

# Berücksichtigung der Kantenrissempfindlichkeit in der Umformsimulation

Bei Blechwerkstoffen wird durch Scherschneidvorgänge das Formänderungsvermögen des Materials lokal reduziert, wodurch die Gefahr eines Risses im Weiterverarbeitungsprozess an der Kante ansteigt. Die Werkstoffe, bei denen dies im besonderen Maße auftritt, werden als kantenrissempfindlich bezeichnet. Für die quantitative Ermittlung der Kantenrissempfindlichkeit sowie die Anwendung entsprechender Kennwerte in der Umformsimulationssoftware PAM-STAMP war bisher kein Vorgehen definiert. Im Folgenden werden zwei Testverfahren und ein Ansatz zur Verwendung der Ergebnisse in einem erweiterten Grenzformänderungsdiagramm vorgestellt. Mit dessen Hilfe und einer optimierten Vernetzungsstrategie wird die Herstellbarkeit eines Fahrwerksbauteils neu beurteilt.

Thorsten Gläsner, Volkswagen AG, Komponenten-Werkzeugbau, Braunschweig  
Volkan Imat, ESI Group, Neu-Isenburg  
Matthias Schneider, Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Engineering und Simulation, Salzgitter  
Dr.-Ing. Christina Sunderkötter, Volkswagen AG, Konzernforschung, Wolfsburg  
Martin Theiss, ESI Group, Neu-Isenburg  
Sebastian Westhäuser, Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Umformtechnik, Salzgitter

## 1 Einleitung

Die Automobilindustrie steht aufgrund ökonomischer Ziele und gesetzlicher Vorgaben vor der Herausforderung, den CO<sub>2</sub>-Ausstoss der Fahrzeuge zu reduzieren. Ein vielversprechender Ansatz in diesem Kontext ist der Stahlleichtbau. Eine Reduzierung der Fahrzeugmasse hat direkten Einfluss auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoss. Je 100 Kilogramm eingesparter Masse werden die Emissionen um 8,5 g/km CO<sub>2</sub> reduziert [BUC07]. Die Stahlindustrie hat diesen Trend erkannt und neue Produkte und Anwendungsmöglichkeiten entwickelt. Die Stahlgüten werden immer fester, die eingesetzten Bleche immer dünner und die Bauteilgeometrien immer komplexer. Mit jeder neuen Bauteilgeneration steigen somit die Ansprüche an die mechanischen Eigenschaften des Vormaterials. Parallel wird die Umformtechnik vor entsprechend große Herausforderungen gestellt.

Ein Beispiel für eine solche Herausforderung stellt die Kantenrissempfindlichkeit von schergeschnittenen Werkstoffen dar. Durch einen Scherschneidprozess kann das Formänderungsvermögen der neu entstandenen Kante signifikant im Vergleich zu dem des Basismaterials reduziert werden. Bei anschließenden Umformvorgängen kann aufgrund des so reduzierten Formänderungsvermögens eine von der Kante ausgehende Rissbildung auftreten, welche mit bestehenden Methoden sowohl experimentell als auch simulativ nur unzureichend genau vorausgesagt werden konnte. In der Umformsimulation hat sich als Maß für die Umformbarkeit von Blechen das Grenzformänderungsdiagramm mit der entsprechenden Grenzformänderungskurve

(Forming Limit Curve, FLC) etabliert. Im Falle der simulativen Abbildung der Kantenrissempfindlichkeit hat sich bisher noch kein universell anwendbarer Ansatz etabliert, der an einer aussagekräftigen Anzahl an Praxisbauteilen erprobt und verifiziert wurde.

In einer Kooperation der ESI GmbH, der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, dem Volkswagen Komponenten-Werkzeugbau und der Volkswagen Konzernforschung wurde jetzt ein industriell anwendbares Vorgehen definiert und dieses an einem Fahrwerksbauteil angewendet. Die zu diesem Zweck eingesetzten Testverfahren „Lochaufweitung mit Nakajima-Stempel“ und „Kobe-Lochzugversuch“ werden im Folgenden vorgestellt.

## 2 Versuche zur Bestimmung der Kantenrissempfindlichkeit

Der Lochaufweitungstest nach ISO 16630 ist derzeit der einzige genormte Test zur Bestimmung der Kantenrissempfindlichkeit. Bei diesem Test wird ein Loch mit einem Durchmesser von 10 mm durch Scherschneiden in die Blechprobe eingebracht (Schneidspalt: 12 %) und anschließend mit einem konischen Stempel (Kopfkegelwinkel 60°) aufgeweitet. Die Aufweitung wird durch den Bediener gestoppt, sobald dieser einen durch die gesamte Blechdicke verlaufenden Riss visuell wahrnimmt. Infolgedessen sind die Ergebnisse dieses Tests im hohen Maße von der Wahrnehmung und Reaktionsgeschwindigkeit des Bedieners abhängig. Das Testergebnis ist durch das sogenannte Lochaufweitungsverhältnis gegeben, welches als Verhältnis aus Lochdurchmesserzunahme zum initialen Lochdurchmesser definiert ist [ISO09].

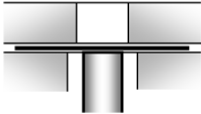
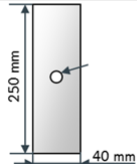
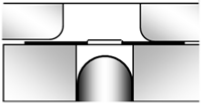


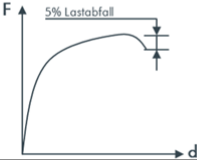
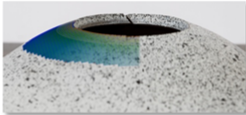
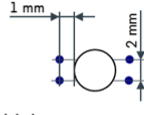

Aufgrund der beschriebenen Testmethodik, die u.a. einen starken Bedienerinfluss auf die Messergebnisse zulässt, weisen die aus mindestens drei Einzelproben ermittelten Lochaufweitungsverhältnisse im Allgemeinen eine recht hohe Streuung auf. Diese hohe Streuung ist sowohl innerhalb einer Prüfstelle als auch prüfstellenübergreifend zu beobachten [BRA11]. In [BRA11] wird daher u.a. eine Erhöhung der Probenanzahl mit dem Ziel einer besseren statistischen Absicherung gefordert.

Neben dem genormten Lochaufweitungstest gibt es zahlreiche weitere Testverfahren, die zur Quantifizierung der Kantenrissempfindlichkeit entwickelt wurden. Im Folgenden werden die beiden Testmethoden „Lochaufweitung mit Nakajima-Stempel“ sowie „Kobe-Lochzugversuch“ vorgestellt. Diese erlauben die Anwendung von optischen Messsystemen, wodurch der Bedienerinfluss und folglich die Streuung der Testergebnisse deutlich reduziert werden kann [BRA13].

Für die „Lochaufweitung mit Nakajima-Stempel“ wird der Versuchsaufbau zur Ermittlung einer Grenzformänderungskurve verwendet. Wie im Falle des ISO 16630 Lochaufweitungstests besteht der Versuch aus zwei Schritten. Zuerst wird ein Loch, hier jedoch mit einem Durchmesser von 20 mm, in eine quadratische Probe (Kantenlänge 200 mm) mittels Stanzen (Schneidspalt 12 %) eingebracht, siehe Abbildung 1. Im zweiten Schritt wird die so präparierte Probe mit einem hemisphärischen Stempel (Durchmesser 100 mm) aufgeweitet, wobei die Stempelgeschwindigkeit in Anlehnung an den ISO 16630 Lochaufweitungstest kleiner bzw. gleich 1,0 mm/s gewählt sein muss. Die Probe ist so zu platzieren, dass die Stanzrichtung der Umformrichtung entspricht. Um verlässliche Ergebnisse zu erzielen, ist für eine genaue Zentrierung der Probe zu sorgen. Sobald ein Riss, welcher durch die gesamte Blechdicke verläuft, zu detektieren ist, wird der Versuch unmittelbar gestoppt. Wie im Fall des ISO 16630 Lochaufweitungstests werden mindestens drei Proben pro Einstellung getestet. Im Vergleich zum ISO 16630 Lochaufweitungstest erfolgt die Rissinitiierung bei der „Lochaufweitung mit Nakajima-Stempel“ abrupter [SCH11]. Aus diesem Grund kann eine Rissbreitenkorrektur, wie in [SCH12] dargestellt, bei der Auswertung durchgeführt werden. Das Ergebnis ist wiederum das bereits oben beschriebene Lochaufweitungsverhältnis. Im Gegensatz zum ISO 16630 Lochaufweitungstest kann jedoch vor der Umformung ein stochastisches Muster auf die Blechoberfläche appliziert und mit dem optischen Messsystem ARAMIS der Firma GOM eine detaillierte Dehnungsanalyse für den kantennahen Bereich der Probe durchgeführt werden. Eine vergleichbare Analyse ist bei der Lochaufweitung nach ISO16630 aufgrund sich während des Versuches stark aus der anfänglichen

Blechebene herausbewegenden Probenoberfläche mit einem Standard ARAMIS-System nicht möglich. Mit Hilfe eines auf Visual Basic basierenden Auswertemakros, welches definierte Risskriterien enthält, kann der Risszeitpunkt sowie das Lochaufweitungsverhältnis automatisch detektiert und bestimmt werden [BEH15].

Für den „Kobe-Lochzugversuch“ wird nach [WAT06] eine rechteckige Zugprobe verwendet (250 x 40 mm<sup>2</sup>), in welche zentriert ein Loch mit einem Durchmesser von 10 mm gestanzt wird (Schneidspalt 14 %), siehe Abbildung 1. Anschließend wird die Probe mit Hilfe einer Zugprüfmaschine mit einer Geschwindigkeit von 10 mm/min solange gezogen, bis ein Riss an der Lochkante initiiert wird. Im Gegensatz zum Vorgehen nach [WAT06] erfolgt die Kennwertermittlung virtuell. Wie im Fall der „Lochaufweitung mit Nakajima-Stempel“ wird ein stochastisches Muster verwendet, um die Verschiebungen und folglich die Dehnungen im Lochbereich mit Hilfe des ARAMIS Messsystems erfassen zu können. Die Probe wird mittels einer virtuellen Messlänge ausgewertet, welche im initialen Zustand eine Länge von 2 mm sowie einen Abstand zur Kante von 1 mm aufweist und in Richtung der Längsachse orientiert ist. Der Kennwert dieses Testverfahrens ist durch das Verhältnis aus der Verlängerung dieser Messlänge bei Rissbeginn zur anfänglichen Messlänge gegeben. Die in [WAT06] vorgegebene Dehnungsbezugsgröße von 2 mm liegt jedoch in der Größenordnung der in der Finite-Elemente-Simulation verwendeten Elementgröße. Der Einsatz eines optischen Dehnungsmesssystems (ARAMIS) sowohl im Fall der „Lochaufweitung mit Nakajima-Stempel“ als auch dem „Kobe-Lochzugversuch“ ermöglicht eine variable Anpassung der Dehnungsbezugsgröße. Somit lässt sich bedarfsorientiert ein elementgrößenabhängiger Grenzdehnungswert bestimmen.

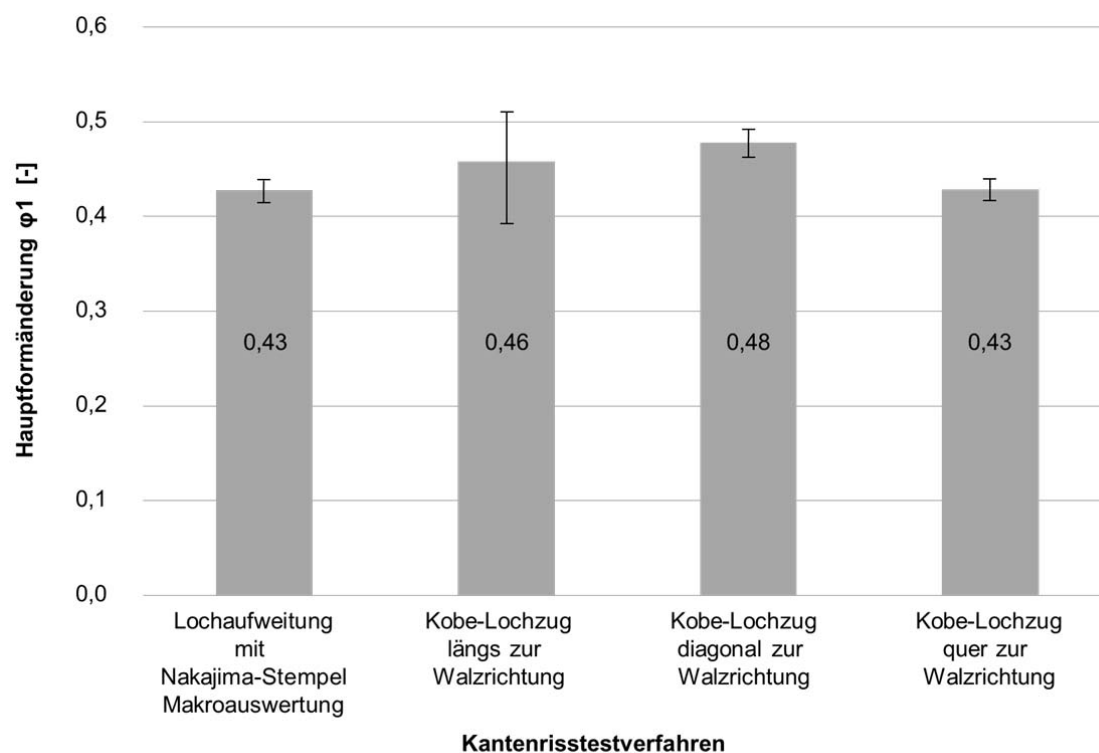
Lochaufweitung mit Nakajima-Stempel	Kobe-Lochzugprobe
<ul style="list-style-type: none"> <li>Probengröße 200 mm x 200 mm</li> <li>Stanzen Ø 20 mm Stempel</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Probengröße 40 mm x 250 mm</li> <li>Stanzen Ø 10 mm Stempel</li> </ul> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>Umformen Ø 100 mm Nakajima-Stempel entsprechend ISO 12004-2</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Umformen Zugversuch mit konstanter Geschwindig- keit von 10 mm/min</li> </ul> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>Abschaltkriterium Sichtbarer Riss durch Blechdicke</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Abschaltkriterium Automatische Abschaltung bei Lastabfall von 5 %</li> </ul> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>Auswertung <ul style="list-style-type: none"> <li>Bestimmung des Lochaufweitungsverhältnisses</li> <li>Dehnungsanalyse und automatische Bestimmung des Risszeitpunktes</li> </ul> </li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Auswertung <ul style="list-style-type: none"> <li>Bestimmung der Hauptformänderung mittels Messung der Verschiebung von zwei virtuellen Punkten</li> </ul> </li> </ul>  

**Abbildung 1: Versuchsdurchführung des Kantenrisstests „Lochaufweitung mit Nakajima-Stempel“ und „Kobe-Lochzugversuch“**

In Abbildung 2 sind die Ergebnisse für die Testmethoden „Lochaufweitung mit Nakajima-Stempel“ und „Kobe-Lochzugversuch“ dargestellt. Bei der „Lochaufweitung mit Nakajima-Stempel“ handelt es

sich um die Ergebnisse der Makroauswertung. Im Fall des Testverfahrens „Kobe-Lochzugversuch“ wurden die Ergebnisse in Abhängigkeit zur Walzrichtung (längs, diagonal und quer) mit jeweils fünf Einzelproben ermittelt. Das jeweilige minimale und maximale Einzelergebnis wurde bei der Bildung des Mittelwertes sowie der Standardabweichung nicht berücksichtigt. Die in der Abbildung 2 aufgeführten Mittelwerte und Standardabweichungen repräsentieren somit den Durchschnitt aus je drei Proben.

Die Kennwerte der „Lochaufweitung mit Nakajima-Stempel“ und vom „Kobe-Lochzugversuch“ mit einer Ausrichtung quer zur Walzrichtung liegen auf demselben Niveau. Da die gleichmäßig über den Umfang der gestanzten Kante belastete Probe der „Lochaufweitung mit Nakajima-Stempel“ bevorzugt in Walzrichtung reißt (0°- bzw. 180°-Richtung), handelt es sich um dieselbe Rissausbreitungsrichtung bei diesen beiden Versuchsvarianten. Auffällig ist weiterhin, dass die Probe des „Kobe-Lochzugversuchs“ mit einer Ausrichtung quer zur Walzrichtung den Fall repräsentiert, bei dem das Material die geringsten Dehnungen ertragen kann. Die Kennwerte für den „Kobe-Lochzugversuch“ mit einer Ausrichtung längs und diagonal zur Walzrichtung liegen durchschnittlich auf einem höheren Niveau.



**Abbildung 2: Ergebnisse der Kantenrisstests „Lochaufweitung mit Nakajima-Stempel“ und „Kobe-Lochzugversuch“**

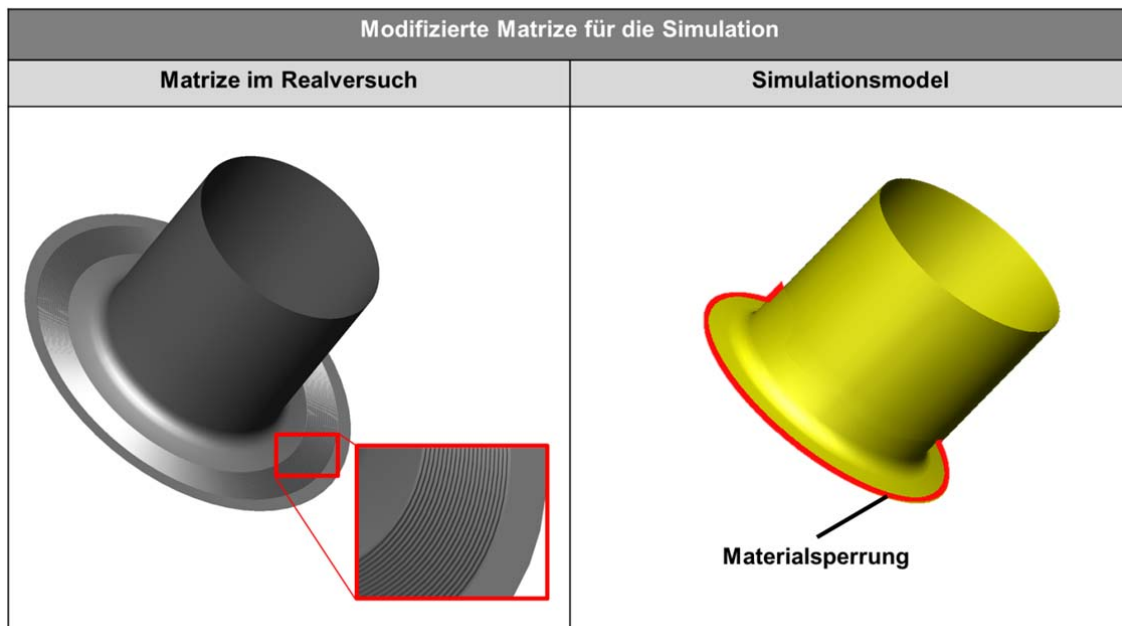
### 3 Modellierung der Experimente mit PAM-STAMP

Die beiden oben beschriebenen Experimente „Lochaufweitung mit Nakajima-Stempel“ und „Kobe-Lochzugversuch“ werden im Folgenden auch simulativ betrachtet. Dazu werden entsprechende

Simulationsmodelle, welche die realen Versuchsbedingungen möglichst exakt abbilden, mit der Simulationssoftware PAM-STAMP erstellt und berechnet.

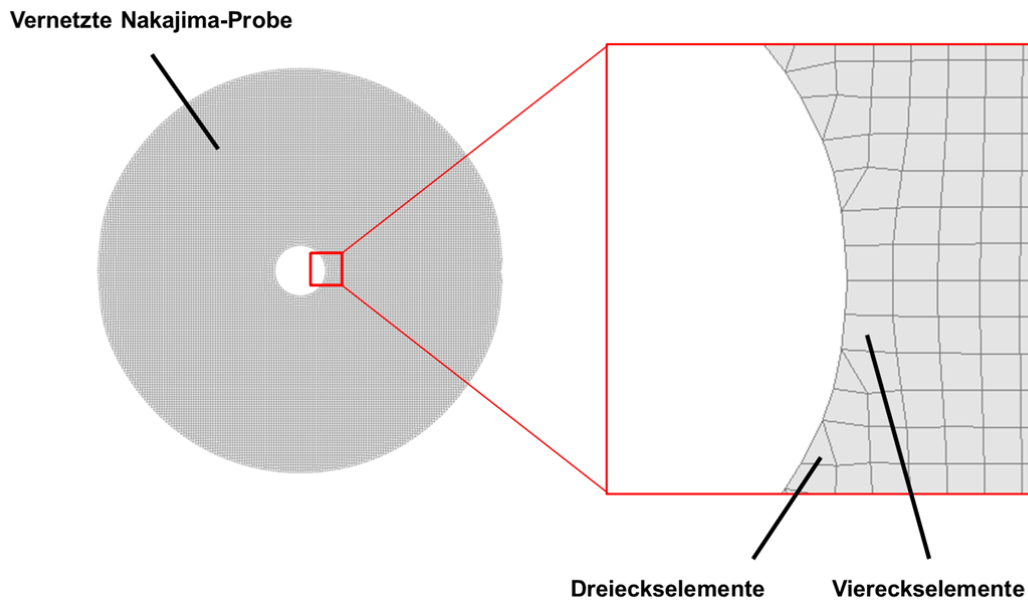
### 3.1 Lochaufweitung mit Nakajima-Stempel

In der realen Versuchsdurchführung wird die Probe zunächst über Sicken in der Matrize und dem Blechhalter gehalten (Abbildung 3, links). Wie in dem rechten Bild der Abbildung 3 zu sehen, wurden die realen Klemmbedingungen durch entsprechende kinematische Randbedingungen in PAM-STAMP berücksichtigt und auf diese Weise das Nachfließen des Materials unterbunden.



**Abbildung 3: Vereinfachung der Simulation über kinematische Annahmen in PAM-STAMP**

Die Berechnung erfolgt mit einer kreisrunden Platine (Durchmesser = 200 mm). Die verwendeten Shell-Elemente des Platinennetzes in der Simulation haben eine Maximalkantenlänge von 1 mm, welche an die bei der Messung mit ARAMIS vorliegende Dehnungsbezugsgröße angelehnt ist. Die Vernetzung der Platine erfolgt standardisiert und dem industriellen Alltag entsprechend großflächig und vorrangig mit Viereckselementen sowie im Lochbeschnitt mit Dreieckselementen, um der Platinengeometrie folgen zu können (siehe Abbildung 4).



**Abbildung 4: Modellierungsparameter in PAM-STAMP**

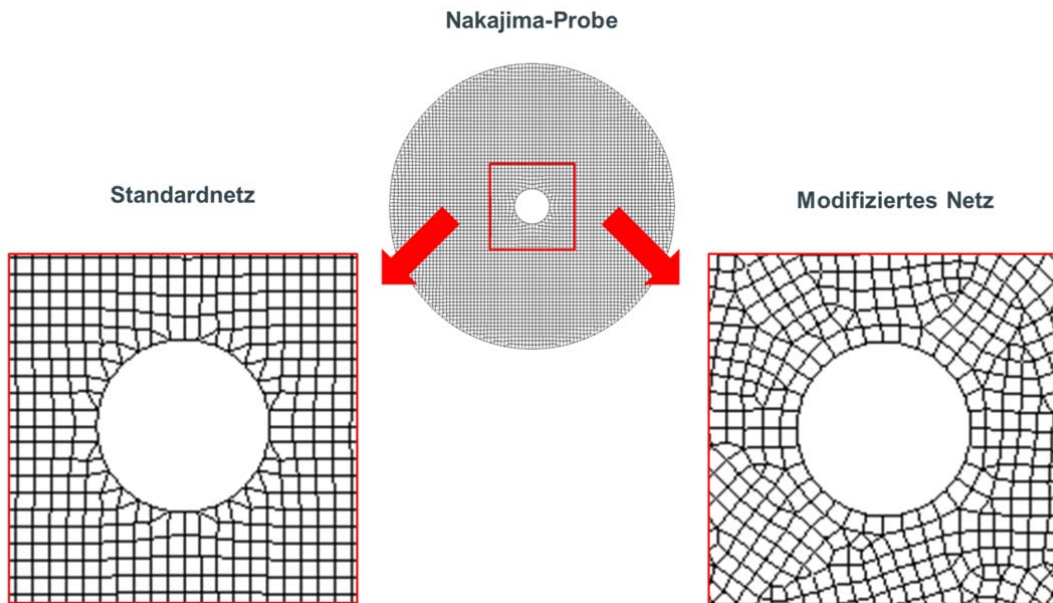
### 3.2 Kobe-Lochzugversuch

Beim „Kobe-Lochzugversuch“ werden ebenso kinematische Vereinfachungen in der Simulationsumgebung getroffen. Während die Probe in einem realen Zugversuch zwischen zwei Backen geklemmt und anschließend gezogen wird, werden in PAM-STAMP die Knoten der jeweiligen Elemente im Klemmbereich der Platine kinematisch gesteuert, was den Simulationaufbau vereinfacht, den Praxisversuch dennoch gut abbildet. Die im Kapitel 3.1 beschriebene Vernetzungsstrategie wird auch beim „Kobe-Lochzugversuch“ angewendet.

## 4 Abgleich der Simulation mit den Experimenten

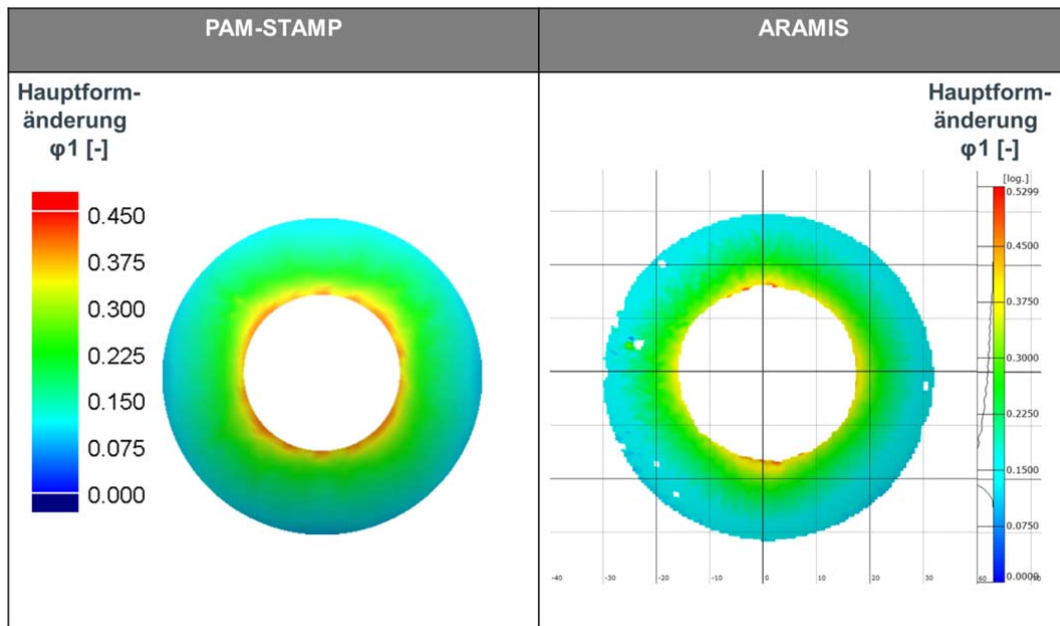
### 4.1 Lochaufweitung mit Nakajima-Stempel

Bei Betrachtung der Simulationsergebnisse für die „Lochaufweitung mit Nakajima-Stempel“ zeigt sich ein numerischer Einfluss, welcher offensichtlich durch die Netzdiskretisierung hervorgerufen wird. Davon betroffen sind Dreiecks- und unregelmäßige Viereckselemente, welche durch die Randvernetzung vorliegen. Zur zuverlässigen Vorhersage der Kantenrissgefahr ist es notwendig, diesen numerischen Einfluss an der Probenkante auszuschließen. Ansonsten würde ein möglicher Kantenriss durch die Simulation zu früh prognostiziert werden [GLÄ15]. Zu diesem Zweck wird die Berechnung erneut mit einem anderen Ausgangsnetz für die Platine durchgeführt. Dabei wird das Platinennetz mit Rücksicht auf die Beibehaltung der Elementgröße hinreichend modifiziert, so dass im Schnittkantenbereich keine Dreieckselemente mehr vorliegen und dort ein möglichst gleichmäßiges Netz entsteht (siehe Abbildung 5). Dieser Schritt erfolgt in der ESI eigenen Software VISUAL-MESH.



**Abbildung 5: Netzmodifizierung im Bereich der Probenkante mittels VISUAL-MESH**

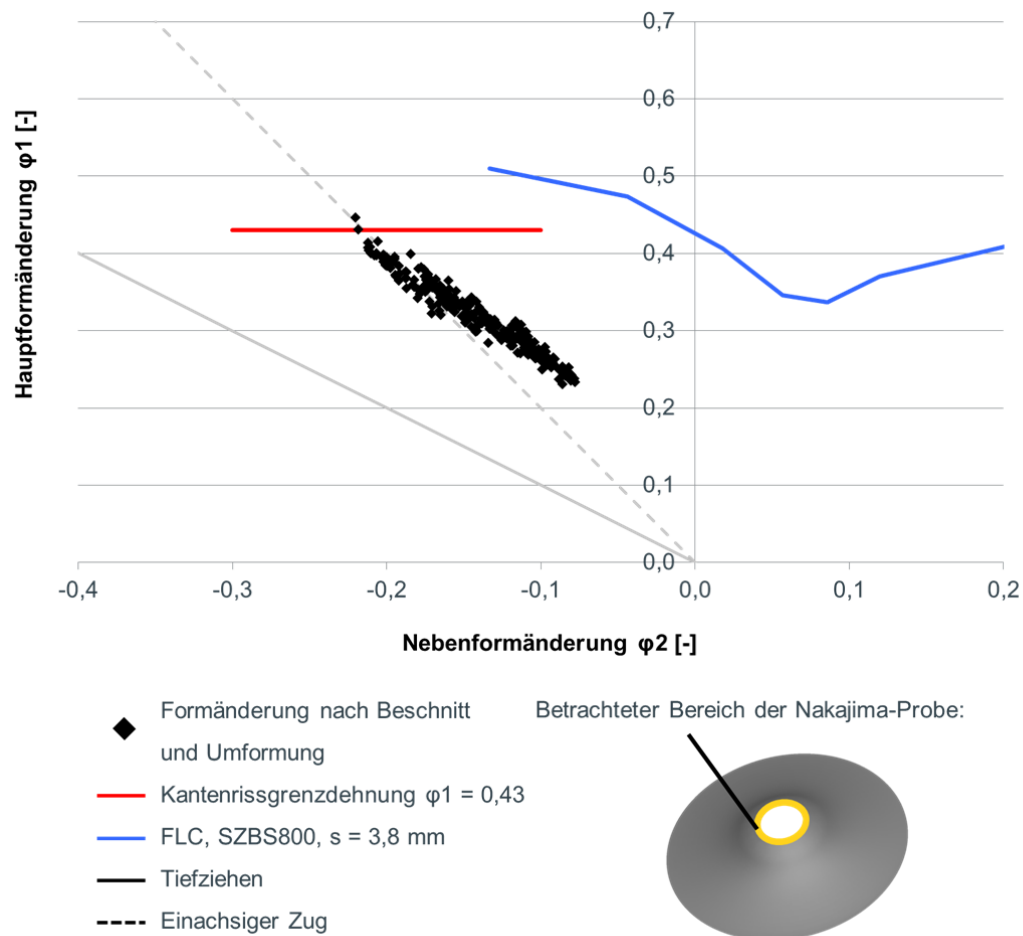
Das Simulationsergebnis mit der modifizierten Vernetzung, welches nur noch viereckige Elemente entlang der Kante besitzt, weist eine signifikante Besserung der Ergebnisqualität auf. Beim Vergleich der mit diesem Platinennetz erzielten Ergebnisse mit denen der ARAMIS-Messung zeigt sich eine qualitativ und quantitativ gute Übereinstimmung. In Abbildung 6 ist dieser Vergleich exemplarisch für die erste Hauptformänderung dargestellt. Der Stempelweg, der beiden Bildern zugrunde liegt, ist identisch und entspricht dem Zustand unmittelbar vor Risseintritt.



**Abbildung 6: Vergleich der Hauptformänderungen bei der „Lochaufweitung mit Nakajima-Stempel“ auf der Oberseite zwischen Simulation und Laborprobe**

Abbildung 7 zeigt die Erweiterung des Grenzformänderungsdiagrammes um die aus den Kantenrisstests stammende Grenzdehnung. Werden die Dehnungen aus der Simulation der Nakajima-Probe bei entsprechendem Stempelweg in dieses Diagramm eingetragen, wird eine Rissgefahr durch Überschreiten der Grenzdehnung angezeigt.

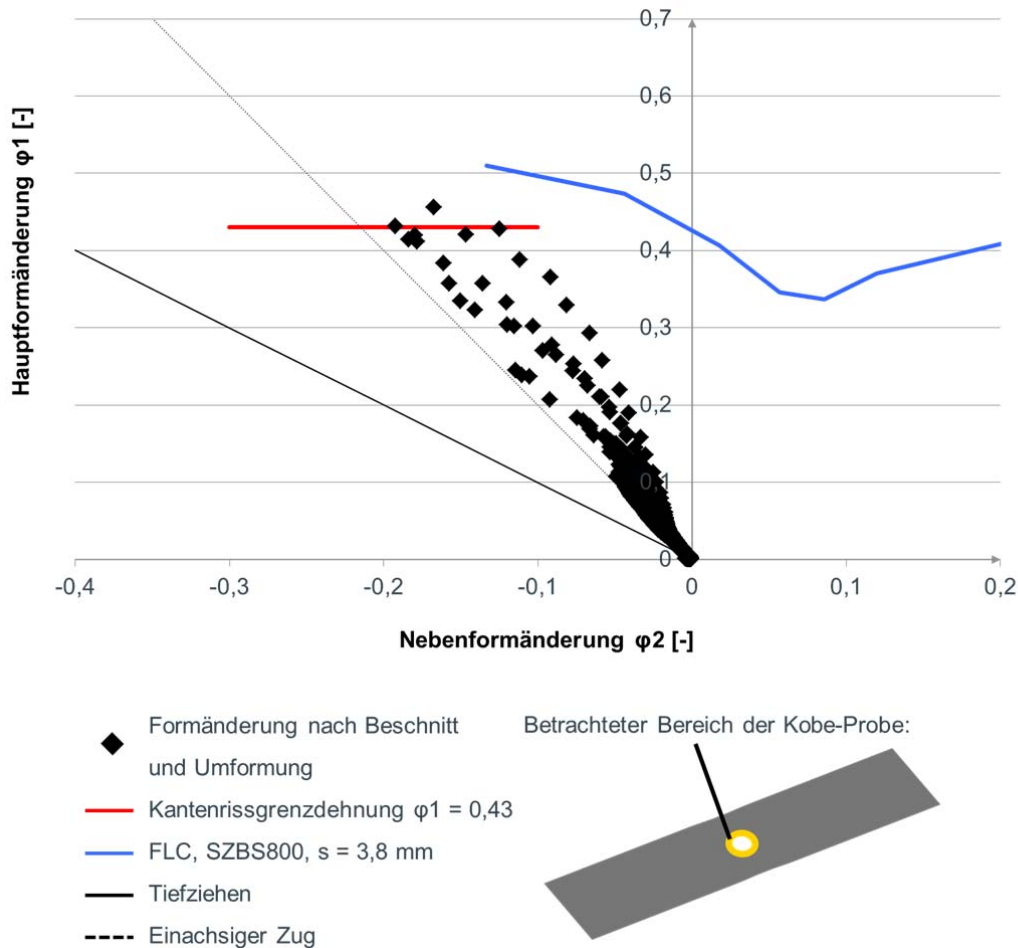




**Abbildung 7: Grenzformänderungsdiagramm mit Grenzdehnungen für die Kantenrissempfindlichkeit sowie Randelemente aus der numerischen Simulation der „Lochaufweitung mit Nakajima-Stempel“**

## 4.2 Kobe-Lochzugversuch

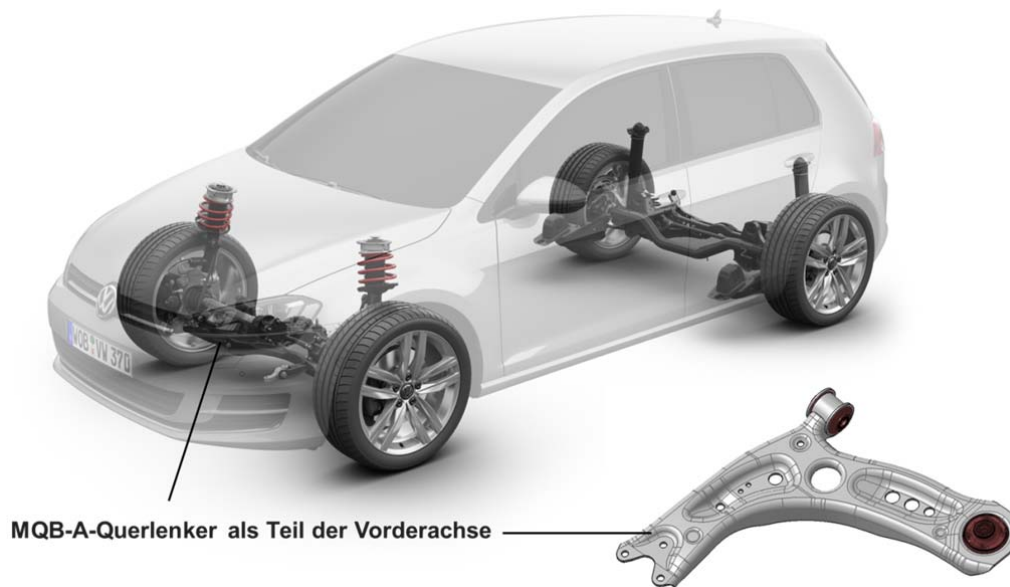
Die Ergebnisse aus der numerischen Simulation zeigen im Vergleich zum Experiment eine gute Überstimmung hinsichtlich der Dehnungsverteilung und -lokalisierung. Aufgrund der Probengeometrie ist der Bereich höchster Formänderungen im Gegensatz zur „Lochaufweitung mit Nakajima-Stempel“ bereits vorbestimmt, so dass bei der Vernetzung insbesondere in diesem Bereich auf homogene Viereckselemente zu achten ist. Abbildung 8 zeigt die Erweiterung des Grenzformänderungsdiagramms um die aus den Kantentests stammende Grenzdehnung. Auch hier wird der Versagenspunkt korrekt vorhergesagt.



**Abbildung 8: Grenzformänderungsdiagramm mit Grenzdehnung für die Kantenrissempfindlichkeit sowie Randelementdehnung aus der numerischen Simulation des „Kobe-Lochzugversuchs“**

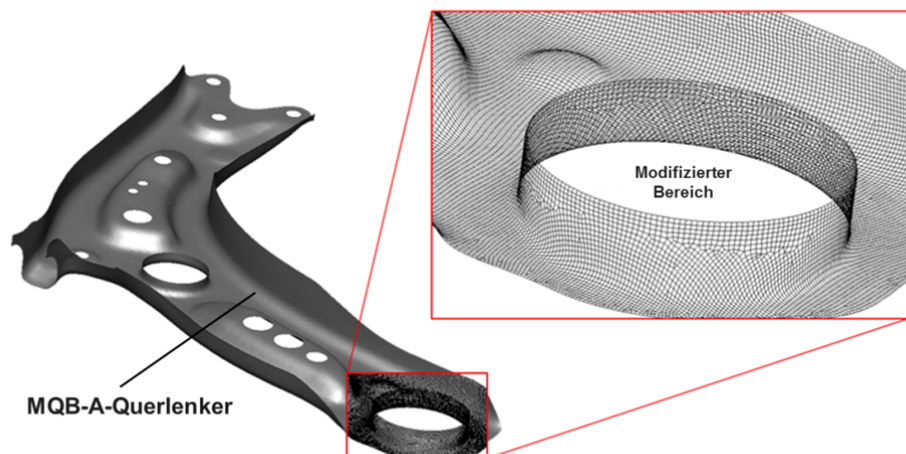
### 4.3 Modifiziertes Netz in der Praxis

In der Praxis werden Bauteile wie der MQB-A-Querlenker des Volkswagen Konzerns in der Regel durch Umformprozesse aus mehreren Beschnitt- und Umformstufen hergestellt, siehe Abbildung 9. Bei einem möglichen Zwischenbeschnitt entstehen im Simulationsmodell entlang der Schnittkante erneut Dreieckselemente, welche eine Netzanpassung ab dieser Stufe erforderlich machen. Jedoch ist eine erneute Anpassung der Platine in einer Zwischenstufe weitaus komplexer zu realisieren, da bei einer Vernetzungsanpassung in VISUAL-MESH, also außerhalb der Umgebung von PAM-STAMP, die Informationen wie Ausdünnung, Dehnung, usw. von vorherigen Stufen verloren gehen.



**Abbildung 9: MQB-A-Querlenker als Teil der Vorderachse für die Golf-Plattform der Volkswagen AG**

Das Umformergebnis einer vorherigen Stufe kann jedoch mit Hilfe der in PAM-STAMP zur Verfügung stehenden „Mapping“-Funktion auf die folgende Stufe übertragen werden. Dadurch kann eine Platine mit einem in VISUAL-MESH veränderten Netz, welches zunächst keinerlei Umformhistorie mehr besitzt, über einen (Re)-Import der aus der vorherigen Stufe exportierten Mapping-Datei wieder mit den Ergebnissen aus den Vorstufen belegt werden. Bei diesem Schritt werden die Ergebnisse der Vorstufe auf das neue Netz projiziert, der alte Umformzustand somit wiederhergestellt. Exemplarisch wird die oben dargelegte Vorgehensweise für den Querlenker durchgeführt (siehe Abbildung 10).



**Abbildung 10: Lokale Netzmodifizierung an einem MQB-A-Querlenkerbauteil**

Mit dieser neuen Vernetzungsstrategie kann die Vorhersagegenauigkeit für möglicherweise auftretende Kantenrisse gesteigert und auf diese Weise die Ergebnisqualität optimiert werden (siehe Abbildung 11).

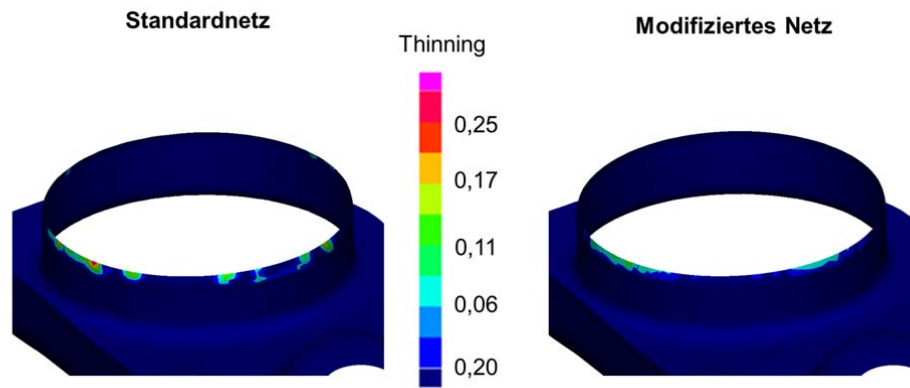


Abbildung 11: Netzoptimierung im Bereich eines Durchzuges des MQB-A-Querlenkers

## 5 Anwendung der Erkenntnisse auf Fahrwerksbauteil

Als Beispiel für die Übertragbarkeit in die Praxis des bisher nur auf Geometrien im Labormaßstab angewandten Vorgehens dient im Folgenden der MQB-A-Querlenker für die Golf-Plattform. Auf Basis der Erfahrungen aus dem Serienprozess wird die Annahme getroffen, dass der zur Erzeugung der Laborproben eingesetzte standardisierte einfache Schneidprozess bei der Fertigung des realen Querlenkers ein Versagen der Bauteilkanten zur Folge hätte.

Um im Vorfeld sicherzustellen, dass die in der Umformsimulation vorliegenden Dehnungen mit den am Bauteil vorliegenden Verhältnissen korrespondieren, wird eine Umformanalyse des Serienprozesses durchgeführt, siehe Abbildung 12.

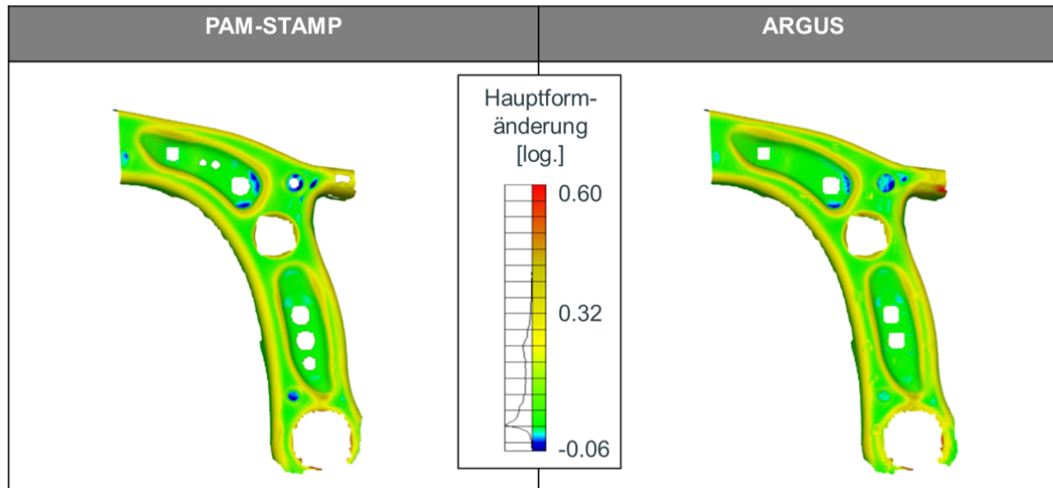


Abbildung 12: Vergleich der Hauptformänderungen aus Umformsimulation (PAM-STAMP) und Umformanalyse (ARGUS)

Hierzu werden auf das ebene Blech, vor der Umformung, elektrolytisch äquidistante Punkte aufgebracht. Das Blech wird dem Serienprozess zugeführt und nach der Umformung wieder entnommen. Mit Hilfe des optischen Dehnungsmesssystems ARGUS der Firma GOM werden aus

Digitalfotos des umgeformten Bleches dreidimensionale Koordinaten und Dehnungsverteilungen berechnet. Diese beziehen sich auf die Blechoberfläche [Fri08]. Abbildung 12 zeigt links die Verteilung der Hauptformänderung aus PAM-STAMP und rechts aus ARGUS. Eine für die weitere Betrachtung hinreichend gute Übereinstimmung liegt vor.

Im Folgenden werden verschiedene Bereiche des MQB-A-Querlenkers überprüft, ob die im Labormaßstab ermittelte Kantenrissgrenzdehnung ( $\varphi_1 = 0,43$ ) auch für ein Serienbauteil angewendet werden kann. Insgesamt werden die simulativen Untersuchungen an drei Stellen vorgenommen. Bei den ersten zwei Beispielen handelt es sich um Bereiche, die vor dem Schneiden nicht signifikant umgeformt werden. Der dritte Bereich hingegen steht beispielhaft für eine vorgedehnte, beschnittene und weiter umgeformte Bauteilzone.

In Abbildung 13 werden die Elementdehnungen der PAM-STAMP Simulation für eine Außenkante des MQB-A-Querlenkers im erweiterten Grenzformänderungsdiagramm dargestellt, welches neben der klassischen Forming Limit Curve ebenfalls die Kantenrissgrenzdehnung beinhaltet.

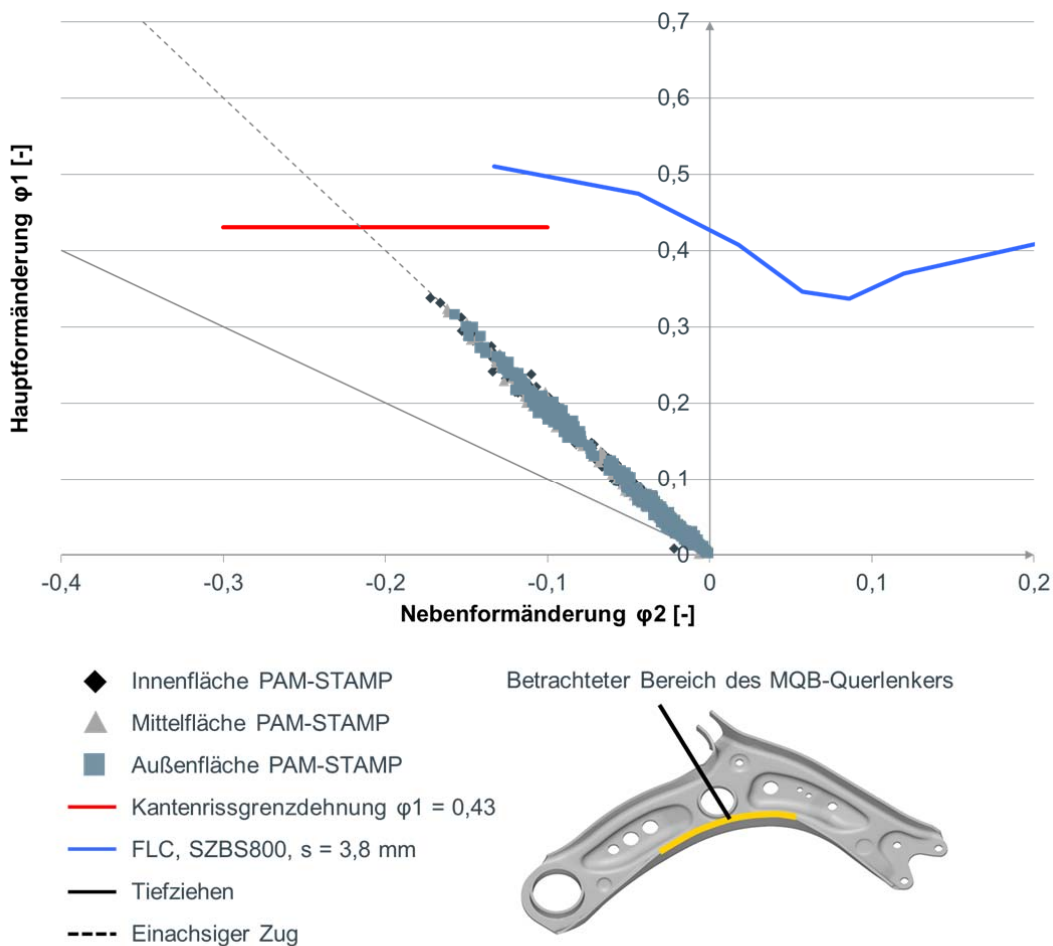


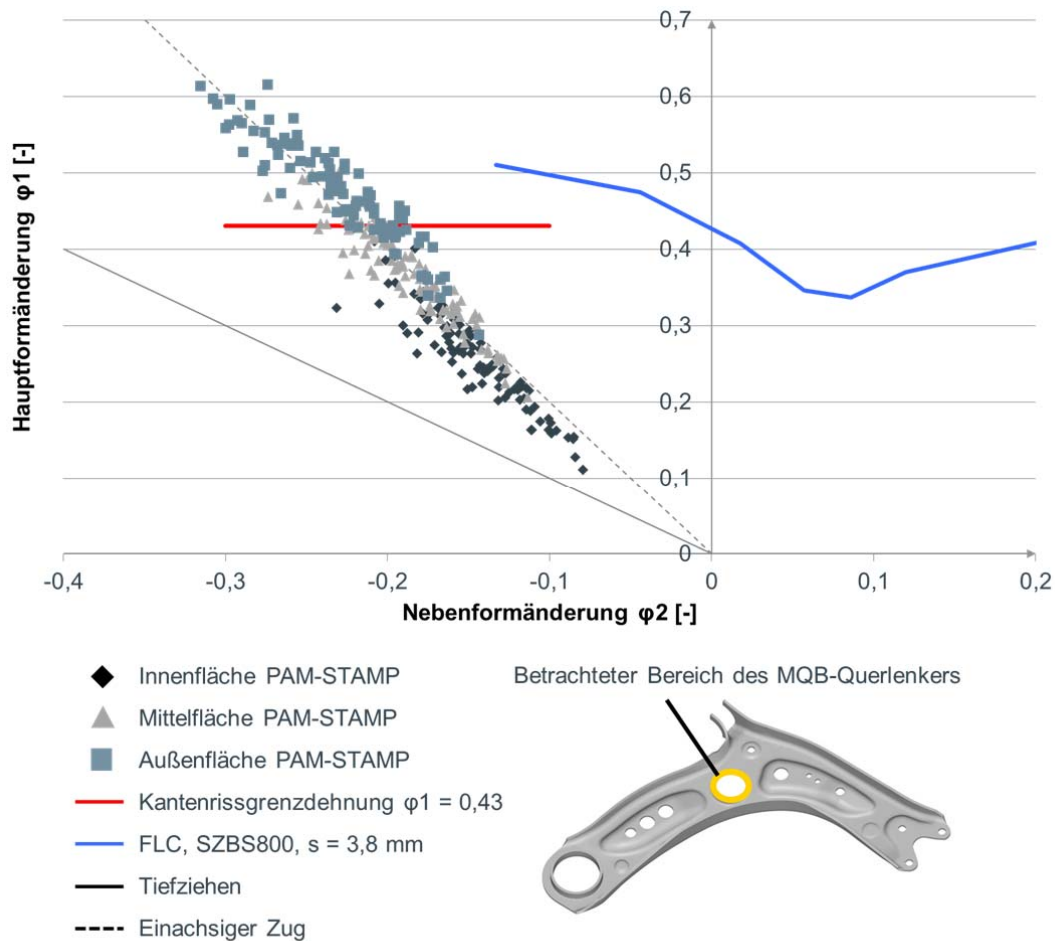
Abbildung 13: Beurteilung der Herstellbarkeit der Querlenkeraußenkante

Es zeigt sich (wie bei den Kantenrissversuchen), dass der untersuchte, kantennahe Bereich gemäß des einachsigen Zuges beansprucht wird. Alle Elemente liegen sowohl deutlich unterhalb der FLC als auch der Kantenrissgrenzdehnung und können somit als nicht kantenrissgefährdet bewertet werden. Zusätzlich lässt sich kein Einfluss der auszuwertenden Blechebene erkennen. Sowohl die Innen-, Mittel- als auch Außenflächen werden lediglich einer ertragbaren Dehnung ausgesetzt.

Klassisch erweisen sich Durchzüge, bei denen ein zunächst durch Scherschneiden hergestelltes Loch durch Kragenziehen aufgeweitet wird, als besonders kantenrissempfindlich. Beim Kragenziehen in ebenen Blechen wird der über der Ziehringöffnung liegende Blechabschnitt um die Kanten von Ziehring und -stempel gebogen. Während dieser Umformung vergrößert sich der Durchmesser des Vorloches bei gleichzeitiger Verringerung der Blechdicke. Gegenstand der Untersuchungen ist der Kragen mittig im Bauteil, siehe Abbildung 14.

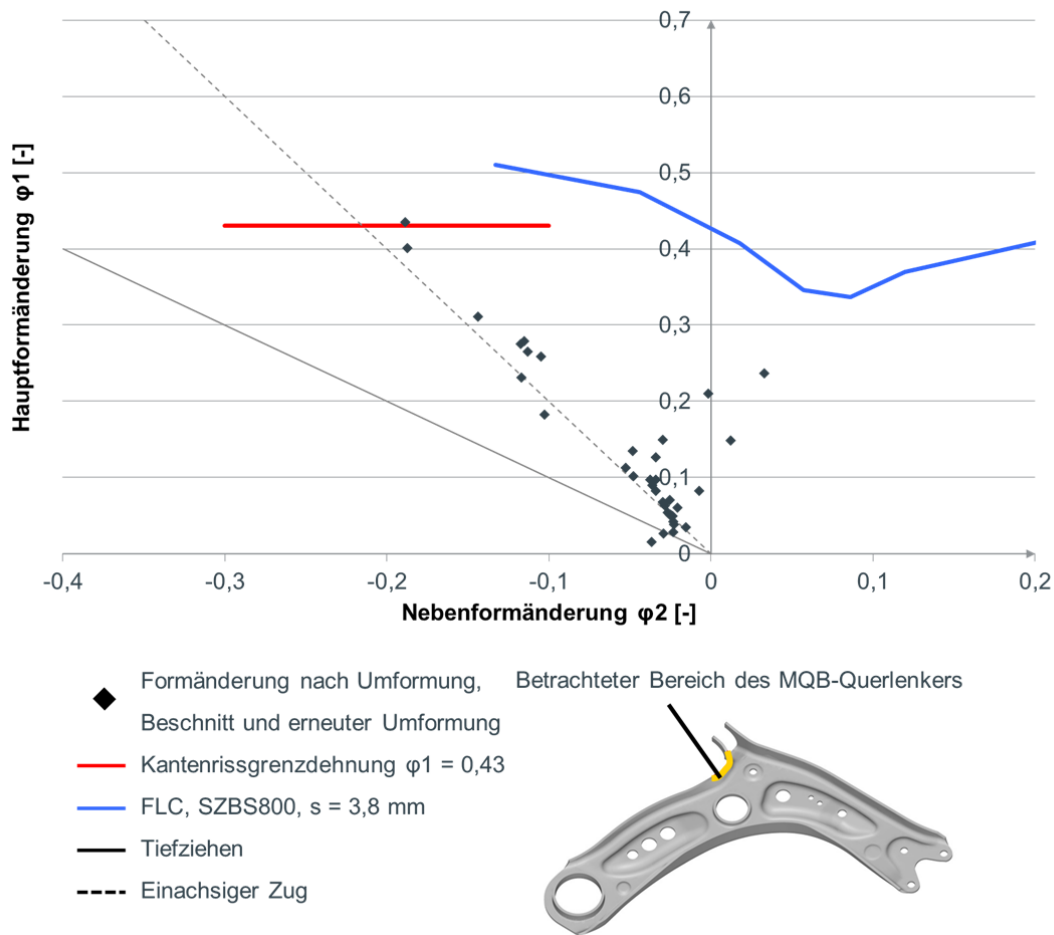
Da hier durch die Umformung ein Dehnungsgradient über der Blechdicke vorliegt, ergibt sich je nach Auswertebene ein unterschiedliches Bild. Für die Beurteilung der Herstellbarkeit im Kantenbereich ist somit die Auswertebene mit der jeweils höchsten Dehnung zu wählen.

Für den vorliegenden Fall bedeutet dies, dass der Durchzug bei einem standardisierten einfachen Stanzprozess als nicht herstellbar identifiziert wird. Dies entspricht den Erfahrungswerten. Aus diesem Grund wird in der Praxis ein zweistufiger Scherschneidprozess eingesetzt, der das Material im Vergleich zum einstufigen Scherschneidprozess weniger stark schädigt und dadurch ein deutlich höheres Formänderungsvermögen der Kante ermöglicht [GLÄ14].



**Abbildung 14: Beurteilung der Herstellbarkeit an einem Durchzug**

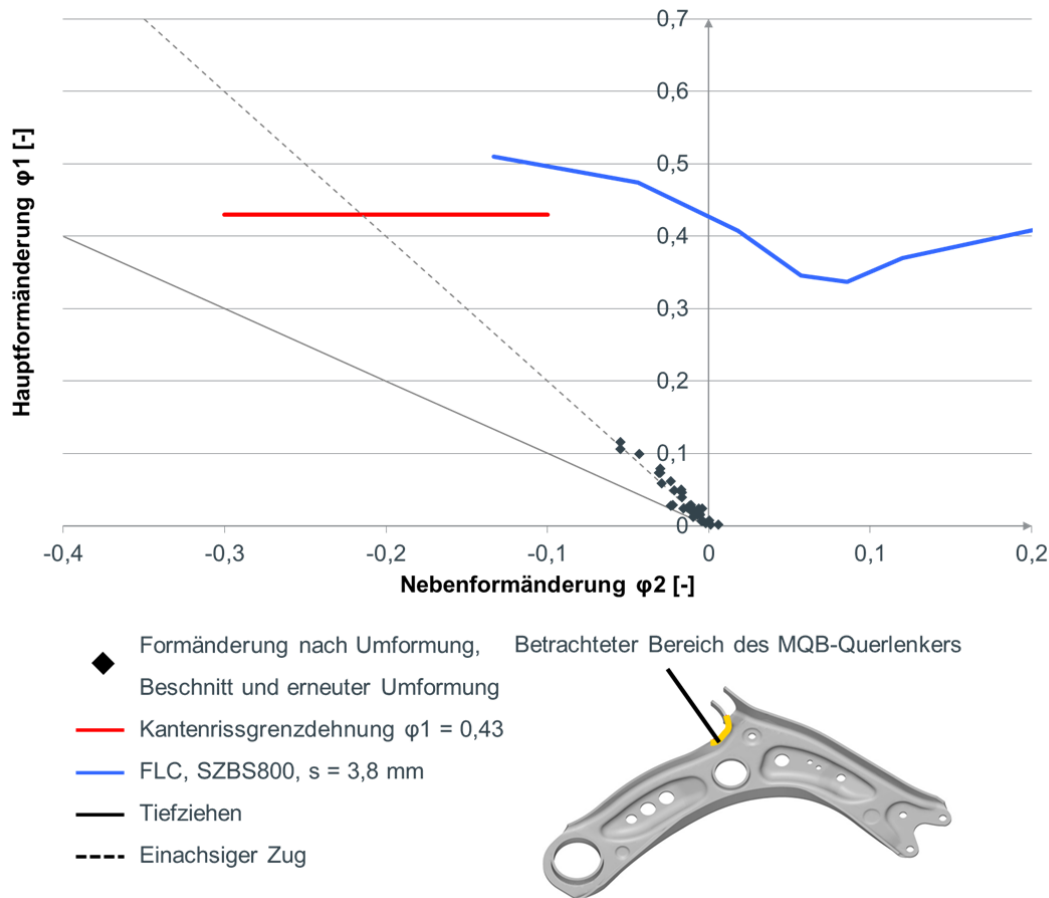
Im Unterschied zu den bisherigen Untersuchungen wurde der im Folgenden betrachtete Bereich (siehe Abbildung 15) vor dem Schneiden bereits umgeformt. Laut Herstellmethode wird der Bereich umgeformt, beschnitten und letztlich erneut umgeformt. Wird hier die vorher beschriebene Beurteilung durchgeführt und die aus beiden Umformstufen akkumulierten Dehnungen aufgetragen, wird ein Versagen der Kante prognostiziert. Dies widerspricht den Erfahrungen aus dem realen Herstellungsprozess.



**Abbildung 15: Beurteilung der Herstellbarkeit eines umgeformten, beschnittenen und erneut umgeformten Bereichs (Prognose 1)**

Dieses scheinbare Fehlurteil aus Prognose 1 könnte vermieden werden, wenn im Postprocessing nur der Dehnpfad seit der Beschnittoperation angezeigt würde. Abbildung 16 zeigt die entsprechende Darstellung der zweiten Prognose. Diesem Vorgehen liegt jedoch die Annahme zugrunde, dass die Vordehnungen keinen Einfluss auf das Formänderungsvermögen einer Scherschnittkante haben. Diese optimistische Annahme erscheint ebenso unwahrscheinlich wie die vorherige Prognose. Wie groß die durch Vorverformungen (vor dem Schneidprozess) vorliegenden Vorschädigungen sind und wie sich diese auf das Formänderungsvermögen einer Schnittkante auswirken, muss zukünftig noch ermittelt werden. Denkbar wäre eine Versuchsvariante der beiden bereits vorgestellten Kantenrisstests mit entsprechend vorgereckten Proben. Aktuell stellen die beiden getätigten Annahmen bzw. Prognosen die möglichen Grenzen hierfür dar.





**Abbildung 16: Beurteilung der Herstellbarkeit eines umgeformten, beschnittenen und erneut umgeformten Bereichs durch Betrachtung der Dehnung seit Beschnitt (Prognose 2)**

## 6 Zusammenfassung

Bei der Herstellung komplexer Fahrwerksbauteile hat sich in der täglichen Praxis gezeigt, dass durch Scherschneiden hergestellte Blechkanten gegenüber dem Ausgangswerkstoff ein erheblich reduziertes Umformvermögen aufweisen und diese Bereiche bei nachfolgenden Umformungen zu erhöhter Rissbildung neigen. Eine konkrete Vorhersage der Kantenrissempfindlichkeit war bisher mit der Umformsimulations-Software PAM-STAMP nicht möglich.

Ziel war es daher, ein Testverfahren zu identifizieren, das sowohl die Kantenrissempfindlichkeit bewerten kann und zugleich Eingangsgrößen mit geringer Streuung für die Umformsimulation liefert. Die „Lochaufweitung mit Nakajima-Stempel“ und der „Kobe-Lochzugversuch“ erfüllen diese Anforderungen. Beide Verfahren haben gemein, dass die Auswertung mittels optischer Messtechnik erfolgen kann und somit eine detaillierte Dehnungsanalyse für den kantennahen Bereich möglich ist. Es werden Hauptformänderungen kurz vor Risseintritt ermittelt, die als zusätzliche Information in das bestehende Grenzformänderungsdiagramm übernommen werden.

In den experimentellen Versuchen konnte gezeigt werden, dass beide Verfahren zu vergleichbaren und wiederholbaren Hauptformänderungswerten führen. Entsprechende Simulationsmodelle der beiden

Kantenrisstests wurden aufgebaut und hinsichtlich der Dehnungsverteilung mit den Dehnungsmessungen aus dem Experiment abgeglichen.

Auf Basis der ermittelten Kennwerte und des definierten Vorgehens wurde die Herstellbarkeit eines Querlenkers überprüft. Für alle Bauteilkanten, die vor dem Scherschneidprozess nicht signifikant umgeformt wurden und sich im Bereich des einachsigen Zuges bewegen, wie z.B. im Fall des klassischen Kragenziehens, bietet das geschilderte Vorgehen verlässliche Prognosen. Weitere Forschungsarbeit ist aber notwendig, wenn von diesem beschriebenen Dehnpfad abgewichen wird oder mehrstufige Umformprozesse zu nicht linearen Dehnpfaden führen.

## Literaturverzeichnis

- [BEH15] Behrens, B.; Vucetic, M.; Peshekhodov, I.; Schneider, M.: Numerische Beschreibung der Schädigung beim Scherschneiden und des verbleibenden Restumformvermögens für Dualphasenstähle mithilfe der Multiskalensimulation. Abschlussbericht, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V (FOSTA), 2015
- [BRA11] Braun, M. et. al.: Ergebnisse eines europäischen Ringversuchs zum Lochaufweitversuch nach ISO 16630. In: Tagungsband Werkstoffprüfung, Berlin; Deutschland, 2011
- [BRA13] Braun, M.: Vortrag bei Umformen im Karosseriebau: Determination of edge cracking sensitivity – Estimation of Reduced Formability of Sheet Steel Edges Produced by Shearing Using Different Test Methods, Bad Nauheim, Deutschland, 2013
- [BUC07] Buchmayer, B.: Innovative Beiträge der Umformtechnik zum Leichtbau von Kraftfahrzeugen. BHM, 152. Jahrgang, 2007
- [FRI08] Friebe, H.; Galanulis, K.; Schneider, M.: Validation and optimisation of numerical simulation by optical measurement of tools and parts. Conference, International Deep Drawing Research Group (Hrsg.): Olofström, Schweden, 2008
- [GLÄ14] Gläsner, T.; Sunderkötter, C.; Plath, A.; Bednarz, M.; Volk, W.; Hoffmann, H.; Golle, R.: Methods to decrease cut edge sensitivity of high strength steels. In: ESAFORM 2014, Espoo, Finland, 2014
- [GLÄ15] Gläsner, T.; Imat, V.; Theiß, M.; Volk, W.; Hoffmann, H.; Golle, R.: Erhöhung der Vorhersagegenauigkeit in der Umformsimulation durch eine optimierte Vernetzungsstrategie. UTF Science I/2015, Verlag Meisenbach GmbH, Bamberg
- [NN09] N.N.: International Standard ISO 16630, Metallic Materials – Sheet and Strip – Hole Expanding Test, 2009
- [NN09] N.N.: DIN EN ISO 12004-2: Metallische Werkstoffe – Bleche und Bänder – Bestimmung der Grenzformänderungskurve - Teil 2: Bestimmung von Grenzformänderungskurven im Labor, 2009
- [SCH11] Schneider, M.; Eggers, U.: Investigation on punched edge formability. In: International Deep Drawing Research Group 2011, Bilbao, 2011
- [SCH12] Schneider, M.: Bewertungsmöglichkeiten für das Restumformvermögen einer durch Scherschneiden vorgeschädigten Blechkante, EFB 2012, Bad Boll, Deutschland, 2012

[WAT06] Watanabe, K.; et. al.: Simple Prediction Method for the Edge Fracture of Steel Sheet During Vehicle Collision – Evaluation of Fracture Limit from the Edge Using Small-Sized Test Pieces, 5. LS-Dyna Anwenderforum, Ulm, Deutschland, 2006

**Adressen und Ansprechpartner:**

- Thorsten Gläsner, Volkswagen AG, Komponenten-Werkzeugbau, Brieffach 013/3380, Gifhorner Straße 180, 38112 Braunschweig
- Volkan Imat, ESI Group, Siemensstraße 12 B, 63263 Neu-Isenburg
- Matthias Schneider, Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Engineering und Simulation, Eisenhüttenstraße 99, 38239 Salzgitter
- Dr.-Ing. Christina Sunderkötter, Volkswagen AG, Konzernforschung, 38436 Wolfsburg
- Martin Theiss, ESI Group, Siemensstraße 12 B, 63263 Neu-Isenburg
- Sebastian Westhäuser, Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Umformtechnik, Eisenhüttenstraße 99, 38239 Salzgitter