

# Verbesserte Abbildungsgenauigkeit bei der Simulation von Umformfügeverbindungen durch geeignete Kennwertermittlung

R. Neugebauer, S. Dietrich, C. Kraus, M. Israel

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz

## 1 Einführung

FEM-Simulationen sind wichtige Hilfsmittel zur Verkürzung von Entwicklungszeiten, nicht nur im Bereich der Dimensionierung von Bauteilen sondern auch bei der Auslegung von Prozessen zu ihrer Herstellung. Die Simulation von Umformfügeverfahren erlaubt die schnelle Beurteilung der Fügbarkeit in Abhängigkeit von der zu fügenden Werkstoff- und Dickenkombination, detaillierte Analysen von beliebigen Zwischenstufen der Prozesse und die Optimierung der Werkzeuggestaltung. Im Gegensatz zu experimentellen Untersuchungen, bei denen alle Einflussparameter statistischen Schwankungen unterliegen, können im Simulationsmodell zur Untersuchung des Einflusses eines Parameters alle anderen Parameter ohne Schwankungen konstant gehalten werden. Darüber hinaus können mit vergleichsweise geringem Aufwand Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden, bei denen der Einfluss schwankender Prozessbedingungen auf die Herausbildung der Verbindung untersucht wird, um Aussagen über die Prozessstabilität unter Serienbedingungen treffen zu können. Ein weiteres Einsatzfeld der FEM-Berechnungen ist die Belastungssimulation gefügter Verbindungen zur Abschätzung der ertragbaren Beanspruchungen in den verschiedenen Lastfällen und zur Vorhersage des Versagensverhaltens der Verbindungen.

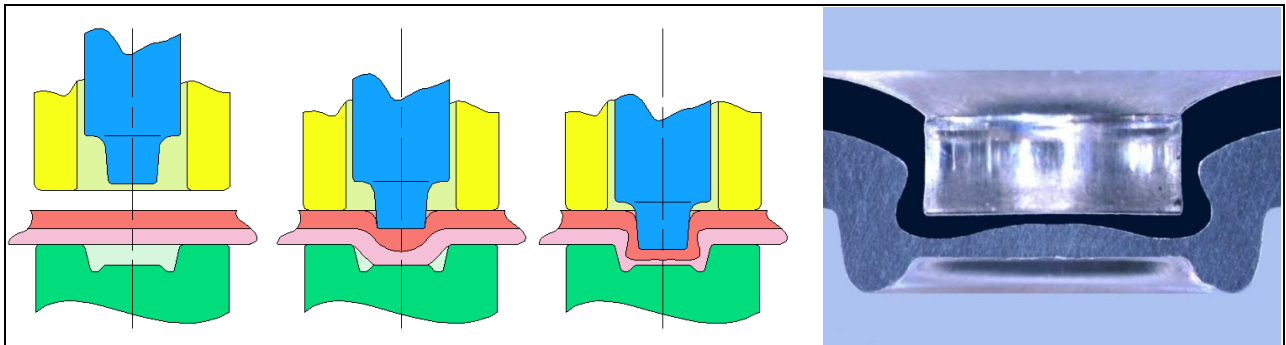
Bei der Vorbereitung des FEM-Modells zählen die Fließkurven der zu verbindenden Werkstoffe zu den wichtigsten Kenngrößen für die Abbildung des Umformvorgangs und der Eigenschaften umformgefügter Verbindungen. Ungenauigkeiten in diesen Eingangsdaten können sich bei der FEM-Simulation der Umformfügeprozesse und bei der Belastungssimulation der Verbindungen signifikant auf das Berechnungsergebnis auswirken und die Anfangsabweichung vervielfachen.

## 2 Umformfügen

Umformfügeverfahren wie beispielsweise das Clinchen oder das Stanznieten werden zum Verbinden von Blechbauteilen eingesetzt. Durch ein lokales Umformen der zu verbindenden Bauteile und gegebenenfalls durch das Umformen von Hilfsfügeteilen (z.B. Stanzniete) wird eine unlösbare Verbindung hergestellt. Es können alle umformbaren Werkstoffe unabhängig von ihrer Schweißeignung miteinander verbunden werden. Die Verbindungen werden ohne Wärmeeinwirkung und somit auch ohne den damit verbundenen Wärmeverzug hergestellt. Die Dicke der zu verbindenden Einzelbauteile liegt meist im Bereich von 1-3 mm.

Beispielhaft soll im Folgenden kurz das Umformfügeverfahren Clinchen etwas näher erläutert werden. Beim Clinchen, auch Durchsetzfügen genannt, werden die übereinander angeordneten Fügeteile mit Hilfe eines Clinchstempels und einer Matrize lokal durchgesetzt bzw. eingesenkt und anschließend gestaucht. Über die, auf die jeweilige Fügepaarung abgestimmte Werkzeuggeometrie

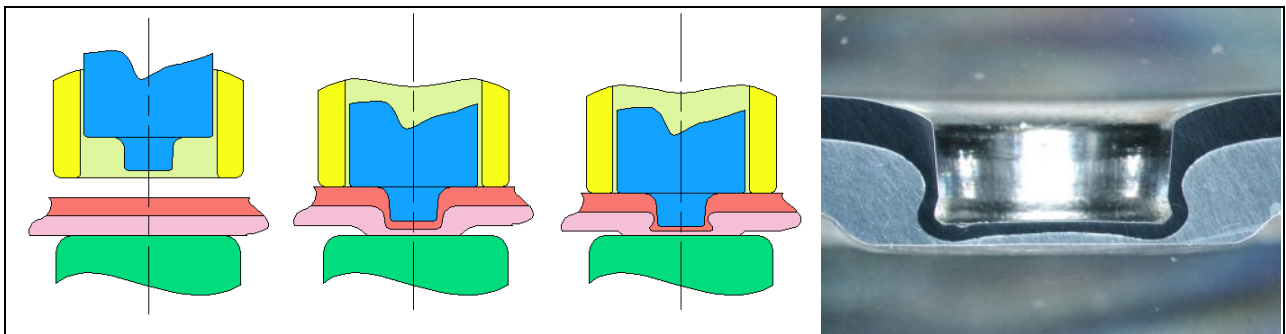
wird der Werkstofffluss so gelenkt, dass es zur Ausbildung eines Hinterschnittes kommt, welcher die Teile kraft- und formschlüssig verbindet (vgl. **Bild 1**).



**Bild 1:** Clinchen mit konturierter Matrize (links: Prinzip; rechts: Schweißbild)

Verbindungen zwischen artfremden Werkstoffen sind ebenso herstellbar wie Verbindungen artgleicher Werkstoffe. Typische Anwendungen des Clinchens finden sich im Fahrzeugbau, im Klima- und Lüftungsbau sowie in der Haushaltsgeräte- und Elektroindustrie.

Es kommen beim Clinchen verschiedene Matrizenausführungen zum Einsatz. Neben der in **Bild 1** gezeigten Variante mit einer einteiligen konturierter Matrize und Varianten mit mehrteiligen öffnenden Matrizen waren in den letzten Jahren insbesondere Varianten mit flachem Gegenwerkzeug Gegenstand von umfangreichen Entwicklungsarbeiten [1, 2]. In **Bild 2** ist das Matrizenlose Clinchen dargestellt, bei welchem die konturierte Matrize durch einen flachen Amboss ersetzt wird.



**Bild 2:** Matrizenloses Clinchen (links: Prinzip; rechts: Schweißbild)

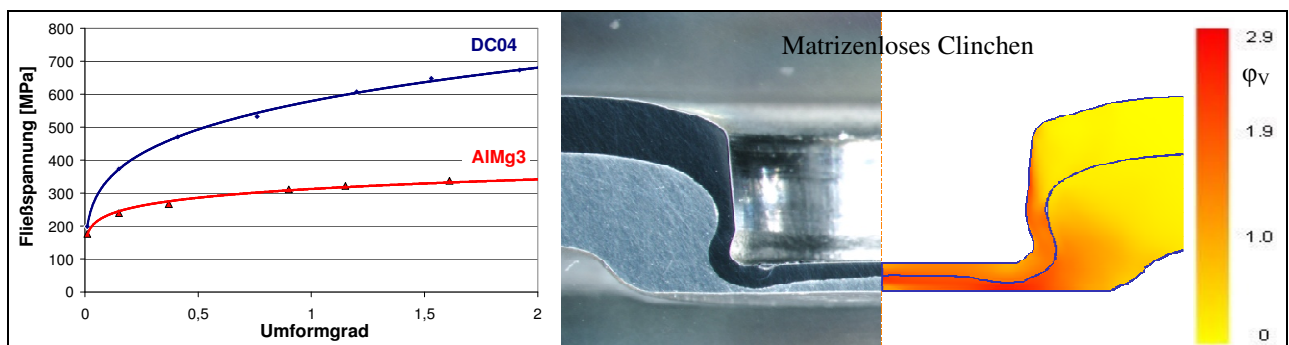
### 3 Fließkurven für die Simulation von Umformfügeverbindungen

Bei den Umformfügeverfahren treten im Verbindungsbereich sehr hohe Umformgrade auf, welche lokal Werte von  $\varphi > 2$  annehmen. Um die Herausbildung der Verbindungen während des Fügeprozesses und die Eigenschaften der erzeugten Verbindungen in der FEM-Simulation realitätsnah abbilden zu können, benötigt man genaue Fließkurven für die jeweils zu verbindenden Werkstoffe bis hin zu diesen hohen Umformgraden. Fließkurven für dünne Blechwerkstoffe können in einfachen Zugversuchen bis zu Umformgraden von  $\varphi \approx 0,3$  oder in aufwändigeren geschichteten Zylinderstauchversuchen bis zu  $\varphi \approx 0,8$  ermittelt werden. Der weitere Verlauf der Fließkurve wird üblicherweise extrapoliert, wobei die ermittelten Fließkurven sich in Abhängigkeit vom gewählten Extrapolationsansatz stark voneinander unterscheiden können [3].

Ein mögliches Verfahren zur Ermittlung verlässlicher Fließkurven bis zu hohen Umformgraden ist der Zugversuch an durch Walzen vorverfestigten Proben [4]. Als Fließspannung für den jeweils durch Walzen der Proben eingestellten Umformgrad wird die im anschließenden Zugversuch ermittelte Streckgrenze der Proben angenommen. Auf diese Weise können für Bleche die Fließspannungen experimentell bis zu Umformgraden von  $\phi \approx 2$  ermittelt werden [2, 4]. Da pro Einzelversuch immer nur ein Wertepaar aus Umformgrad und Fließspannung ermittelt werden kann, ist die Aufnahme einer kompletten Fließkurve jedoch vergleichsweise aufwendig. Vereinfachen kann man den Prozess, indem man die Zugversuche für durch Walzen vorverfestigte Proben nur für ausgewählte Stützstellen bei hohen Umformgraden durchführt und dann aus den zahlreich verfügbaren Extrapolationsansätzen einen, dem jeweiligen Werkstoffverhalten angemessenen Ansatz für die Extrapolation der mit herkömmlichen Versuchen ermittelten Anfangsfließkurve auswählt. Zu beachten ist, dass die Proben beim Walzen einer Druckbeanspruchung unterliegen, aber im anschließenden Zugversuch einer Zugbeanspruchung ausgesetzt werden. Einige Werkstoffe, wie beispielsweise Magnesiumlegierungen oder moderne hoch- und höchstfeste Stähle zeigen jedoch eine starke plastische Anisotropie, d.h. eine große Abhängigkeit des Verfestigungsverhaltens vom Spannungszustand. Da beim Umformfügen überwiegend Druckbeanspruchungen auftreten, ist eine Beschreibung des Fließverhaltens über eine mit Zugversuchen ermittelte Fließkurve nur bei Werkstoffen ohne ausgeprägte plastische Anisotropie zulässig.

#### 4 Simulation von Umformfügeverfahren

Durch die zuverlässige Ermittlung der Fließkurvendaten wird es möglich, das Umformfügen in der FEM-Simulation mit einer sehr hohen Genauigkeit abzubilden. In **Bild 3** ist am Beispiel des Matrizenlosen Clinchens die gute Übereinstimmung zwischen der berechneten und der tatsächlichen Verbindungsherausbildung exemplarisch dargestellt.

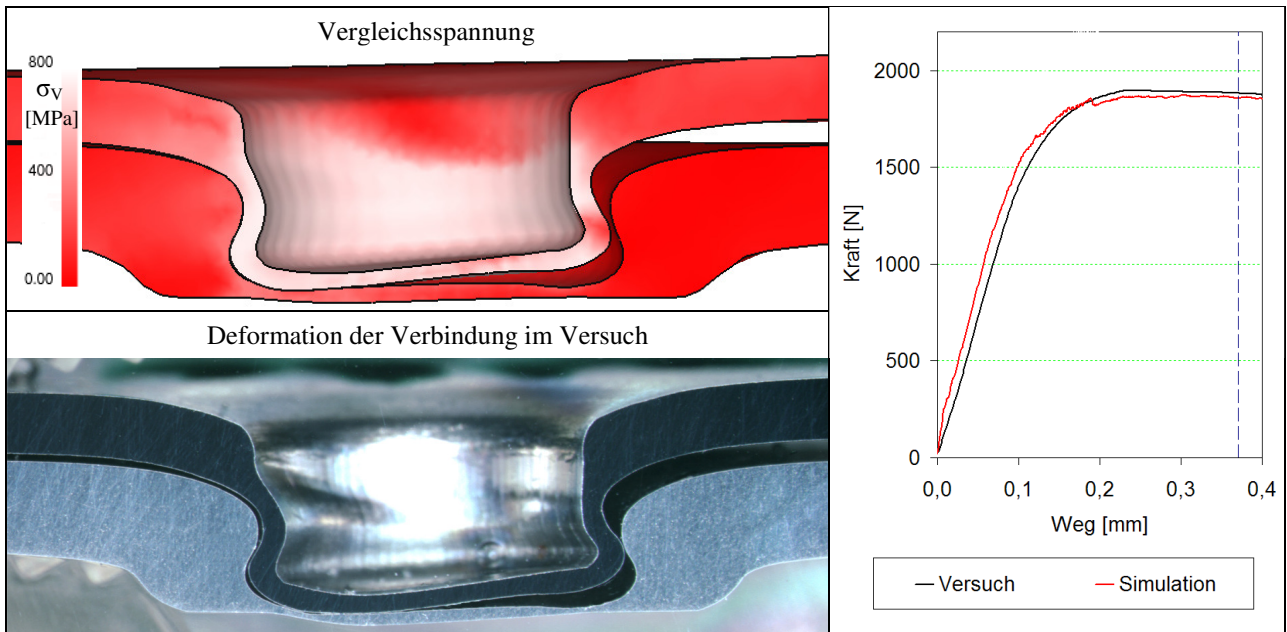


**Bild 3:** Fließkurven ermittelt durch Zugversuche an vorgewalzten Proben (links) und Gegenüberstellung von Schlichtbild und Simulationsergebnis am Beispiel der Verbindung DC04; 1,00 mm + AlMg3; 1,50 mm (rechts)

Diese hohe Abbildungsgenauigkeit erlaubt es, den Prozess so detailliert zu untersuchen, wie es allein im Experiment nicht oder nur mit wesentlich größerem Aufwand möglich wäre. Über einfache Änderungen an den Basisdaten des Modells können die Einflüsse unterschiedlicher Werkzeuggeometrien oder Schwankungen der Werkstoffeigenschaften untersucht und der Fügeprozess bzgl. seiner Prozessfähigkeit analysiert werden.

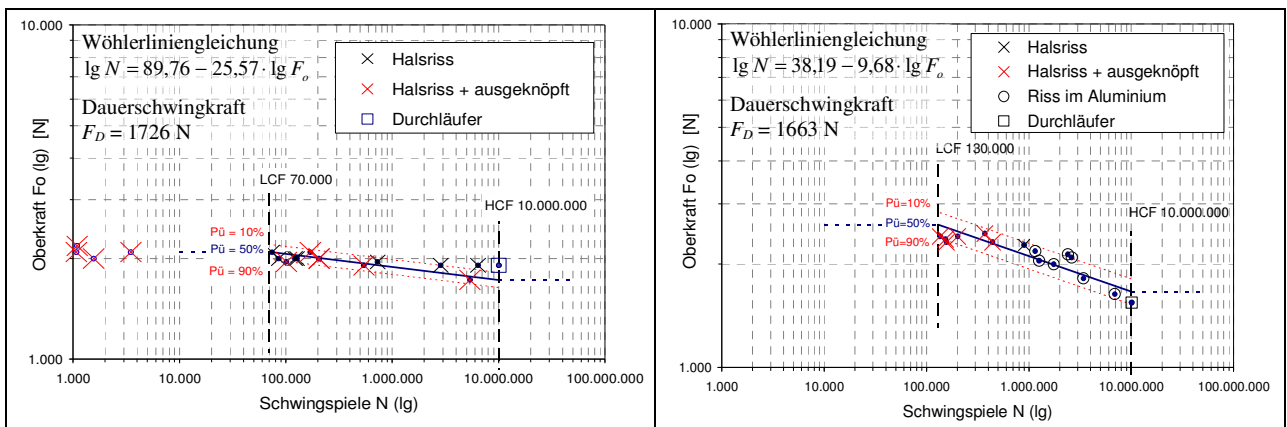
Ausgehend von den berechneten Verbindungen können zusätzliche FEM-Simulationen durchgeführt werden, mit denen das Verformungs- und Versagensverhalten der Verbindungen unter

Belastung untersucht wird. Bei guter Übereinstimmung zwischen der Simulation des Fügeprozesses und der Realität kann auch bei diesen nachgelagerten Simulationen zur Ermittlung von Verbindungseigenschaften eine hohe Abbildungsgenauigkeit erreicht werden. In **Bild 4** ist exemplarisch die Untersuchung einer matrizenlos geclinchten Verbindung unter Scherzugbelastung gezeigt. Wie man erkennen kann, wird die im Versuch ermittelte Kraft-Weg-Kurve in der Simulation sehr genau wiedergegeben. Auch das im Versuch beobachtete Versagensverhalten weist eine große Übereinstimmung mit den berechneten Ergebnissen auf.



**Bild 4:** Scherzugversuch an einer matrizenlos geclinchten Verbindung (DC04; 1,00 mm + AlMg3; 1,50 mm, Stempeldurchmesser 5,00 mm) – links oben: Simulation; links unten: Querschliff; rechts: Kraft-Weg-Verlauf

Von besonderem Interesse sind Ergebnisse aus dem Schwingversuch, die im Folgenden vorgestellt werden sollen. In den Untersuchungen wurden zwei Clinchverfahren miteinander verglichen. Zum einen das Clinchen mit konturierter Matrize (vgl. **Bild 1**) und zum anderen das matrizenlose Clinchen (vgl. **Bild 2**). Es zeigte sich, dass die Wöhlerlinie bei der matrizenlos geclinchten Verbindung mit einem k-Faktor von  $k > 25$  deutlich flacher verläuft als die Wöhlerlinie der mit konturierter Matrize geclinchten Verbindung mit dem k-Faktor von  $k < 10$  (vgl. **Bild 5**).

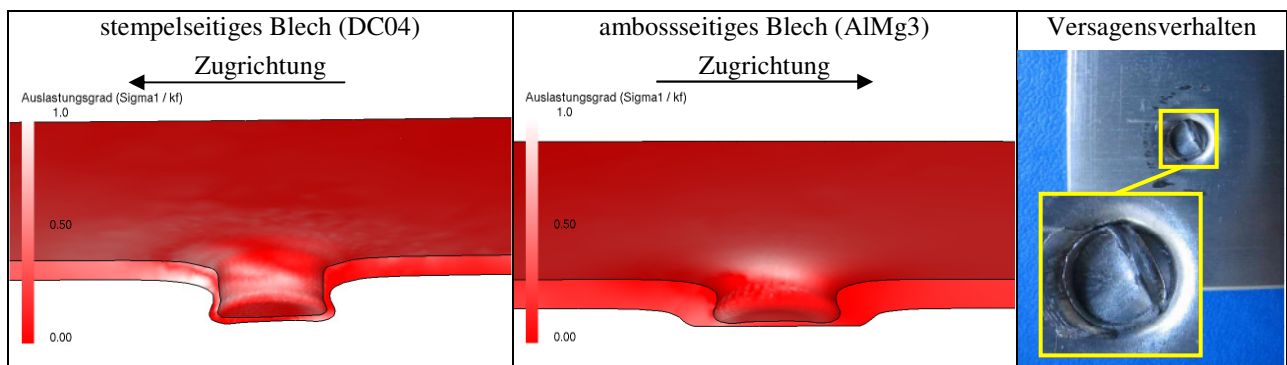


**Bild 5:** Wöhlerlinie für das Matrizenlose Clinchen (links) und das Clinchen mit konturierter Matrize (rechts) bei  $R = 0,1$  (Verbindung DC04; 1,00 mm + AlMg3; 1,50 mm, Stempeldurchmesser 5,00 mm)

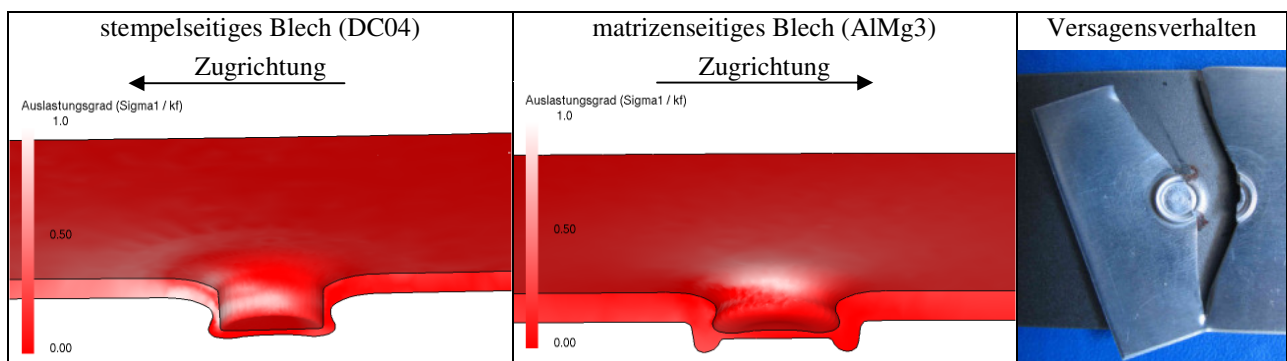
Eine Analyse des Versagensverhaltens zeigt, dass die matrizenlos geclinchten Verbindungen stets im Stahlblech, im Halsbereich der Verbindung reißen (vgl. **Bild 6**, rechts). Die mit konturierter Matrize geclinchten Verbindungen versagen dagegen bei niedrigen Lasthorizonten im matrizenseitigen Aluminiumblech (vgl. **Bild 7**, rechts).

Zur Untersuchung und Analyse des beobachteten Versagensverhaltens unter schwingender Beanspruchung können ebenfalls FEM-Simulationen zum Einsatz kommen. Während vollständige realitätsgetreue Simulationen des gesamten Zykluslastversuches aufgrund der hohen Lastwechselzahl unpraktikabel sind, können über eine einfache quasistatische Belastungssimulation und die Analyse der Spannungsverteilung unter Last oft bereits Aussagen über kritische Lasthorizonte und den Ort des zu erwartenden Rissstarts getroffen werden.

Besondere Berücksichtigung erfordert bei der Bewertung der Spannungen die Tatsache, dass bei der Herstellung der Verbindungen in einigen Bereichen sehr hohe Umformgrade erreicht werden (vgl. **Bild 3**, rechts), die zu einer lokal stark erhöhten Festigkeit führen. Dies hat zur Folge, dass das Versagen nicht notwendigerweise am Ort der höchsten Spannungen erfolgt. Um trotzdem eine Aussage über den Ort eines möglichen Versagens und die Höhe der ertragbaren Beanspruchungen treffen zu können, müssen also die bei der Belastung der Verbindung auftretenden Spannungen in Relation zu den jeweils lokal ertragbaren Spannungen gesetzt werden. In vergleichenden Betrachtungen hat sich gezeigt, dass insbesondere der als Auslastungsgrad bezeichnete Quotient aus dem Betrag der ersten Hauptspannung  $\sigma_1$  und der Fließspannung  $k_f$  gute Aussagen über das Versagensverhalten ermöglicht.



**Bild 6:** Auslastungsgrad einer matrizenlos geclinchten Verbindung (DC04; 1,00 mm + AlMg3; 1,50 mm, Stempeldurchmesser 5,00 mm) unter Einwirkung einer Scherzugkraft von 1750 N (links) und Versagensverhalten der Verbindung im Zyklustest (rechts)



**Bild 7:** Auslastungsgrad einer mit konturierter Matrize geclinchten Verbindung (DC04; 1,00 mm + AlMg3; 1,50 mm, Stempeldurchmesser 5,00 mm) unter Einwirkung einer Scherzugkraft von 1750 N (links) und Versagensverhalten der Verbindung im Zyklustest (rechts)

Vergleicht man den berechneten Auslastungsgrad für die beiden Verfahrensvarianten Matrizenloses Clinchen (vgl. **Bild 6**, links) und Clinchen mit konturierter Matrize (vgl. **Bild 7**, links) an der untersuchten Fügepaarung, kann man die in den Schwingversuchen beobachteten Effekte erklären. Bei der mit Matrize geclinchten Verbindung sind deutlich höhere Auslastungsgrade im Aluminium zu beobachten als bei der matrizenlos geclinchten Verbindung, was zu dem entsprechenden Versagen der mit Matrize geclinchten Verbindung durch Risse im Aluminiumbauteil führt. Bei der matrizenlos geclinchten Verbindung sind die Werte des Auslastungsgrades im ambosseitigen Aluminiumbauteil niedriger, was dann dazu führt, dass das Versagen der Verbindung auch unter schwingender Beanspruchung nicht im Aluminiumbauteil eintritt sondern im höher ausgelasteten Stahlteil und die Wöhlerlinie entsprechend flach verläuft.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Bei genauer Kenntnis des plastischen Werkstoffverhaltens und entsprechender Daten in Form von Fließkurven bis zu hohen Umformgraden von  $\varphi > 2$  ist es möglich die Verfahren des Umformfügens, wie beispielsweise das Clinchen oder das Stanznieten mit Hilfe der FEM-Simulation so abzubilden, dass eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Berechnung und Realität erreicht wird. Der Prozess der Verbindungsherausbildung kann im Modell ebenso verlässlich abgebildet werden wie das Verhalten der gefügten Verbindung unter Belastung.

Es wurde eine einfache Auswertegröße - der Auslastungsgrad - vorgestellt, die als Quotient aus dem Betrag der ersten Hauptspannung  $\sigma_1$  und der Fließspannung  $k_f$  das Verhältnis der unter Beanspruchung vorliegenden Spannungen zu den lokal ertragbaren Spannungen wiedergibt. Mit Hilfe des Auslastungsgrades sind Prognosen über das Versagensverhalten und die ertragbaren Beanspruchungen der Verbindungen unter zyklischer Last möglich.

Als Verfahren zur Fließkurvenermittlung für Blechwerkstoffe bis zu hohen Umformgraden von  $\varphi > 2$  hat sich für Werkstoffe ohne ausgeprägte plastische Anisotropie der Zugversuch an durch Walzen vorverfestigten Proben bewährt. Ziel weiterer Entwicklungen ist ein Versuch, bei dem die Fließkurven von Blechwerkstoffen in einem einfachen Druckversuch bis zu den benötigten hohen Umformgraden ermittelt werden können, um den Aufwand für die Fließkurvenermittlung zu reduzieren und auch Fließkurven zur Simulation der Umformfügeverfahren für Werkstoffe mit ausgeprägter plastischer Anisotropie bereitstellen zu können.

## 6 Literatur

- [1] M. Todtermuschke, *Verfahrensoptimierung zur Herstellung einer punktförmigen, mechanisch gefügten einseitig ebenen Verbindung*, Dissertation, TU Chemnitz, Shaker Verlag, 2006
- [2] S. Dietrich, *Grundlagenuntersuchungen zu neuen matrizenlosen Umformfügeverfahren*, Dissertation, TU Chemnitz, Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2007
- [3] D. Süße, V. Thoms, EFB-Bericht Nr. 187, Hannover, 2002
- [4] E. Doege, H. Meyer-Noelkemper, I. Saeed, *Fließkurvenatlas*, Carl Hanser Verlag, 1986