

Stanzstauchnieten – Numerische Nietentwicklung zur Qualifizierung des Fügeverfahrens für dünne Blechwerkstoffe

Einleitung

Die Themen Elektrifizierung der Mobilität, Autonomes Fahren, 3D-Druck von Bauteilen oder Industrie 4.0 stehen zumeist im Fokus aktueller Entwicklungen im Automobilbereich. Der Leichtbau zur Realisierung und Umsetzung von CO₂-Reduzierungsstrategien im Automobilbereich wird nur noch selten genannt. Nichtsdestotrotz ist der automobiler Leichtbau auch in einem elektrisch angetriebenen Fahrzeug energetisch sinnvoll. Besonders bei geringen Durchschnittsgeschwindigkeiten, wie sie häufig im Stadtverkehr vorkommen, zeigen sich die größten Effekte. Dieses Ergebnis ist in [1] anhand realer Versuche und abgeglicherer Simulationen ermittelt worden.

Eine Möglichkeit des Leichtbaus im Automobil ist der Karosserieleichtbau, da die tragende und schützende Struktur einen signifikanten Anteil am Gesamtfahrzeuggewicht beinhaltet. Als Leichtbauwerkstoffe sind unterschiedliche Aluminiumlegierungen, hoch- und höchstfeste Stähle, kohlefaserverstärkte Werkstoffe oder auch Magnesiumwerkstoffe im Einsatz. Ein Beispiel hierfür ist die aktuelle Karosserie des Audi Q8 [2]. Voraussetzungen für die Verwendung eines entsprechenden Werkstoffs bilden dabei häufig wirtschaftliche und technische Anforderungen am Einsatzort. Zu den technischen Anforderungen zählen neben dem reinen formgebenden Herstellen der Einzelblechbauteile auch das Verbinden dieser zu kleineren und größeren Baugruppen.

Bei Materialmischbauweisen ist die mechanische Fügetechnik Stand der Technik. Speziell beim Verbinden dünner Blechwerkstoffe ergeben sich allerdings Herausforderungen. Ziel des kürzlich abgeschlossenen Forschungsprojekts IGF 19249BR war es daher, ein neues Verfahren, das sogenannte Stanzstauchnieten, für das Fügen von Leichtbauwerkstoffen zu qualifizieren, grundlegende Zusammenhänge der Prozessgrößen systematisch zu ermitteln und damit die Anwendungsgrenzen der mechanischen Fügetechnik zu erweitern.

Stand der Technik und experimentelle Prozessanalyse

Die mechanischen Fügeverfahren sind nach DIN 8580 [3] Fügen sowie nach DIN 8593-5 [4] Fügen durch Umformen in die Untergruppe 4.5.1 Fügen durch Nietverfahren eingeordnet. Diese Gruppe umfasst alle Verfahren, bei denen die Fügepartner mit oder ohne Hilfsfügeteil teilweise bzw. komplett umgeformt werden oder nur das Hilfselement umgeformt wird.

Das prinzipielle Verfahrensprinzip des Stanzstauchnietens ist zunächst in Abbildung 1 dargestellt. Das Verfahren ist durch fünf Prozessschritte gekennzeichnet. Zu Beginn werden die Fügeteilpartner überlappend zwischen der Schneidmatrize und dem Niederhalter positioniert und mittels wirkender Niederhalterkraft zueinander fixiert (Abbildung 1, I.). Anschließend folgt durch den in Blechrichtung verfahrenen Nietstempel das Lochen der Fügeteile durch den Niet (Abbildung 1, II.). Die dabei entstehenden Butzen werden durch die Schneidmatrize abgeführt und der Nietkopf wird bei Einsatz einer Senkkopfgeometrie in das entstandene Loch eingeprägt, bis die stempelseitige Endlage des Niets erreicht ist (Abbildung

1, III.). Bis zu diesem Prozessschritt geschieht keine plastische Verformung des Niets. Nach einem Werkzeugwechsel auf der Unterseite von einer Schneid- zu einer Stauchmatrize (Abbildung 1, IV/V.) wird der Niet im letzten Prozessschritt angestaucht. Dabei entsteht eine form- und kraftschlüssige Verbindung zwischen dem Niet und den Füge­teilen. [3, 4]

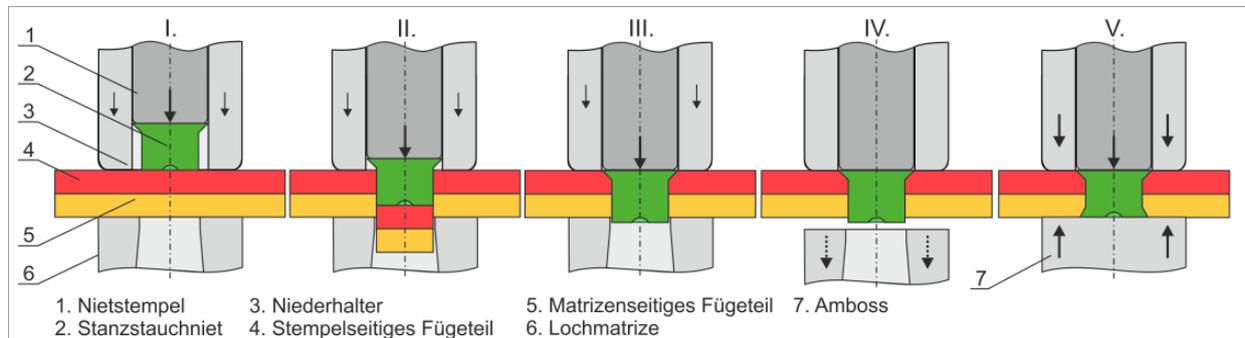


Abbildung 1: Verfahrensprinzip Stanzstauchnieten nach [3, 4]

Die wesentlichen Vorteile dieses Verfahrens liegen in der Verlagerung der Umformung in das Niete­lement und der daraus folgenden signifikanten Verringerung der Umformung der Füge­teile, wodurch die Gefahr von Rissbildung und Bruch gerade bei spröden Werkstoffen stark gemindert werden kann. Des Weiteren sinkt die Belastung der Bauteil­beschichtungen bei einer geringeren Umformung der Füge­teile. Ebenso ist die Möglichkeit einer beidseitigen Ebenheit der Füge­stellen bei entsprechender Nietauslegung möglich. Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist, dass mithilfe des Stanzstauchnietens die Flexibilität in Bezug auf die Füge­richtung erweitert wird, da dieses Verfahren sowohl die Füge­richtungen „fest“ bis „höchstfest“ in „weich“ sowie andersherum ermöglicht. Diese Vorteile bedingen allerdings aufgrund des erforderlichen Matrizen­wechsels einen Mehraufwand bei der Realisierung des zweistufigen Füge­prozesses.

Aufgrund der Vergleichbarkeit des Stanzstauchnietens zum etablierten mechanische Füge­verfahren Vollstanznieten dient dieses Verfahren als Referenz und wird im Folgenden genauer beschrieben. Das prinzipielle Verfahrensprinzip des Vollstanznietens wird in die Verfahrensschritte Positionieren (I.), Stanzen (II.) und Umformen (III.) eingeteilt und ist in Abbildung 2 dargestellt.

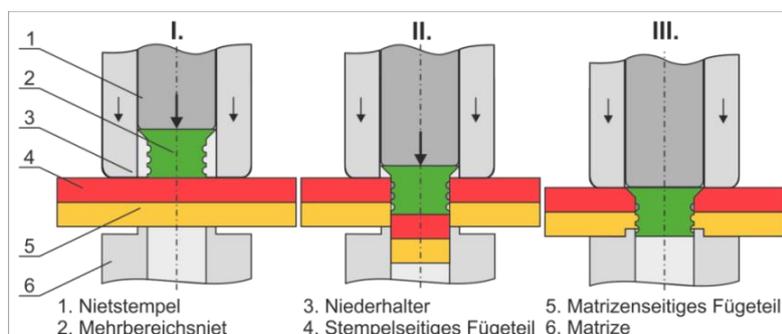


Abbildung 2: Verfahrensprinzip Vollstanznieten [5]

Im ersten Prozessschritt (Abbildung 2, I.) werden die Füge­partner zwischen Matrize und Niederhalter überlappend angeordnet und zwischen diesen fixiert. Anschließend stanzt der Niet, welcher als Schneidstempel fungiert, durch den herab­fahrenden Nietstempel ein Loch in beide Füge­partner (Abbildung 2, II.). Der herausgestanzte Butzen wird als Abfall durch die Schneidmatrize ab­geführt. Der letzte Prozessschritt wird durch das Umformen charakterisiert

(Abbildung 2, III.). Hier wird zunächst der Senkkopf des Vollstanznietes im stempelseitig angeordneten Blech eben eingeformt und anschließend der Prägering der Matrize in das matrizenseitige Blech hineingedrückt. Dadurch fließt der Werkstoff in die Schaftnuten des Vollstanznietes, womit der für die Fügeverbindung notwendige Hinterschnitt erzeugt wird. Der Niet wird hier nicht umgeformt. [6]

Bei Einsatz geringer Fügeblechdicken kommt es allerdings im Vollstanznietprozess beim Einprägen der Prägeringnut zu einer starken Verminderung der matrizenseitigen Blechdicke, sodass die Festigkeit der Verbindung unzureichend gering wird. Die Bemusterung der Referenzverbindung mit den Aluminiumknetlegierungen EN AW-6016 T4 ($t = 0,8 \text{ mm}$) in EN AW-6016 T4 ($t = 0,8 \text{ mm}$) zeigt Abbildung 3.

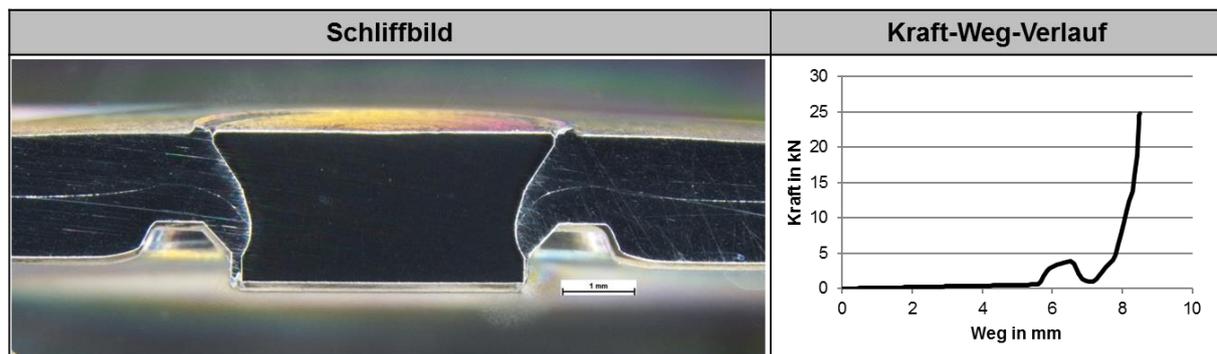


Abbildung 3: Prozessanalyse Vollstanznieten der Verbindung EN AW-6016 T4 in EN AW-6016 T4

Aufgrund der geringen Werkstoffdickenkombination wurde ein Einbereichsvollstanzniet mit einem Nietenddurchmesser $d_N = 4,0 \text{ mm}$ und einer Nietennlänge $l_N = 2,1 \text{ mm}$ verwendet. Die Vollstanznietmatrize hatte eine Prägeringbreite $b_{PR} = 1,0 \text{ mm}$ und eine zusätzliche Fase, um die Blechdickenminderung etwas zu kompensieren. Mit dieser Niet-Matrizen-Kombination wurde bei einer Fügekraft von $F = 25 \text{ kN}$ ein Hinterschnitt von $u_{1,2} = 0,12 \text{ mm}$ erzielt.

Weitere Probleme beim Fügen dieser Verbindung sind die geringen Hinterschnitthöhen, die gesamte Deformation der Fügepartner im Fügebereich sowie die Niethandhabung bei solchen Nietlängen-Nietdurchmesser-Verhältnissen infolge der Verdrehungsgefahr während der Zuführung im Fügeablauf selbst.

Aufbau und Validierung des Simulationsmodells

Auf Basis der experimentellen Prozessanalyse erfolgte der Aufbau und die Validierung eines 2D-rotationssymmetrischen Simulationsmodells in der FE-Software Deform V11. Die Werkstoffparameter wurden mithilfe von standardisierten Zugversuchen und Stauchversuchen ermittelt. Da der Zugversuch nur Kennwerte bis zu einem Umformgrad $\varphi \approx 0,2$ und der Stauchversuch Kennwerte bis zu einem Umformgrad $\varphi \approx 0,8$ liefert, müssen die Fließkurven für eine ausreichende Beschreibung in der Simulation durch Fließkurvenapproximationen erweitert werden. Als Ansatz wurde die Beschreibung nach HOCKETT-SHERBY (Formel 1, [7])

$$\sigma = C_1 - (C_1 - C_2) \cdot e^{-C_3 \cdot \varphi^{C_4}} \quad (1)$$

verwendet. Die Parameter C_1 bis C_4 sind werkstoffabhängig und werden über die Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt. Des Weiteren wurde die Reibung mit dem Reibfaktormodell (Formel 2, [8]) abgebildet.

$$\tau_R = m \cdot k_s \quad (2)$$

Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Reibschubspannung τ_R und die Schubfließspannung k_s über den Reibfaktor m proportional im Zusammenhang stehen. Der prinzipielle Aufbau des Simulationsmodells sowie das Deformationsverhalten der Objekte sind in Abbildung 4 dargestellt.

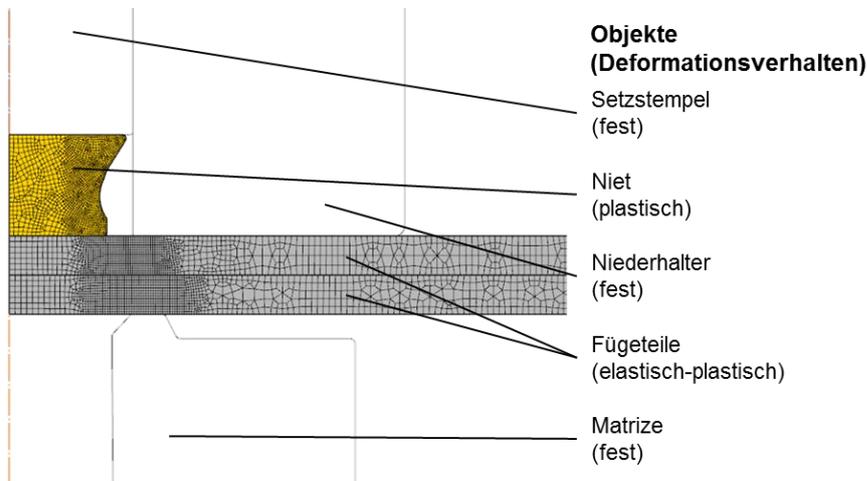


Abbildung 4: Aufbau des Simulationsmodells für das Vollstanznieten

Die Werkzeuge Fügestempel, Niederhalter und Vollstanznietmatrize wurden zur Vereinfachung und Reduzierung der Rechenzeit starr abgebildet. Der Vollstanzniet war plastisch modelliert und die Fügeteile elastisch-plastisch. Da ein ganzheitlich feines FE-Netz zu einer hohen Abbildgenauigkeit und gleichermaßen auch zu erheblich längeren Rechenzeiten führt, wurden sogenannte „Meshwindows“ benutzt. Diese sind spezielle Bereiche, in denen das FE-Netz lokal verfeinert ist. Dies betrifft vor allen Dingen den Bereich der Scherfläche der Fügeteile und den äußeren Randbereich des Vollstanznietes. Die Vorteile der lokalen Netzverfeinerung sind unter anderem, dass der Volumenverlust beim Trennvorgang durch Löschen der Elemente möglichst gering bleibt und zum anderen eine hohe Abbildgenauigkeit bei gleichzeitig verringerter Rechenzeit möglich ist. Für die Abbildung des Trennvorgangs wurde das FREUDENTHAL-Schädigungskriterium nach Formel 3 [9] verwendet.

$$D_{Freu} = \int \bar{\sigma} d\bar{\varphi} \quad (3)$$

Der Schädigungswert D_{Freu} ist hierbei als Integral der Vergleichsspannung $\bar{\sigma}$ über dem Vergleichsumformgrad $\bar{\varphi}$ definiert.

Das Ergebnis der Validierung ist in Abbildung 5 in Form der roten Kontur des Schliffbildes links und dem roten Graph der Kraft-Weg-Kurve rechts dargelegt. Sowohl im Schliffbild als auch im Kraft-Weg-Verlauf des Fügeprozesses konnte eine hinreichend genaue Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation erzielt werden. Damit wurde gezeigt, dass das Simulationsmodell des Stanzstauchnietens für die Nietentwicklung des Stanzstauchnietens geeignet ist.

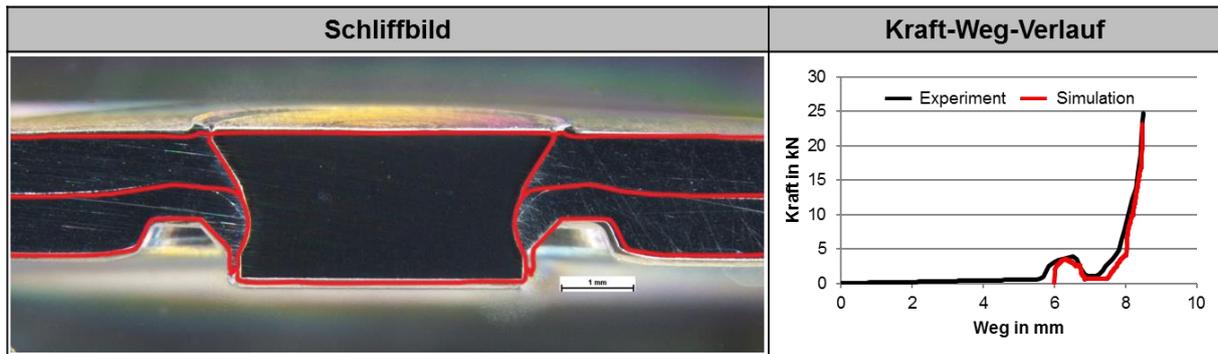
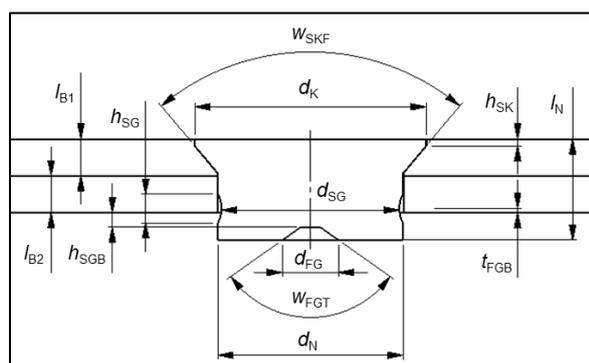


Abbildung 5: Ergebnis der Validierung des Simulationsmodells zum Vollstanznieten

Nietentwicklung Stanzstauchnieten

Für die Nietentwicklung wurde anschließend ein vereinfachtes Simulationsmodell des Stauchprozesses nach Abbildung 1, Prozessschritt V aufgebaut, damit eine Vielzahl Simulationsberechnungen in zeitlich vertretbarem Aufwand durchgeführt werden konnte. Als wesentliche Prozessparameter wurden die Nietgeometrie und der Nietwerkstoff untersucht. Die gesamte Geometrie der Verbindung sowie die Fließkurve des Nietwerkstoffs wurden parametrisiert und in definierten Bereichen variiert, dargestellt in Abbildung 6.



Variable Größen	
Durchmesser FG	d_{FG} 1,00 – 3,00 mm
Tiefe FG-Blech	t_{FGB} -0,20 – 0,80 mm
Winkel FG-Trapez	w_{FGT} 5,0 – 155,0 °
Tiefe SG	t_{SG} 0,05 – 0,15 mm
Höhe SG	h_{SG} 0,40 – 0,80 mm
Höhe SG-Blech	h_{SGB} -0,12 – 0,08 mm
Nennlänge Niet	l_N 2,00 – 2,60 mm
Gestauchte Nietlänge	Δl_{NST} 7,5 – 10,5 %
Fließkurvenparameter	C_1 360 – 1600
Fließkurvenparameter	C_2 0,05 – 0,32
Fließkurvenparameter	C_3 90 – 400

Abbildung 6: Parametrisierte Geometrie der Verbindung (links) und Parametermeterraum (rechts)

Die Abkürzung FG steht hierbei für Fußgeometrie und die Abkürzung SG für die Seitengeometrie des Niets. Die Nietfließkurve wurde hierbei mit dem Fließkurvenansatz nach LUDWIK-HOLLOMON (Formel 4, [10]) beschrieben.

$$\sigma = C_1 \cdot \varphi^{C_2} + C_3 \quad (4)$$

Die Parameter C_1 bis C_3 sind auch hier werkstoffabhängig und werden ebenfalls über die Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt. Das Stauchmaß Δl_{NST} ermittelt aus dem Zusammenhang aus Anfangsnietlänge l_N und Endnietlänge l_S nach Formel 5.

$$\Delta l_{NST} = 1 - \frac{l_S}{l_N} \quad (5)$$

Auf Basis des Variationsraums wurde anschließend eine Sensitivitätsanalyse mit 480 Variationen durchgeführt. Die Versuchsplanung erfolgte mithilfe des Latin Hypercube Samplings, da mit dieser Methode eine hohe Ergebnisqualität bei geringerer Versuchsanzahl erzielt werden kann [11, 12]. Nach erfolgter Berechnung der Einzelversuche entstand anschließend eine Punktwolke im Versuchsraum. Mithilfe der Regressionsanalyse auf Basis der Approximationsmethode Isotropic Kriging wurden Antwortflächen bestimmt, welche sich

bestmöglich an die Punktwolken annähern. Die Summe der Antwortflächen bilden hierbei ein sogenanntes übergeordnetes Metamodell. Mit diesem können beliebige Designpunkte im Versuchsraum vorausgesagt werden [13]. Je genauer dabei die Modellfunktion die reale Funktion abbildet, desto besser ist das Metamodell.

Um die Prognosefähigkeit und damit eine qualitative Bewertung von Metamodellen anhand einer unabhängigen statistischen Größe zu ermöglichen, wurde von [14] der „Coefficient of Prognosis“ (CoP) eingeführt. Dieser berechnet sich nach Formel 6

$$CoP = 1 - \frac{SS_{F.Vorhersage}}{SS_T} \quad (6)$$

Hierbei steht $SS_{F.Vorhersage}$ für die Summe aller quadratischen Vorhersagefehler. SS_T steht für die Gesamtbreite der Parameterstreuung. Die Vorhersagefehler werden auf der Grundlage der Kreuzvalidierung ermittelt. Hierfür wird aus der Gesamtheit der Daten ein kleiner Testdatensatz entnommen und mit dem Regressionsmodell, welches aus den restlichen Daten ermittelt wird, verglichen. Dabei gilt nach [15] ein totaler CoP-Wert von 80 % als ungefähre Grenzwert, bei dem durch Unterschreiten des Werts die Aussagekraft des gesamten Metamodells als unzureichend einzustufen ist. Neben dem totalen CoP-Wert werden darüber hinaus für jeden Input-Parameter die entsprechenden Einzel-CoP-Werte für jeden jeweiligen Outputparameter bestimmt. Je höher der Einzel-CoP-Wert ist, desto höher ist dessen Einfluss auf die Output-Größe. Hierbei können die Einzel-CoP-Werte durchaus in Summe über 100 % kommen.

Da bei der Sensitivitätsanalyse lediglich der Stauchprozess simuliert wurde, ist die Ersatzstanzkraft $F_{Stanz0.05}$ eingeführt worden. Sie ist so definiert, dass sie der Kraft bei einer radialen Deformation des Niets von $r_V = 0,05$ mm entspricht. Der Wert 0,05 mm entsprach der Hälfte des eingestellten Schneidspalts und sollte verhindern, dass der Niet im Stanzprozess unerlaubt weit aufspreizt und damit eine Beschädigung der Matrize verursachen könnte. Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse für die Zielgrößen Hinterschnitt $u_{1,2}$, Ersatzstanzkraft $F_{Stanz0.05}$ und Stauchkraft F_{Stauch} zeigt Abbildung 7.

Dargestellt sind jeweils im oberen Bereich die sogenannte CoP-Tabelle, welche alle Input-Parameter mit ihrem gewichteten Einfluss auf den Output-Parameter zeigt, und im unteren Bereich die 3D-Antwortfläche der jeweils beiden signifikantesten Einflussparameter auf den entsprechenden Output-Parameter. Bei den 3D-Grafiken sind alle anderen Parameter des Versuchsraums mit ihrem Mittelwert hinterlegt. Die signifikanten Einflussparameter beim Modell des Hinterschnitts $u_{1,2}$ sind der Durchmesser der Fußgeometrie d_{FG} und der Fließkurvenparameter C_3 . Der Hinterschnitt $u_{1,2}$ wird sowohl bei größerem Durchmesser der Fußgeometrie d_{FG} als auch bei kleineren Fließkurvenparameter C_3 größer. Wenn der Fließkurvenparameter C_3 sinkt, steigt das Umformvermögen der Nietgeometrie bei gleichbleibender Krafteinwirkung und kann damit einen größeren Hinterschnitt erzeugen. Allerdings sinkt mit kleinerem Fließkurvenparameter C_3 die Stanzkraft, sodass hier gegenläufige Zielfunktionen sichtbar werden. Bei der Stanzkraft $F_{Stanz0.05}$ ist der signifikante Einflussparameter ebenfalls der Fließkurvenparameter C_3 . So kann mit einem Nietwerkstoff mit hohem C_3 -Wert eine höhere Stanzkraft übertragen werden, bevor der Niet zu stark staucht und radial deformiert wird. Beim Modell der Stauchkraft F_{Stauch} ist der Fließkurvenparameter C_3 ebenfalls der signifikante Einflussparameter. Jedoch führt hier die höhere Stabilität des Niets

bei hohem C_3 -Wert zu einem höheren Kraftbedarf im abschließenden Stauchvorgang des Fügeprozesses.

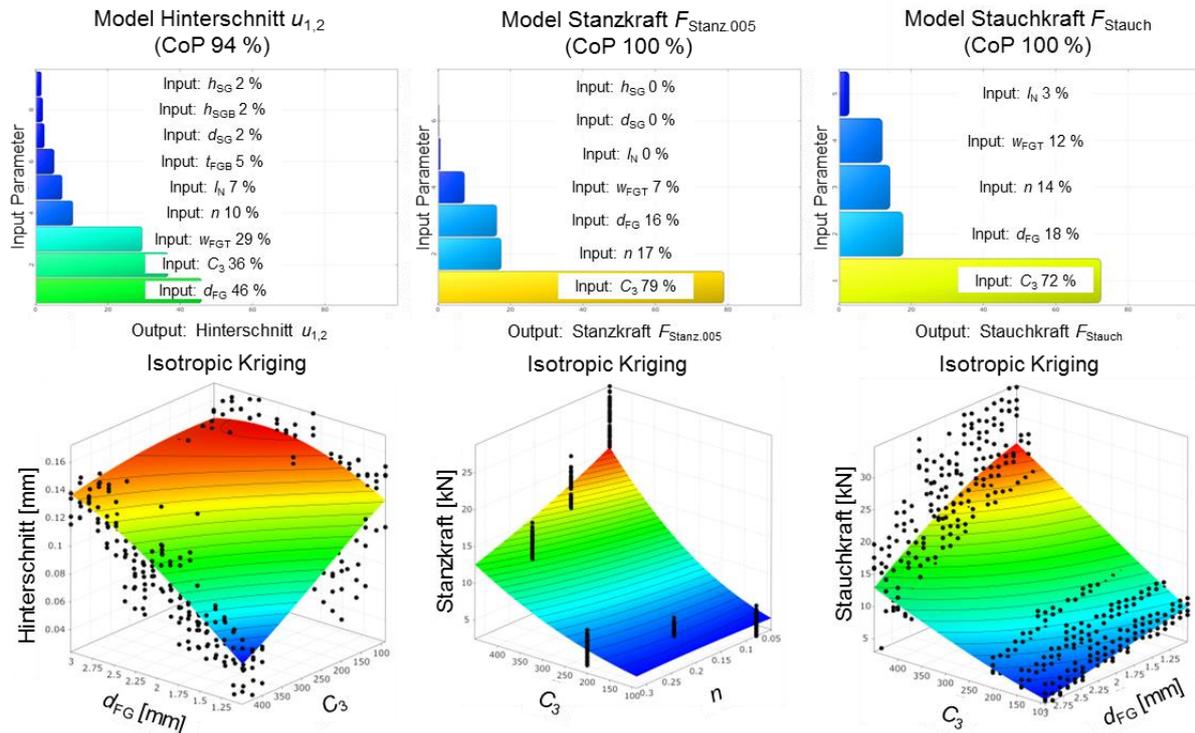


Abbildung 7: Metamodell der Sensitivitätsanalyse mit den Zielgrößen Hinterschnitt, Stanzkraft und Stauchkraft

Auf Basis dieser Analyse folgte, dass der Stanzstauchniet bei einer Auslegung aus dem Werkstoff EN AW-7075 T651 mit deren Fließkurvenparametern $C_1 = 680$ $C_2 = 0,10$ und $C_3 = 170$ und der erforderlichen Stanzkraft von 3,8 kN einen maximalen Durchmesser der Fußgeometrie $d_{FG} \leq 2,4$ mm haben darf, um einen sicheren Stanzprozess zu ermöglichen. Die finale Geometrie zeigt Abbildung 8.

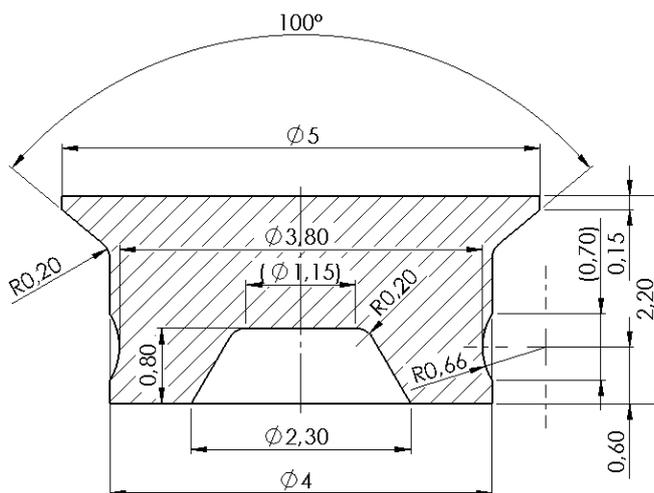


Abbildung 8: Abgeleitete Stanzstauchnietgeometrie zum Fügen dünner Werkstoffe

Anschließend erfolgte mit dieser Geometrie die Simulation des Stanzstauchnietprozesses. Der Simulationsaufbau sowie das Deformationsverhalten sind in Abbildung 9 dargestellt. Wie beim Modell des Vollstanznietens sind die Werkzeuge Fügestempel, Niederhalter und Matrize starr abgebildet worden. Zusätzlich ist ein Abstützring als starr hinzugekommen, der die

Fügepartner während des Matrizenwechsels weiterhin fixiert. Der Stanzstauchniet wurde nun ebenso wie die Fügeteile elastisch-plastisch modelliert. Ebenso wurden bei diesen Objekten „Meshwindows“ benutzt und für die Abbildung des Trennvorgangs mit dem FREUDENTHAL-Schädigungskriterium (Formel 3) verwendet.

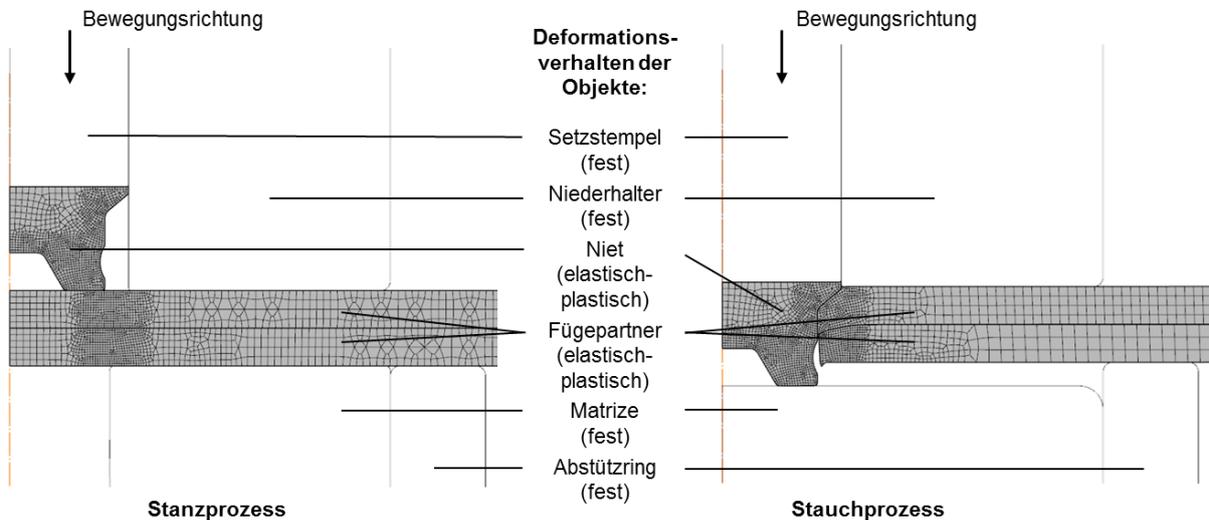


Abbildung 9: Simulationsaufbau für das Stanzstauchnieten

Im Ergebnis dieser Simulation konnte eine qualitätsgerechte Fügeverbindung mit einem Hinterschnitt von $u_{1,2} = 0,16$ mm erzeugt werden, dargestellt in Abbildung 10.

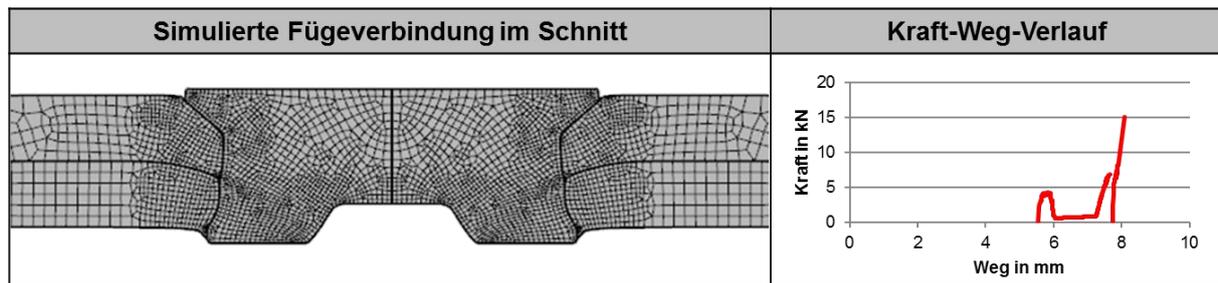


Abbildung 10: Ergebnis der Stanzstauchnietesimulation

Die Blechausdünnung im matrizenseitigen Fügepartner konnte nahezu komplett vermieden werden.

Stanzstauchnieten von dünnen Blechwerkstoffen

Im Folgenden wurden Niete gemäß technischer Zeichnung (siehe Abbildung 8) spanend gefertigt und experimentelle Bemusterungen durchgeführt. Das Ergebnis zeigt Abbildung 11.

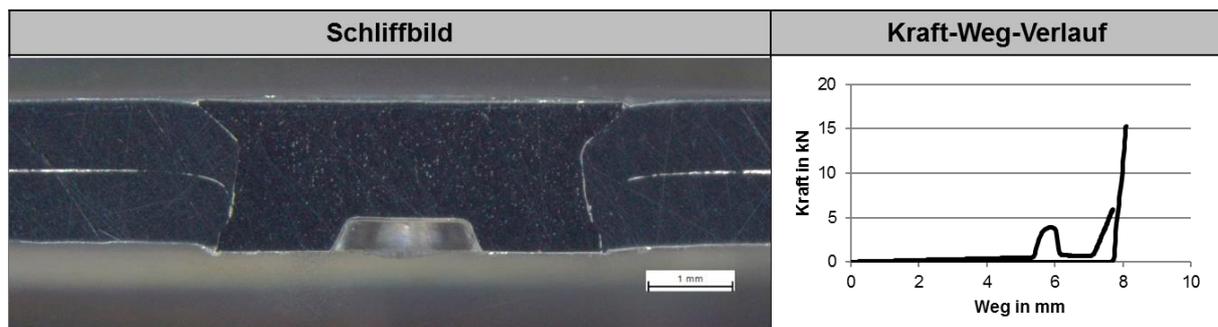


Abbildung 11: Experimentelles Bemusterungsergebnis der Stanzstauchnietverbindung

In guter Übereinstimmung zur Simulation konnte im Experiment bei einem Stauchmaß $\Delta_{NST} = 16,8\%$ sowohl im Schliff als auch im Kraft-Weg-Verlauf der Verbindung eine qualitätsgerechte Fügeverbindung mit einem Hinterschnitt $u_{1,2} = 0,15\text{ mm}$ und einer Stauchkraft $F_{\text{Stauch}} = 15,2\text{ kN}$ erzeugt werden.

Auf Basis der experimentellen Fügeversuche wurden anschließend Prüfungen der quasistatischen und zyklischen Verbindungsfestigkeit durchgeführt. Die Prüfungen erfolgten gemäß Merkblatt DVS/EFB 3480 [16] an Einpunkt-Flachproben. Das Ergebnis der quasistatischen Verbindungsprüfung im Scherzug und Kopfzug für das Vollstanz- und Stanzstauchnieten zeigt Abbildung 12.

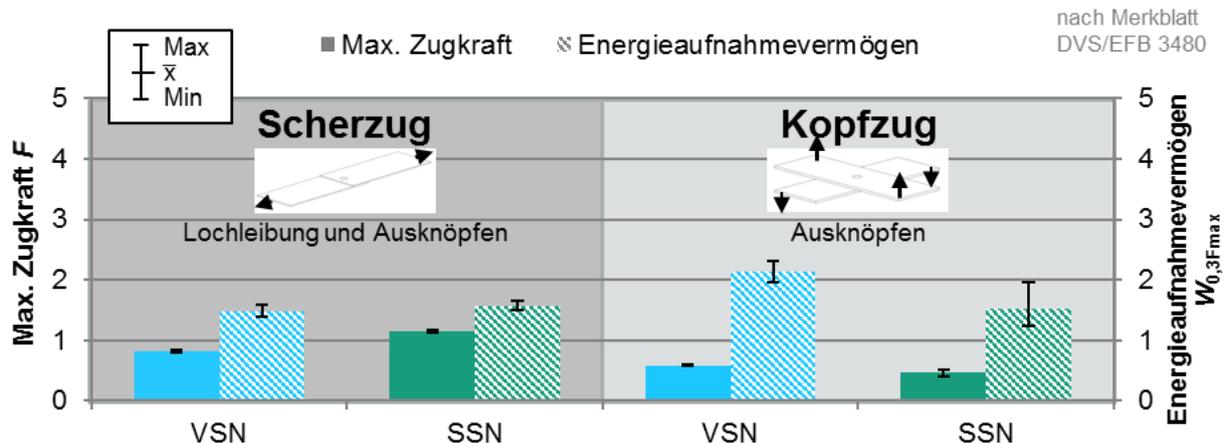


Abbildung 12: Ergebnis der quasistatischen Verbindungsprüfung im Scher- und Kopfzug nach DVS/EFB 3480-1 für das Vollstanz- und Stanzstauchnieten

Ausgewertet wurde die maximale Zugkraft F je Belastungsart und das dazugehörige Energieaufnahmevermögen $W_{0,3F_{\max}}$ der Verbindung. Letzteres ist gemäß Formel 7

$$W_{0,3F_{\max}} = \int_{s_0}^{s_{0,3F_{\max}}} F \cdot ds \quad (7)$$

als Aufnahmevermögen von mechanischer Arbeit $W_{0,3F_{\max}}$ unter quasistatischer Zugbelastung F bis zum Weg s definiert, bei dem ein Kraftabfall von 30 % der maximalen Zugkraft erreicht wird. Die Ergebnisse zeigen eine leichte Steigerung der maximalen Scherzugkraft beim Stanzstauchnieten und gleiche maximale Kraftwerte im Kopfzug. Die Energieaufnahmevermögen sind hingegen beim Scherzug auf vergleichbarem Niveau, während im Kopfzug das Stanzstauchnieten unter dem Niveau des Vollstanznietens liegt. Die Versagensfälle Lochleibung und Ausknöpfen sind bei beiden Fügeverfahren identisch.

Die Prüfung der zyklischen Verbindungsfestigkeit erfolgte nach dem Perlschnurverfahren auf unterschiedlichen Lasthorizonten im Zeitfestigkeitsbereich bei Schwingspielen zwischen $N = 50000$ und $N = 2000000$. Die anschließende Regression wurde mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt und logarithmisch in einem Diagramm abgetragen. Des Weiteren wurden die Prüfungen im Zug-Schwellbereich mit einem Lastverhältnis $R = 0,1$ und einer Lastwechselfrequenz $f = 35\text{ Hz}$ durchgeführt. Als Abbruchkriterium wurde ein Versagen bei einer Längung der Verbindung von 1,0 mm definiert, da ein steifigkeitsbedingtes Abbrechen der Prüfung maschinentechnisch nicht umsetzbar war.

Das Ergebnis der zyklischen Verbindungsprüfung im Scherzug für das Vollstanz- und Stanzstauchnieten zeigt Abbildung 13.

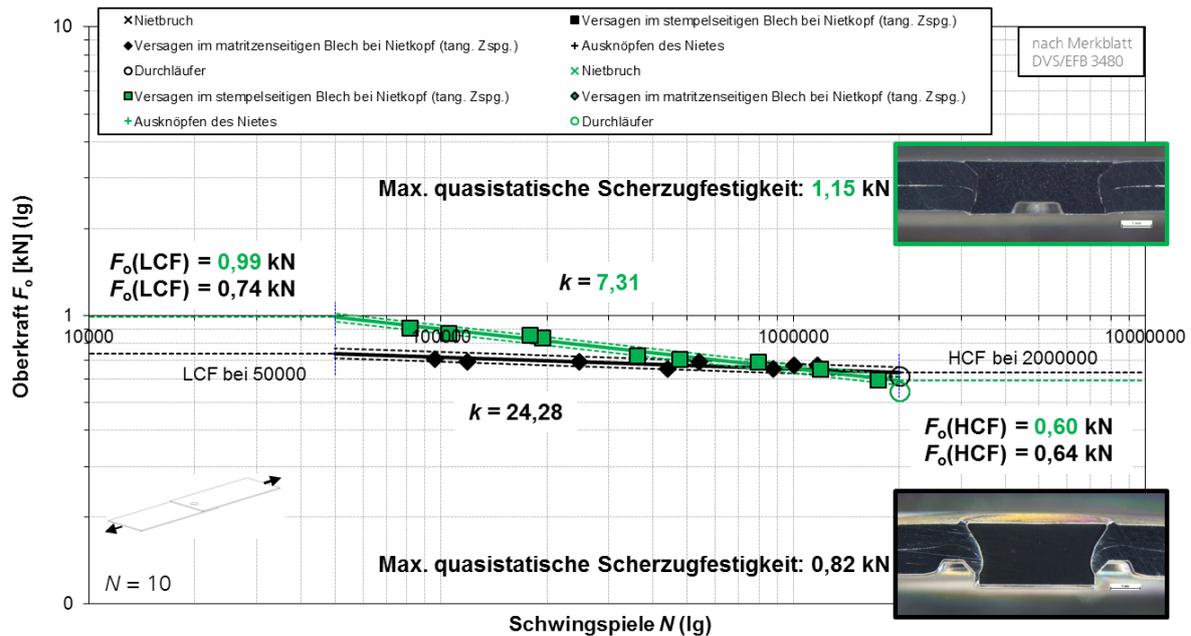


Abbildung 13: Ergebnis der zyklischen Verbindungsprüfung im Scherzug nach DVS/EFB 3480-1 für das Vollstanz- und Stanzstauchnieten

Beide Stanznietverfahren erzielten vergleichbare Kennwerte im Dauerfestigkeitsbereich. Im Zeitfestigkeitsbereich kann das Stanzstauchnieten höhere Kräfte als das Vollstanznieten übertragen. Während das Versagen aller Vollstanznietverbindungen ausschließlich im matrizenständig angeordneten 6000er Aluminium in Form von Rissbildung aufgrund tangentialer Zugspannungen oder durch Ausknöpfen des Nieten aus diesem auftrat, versagten alle Stanzstauchnietverbindungen aufgrund von Rissbildung durch tangentialer Zugspannungen am Niet kombiniert in beiden Fügepartnern. Ein Ausknöpfen der Stanzstauchniete war nicht zu identifizieren.

Zuletzt erfolgte eine Untersuchung der fügeprozessbedingten Bauteil deformation, da es häufig zu Vorformungen im Umkreis der Fügestellen beim Fügen dünner Materialstärken kommt. Hierzu wurden Blechronden mit einem Durchmesser $d = 50 \text{ mm}$ vorbereitet und jeweils mit dem Vollstanz- und Stanzstauchnieten konzentrisch gefügt. Anschließend erfolgte mithilfe des Messsystems ATOS Triple Scan der Fa. GOM GMBH eine optische Vermessung der Ronden. Bei diesem Messsystem werden präzise Streifenmuster auf die Probenoberfläche projiziert und von zwei Kameras nach dem Stereokameraprinzip erfasst. Da sowohl die Strahlengänge beider Kameras außen und die des Projektors mittig innen durch eine Kalibrierung vorab bekannt sind, können so 3D-Koordinatenpunkte aus den drei unterschiedlichen Strahlenschnitten berechnet werden. [17] Das Ergebnis der Deformationsuntersuchung ist in Abbildung 14 dargelegt.

Beim Vollstanznieten zeigten sowohl der stempelseitig angeordnete als auch der matrizenständig angeordnete Aluminiumfügepartner deutliche Deformationen in Richtung der Matrize auf. Da beide Deformationen die gleiche Richtung aufwiesen, flügelte die Probe nicht auf. Begründet werden kann dies durch die Kombination der einwirkenden Niederhalterkraft und dem Einprägen der Ringnut, wodurch hohe Biegebeanspruchungen die gleichgerichtete Deformation in Richtung Matrize hervorrufen. Die Stanzstauchnietverbindung zeigte hingegen deutlich die Vorteile des Fügeverfahrens auf. Es konnte keine fügeprozessbedingte

Bauteildeformation identifiziert werden. Die nahezu beidseitige Ebenheit der Fügestelle konnte ebenfalls sichtbar identifiziert werden.

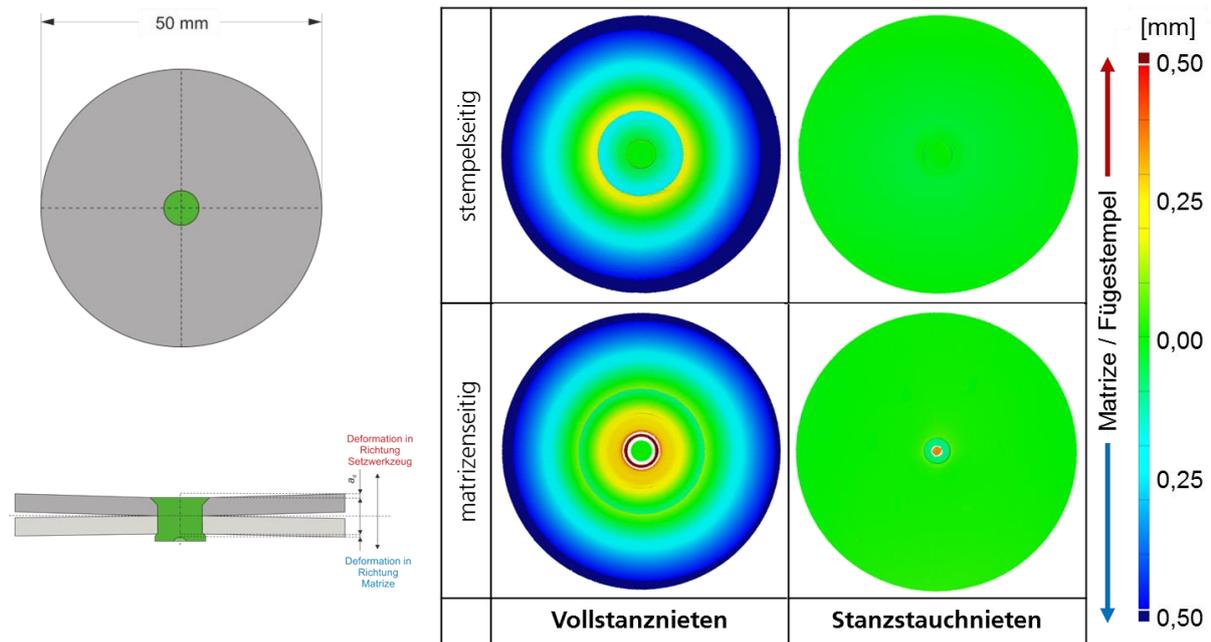


Abbildung 14: Gegenüberstellung der Bauteildeformationen infolge des Fügeprozesses beim Vollstanz- und Stanzstauchnieten

Zusammenfassung und Ausblick

Ein Teilziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung der Verfahrensgrundlagen für den Fügeprozess Stanzstauchnieten beim Fügen geringer Blechdicken ($t_2 \leq 0,9$ mm). Für die Erlangung dieser Ziele wurde die ausgewählte Fügepartnerkombination EN AW-6016 T4 in EN AW-6016 T4 zunächst mithilfe des Referenzfügeverfahrens Vollstanznieten bemustert und dem Stand der Technik nach analysiert. Dabei zeigte sich beim Vollstanznieten eine ausgeprägte Blechdickenausdünnung im matrizenseitigen Fügepartner sowie eine. Als nächstes wurde ein 2D-rotationssymmetrisches FE-Simulationsmodell des Vollstanznietprozesses aufgebaut und mithilfe des experimentellen Schlibfbilds und Kraft-Weg-Verlaufs validiert. Anschließend wurde ein robustes und vereinfachtes Simulationsmodell zum Stanzstauchnieten in Form einer reinen Stauchsimulation entwickelt. Als Zielgrößen wurden ein maximaler Hinterschnitt, sowie eine minimale Stanz- und Stauchkraft definiert. Diese stellten die Basis der folgenden numerischen Nietentwicklung. Aufgrund dessen, dass mit diesem vereinfachten Stauchmodell keine Stanzkräfte ermittelt werden konnten, wurde die Ersatzkraft $F_{\text{Stanz.005}}$ eingeführt. Auf dieser Basis wurden anschließend 480 verschiedene Variationsberechnungen durchgeführt. Die darauffolgende Sensitivitätsanalyse ermöglichte die Identifizierung einflussreicher Prozessparameter. Der Fokus der Analyse lag besonders auf dem Einfluss der Nietgeometrie- und Fließkurveigenschaften. Als signifikante Einflussgrößen der Nietgeometrie hatten sich der Durchmesser der Fußgeometrie d_{FG} und der Winkel der Fußgeometrie w_{FGT} herauskristallisiert. Der signifikanteste Einflussparameter der Fließkurve nach LUDWIK-HOLLOMON war der Fließkurvenparameter C_3 . Mit diesen Untersuchungen konnte somit ein tiefgreifendes Prozessverständnis über die Parameter des Verfahrens entwickelt und entsprechende Nieteigenschaften abgeleitet werden.

Unter der Voraussetzung, dass es während des Stanzprozesses zu keiner starken, den Prozess negativ beeinflussenden Deformation des Niets kommt und im Stauchprozess ein hinreichend großer Formschluss erzielt werden kann, wurde auf Basis der numerischen Untersuchungen ein Prototyp aus dem Nietwerkstoff EN AW-7075 T651 spanend gefertigt. Die Fügeverbindung wurde mittels Stanzstauchnieten bemustert und deren Fügepunktqualität analog zum Vollstanznieten ausgewertet. Im Ergebnis konnte einerseits ein qualitätsgerechte Stanzstauchnietverbindung erzeugt und andererseits die Blechausdünnung beim Fügen solcher geringen Blechdicken verhindert werden. Weiterhin wurden quasistatische Scher- und Kopfzug- sowie zyklische Scherzugverbindungsfestigkeiten ermittelt und mit dem Vollstanznieten verglichen. Dabei zeigte sich, dass die Stanzstauchnietverbindungen gleichwertige oder höhere Verbindungsfestigkeiten erzielen konnte. Ebenso wurde die Bauteildeformation mithilfe optischer 3D-Vermessung untersucht und ausgewertet. Hier zeigte sich, dass die starke Bauteildeformation, wie sie beim Vollstanznieten auftrat, mithilfe des Stanzstauchnietens komplett vermieden werden konnte.

Literaturangaben

- [1] HOHMANN, M.; HILLEBRECHT, M.; SCHÄFER, M.: *Leichtbaupotenzial in urbanen Elektrofahrzeugen*. Lightweight Design 11 (2018) 6, S. 48 – 51
- [2] *Audi Q8*. Karosserie. <https://www.audi-mediacyber.com/de/der-audi-q8-das-neue-top-modell-der-q-familie-10412/karosserie-10419>, abgerufen am: 04.03.2019
- [3] KLARNER, F.; NUEBLER, T.; ZINTL, A.: KERB-KONUS-VERTRIEBS-GMBH. *Stanzstauchniet*. WO 2012/113463 A1. 2011. Offenlegungsschrift
- [4] QUERENGÄSSER, M.; FALKENBERG, H.-J.; GSCHNEIDINGER, R.: BMW AG. *Verfahren und Vorrichtung zum Fügen von Fügepartnern durch einen Stanzniet*. EP 2 638 987 A1. 2012. Offenlegungsschrift
- [5] DVS/EFB: *Merkblatt 3410 Stanznieten - Überblick*, DVS Gemeinschaftsausschuss „Mechanisches Fügen“, Düsseldorf
- [6] BUDDE, L.; PILGRIM, R.: *Stanznieten und Durchsetzfügen*. Systematik und Verfahrensbeschreibung umformtechnischer Fügetechnologien Bd. 115. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie 1995
- [7] HOCKETT, J. E.; SHERBY, O. D.: *Large strain deformation of polycrystalline metals at low homologous temperatures*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids (1975) 23, S. 87 – 98
- [8] DAHL, W. *Umformtechnik, Plastomechanik und Werkstoffkunde*. Düsseldorf: Verl. Stahleisen 1993
- [9] FREUDENTHAL, A. M.: *Inelastisches Verhalten von Werkstoffen*. Berlin: VEB Verlag Technik 1955
- [10] LUDWIK, P.: *Elemente der Technologischen Mechanik*. Berlin: Springer-Verlag 1909
- [11] SIEBERTZ, K.; VAN BEBBER, D.; HOCHKIRCHEN, T.: *Statistische Versuchsplanung*. Design of Experiments (DoE). VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2010

- [12] MCKAY, M. D.; BECKMAN, R. J.; CONOVER, W. J.: *A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code*. Technometrics 21 (1979) 2, S. 239
- [13] ADAM, M.: *Statistische Versuchsplanung und Auswertung (DoE Design of Experiments)*, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Studiengang Simulation und Experimentaltechnik, FH Düsseldorf, 2013
- [14] MOST, T.; WILL, J.: *Metamodel of Optimal Prognosis - An automatic approach for variable reduction and optimal metamodel selection*, Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag 5.0, Weimar 2008
- [15] N.N.: *Robust Design Optimization with optiSLang*. Handreichung zum Grundlagenseminar optiSLang - Part2: Sensitivity Analysis, DYNARDO GmbH, Weimar 2013
- [16] DVS/EFB: *Merkblatt 3480 Prüfung von Verbindungseigenschaften*, DVS Gemeinschaftsausschuss „Mechanisches Fügen“, Düsseldorf
- [17] *ATOS Triple Scan – Industrieller optischer 3D-Digitalisierer*. <https://www.gom.com/de/messsysteme/atos/atos-triple-scan.html>, abgerufen am: 22.03.2019