

# Robustheitsbewertung und Werkzeugoptimierung beim Umformfügen

Priv.-Doz. Dr.-Ing. Welf-Guntram Drossel<sup>1</sup>, Markus Israel<sup>1</sup>,  
Tobias Falk<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik

## Zusammenfassung

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 Verbindungskenngrößen 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.

**Keywords:** mechanisches Fügen, Clinchen, Sensitivitätsanalyse, Werkzeugoptimierung

# 1 Einleitung

Fertigungsprozesse unterliegen im Serieneinsatz Streuungen der Prozessparameter, welche Schwankungen der charakteristischen Ergebnisgrößen bewirken können. Auch in der mechanischen Fügechnik 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 Clinchaufgaben 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 Fügechnik 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. Abbildung 1). In der Durchsetzphase (B) verschiebt der herabfahrende 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).

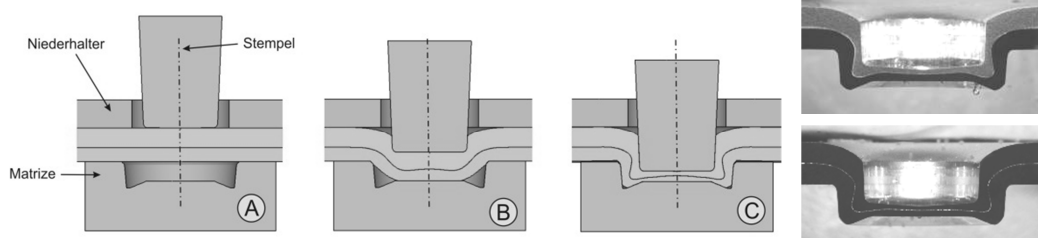


Abbildung 1: Rundpunktclinchen mit starrer Matrize; links: Prinzip; rechts: typische Schlifffbilder.

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. Abbildung 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).

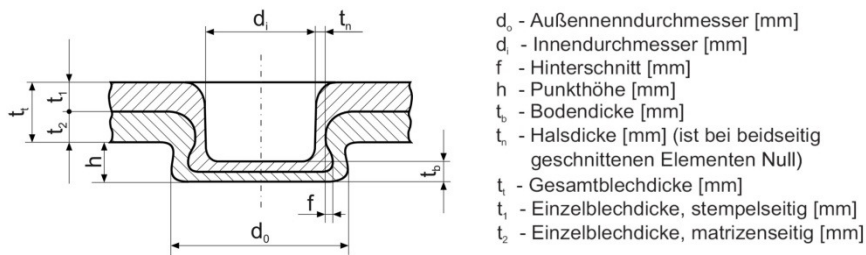


Abbildung 2: Relevante geometrische Kenngrößen einer Clinchverbindung nach DVS (2009)

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-basierter 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 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 wie beispielsweise Halsdicke und Hinterschnitt auf Basis geometrischer Funktionen identifiziert und an das output-file übergibt. Vorab ist das FEM-Modell zu parametrisieren.

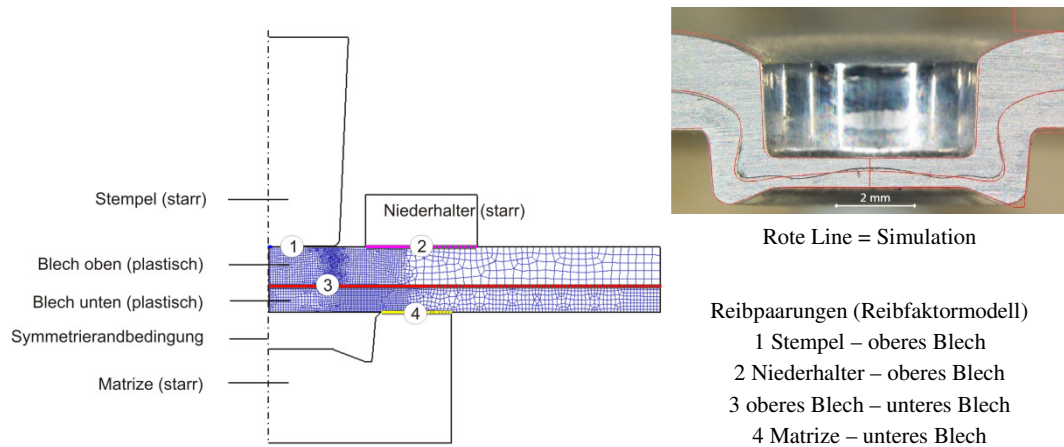


Abbildung 3: FEM-Modell (links) und Schliffbildvergleich Experiment und Simulation (oben rechts, FEM-Ergebnis: rote Linie)

Gegenstand der Analysen ist die Blechpaarung EN AW-6016 in der Dickenkombination 1.5mm in 1.0mm. Abbildung 3 zeigt das FEM-Modell im Ausgangszustand und den Schliffbildvergleich 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, wobei der Matrizendurchmesser konstant sein wird. 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
Stempel	Stempeldurchmesser (mm)	4,5	6,0
	Stempelkantenradius (mm)	0,1	0,4
	W1 (°)	0,0	5,0
	W2 (°)	0,0	5,0
Matrize	Matrizentiefe (mm)	1,0	1,8
	Ringkanaltiefe (mm)	0,3	0,8
	AD (mm)	4,0	6,0
	RD (mm)	6,0	7,5
	$\alpha$ (°)	0,0	10,0
	Fase (mm)	0,1	0,5
	RR (mm)	0,0	0,5

Abbildung 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. Um bei etwaigen Designausfällen eine große Anzahl an Simulationen zu berücksichtigen, wurden im hier betrachteten Fall drei Sets je 100 Rechnungen zusammengefügt. Der oben erläuterte Indikationswert (CoP) für die Prognosefähigkeit der Analyse, bzw. des Metamodells, beträgt für den Hinterschnitt 85% (s. Abbildung 5), der Stempeldurchmesser (46%) ist der mit Abstand wichtigste Parameter zur Beeinflussung des Hinterschnitts. Das CoP-Diagramm weist zudem 6 weitere Parameter mit Werten von 3% bis 11 % als mäßig relevant aus. Die Größen  $W_2$ ,  $R_D$ ,  $R_R$  und  $T_R$  sind hingegen irrelevant für die Ausbildung des Hinterschnitts. Bereits an dieser Stelle soll ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass diese ermittelten CoP-Werte nur für die oben angenommenen Parametervariationen gelten. Würde man für den Stempeldurchmesser nicht die Variationsbreite von 4,5 mm bis 6,0 mm wählen, sondern z.B. 4,8 mm bis 5,2 mm, so ist zu erwarten, dass die Relevanz dieses Parameters deutlich geringer ist, wenn die Variationsbreiten der übrigen Parameter konstant bleiben.

Auf der rechten Seite in Abbildung 5 ist das Metamodell „Stempeldurchmesser und Matrizeniefe vs. Hinterschnitt“ dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass der Hinterschnitt mit steigendem Stempeldurchmesser stark anwächst. Die Zunahme der Matrizeniefe bewirkt über den gesamten Parameterraum ebenfalls eine Zunahme des Hinterschnitts. Festzuhalten ist, dass bei einem Stempeldurchmesser von 4,6 mm durch die Matrizeniefenvariation über die gesamte Variationsbreite eine Veränderung des Hinterschnitts von lediglich ca. 0,05 ausgewiesen wird. Die Matrizeniefe hingegen

beeinflusst den Hinterschnitt bei einem Stempeldurchmesser von 5,6 mm um ca. 0,13 mm. Eine Veränderung der Matrizentiefe um den gleichen Wert hat also bei einem Stempeldurchmesser von 5,6 mm einen deutlich größeren Einfluss als bei einem Stempeldurchmesser von 4,6 mm.

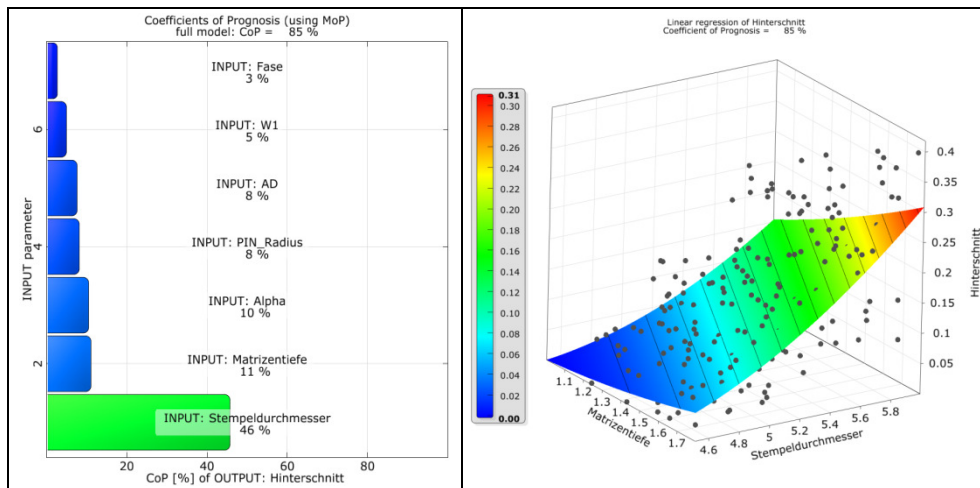


Abbildung 5: Relevante Einflussgrößen auf den Hinterschnitt

Zur weiteren Verdeutlichung der Realitätsnähe des Metamodells als Ganzes werden drei Punkte des Parameterraumes am Experiment verifiziert. Hierfür wird das 3D-Metamodell aus Abbildung 5 mit Ebenen konstanter Matrizentiefe geschnitten (1,4 mm und 1,6 mm). Daraus resultieren die in Abbildung 6 links dargestellten Linien. Es ist zu erkennen, dass es zwei verschiedene Lagen der Linie „Matrizentiefe = 1,4 mm“ gibt. Dies ist dadurch bedingt, dass die grüne Linie das Metamodell für den Stempelstirnwinkel  $0,5^\circ$  und die rote Linie das Metamodell für den Stempelstirnwinkel  $5,0^\circ$  abbildet. Daraus ist auch der nachvollziehbare Zusammenhang zu erkennen, dass der Hinterschnitt mit steigendem Stirnwinkel tendenziell sinkt. Die drei Versuchspunkte auf der jeweiligen Linie sind durch die Kreise gekennzeichnet. Es kann festgestellt werden, dass die drei Versuchspunkte sehr genau auf den jeweiligen Metamodell-Linien liegen. Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass eine sehr gute Abbildung der Realität durch das Metamodell gegeben ist.

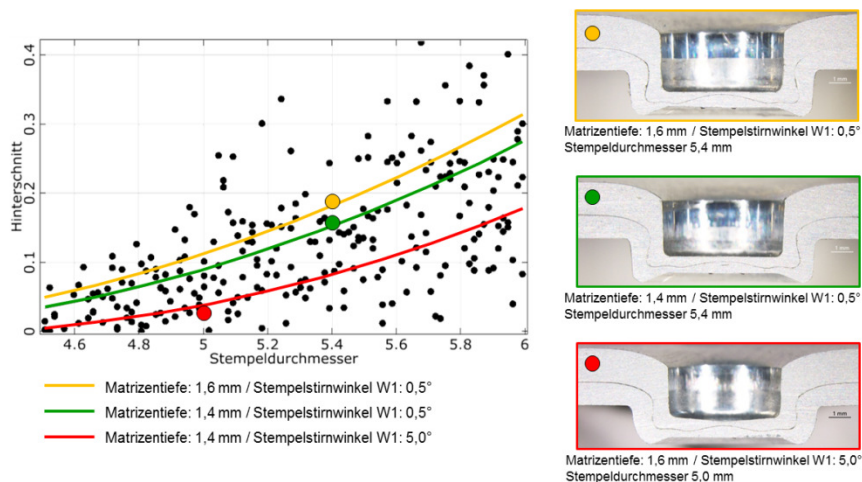


Abbildung 6: Verifikation des Metamodells am Experiment



Im Gegensatz zum Hinterschnitt hat der Stempeldurchmesser auf die Halsdicke einen deutlich geringeren Einfluss. Sein CoP-Wert wird mit 18% ausgewiesen. Mit einem CoP-Wert von 62% mit Abstand wichtigste Einflussgröße auf die Halsdicke ist die Matrizen-tiefe. Dabei sinkt laut Metamodell der Wert der Halsdicke mit zunehmender Matrizen-tiefe (s. Abbildung 7 rechts). Auch diese Tendenz wird durch viele experimentelle und numerische Studien bestätigt, siehe dafür Varis (2006) und Mucha (2011). Eine Vergrößerung des Stempeldurchmessers führt zu einer Reduktion der Halsdicke. Ebenfalls bekannt ist, dass die Halsdicke bei zunehmendem Pin-Radius steigt.

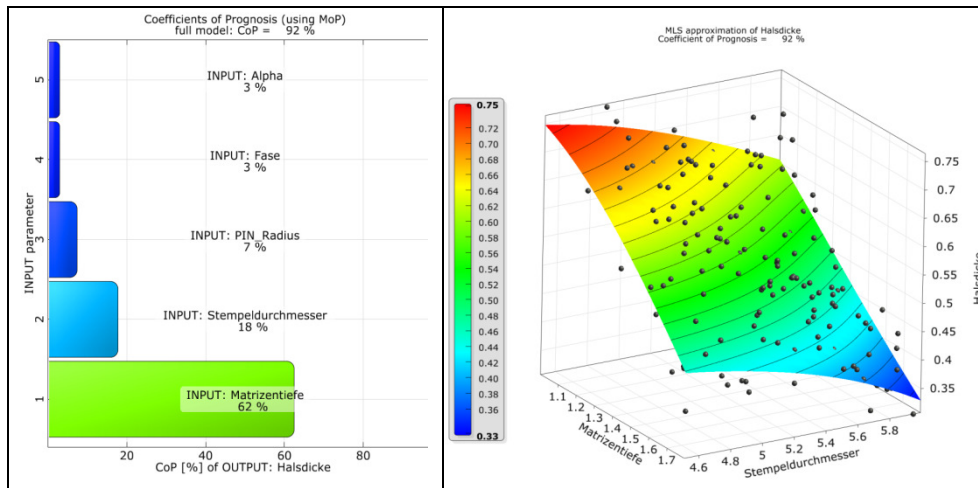


Abbildung 7: Relevante Einflussgrößen auf die Halsdicke

An dieser Stelle wird auch die bekannte Problematik bei der Auslegung von Clinchwerkzeugen ersichtlich: Die beiden Parameter, welche Halsdicke und Hinterschnitt am meisten beeinflussen (Stempeldurchmesser und Matrizen-tiefe) verändern diese Größen tendenziell genau entgegengesetzt. Bei einer Vergrößerung des Stempeldurchmessers wird also zwar der Hinterschnitt vergrößert, gleichzeitig aber auch die Halsdicke reduziert. Gleiches gilt in umgekehrter Weise für die Matrizen-tiefe. Auf diese Problematik und weitere Aspekte der Optimierung wird später eingegangen.

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.

Um die Relevanz der beiden bisher wichtigsten Parameter zu sehen und somit ein globales Prozessverständnis zu erlangen, wurden die CoP-Ergebnisse auf Basis der OptiSLang Berechnungen aufgearbeitet (s. Abbildung 8).

Wie zu sehen ist, hat die Variation des Stempeldurchmessers auf die meisten Ergebnisgrößen einen sehr großen Einfluss. Dabei wird allerdings lediglich die Halsdicke bei steigendem Stempeldurchmesser verringert. Alle übrigen, signifikant beeinflussten Ergebnisgrößen wachsen mit wachsendem Stempeldurchmesser. Interessant ist beim Stempeldurchmesser der Aspekt, dass sich seine Veränderung nicht in einer signifikanten Veränderung des Umformgrades und des maximalen Damage-Wertes im Halsbereich widerspiegelt. Unter Vorbehalt steht die Behauptung, dass durch die Variation des Stempeldurchmessers die Ausbildung des Clinchpunktes massiv beeinflusst wird

(Halsdicke und Hinterschnitt), ohne dass eine signifikante Änderung der Werkstoffschädigung im Halsbereich eintritt.

Im Vergleich mit dem Stempeldurchmesser kann mit dem Parameter Matrizen­tiefe die Halsdicke stärker und der Hinterschnitt weniger stark beeinflusst werden, auf die Fugekraft hat die Matrizen­tiefenvariation sehr geringen Einfluss. Für die Matrizen­tiefe gilt jedoch: eine Vergrößerung der Matrizen­tiefe führt zu einer massiven Steigerung des Umform­grades und des Damage-Wertes im Halsbereich, gleichbedeutend mit einer deutlich wachsenden Gefährdung von Halsrissen und -anrissen durch den Fügeprozess.

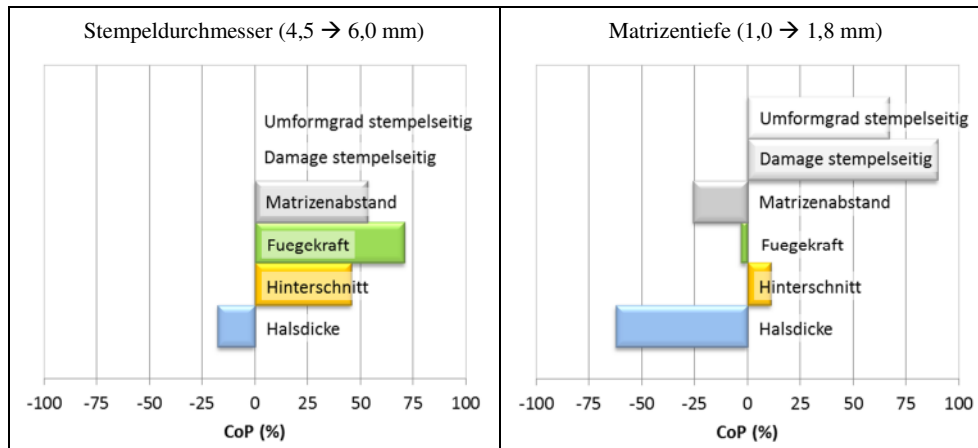


Abbildung 8: Einfluss relevanter Parameter auf Ergebnisgrößen

## 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.

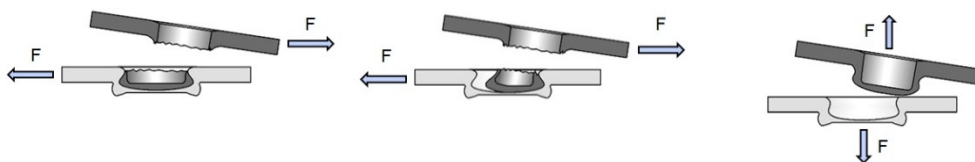


Abbildung 9: Fehlermodi bei Clinchpunktbelastung nach DVS (2009)

Abbildung 9 zeigt die möglichen Fehlermodi des Verbindungsversagens bei Punkt­belastung: Halsriss (links), Mischversagen (Mitte) und Ausknöpfen (rechts). 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 Matrizen­tiefe ermittelt. Wie Abbildung 5 und Abbildung 7 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, sowie die Bodendicke berücksichtigt. Die Optimierung erfolgt mittels der Adaptive Response Surface Methode (ARSM) 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 (s. Abbildung 10).

## 4.2 Ergebnisse der Parameteroptimierung

Die Konvergenzdiagramme in Abbildung 11 von Stempeldurchmesser, Matrizen­tiefe und AD zeigen relativ schnell eine Konvergenz der Parameter. Lediglich für die Bodendicke kann keine Konvergenz erzielt werden. Dies liegt darin begründet, dass die Bodendicke keinen Einfluss auf die Zielfunktion hat. Dieser Zusammenhang wurde bereits in vielen Untersuchungen nachgewiesen: Eine Reduktion der Bodendicke am Prozessende hat keinen signifikanten Einfluss auf die Halsdicke, sondern führt ausschließlich zu einer Steigerung der Hinterschneidung, Hahn (2002). Dieser Parameter hat also allenfalls Einfluss auf die Einhaltung der ersten Nebenbedingung. Aus den Konvergenzkurven kann ein weiterer Effekt abgelesen werden: Simulationen, bei der eine oder beide Nebenbedingungen verletzt wurden, sind mit einem roten Punkt gekennzeichnet, alle i.O.-Simulationen mit einem grünen Punkt. Man erkennt deutlich mehr rote Punkte als grüne, also mehr Simulationen mit Parameterkonstellationen, welche zur Verletzung einer oder beider Nebenbedingungen führen. Dies hat seine Ursache vorrangig in der sehr engen Festlegung der Nebenbedingungen. Gegebenenfalls muss bei diesem Optimierungsproblem eine Erweiterung der Nebenbedingungen in Betracht gezogen werden (z.B. Erhöhung der Kraftschränke von 30 kN auf 35 kN).

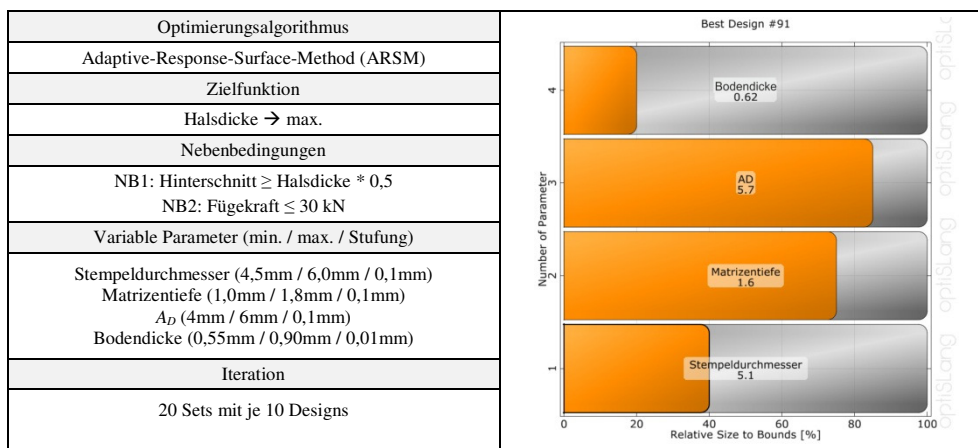


Abbildung 10: links: Randbedingungen der Analyse;  
rechts: Balkendiagramm mit optimalen Parametern

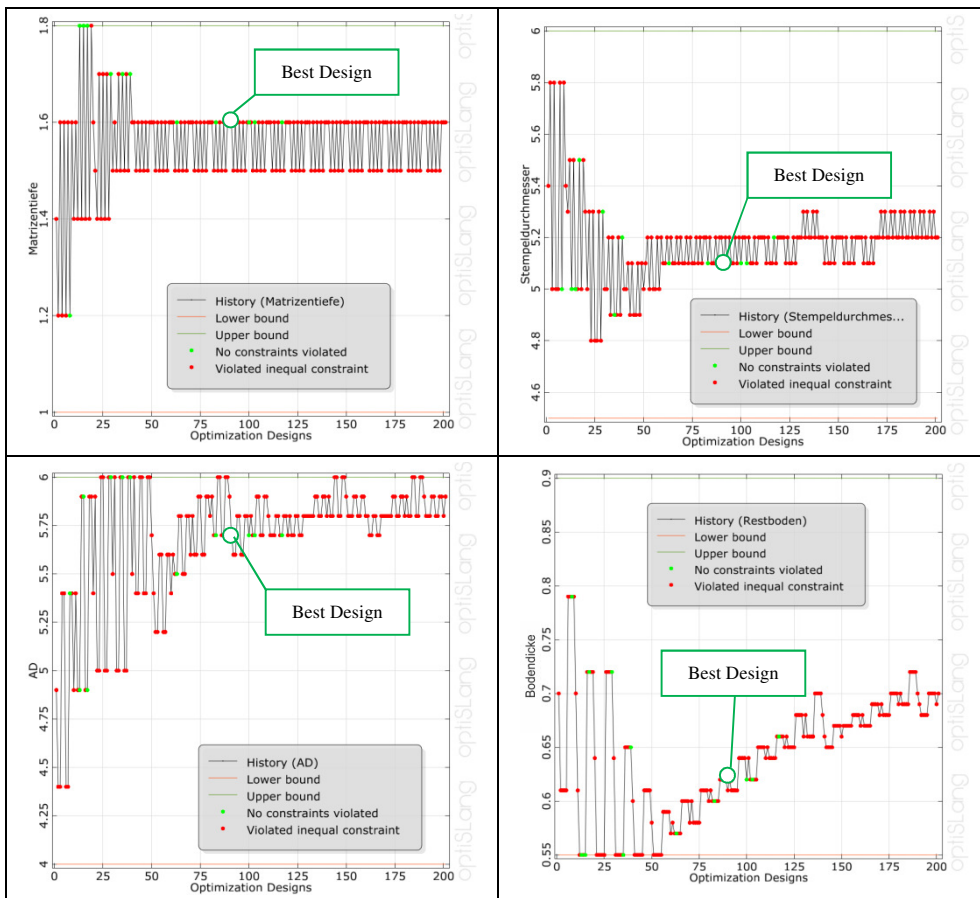


Abbildung 11: Konvergenzdiagramme der Parameter

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. In Abbildung 12 ist auf der linken Seite der Ausgangspunkt der Optimierung zu sehen: die Referenzverbindung im experimentellen und numerischen Querschnitt.

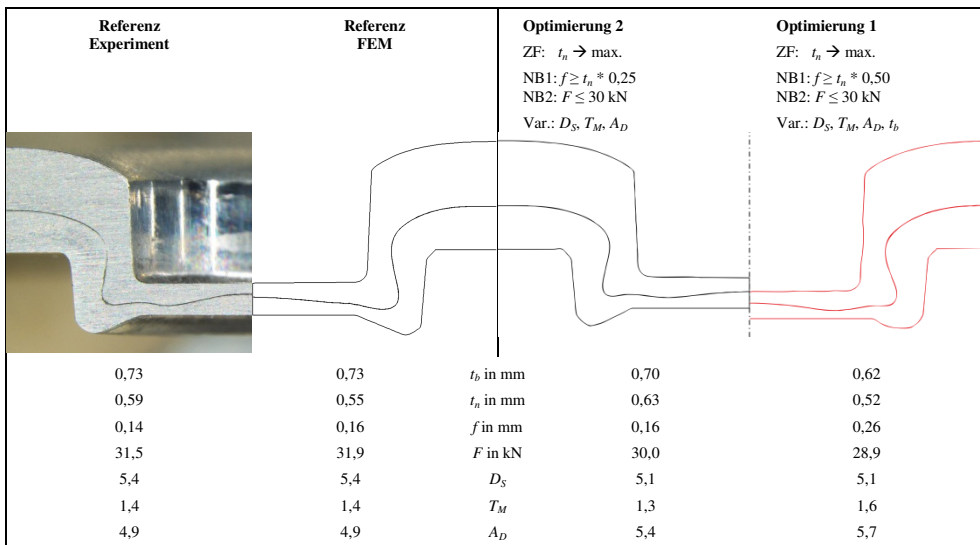


Abbildung 12: Schlibbilder optimierter Verbindungen mit verschiedenen Nebenbedingungen

Die rechte Hälfte zeigt die Unterschiede im Querschliffvergleich für ein Mindestverhältnis Hinterschnitt/Halsdicke von 0.25 und 0.5 auf. Im Vergleich zwischen Optimierung 1 und der FEM-Referenz scheint die Maximierung der Halsdicke nicht erfolgt worden zu sein. Dies liegt aber an den ehrgeizig gewählten Nebenbedingungen, die in der Referenzverbindung verletzt wurden. Diese strenge Wahl bringt eine Hinterschnittvergrößerung von 62% mit sich. Eine Vergrößerung der Halsdicke ist dagegen bei Optimierung 2 festzustellen (+15%), mit der ein unveränderter Hinterschnitt und eine maximal erlaubte Fügekraft einhergehen. Insgesamt kann aus diesen beiden Optimierungsergebnissen abgeleitet werden, dass die Referenzverbindung schon recht gut bemustert ist. Es konnte das Potenzial der Optimierung gezeigt werden, schnell optimale Werkzeuggeometrien für verschiedene Anforderungen an den Clinchpunkt zu ermitteln.

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.

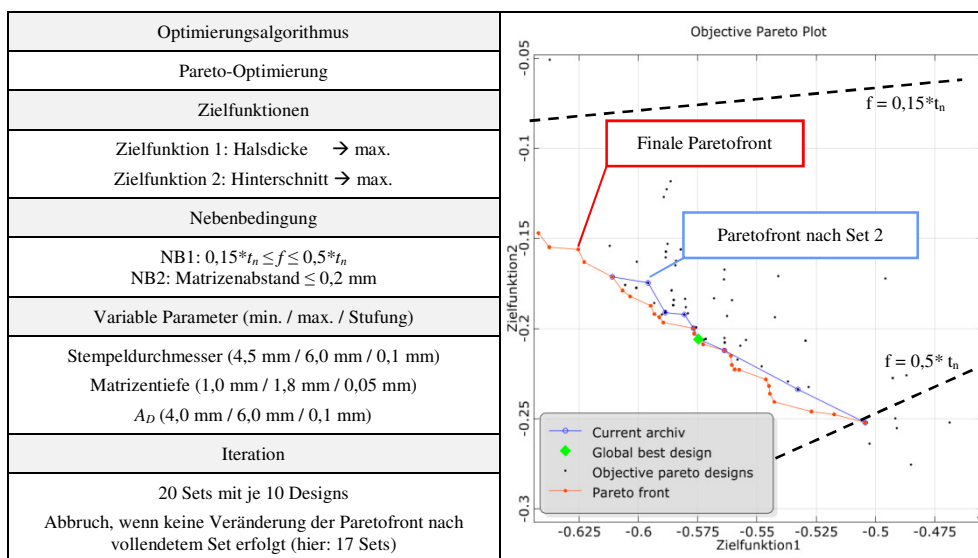


Abbildung 13: Randbedingungen (links) und Ergebnis (rechts) der Pareto-Optimierung

In Abbildung 13 ist erkennbar, dass das optimale Ergebnis nicht eindeutig bestimmt ist. Aus der finalen Paretofront kann ein optimales Ergebnis ausgewählt werden, je nachdem, ob der Fokus mehr auf der ersten oder zweiten Zielfunktion liegt.

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 für mehrere 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 0.1mm sowie ein maximales Ausheben der Verbindung aus der Matrize von 0.3mm gewählt. Die betrachteten Werkstoff- und Dickenpaarungen können Abbildung 14 entnommen werden. Hier wird auch ersichtlich, dass in der Gegenüberstellung von FEM und Experiment sehr gute Übereinstimmung von Numerik und Realität erzielt werden. Der optische Vergleich der Querschnittkontur zeigt für alle Paarungen eine nahezu perfekte Übereinstimmung.

Durch diese Gegenüberstellung wird eindrucksvoll das Potenzial dieser Vorgehensweise für die Werkzeugoptimierung deutlich.

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.

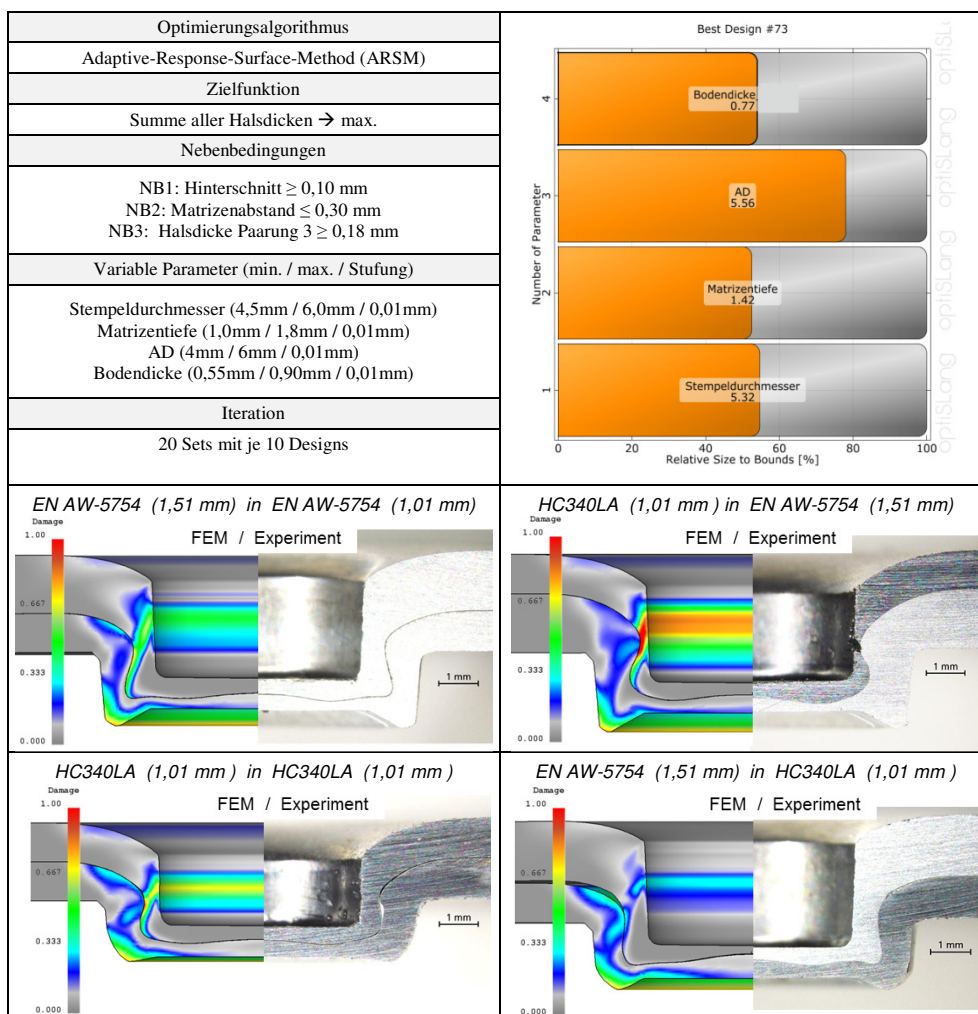


Abbildung 14: Kompromissauslegung für vier Werkstoff- und Dickenpaarungen; oben links: Randbedingungen der Analyse; oben rechts: Balkendiagramm mit optimalen Parametern; unten: Simulationsergebnisse im Vergleich mit dem Experiment

## 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.

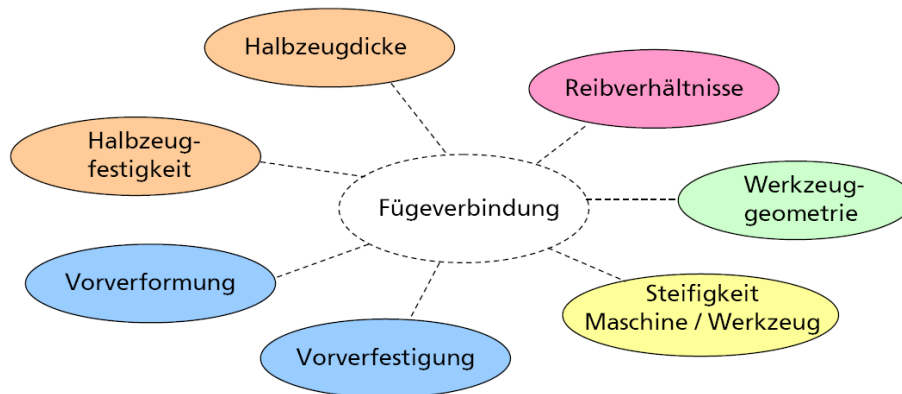


Abbildung 15: Auswahl relevanter toleranzbehafteter Prozessparameter beim mechanischen Fügen

Abbildung 15 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 Abbildung 16. Zudem werden Ungenauigkeiten bei der Herstellung der Werkzeuge Stempel und Matrize, sowie Verschleißerscheinungen und ähnliches berücksichtigt, indem geringe Schwankungen um den Nennwert betrachtet werden. Als Ergebnisgrößen werden - wie bei der Sensitivitätsanalyse gegenüber den Designparametern - die Halsdicke, der Hinterschnitt und die Fügekraft ausgewertet.

		Parameter	Min.	Max.
Werkstoff	oben	Herstellungsblechdicke in mm	1,36	1,64
		Vorverformung	-0,2	0
		Zugfestigkeit $R_m$ in N/mm <sup>2</sup>	170	260
	unten	Herstellungsblechdicke in mm	0,90	1,10
		Vorverformung	-0,2	0
Feibung		Stempel - oberes Blech	0,15	0,45
		Niederhalter - oberes Blech	0,15	0,45
		oberes Blech - unteres Blech	0,15	0,45
		Matrize - oberes Blech	0,15	0,45

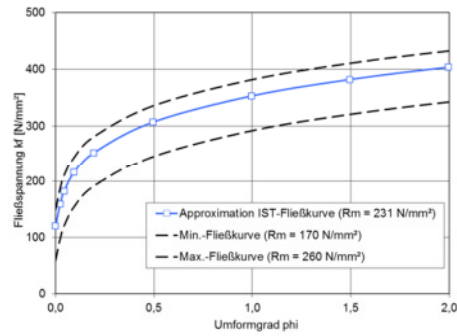


Abbildung 16: Unsicherheiten und deren Variationsgrenzen; links: Grenzwerte; rechts: Prinzip der Fließkurvenverschiebung

In der betrachteten Robustheitsanalyse sollen die Eingangsparameter eine möglichst realitätsnahe Verteilungsfunktion annehmen. Dabei kann es mitunter auch nötig sein, die Verteilung bestmöglich abzuschätzen. Als Beispiel ist in Abbildung 17 oben links die Normalverteilung der unteren Herstellungsblechdicke skizziert.

## 5.2 Ergebnisse der Robustheitsanalyse

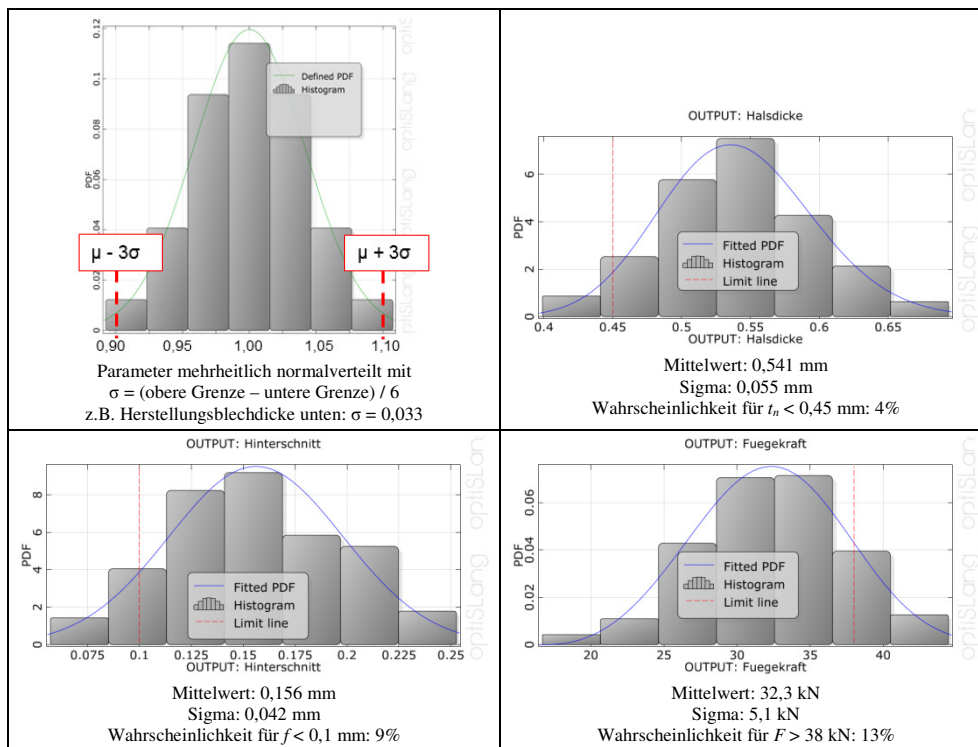


Abbildung 17: oben links: Normalverteilung des Parameters „untere Herstellungsblechdicke“; oben rechts und unten: Häufigkeitsverteilung der Größen Halsdicke, Hinterschnitt und Fügekraft (Parameter mehrheitlich normalverteilt)

Weiter ist in Abbildung 17 die Häufigkeitsverteilung der Ergebnisgrößen Halsdicke, Hinterschnitt und Fügekraft für die Robustheitsanalyse zu sehen. Für die Bewertung der



Prozessrobustheit ist unter anderem relevant, dass geforderte Mindestwerte der Ergebnisgrößen über den gesamten Produktionsprozess eingehalten werden. Beim Clinchen betrifft dies zum Beispiel den Hinterschnitt. Häufig wird gefordert, dass diese Größe einen Wert von 0,1 mm nicht unterschreiten sollte. Da diese Ausfallwahrscheinlichkeit von 9% als zu hoch angenommen wird, wird nun eine Methode zur Verbesserung vorgestellt (s. Abbildung 18).

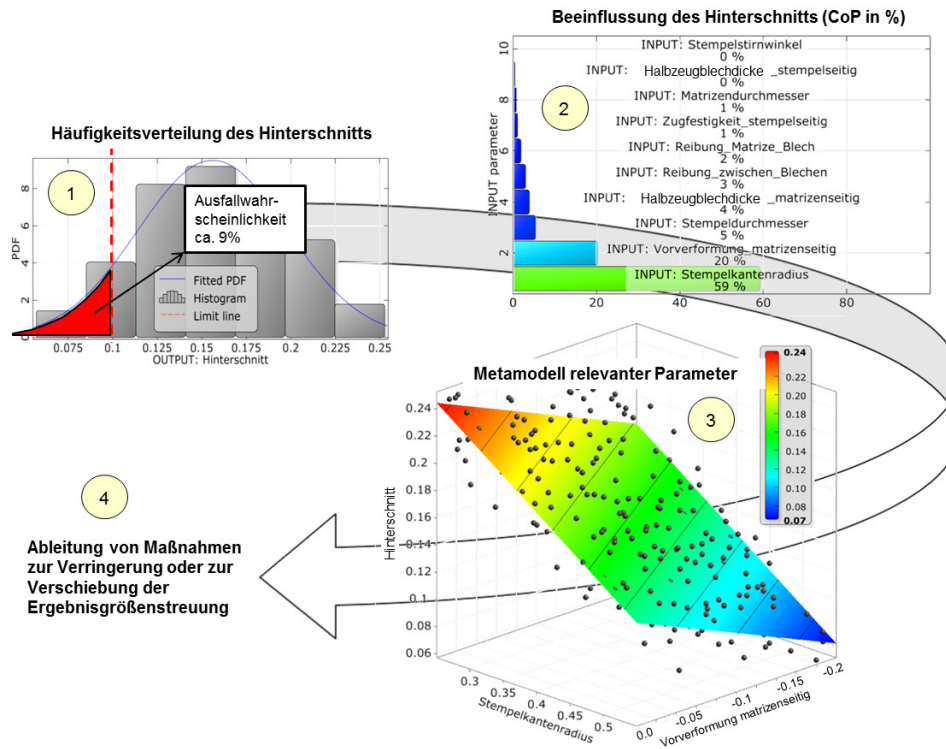


Abbildung 18: Prinzipielle Vorgehensweise bei der Auswertung von Robustheitsanalysen und der Ableitung von Maßnahmen zur Verbesserung der Robustheit.

Nach der Bewertung der Ausfallwahrscheinlichkeit (Schritt 1), ist die Kenntnis erforderlich, welche Parameter den größten Einfluss auf die kritische Ergebnisgröße, den Hinterschnitt, haben. Dies kann, genau wie bei der Sensitivitätsanalyse, anhand des CoP-Diagramms abgeleitet werden (Schritt 2). Im vorliegenden Beispiel sind der Stempelkantenradius und die Vorverformung des matrizenseitigen Bleches Haupteinflussparameter. Deren Wirkrichtung auf die Ergebnisgröße kann aus dem zugehörigen Metamodell abgelesen werden (Schritt 3): Kritisch hinsichtlich kleiner Hinterschnitte sind ein großer Stempelkantenradius und eine starke Vorverformung (Blechausdünnung) des matrizenseitigen Bleches. Basierend auf diesen Erkenntnissen können nun Maßnahmen für einen robusteren Prozess abgeleitet werden.

Beispielhaft kann dies in einer Robustheitsanalyse mit einer Verringerung der zulässigen Abnutzung des Stempelkantenradius von 0,55mm auf 0,45mm geschehen. In der Praxis heißt dies höhere Kosten, da der Stempel häufiger ausgetauscht werden muss. Man sieht in Abbildung 19, dass dies einen positiven Einfluss auf die Ausfallwahrscheinlichkeit hat, die dann nur noch bei 1,5% liegt.

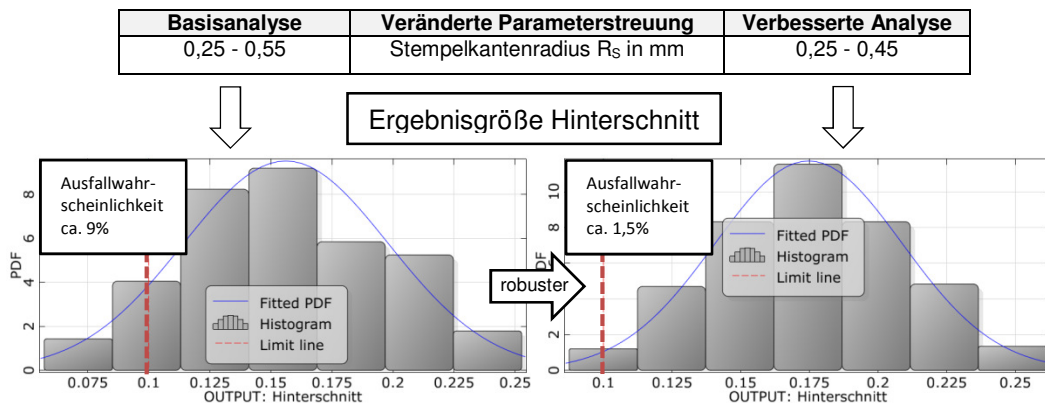


Abbildung 19: Verbesserte Robustheit des Hinterschnitts

Die dargestellten Beispiele und die aufgezeigte Vorgehensweise bei der Robustheitsbewertung des Clinchprozesses zeigen deutlich das Potenzial der numerischen Robustheitsanalyse auf. Ähnlich wie bei der Sensitivitätsanalyse werden die komplexen Parametereinflüsse aufgeschlüsselt. Der Nutzer hat somit die Möglichkeit die Wirkrichtung der relevanten Parameter zu studieren und geeignete Maßnahmen für eine Verbesserung des Clinchprozesses abzuleiten. Wie bei der Optimierung so ist es auch bei der Robustheitsbewertung notwendig, dass ein möglichst gut mit dem Experiment abgeglichenes FE-Modell existiert, da definierte Werte der Ergebnisgrößen Gegenstand der Bewertung sind.

## 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 der 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 und Optimierungen 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 Stanz-

nietverfahren. 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 Referenzen/Literaturangaben

- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Fertigungsverfahren Fügen, Teil 5: Fügen durch Umformen, Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2003
- DEUTSCHER VERBAND FÜR SCHWEIßEN UND VERWANDTE VERFAHREN E.V.: *Taschenbuch DVS-Merkblätter und -Richtlinien – Mechanisches Fügen, Fachbuchreihe Schweißtechnik*, Band 153, DVS-Media GmbH, Düsseldorf, 2009
- DIETRICH, S.: *Grundlagenuntersuchungen zu neuen matrixlosen Umformfügeverfahren*. Chemnitz, TU Chemnitz, Dissertation, 2006
- HAHN, O.; u.a.: *Verfahrenssimulation des Durchsetzfügens kaltverfestigter Aluminiumwerkstoffe zur rechnergestützten Werkzeugentwicklung*. Hannover, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechbearbeitung e.V., 2002. Forschungsbericht Nr. 183
- 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)
- KÜHNE, T.: *Clinchen und Kleben – Komplexer Einsatz im Mischbau*. In: *Adhäsion. Kleben und Dichten* 10/2007, S.32-36
- 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
- MUCHA, J.: *The analysis of lock forming mechanism in the clinching joint*. In: *Materials and Design*, 2011 32 (10), S. 4943-4954
- 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
- OUDJENE, M., ET AL: *Shape optimization of clinching tools using the response surface methology with Moving Least-Square approximation*. In: *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 209, Issue 1, Januar 2009, S.289-296

- 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
- ROOS, D.; BUCHER, C.: Methoden der stochastischen Optimierung. *Konferenz-Einzelbericht: Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag 1.0*, Weimar, 2004
- STEINHAEUER, A.: In-Process Qualitätskontrolle fürs Clinchen. In: *Blech Rohre Profile*, 3-2007, S. 33
- VARIS, J.P.; LEPISTÖ, J.: A simple testing-based procedure and simulation of the clinching process using finite element analysis for establishing clinching parameters, *Thin-Walled Structures*, Vol. 41, No. 8, 2006, pp. 691–709.
- WILL, J. U.A.: Berechnung und Visualisierung statistischer Maße auf FE-Strukturen für Umformsimulationen, *Konferenz-Einzelbericht: Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag 2.0*, Weimar, 2005
- 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.