

Holistischer Ansatz zur Versagensmodellierung von Schweißpunkten in der Crashsimulation

David Pieronek¹, Andre Marx², Rolf Peter Röttger³

¹Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen (fka), Aachen, Germany

²Dortmunder OberflächenCentrum GmbH (DOC), Dortmund, Germany

³ThyssenKrupp Steel Europe AG, Duisburg, Germany

Abstract:

A sufficient modelling of spot weld behaviour in full car crash simulations is a fundamental item due to the fact that local joint fracture can make a significant contribution to the overall crash performance. The accurate reproduction of local joint properties leads typically to highly-detailed discretisations which violate the time step restrictions in full vehicle crash models and are therefore not appropriate. For this reason only representative spot weld models can be used. The existing substitute models need comprehensive experimental testing to define each joint under relevant crash loading conditions. Consequentially, a parameterisation of all combinations in a vehicle is highly cost-intensive.

The present paper introduces a new approach to provide the basis for an efficient parameterisation of substitute spot weld models. This is accomplished by using a detailed simulation model with separate damage criteria for the different weld zones in order to predict the spot weld behaviour numerically. Fracture in the weld (shear fracture) is captured by a Cohesive Zone Model, in contrast to the base material and the heat affected zone where the Gurson model with a specific set of parameters is deployed to indicate plug fracture. The necessary model parameters are identified via an inverse method. In a following verification phase a precise prediction of spot weld behaviour for similar and dissimilar joints could be demonstrated. Consequently, the experimental effort to characterise substitute spot weld models for full car crash simulations can be reduced.

Keywords:

Resistance spot welding, failure, Cohesive zone model, Gurson, dissimilar joints, process chain

1 Einleitung

Der automobilen Fahrzeugentwicklungsprozess findet heutzutage unter intensivem Einsatz numerischer Simulationswerkzeuge statt. Insbesondere die Sicherstellung der passiven Insassensicherheit wird durch umfangreiche virtuelle Crashsimulationen überprüft. Zur Erfüllung der stetig steigenden Crashanforderungen werden zunehmend moderne Stahlwerkstoffe eingesetzt, die über hohe Festigkeiten verfügen und damit einer signifikanten Erhöhung des Fahrzeuggewichtes entgegenwirken. Neben dem Materialkonzept leistet auch die Fügetechnik einen entscheidenden Beitrag zur Crashperformance, da der Strukturzusammenhalt der crashrelevanten Komponenten während der Energieabsorption sichergestellt werden muss. Ein Versagen der Fügestellen kann zu einem global veränderten Crashverhalten oder sogar zum vollständigen Verlust der Strukturintegrität führen. Daher ist die Berücksichtigung des Versagensverhaltens von Fügestellen für eine verlässliche Craschauslegung sinnvoll.

Das dominierende thermische Fügeverfahren im Karosseriebau ist das Widerstandspunktschweißen. Konventionelle Stahlkarosserien weisen in der Regel mehrere tausend Schweißpunkte auf, so dass eine geeignete Modellierungstechnik für Schweißpunkte in der Crashsimulation von besonderer Wichtigkeit ist. Im folgenden Bild 1 ist dazu exemplarisch die von der ThyssenKrupp Steel Europe AG entwickelte Karosserie aus dem InCar-Projekt [1] dargestellt, welche über die ganze Struktur verteilt annähernd 6000 Schweißpunkte besitzt und Bleche aus unterschiedlichsten Stahlgüten für ein optimales Crashmanagement miteinander verbindet.

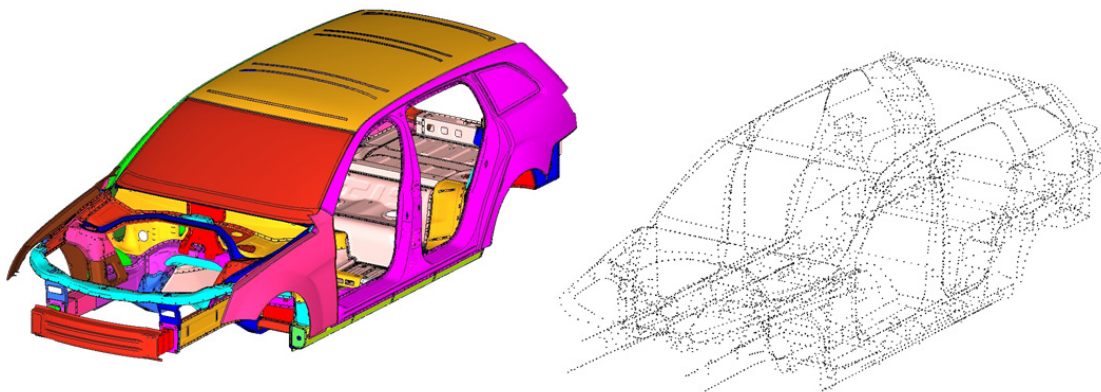


Bild 1: Verteilung der Stahlgüten (links) sowie Schweißpunkte (rechts) bei der InCar-Referenzstruktur

Aus Effizienzgründen können Schweißpunkte im Gesamtfahrzeugmodell nur über Ersatzmodelle abgebildet werden, die das Verformungs- und Versagensverhaltens vereinfacht beschreiben [2], [3]. Notwendige Voraussetzung für alle derzeit existierenden Ersatzmodelle sind experimentelle Daten aus unterschiedlichen Belastungsversuchen (Scherzug-, Kopfzug-, Schälzug-, KS2-Proben), die eine Parametrisierung der Ersatzmodelle erlauben. Neben der Belastungsart ist das Versagensverhalten von Schweißverbindung auch von den Schweißparametern, Material und Blechdicke abhängig. Folglich müssen für jede Schweißpunktverbindung entsprechende Versuchsdaten sowie Modellparameter ermittelt werden. Aus den vielfältigen Verbindungskombinationen im Fahrzeug (vgl. Bild 1) resultiert eine umfangreiche Versuchsmatrix, deren Abprüfung sehr aufwändig und kostenintensiv ist.

Zur Lösung dieses Zielkonfliktes wurde eine holistische Simulationsmethode entwickelt, mit der die notwendigen Daten zur Parametrisierung der Ersatzmodelle von beliebigen Schweißpunktverbindungen virtuell bestimmt werden können. Dazu werden detaillierte Simulationsmodelle mit zonenspezifischen Versagenskriterien eingesetzt, welche unter definierter Belastung die Versagensart (Scherbruch oder Ausknöpfbuch) und das Festigkeitsverhalten von standardisierten Proben mit einem Schweißpunkt prognostizieren.

2 Grundlagen

Die konzentrierte Wärmebringung beim Widerstandspunktschweißprozess führt zu einer lokalen Veränderung der Mikrostruktur und damit der Materialeigenschaften im Bereich der Fügestelle. Es können drei verschiedene Gefügezonen identifiziert werden: Schweißlinse (SL), Wärmeinflusszone (WEZ) und Grundwerkstoff (GW). Die Schweißlinse bildet die stoffschlüssige Verbindung zwischen den Stahlblechen. Die Wärmeinflusszone ist aufgrund der komplexen Temperaturführung während des Schweißprozesses von einer ungleichmäßigen Gefügestruktur geprägt. Die unterschiedlichen Gefügezonen können durch Schliffbilder und Härtemessungen detektiert werden und bestimmen durch die resultierenden mechanischen Eigenschaften die Tragfähigkeiten sowie das Bruchverhalten der Schweißverbindung. Im folgenden Bild 2 ist der Härteverlauf in der Schweißpunktumgebung für artgleich gefügte Werkstoffpaarungen dargestellt. Dabei kristallisieren sich materialspezifische Unterschiede heraus, wie z.B. der Härteeinbruch in der Wärmeinflusszone (WEZ) beim MS-W 1200.

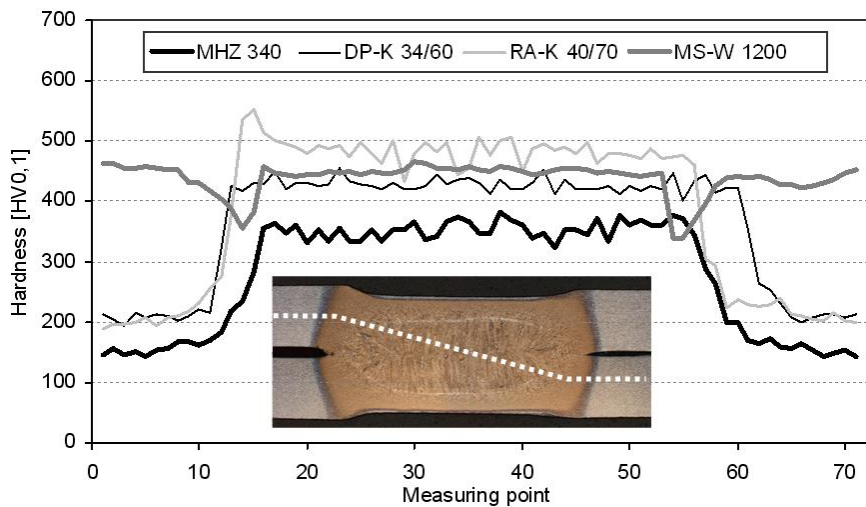


Bild 2: Härtemessungen im Bereich der Schweißpunktverbindung

Das Bruchverhalten von Schweißpunktverbindungen kann generell in zwei unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden. Der Scherbruch tritt im Allgemeinen schlagartig ein und ist mit geringer plastischer Verformungen sowie Energieaufnahme verbunden. Die Trennung der Bleche erfolgt dabei entlang der Fügeebene, also durch die Schweißlinse. Der Ausknöpfbuch findet in der Umgebung der Schweißlinse statt und kann sowohl im Grundwerkstoff als auch in der Wärmeinflusszone initiieren. Diese Bruchart ist mit hoher Energieaufnahme verbunden und wird deshalb bevorzugt. In Bild 3 sind die unterschiedlichen Brucharten dargestellt. Eigene Untersuchungen zeigen eine Abhängigkeit der Tragfähigkeit und Bruchart von der Belastungsart, Materialgüte, Blechdicke und den eingesetzten Schweißparameter [4]. Die Berücksichtigung der genannten Einflussfaktoren in einem numerischen Detailmodell ist für eine verlässliche, virtuelle Versagensprognose erforderlich.



Bild 3: Ausknöpfbuch (links) und Scherbruch (rechts)

3 Virtuelle Versagensprognose

Eine numerische Vorhersage der Tragfähigkeit und Bruchart von widerstandspunktgeschweißten Stahlblechverbindungen erfordert Informationen über die Schweißpunktgeometrie sowie die zonenspezifischen Materialeigenschaften. Diese können aus entsprechenden Schlibbildern und Härtemessungen abgeleitet werden oder auch aus einer vorgelagerten Prozesssimulation des Widerstandspunktschweißens entnommen werden [5], [6]. Mit zonenspezifischen Schädigungsmodellen kann folgend eine Versagensprognose von Proben mit einem Schweißpunkt durchgeführt werden.

3.1 Detailmodellierung

Die Abbildung der Schweißpunktgeometrie und bereichsweisen Materialeigenschaften erfolgt durch Volumenelemente mit einer homogenen Elementkantenlänge von 0,2 mm. Diese feine Diskretisierung ist notwendig, um die inhomogenen Spannungs- und Dehnungsverteilung, die sich bei einer Belastung ergeben, ausreichend darzustellen. Das Modell wird in unterschiedliche Gefügezonen eingeteilt: Schweißlinse (SL), Wärmeeinflusszone (WEZ) sowie Grundwerkstoff (GW) und mit separaten Material- und Schädigungsmodellen versehen. Die plastischen Eigenschaften der Gefügezonen werden durch Skalierung der Grundwerkstofffließkurve auf Basis des relativen Härteunterschiedes approximiert. Das folgende Bild 4 zeigt die schematische Detailmodellierung eines Schweißpunktes.

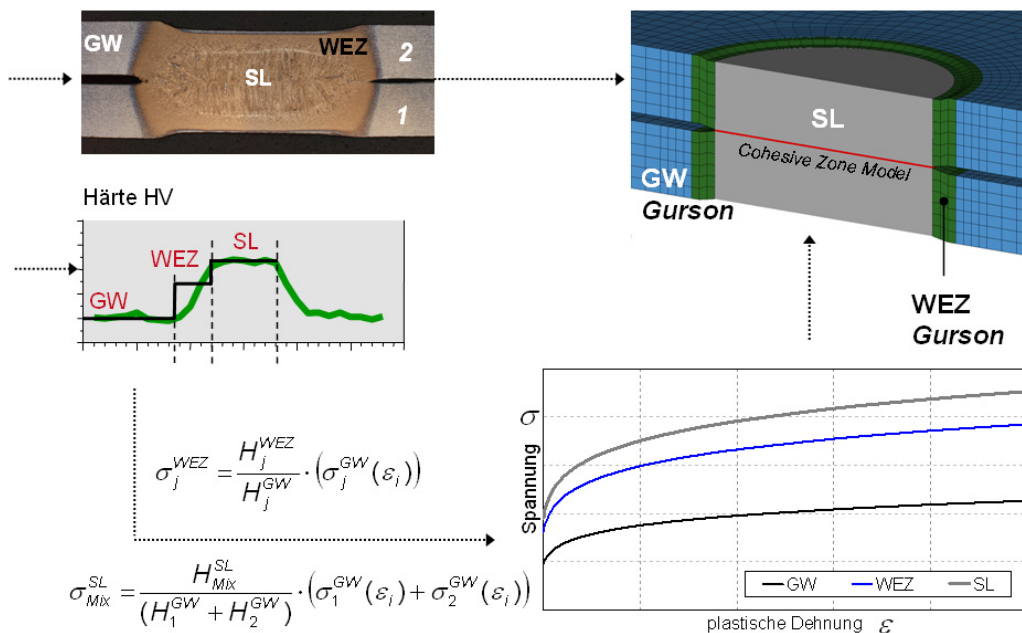


Bild 4: Detailmodellierung einer Schweißpunktverbindung

Die Schädigungsmodellierung wird in den drei Schweißpunktzonen durch unterschiedliche Strategien realisiert. Für die Schweißlinse wird ein phänomenologischer Ansatz verwendet und die mögliche Trennung der gefügten Bleche über ein Cohesive Zone Model beschrieben. Dazu werden Grenzflächenelemente im Bereich eines zu erwartenden Risses platziert und mit einem dazugehörigen Materialmodell, welches die resultierenden Kräfte und Verschiebungen in normaler und tangentialer Richtung in Beziehung setzt, versehen. Durch diesen Ansatz kann der komplexe Bruchprozess in der Schweißlinse effektiv modelliert werden.

Das Versagen in der Wärmeeinflusszone und im Grundwerkstoff wird über das mikromechanisch motivierte Materialmodell nach Gurson abgebildet [7]. Die Modellparameter können sich dabei in Abhängigkeit der Stahlgüte und Gefügezone deutlich voneinander unterscheiden. Der Bruchvorgang selber wird im Gurson-Modell über die Mechanismen Porenbildung, -wachstum und -vereinigung mathematisch beschrieben. Experimentelle Untersuchungen an Bruchflächen von Schweißpunkten zeigen, dass der duktile Bruch hauptsächlich bei Schweißpunktverbindungen vorkommt [2].

3.2 Validierung

Die Parametrisierung der zonenspezifischen Versagensmodelle erfolgt durch inverse Simulation einfacher Versuche mit einem Schweißpunkt. Dadurch ist die Validierungsphase effektiv und eine aufwändige Herstellung von experimentellen Schweißpunktersatzgefügen entfällt. Für die Ermittlung der spezifischen Versagensparameter eignen sich Schälzug- und Scherzugversuche. Diese liegen im Allgemeinen vor, um eine erste Charakterisierung einer Verbindung oder die Parametrisierung von Ersatzmodellen zu ermöglichen.

Beim Schälzugversuch führt die lokale Spannungskonzentration im Fügespalt zu einer kritischen Beanspruchung in der Wärmeeinflusszone, so dass ein Versagen in dieser Zone bevorzugt auftritt. Daher kann dieser Versuch zur Bestimmung der Gursonparameter der Wärmeeinflusszone eingesetzt werden. Das folgende Bild 5 zeigt das Ergebnis der Modellanpassung für eine artgleiche Verbindung aus dem Dualphasen-Stahl DP-K 34/60.

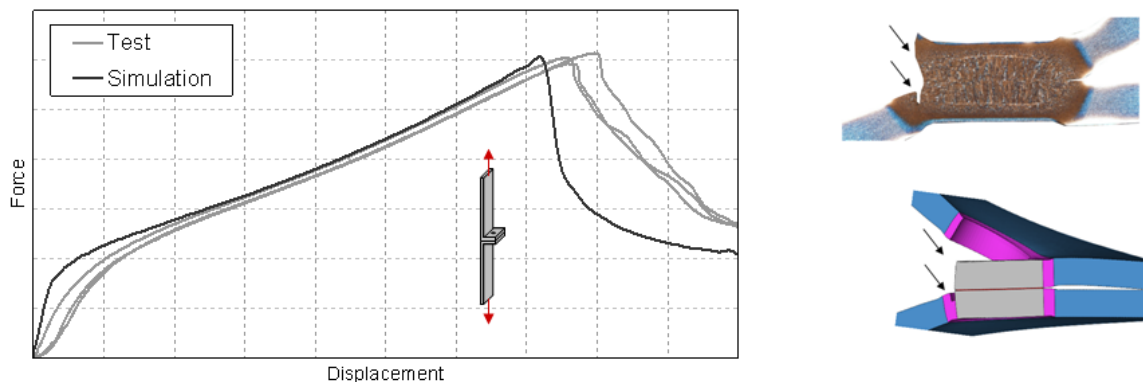


Bild 5: Validierung der Versagensparameter für die Wärmeeinflusszone beim DP-K 34/60

Zur Kalibrierung der Versagensmodelle für die Schweißlinse und den Grundwerkstoff bietet sich der Scherzugversuch mit unterschiedlichen Schweißlinsendurchmessern an. Mit steigender Größe der Schweißlinsengröße kann in der Regel ein Wechsel vom Scherbruch zum Ausknöpfbuch festgestellt werden. Somit können die beiden Brucharten im Simulationsmodell aufeinander abgestimmt werden. Das Bild 6 zeigt das Ergebnis der Validierung für zwei unterschiedliche Schweißlinsendurchmesser ($4\sqrt{t}$ und $4,5\sqrt{t}$). Auch hier ist der entwickelte Modellansatz in der Lage, die experimentellen Beobachtungen zuverlässig wiederzugeben.

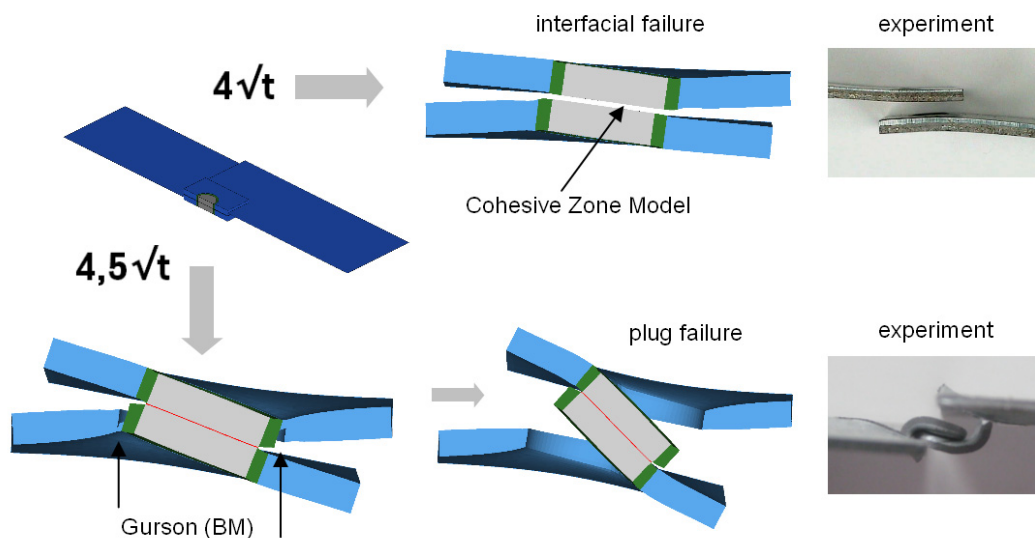


Bild 6: Scherzugversuch: DP-K 34/60 + DP-K 34/60

3.3 Verifikation

Die Prognosefähigkeit des entwickelten Simulationsmodells wird anhand der KS2-Probe überprüft. Die Geometrie der KS2-Probe sowie die möglichen Belastungen sind in Bild 7 dargestellt. Der wesentliche Vorteil dieses Testverfahrens ist die Möglichkeit zur Abprüfung mehrerer Belastungssituationen mit nur einer Probenform. Aus diesem Grund wird die KS2-Probe überwiegend zur Charakterisierung von Verbindungen und zum Aufbau von geeigneten Ersatzmodellen eingesetzt [3].

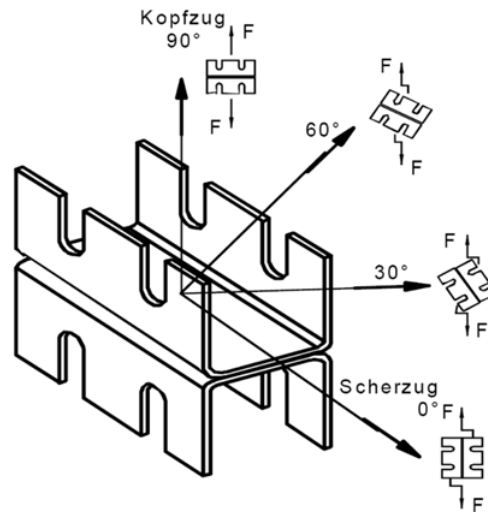


Bild 7: KS2-Probe und mögliche Belastungsarten [8]

Die Simulationsergebnisse der KS2-Probe sind nachfolgend für unterschiedliche Stahlgüten und Kombinationen unter Verwendung der Modellparameter aus der Validierungsphase dargestellt.

3.3.1 Artgleiche Verbindungen

Zunächst erfolgt der Abgleich für die aus der Validierung bekannte Verbindung aus dem Dualphasen-Stahl DP-K 34/60 und der Blechdicke t_1 . Die Resultate sind in Bild 8 dargestellt und zeigen, dass das Simulationsmodell sowohl das Festigkeitsverhalten als auch die Bruchart genau prognostizieren kann.

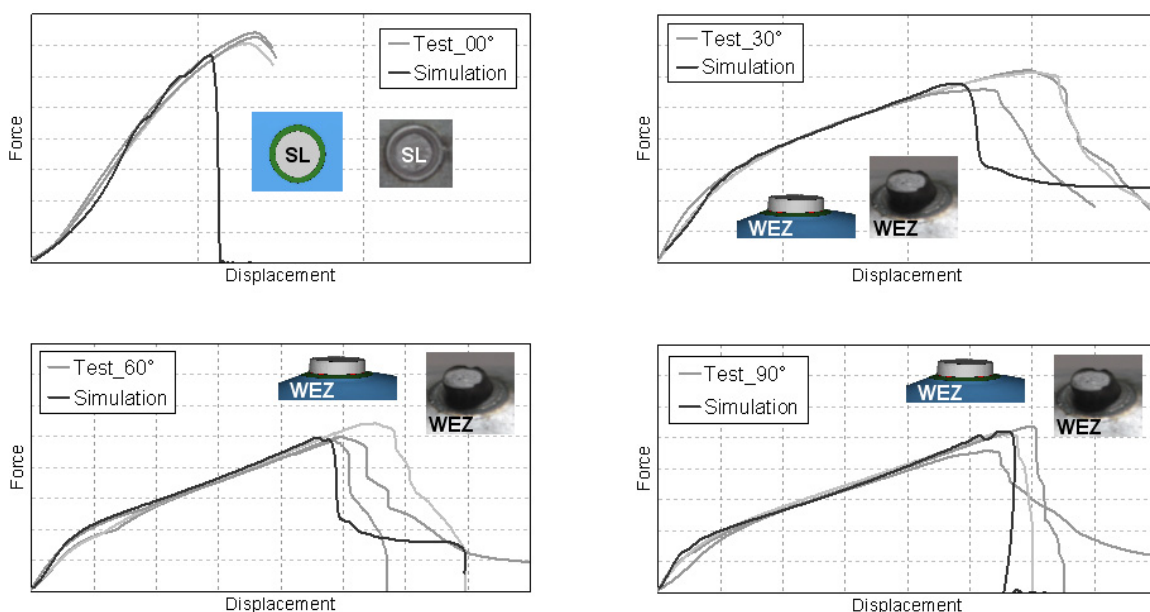


Bild 8: KS2-Probe: DP-K 34/60 (t_1) + DP-K 34/60 (t_1)

In einem weiteren Schritt wurde die Vorhersagegenauigkeit für eine Verbindung aus DP-K 34/60 mit der geringeren Blechdicke t_2 untersucht. Diese Ergebnisse sind in Bild 9 dargestellt und zeigen auch hier eine hohe Prognosegüte der entwickelten Simulationsmethode. Besonders interessant ist der Wechsel der Bruchart bei überwiegender Scherbelastung, welche durch das Modell ohne Anpassungen wiedergegeben wird. Zudem kann festgestellt werden, dass die einmal ermittelten Versagensparameter ohne Anpassungen auf andere Blechdicken übertragbar sind.

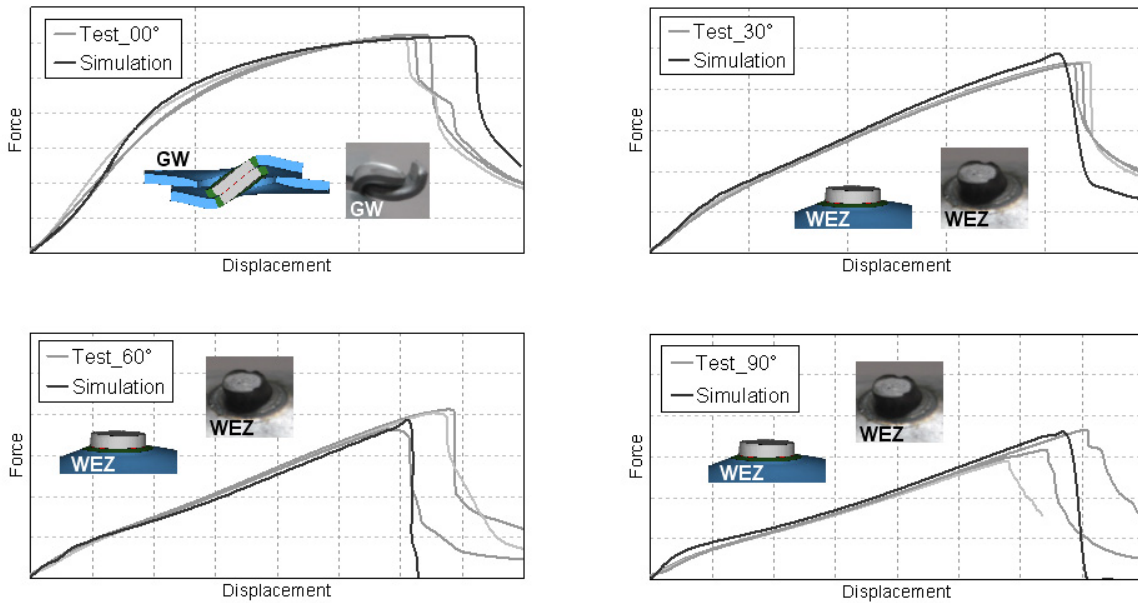


Bild 9: KS2-Probe: DP-K 34/60 (t_2) + DP-K 34/60 (t_2)

Zur abschließenden Verifikation der Simulationsmethode wurde eine weitere Stahlgüte ausgewählt. Es handelt sich dabei um den mikrolegierten Stahl MHZ 340. Die hohe Duktilität des Werkstoffes führte im Versuch zu reinen Ausknöpfbrüchen aus dem Grundwerkstoff. Auch das Simulationsmodell prognostiziert ein Versagen im Grundwerkstoff, wie in Bild 10 zu sehen ist. Die maximalen Kräfte werden mit guter Genauigkeit bestimmt.

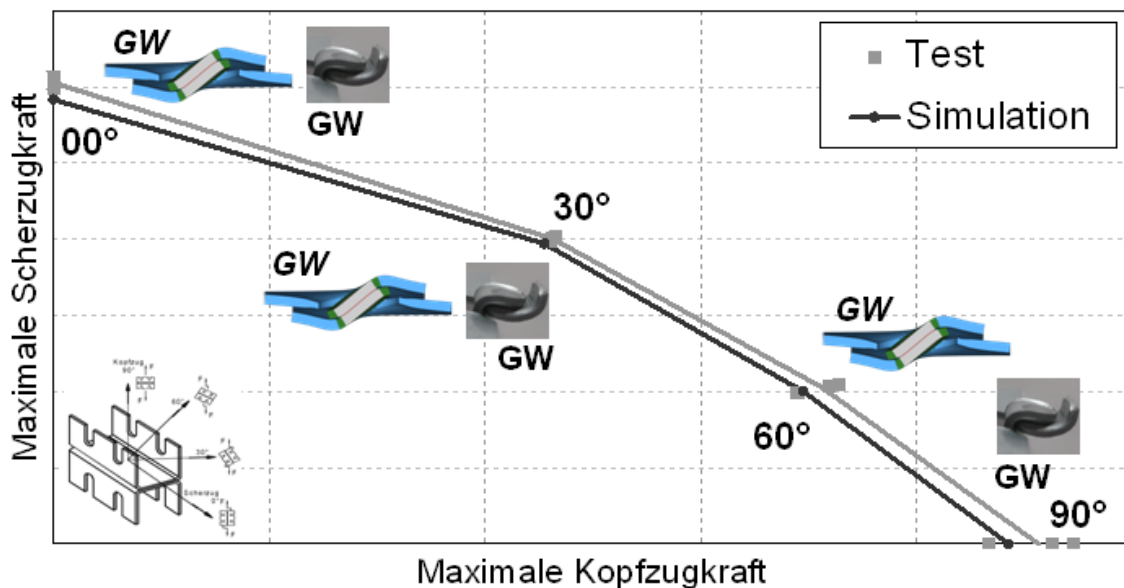


Bild 10: KS2-Probe: MHZ 340 (t_3) + MHZ 340 (t_3)

3.3.2 Mischverbindungen

Die Übertragung der Simulationsmethode auf Mischverbindungen erfordert eine Vorgehensweise zur Definition der plastischen Eigenschaften der Schweißlinse. Als Abschätzung wurde von einer homogenen Durchmischung der Stahlwerkstoffe in der Schweißlinse ausgegangen und eine modifizierte Fließkurve nach Formel (1) bestimmt.

$$\sigma_{Mix}^{SL} = \frac{H_{Mix}^{SL}}{(H_1^{GW} + H_2^{GW})} \cdot (\sigma_1^{GW}(\epsilon_i) + \sigma_2^{GW}(\epsilon_i)) \tag{1}$$

Der Parameter H bezeichnet die gemessene Vickershärte in den einzelnen Gefügezonen und $\sigma(\epsilon)$ steht für die Fließkurve des Basismaterials. Die Indizes kennzeichnen die jeweiligen Stahlgüten. Die Ermittlung der Versagensparameter für die Schweißlinse bei Mischverbindungen erfolgt äquivalent zur Vorgehensweise bei artgleichen Verbindungen.

Die Eignung der entwickelten Simulationsmethode für Mischverbindungen wurde an unterschiedlichen Blechdickenkombinationen aus den Werkstoffen DP-K 34/60 und MHZ 340 untersucht. Die ermittelten Modellparameter aus der Validierung werden dazu für beide Stahlgüten verwendet. In Bild 11 sind die realen Verformungen bei einer 90° Belastung der KS2-Probe dargestellt und belegen eine hohe Übereinstimmung mit der Simulation. Besonders interessant ist der Verlauf der zonenspezifischen Schädigungsvariablen. Während bei der Kombination aus DP-K 34/60 mit geringerer Blechdicke (t_2) die Schädigung unmittelbar in der Wärmeeinflusszone erfolgt, kommt es in der zweiten Variante zu einer Verlagerung der Schädigung in den Grundwerkstoff der mikrolegierten Stahlgüte.

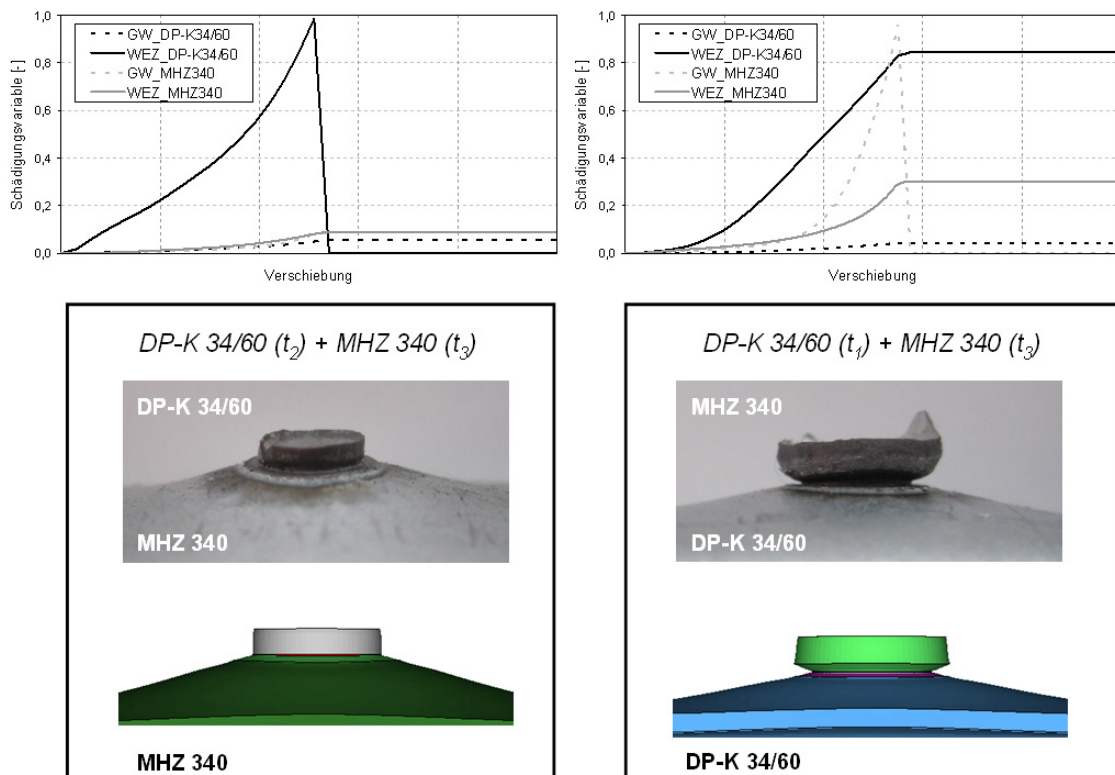


Bild 11: KS2-Probe: Versagensanalyse bei 90° Belastung

Die vorgestellte Simulationsmethode zeigt für unterschiedliche Stahlwerkstoffe eine hohe Prognosefähigkeit und ermöglicht erstmalig eine Berücksichtigung von Mischverbindungen, welche überwiegend im Fahrzeug auftreten. Damit kann eine Reduzierung der notwendigen Experimente zur Charakterisierung von Schweißpunktverbindungen erreicht werden.

3.4 Fügeprozesssimulation

Zum Aufbau der vorgestellten Detailmodelle von Schweißpunktverbindungen kann die Fügeprozesssimulation relevante Informationen liefern. Insbesondere die resultierende Geometrie der Fügestelle und die Veränderung der Gefügestruktur sowie Härteverteilung durch den Schweißprozess sind von Bedeutung. Durch eine geeignete Kopplung beider Simulationsdisziplinen kann eine virtuelle Prozesskette von widerstandspunktgeschweißten Stahlblechverbindungen aufgebaut werden. Ausgehend von den Randbedingungen und verwendeten Prozessparametern beim Schweißen kann somit eine Prognose der resultierenden Tragfähigkeit und Verbindungsfestigkeit erfolgen.

Die Software SYSWELD wird zur Simulation des Widerstandspunktschweißens eingesetzt. In Bild 12 sind Ergebnisse aus einer Validierung für den Stahlwerkstoff DP-K 34/60 dargestellt. Dabei kann die Schweißpunkt- und Schweißlinsengeometrie sowie die Ausdehnung der Wärmeeinflusszone durch die numerische Fügeprozesssimulation gut erfasst werden.



Bild 12: Fügeprozesssimulation: Schweißlinsengeometrie (links) und Gefügeverteilung (rechts)

Zur Einbeziehung der Ergebnisse aus der Fügeprozesssimulation in die Detailmodellierung liegt eine Schnittstelle vor. Diese ermöglicht den Import des resultierenden Verformungszustandes nach dem Schweißprozess sowie die Übertragung der Geometrie der Schweißlinse und der Wärmeeinflusszone. Die Vorgehensweise zur Kopplung der Simulationsdisziplinen ist schematisch in Bild 13 dargestellt.

Eine Hürde bei der Anwendung der Fügeprozesssimulation stellen die umfangreichen Daten dar, die in Abhängigkeit von der Temperatur und teilweise dem Phasenzustand vorliegen müssen. Daher sind auch für die Fügeprozesssimulation effektive Strategien zur Kennwertermittlung gefragt.

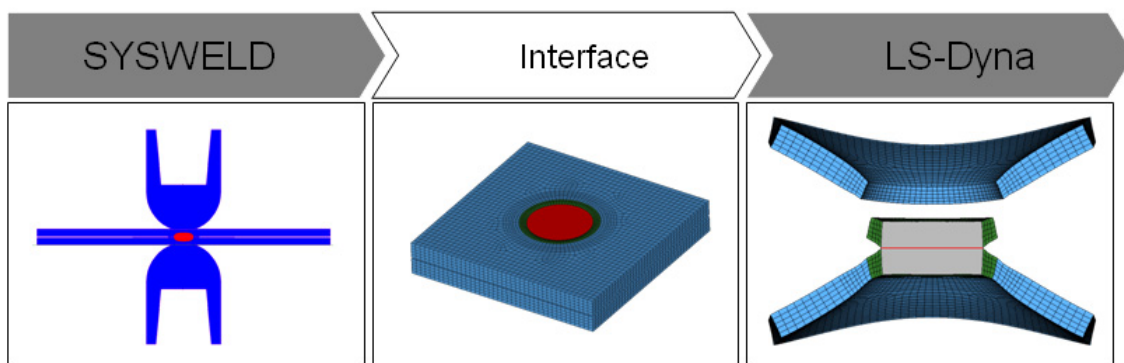


Bild 13: Durchgängige Simulationskette beim Widerstandspunktschweißen

4 Komponententest

Die vorgestellte Detailmodellierung von Schweißpunktverbindungen ist aufgrund der hohen Anzahl an Elementen und dem geringen Zeitschritt für den Einsatz in der Gesamtfahrzeuggestaltung nicht geeignet. Daher müssen Ersatzmodelle verwendet werden, die das Verformungs- und Versagensverhalten vereinfacht beschreiben. Das hier verwendete Schweißpunktersatzmodell besteht aus einem Volumenelement, welches über eine Kontaktbedingung an die Schalenelemente der Fügepartner angebunden wird. Zur Versagensmodellierung wird ein quadratisches Kriterium eingesetzt, welches in Abhängigkeit der auftretenden Kräfte und Momenten definiert ist. Die notwendigen Informationen zur Parametrisierung des Schweißpunktersatzmodells werden aus den Detailsimulationen entnommen. Die entwickelte Vorgehensweise zur Charakterisierung der Ersatzmodelle für die Crashsimulation ist schematisch in Bild 14 dargestellt.

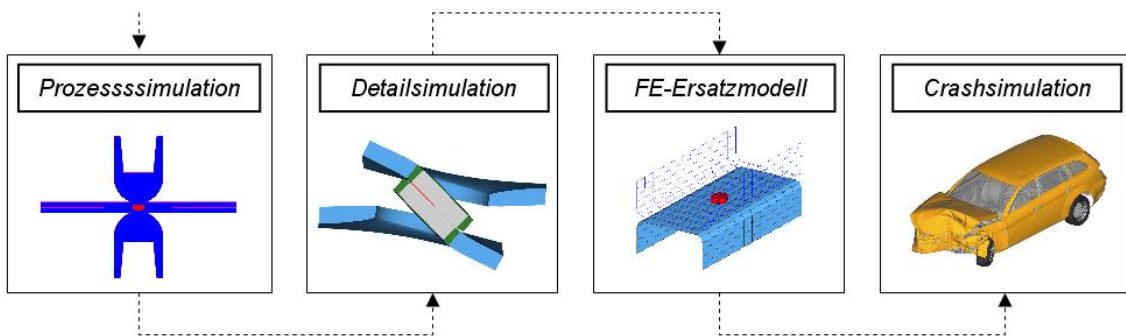


Bild 14: Virtuelle Charakterisierung von Schweißpunktverbindungen für die Crashsimulation

Zur Verifikation der Ersatzmodellierung wurde eine bauteilähnliche Probe mit dem Ziel der kritischen Schweißpunktbelastung bei der ThyssenKrupp Steel Europe AG aufgebaut. Der Probekörper ist in Bild 14 dargestellt und besteht aus drei unterschiedlichen Hutprofilen, die miteinander verschweißt werden. Die Biegebelastung des Trägers führt in den Schweißpunkten zu einer komplexen Beanspruchung aus Scherung, Schälung und Zug. Generell bildet der Versuch stark vereinfacht das Bauteilverhalten zwischen Schweller und B-Säule bei einem Seitencrash ab.

Die Fertigung des Biegeträgers erfolgte aus dem Stahlwerkstoff DP-K 34/60. Die Belastung wird zunächst statisch auf den Träger aufgebracht, kann aber bei Bedarf auch dynamisch über eine Fallmasse erfolgen. Für einen Abgleich mit der Simulation wird die resultierende Kraft und Verschiebung aufgezeichnet.

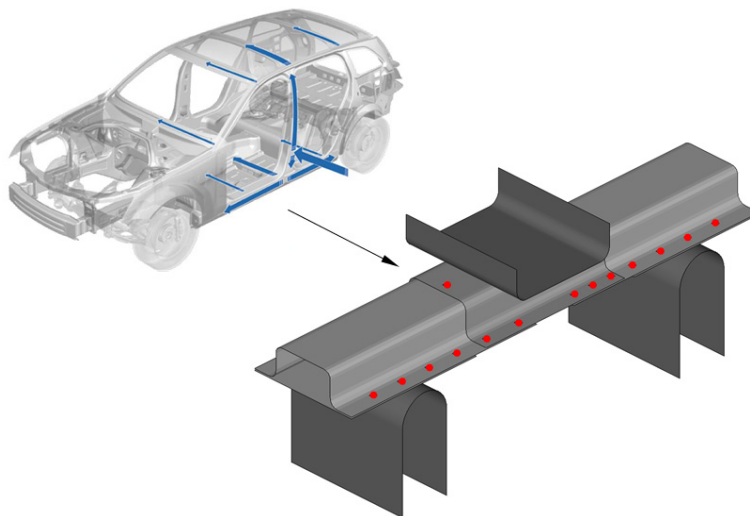


Bild 15: Bauteilähnlicher Komponententest zur Bewertung der Fügechnik

Der Versuch wird entsprechend der bestehenden Modellierungsrichtlinien für Gesamtfahrzeugmodelle numerisch abgebildet. Dabei erfolgt die Simulation ohne und mit Versagenskriterium für die Ersatzelemente der Schweißpunkte. Die Simulationsergebnisse sind in Bild 16 und Bild 17 im Vergleich mit den experimentellen Daten dargestellt. Die Simulation mit Versagen der Schweißpunkte (SP) kann die Messdaten sowie Versagensreihenfolge der Schweißpunkte gut wiedergeben.

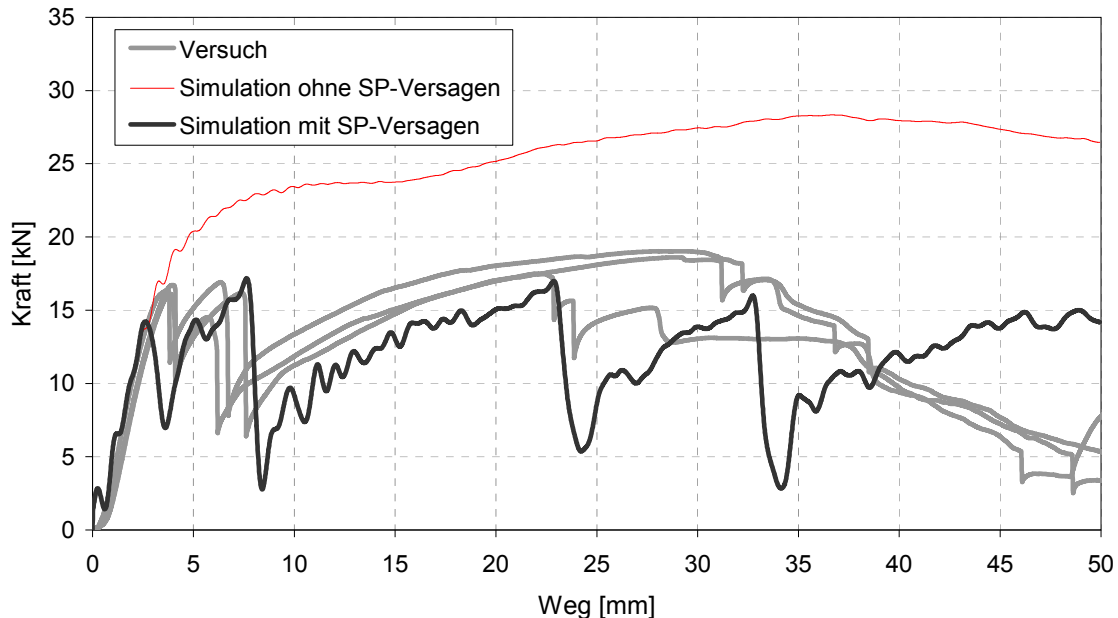


Bild 16: Vergleich Versuch und Simulation: Kraft-Weg-Verlauf

5 Zusammenfassung

Ein geeignetes Modellierungskonzept zur Abbildung von Schweißpunkten in der Crashesimulation ist wichtig, da ein Versagen der Fugestellen zu einem global veränderten Crashverhalten führen kann. Notwendige Voraussetzung für alle existierenden Schweißpunktersatzmodelle sind experimentelle Daten, welche für jede einzelne Schweißpunktverbindung vorliegen müssen. Aus den vielfältigen Verbindungskombinationen im Fahrzeug resultiert eine umfangreiche Versuchsmatrix.

In diesem Beitrag wurde eine holistische Simulationsmethode vorgestellt, mit der die notwendigen Daten zur Parametrisierung der Ersatzmodelle von beliebigen Schweißpunktverbindungen virtuell bestimmt werden können. Dazu werden detaillierte Simulationsmodelle mit zonenspezifischen Versagenskriterien eingesetzt, welche unter definierter Belastung die Versagensart und das Festigkeitsverhalten von standardisierten Proben mit einem Schweißpunkt prognostizieren. Eine hohe Vorhersagegenauigkeit der Methode konnte für artgleiche und erstmalig für artungleiche Schweißverbindungen, welche überwiegend im Fahrzeug auftreten, nachgewiesen werden.

In einem Komponentenversuch, der speziell auf das Verbindungsversagen ausgelegt ist, konnte gezeigt werden, dass die Vernachlässigung von Schweißpunktversagen zu einer veränderten Energieaufnahme führt. Die Integration der Ersatzmodellierung mit Schweißpunktversagen lieferte eine gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Simulation. Somit kann durch die vorgestellte Methode eine verbesserte Auslegung der Verbindungszonen erreicht werden.

6 Literatur

- [1] Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ): "Das InCar-Projekt von ThyssenKrupp", ATZ extra, 2009
- [2] Sommer, S.: "Modellierung des Verformungs- und Versagensverhaltens von Punktschweißverbindungen unter monoton ansteigender Belastung", Dissertation, 2009
- [3] Haufe, A., Graf, T., Pietsch, G., Feucht, M., Neukamm, F.: "Aktuelle Trends bei der Modellierung von Schweißpunktverbindungen in der Crash-Simulation mit LS-DYNA", crashMAT, 2009
- [4] Laurenz, R.: "Spot Weldability of Advanced High Strength Steels (AHSS)", Proceedings of Advanced Joining Conference, 2004
- [5] Pieronek, D., Röttger, R., Marx, A.: "Ganzheitlicher Simulationsansatz zur Versagensprognose von widerstandspunktgeschweißten Stahlblechverbindungen", LS-DYNA Update Forum, 2009
- [6] Pieronek, D., Röttger, R., Marx, A.: "Virtuelle Versagensprognose von widerstandspunktgeschweißten Stahlblechverbindungen", NAFEMS-Seminar, 2010
- [7] Feucht, M., Sun, D.-Z., Erhart, T., Frank, T.: "Recent development and applications of the Gurson model", Proceedings of 5th German LS-DYNA Forum, 2006
- [8] Hahn, O., Gieske, D., Rhode, A.: "Probe und Probenspannvorrichtung zum Einsatz in Zugmaschinen", patent specification DE 195 22 247 A1, 1996