

Probenform zur Ermittlung des mechanischen Verhaltens von Punktschweißverbindungen

M. Brandhuber^{1,a}, M. Pfestorf^{1,b}

¹BMW Group, Knorrstraße 147, 80788 München

^amartin.brandhuber@bmw.de, ^bmarkus.pfestorf@bmw.de

1. Einleitung

Betrachtet man die Entwicklung der auf den verschiedenen Absatzmärkten gültigen Regularien zur passiven Sicherheit eines Fahrzeugs, so stellt man eine ständige Steigerung der Anforderungen an das Fahrzeug fest. Um diese Anforderungen ohne eine signifikante Steigerung des Fahrzeuggewichts zu erfüllen, werden in der Rohkarosserie in immer größerem Umfang höher- und höchstfeste Stahlgüten verwendet, Bild 1 zeigt die eingesetzten Stahlgüten am Beispiel des BMW 5er Gran Turismo. Dadurch soll bei unterschiedlichen Crashlastfällen eine möglichst steife und sichere Fahrgastzelle geschaffen werden, um so die Verletzung der Insassen bei einem Unfall auf ein Minimum zu reduzieren. Geeignete Werkstoffe müssen neben entsprechenden mechanischen Eigenschaften, wie Festigkeit und Dehnung auch ein geeignetes Deformationsverhalten aufweisen.

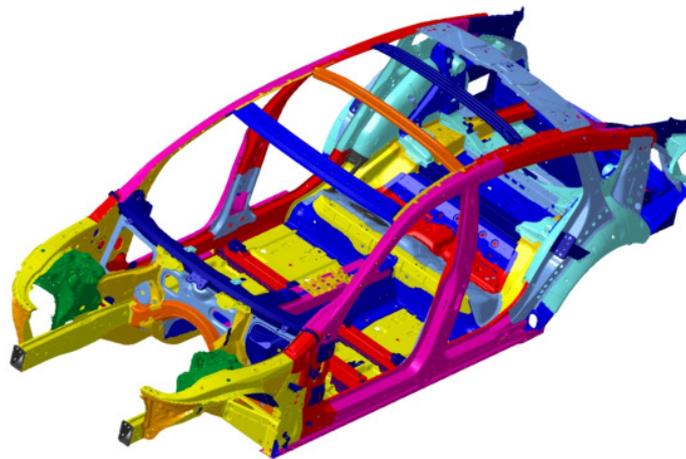


Bild 1. Stahlgüten am Beispiel der Rohkarosserie des BMW 5er Gran Turismo.

Die Crashsimulationsmodelle sind überwiegend mit Schalenelementen vernetzt, wobei für die Gesamtfahrzeugsimulationen mit dem FE-Programm Abaqus/Explicit eine typische Kantenlänge von 8 mm verwendet wird. Das Versagen der eingesetzten Werkstoffe wird dabei mit einem phänomenologischen Werkstoffversagenskriterium [1] beschrieben. Neben der eigentlichen Deformation der eingesetzten Stahlwerkstoffe haben aber auch die Schweißpunkte einen signifikanten Einfluss auf das Crashverhalten der Karosseriestruktur, Bild 2.

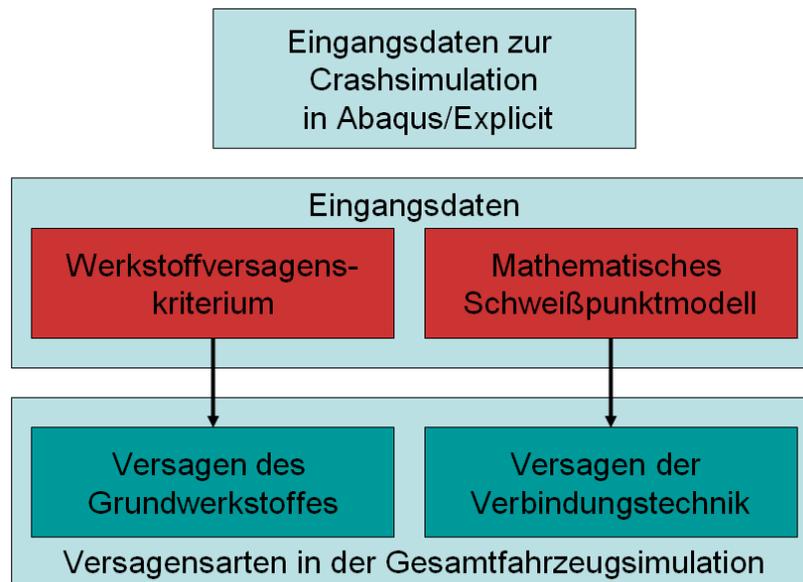


Bild 2. Eingangsdaten zur Crashsimulation in Abaqus/Explicit.

Es ist daher erforderlich, die Schweißpunktkräfte, die von Material und Blechdicke abhängig sind, in der Finite Elemente Simulation prognosefähig zu berücksichtigen. Durch Fügepunkt-Ersatzelemente kann bei adäquater Vernetzung bereits das Versagensverhalten von Schweißpunkten in der Simulation abgebildet werden [2]. Um die dafür notwendigen Eingangsdaten für die Vielzahl unterschiedlicher Verbindungen aus wenigen Experimenten interpolieren bzw. approximieren zu können, müssen spezifische Kennwerte über das Tragverhalten aus Experimenten ermittelt werden, welche dann zur Kalibrierung von mathematischen Modellen verwendet werden. Zur Ermittlung des Tragverhaltens von Punktschweißverbindungen gibt es eine Reihe von unterschiedlichen Probengeometrien [3, 4, 5]. Die Versuchsergebnisse von unterschiedlichen Proben sind jedoch nur eingeschränkt miteinander vergleichbar. Damit sind meist nur qualitative Bewertungen möglich und sie sind ohne zusätzliche Analysen und Berechnungen nicht für die Auslegung von Bauteilen geeignet. Bei Anwendung der Probenform aus [4, 5] gibt es aufgrund von Werkstoffnachgiebigkeiten eine ungleichmäßige Belastungssituation am Schweißpunkt. Bei der in [3] genannten Probenform wird dieser Effekt durch eine steifere Probengeometrie weitgehend unterdrückt. Jedoch gestaltet sich die Herstellung dieser Probe bei höchstfesten Stahlgüten als sehr aufwändig. Für warm umgeformte Stähle muss für jede zu untersuchende Blechdicke ein separates Werkzeug verwendet werden, dessen Herstellung mit weiteren Kosten verbunden ist. Als weiterer Nachteil ergibt sich, dass auf Grund der Probengeometrie keine Proben direkt aus Bauteilen entnommen und geprüft werden können.

2. Anforderungen an die Zugprobe

Ziel bei den Entwicklungen war es, eine Probenform zum Einsatz in Universalprüfmaschinen zu schaffen, welche kostengünstig und einfach herstellbar ist und die es ermöglicht, eine Vielzahl von unterschiedlichen

Schweißpunktverbindungen, die mit seriennahen Parametern geschweißt werden, hinsichtlich ihrer Festigkeit zu prüfen. Die Vielzahl der unterschiedlichen Punktschweißverbindungen in einer Rohkarosserie ergibt sich aus den verschiedenen Kombinationen der Grundwerkstoffe, aber auch der unterschiedlichen Blechdickenkombinationen wie auch Beschichtungen. Als weitere Anforderung wurde festgelegt, dass mit dieser Probe sowohl Zweiblech- als auch Dreiblechverbindungen zu prüfen sind. Zusätzlich sollte bei dieser Probenform die Möglichkeit gegeben sein, auch Proben direkt aus einem umgeformten Blechbauteil in Bereichen ebener Flächen entnehmen zu können.

Die hierbei ermittelten Daten können dann für die Kalibrierung der mathematischen Modelle, die zur Berechnung des Schweißpunktversagens in der Finite Elemente Simulation implementiert sind, verwendet werden. Die Kennwerte müssen dabei in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung gewonnen werden können, wobei unterschiedliche Beanspruchungszustände aus der Kombination der Belastungsarten Kopf- und Scherzug ohne Änderung der Probengeometrie zu realisieren sind. Dies ist nötig, um das Potential für den Beginn des Schweißpunktversagens bei beliebiger Belastung möglichst genau vorhersagen zu können, Bild 3.

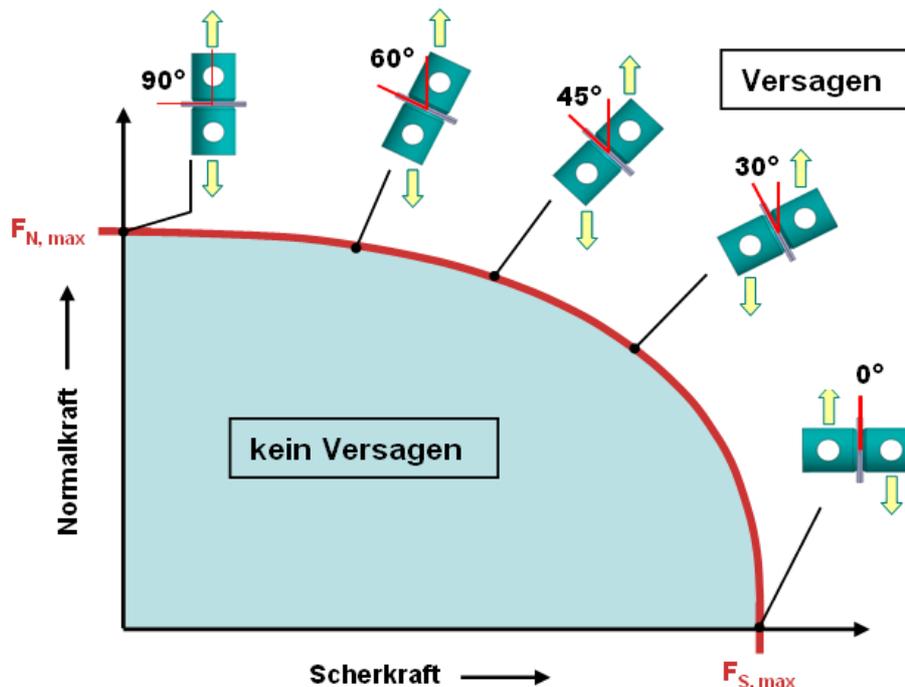


Bild 3. Potentialkurve für den Beginn des Schweißpunktversagens.

In Abbildung 4a ist ein Modell der entwickelten Probenform dargestellt, welche alle genannten Anforderungen erfüllt. Die neue Probengeometrie, welche die gleichen Funktionalitäten der bereits bekannten Probenformen besitzt und deren Nachteile weitgehend beseitigt, besteht aus Probenhälften, die je eine Bodenfläche und ein Adapterrohr aufweisen. Die Bodenflächen sind dabei aus den zu prüfenden Materialien und sind durch die zu prüfende Verbindungstechnik, in diesem Fall Punktschweißen, miteinander verbunden, siehe Bild 4b.

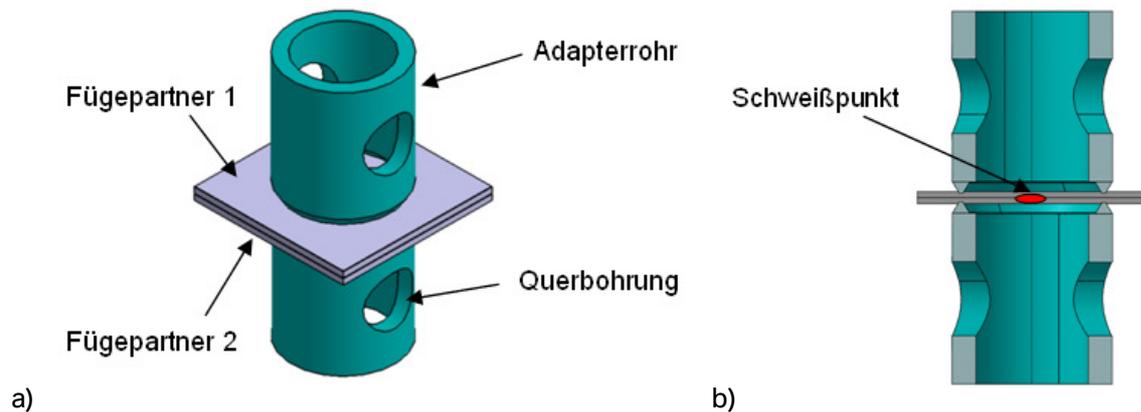


Bild 4. CAD-Modell der neu entwickelten Probenform als **a)** 3D-Modell und **b)** Schnittdarstellung mit Schweißpunkt.

Bei der Dimensionierung des Adapterrohres mussten mehrere Prämissen beachtet werden. Der Durchmesser des Adapterrohres ist möglichst gering zu wählen, da im Rahmen von Voruntersuchungen festgestellt werden konnte, dass das Maß für den Durchmesser besonders bei Kopfbiegebelastung einen Einfluss auf die Probenverformung hat. Um dies zu verhindern und gleichzeitig den Belastungszustand am realen Bauteil besser abbilden zu können, wurde eine möglichst steife Auslegung der Probe um den Schweißpunkt herum gewählt. Dadurch, dass der Durchmesser des Adapterrohres möglichst klein gewählt wird und sich damit eine hohe Steifigkeit des Bleches um den Schweißpunkt ergibt, erfolgt eine eindeutig definierte radialsymmetrische Belastung des Schweißpunktes. Jedoch muss dabei gewährleistet sein, dass die Zugänglichkeit mit Schweißelektroden erfolgen kann. Zusätzlich sollten nur Abmaße nach DIN verwendet werden, um die Anzahl der Bearbeitungsschritte möglichst gering zu halten. Abschließend musste sichergestellt werden, dass durch den Fügeprozess des Rohres auf das Blech keine Beeinflussung des Gefüges im zu untersuchenden Werkstoff stattfindet, da sonst falsche Werte ermittelt würden. Außerdem musste die Verbindung von Rohr und Blech so gewählt werden, dass die Festigkeit dieser Verbindung auf jeden Fall höher ist, als die der zu prüfenden Verbindung der beiden Bleche.

3. Auslegung der Zugprobe

Bei der Auswahl des Werkstoffes für das Adapterrohr musste überprüft werden, ob dieser den maximalen Belastungen standhält. Zur Auswahl standen dafür S235JR und S355JR welche für nahtlose Präzisionsstahlrohre verfügbar sind. Zusätzlich musste ein Fügeverfahren festgelegt werden, mit dem sich das Adapterrohr und das zu prüfende Blech verbinden und die nötigen Kräfte übertragen lassen. Dafür wurde das Kondensatorentladungsschweißen ausgewählt, welches zu den Widerstandspressschweißverfahren zählt. Es zeichnet sich durch einen schnellen Stromanstieg, eine extrem kurze Schweißzeit und sehr hohe Schweißströme aus [6]. Der Vorteil für diesen Anwendungsfall liegt hauptsächlich darin, dass die Wärmeentwicklung im Wesentlichen an der Fügestelle entsteht. Es bildet sich eine stoffschlüssige Verbindung zwischen Rohr und Blech mit für dieses Verfahren

typischer geringer Wärmeeinflusszone. Dadurch wird der Bereich des Probebleches, wo anschließend die Punktschweißung erfolgt, im Gefüge nicht verändert. Durch die kurze Schweißzeit wird außerdem das Adapterrohr kaum erwärmt, dadurch sind Verformungen, speziell im Bereich der Querbohrung durch Wärmeeinwirkungen auszuschließen. Die Auslegung der Probe erfolgte auf zwei untersuchte Beanspruchungen, Belastung in Normalenrichtung, was dem Kopfzug entspricht und Schubbelastung, was dem Scherzug entspricht. Als erstes wurde die Verbindung von Rohr zu Zugvorrichtung über einen Bolzen untersucht, anschließend die Verbindung von Rohr und zu prüfendem Blech. Als maximale Belastung wurde im Kopfzug 30 kN und im Scherzug 50 kN gewählt. Dies entspricht den maximal übertragbaren Kräften eines Schweißpunktes bei höchstfesten Stählen in großer Wandstärke. Als Startwerte wurden ein Bohrungsdurchmesser von 16mm (h11 Passung), eine Rohrwandstärke von 4mm und ein Rohraußendurchmesser von 33,7mm gewählt. Daraus ergab sich ein Wirkdurchmesser für die Kraftübertragungsfläche von 31mm. In metallographischen Untersuchungen wurde in Schliffen durch den Fugebereich zwischen Adapterrohr und Blech die maximale Anbindungsbreite ermittelt und daraus zusätzlich die maximale resultierende Kraftübertragungsfläche berechnet und im Mittel als Kreisring mit einer Breite von 2mm modelliert.

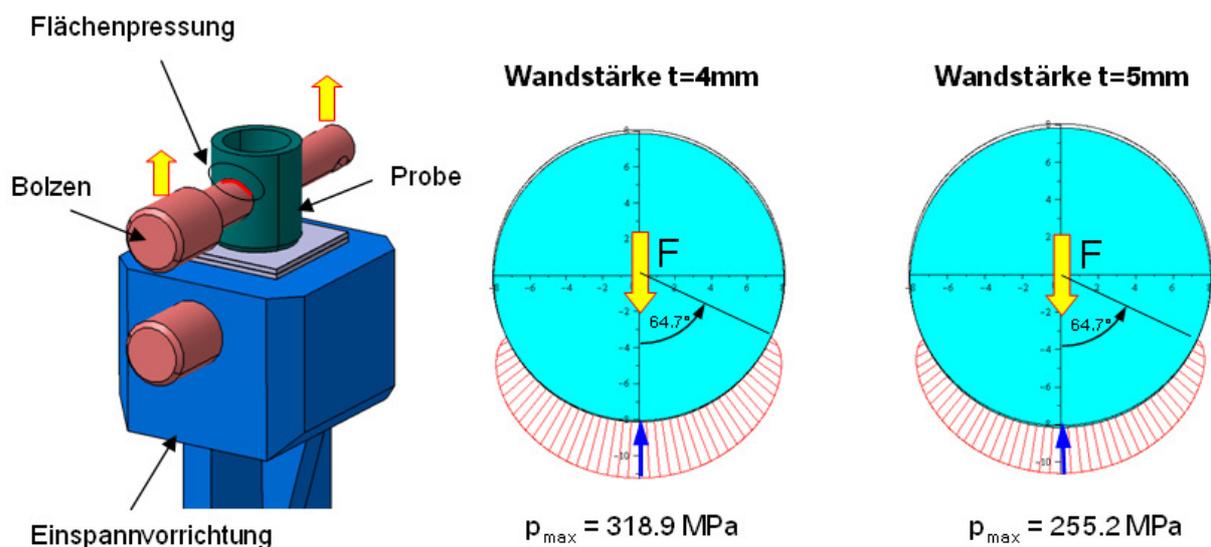


Bild 5. Maximale Flächenpressung in der Querbohrung bei verschiedenen Wandstärken für Kopfzugbeanspruchung der neu entwickelten Probenform.

Für den Belastungsfall Kopfzug wurde die maximale Flächenpressung nach [7] in den Querbohrungen ermittelt. Für eine Wandstärke von 4mm und einen Bohrungsdurchmesser von 16mm ergaben sich die in Bild 5 dargestellten maximalen Kontaktdruckspannungen. Bei einer Belastung von 30 kN wird die maximal zulässige Spannung, welche der Fließgrenze von S235JR entspricht überschritten. Aus diesem Grund wurde die Wandstärke des Adapterrohres auf 5mm erhöht und der Werkstoff auf S355JR geändert, welcher dann in den weiteren Untersuchungen ausschließlich betrachtet wurde. Als weiterer Kennwert für den Belastungsfall Kopfzug wurden die maximalen Vergleichsspannungen für die Kraftübertragungsfläche zwischen Adapterrohr und zu prüfendem Blech ermittelt. Als Annahmen wurden dabei

getroffen, dass kein Biegemoment und keine Querkraft wirksam sind. Bei dieser Beanspruchung werden Normalspannungen erzeugt, welche nicht über der Fließgrenze des Werkstoffes liegen dürfen. Für den Werkstoff S355JR wird bei der maximalen Belastung von 30kN die zulässige Spannung von 360MPa nicht überschritten, Bild 6a. Für den Belastungsfall Scherzug wurden die maximalen Vergleichsspannungen für die Kraftübertragungsfläche unter der Annahme, dass kein Biegemoment wirksam ist, ermittelt. Diese werden durch den vorherrschenden Querkraftschub bestimmt, welcher sich über folgende Gleichung berechnen lässt [8]:

$$\tau(\phi) = \frac{F_s}{\pi \cdot r_m} \cdot \sin\phi. \quad (1)$$

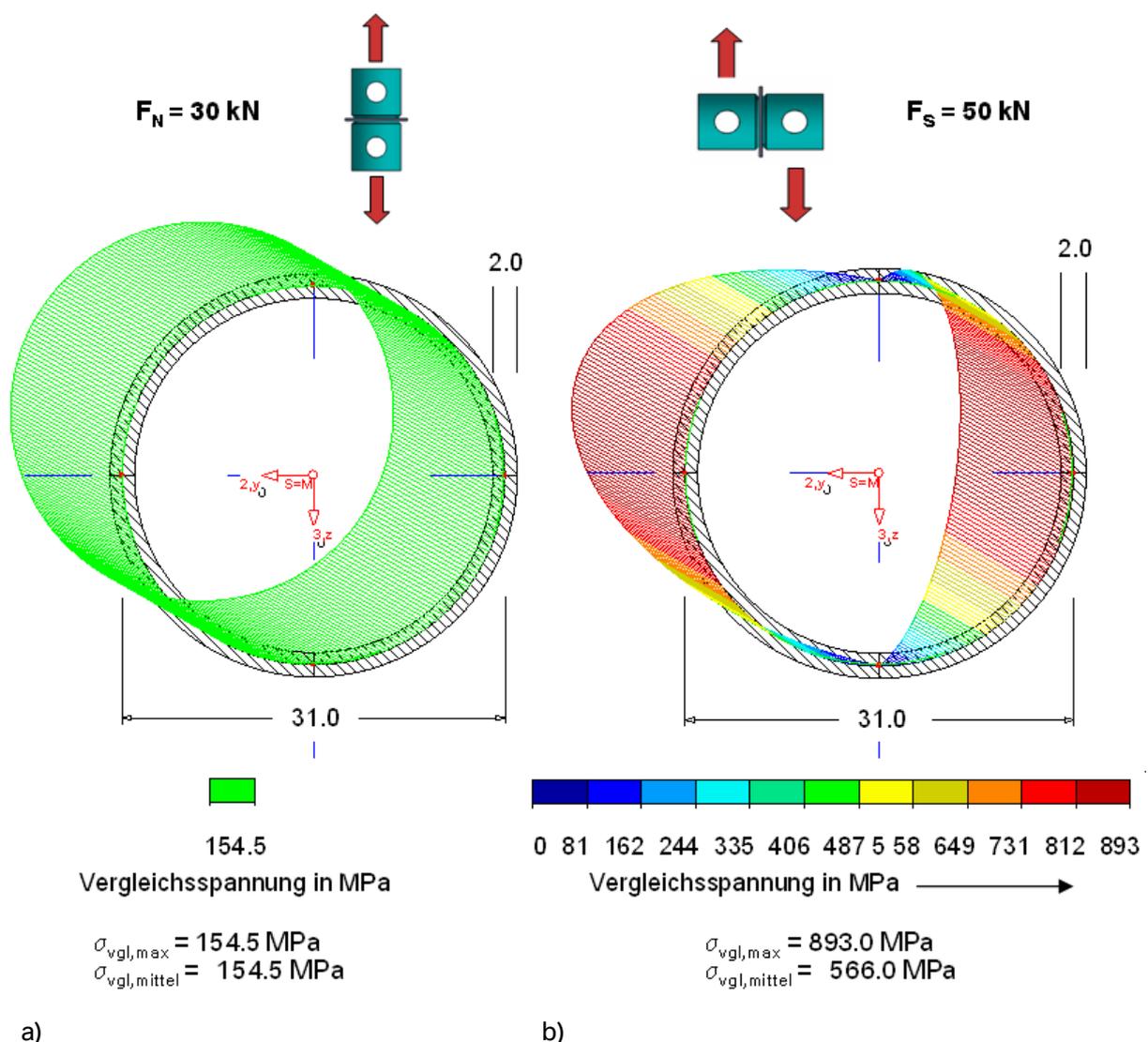


Bild 6. Vergleichsspannungen in der Kraftübertragungsfläche für **a)** reine Kopfzugbelastung und **b)** reine Scherzugbeanspruchung der neu entwickelten Probe.

Abbildung 6b zeigt, dass die Vergleichsspannung in der Kraftübertragungsfläche bei Scherzugbelastung deutlich über der zulässigen Spannung des Werkstoffes S355JR liegt. Außerdem überschreitet auch die mittlere Vergleichsspannung über den Umfang des Rohres die zulässige Spannung. In den bereits erwähnten Untersuchungen der Fügezone zwischen Adapterrohr und Blech wurde anhand von Schliffen und Härtemessungen festgestellt, dass die Festigkeit im Schweißgefüge, wo die Kraftübertragung des Adapterrohres auf das Blech erfolgt, höher liegt als die Festigkeit des Grundwerkstoffes des Rohres. Daher kann angenommen werden, dass die zulässige Spannung für diesen Bereich maximal um den Faktor zwei erhöht werden kann und somit 720MPa beträgt. Dieser Wert liegt zwar noch unter der maximal vorherrschenden Vergleichsspannung, jedoch über der gemittelten Vergleichsspannung, welche als ausschlaggebendes Kriterium herangezogen wurde. Aus den hier dargestellten Ergebnissen lässt sich erkennen, dass die Dimensionierung der Probe unter den genannten Voraussetzungen ausreichend ist.

4. Probenherstellung und Versuchsdurchführung

Die Herstellung der Adapterrohre ist auf Dreh- und Bohrarbeiten beschränkt und kann für alle zu untersuchenden Materialpaarungen beibehalten werden. Zur Fertigung der Proben werden Blechstreifen in den entsprechenden Maßen zugeschnitten und anschließend mittels Kondensatorentladungsschweißen das Adapterrohr auf das Blech aufgeschweißt. Die Schweißparameter müssen dabei so gewählt werden, dass die Verbindungsfläche durchgängig den in der Auslegung ermittelten Wert erreicht. Die Fügeverbindung Adapterrohr-Blech muss auf jeden Fall eine höhere Festigkeit aufweisen, als die anschließend gefertigte und zu prüfende Punktschweißverbindung.

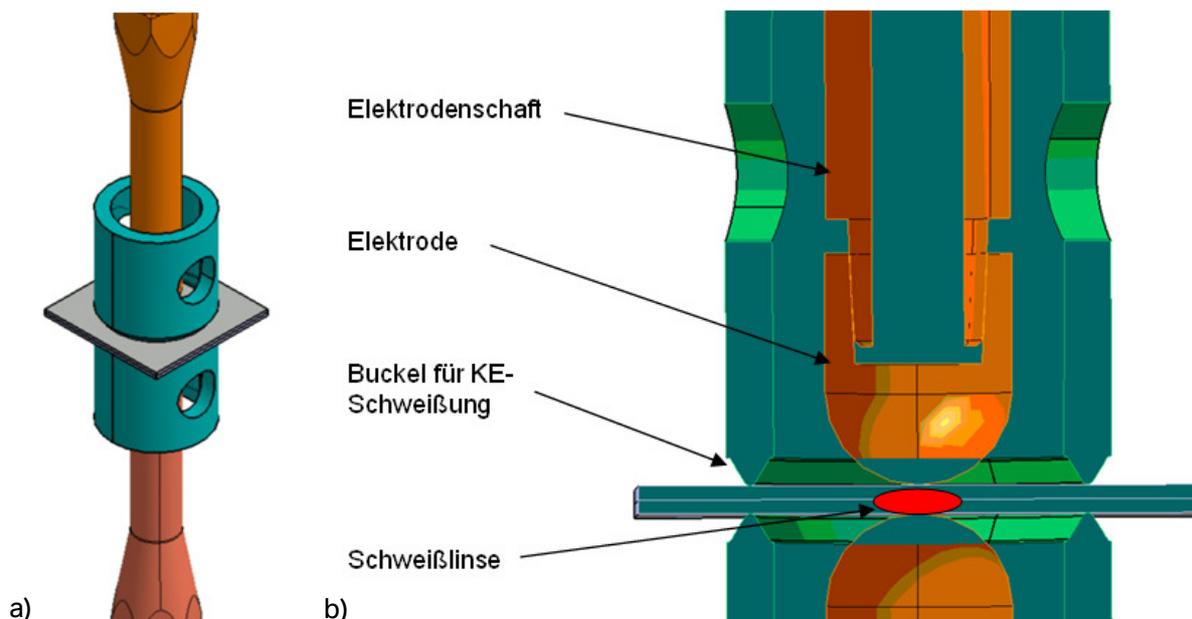


Bild 7. Fertigungsprozess Punktschweißen für die neu entwickelte Probenform dargestellt in **a)** 3D-Ansicht und **b)** Schnittdarstellung.

Das Punktschweißen erfolgt mit einer Schiebezange, um zu gewährleisten, dass die Schweißelektroden mit den Elektroden durch das Adapterrohr greifen können und den Schweißpunkt mittig setzen. Bei Zweiblechverbindungen werden dazu die zwei zu prüfenden Bleche mit den aufgeschweißten Adapterrohren aufeinander positioniert, Bild 7, bei Dreiblechverbindungen wird das dritte, mittlere Blech lose dazwischen gelegt. Beim Verschweißen zweier Proben waren hohe Anforderungen bei den Maßtoleranzen hinsichtlich Fluchten der Rohre und Lage der Bohrungen zu erfüllen, um für alle Proben eine zentrische Krafteinleitung und eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu erreichen. Dies wurde mit einer speziell dafür angefertigten Schweißvorrichtung sichergestellt.

Zur Ermittlung des Tragverhaltens bei quasistatischer Belastung sollen die Proben in einer Universalprüfmaschine bei einer Prüfgeschwindigkeit von 10mm/min geprüft werden. Abbildung 8 zeigt die zur Prüfung der Proben bei quasistatischer Belastung entwickelten Prüfvorrichtungen für die zur Untersuchung möglichen Lasteinleitungswinkel von 0° (Scherzug) über die Zwischenwinkel 30°, 45° und 60° bis zu 90° (Kopfzug). Dabei wird das aufgeschweißte Adapterrohr jeweils von der oberen bzw. unteren Zugvorrichtung umschlossen und durch einen Bolzen fixiert. Alle Bohrungen sind als Passungen ausgelegt, um ein mögliches Spiel und damit Verkippen der Proben zu vermeiden. Die Einspannung der Prüfvorrichtungen in die Prüfmaschine erfolgt über die Flansche in hydraulischen Spannbacken.

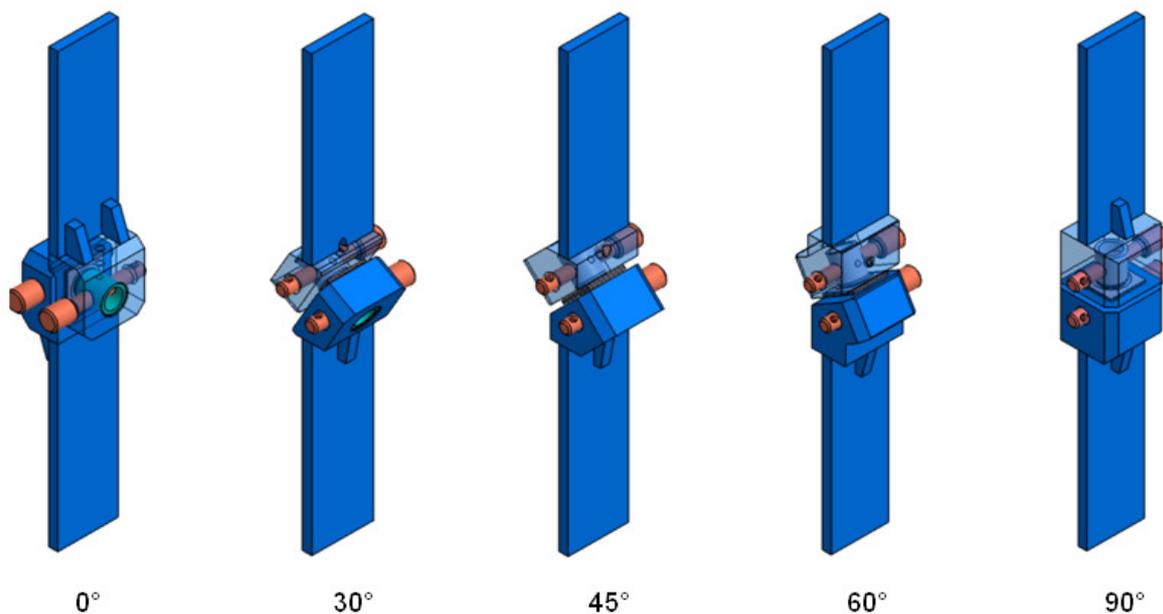


Bild 8. Prüfvorrichtungen für die neu entwickelte Zugprobe bei quasistatischer Belastung zur Untersuchung unterschiedlicher Lasteinleitungswinkel.

5. Messung von Verbindungskennwerten

Zur präzisen Kalibrierung von mathematischen Modellen und als Eingabewerte für die rechnergestützte Simulation sind die Verbindungskennwerte, die das tatsächliche Kraft- und Verformungsverhalten des Schweißpunktes beschreiben, erforderlich. Bei der experimentellen Bestimmung für quasistatische Belastungen kann die Kraftmessung aufgrund der sehr niedrigen Prüfgeschwindigkeit direkt an der Prüfmaschine vorgenommen werden. Bei der Verformungsmessung muss jedoch eine genauere Betrachtung erfolgen, da zusätzlich zur Probenverformung auch das elastische Verhalten der Prüfmaschine, die sogenannte Maschinensteifigkeit, und die Nachgiebigkeit der Probeneinspannung in die Wegmessung der Maschine mit eingehen [9].

Zur theoretischen Abschätzung der Steifigkeit der Probenform bei Kopfzugbelastung wurde diese idealisiert als zwei mittig verbundene Kreisplatten betrachtet, Bild 9.

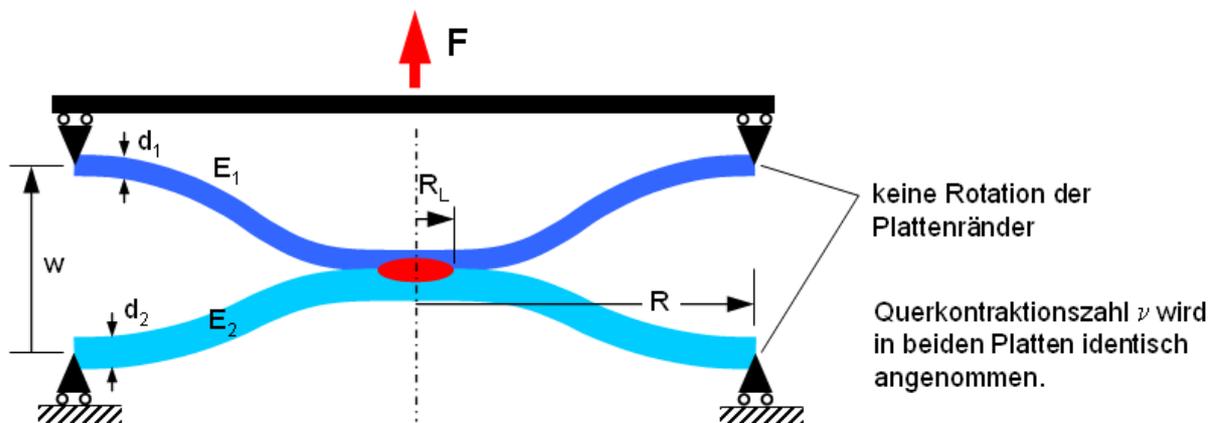


Bild 9. Idealisierte Darstellung der neuen Probenform als zwei mittig verbundene Kreisplatten zur Ermittlung der theoretischen Probensteifigkeit.

Dabei erfolgte die Definition der Steifigkeit, bei linear elastischem Verhalten als Quotient von Kraft F und Verformung w . Die Verformung w setzt sich dabei aus den resultierenden Verschiebungen aus Biege- und Schubverformung zusammen. Diese wurden nach [10] hergeleitet:

$$w = w_B + w_S, \quad (2)$$

$$w_B = F \frac{3(1-\nu^2) \left[E_1 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^3 + E_2 \right] \left\{ (R - R_L)^2 (R + R_L)^2 - \left[R R_L \ln \left(\frac{R^2}{R_L^2} \right) \right]^2 \right\}}{4\pi E_1 E_2 d_1^3 (R^2 - R_L^2)}, \quad (3)$$

$$w_S = F \frac{3(1-\nu)}{2\pi} \left(\frac{1}{E_1 d_1} + \frac{1}{E_2 d_2} \right) \ln \left(\frac{R}{R_L} \right). \quad (4)$$

Darin ist ν die Querkontraktionszahl, welche für beide Platten identisch angenommen wurde, E_1 und E_2 die Elastizitätsmodule sowie d_1 und d_2 die Dicken der beiden Kreisplatten. Der Radius R beschreibt die Größe der Kreisplatten und R_L entspricht dem Radius des Schweißpunktes der jeweiligen Verbindung. Zur experimentellen Ermittlung der Maschinennachgiebigkeit wurden die Zugvorrichtungen starr und spielfrei miteinander verbunden und anschließend die Kraft-Weg-Kennlinie bestimmt. Dabei ergab sich eine Nachgiebigkeit von 0,02mm/kN.

| ν [/] | E_1 [N/mm] | E_2 [N/mm] | d_1 [mm] | d_2 [mm] | R [mm] | R_L [mm] | N_{ber} [N/mm] | N_{gem} [N/mm] |
|--------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|-------------|---------------|---------------------|---------------------|
| 0,3 | 2,07e5 | 2,07e5 | 1,16 | 0,8 | 14,85 | 2,0 | 0,00042 | 0,00052 |
| 0,3 | 2,07e5 | 2,07e5 | 1,0 | 1,6 | 14,85 | 2,5 | 0,00019 | 0,00026 |

Tabelle 1. Vergleich von berechneten und gemessenen Probensteifigkeiten bei Kopfzug.

Durch die Verwendung dieser Steifigkeitskurven konnte die gemessene Gesamtnachgiebigkeit des Prüfaufbaus somit reduziert und die reine Probenachgiebigkeit bestimmt werden. Dieser Wert wurde anschließend mit der errechneten theoretischen Steifigkeit bzw. dem Reziprokwert Nachgiebigkeit verglichen und zeigte eine weitgehend gute Übereinstimmung, Tabelle 1.

Daher kann nun standardmäßig für jede Prüfung eine gezielte Eliminierung der Maschinennachgiebigkeit erfolgen und somit nur die reine Probenverformung bestimmt werden. Eine Messung der lokalen Probenverformung mittels optischen Systemen wurde aufgrund der hohen Komplexität sowie der schlechten Probenzugänglichkeit nicht in Betracht gezogen.

6. Validierung

Zur Validierung der neuen Probenform wurden sechs unterschiedliche Materialpaarungen jeweils mit der neuen Probenform als auch mit der in [3] beschriebenen KSII-Probe durchgeführt und anschließend die Ergebnisse miteinander verglichen. Die Experimente mit der KSII-Probe wurden am Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF) durchgeführt.

Zur statistischen Absicherung der Ergebnisse wurde je Materialpaarung und Belastungswinkel fünf Proben untersucht. Aus den ermittelten Kräfte-Weg-Verläufen wurden als Kennwerte die Maximalkraft F_{max} , die Verformung bei F_{max} sowie der Bruchweg ermittelt.

Diese Kennwerte dienen zur späteren Kalibrierung der mathematischen Ersatzmodelle. Aus den fünf Prüfungen je Versuchsreihe wurden im Rahmen der Kennwertermittlung jeweils der Maximalwert und der Minimalwert zur Darstellung des Streubandes sowie der arithmetische Mittelwert ausgewertet. Der Vergleich der maximal übertragbaren Kräfte zwischen beiden Probenformen zeigt eine gute Übereinstimmung. Nahezu alle Kraftmittelwerte und die Streuungen liegen in einem vergleichbaren Feld, Bild 10.

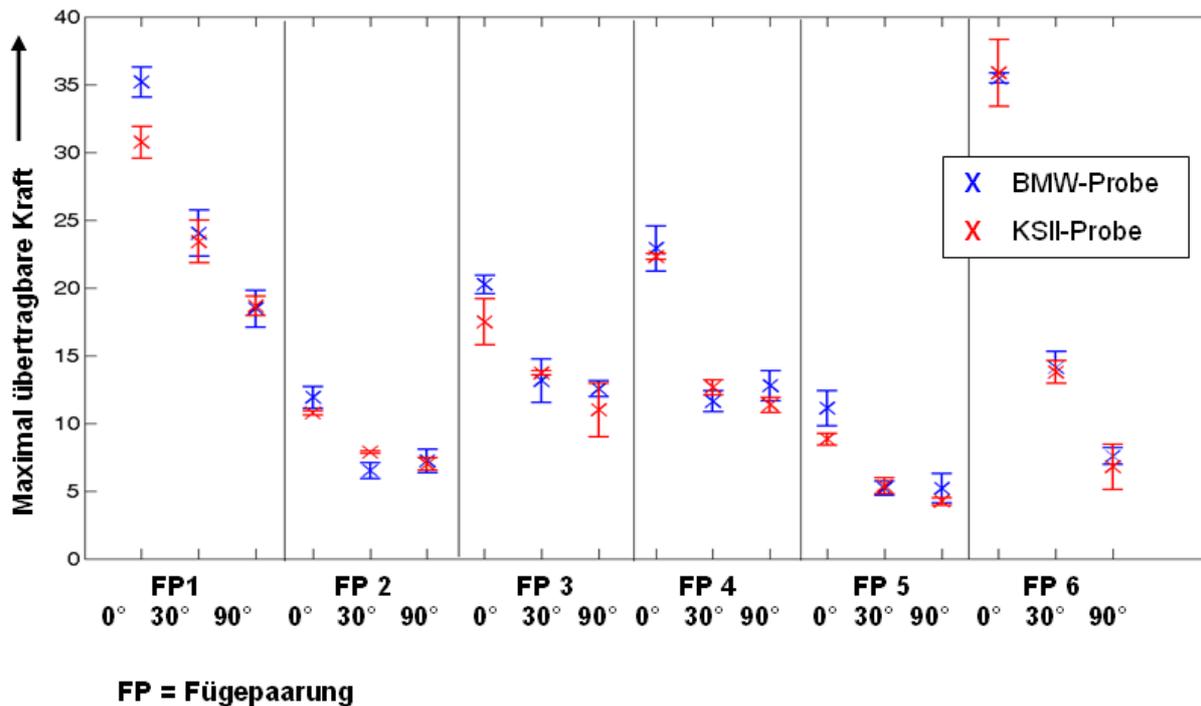


Bild 10. Gegenüberstellung der maximal übertragbaren Kräfte bei unterschiedlichen Belastungswinkeln für zwei verschiedene Probenformen.

Die Deformation bei maximaler Kraft ist bei der neu entwickelten Probe niedriger. Dies war aufgrund der steiferen Auslegung jedoch zu erwarten. Somit erfolgt eine bessere Annäherung der Verformung der Fügeverbindung ohne Beeinflussung durch eine zusätzliche Blechverformung.

7. Zusammenfassung

Zur Charakterisierung des Trag- und Versagensverhaltens von Punktschweißverbindungen wurde eine neue Probenform entwickelt. Diese sollte die Vorteile bereits bekannter Probenformen beinhalten und zusätzlich deren Schwachstellen beseitigen. Dazu wurden klare Anforderungen hinsichtlich Probenform und -funktionalität definiert. Beim Vergleich zwischen der neuen Probenform und der KSII-Probe zeigte sich hinsichtlich der maximal übertragbaren Kräfte eine sehr gute Übereinstimmung. Der Vergleich der Verformungen zeigte den zu erwartenden Unterschied aufgrund der verschieden steif ausgelegten Probengeometrien. Dies ist jedoch gewünscht, da nur die Verformung des Schweißpunktes und nicht die des Bleches bestimmt werden soll.

Es wurde somit ein Konzept aus standardisierbaren Experimenten zur Kennwertermittlung entwickelt, welches der industriellen Anwendung gerecht wird. Dadurch lassen sich kostengünstig mit relativ geringem Aufwand Verbindungskennwerte ermitteln, welche zur fertigungstechnischen Absicherung als auch zur Kalibrierung mathematischer Modelle und anschließender Simulation verwendet werden können. Dadurch lässt sich in der Simulation ein Schweißpunktversagen prognosesicher bestimmen.

8. Literatur

- [1] Hooputra, H.; Gese, H.; Dell, H.; Werner, H.: A comprehensive Failure Model for Crashworthiness Simulation of Aluminium Extrusions. International Journal of Crashworthiness, Vol. 9, No. 5 (2004), pp. 449-463.
- [2] Hahn, O., u. M. Wißling: FEM-Simulation von mechanisch gefügten Verbindungen unter Crashbelastung. Schweißen und Schneiden 60, Heft 3 (2008).
- [3] Hahn, O., u. a.: Probe und Probenspannvorrichtung zum Einsatz in Zugmaschinen. Patentschrift DE 195 22 247 A1 (1996).
- [4] DIN 14272: Probenmaße und Durchführung für den Kopfzugversuch.
- [5] DIN 14273: Probenmaße und Durchführung für den Scherzugversuch.
- [6] <http://www.ke-schweissen.de/>.
- [7] Johnson, K. L.: Contact Mechanics. Cambridge University Press, Cambridge 1992.
- [8] Klein, B.: Leichtbaukonstruktion. Vieweg-Verlag, Braunschweig, 2001.
- [9] Wißling, M.: Methodenentwicklung zur Auslegung mechanisch gefügter Verbindungen unter Crashbelastung. Diss., Univ. Paderborn, ISBN 978-3-8322-6993-7, Shaker Verlag, Aachen 2008.
- [10] Timoshenko, S. u. S. Woinowsky-Krieger: Theory of Plates and Shells. McGraw-Hill Book Company (1956).