

Bewertung von Parameterstreuung beim Umformfügen

Markus Israel

(Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik / Abteilung Füge-technik)

Mechanische Fügeverfahren gewinnen durch den Trend im Automobilbau zu Leicht- und Mischbauweisen eine zunehmende Bedeutung. Die Bereitstellung robuster Verbindungstechniken ist dabei von besonderer Bedeutung, da hierdurch Ausschussraten bei der Teileherstellung gesenkt und somit Kosten eingespart werden können. Der Beitrag beleuchtet am Beispiel des Clinchens die Einsatzpotentiale und Grenzen FE-basierter Sensitivitätsanalysen und Optimierungsaufgaben für die Kaltfügetechnik.

Durch die Ermittlung der Sensitivitäten der Designparameter auf relevante Verbindungs-kenngrößen können die wichtigen Parameter für die Werkzeugoptimierung abgeleitet werden. Auf dieser Basis werden sowohl geeignete Werkzeuge für eine bestimmte Fügepaarung als auch Kompromisswerkzeuge für das Fügen verschiedener Blechdicken und Blechwerkstoffe designet. Sensitivitätsanalysen gegenüber Unsicherheiten gestatten es dagegen, die Robustheit des Clinchprozesses in der Produktion zu bewerten. Auf der Basis dieser Erkenntnisse können Maßnahmen zur Steigerung der Prozessrobustheit oder für eine Prozessüberwachung hinsichtlich der Qualitätssicherung abgeleitet werden.

1 Einleitung

Fertigungsprozesse unterliegen im Serieneinsatz Streuungen der Prozessparameter, welche Schwankungen der charakteristischen Ergebnisgrößen bewirken können. Auch in der mechanischen Füge-technik existiert eine Vielzahl von Aufgabenstellungen hinsichtlich Sensitivitäts- und Robustheitsbetrachtungen oder Optimierungsaufgaben. Vor allem in Hinblick auf Effektivitätssteigerung und Kostensenkung sind Vereinheitlichungen von Werkzeugsätzen für verschiedene Verbindungen ein großes Thema. In Kühne (2007) wird am Beispiel der Mercedes S-Klasse aufgezeigt, welches Potential in einer derartigen „Vereinigung“ von unterschiedlichen Clinch-aufgaben liegt. Solch komplexe und umfangreiche Analysen sind experimentell jedoch sehr aufwändig, weshalb der Einsatz der FEM in der Prozessentwicklung und Prozessbewertung stark zunimmt. Die stetig zunehmende Anwendung von Simulationsprogrammen in allen Fertigungsstufen bei der Bauteilfertigung liegt nach Held (2009) in dem Interesse vor allem der Automobilhersteller begründet, das Prozessverständnis stetig auszubauen, um Kostenpotentiale zu nutzen.

Eine Sensitivitäts- und Robustheitsbewertung gestattet schon in einer frühen Entwicklungsphase die Definition geeigneter Maßnahmen zur Sicherung der Prozess- und damit der Produktqualität, Will (2005). Der numerischen Robustheitsbewertung kommt deshalb im virtuellen Entwicklungsprozess im Hinblick auf Verbesserung von Eigenschaften und zur Reduzierung von Produktionskosten eine besondere Bedeutung zu, Roos (2004). Wesentlich, vor allem hinsichtlich der Auslegung und der Qualitätssicherung mechanischer Fügeverbindungen, ist dabei die Kenntnis der Einflussgröße bzw. der Einflussstärke der einzelnen Parameterschwankungen und -toleranzen auf den Fügeprozess. Um dies beurteilen zu können, sind Sensitivitäts- und Robustheitsbewertungen nötig. Die Anwendung eines FE-basierten Ansatzes zur Sensitivitätsanalyse, gekoppelt mit einer entsprechenden statistischen Versuchsplanung (DOE), ist in der mechanischen Füge-technik bis jetzt noch nicht bekannt.

Ein wichtiges mechanisches Fügeverfahren ist das Clinchen, welches nach DIN 8593 unter dem Namen „Durchsetzfügen“ genormt ist. Unter Clinchen versteht man ein mechanisches Fügeverfahren, das eine Verbindung zwischen zwei oder mehr Blechen ausschließlich durch lokale Kaltumformung erzeugt. Der Fügeprozess kann in drei Teilprozesse gegliedert werden (s. Abb. 1). In der Durchsetzphase (B) verschiebt der herab fahrende Stempel den Fügebereich aus der Blechebene heraus. Beim Einsenken wird nun der Blechwerkstoff bis auf den Matrizenboden gedrückt. Das weitere Zustellen des Stempels führt zum zunehmenden radialen Fließen der Werkstoffe zwischen Stempel und Matrize, wodurch die Matrizenkontur gefüllt und der Hinterschnitt der Bleche realisiert wird (C).

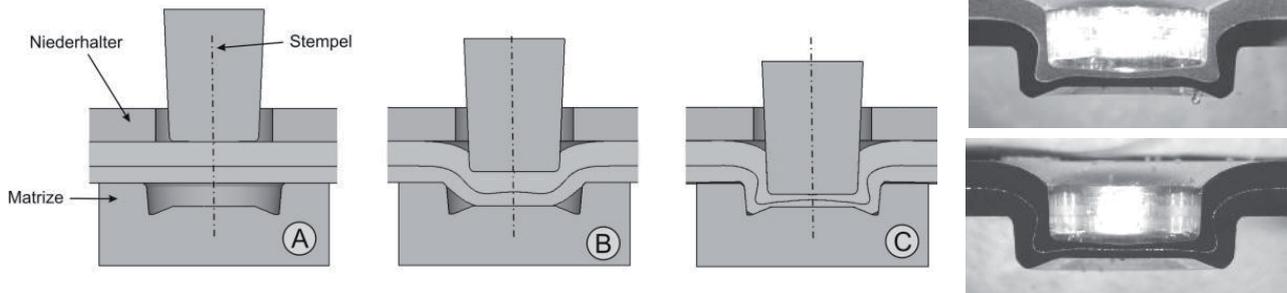


Abb. 1: Rundpunktclinchen mit starrer Matrize; links: Prinzip; rechts: typische Schliffbilder.

Zur Beurteilung von Parametereinflüssen bedarf es definierter Ergebnisgrößen. Im Sinne der Beurteilung der Tragfähigkeit von Verbindungen sind dies meist festigkeitsrelevante Größen, beim Clinchen also hauptsächlich die Halsdicke t_n und der Hinterschnitt f (s. Abb. 2). Die Bodendicke t_b ist bei der allgemein üblichen Prozessgestaltung ein konstantes Maß, welches vorab im Bemusterungsprozess eingestellt wird und zerstörungsfrei mittels Dickenmessgerät geprüft werden kann, Steinhauer (2007).

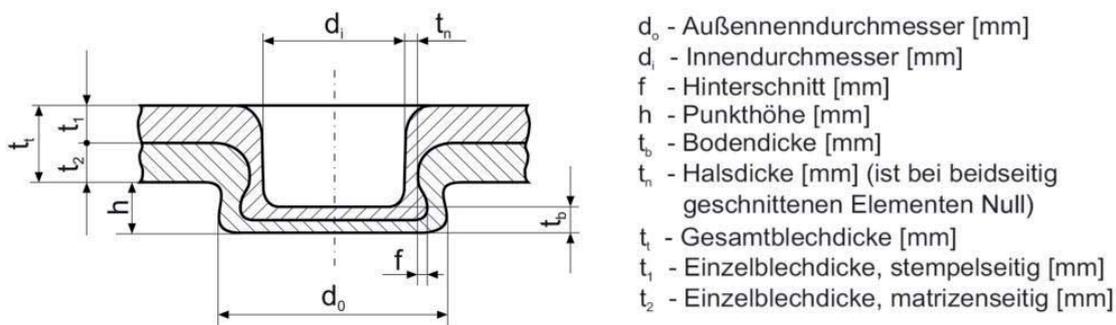


Abb. 2: Relevante geometrische Kenngrößen einer Clinchverbindung nach DVS (2009)

Die numerische Beschreibung des Clinchens ist Gegenstand zahlreicher FEM-basierter Studien und Projekte. In Dietrich (2006), Paula (2007), Lee (2010), Mucha (2011) und weiteren Quellen wurden geeignete Werkzeuggeometrien zur Verbesserung der Punktausbildung oder der Verbindungsfestigkeit unter Kopfzuglast numerisch, aber iterativ, ermittelt. Erste Erkenntnisse zur FEM-basierten Optimierung von Clinchprozessen auf Basis der Taguchi-Methode und der Response Surface Methode wurden in Oudjene (2008) und Oudjene (2009) gewonnen. Auf statistischer Versuchsplanung basierende, numerische und Sensitivitäts- und Robustheitsanalysen mit mehr als zwei Parametern sind beim Clinchen dagegen nicht bekannt.

Die statistisch-numerischen Analysen beim Clinchen sind prinzipiell in zwei Kategorien zu unterteilen. Ein wesentlicher Aspekt ist die Bestimmung geeigneter Werkzeug- und Prozessparameter (Designparameter) für die Bereitstellung optimaler Verbindungen. Hierfür sind die Detektion relevanter Parameter mittels Sensitivitätsanalyse und eine anschließende Prozessoptimierung erforderlich. Die zweite Analyseform beschäftigt sich mit der Ermittlung und Bewertung der Prozessrobustheit, also den durch Prozessunsicherheiten (z.B. Reibung, Festigkeitsschwankung) verursachten Ergebnisgrößenvariationen. Beide Analysen sollen im Folgenden betrachtet werden

2 Setup für stochastische Analysen beim Clinchen

Für die numerische Beschreibung des Clinchprozesses wird das FEM-Tool Deform verwendet, welches speziell für Massivumformvorgänge entwickelt wurde. Wichtig für die Berechnung von Umformprozessen, wie dem Clinchen, ist das Vorhandensein einer Remeshing-Option. Das bedeutet, dass Bereiche starker Umformung, und daraus resultierender lokaler Elementdurchdringung bzw. extremer Elementverzerrung, neu vernetzt werden und die Knoten- und Elementdaten vom alten auf das neue Netz übertragen werden können.

Unter der Annahme ideal rotationssymmetrischer Werkzeuge und unter Vernachlässigung eventueller Werkstoffanisotropie kann das Problem 2D rotationssymmetrisch beschrieben werden. Die Kommunikation zwischen Deform und optiSLang erfolgt über entsprechende input- und output-files. Zusätzlich ist ein Skript erforderlich, welches die Ergebnisgrößen Halsdicke und Hinterschnitt auf Basis geometrischer Funktionen identifiziert und an das output-file übergibt. Vorab ist das FEM-Modell zu parametrisieren.

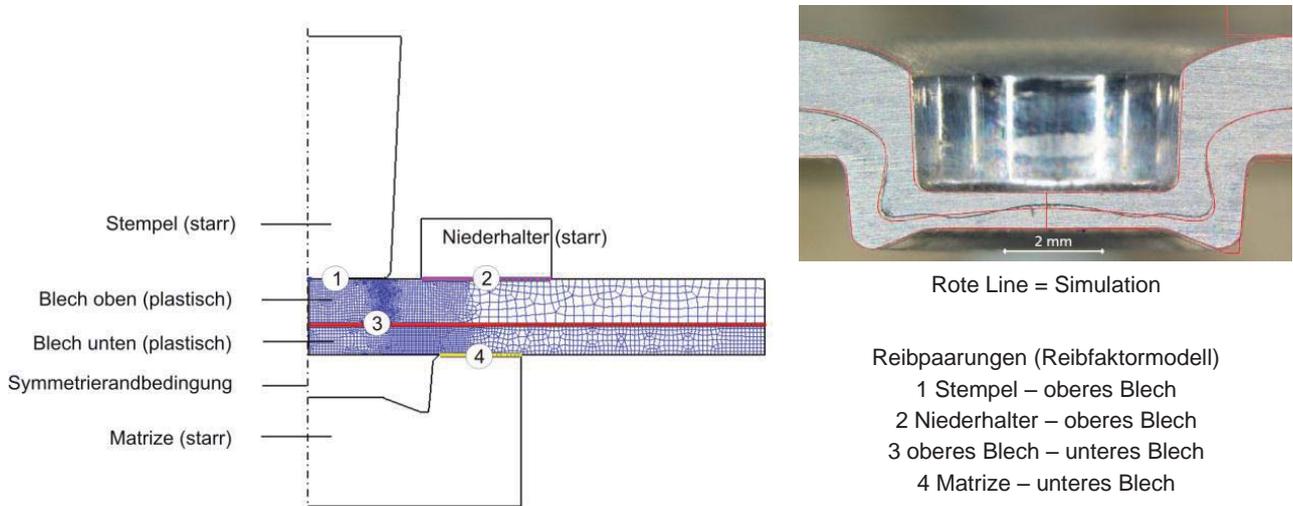


Abb. 3: FEM-Modell (links) und Schweißbildvergleich Experiment und Simulation (oben rechts, FEM-Ergebnis: rote Linie)

Gegenstand der Analysen ist die Blechpaarung EN AW-6016 in der Dickenkombination 1.5mm in 1.0mm. Abb. 3 zeigt das FEM-Modell im Ausgangszustand und den Schweißbildvergleich von Simulation und Experiment. Eine wesentliche Grundlage zur numerischen Berechnung von Umformvorgängen ist die Fließkurve der Werkstoffe, welche die Fließspannung über dem Umformgrad angibt. Die Reibwerte basieren derzeit noch auf Erfahrungswerten und werden iterativ hinsichtlich der Übereinstimmung von Punktausbildung und Fügekraft in Experiment und Simulation angepasst. Hier könnte perspektivisch auch eine Optimierung der Reibwerte mit dem Ziel erfolgen, in der experimentellen Verifikation der Simulation die bestmögliche Übereinstimmung zu realisieren.

3 Sensitivitätsanalyse bezüglich der Designparameter

3.1 Designparameter und Ergebnisgrößen

Die Ausbildung der Clinchverbindung ist im Wesentlichen von der geometrischen Form der Werkzeuge, Stempel und Matrize, abhängig. Eine weitere Einflussgröße ist der Niederhalter, welcher die Funktion des Fixierens vor dem Clinchen und des Abstreifens nach Prozessende übernimmt. Aufgrund bekannter Niederhalterereinstellungen und wegen der nachgewiesenen geringen Auswirkung der Niederhalterform und -kraft in einem technologisch sinnvollem Variationsraum werden die Niederhalterparameter nicht in der Analyse betrachtet. Folgend aufgelistete Parameter und ihre jeweiligen Variationsgrenzen sind Gegenstand der Analyse:

| | Parameter | Minimum | Maximum |
|---------|--------------------|---------|---------|
| Matrize | Matrizentiefe | 1,0 | 1,8 |
| | Ringkanaltiefe | 0,3 | 0,8 |
| | AD | 4,0 | 6,0 |
| | RD | 6,0 | 7,5 |
| | α | 0,0 | 10,0 |
| | Fase | 0,1 | 0,5 |
| | RR | 0,0 | 0,5 |
| Stempel | Stempeldurchmesser | 4,5 | 6,5 |
| | PIN-Radius | 0,1 | 0,4 |
| | W1 | 0,0 | 5,0 |
| | W2 | 0,0 | 6,0 |

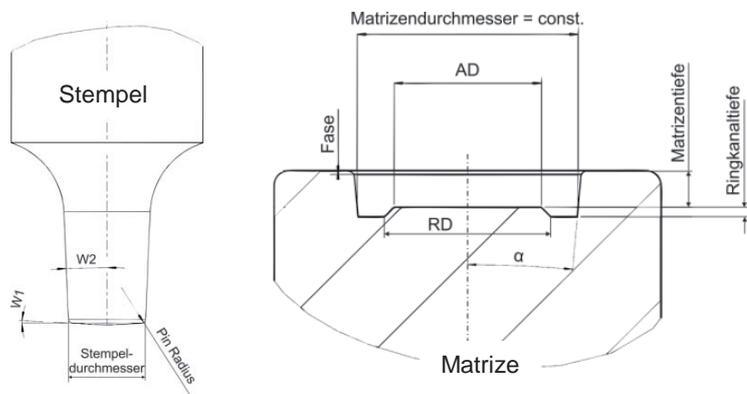


Abb. 4: Designparameter und Variationsgrenzen

Die für die Festigkeit relevanten Ergebnisgrößen, Halsdicke und Hinterschnitt, sind in der Einleitung bereits erläutert worden. Hinsichtlich der Dimensionierung des erforderlichen Antriebs und des C-Bügels ist die Fügekraft eine weitere, wichtige Ergebnisgröße. Für die Beurteilung der Umformung und eventueller Schädigung des Blechwerkstoffes infolge der starken Verformung können sowohl der Umformgrad als auch Schädigungswerte an den kritischen Stellen am Clinchpunkt ausgelesen werden. Die Untersuchungen fokussieren derzeit jedoch auf die geometrischen Kenngrößen und die Fügekraft.

3.2 Auswertung der Sensitivitätsanalyse

Für die Erzeugung der zu berechnenden Parametersätze wird das Latin Hypercube Sampling verwendet. Dadurch können bereits mit 100 Samplesets aussagekräftige Ergebnisse mit ausreichend hohen CoP-Werten (Coefficient of Prognosis) erzielt werden. Dieser Indikationswert für die Prognosefähigkeit der Analyse, bzw. des Metamodells, beträgt für die Halsdicke 94%. Die Matrizen­tiefe ist mit 64% Relevanz der bestimmende Parameter, über den Stempeldurchmesser können 19% der Halsdickenvariationen erklärt werden. Die automatische Regressionsanalyse erkennt für die beiden wichtigsten Parameter einen funktional polynom-basierten Zusammenhang zwischen den Parameterwerten und der Ergebnisgröße (s. Abb. 5, rechts oben). Der 2D-Plot von Matrizen­tiefe vs. Halsdicke lässt jedoch erkennen, dass der Zusammenhang als annähernd linear bezeichnet werden kann. Dabei sinkt die Halsdicke mit zunehmender Matrizen­tiefe signifikant ab.

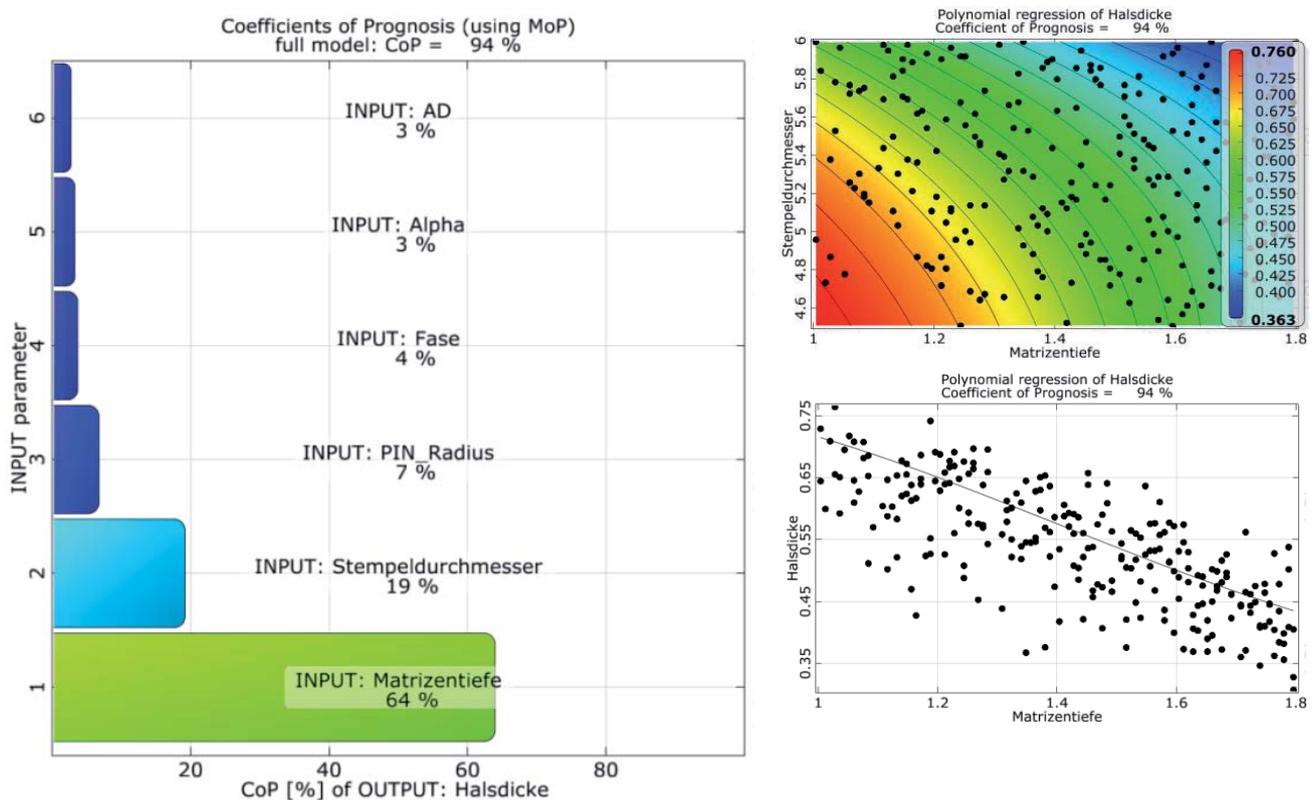


Abb. 5: Relevante Einflussgrößen auf die Halsdicke

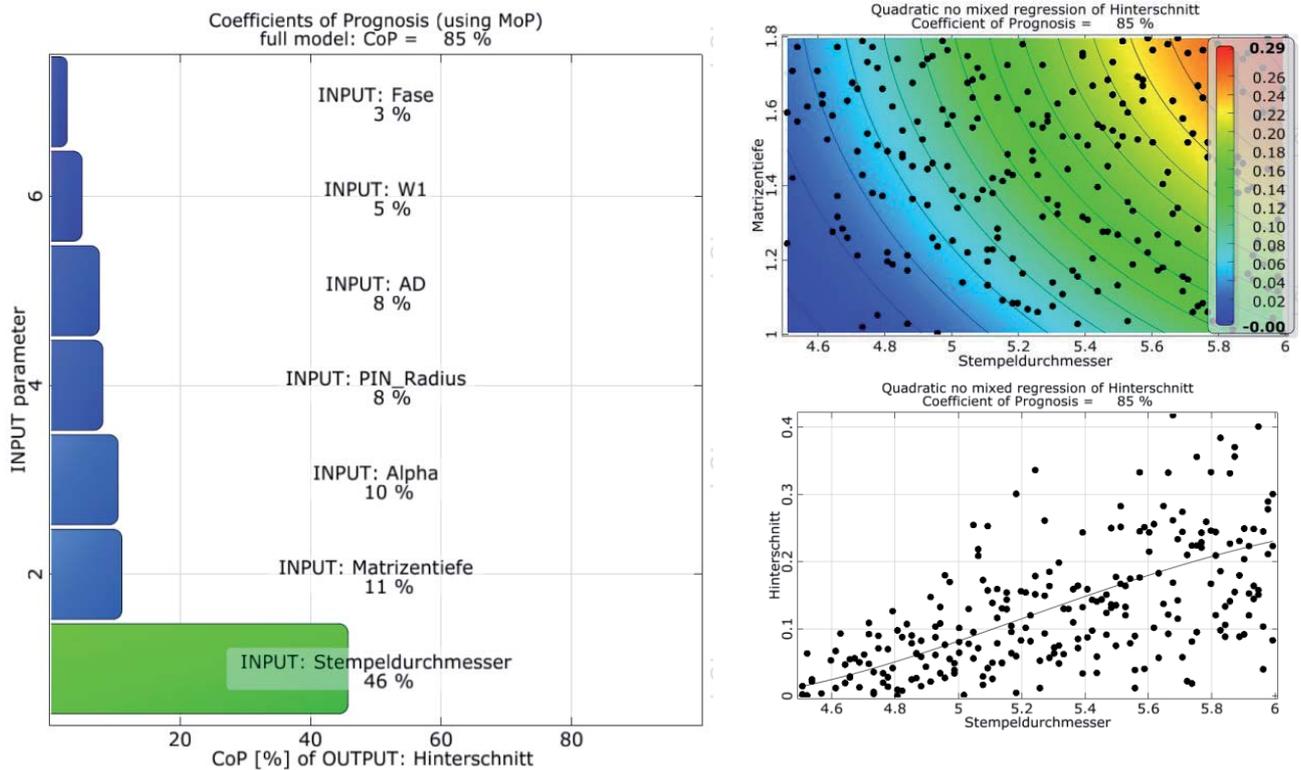


Abb. 6: Relevante Einflussgrößen auf den Hinterschnitt

Eine ähnlich klare Abhängigkeit von einem Parameter ist bei der Auswertung des Hinterschnitts feststellbar (s. Abb. 6). Der Stempeldurchmesser ist hier der Parameter mit dem größten Einfluss. Matrizentiefe, Alpha und Pin-Radius bilden mit je ca. 10% Relevanz die 2. Liga der einflussreichen Parameter. Ähnlich der Auswertung bei der Halsdicke kann auch für den Hinterschnitt ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen dem wichtigsten Einflussparameter und der Zielgröße ermittelt werden. Dabei liegt die kritische Ecke hinsichtlich einer ordnungsgemäßen Hinterschnittausprägung bei geringem Stempeldurchmesser und geringer Matrizentiefe.

Die dritte betrachtete Ergebnisgröße, die Fügekraft, ist mit 71% Relevanz fast ausschließlich von der Größe des Stempeldurchmessers abhängig. Erwartungsgemäß steigt die Fügekraft mit wachsendem Stempeldurchmesser an.

4 Optimierung des Clinchprozesses

4.1 Parameter und Zielgrößen

Die zu optimierende Zielgröße einer Clinchverbindung ist die Verbindungsfestigkeit, welche jedoch allein aus dem Schliffbild der berechneten Verbindung nicht ableitbar ist. Halsdicke und Hinterschnitt beeinflussen die Tragfähigkeit einer Clinchverbindung maßgeblich. Beide Größen sollten hinsichtlich einer gesteigerten Verbindungsfestigkeit möglichst groß sein. Allerdings kann keine pauschale Aussage getroffen werden, wann ein Clinchpunkt die maximale Tragfähigkeit erreicht. Dies ist stark von der Belastungsrichtung, aber auch von den Blechwerkstoffen und -dicken abhängig.

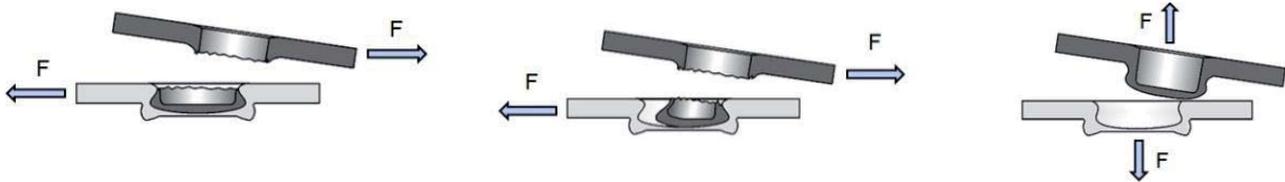


Abb. 7: Fehlermodi bei Clinchpunktbelastung nach DVS (2009)

Abb. 7 zeigt die möglichen Fehlermodi des Verbindungsversagens bei Punktbelastung: Halsriss (links), Ausknöpfen (rechts) und Mischversagen (mitte). Zur Vermeidung eines Halsrisses sollte die Halsdicke maximiert werden. Entsprechend muss zur Vermeidung des Ausknöpfens ein möglichst großer Hinterschnitt vorliegen.

Als wesentliche, die Halsdicke und den Hinterschnitt beeinflussenden Parameter wurden in der Sensitivitätsanalyse der Stempeldurchmesser und die Matrizeniefe ermittelt. Wie Abb. 5 und Abb. 6 entnommen werden kann, sind die Entwicklungstendenzen von Halsdicke und Hinterschnitt in Abhängigkeit dieser beiden Designparameter genau entgegengesetzt. Für die Optimierung wird zudem der Wert AD, also der Matrizenbodendurchmesser, berücksichtigt. Die Optimierung erfolgt mittels der Adaptive Response Surface Methode mit der Zielgröße, die Halsdicke zu maximieren. Als Nebenbedingungen wird die Einhaltung eines Mindest-Hinterschnitts von $0.5 \cdot \text{Halsdicke}$ und eine maximale Fügekraft von 30kN definiert.

4.2 Ergebnisse der Parameteroptimierung

Bereits nach 9 Iterationen wird das best design ermittelt und die variierten Parameter konvergieren (Abb. 8). Vor allem für die Matrizeniefe wird sehr schnell ein Optimum (1.6mm) gefunden.

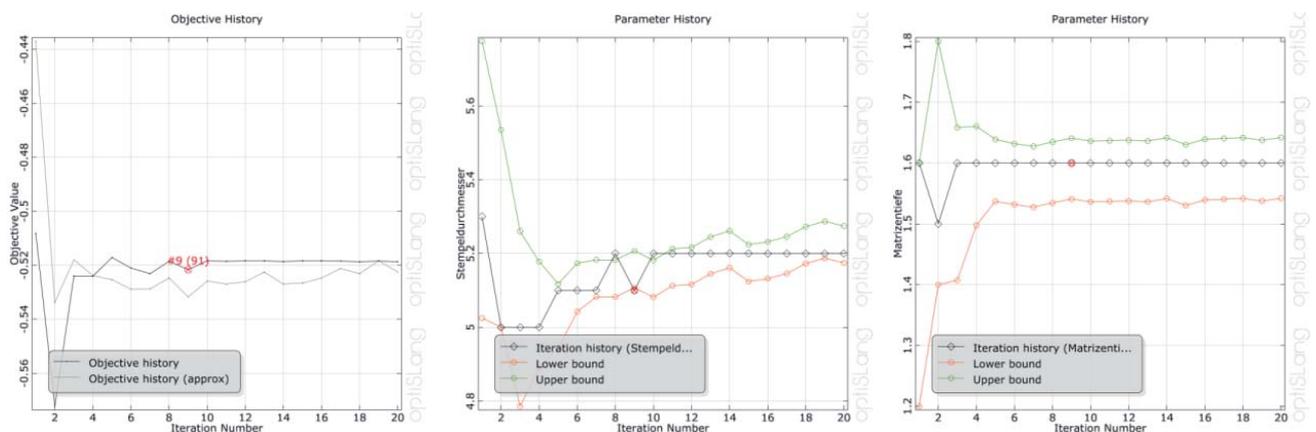


Abb. 8: Konvergenz von objective value (Halsdicke) und der Parameter Stempeldurchmesser (mitte) und Matrizeniefe (rechts)

Wie bereits aufgezeigt, ist die Festlegung eines optimalen Verhältnisses von Halsdicke zu Hinterschnitt pauschal nicht möglich. In weiteren Optimierungsläufen wird deshalb die Randbedingung angepasst, welche das Verhältnis von Halsdicke zu Hinterschnitt definiert. Abb. 9 zeigt auf der rechten Hälfte die Unterschiede im Querschliffvergleich für ein Mindestverhältnis Hinterschnitt/Halsdicke von 0.25 und 0.5. Auf Basis dieser einzelnen Optima kann nun auch eine Pareto-Optimierung erfolgen, in deren Ergebnis dann ein Band optimaler Verbindungen für beliebige Halsdicken-Hinterschnitt-Verhältnisse generiert wird.

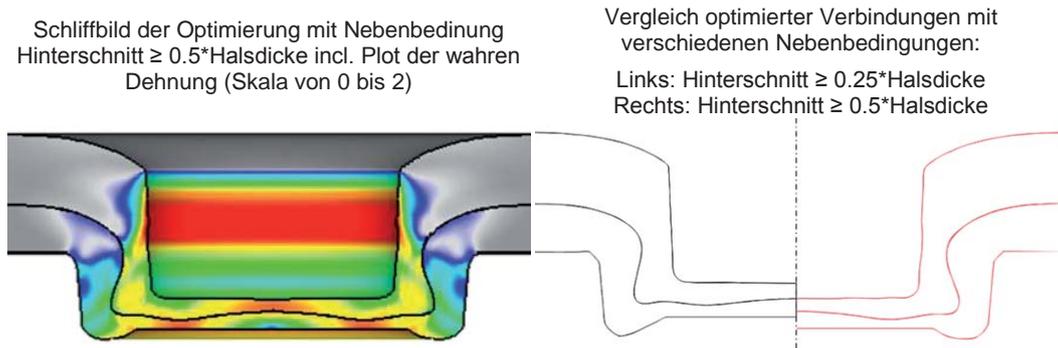


Abb. 9: Schliffbilder optimierter Verbindungen mit verschiedenen Nebenbedingungen

Neben der Werkzeugoptimierung für einzelne Verbindungen werden in der Praxis zunehmend Kompromissauslegungen für verschiedene Blechwerkstoff- und Blechdickenpaarungen gesucht. Ziel ist es, mit einem Werkzeugsatz (Stempel und Matrize) ordnungsgemäße Clinchverbindungen zum Beispiel für drei oder mehr unterschiedliche Paarungen zu realisieren. Auch diese Problemstellung kann mittels ARSM gelöst werden. Es wird als Zielfunktion hier die Maximierung der Summe aller Einzel-Halsdicken definiert. Als Nebenbedingung werden die Einhaltung eines Mindest-Hinterschnitts von 0.15mm sowie ein maximales Ausheben der Verbindung aus der Matrize von 0.2mm gewählt. Die Schliffbilder der FEM an den drei Blechdickenpaarungen in Abb. 10 zeigen eindrucksvoll das Potenzial dieser Vorgehensweise für die Werkzeugoptimierung.

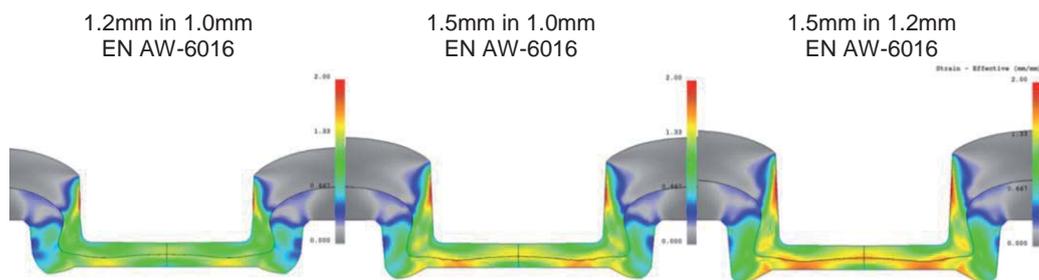


Abb. 10: Schliffbilder optimierter Verbindungen; verschiedene Blechdickenkombinationen, einheitliche Werkstoffe und Werkzeuge

Als kritisch zu bemerken ist die Tatsache, dass bei der Optimierung eine sehr genaue Übereinstimmung von Experiment und Simulation erforderlich ist. Hierfür ist eine entsprechend sorgfältige Kennwertermittlung (Fließkurven) unabdingbar. Zudem sind möglichst realitätsnahe Reibbeiwerte für die vier Reibpaarungen zu bestimmen. Im Gegensatz zur Sensitivitätsanalyse führt eine Abweichung der Vorhersagegenauigkeit der FEM immer auch zu Ungenauigkeiten im Optimierungsergebnis. Des Weiteren besteht derzeit noch nicht die Möglichkeit, die Werkstoffschädigung als Grenzwert oder Zielgröße zu implementieren. Hierfür fehlen bislang noch geeignete Damagekriterien für das Clinchen und entsprechende Grenzwerte für die jeweiligen Blechwerkstoffe.

5 Sensitivität gegenüber Unsicherheiten im Prozess

5.1 Parameter und Ergebnisgrößen

Der Clinchprozess wird durch eine Vielzahl von Prozessunsicherheiten beeinflusst. Typische toleranzbehaftete Größen sind zum Beispiel Materialkennwerte wie Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung oder die Blechdicke der Halbzeuge, Will (2006). Beim Clinchen kann während der Lebenszeit eines Werkzeugsatzes (ca. 200.000 bis 400.000 Punkte) auch die Reibung aufgrund von Oberflächen- bzw. Schmierzustandsänderungen variieren. Zudem kann es zu Verschleißeffekten kommen. Quantitative Aussagen hinsichtlich realistischer Grenzwerte und Verteilungsfunktionen sind hierbei jedoch äußerst schwer zu generieren. Eine lokal verschieden starke Vorverformung bzw. damit einhergehende Vorverfestigung der Bleche durch vorgelagerte Umformprozesse (z.B. Biegen, Tiefziehen) ist ebenfalls möglich.

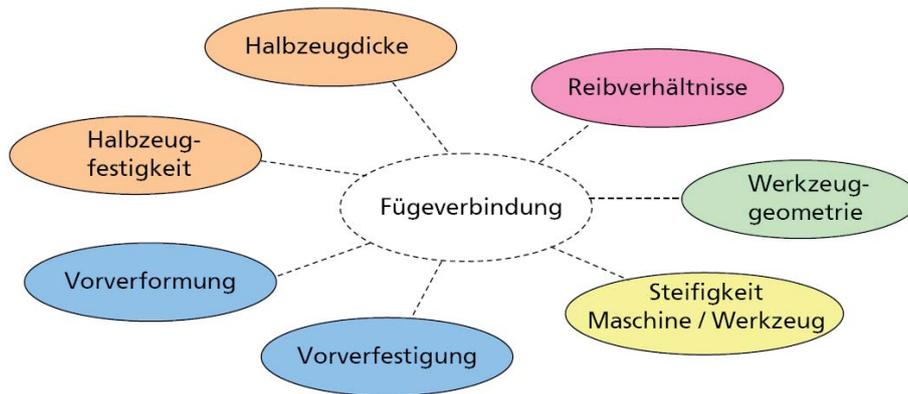


Abb. 11: Auswahl relevanter toleranzbehafteter Prozessparameter beim mechanischen Fügen

Abb. 11 zeigt die Parameter für das Clinchen auf, wobei die Werkzeug- und Maschinensteifigkeit in den jetzigen Betrachtungen unberücksichtigt bleiben. Betrachtet man diese „Parameterblöcke“ genauer, so wird ersichtlich, dass daraus eine Vielzahl von einzelnen Parametern resultiert. Zum Beispiel gibt es beim Clinchen vier Reibpaarungen: Niederhalter gegen Blech, Stempel gegen Blech, Blech gegen Blech und Matrize gegen Blech. Die in der folgend ausgewerteten Analyse verwendeten Parameter und deren angenommene Streubreiten zeigt Abb. 12. Als Ergebnisgrößen werden - wie bei der Sensitivitätsanalyse gegenüber den Designparametern - die Halsdicke, der Hinterschnitt und die Fügekraft ausgewertet.

| Unsicherheiten | | Min. | Max. | |
|----------------|------------------------------|--|------|------|
| Werkstoff | upper | Blechdicke in mm | 1,36 | 1,64 |
| | | Blechfestigkeit R_m in N/mm ² | 170 | 260 |
| | bottom | Blechdicke in mm | 0,90 | 1,10 |
| | | Blechfestigkeit R_m in N/mm ² | 170 | 260 |
| Reibfaktoren | Stempel – oberes Blech | 0,15 | 0,45 | |
| | Niederhalter – oberes Blech | 0,15 | 0,45 | |
| | oberes Blech – unteres Blech | 0,15 | 0,45 | |
| | Matrize – unteres Blech | 0,15 | 0,45 | |

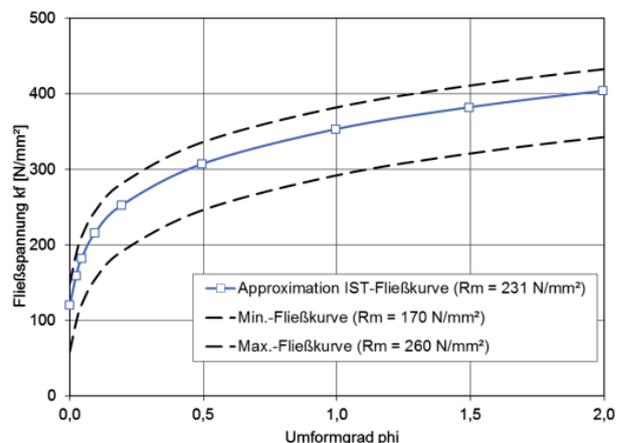


Abb. 12: Unsicherheiten und deren Variationsgrenzen;
links: Grenzwerte; rechts: Prinzip der Fließkurvenverschiebung

5.2 Ergebnisse der Robustheitsanalyse

Die Beeinflussung der Halsdicke durch die Parameterstreuungen kann als moderat bezeichnet werden. Es sind Werte von 0.47mm bis 0.63mm zu erwarten (s. Abb. 13, rechts). Die Prognosefähigkeit des Metamodells ist mit einem CoP-Wert von 97% sehr gut. Die größte Beeinflussung der Zielgröße erfolgt durch die Variation der beiden Blechdicken, wobei die Variation der unteren Blechdicke (bottom) in der angenommenen Streubreite eine stärkere Veränderung der Halsdicke bewirkt als die Variation der oberen Blechdicke (upper). Einen geringen Einfluss hat die Reibung zwischen den beiden Blechen. Dagegen hat eine Schwankung der Festigkeit nahezu keine Auswirkung auf die Ausprägung dieser geometrischen Größe.

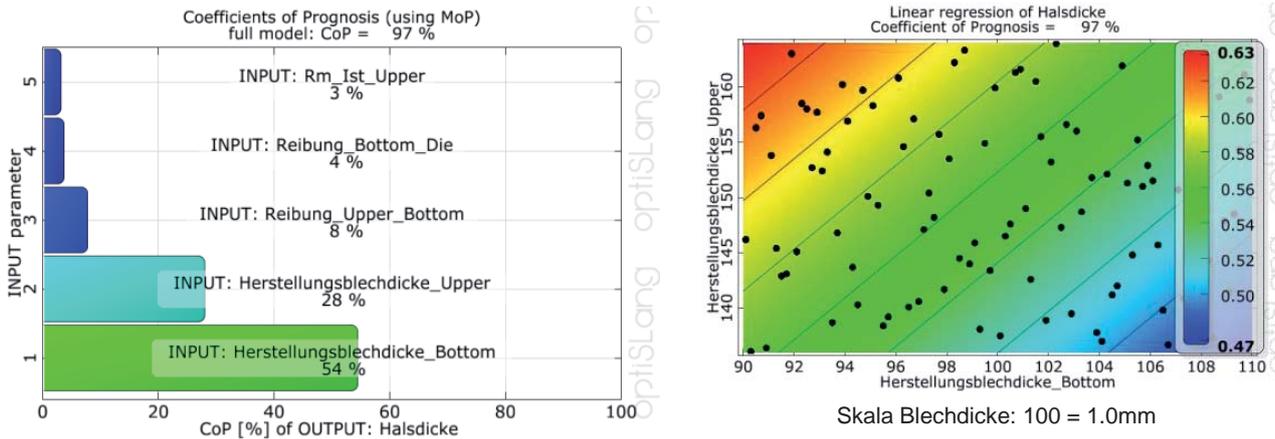


Abb. 13: Relevante Einflussgrößen auf die Halsdicke

Die kritische Ecke hinsichtlich einer sehr kleinen Halsdicke (und damit verbunden einer geringen Punktfestigkeit bzw. einer erhöhten Gefahr von Anrissen bereits während des Fügens) besteht beim Einsatz von stempelseitig minustoleriertem und matrizeitig plustoleriertem Blech. Entsprechende Strategien zur Vermeidung dieses Extrembereiches könnten eingeschränkte Toleranzbreiten der Bleche bzw. zumindest eine Prüfung der Blechdicke sein.

Der CoP-Wert von 89% gestattet auch für die Bewertung der Parametereinflüsse hinsichtlich des Hinterschnitts eine gute Aussagefähigkeit. Der Hinterschnitt ist ebenfalls am stärksten von der Blechdicke des matrizeitigen Bleches beeinflusst. Dagegen ist der Relevanz der Blechdickenvariation des unteren Bleches vernachlässigbar gering. Auf die Ausbildung des Hinterschnitts wirken dagegen zwei Reibpaarungen stark ein: die Reibung zwischen den Blechen und die Reibung zwischen dem unteren Blech und der Matrize. Tendenziell steigt der Hinterschnitt mit zunehmender Blechdicke (unten) und zunehmender Reibung zwischen den Blechen sowie zwischen Blech und Matrize.

Im Vergleich mit der Halsdicke sind die prozentualen Veränderungen des Hinterschnitts infolge der Parameterstreuungen größer: Es sind Werte von 0.131mm bis 0.215mm zu erwarten (s. Abb. 13, rechts). Eine Beeinflussung des Prozesses hin zu einer geringeren Streuung des Hinterschnitts und somit zur Gewährleistung eines robusteren Prozesses ist zum Beispiel durch folgende Maßnahmen möglich: Vermeidung der Minustoleranz des unteren Bleches, Vermeidung von Schmiering bzw. Schmierstoffrückständen bei den Reibpaarungen Blech-Blech und Matrize-Blech.

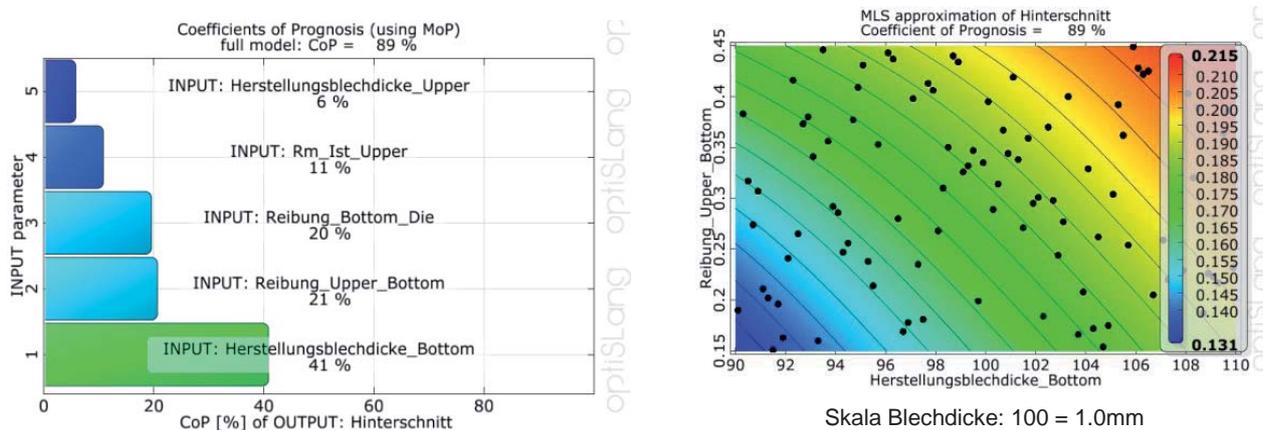


Abb. 14: Relevante Einflussgrößen auf den Hinterschnitt

Wie bereits bei der Sensitivitätsanalyse der Designparameter ist festzustellen, dass die beiden Zielgrößen von den relevanten Parametern gegensätzlich beeinflusst werden. Das heißt, dass zum Beispiel eine Vermeidung kritischer Hinterschnittwerte durch die Bestellung matrizeitig ausschließlich plustolerierter Bleche mit einer Zunahme von Verbindungen mit geringer Halsdicke einhergeht. Ohnehin sind derartige Umstellungen im Pro-

duktionsprozess kritisch zu bewerten, da sie sehr kostenaufwändig sind. Die Analyse der Prozessrobustheit gestattet es jedoch, zumindest die Kenntnis über kritische Parameter und Parameterkonstellationen zu erlangen und auf dieser Basis zum Beispiel eine gezielte Kontrolle der relevanten Parameter als Qualitätssicherung in den Prozess zu integrieren.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die zunehmende numerische Prozesskettenabbildung, vor allem in der Automobilproduktion, erfordert eine immer tiefere Durchdringung der Fügeprozesse zur Steigerung des Prozessverständnisses in Hinblick auf die Qualitätsgenerierung und -sicherung sowie die Erschließung von Kosteneinsparungspotential. Die umfassenden Möglichkeiten der FE-Simulation für Sensitivitäts-, Robustheits- und Optimierungsbetrachtungen sind in der mechanischen Füge-technik bisher noch nicht hinreichend genutzt und bezüglich ihrer Einsetzbarkeit noch nicht bewertet worden.

Die hier für das Clinchen durchgeführten Sensitivitäts- bzw. Robustheitsanalysen zeigen das Potential der numerisch basierten Eigenschaftsanalyse an Durchsetzfügevorgängen auf. Aus einer Vielzahl von Parametern, welche den Fügeprozess beeinflussen, können in entsprechenden Studien die relevanten Einflussparameter detektiert und so Grundlagen entweder für eine Prozessoptimierung oder eine Bewertung der Prozessrobustheit gewonnen werden. Das hierbei gewonnene Prozesswissen reicht deutlich über die bisher deterministisch und zumeist experimentell generierten Erkenntnisse und Wirkungszusammenhänge hinaus. Durch die Möglichkeit, Parameter in einer Komplexität und Anzahl zu betrachten, wie es experimentell nicht möglich ist, können zum einen neue Erkenntnisse aber auch globale und allgemeingültige Zusammenhänge gefunden werden.

Auf Basis dieser ersten Studien für das Clinchen sollen weitere Analysen an anderen häufig eingesetzten mechanischen Fügeverfahren durchgeführt werden. Im Fokus der weiteren Forschung sind die in der Automobilindustrie vermehrt eingesetzten Stanznietverfahren. Die Herausforderung liegt dabei vor allem in der numerischen Abbildung der Werkstofftrennung und der Steigerung der Rechenstabilität sowie der Abbildungsgenauigkeit. Wie in den Sensitivitätsanalysen beim Clinchen bereits aufgezeigt, stellen die Grunddaten der Simulation, also die mechanisch-technologischen Kennwerte der Werkstoffe sowie die Reibbedingungen eine wesentliche Basis für die realitätsnahe numerische Abbildung dar. Kann dies erreicht werden, bildet die numerisch basierte Sensitivitäts- und Robustheitsanalyse an Fügeverfahren perspektivisch eine wesentliche Informationsquelle für den Verfahrensvergleich und für die Auswahl geeigneter Verbindungstechnologien.

7 Literatur

- [1] Deutsches Institut für Normung e.V.: Fertigungsverfahren Fügen, Teil 5: Fügen durch Umformen, Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2003
- [2] Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren: Taschenbuch DVS-Merkblätter und – Richtlinien – Mechanisches Fügen, Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 153, DVS-Media GmbH, Düsseldorf, 2009
- [3] Dietrich, S.: Grundlagenuntersuchungen zu neuen matrizenlosen Umformfügeverfahren. Chemnitz, TU Chemnitz, Dissertation, 2006
- [4] Held, C.; Liewald, M.; Sindel, M.: Untersuchungen zum Einfluss werkstofflicher Schwankungen innerhalb eines Coils auf die Umformbarkeit, In: wt Werkstattstechnik online, 2009, URL:[http://www.werkstattstechnik.de/wt/get_article.php?data\[article_id\]=51225](http://www.werkstattstechnik.de/wt/get_article.php?data[article_id]=51225) (Abruf am 23.11.2009)
- [5] Kühne, T.: Clinchen und Kleben – Komplexer Einsatz im Mischbau. In: Adhäsion. Kleben und Dichten 10/2007, S.32-36
- [6] Lee, C.-J.; Kim, J.-Y.; Lee, S.-K.; Ko, D.-C.; Kim, B.-M.: Design of mechanical clinching tools for joining of aluminium alloy sheets. In: Materials & Design Volume 31, Issue 4, Design of Nanomaterials and Nanostructures, April 2010, S. 1854-1861
- [7] Mucha, J.: The analysis of lock forming mechanism in the clinching joint. In: Materials and Design, 2011 32 (10), S. 4943-4954
- [8] Oudjene, M., Ben-Ayed, L.: On the parametrical study of clinch joining of metallic sheets using the Taguchi method, In: Engineering Structures, Volume 30, Issue 6, Juni 2008, S.1782-1788
- [9] Oudjene, M., Et Al: Shape optimization of clinching tools using the response surface methodology with Moving Least-Square approximation. In: Journal of Materials Processing Technology, Volume 209, Issue 1, Januar 2009, S.289-296

- [10] Paula, A. A.; Aguilar, M. T. P.; Pertence, A. E. M.; Cetlin, P. R.: Finite element simulations of the clinch joining of metallic sheets. In: journal of materials processing technology. 182, 2007, S. 352–357
- [11] Roos, D.; Bucher, C.: Methoden der stochastischen Optimierung. Konferenz-Einzelbericht: Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag 1.0, Weimar, 2004
- [12] Steinhauer, A.: In-Process Qualitätskontrolle fürs Clinchen. In: Blech Rohre Profile, 3-2007, S. 33
- [13] Will, J. u.a.: Berechnung und Visualisierung statistischer Maße auf FE-Strukturen für Umformsimulationen, Konferenz-Einzelbericht: Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag 2.0, Weimar, 2005
- [14] Will, J.; Menke, T.; Stühmeyer, A.: Rechnerische Robustheitsbewertungen von Umformprozessen. Konferenz-Einzelbericht: Neuere Entwicklungen in der Blechumformung, Stuttgart, 2006

Förderhinweis:

Die in diesem Beitrag dargelegten Erkenntnisse sind Teilergebnisse eines öffentlich geförderten Projektes (16502BR). Das IGF-Vorhaben 16502BR der Forschungsvereinigung EFB wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Für diese Unterstützung sei herzlich gedankt.