

Innovative thermische Fügeverfahren für den Einsatz im Multimaterial-Leichtbau

Christopher Schmal, M.Sc, Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut, Laboratorium für Werkstoff- und Füge-technik, Universität Paderborn

Dipl.-Ing. (FH) Tobias Broda, Prof. Dr.-Ing. Steffen Keitel, SLV Halle GmbH

Zusammenfassung

Eine nachhaltige Schonung der Ressourcen in Fertigung und Produktleben führt im Fahrzeugbau zu einer forcierten Weiterentwicklung sowohl der Leichtbau- wie auch der Antriebskonzepte. Moderne Mischbaukonzepte, also die Kombination artfremder Werkstoffe im Sinne des intelligenten Leichtbaus, führen konventionelle Fügeverfahren wie das Widerstandspunktschweißen oder mechanische Fügeverfahren an ihre technologischen Grenzen. Die Hintergründe liegen sowohl in der erschwerten Kombinierbarkeit wie auch in den individuellen Eigenschaften der Fügepartner. Im Rahmen des diesem Artikel zugrundeliegenden Cornetvorhabens „Innojoin“ wurden acht verschiedene innovative thermische Fügeverfahren für drei ausgewählte Materialkombinationen erprobt, weiterentwickelt und gegenübergestellt. In diesem Artikel werden exemplarische Ergebnisse für die drei Fügeverfahren Widerstandselement-, Reibelement- sowie Lichtbogenelementschweißen detailliert dargestellt und ausgewählte mechanische Eigenschaften von Verbindungen der im Gesamtvorhaben betrachteten Fügeverfahren vergleichend gegenübergestellt.

1 Einleitung

Zu Beginn des Cornetprojektes (IGF-Nr.: 00.108E) wurden die zu betrachtenden Fügeverfahren anhand industriell relevanter Materialkombinationen hinsichtlich der Tauglichkeit geprüft, optimiert und die Verbindungseigenschaften untersucht. Ausgehend von einer Parameterstudie erfolgte zunächst eine systematische Verbindungsoptimierung um dann die mechanisch-technologischen Eigenschaften aufzunehmen. Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse zur Verfahrensweiterentwicklung der zuvor genannten Verfahren dargestellt. Abschließend wird die Gegenüberstellung aller betrachteten Verfahren anhand der durchgeführten Scherzugversuche unter schlagartiger und schwingender Belastung gezeigt und diskutiert.

2 Versuchsrandbedingungen und Vorgehensweise/Behandelte Fügeverfahren

An den beteiligten deutschen Instituten wurden das Lichtbogenelementschweißen (SLV Halle) sowie das „Widerstandselement-“ und Reibelementschweißen (LWF – Uni Paderborn) betrachtet. Die betrachteten Verfahren beruhen auf einer vorzugsweise artreinen, metallisch stoffschlüssigen Verbindung zwischen einem Hilfsfügeelement und dem Basisblech. Der deckblechseitig angeordnete, nicht zwangsweise metallische zweite Fügepartner wird dabei durchdrungen und form- und kraftschlüssig durch das Hilfsfügeelement angebunden. Die größten Unterscheidungsmerkmale der betrachteten Verfahren liegen in der Art der Energieeinbringung zur Herstellung der Verbindung sowie in der Hilfsfügeelementbeschaffenheit. Eine Übersicht über die Verfahrensabläufe sowie über die generellen Verbundeigenschaften wird in den folgenden Abschnitten gegeben. Im abschließenden Teil dieses Beitrages werden die Verbindungskennwerte unter dynamischer Belastung aller im Vorhaben betrachteten Verfahren gegenübergestellt. Dazu zählen weiterhin die am Belgian Welding Institut, CEWAC und an der

KU Leuven betrachteten Verfahren Elektromagnetisches Pulsschweißen, Laserstrahlschweißen, Widerstandspunktschweißen mit Prozessband, Rührreibpunktschweißen und Reibpunktschweißen.

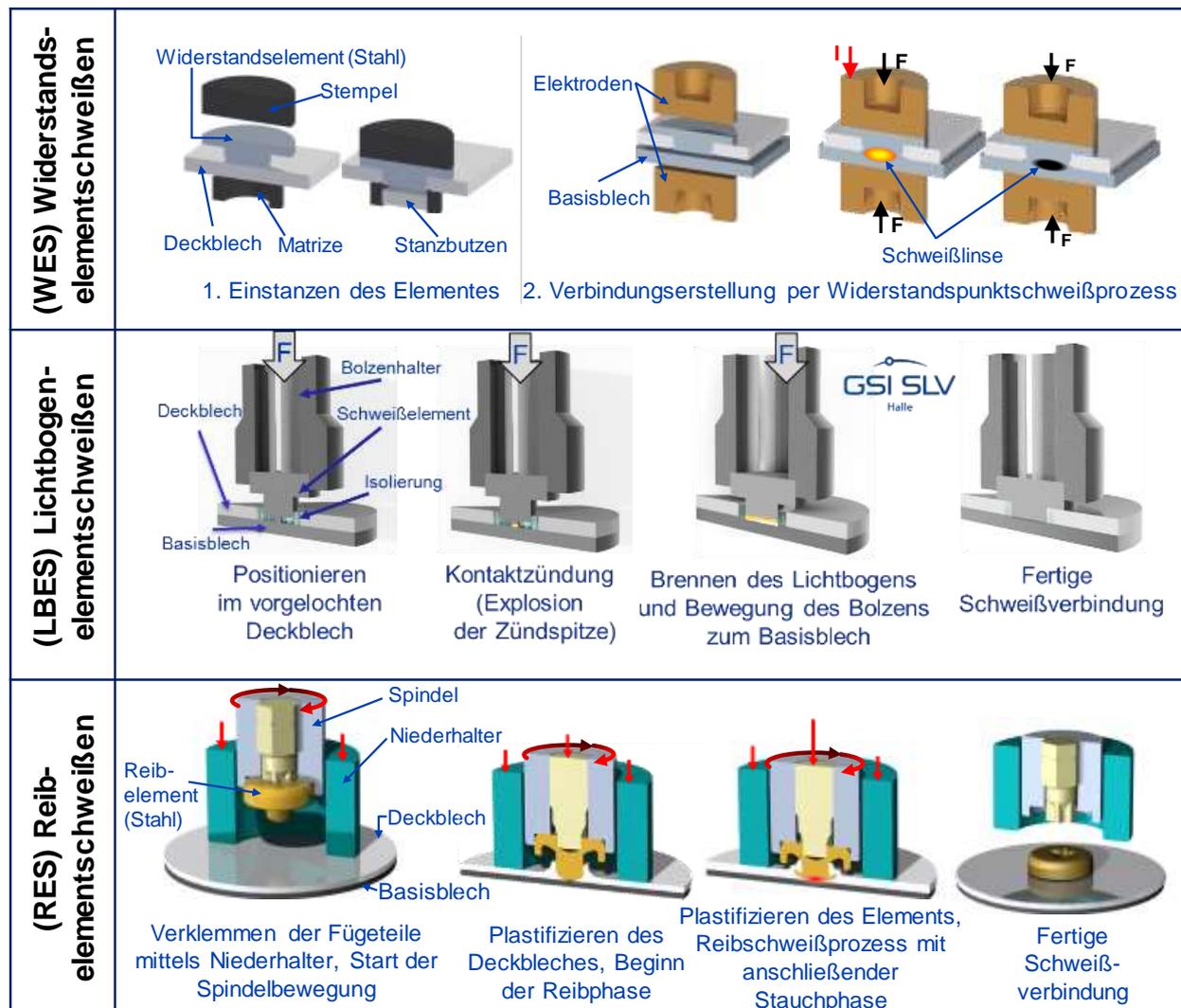


Abbildung 1: Verfahrensablauf beim Widerstandselementschweißen (oben) [2]; Verfahrensablauf beim Lichtbogenelementschweißen (mitte) [3]; Verfahrensablauf beim Reibelementschweißen (unten)

2.1 Widerstandselementschweißen

Das Widerstandselementschweißen ist eine Weiterentwicklung des Widerstandspunktschweißens, wobei im Gegensatz zum konventionellen Verfahren ein T-förmiges, nietähnliches Widerstandselement als Hilfsfügeteil aus einem zum Basisblech kompatiblen Werkstoff zum Einsatz kommt. Dadurch wird die Problematik unterschiedlicher physikalischer Eigenschaften, insbesondere unterschiedlicher Schmelzpunkte der Fügekomponenten im Fall der Mischbauverbindung, umgangen. Der prinzipielle Prozessablauf ist in **Abbildung 1 (oben)** dargestellt.

Zu Beginn des Prozesses wird das Widerstandselement in das Deckblech eingestanzt und die Fügepartner zwischen Punktschweißelektroden positioniert. Darauffolgend setzt eine Elektrode auf den Elementkopf und die andere Elektrode auf das Basisblech auf und es wird ein Stromfluss unter Kraftereinwirkung eingeleitet. An der Kontaktfläche zwischen Widerstandselement und Basisblech kommt es zur Schweißlinienbildung und nach der Abkühlung zu einer stoffschlüssigen Verbindung. Durch eine Erhöhung der Elektrodenkraft kann das Widerstandselement zusätzlich in axialer Richtung gestaucht bzw. in Umfangsrichtung geweitet und eine form- und kraftschlüssige Verbindung mit dem Deckblech generiert werden. [1]

2.2 Lichtbogenelementschweißen

Das Lichtbogenelementschweißen soll als Möglichkeit für das Setzen von Nietelementen bei einseitiger Zugänglichkeit untersucht werden. Zunächst wurden alle Lichtbogen-Bolzenschweißverfahren aus DIN EN ISO 14555 betrachtet und bewertet, um eine geeignete Variante zum Setzen der Niete zu finden. Das Lichtbogenbolzenschweißen mit Hubzündung (Verfahren 783) ist gekennzeichnet durch Schweißzeiten von über 100 ms und das Schweißbad wird durch Keramikringe oder Schutzgase geschützt. Durch die lange Lichtbogenbrenndauer wurde das Deckblech angeschmolzen bzw. das Grundblech durchgeschmolzen. Weiter führte die Hubbewegung zu Reibung zwischen Nietelement und Deckblech, wodurch eine Verbindungsbildung ausblieb. Zu ähnlichen Ergebnissen führte auch das Kurzzeitbolzenschweißen mit Hubzündung (Verfahren 784). Die Spitzenzündungsverfahren (786) haben nur kurze Schweißzeiten (1 – 3 ms), wobei nur beim Kontaktverfahren im Gegensatz zum Spaltverfahren die Gefahr des Reibens des Elements im Deckblech gering ist. Weiter führt die Lichtbogenbrenndauer von bis zu 3 ms zu einer ausreichenden Reinigungswirkung der zum Teil verzinkten Bleche. Den prozesstechnischen Ablauf zeigt **Abbildung 1 (mitte)**.

2.3 Reibelementschweißen

Abbildung 1 (unten) zeigt schematisch den Verfahrensablauf beim Reibelementschweißen. Ein rotationssymmetrisches Hilfsfügeteil wird mittels hoher Drehzahlen und einer entsprechenden Axialkraft zunächst durch den zu plastifizierenden Deckblechwerkstoff gerieben und anschließend über einen Reibschweißprozess mit einem in der Regel hochfesten Basisblechwerkstoff verschweißt. Das während des Fügens verdrängte Deckblechmaterial kann mittels der Unterkopfringnutgeometrie des Reibelementes aufgenommen werden und bildet eine weitere Scherebene. Es entsteht eine stoffschlüssige Verbindung des Basisbleches mit dem Hilfsfügeteil sowie eine form- und kraftschlüssige Verbindung mit dem Deckblech, da nach Abkühlung des Reibelements eine axiale Schrumpfung einsetzt. Aufgrund der einstufigen Prozesscharakteristik ohne Vorlochoperation bietet das Reibelementschweißen bei kurzen Prozesszeiten im Bereich von ca. 1,0 – 3,0 Sekunden neben dem Widerstandselementschweißen ein besonders hohes Anwendungspotenzial für die automobilen Serienfertigung. [3, 4]

2.4 Behandelte Werkstoffkombinationen

Nachfolgend sind die drei für diesen Beitrag relevanten und im Projekt betrachteten Werkstoffkombinationen dargestellt. Diese sind repräsentativ für verschiedene Branchen wie zum Beispiel die Automobilindustrie, Elektro-/Kühlindustrie und den Behälterbau:

1. EN AW-5182 (t=2,0 mm) + HDT1200M ZE50/50 (t=1,5 mm)

2. EN AW-1050 H14/24 (t=1,0 mm) + Cu-ETP R240 (t=1,0 mm)
3. HCT780X ZE50/50 (t=1,5 mm) + H800/1.4378 (t=1,48 mm).

3 Versuchsergebnisse

In den folgenden Abschnitten 3.1-3.3 wird zunächst auf das Vorgehen sowie auf ausgewählte Ergebnisse zu den Fügeverfahren Widerstandselement-, Reibelement- und Lichtbogenelementschweißen mit dem Fokus auf der Materialkombination 1 aus einem hochfesten Stahl (HDT1200M, t=1,5 mm) und einem Aluminiumwerkstoff (EN AW-5182, t=2,0 mm) eingegangen. Anschließend werden anhand von Ergebnissen aus Scherzugversuchen unter dynamischer Krafteinleitung (schlagartig und schwingend) die Eigenschaften sämtlicher, in diesem Projekt untersuchter Fügeverfahren gegenübergestellt. Dabei werden auch die anderen beiden Materialkombinationen 2 (Aluminium/ Kupfer) und 3 (Stahl/nichtrostender Stahl) betrachtet.

3.1 Widerstandselementschweißen von Mischverbindungen

Die Werkstoffkombination 1 der Kategorie Aluminium/hochfester Stahl spiegelt eines der Hauptanwendungsgebiete des Widerstandselementschweißens im Automobilbau wider. Zunächst wurden die Elemente angepasst sowie Schweißbereichsdiagramme für zwei ausgewählte und basierend auf Voruntersuchungen erfolgsversprechende Schweißzeiten mit 150 ms und 380 ms in Anlehnung an die Vorgehensweise nach SPE1220 (Teil 2) ermittelt. Nachfolgend wurde die Verbindung mittels der Auswahl je eines Parametersatzes pro Schweißbereichsdiagramm, welcher im mittleren Bereich zwischen Haft- und Spritzergrenze liegt, tiefergehend untersucht. Die weiteren Scherzug- wie auch Kreuz-Kopfzuguntersuchungen zur Optimierung wurden an den erfolgsversprechenden Parametersätzen 150 ms / 5,5 kA sowie 380 ms / 5,5 kA durchgeführt. In der nachfolgenden **Abbildung 2** sind die entsprechenden Ergebnisse der Scherzugprüfungen nach SEP1220 dargestellt. Trotz einheitlichem Deckblechversagen und nahezu identischer maximaler Prüfkräfte ergeben sich deutliche Differenzen hinsichtlich der Energieaufnahme. Ein analoges Ergebnis wurde in dem Untersuchungspunkt der Kreuz-Kopfzugprüfungen nach DIN EN ISO 14272 ermittelt. Das Versagen tritt hierbei mit dem Ausknöpfen des Elementschafes aus dem Elementkopf auf. Die jeweilige Versagenscharakteristik spricht für eine negative thermische Beeinflussung des Aluminium-Deckblechs wie auch des Widerstandselementwerkstoffes im Falle des Parametersatzes mit längerer Schweißzeit.

Die Herausforderung beim Widerstandselementschweißen der Materialkombination 2 (Aluminium/Kupfer) bestand darin, eine fehlerfreie Schweißverbindung zwischen dem Widerstandselement aus Aluminium und dem basisblechseitig angeordneten Aluminiumblech herzustellen. Dies wurde mittels Schweißzeiten von 60 ms, Schweißströmen in Höhe von ca. 25 kA sowie angepasster Schweißstromprofile (Downslope) ermöglicht. Bezüglich der Materialkombination 3 (Stahl/nichtrostender Stahl) wurden verschiedene Anordnungsfälle und Widerstandselementwerkstoffe untersucht. Problematiken wie Chromkarbidbildung und Kontaktkorrosion infolge des Aufeinandertreffens von Werkstoffen mit unterschiedlich hohen Elektronegativitäten konnte mit Hilfe der deckblechseitigen Anordnung des nichtrostenden Stahls und einer geeigneten Elementbeschichtung weitestgehend begegnet werden. Ein Nachweis mit

beschichteten Elementen konnte jedoch zeitlich bedingt und aufgrund der institutsbezogenen Arbeitsteilung nicht durchgeführt werden.

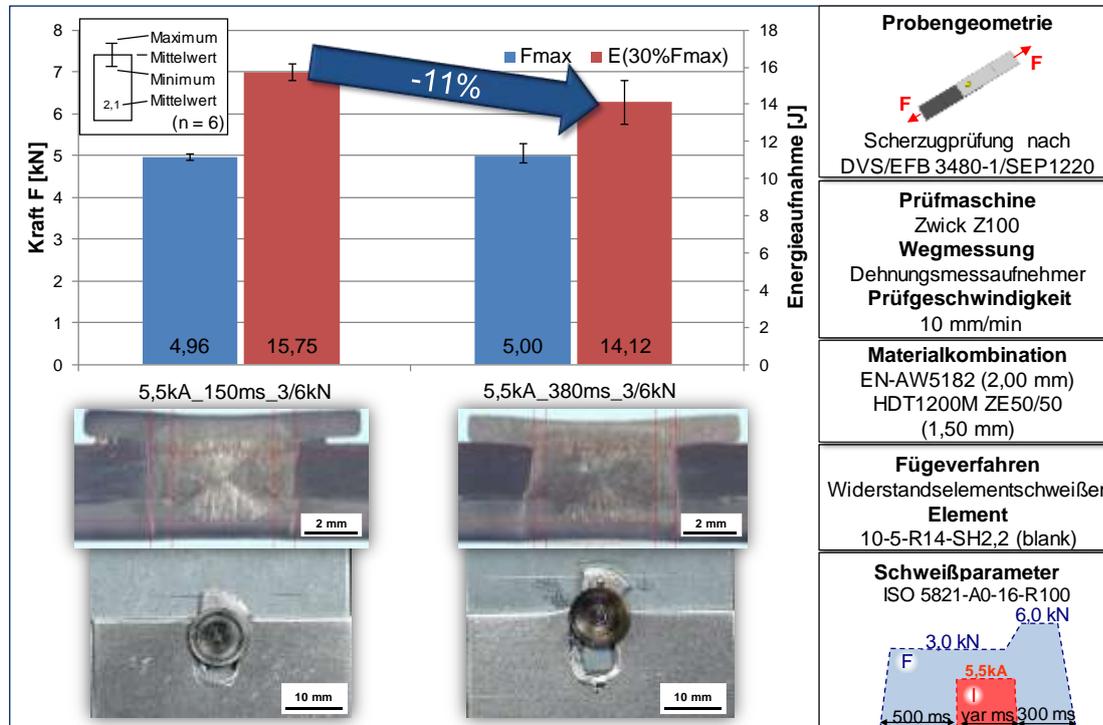


Abbildung 2: Gegenüberstellung der maximalen Prüfkräfte und Energieaufnahmen von widerstandselementgeschweißten Al-St-Proben bei unterschiedlichen Schweißzeiten unter quasistatischer Scherzugbelastung

3.2 Reibelementschweißen von Mischverbindungen

Wie auch für das Widerstandselementschweißen ist das Reibelementschweißen prädestiniert für die Materialkombination 1 (Aluminium/hochfester Stahl). Nach der grundlegenden Elementgeometrieanpassung und einer Parameterstudie mittels metallographischer Auswertemethoden wurde das resultierende Tragverhalten bei quasistatischer Scherzug- und Kreuz-Kopfzugbelastung für die weitere Optimierung genutzt. Zu variierende Parameter waren hierbei die Drehzahl, die Reib- und Stauchkraft sowie der Umschaltpunkt, zu dem der Übergang von der Reib- in die Stauchphase mittels Spindelabbremmung stattfindet. Da diese Werkstoffkombination eine erhöhte Anwendungsrelevanz für den automobilen Rohbau widerspiegelt wurden zusätzlich zu den rein reibelementgeschweißten Verbindungen (elementar) die Kombination mit dem Kleben (hybrid) untersucht. Relevant sind hier die Klebstoffverdrängung bzw. -schädigung durch die thermisch-mechanische Fügetechnik sowie die resultierenden Festigkeitswerte. Als Klebstoffsystem wurde ein 2K-Epoxidharz-Strukturklebstoff verwendet. Das Reibelement musste nicht an die sich ausbildende Klebeschicht angepasst werden. Die nachfolgende **Abbildung 3** zeigt die Gegenüberstellung des Kraft-Weg-Verlaufes einer hybrid gefügten Verbindung zu dem Kraft-Weg-Verlauf einer elementar gefügten Verbindung. Weiterhin sind die entsprechenden Verläufe einer widerstandselementschweißgeklebten Verbindungen dargestellt. Das Versagen fand sowohl beim Hybridfügen als auch im elementar gefügten Fall im bzw. am Aluminiumblech statt. Mit Klebstoff kommt es im Bereich hoher Fügeerteilnehmungen zu

einem adhäsiven Klebschichtversagen. Außerdem führt die punktförmige Reibelementverbindung stets zu einer Langlochbildung. Im Vergleich zur elementaren Reibelementschweißverbindung erreichten die hybridgefügte Proben ab einem Weg von 1 mm ähnlich hohe Maximalkräfte (ca. 9 kN), jedoch lassen die höheren Gesamtverformungen der hybridgefügte Verbindung auf eine plastische Vorverformung der Aluminiumdecklage aufgrund des Klebstoffeinsatzes schließen. Die Herstellerangaben zur maximalen Scherzug-Klebstofffestigkeit von 20 MPa (entspricht ca. 14,4 kN) auf Aluminiumoberflächen konnten auch mit eingebrachtem Reibelement erreicht werden, sodass gegenüber einer rein geklebten Verbindung eine Schwächung der Klebschicht durch das zusätzliche Reibelement bzw. den Fügeprozess unter Scherzugbelastung nicht zu erkennen ist. Beim Widerstandselementschweißen wurden gegenüber den reibgeschweißten Ausführungen geringfügig reduzierte Prüfkraft erreicht. So liegt das zunächst relevante Versagen der Klebschicht auf einer Höhe von ca. 14,5 kN, das im weiteren Verlauf dominante Versagen der Widerstandselementverbindung auf ca. 5 kN. Letzteres liegt gegenüber der reibgeschweißten Verbindung aufgrund des kleineren Elementkopfdurchmessers sowie aufgrund der fehlenden zweiten Scherebene bzw. Ringnut auf deutlich geringerem Kraftniveau.

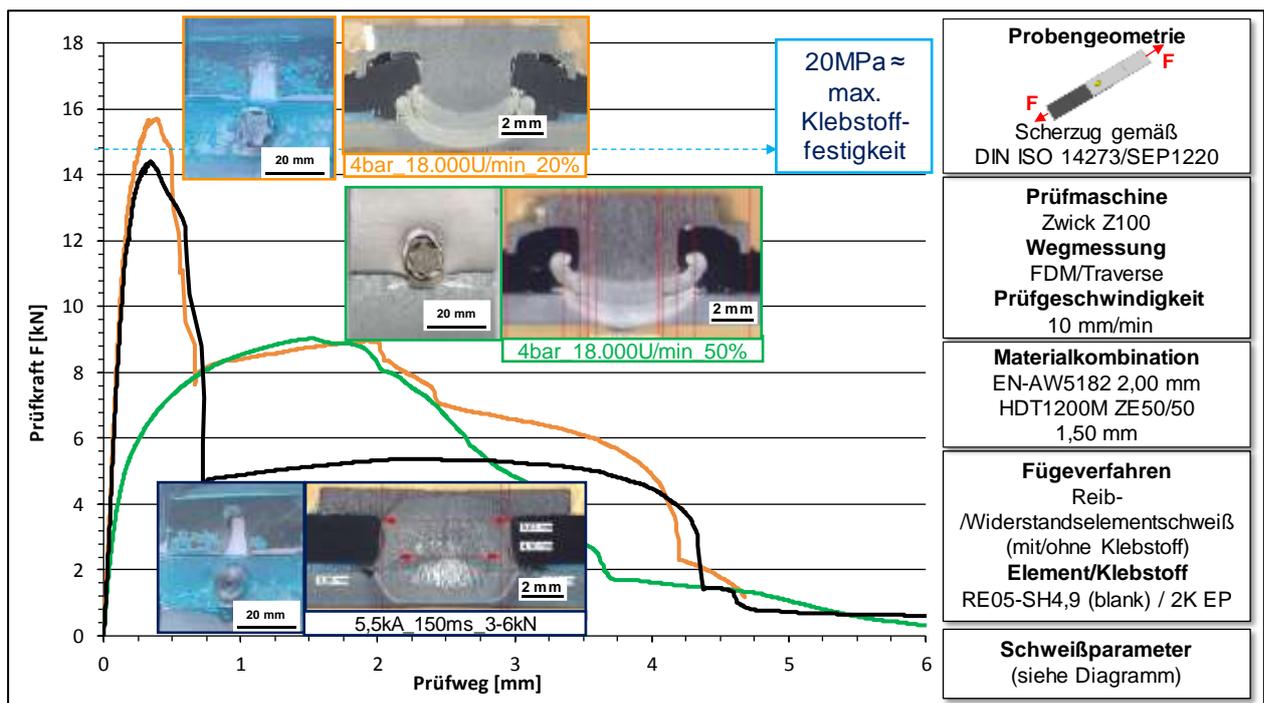


Abbildung 3: Gegenüberstellung der Kraft-Weg-Verläufe von repräsentativen reibelementgeschweißten (grün), reibelementschweißgeklebten (orange) und widerstandselementschweißgeklebten (schwarz) Al-St-Verbindungen unter quasistatischer Scherzugbelastung

Bei der Anwendung des Reibelementschweißens auf die Materialkombination 2 (Aluminium/Kupfer) konnten die bisher gewonnenen Erkenntnisse zu den Mechanismen von konventionellen Reibelementschweißungen nicht direkt übertragen werden. Ähnlich geringe Festigkeitswerte beider Fügeteilwerkstoffe führten dazu, dass zur Vermeidung des Durchreibens durch die Fügepartner insbesondere die Elementschäftlänge gekürzt und damit auch das

Unterkopfringnutvolumen reduziert werden musste. Mit einer basisblechseitigen Anordnung des Kupferbleches konnten erfolgreich Verbindungen erstellt werden. Eine Adaptation auf die Materialkombination 3 (Stahl/nichtrostender Stahl) konnte nicht erreicht werden, da beide Fügepartie Werkstoffe zu hohe Festigkeitseigenschaften besitzen, um diese mit dem Hilfsfügeteil zu durchdringen.

3.3 Lichtbogenelementschweißen von Mischbauverbindungen

Für die Entwicklung des Prozesses aus **Abbildung 1 (mitte)** musste bedingt durch das Brennen eines Lichtbogens zur Vermeidung eines Kurzschlusses und des Überspringens des Lichtbogens zum Deckblech eine Isolierung verwendet werden. Diese ist beim Lichtbogenelementschweißen ein Silikonring. Der Schweißniet, welcher bereits mit der Silikonisolierung versehen wurde, wird wie ein herkömmlicher Schweißbolzen in den Bolzenhalter eingeführt. Für die Versuche wurde eine Handschweißzange genutzt. Das Schweißelement wird anschließend durch das vorgelochte Deckblech geführt, sodass die Zündspitze am Basisblech aufsitzt. Die Feder in der Schweißpistole wird gespannt. Das Basisblech selbst muss mit den Masseklammern kontaktiert sein. Durch Betätigen des Auslösers an der Schweißpistole wird der Stromkreis geschlossen und eine Kondensatorbatterie entladen. Die Zündspitze am Schweißelement erwärmt sich, explodiert und im dadurch entstehenden Spalt brennt ein Lichtbogen. Durch die vorgespannte Feder wird das Schweißelement zum Basisblech bewegt, bis Schweißelement und Basisblech wieder in Kontakt treten. Durch die noch vorhandene Federkraft entsteht die Pressschweißung. Durch den Kopf des Schweißelements wird das Deckblech niedergehalten. Für die drei Werkstoffkombinationen wurde in Parameterentwicklungen der Prozess soweit entwickelt, dass in Abrollversuchen in Anlehnung an DIN EN 10447 Ausknöpfbrüche im Basis- oder Deckblech eintraten. In Kopf- und Scherzugversuchen wurden diese Ergebnisse bestätigt. **Abbildung 4** zeigt repräsentativ die Verbindung 1 (Aluminium/Stahl) mit Nietelement aus S235 mit den erreichten Bruchbildern. Für die Verbindung 3 (Stahl/nichtrostender Stahl) wurde eine ähnliche Konfiguration wie für das Schweißen der Aluminium/Stahl-Verbindung genutzt, lediglich die Schaftlänge des Niets wurde angepasst. Für die Verbindung 2 (Aluminium/Kupfer) konnte kein schweißgeeigneter artgleicher Niet gefunden werden, der eine ausreichende Festigkeit gewährleistet. Daher wurde ein Niet aus X5CrNi18-10 genutzt, welcher direkt an das Kupferblech gefügt wurde.

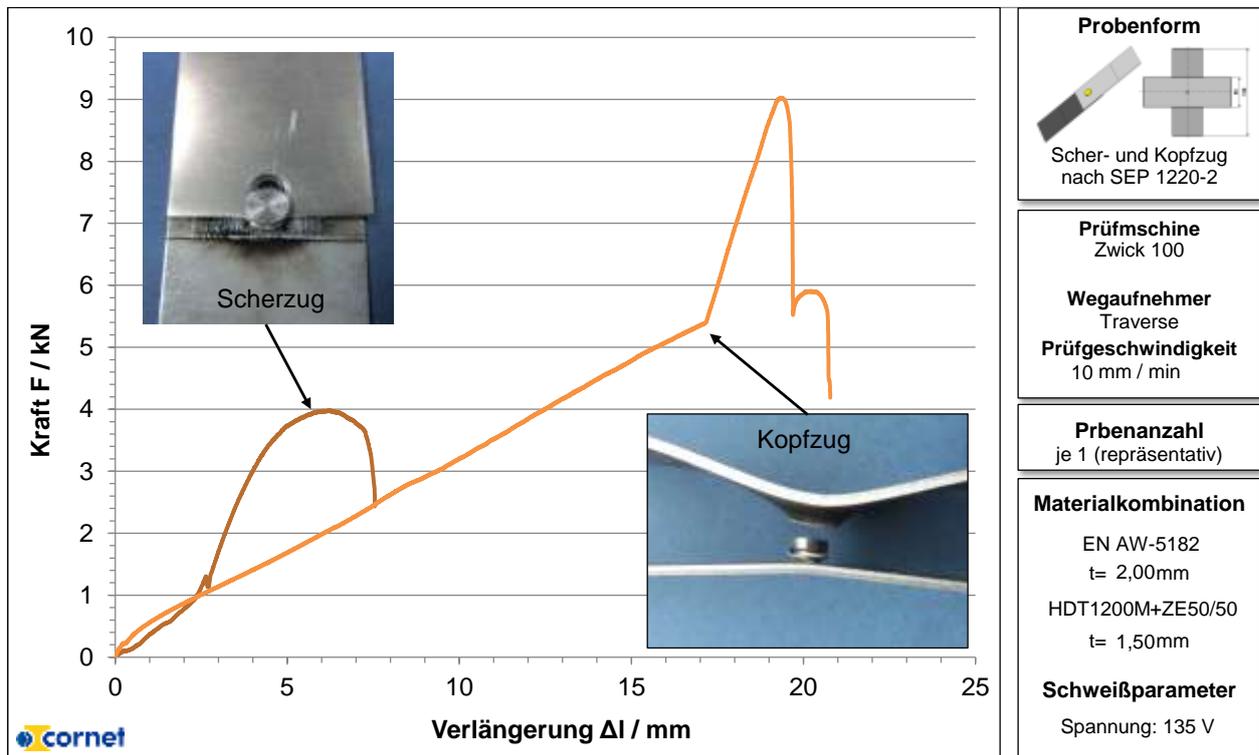


Abbildung 4: Gegenüberstellung der Kraft-Weg-Verläufe von repräsentativen lichtbogenelementgeschweißten Al-St-Verbindungen unter quasistatischer Scherzug- und Kreuz-Kopfzugbelastung

3.4 Vergleich des Tragverhaltens aller betrachteten thermisch basierten Fügeverfahren unter schlagartiger Lastaufbringung im Scherzug

Am Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik wurden forschungsstellenübergreifend Scherzugversuche mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 1 m/s an den vom gesamten Projektkonsortium hergestellten Proben (siehe **Abbildung 5**) durchgeführt. Die Ergebnisse wurden für die anschließende Gegenüberstellung aller betrachteten Fügeverfahren herangezogen, siehe **Abbildung 6**. Die Fügeverfahren wurden individuell anhand einer vorgegebenen Überlappungslänge von 16 mm optimiert. Die nachfolgend aufgeführten Ergebnisse unter schlagartiger Belastung zeigen auf leicht erhöhtem Prüfkraftniveau die entsprechenden Tendenzen bzw. Rangfolgen der individuell durchgeführten quasistatischen Scherzuguntersuchungen. Herausragende Prüfkräfte konnten für Materialkombination 1 (Aluminium/Stahl) im Fall der Reibelementschweißverbindungen ermittelt werden. Die positiven Effekte der in Abschnitt 2.3 und 3.2 genannten zweiten Scherebene sind hierbei direkt übertragbar. Für Materialkombination 2 (Aluminium/Kupfer) traten unter den punktförmigen Fügeverfahren die höchsten Prüfkräfte bei den rührreibpunktgeschweißten Proben auf. Deutlich höhere Prüfkräfte konnten erwartungsgemäß mit dem linienförmigen elektromagnetischen Pulsschweißen erreicht werden. Bezüglich Materialkombination 3 (Stahl/nichtrostender Stahl) sind die hohen Scherzugkräfte der mit Prozessband punktgeschweißten Proben bemerkenswert.

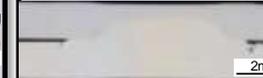
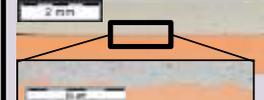
	MK1: Al/St	MK2: Al/Cu	MK3: St/nichtr.St
(LBES) Lichtbogen- elementschweißen 	 2mm	 2mm	 2mm
(RP) Punktschweißen mit Prozessband 	 4mm	 4mm	 2mm
(WES) Widerstands- elementschweißen 	 2mm	 2mm	 2mm
(EMPS) Elektromag- netisches Pulsschweißen 	 2mm	 2mm	n.a.
(RES) Reibelement- schweißen 	 4mm	 2mm	n.a.
(RRPS) Rührreib- punktschweißen 	n.a.	 4mm	n.a.
(RPS) Reibpunkt- schweißen 	 2mm	 2mm	n.a.
(LS) Laserstrahl- schweißen 	n.a.	 0.5mm	 2mm
Benchmark: Mech- anisches Fügen 	 2mm	 4mm	n.a.

Abbildung 5: Übersicht aller im Verbundprojekt betrachteten Werkstoffkombinationen und anwendbaren Verbindungstechnologien im Schliffbild (Halbhohlstanznieten und Clinchen dienten als mechanische Benchmarkverfahren)

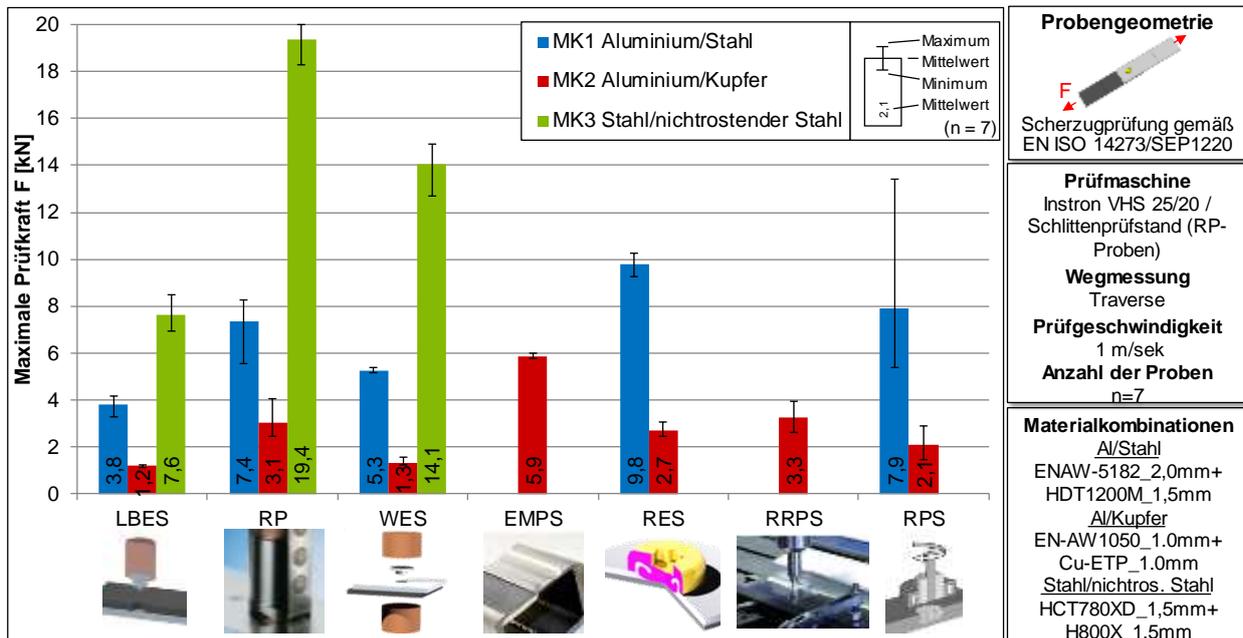


Abbildung 6: Gegenüberstellung der maximalen Scherzugkräfte der eingesetzten Fügeverfahren für die jeweils möglichen Werkstoffkombinationen unter schlagartiger Belastung (1 m/s)

3.5 Vergleich der Dauerfestigkeiten unter schwingender Lastaufbringung im Scherzug

Für alle Verbindungen, die gefügt werden konnten, wurden an der SLV Halle Schwingversuche durchgeführt und die Ergebnisse als Wöhlerlinien dargestellt. Die Ermüdungsfestigkeiten wurden mit dem Perlschnurverfahren ermittelt [5]. Je Schweißnahtkonfiguration wurden mehrere Proben mit unterschiedlicher Oberlast geprüft und die übertragenen Schwingspiele N registriert. Die Prüfungen erfolgten auf einem Resonanzpulsler, als Abschaltkriterium wurde ein Eigenfrequenzabfall von $\Delta f = 5$ Hz gewählt. Das Spannungsverhältnis $R = 0,1$ wurde innerhalb einer Wöhlerlinie für jede Versuchsreihe konstant gehalten. Die Proben wurden hauptsächlich im Bereich der Zeitfestigkeit geprüft. Alle Einzelversuche wurden parallel zur Ausgleichsgeraden zu $N = 2 \cdot 10^6$ Schwingspielen verschoben, um die Streuung der Spannung T_s zu ermitteln. In den Einzeldiagrammen wurde eine normierte Streuspanne von $T_s = 1:1,50$ verwendet [6], da die realen Streuungen bei einigen Wöhlerlinien sehr gering waren. Mit Hilfe dieser Streuung T_s wurden die Wöhlerlinien mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{u}} = 90$ % angegeben und in **Abbildung 7** dargestellt. Die zum Teil sehr unterschiedlichen Fügezonengeometrien führen nur zu bedingt vergleichbaren Ergebnissen. So wurde z.B. beim Reibpunktschweißen zwischen Stahl und Aluminium durch den Niederhalter eine Lötverbindung unterhalb des Niederhalters zwischen EN AW-5182 und dem Zink des HDT1200M erzeugt, was zu sehr großen Anbindungsquerschnitten führte und die hohe Oberkraft von 2,29 kN erklärt. Dieser Effekt ist als ein prozessbedingtes und -begleitendes Nebenprodukt zu sehen. Zusammenfassend lässt sich ableiten, dass die Ermüdungsfestigkeit mit der Grundwerkstofffestigkeit des versagenden Fügepartners korreliert, d.h. eine Verbindung mit reinem Aluminiumwerkstoff (Al/Cu) führt zu geringeren Festigkeiten als die Verbindung mit legiertem Aluminiumwerkstoff (Al/St).

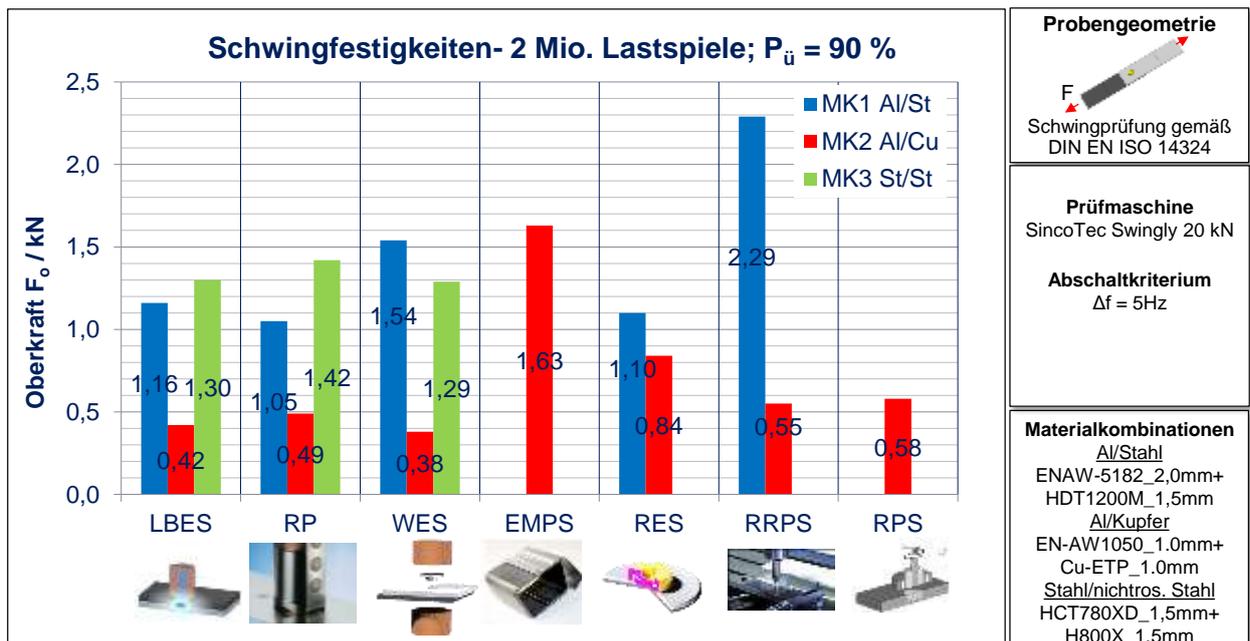


Abbildung 7: Gegenüberstellung der erreichten Oberkräfte der unterschiedlichen Verbindungen bei 2 Mio. Lastwechseln aufgeteilt nach den eingesetzten Fügeverfahren

4 Schlussbemerkungen

Im Rahmen dieser Ausführungen wurden exemplarische Ergebnisse anhand von drei Materialkombinationen zu den Verfahren Reibelement-, Widerstandselement- und Lichtbogenelementschweißen dargestellt. Dabei wurde auf die prinzipielle Vorgehensweise der Verfahrensoptimierung sowie auf die Charakterisierung des Tragverhaltens eingegangen. Die drei Verfahren mit Hilfsfügeelement weisen eine gute Anwendbarkeit bezüglich der ausgewählten Werkstoffkombinationen auf. So konnte lediglich das Reibelementschweißen nicht auf die Materialkombination Stahl/nichtrostender Stahl aufgrund der nicht möglichen Penetrierbarkeit der hochfesten Fügeelementwerkstoffe appliziert werden. Die abschließende Gegenüberstellung der mechanischen Eigenschaften aller im Verbundprojekt betrachteten Fügeverfahren ermöglicht einem potenziellen Anwender eine prinzipielle Verfahrensauswahl. Diese kann mit Hilfe des Abschlussberichtes weiter spezifiziert werden.

Danksagung

Das Cornet-IGF-Vorhaben Nr. 00.108 E (DVS-Nr. 05.056) der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Wir bedanken uns für die Förderung dieser Forschungsarbeit. Die Autoren bedanken sich für diese Förderung und Unterstützung.

Schrifttum

- [1] Hahn, O.; Meschut G.; Olfermann, T.; Süllentrop, S.; Janzen, V.: Fügeverfahren in hybriden Leichtbaustrukturen. In: Friedrich, H. (Hrsg.): Leichtbau der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2013.
- [2] Meschut, G.; Hahn, O.; Olfermann, T.: Joining technologies for multi-material design – a key to efficient future mobility. Tagungsband Materialien des Karosseriebaus 2012, Automotive Circle International / Vincentz Network Hannover, Bad Nauheim, 11.05.2012.
- [3] Meschut, G.; Olfermann, T.; Janzen, V. Matzke, M.: Vergleich innovativer thermischer Fügeverfahren zum Verbinden von ultrahöchstfesten Stählen in Mischbaustrukturen. Tagungsband DVS-Congress 2013, Essen, 21.09.2013.
- [4] Alber, U.: Reibelementschweißen - innovatives Fügeverfahren für den Karosserie-Mischbau. Vortrag auf der 4. VDI-Fachkonferenz Fügen im Automobilbau, Eisenach, 27.-28. Januar 2015.
- [5] Hobbacher, A.: Zur Auswertung von Schwingfestigkeitsversuchen an Schweißverbindungen Zeitschrift Schweißen und Schneiden 4-1977, S. 143-146
- [6] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit, Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin; Heidelberg; New York; Hongkong; London; Mailand; Paris Tokio 2002

Bildunterschriften

Abbildung 1: Verfahrensablauf beim Widerstandselementschweißen (oben) [2]; Verfahrensablauf beim Lichtbogenelementschweißen (mitte) [3]; Verfahrensablauf beim Reibelementschweißen (unten)

Abbildung 2: Gegenüberstellung der maximalen Prüfkräfte und Energieaufnahmen von widerstandselementgeschweißten Al-St-Proben bei unterschiedlichen Schweißzeiten unter quasistatischer Scherzugbelastung

Abbildung 3: Gegenüberstellung der Kraft-Weg-Verläufe von repräsentativen reibelementgeschweißten (grün), reibelementschweißgeklebten (orange) und widerstandselementschweißgeklebten (schwarz) Al-St-Verbindungen unter quasistatischer Scherzugbelastung

Abbildung 4: Gegenüberstellung der Kraft-Weg-Verläufe von repräsentativen lichtbogenelementgeschweißten Al-St-Verbindungen unter quasistatischer Scherzug- und Kreuz-Kopfzugbelastung.

Abbildung 5: Übersicht aller im Verbundprojekt betrachteten Werkstoffkombinationen und anwendbaren Verbindungstechnologien im Schliffbild (Halbhohlstanzen und Clinchen dienten als mechanische Benchmarkverfahren).

Abbildung 6: Gegenüberstellung der maximalen Scherzugkräfte der eingesetzten Fügeverfahren für die jeweils möglichen Werkstoffkombinationen unter schlagartiger Belastung (1 m/s)

Abbildung 7: Gegenüberstellung der erreichten Oberkräfte der unterschiedlichen Verbindungen bei 2 Mio. Lastwechseln aufgeteilt nach den eingesetzten Fügeverfahren