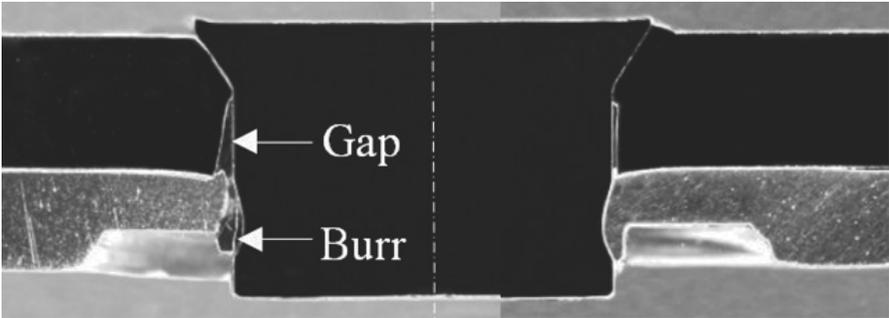


Bild 1: Mischverbindung durch konventionelles Vollstanznieten (links) und Hochgeschwindigkeitsvollstanznieten (rechts), Stempelseite 22MnB5, $t=1,8$ mm, Matrizenseite EN AW-6181, $t=1,2$ mm

Eine weitere Möglichkeit für das mechanische Fügen pressgehärteter Bauteile wird durch eine lokale Entfestigung der Werkstoffe an den Fügstellen geschaffen. In einem Gemeinschaftsprojekt (IGF-Forschungsvorhaben 391ZBG) zwischen dem Fraunhofer IWU Chemnitz, dem Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik der Universität Paderborn und dem Institut für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover werden Prozessvarianten zur lokalen Entfestigung durch induktive und konduktive Erwärmung sowie durch Erwärmung mittels Laser untersucht. Ziel der lokalen Temperierung ist das Einstellen einer Materialfestigkeit und Duktilität, die ein mechanisches Fügen, zum Beispiel mit Halbhohlstanznieten oder Clinchen, zulässt. Die Temperierungszeit soll so kurz wie möglich gehalten werden. Die Härteverteilung im Bereich der Entfestigung muss homogen sein, um geometrische Unregelmäßigkeiten beim Ausbilden der Fügeverbindung auszuschließen.

Unabhängig von der Art der Erwärmung der pressgehärteten Teile muss die Temperaturführung exakt gewählt werden, um die Prozesszeit minimal zu halten und eine geeignete Härteverteilung zu erreichen. Für die Planung der Temperaturführung werden daher die Zusammenhänge zwischen Temperatur, Gefügeentwicklung und Härte ermittelt und in Simulationsmodellen zusammengefasst. Damit wird es möglich die lokale Entfestigung eines Bauteiles in Abhängigkeit von der zugeführten Wärmeleistung, des Werkstoffzustandes und der Bauteilgeometrie vor auszurechnen. Die Berechnungsmodelle werden mit dem Programm DEFORM getestet.

In Bild 2 werden Untersuchungsergebnisse zusammengestellt, die den Einfluss der Temperaturverteilung auf die Gefügeentwicklung und damit verbunden die Festigkeit bzw. die Härte des Materials, zeigen. Die Härte fällt im dargestellten Beispiel von der Grundhärte von etwa 475 HV1 auf ein Härteplateau von unter 300 HV1 ab. Für eine hohe Prozesssicherheit beim anschließenden mechanischen Fügen ist eine gleichmäßige Härteverteilung im Plateau notwendig. Die Größe der entfestigten Zone hat im gezeigten Beispiel einen Durchmesser von etwa 10 mm. Sie wird durch das Temperierungsverfahren, der verwendeten Anlagen und der zugeführten Wärmeleistung bestimmt.

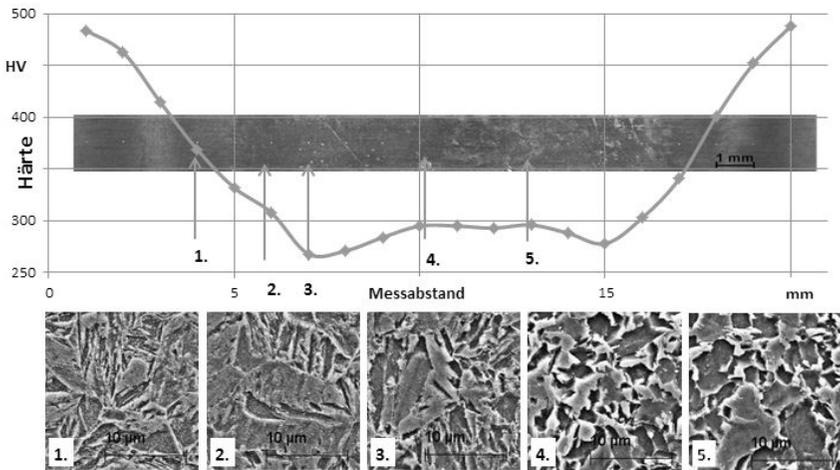


Bild 2: Härteverteilung (HV1) und Gefügeentwicklung bei einer lokalen Entfestigung eines pressgehärteten 22MnB5, $t=1,5$ mm

Bild 3 zeigt die unterschiedlichen Temperaturverläufe für drei nebeneinanderliegende Punkte im Flanschbereich bei einer induktiven Erwärmung. Das Bild verdeutlicht die Komplexität der Aufgabe, in der Zone der lokalen Entfestigung eine gleichmäßige Temperierung vorzunehmen, um homogene Materialeigenschaften einzustellen. Wegen der Lage der Wärmeeinleitungspunkte zum Werkstückrand stellen sich inhomogene Temperaturverteilungen ein. Eine Temperaturregelung ist daher zwingend erforderlich.

Nach der lokalen Entfestigung können mechanische Fügepunkte analog dem Fügen von höherfesten Werkstoffen gesetzt werden. Im Bild 4 werden Halbhohl-

stanznietverbindungen und Clinchpunkte in lokal entfestigten Presshartwerkstücken in Verbindung mit Aluminiumblechen gezeigt.

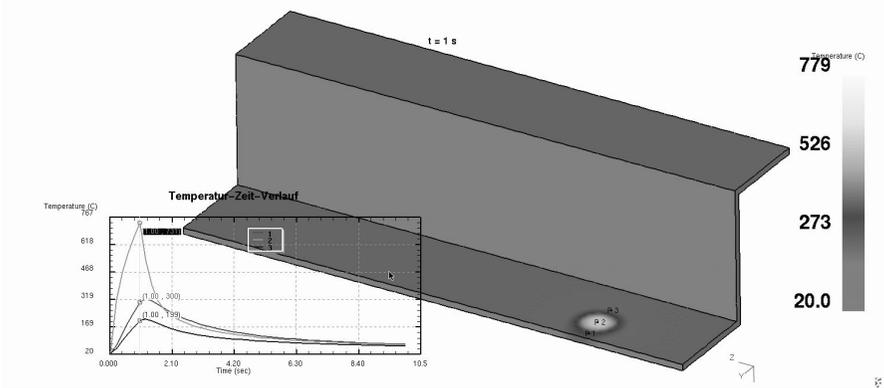


Bild 3: Temperaturverteilung bei induktiver Erwärmung eines Flansches, Werkstoff 22MnB5

22MnB5 (1,5 mm) + EN AW-6181 (1,2 mm)

22MnB5 (1,5 mm) + EN AW-5083 (1,5 mm)

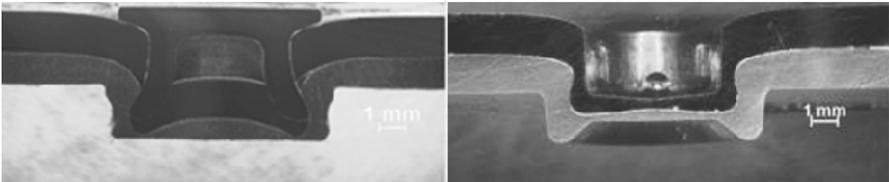


Bild 4: Mechanische Fügeverbindungen an lokal entfestigtem Presshartstahl

3 Mechanisches Fügen von Werkstoffen mit eingeschränkter Duktilität

Zu den Werkstoffen mit eingeschränkter Duktilität gehören zum Beispiel Magnesium und hochfeste Aluminiumknetlegierungen sowie Aluminiumdruckgusswerkstoffe. Auch diese Werkstoffe können bei speziellen Prozessbedingungen mechanisch gefügt werden. Durch eine Temperierung und dem Umformen in Druckspannungszuständen kann das Formänderungsvermögen der genannten Werkstoffe erheblich erweitert werden.

Das am Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik entwickelte matrizenlose Clinchen hat sich als besonders geeignet gezeigt für das Fügen von Magnesiumbauteilen [2]. Gegenüber dem konventionellen Clinchverfahren werden hier keine konturierten Matrizen verwendet. Das Gegenlager für die Fügestelle ist ein flacher Amboss. Von Prozessbeginn an unterliegen die zu fügenden Bauteile zwischen Clinchstempel und Amboss einem Druckspannungszustand. Dieser wirkt zum einen günstig auf das Umformvermögen der Werkstoffe. Zum anderen unterstützt der Druckspannungszustand einen effektiven Wärmeübergang zwischen einem beheizten Amboss und dem ambossseitigen Werkstück.

Im Bild 5 ist die Verbindung eines Magnesiumbauteiles mit einem Aluminiumbauteil abgebildet, die durch das matrizenlose Clinchen erzeugt wird. Die Matrizen temperatur beträgt etwa 400°C. Wegen des guten Wärmeüberganges zwischen Amboss und Magnesiumbauteil erfolgt die Erwärmung während dem Fügevorgang. Es ist keine gesonderte Prozesszeit zur Bauteilerwärmung erforderlich. Im Magnesiumbauteil stellt sich im dargestellten Beispiel eine Temperatur von 230°C ein.

Das matrizenlose Clinchen mit beheiztem Amboss lässt sich bei geeigneten Fügepaarungen auch für das Fügen hochfester Aluminiumlegierungen einsetzen.

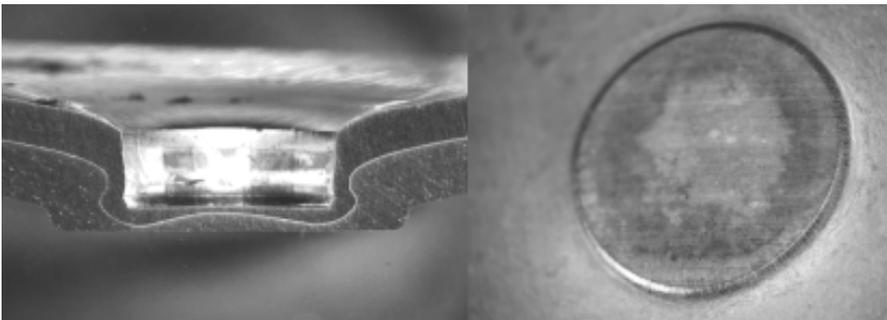


Bild 5: Mischverbindung durch temperiertes Matrizenloses Clinchen
Stempelseite: AlMg3, $t=1,0$ mm; Ambossseite: AZ31, $t=1,3$ mm

Das mechanische Fügen von Werkstoffen mit eingeschränkter Duktilität ist kritisch bei den Verfahren bei denen Matrizen mit einer Hohlkontur verwendet werden. Das betrifft das konventionelle Clinchen aber vor allem auch das Halbhohlstanzen. Bei diesen Verfahren unterliegen die matrizenseitigen Bauteile in der Phase des Einformens in die Matrize einer erheblichen Zugbeanspruchung an der Außenseite. Das führt häufig zu verschiedenen Rissbildungen.

Eine Alternative bietet das am Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik entwickelte serielle Halbhohlstanznieten. Bild 8 zeigt das Verfahrensprinzip. Im Gegensatz zum konventionellen Halbhohlstanznieten wird hier keine starr konturierte Matrize verwendet. Das bewegliche Matrizenelement (7) kann relativ zum festen Matrizenelement (6) bewegt werden, das auch die Auflage für die zu fügenden Werkstücke bildet. Das bewegliche Matrizenelement hat ständig Kontakt zum matrizenseitigen Bauteil und kann eine Kraftwirkung ausüben. Damit besteht die Möglichkeit, Zugbeanspruchungen im Material zu reduzieren. In gegenwärtigen Untersuchungen werden verschiedene Werkzeugkinematiken verglichen. Ziel ist die Erweiterung der Verfahrensgrenzen beim Halbhohlstanznieten.

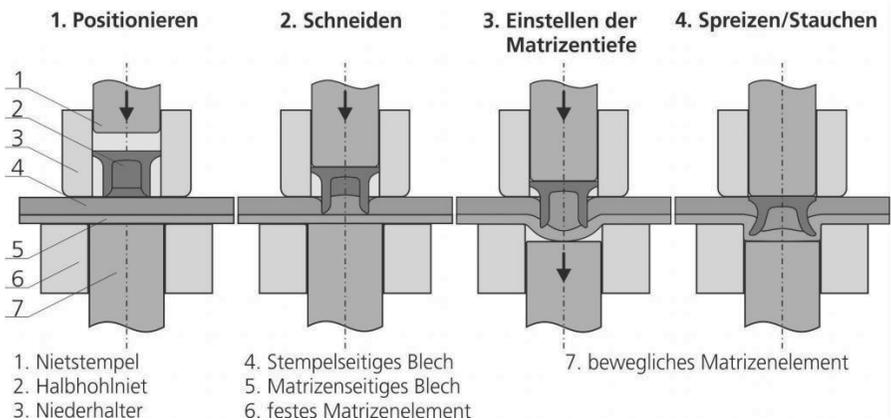


Bild 6: Verfahrensprinzip serielles Halbhohlstanznieten

Ein Beispiel für die Erweiterung der Verfahrensgrenzen zeigt Bild 7. Hier werden zwei Aluminiumbleche verbunden. Die Besonderheit der Fügeaufgabe liegt in der Fügerichtung. Stempelseitig ist ein 2,0 mm dickes Material EN AW-6016 angeordnet. Die Materialdicke auf der Matrizen Seite beträgt 1,0 mm. Beim Halbhohlstanznieten mit konventioneller Matrize (links) wird keine genügende Verbindungsqualität erreicht. Beim seriellen Halbhohlstanznieten (rechts) wird eine gute Verbindungsqualität erzeugt.

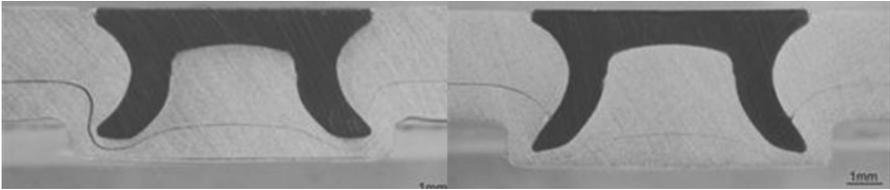


Bild 7: Halbhohlstanznietverbindung links: konventionell, rechts: serielles Halbhohlstanznieten
Werkstoff EN AW-6016, stempelseitig $t = 2,0$ mm, matrizeseitig $t = 1,0$ mm

4 Thermische Beanspruchung der Baugruppen im Multimaterial-Design

Die verschiedenen Werkstoffe im Multimaterial-Design unterscheiden sich nicht nur in ihren mechanischen Eigenschaften sondern auch in den thermischen Kenngrößen. Das betrifft insbesondere die Wärmeausdehnungskoeffizienten und die spezifische Wärmekapazität der Werkstoffe. Bei einer thermischen Belastung von Baugruppen im Multimaterial-Design können sich in den Bauteilen erhebliche Spannungen und Deformationen ergeben, wenn diese thermischen Kenngrößen differieren. Das trifft zum Beispiel für die Kombination von Stahl- und Aluminiumbauteilen zu sowie für die Kombination von metallischen Bauteilen und faserverstärkten Kunststoffen (FVK).

In Bild 8 sind exemplarisch für den Mischbau mit faserverstärkten Kunststoffen eine Stanznietverbindung eines FVK-Bauteils mit einem Aluminiumblech (rechts oben) sowie eine Falzklebverbindung an einer Testbaugruppe aus FVK und Aluminiumblech (rechts unten) nach dem thermischen Aushärten des Klebstoffs dargestellt. Wegen der unterschiedlichen thermischen Eigenschaften der einzelnen Werkstoffe kommt es bei oder nach Temperierungen der Baugruppe, zum Beispiel bei einer Klebstoffaushärtung oder im Farbgebungsprozess, zu Spannungen in der Füge­stelle und zu Deformationen der Baugruppe. Das kann zur Schädigung der Verbindung oder zur Unbrauchbarkeit der Baugruppe wegen der Deformationen führen.

Am Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik werden diese Phänomene untersucht. Für die Ermittlung der Beanspruchung der Füge­stellen im Fertigungsprozess und bei der Strukturbelastung werden Messmethoden und Berechnungsmodelle entwickelt. Für die Messungen werden berührungslose optische Verfahren der Firma GOM genutzt [3]. Die Messung der Deformationen an den Baugruppen erfolgt vor und nach der Temperierung oder auch direkt im

Ofenprozess (Bild 8, links). Die Messergebnisse dienen der Modellbildung sowie für die Verifizierung von Simulationsmodellen. Mit den gefundenen Simulationsmodellen sollen derartige Beanspruchungszustände vorausberechnet und Lösungen für derartige Konstruktionsaufgaben entwickelt werden.

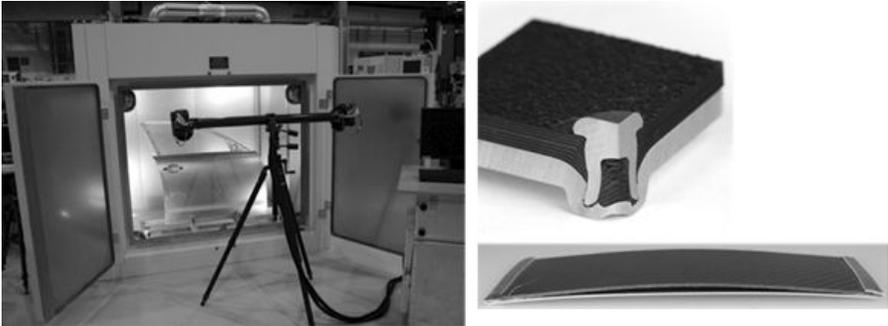


Bild 8: Baugruppen im Multimaterial-Design (rechts) und Deformationsmessung im Ofenprozess (links)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Fügen von Baugruppen im Multimaterial-Design erfolgt häufig durch mechanische Fügeverfahren, auch in Kombination mit dem Kleben. Die breite Palette der zur Verfügung stehenden Werkstoffe, mit zum Teil erheblich verschiedenen Eigenschaften, stellt unterschiedlichste Anforderungen an die Fügeverfahren. Dabei ist der Markt gekennzeichnet durch immer neue Werkstoffentwicklungen. Als Beispiele sollen die höchstfesten Stahl- und Aluminiumwerkstoffe genannt werden. Aber auch eine breitere Anwendung von Magnesiumwerkstoffen und faserverstärkten Kunststoffen ist abzusehen.

Diese Entwicklungen zwingen dazu, auch die Fügeverfahren an die neuen Herausforderungen anzupassen. Der vorliegende Beitrag zeigt hierzu neuartige Lösungen auf und stellt aktuelle Entwicklungsprojekte vor. Neben der Weiterentwicklung von Fügeverfahren gewinnen auch die Entwicklung von Messmethoden zur Charakterisierung von Fügestellenbeanspruchungen und die Entwicklung von Simulationsmodellen zur Unterstützung von Prozessplanungen an Bedeutung.

Literatur

- [1] Neugebauer, R.; Jesche, F.; Kraus, C.; Hensel, S.: *Mechanical joining with self piercing solid-rivets at elevated tool velocities*. In: *Queens University: ESAFORM [2011] : 27-29 April 2011, Belfast*. 2011, S. 1278-1283.
- [2] Neugebauer, R.; Dietrich, S.; Kraus, C.: *Advances in mechanical joining of magnesium*. In: *International Institution for Production Engineering Research (CIRP): Manufacturing Technology [2008/1]: August 24-30, 2008, Manchester*. Amsterdam : Elsevier, 2008, S. 283-286. (CIRP Annals 57/1)
- [3] Neugebauer, R.; Rössinger, M.; Schulz, F.; Eckert, A.; Schützle, W.: *Predicting Dimensional Accuracy of Mechanically Joined Car. Body Assemblies*, SheMet Conference Leuven, 2011

