

**Raiser Innovationspreis 2013**

# **Reibpressfügen von Aluminiumlegierungen mit thermoplastischen Kunststoffen**

Kurzerläuterung:

Entwicklung eines modifizierten Rührreibschweißprozesses zum sicheren und kostengünstigen Fügen von Aluminiumlegierungen mit thermoplastischen Kunststoffen.

Verfasser:

**Franz Xaver Wirth**

Kontaktdaten:

Franz X. Wirth

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

Technische Universität München

Boltzmannstr. 15

85748 Garching

Tel.: 089/289-15490

E-Mail: franz.wirth@iwb.tum.de

## -Kurzfassung-

Das Reibpressfügen, kurz RPF ist ein Pressschweißverfahren für Aluminium-Thermoplast-Verbindungen im Überlappstoß und basiert auf einem modifizierten Rührreibschweißprozess (engl. Friction Stir Welding, kurz FSW). Im Vergleich zum FSW wird auf den Einsatz eines Schweißspins verzichtet. Beim Fügevorgang rotiert ein zylindrisches Werkzeug mit der Drehzahl  $n$  auf der Aluminiumoberfläche. Der durch Reibung entstehende Wärmestrom  $\dot{Q}$  führt zu einem lokalen Erweichen des Thermoplasts in der Fügezone. In Zusammenwirken mit der axialen Anpresskraft  $F_z$  des Werkzeugs sowie einer geeigneten Oberflächenvorbehandlung des Aluminiumwerkstoffs entsteht eine belastbare Mischverbindung. In Abbildung 1 ist das Verfahrensprinzip des Reibpressfügens dargestellt.

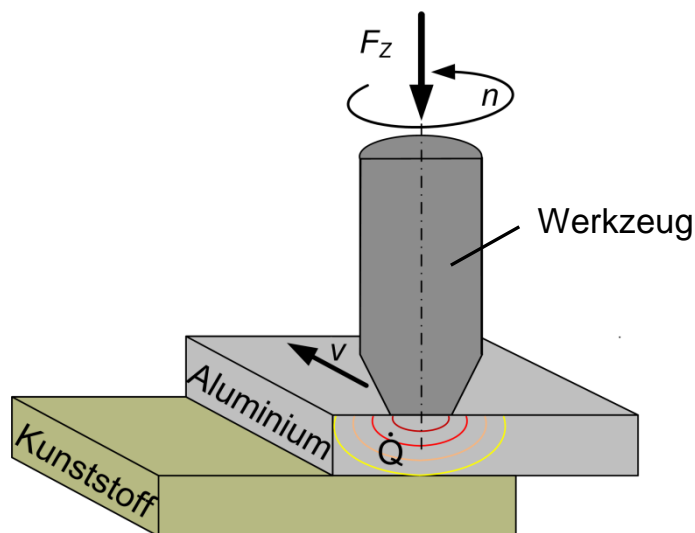


Abbildung 1: Prinzip des Reibpressfügens

Im Rahmen der bisherigen Forschungstätigkeit wurden neben Untersuchungen zur Identifikation eines geeigneten Prozessparameterfensters auch Anpassungen der Werkzeuggeometrie analysiert. Darüber hinaus lag ein Forschungsschwerpunkt in der Auswahl zweckmäßiger Modifikationen der Aluminiumoberfläche, um eine möglichst gute Anbindung zu erhalten. Abbildung 2 zeigt eine gezogene Scherzugprobe bei der ein lasertexturiertes Aluminiumblech mit glasfaserverstärktem Polyamid durch Reibpressfügen verbunden wurde. Deutlich ist das Versagen der Probe im Kunststoffgrundwerkstoff zu erkennen.

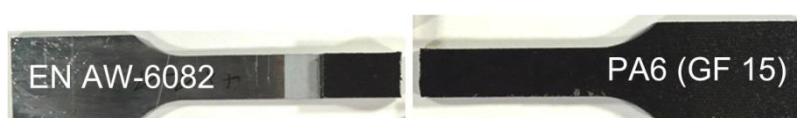


Abbildung 2: Reibpressgefügte Scherzugprobe (lasertexturiertes EN AW-6082 + PA6 (GF 15))

## -Langfassung-

### Motivation und Ausgangssituation

Für das Jahr 2025 wird der Verkehrsleistung Deutschlands eine Verdoppelung des Luftverkehrsaufkommens sowie eine deutliche Steigerung des Individualverkehrs im Vergleich zum Jahr 2005 prognostiziert. Um der CO<sub>2</sub>-Problematik entgegenwirken zu können, werden Ressourcenschonung und effizientere Antriebsformen im Verkehrssektor immer wichtiger. Dies wird auch dadurch verdeutlicht, dass allein ca. 29 % des End-Energiekonsums der Bundesrepublik Deutschland auf diesen Bereich entfallen (ABELE & REINHART 2011). Die Elektrifizierung der Antriebsstränge von Straßenfahrzeugen bietet die Möglichkeit, Treibhausgasemissionen zu verringern und gleichzeitig die individuelle Mobilität zu gewährleisten. Jedoch verursacht alleine die Batterie von Elektrofahrzeugen eine Massenzunahme von ca. 200 bis 300 kg. Dadurch werden die Fahrzeugreichweite sowie die Fahrleistung sehr stark beeinträchtigt. Somit nimmt Leichtbau auch bei der Elektromobilität eine entscheidende Rolle ein (HANSELKA & JÖCKEL 2010, WALLENTOWITZ ET AL. 2010).

Bei Straßen- und Luftfahrzeugen mit konventionellen Antrieben, die auf der Verbrennung fossiler Treibstoffe basieren, stellt die Minimierung der Masse ein entscheidendes Ziel aktueller Entwicklungen dar. Beispielsweise kann durch eine Verminderung der Masse eines PKWs um 100 kg eine Kraftstoffersparnis von 0,4 bis 0,7 Liter erreicht werden (SCHMIDT 2009). Zur Reduzierung der Masse von Fahrzeugen bietet der Leichtbau verschiedene Ansätze, etwa den Werkstoffleichtbau. Beim Werkstoffleichtbau wird eine Masseneinsparung durch den Einsatz von Leichtmetallen oder durch die Substitution von Stahl durch Kunststoff erreicht (NIEMANN ET AL. 2001). Bei zukünftigen Automobilen wird der Stahlanteil sinken, wohingegen Aluminiumlegierungen und Kunststoffe vermehrt eingesetzt werden. Mittelfristige Prognosen gehen von einem Kunststoffanteil von etwa 20 Massenprozent im Automobil aus (FRIEDRICH ET AL. 2008). Hieraus ergeben sich speziell für die Füge-technik neue Herausforderungen, um die erforderlichen Mischverbindungen prozesssicher und kostengünstig zu fügen.

Hersteller aus der Fahrzeug- und Fluggeräteindustrie sind ständig bemüht, die Masse ihrer Produkte trotz gesteigerter Komfort- und Sicherheitsanforderungen zu reduzieren. Im Werkstoffleichtbau werden dafür jeweils optimale Werkstoffe für die lokalen Anforderungen eingesetzt. Leichtmetalle sowie Polymerwerkstoffe bieten hier großes Potential, wodurch die Notwendigkeit von Mischverbindungen dieser Werkstoffgruppen, wie z. B. Aluminium-Kunststoff-Verbindungen, enorm ansteigt. Zum Fügen dieser beiden artfremden Werkstoffe werden zur Zeit vornehmlich mechanische Verbindungstechniken, z. B. Nieten und Schrauben, oder Klebetechniken bzw. Kombinationen dieser Verfahren verwendet. Eine vielversprechende Alternative bietet das Reibpressfügen, kurz RPF.

## Prozessbeschreibung und Zielsetzung

Das Reibpressfügen (RPF) ist ein Pressschweißverfahren für Aluminium-Thermoplast-Verbindungen im Überlappstoß und basiert auf einem modifizierten Rührreibschweißprozess (engl. Friction Stir Welding, kurz FSW). In Anlehnung an das Rührreibschweißen wird dazu ein verschleißbeständiges Werkzeug eingesetzt, wobei auf den FSW-typischen Schweißstift zur mechanischen Durchmischung der Fügepartner verzichtet wird. Bei diesem Verfahren wird das mit der Drehzahl  $n$  rotierende Werkzeug mit einer definierten Anpresskraft  $F_z$  auf die Aluminiumoberfläche gedrückt. Der lokale, durch Reibung entstehende Wärmestrom  $\dot{Q}$  ermöglicht dabei in Kombination mit dem aus der Anpresskraft  $F_z$  resultierenden Druck innerhalb der Fügefläche sowie einer geeigneten Oberflächenvorbereitung des Aluminiumwerkstoffs die Ausbildung der Mischverbindung. In Abbildung 1 ist das Verfahrensprinzip des Reibpressfügens dargestellt.

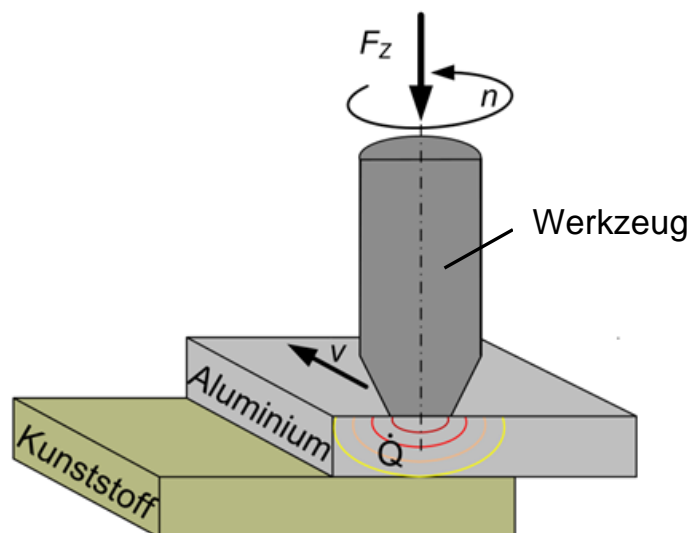


Abbildung 1: Prinzip des Reibpressfügens

Im Rahmen des Transferprojektes T7 „Rührreibschweißen von Aluminiumstrangpressprofilen mit thermoplastischen Kunststoffen“ des Sonderforschungsbereichs Transregio10 wird in enger Zusammenarbeit mit EADS Innovation Works Germany der Prozess des Reibpressfügens erforscht und weiterentwickelt. Die Ermittlung geeigneter Prozessparameter sowie die Steigerung der Verbindungsfestigkeit stellen wesentliche Forschungsziele dar. Um die Güte der Verbindung zu erhöhen, werden unterschiedliche Vorbereitungen der Aluminiumoberfläche untersucht. Die Oberflächen beinhalten dabei sowohl makroskopische Veränderungen, wie z. B. Hinterschnitte als auch definierte mikroskopische Topologien (Kavernen und Vertiefungen). Diese können beispielsweise durch Anodisierung erzeugte Oxidschichten, Strahlbehandlungen oder Lasertexturierungen realisiert werden. Der während des

Prozesses plastifizierte Kunststoff wird in die erzeugten Vertiefungen eingepresst, wodurch eine formschlüssige Verbindung entsteht. Im Rahmen des Forschungsprojekts soll zusätzlich der Beitrag weiterer Bindemechanismen untersucht werden. Begleitend zu den Fügeversuchen soll das Prozessverständnis durch entsprechende thermische Struktursimulationen erweitert werden.

## Untersuchungsergebnisse

### Anodisieren der Aluminiumoberflächen

In ersten Versuchsreihen wurde die Machbarkeit des Reibpressfügens von Polypropylen (PP) mit anodisierten Aluminiumplatten der Legierung EN AW-6056-T6 untersucht. Die Oberflächenvorbehandlung des Aluminiumwerkstoffes mittels Chromsäure-Anodisieren (CAA-Anodisierung) erfolgt durch den Kooperationspartner EADS Innovation Works Germany. Bei dieser anodischen Oxidation wird auf der Aluminiumoberfläche eine wenige Mikrometer dicke und sehr poröse Schicht erzeugt. In Abbildung 2 ist die Aufnahme eines Rasterelektronenmikroskops (REM) einer derartigen Oberfläche zu sehen. Diese poröse Oxidschicht eignet sich gut zum Fügen des Aluminiumbauteils mit dem Kunststoff, da der plastifizierte Polymerwerkstoff in diese Poren mit Hinterschneidungen eindringen kann und nach dem Abkühlen eine feste formschlüssige Verbindung entsteht.

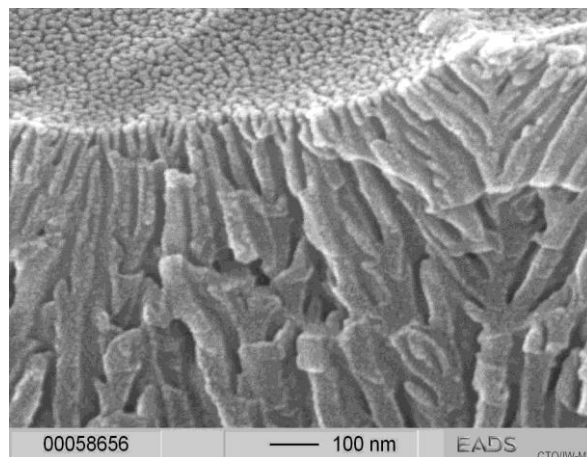


Abbildung 2: REM-Aufnahme einer CAA-anodisierten Aluminiumoberfläche

In Abbildung 3 ist eine REM-Aufnahme einer gedehnten Al-PP-Verbindung dargestellt. Das Anhaften der gestreckten Thermoplastfäden an den Aushöhlungen der Chromsäure-Anodisierungsschicht des Aluminiums ist deutlich zu erkennen.

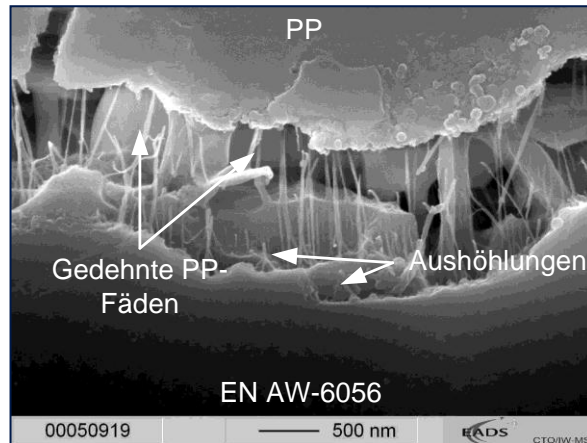


Abbildung 3: REM-Aufnahme einer gedehnten Al-PP-Verbindung

Zwar weisen die durch RPF hergestellten Proben aus Polypropylen und CAA-anodisiertem Aluminium eine gute Verbindung auf, jedoch ist das Chromsäure-anodisieren aufgrund der kanzerogenen Wirkung des verwendeten Chroms (VI) nicht zukunftssträftig. Als Alternative zu dieser Vorbehandlung wurde in Zusammenarbeit mit dem Kooperationspartner EADS Innovation Works das Phosphorsäure-Schwefelsäure-Anodisieren (PSA-Anodisieren) als geeignete Oberflächenvorbehandlung für den RPF-Prozess zum Fügen von Aluminiumwerkstoffen mit thermoplastischen Kunststoffen identifiziert.

### Strahlen der Aluminiumoberflächen

Da die Behandlung der Aluminiumbauteile mittels Anodisierverfahren sehr aufwendig und kostenintensiv ist, liegt ein Schwerpunkt des Forschungsprojekts in der Ermittlung weiterer geeigneter Vorbehandlungsmaßnahmen. Hierzu wurden Untersuchungen zu Strahlbehandlungen mit verschiedenen Strahlmitteln sowie verschiedener Strahlwinkel durchgeführt.

Für die nachfolgenden Untersuchungen wurden jeweils 2 mm dicke Aluminiumbleche der Legierung EN AW-6082-T6 mit 3 mm dickem glasfaserverstärktem Polyamid (PA6 mit 15% Glasfaseranteil) verwendet. Die Bauteilabmessungen betragen jeweils 160 mm Länge und 100 mm Breite. Die vorbereiteten Aluminiumbleche wurden mit einer Überlapplänge von 20 mm durch Reibpressfügen in Breitenrichtung im Überlappstoß miteinander verbunden. Alle Versuche wurden an einem 4-Achs-CNC-Bearbeitungszentrum vom Typ MHC 250 der Firma Heller durchgeführt. Der Werkzeugdurchmesser betrug dabei 20 bzw. 15 mm. Das Werkzeug rotierte im Prozess mit einer Drehzahl  $n$  von 800 1/min. bei einer Fügevorschubgeschwindigkeit  $v$  von 240 mm/min. Die axiale Anpresskraft  $F_z$  wurde durch das Bearbeitungszentrum auf 1,5 kN geregelt. Zur Prüfung der Scherzugfestigkeit wurden taillierte Proben in Anlehnung an DIN 50125 mittels Wasserstrahlschneiden aus den gefügten Bauteilen ausgeschnitten und eine Scherzugprüfung durchgeführt.

In Abbildung 4 ist exemplarisch eine geprüfte Scherzugprobe zu sehen, bei der das Versagen im Grundwerkstoffbereich des verstärkten Thermoplasten aufgetreten ist.



Abbildung 4: Scherzugprobe einer RPF-gefügtten Al-PA-Verbindung (Aluminiumoberfläche gestraht)

Abbildung 5 zeigt graphisch die Auswertung der maximal erreichbaren Scherzugfestigkeit für verschiedene Strahlmittel und Einstellwinkel der Strahldüse. Hier ist zu beachten, dass ein Einstellwinkel von  $0^\circ$  einem senkrechten Bestrahlen der Aluminiumoberfläche entspricht. Die Festigkeitswerte der geprüften Proben zeigen einen geringen Einfluss des Strahlwinkels auf die erreichbare Scherzugfestigkeit. Jedoch ist ein senkrecht auftreffendes Strahlgut ( $0^\circ$  Einstellwinkel der Strahldüse) zu empfehlen, da hier geringere Streuungen auftreten und zudem die prozesstechnische Umsetzung einfacher ist. Bezüglich der verwendeten Strahlmittel erreichen mit Glasperlen bestrahlte Aluminiumoberflächen nach dem Reibpressfügen nur durchschnittliche Scherzugfestigkeitswerte von ca.  $7 \text{ N/mm}^2$ . Edelkorund ist demnach besser zur aluminiumseitigen Oberflächenvorbehandlung für den RPF-Prozess von Aluminium mit thermoplastischen Kunststoffen geeignet. Das grobkörnige Edelkorund-Strahlmittel weist bei senkrechter Bestrahlung der Metallproben hohe erreichbare Scherzugfestigkeiten mit geringer Streuung auf und ist deshalb für Strahlbehandlungen zu empfehlen.

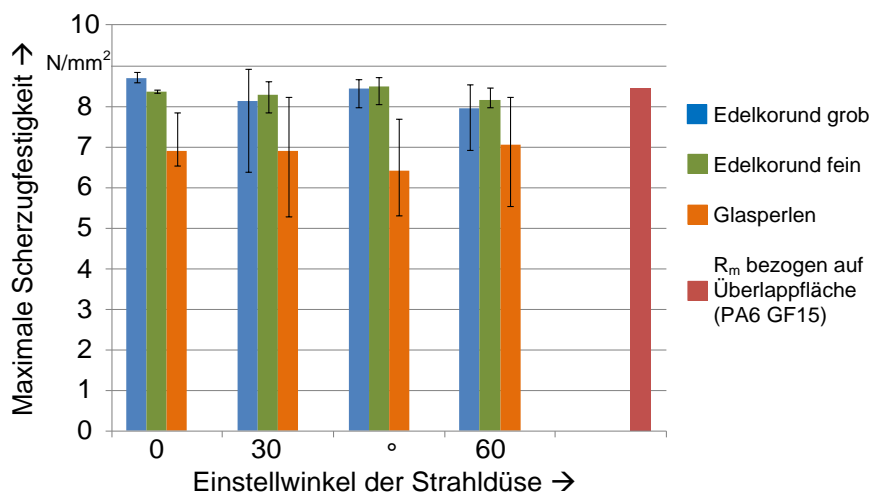


Abbildung 5: Erreichbare Scherzugfestigkeit einer RPF-gefügtten Al-PA-Verbindung bei verschiedenen Strahlmitteln und Strahlwinkeln zur Al-Vorbehandlung

## Weitere Vorbehandlungsmöglichkeiten der Aluminiumoberflächen

Zur Erweiterung der Bandbreite geeigneter Vorbehandlungsmaßnahmen der Aluminiumbauteile wurden im Rahmen des Forschungsprojektes alternative Verfahren untersucht. Zudem lag der Schwerpunkt darin, die Verbindungsfestigkeit zu steigern und das Verständnis der wirksamen Bindemechanismen zu vertiefen. Neben der bereits erwähnten Anodisierung und Strahlvorgängen wurden zudem unbehandelte Aluminiumbleche (EN AW-6082-T6) mittels Reibpressfügen mit glasfaserverstärktem Polyamid (PA6 GF 15) verbunden. Die erreichbare Scherzugfestigkeit mit der gewalzten Blechoberfläche beträgt lediglich  $4 \text{ N/mm}^2$  (vgl. Abbildung 6). Jedoch weist dieser Festigkeitswert darauf hin, dass die Verbindung nicht ausschließlich auf Mikro-Formschluss beruht. Diesen und weitere wirksame Bindemechanismen gilt es in zukünftigen Untersuchungen detaillierter zu analysieren. In Abbildung 6 ist die realisierbare Scherzugfestigkeit für gebürstete Aluminiumoberflächen dargestellt. Die Festigkeit liegt bei knapp  $6 \text{ N/mm}^2$  und damit deutlich höher als bei unbehandelten Oberflächen. Der Wert der anodisierten sowie der gestrahlten Proben wird jedoch nicht erreicht. Die höchste erreichbare Scherfestigkeit konnte durch Lasertexturierung der Aluminiumbleche vor dem Reibpressfügen realisiert werden. Die durchschnittlichen Festigkeitswerte von ca.  $10 \text{ N/mm}^2$  weisen eine geringe Streuung auf und sind aus diesem Grund für industrielle Anwendungen gut geeignet (siehe Abbildung 6).

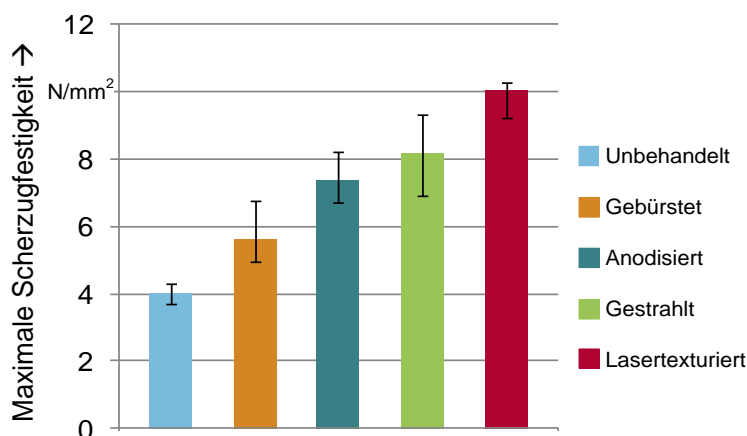


Abbildung 6: Maximale Scherzugfestigkeit von RPF-Proben (Al+PA6 (GF 15)) bei verschiedenen Oberflächenvorbehandlungen des Aluminiumblechs

Die Texturierung der Aluminiumblechoberflächen mittels Laser erfolgte bei EADS Innovation Works. Dieses Verfahren ermöglicht eine definierte Strukturierung der Oberfläche und ist für einen automatisierten Prozessablauf geeignet. Abbildung 7 zeigt eine geprüfte RPF-Scherzugprobe eines Aluminium-Polyamid-Verbundes. Der Versagensort befindet sich außerhalb der Fügezone im Grundwerkstoff des glasfaserverstärkten Thermoplasten.





Abbildung 7: Scherzugprobe einer RPF-gefügten Al-PA-Verbindung (Aluminium lasertexturiert)

## Zusammenfassung

Die vorgestellten Untersuchungsergebnisse zeigen sehr deutlich das Potential des Reibpressfügens zum Verbinden von Aluminium mit thermoplastischen Kunststoffen. Durch eine geeignete Anpassung der Prozessparameter sowie eine entsprechende Modifizierung der Aluminiumoberflächen sind bei Scherzugprüfungen gute Festigkeitswerte zu erreichen, welche ein Versagen im Grundwerkstoff der Kunststoffbauteile hervorrufen. Der Nutzen des Reibpressfügens liegt vor allem in einer kosteneffizienteren Prozesskette beim Fügen von Aluminiumwerkstoffen mit Kunststoffkomponenten. Durch das Einsparen von zusätzlichen Fügeelementen (Nieten oder Schrauben) und das Einsparen einer spanenden Vorbearbeitung (Bohren) entstehen deutliche Kostenvorteile. Darüber hinaus verzichtet dieses Fügeverfahren auf die Verwendung von Klebstoffen und somit können die aufwändige Klebstoffapplikation sowie lange Aushärtezeiten umgangen werden (DILGER & BÖHM 2007). Des Weiteren ermöglicht das RPF das sortenreine Recycling des Aluminiums sowie der verwendeten Kunststoffe, da keine Kontamination durch Fügeelemente und Klebstoffe vorhanden ist.

## Ausblick

Im weiteren Projektverlauf soll neben der bereits erfolgten Machbarkeitsstudie sowie einer Übertragung des Reibpressfügens auf ein Referenzbauteil aus dem EADS-Produktportfolio ein vertieftes Verständnis der wirksamen Bindemechanismen erfolgen. Hierzu wird das Temperatur- und Druckverhalten beim Fügen von Aluminium mit thermoplastischen Kunststoffen vom RPF-Prozess entkoppelt betrachtet. Des Weiteren sollen durch gezielte Variationen der Werkstoffe und Oberflächenvorbehandlungen, unter Zuhilfenahme geeigneter qualitativer bzw. quantitativer Analysemethoden, die Mechanismen der Anbindung näher erforscht werden.

## Danksagung

Der vorliegende Artikel basiert auf Forschungsarbeiten im Transferprojekt T7 des Sonderforschungsbereichs Transregio10, der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird. Die Untersuchungen erfolgen in Kooperation mit EADS Innovation Works Germany in Ottobrunn.

## Literaturverzeichnis

### ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser 2011. ISBN 978-3-446-42595-8.

### WALLENTOWITZ ET AL. 2010

Wallentowitz, H.; Freialdenhoven, A.; Olschewski, I.: Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges. Technologien, Märkte und Implikationen. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2010. ISBN: 978-3-8348-0847-9.

### HANSELKA & JÖCKEL 2010

Hanselka, H.; Jöckel, M.: Elektromobilität. Elemente, Herausforderungen, Potenziale. In: Hüttl, R.-F. et al. (Hrsg.): Elektromobilität. Potenziale und wissenschaftlich-technische Herausforderungen. Heidelberg: Springer 2010, S. 21-38. ISBN: 978-3-642-16253-4.

### SCHMIDT 2009

Schmidt, J.: Korrosionsschutzschichten für Magnesiumknetlegierungen im Automobilbau. In: Huber, O. et al. (Hrsg.): Leichtbau. Eine Schlüsseltechnologie für Material-, Energieeffizienz und Klimaschutz, 4. Landshuter Leichtbau-Colloquium. Landshut, 26.-17. Februar 2009. Landshut: LC-Verlag, S. 27-35. ISBN: 978-3-9812696-0-4.

### NIEMANN ET AL. 2001

Niemann, G.; Winter, H.; Höhn, B.-R.: Maschinenelemente. 3. Auflage. Heidelberg: Springer 2001. ISBN: 3-540-65816-5.

### FRIEDRICH ET AL. 2008

Friedrich, H. E.; Treffinger, P.; Kopp, G.; Knäbel, H.: Werkstoffe und Bauweisen ermöglichen neue Fahrzeugkonzepte. In: Schindler, V.; Sievers, I. (Hrsg.): Forschung für das Auto von morgen. Aus Tradition entsteht Zukunft. 1. Auflage. Berlin: Springer 2008, S. 301-345. ISBN: 978-3-540-74150-3.

### DILGER & BÖHM 2007

Dilger, K.; Böhm, S.: Neueste Klebstoffapplikationsmethoden für wirtschaftliche Prozessketten. In: Reisgen, U. (Hrsg.): Schweißtechnik und Fügetechnik. Schlüsseltechnologien der Zukunft, 10. Internationales Aachener Schweißtechnik Kolloquium. Aachen, 24.-25. Oktober 2007. Aachen: Shaker 2007, S. 129-139. ISBN: 978-3-8322-6644-8.