

# Erhöhung der Vorhersagegenauigkeit in der Umformsimulation durch eine optimierte Vernetzungsstrategie

Im Volkswagen Komponenten-Werkzeugbau in Braunschweig werden Simulationsrechnungen in den verschiedenen Phasen des Werkzeugentstehungsprozesses genutzt, um wertvolle Aussagen über die Herstellbarkeit von Fahrwerksbauteilen wie zum Beispiel Querlenkern zu liefern. In der täglichen Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass vor allem an schergeschnittenen Kanten die Vorhersagegenauigkeit der Simulationsrechnungen nur unzureichend genau ist. In enger Zusammenarbeit mit dem Softwarehersteller ESI Group ist es gelungen, durch eine neue, optimierte Vernetzungsstrategie diese Herausforderung zu lösen und somit den sehr hohen Qualitätsansprüchen im Komponenten-Werkzeugbau zu entsprechen.

Dipl.-Wirt.-Ing. Thorsten Gläsner, Volkswagen AG, Komponenten-Werkzeugbau, Braunschweig  
Dipl.-Ing. Volkan Imat, ESI Engineering System International GmbH, Neu-Isenburg  
Dipl.-Ing. (FH) Martin Theiß, ESI Engineering System International GmbH, Neu-Isenburg  
Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg), TU München  
Prof. i.R. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg), TU München  
Dr.-Ing. Roland Golle, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg), TU München

## 1. Einleitung

Im modernen Werkzeugbau liefern Simulationsrechnungen belastbare Aussagen über die Herstellbarkeit von Bauteilen. Eine der grundlegendsten Möglichkeiten zur Bestimmung der Verfahrensgrenzen bei der Umformung von Blechwerkstoffen bietet das Grenzformänderungsschaubild (Forming Limit Diagramm, FLD) [u.a. LANG90]. Wird in der Simulation die Grenzformänderungskurve (Forming Limit Curve, FLC) überschritten, so wird davon ausgegangen, dass auch in der Praxis ein Versagen des Stahlwerkstoffes auftritt [LANG90, DOEG06]. Da aus produktionstechnischen und herstellerabhängigen Gründen die Qualität und damit die mechanischen Eigenschaften eines Stahls schwanken können, wurde bei Volkswagen ein Sicherheitsbereich definiert. Dieser umfasst den Bereich 20 % unterhalb der eigentlichen Versagenslinie. Zusätzlich gewinnt der Bereich an Bedeutung, da das Simulationsmodell durch die Vereinfachung eine gewisse Unschärfe beinhaltet. Die FLC des verwendeten Blechwerkstoffes ist somit ein wichtiger Materialkennwert für die Umformsimulation. Die Auswertung der Simulation entscheidet in der Konzeptentwicklungsphase des Werkzeugentstehungsprozesses über die Herstellbarkeit eines Bauteils, sie dient als Entscheidungsgrundlage. Hierbei hat sich jedoch gezeigt, dass vor allem an zuvor schergeschnittenen Kanten die Auswertung des FLDs im Praxisabgleich deutliche Abweichungen aufweist.

## 2. Stand der Technik

### FEM-Simulation

In der Blechumformung kann die Finite-Elemente-Methode dazu verwendet werden, um Vorhersagen über mögliche Ausdünnungen und Risse in der Struktur des Bauteils zu bestimmen. Die Problemstellungen werden gelöst, indem eine komplexe Struktur durch ein diskretisiertes System (Modell) ersetzt wird. Nach der VDI 3633 ist ein Modell eine vereinfachte Nachbildung eines existierenden oder gedachten Systems. Zur Diskretisierung dienen hier sogenannte finite Elemente, welche über Knoten miteinander verbunden sind. Dabei sind die Knotenverschiebungen die eigentlichen Unbekannten des Problems, welche anhand eines Gleichungssystems berechnet werden können. Für eine detailliertere Erläuterung sei auf die entsprechende Literatur verwiesen [u.a. BATH82, RIEG03, KLEI12].

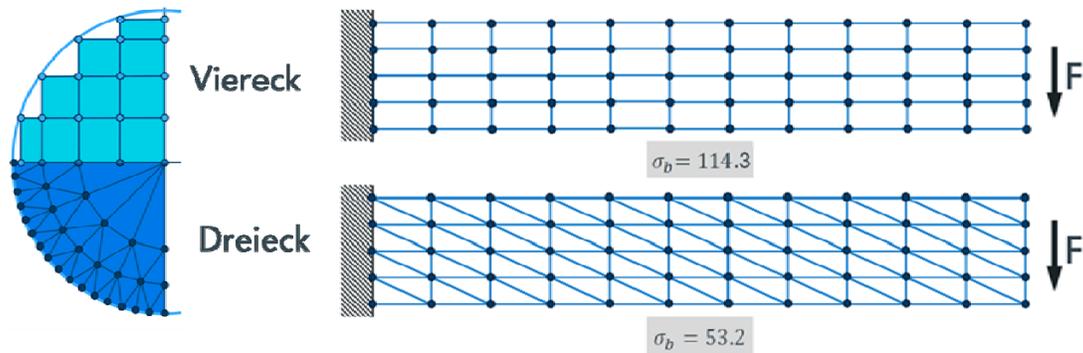
Ein betrachteter Körper wird in der Simulation mit einer endlichen Anzahl von geeigneten Strukturelementen (Polygonen) approximiert, die in Knotenpunkten miteinander in Verbindung stehen. Die Auswahl der Elementtypen ist grundsätzlich beliebig, solange sie sich geometrisch beschreiben lassen. Für die Beschreibung der Ebenen haben sich Dreiecke und Vierecke als vorteilhaft erwiesen. Für die Volumenbeschreibung werden räumliche Äquivalente wie Tetraeder oder Quader häufig eingesetzt [KLEI12].



Abbildung 1: Diskretisierungsstrategie an einer geschlossenen Schnittlinie

Um die Modellgröße möglichst gering zu halten, wird die Struktur nur dort erhöht, wo es das zugrunde liegende Problem erfordert, wie z.B. an Schnittkanten (vgl. Abbildung 1). Diese Diskretisierungsstrategie wird auch adaptive Vernetzung genannt [KLEI12]. Um einer nicht gradlinigen Schnittgeometrie folgen zu können, sind Simulationsprogramme auf die Nutzung von Dreieckselementen (trianguläre Elemente) angewiesen. Dreieckselemente haben generell den Vorteil, dass sie bei der geometrischen Flächenannäherung hinsichtlich Änderung der Netzfeinheit und Anpassung an gebogenen Kanten flexibler sind [KRES04].

In der Umformsimulation neigen diese triangulären Elemente jedoch an Umformkanten, die starken Beanspruchungen ausgesetzt sind, aufgrund ihrer Ansatzfunktion zu einem abweichenden Verhalten im Vergleich zu den Viereckselementen. Dies kann zu ungenauen Ergebnissen führen. Kress [KRES04] begründet in seiner Arbeit diesen Unterschied in der Ansatzfunktion des Dreieckselements. Er hat anhand eines Kragbalken-Beispiels festgestellt, dass Drei- und Viereckelemente im Hinblick auf Biegung unterschiedliche Ergebnisse liefern (vgl. Abbildung 2) [KRES04].



**Abbildung 2: Vernetzungsmöglichkeiten einer radialen Geometrie und die maximalen Biegespannung eines Balkenproblems [KRES04]**

Bedingt durch die Ansatzfunktionen, die durch das zusammenschieben zweier Knoten aus den Ansatzfunktionen des Viereckelementes hergeleitet werden kann, sind die Ableitungen der Ansatzfunktionen beim linearen Dreieckselement konstant. Während Momente auch übertragen werden, kann die Biegung im Element selbst nicht korrekt (sondern nur konstant) dargestellt werden [KRES04, MATH08].

Kress hat zusätzlich mit den beiden Elementtypen ein einfachstes Deformationsmuster nachgebildet. Für einen besseren Vergleich zwischen den beiden Arten werden zwei Dreiecke zu einem Quadrat selber Größe zusammengesetzt. Während beide Elementtypen konstante Dehnungszustände perfekt abbilden und sie somit den grundlegenden Anforderungen an die Ansatzfunktionen entsprechen (wird von allen mindestens linearen Elementen erfüllt), liefert die Modellierung mit triangulären Elementen eine um mehrere Faktoren höhere Biegesteifigkeit [KRES04, MATH08]. Während *Mathiak* eine Verfeinerung dieser kritischen Bereiche empfiehlt, spricht sich *Kress* im Fazit seiner Untersuchungen gegen den Einsatz von linearen Dreieckselementen in der FEM aus [MATH08, KRES04].

### Kragenziehen

Das Kragenziehen ist nach *DIN 8584* dem Zugdruckumformen zugeordnet und ist definiert als das Aufstellen von geschlossenen Rändern (Kragen) an ausgeschnittenen Öffnungen mit Stempel und Ziehring. Gebräuchliche Varianten des Kragenziehens sind in der *VDI-Richtlinie 3359* aufgeführt. Für die vorliegende Arbeit ist das Kragenziehen runder Kragen in ebenen Blechen relevant.

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 Schwächung der Blechdicke. Die Formänderungen in radialer Richtung sind dagegen gering, so dass die Länge des freien Biegeschenkels in etwa erhalten bleibt. Der Prozess ist beendet, wenn die Stempelkante den Vorlochrand passiert hat und der Biegeschenkel am zylindrischen Teil des Stempels anliegt. In der Praxis wird in der Regel ein Niederhalter eingesetzt, der ein Nachfließen von Werkstoff aus dem Flanschbereich verhindert [HENT02, LANG90].

Die Verfahrensgrenze beim Kragenziehen ist durch radiale Risse am Kragenrand gekennzeichnet, die zur Unbrauchbarkeit des Werkstücks führen. Zu einem Riss kommt es, wenn die infolge des Aufweitvorgangs am Kragenrand herrschenden tangentialen Zugspannungen die Zugfestigkeit des Werkstoffs überschreiten. Die Rissbildung wird im Allgemeinen durch vorher entstehende Einschnürungen eingeleitet, die aufgrund der damit verbundenen partiellen Wandschwächung, je nach Zweckbestimmung des Kragens, ebenfalls als Versagensfall zu betrachten sind [SCHL88, OTTO03].

Eine charakteristische Kenngröße zur Beschreibung der Verfahrensgrenze ist das maximal erreichbare Aufweitverhältnis  $V_{A,max}$ . Diese Größe ist definiert als Quotient aus dem Stempeldurchmesser  $d_{ST}$  und dem Vorlochdurchmesser  $d_0$ , bei dem gerade noch keine Rissbildung auftritt. Das maximal erreichbare Aufweitverhältnis ist abhängig vom Werkstoff, der Stempelgeometrie und vom bezogenen Vorlochdurchmesser  $d_0/s$ , vor allem aber von der Herstellungsart des Vorlochs sowie dem damit verbundenen Zustand des Vorlochrandes [OTTO03, LANG90, SCHL88].

### 3. Motivation

Im Werkzeugentstehungsprozess von Querlenkern auf Basis des Modularen Querbaukastens (MQB) zeigte die Umformsimulation mit der Software *PAM-STAMP (PM2G)* in der Simulation speziell an gezogenen Krägen in der Auswertung des FLDs einige besonders kritische Bereiche, die deutlich im Versagensbereich lagen. Die aus der Simulation gezogenen Schlüsse weichen von der Realität ab. Dies führt in einer Machbarkeitsanalyse zu einer n.i.O.-Beurteilung (nicht in Ordnung) des Querlenkers seitens der Volkswagen AG. Eine Freigabe für die Herstellbarkeit des Bauteils kann auf dieser Datengrundlage nicht erteilt werden (vgl. Abbildung 3).

Aus diesem Grund ist zunächst eine Analyse des umformtechnischen Vorgangs in Praxisversuchen erforderlich. Jedoch gestaltet sich die Betrachtung des gesamten Querlenkers als sehr (zeit-)aufwendig und kostenintensiv. Denn für eine komplette Abbildung des Prozesses müssen alle (auch unnötige) Umformstufen simuliert werden und Faktoren, wie z.B. die in der Realität auftretende Durchbiegung des Pressentisches, berücksichtigt werden. Deshalb sind die im rechten Bild der Abbildung 3 markierten zwei umformkritischen Durchstellbereiche im Fokus der Untersuchungen dieser Arbeit.

Aus dieser Tatsache heraus werden sowohl bereits die experimentellen als auch die simulativen Versuche auf den durchzustellenden Bereich des Querlenkers reduziert. Alle anderen Beschnitt- und Umformvorgänge werden nicht betrachtet. Die Grundlagenuntersuchungen führen modellhaft zu einer trivialen Geometrie, trotzdem bilden sie den geforderten Teilbereich mit identischen Abmaßen vom Querlenker genau ab.

Das Werkzeug wurde speziell für Untersuchungsansätze hinsichtlich Krageziehen und Scherschneidoptimierungen gemeinsam von dem Volkswagen Komponenten-Werkzeugbau in Kooperation mit der Volkswagen Konzernforschung und dem Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg) der Technischen Universität München entwickelt.

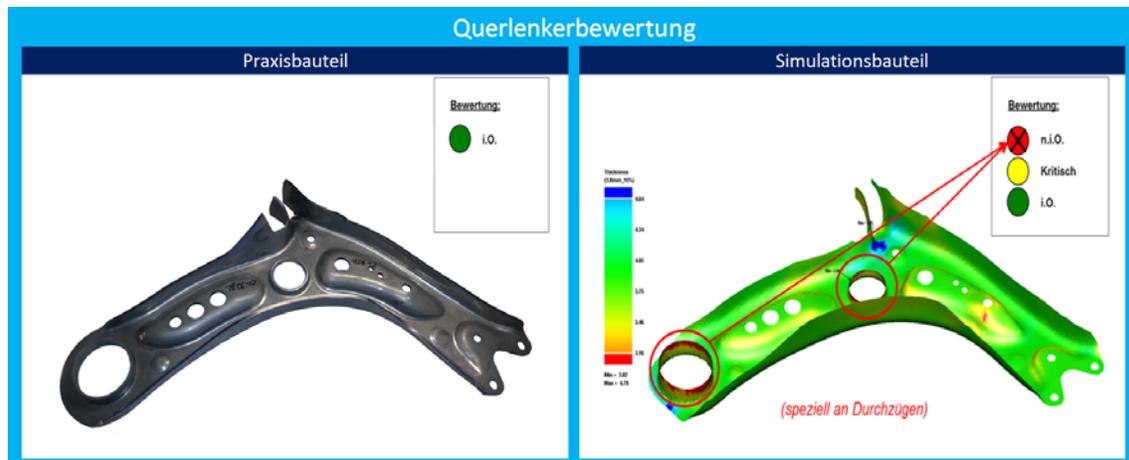


Abbildung 3: Machbarkeitsanalyse im Vergleich mit Praxisbauteil

Das erlangte Wissen soll speziell in der Methodenplanung dazu genutzt werden, die Simulation zu verifizieren und zu optimieren. Damit soll zukünftig eine verbesserte Vorhersagegenauigkeit

bezüglich der Herstellbarkeit getroffen werden. Gleichzeitig wird eine verlässliche Datenbasis geschaffen, die die Bewertungsgrundlage für andere Simulationsprogramme bilden kann.

#### 4. Versuchseinrichtungen und -werkstoffe

##### Versuchswerkzeug

Mithilfe eines vorhandenen Versuchswerkzeugs wurden die experimentellen Versuche durchgeführt, die den Teilbereich eines Serienprozesses bei der Umformung hochfester Stähle nachbildet. Das Werkzeug kann in zwei Ausführungen genutzt werden. In der ersten Konfiguration kann gestanzt und in der zweiten Konfiguration der Kragen gezogen werden (vgl. Abbildung 4).

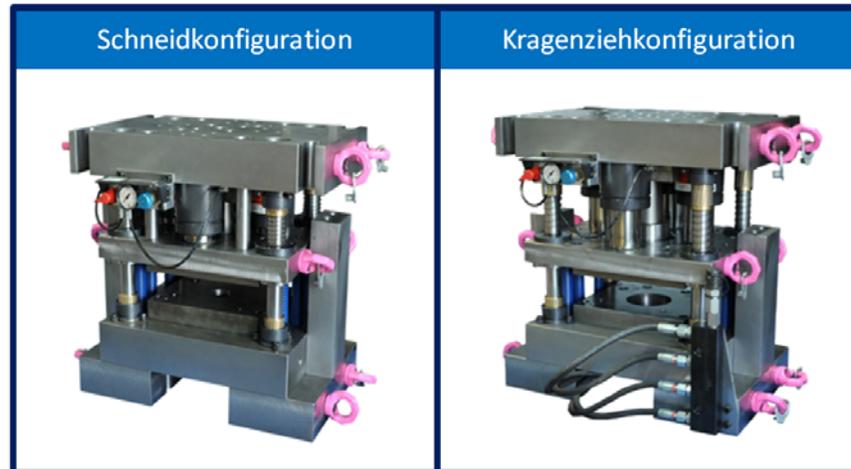


Abbildung 4: Versuchswerkzeug (Schneid- und Kragenziehkonfiguration)

Beim Stanzen ermöglichen die auswechselbaren Aktivelemente Matrize und Stempel ein einfaches Umrüsten auf die gewünschten Schneidgrößen. Ein modularer Aufbau ermöglicht einen einfachen Umbau des Werkzeuges auf das Kragenziehen. Durch einen Austausch weniger Module kann das Werkzeug somit in kurzer Zeit von einer Schneidkonfiguration auf eine Kragenziehkonfiguration umgebaut werden.

##### Versuchswerkstoff

Der verwendete Versuchswerkstoff ist ein hochfester Stahl. Er ist in der [EN10346] unter der Bezeichnung HDT780C (Werkstoffnummer 1.0957) sowie in der [VW50600] unter der Bezeichnung HD680C genormt. Bei der Salzgitter Flachstahl GmbH wird der Blechwerkstoff als SZBS800 gekennzeichnet. Es handelt sich dabei um ein mikrolegiertes und thermomechanisch gewalztes Mehrphasenstahlblech mit einer Stärke von 3,5 mm. Wegen der homogenen, feinkörnigen Mikrostruktur besitzt der SZBS800, bezogen auf die hohe Festigkeit, gute Kaltumformeigenschaften. Die mechanischen Eigenschaften sind in der nachfolgenden Tabelle 1 aufgelistet:

Tabelle 1: Kennwerte für Zugversuche von Querproben [SALZ12]

Mechanische Eigenschaften	
Streckgrenze $R_{eH}$	$\geq 680$ MPa
Zugfestigkeit $R_m$	800 – 980 MPa
Bruchdehnung $A_G$	$\geq 12$ %

Damit bei der Stahlherstellung immer die gleichen Anforderungen an den Stahl erfüllt werden, muss die in der Norm angegebene Zusammensetzung, innerhalb vorgegebener Toleranzen, eingehalten werden. Die chemische Zusammensetzung des Werkstoffes wird in der Tabelle 2 aufgeführt.

**Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung [SALZ12]**

Chemisches Zeichen	C	Si	Mn	P	S	Al	B
in Gewichtsprozent	0,11 %	0,5 %	2 %	0,02 %	0,01 %	0,015 %	0,004 %

## 5. Ergebnisse

### Experimentelle Ergebnisse

Im Mittelpunkt der experimentellen Grundlagenuntersuchung stand das Kragenziehen runder Löcher. Diese werden in die Versuchsplatinen durch ein Stanzverfahren mit einem festen Anfangsdurchmesser ( $\varnothing$  50 mm) vorpräpariert, danach werden verschieden große Kragen mit einem Aufstellwinkel von  $90^\circ$  zur Blechebene gezogen.

Für eine bessere Übersicht der erzielten Ergebnisse werden in den folgenden Abbildungen nur einige, bestimmte Aufweitungen gezeigt und diskutiert. Um trotzdem signifikante Unterschiede darstellen zu können, findet eine sinnvolle Abstufung in 25 %-Schritten statt. Es werden die minimalen (35 %), mittleren (60 %) und maximalen (85 %) Aufweitungen abgeglichen (vgl. Abbildung 5).



**Abbildung 5: Umformergebnisse nach unterschiedlichen Aufweitungen**

Aus den experimentellen Ergebnissen ist zu entnehmen, dass das Bauteil bei einer Aufweitung von 35 % optisch keine Schädigung vorweist. Bereits bei einer Aufweitung von 60 % sieht man jedoch sichtliche Riss- und Einschnürungserscheinungen, die Folge höherer tangentialer Spannungen. Diese führen zu einer gesteigerten Blechdickenabnahme an der Schnittkante. Mit zunehmender Aufweitung (85 %) und damit höherer Umformgrade schreitet die Rissentwicklung fort. Das Bauteil gibt quer zur und entlang der Walzrichtung stark nach, dadurch breiten sich die Risse weiter aus.

### Simulative Ergebnisse

Analog zu der experimentellen Versuchsdurchführung wurde simulativ ein schergeschnittenes Loch ( $\varnothing$  = 50 mm) mit einem konischen Stempel aufgeweitet ( $\lambda$  = 35 %) [DIN8584]. In Abbildung 6 ist die Formänderungsanalyse für den gezogenen Kragen mit einem Aufweitverhältnis von dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass der Spannungszustand des Kragens im Bereich einer uniaxialen Zugbeanspruchung liegt. Die Analyse zeigt neben einigen umformkritischen Elementen im Sicherheitsbereich (gelbe Punkte) auch einige Elemente, die deutlich im Versagensbereich (rote Punkte) liegen und somit zu deutlichen Rissen in Realbauteilen führen müssen (vgl. Abbildung 6). Beim Abgleich mit real gezogenen Kragen wird deutlich, dass es dort jedoch zu keinen Anrissen kommt.

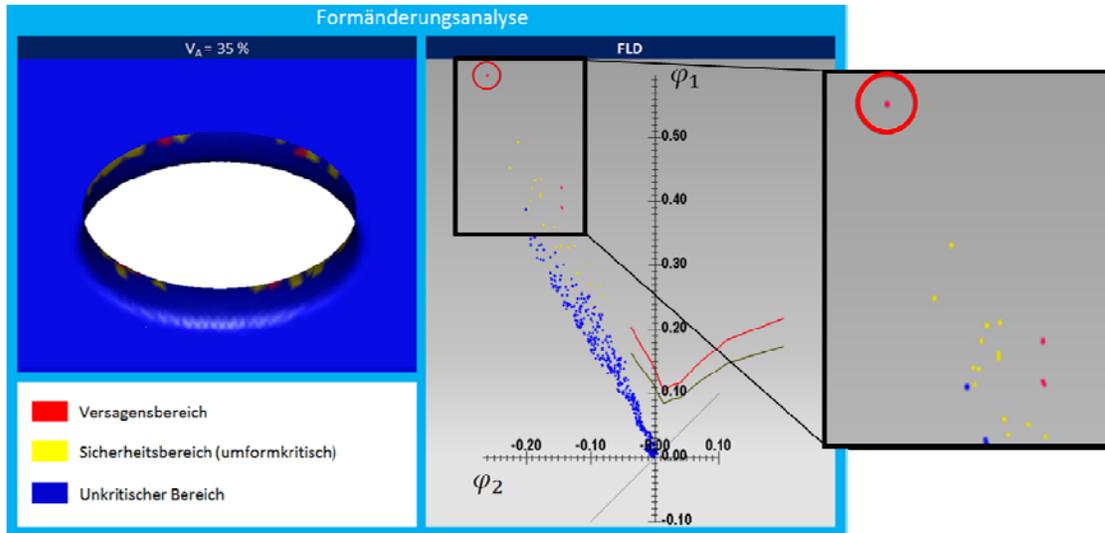


Abbildung 6: Formänderungsanalyse nach dem Kragenziehen mit einem Aufweitverhältnis von  $\lambda = 35 \%$

Eine detaillierte Auswertung der Simulationsergebnisse zeigt, dass sich zwei Elemente besonders stark von dem grundsätzlichen Umformergebnis unterscheiden. Im Vergleich zu den restlichen Punkten weisen diese beiden Elemente (vgl. Abbildung 6, rot umkreiste Elemente) sehr große Hauptformänderungswerte auf. Bei näherer Betrachtung dieser Elemente wird deutlich, dass es sich um trianguläre Elemente handelt (vgl. Abbildung 7). Die begrenzten Umformeigenschaften der Dreieckselemente (vgl. Kapitel 2) können der Grund für die großen Abweichungen Elemente sein.

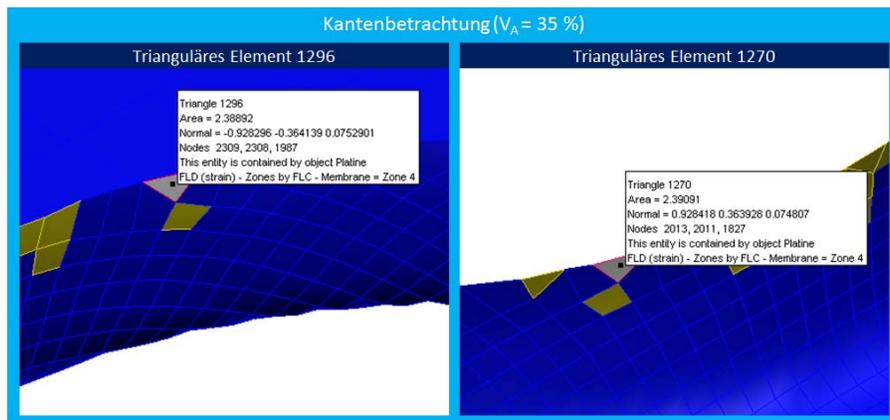


Abbildung 7: Trianguläre Elemente an der Schnittkante

Ein ähnliches Bild ist zu erkennen, wenn eine weitere Simulation betrachtet wird. Erwartungsgemäß fällt die Formänderung bei der dargestellten Simulation höher aus, da hier ebenfalls ein vorgestanztes Loch ( $\varnothing = 50 \text{ mm}$ ) mit einem konischen Stempel aufgeweitet wird. Hier jedoch wird ein Aufweitverhältnis von  $\lambda = 60 \%$  realisiert. Ein Großteil des umgeformten Kragens ist im umformkritischen Sicherheitsbereich und zahlreiche Elemente befinden sich im Versagensbereich. Zudem treten vermehrt Ausreißer auf. Diese Elemente haben eine wesentlich höhere Hauptformänderung im FLD, vgl. Abbildung 8.

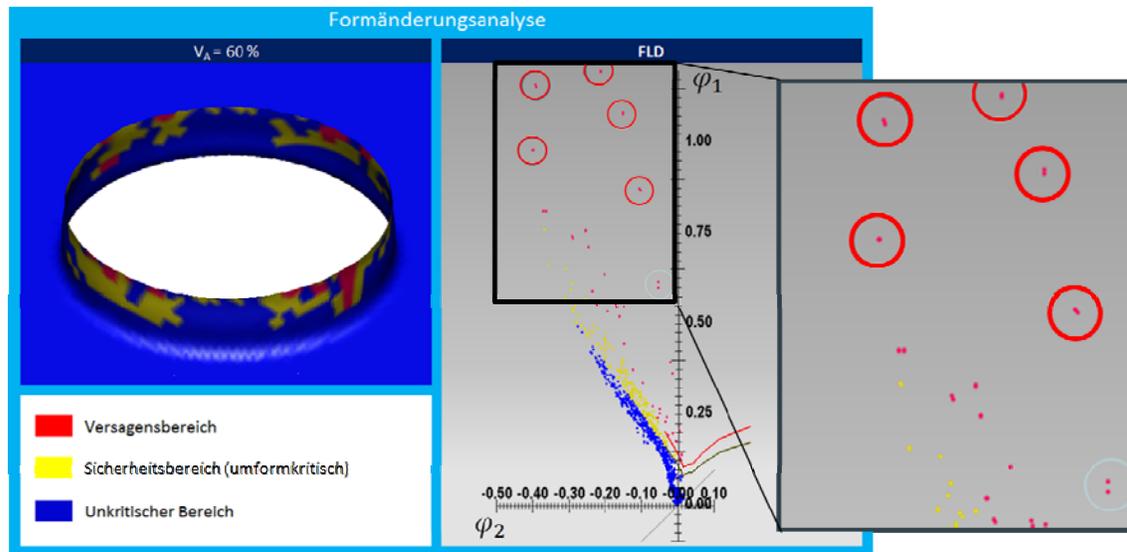


Abbildung 8: Formänderungsanalyse für  $\lambda = 60 \%$

### Optimierung der Simulation

Es konnte gezeigt werden, dass die Genauigkeit an der Schnittkante in der Simulationssoftware schwanken kann. Grund sind hierfür die angeführten triangulären Elemente. Diese werden innerhalb der Software beim Vernetzen der Platine generiert, um komplexere Geometrien, wie z.B. kreisrunde Schnittkanten, die durch Beschnittoperationen in der Platine entstanden sind, vernetzen zu können (vgl. Abbildung 9).

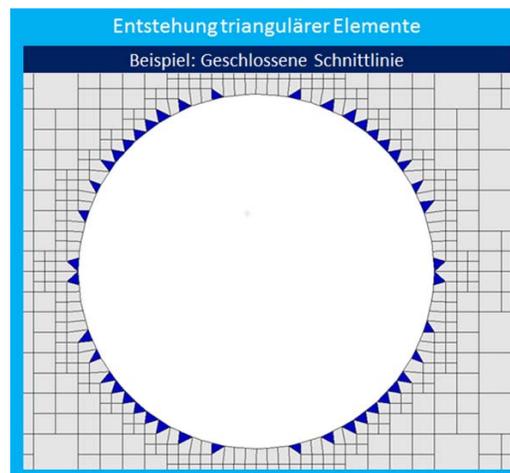


Abbildung 9: Entstehung triangulärer Elemente nach einer Beschnittoperation

Vor diesem Hintergrund werden im folgenden Kapitel die Belastungen am triangulären Element untersucht und mit einem Viereck verglichen. Es sollen genaue Erkenntnisse über den auftretenden Umformeffekt gewonnen und eine neue Vernetzungsstrategie entwickelt werden.

### Gegenüberstellung der Elementvarianten

In den Simulationsergebnissen wurde gezeigt, dass die Umformung an dreieckigen Elementen ungenauer abgebildet wird als bei Vierecken. Für einen direkten Vergleich werden beide Elementvarianten, das kritische Dreieckselement und ein Nachbarelement, gegenübergestellt (vgl. Abbildung 10).

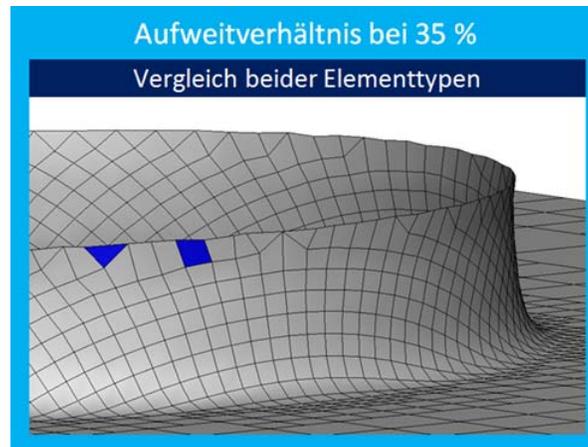


Abbildung 10: Ausgesuchte Elementtypen längs zur Walzrichtung

Die Spannungen und Dehnungen, die bei  $\lambda = 35\%$  an der Schnittkante längs zur Walzrichtung durch Umformungen entstehen, werden für die Elemente ermittelt. Es lassen sich folgende Werte für die Spannungen beider Netzelemente darstellen (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3 Spannungen im Drei- und Viereckselement

Elementtyp	Belastungsart	Belastungsbereich am Element		
		Innen	Mitte	Außen
Dreieck	Hauptspannung ( $\sigma_1$ )	0,96	0,97	0,93
	Nebenspannung ( $\sigma_2$ )	0,20	0,20	0,17
Viereck	Hauptspannung ( $\sigma_1$ )	1,02	1,07	1,07
	Nebenspannung ( $\sigma_2$ )	0,09	0,03	-0,05

Die Spannungen unterscheiden sich nur gering und können nicht der Grund für die Abweichungen in der Simulation sein. Anders sieht es hingegen aus, wenn die Dehnungen miteinander verglichen werden (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Dehnungen in den einzelnen Elementen

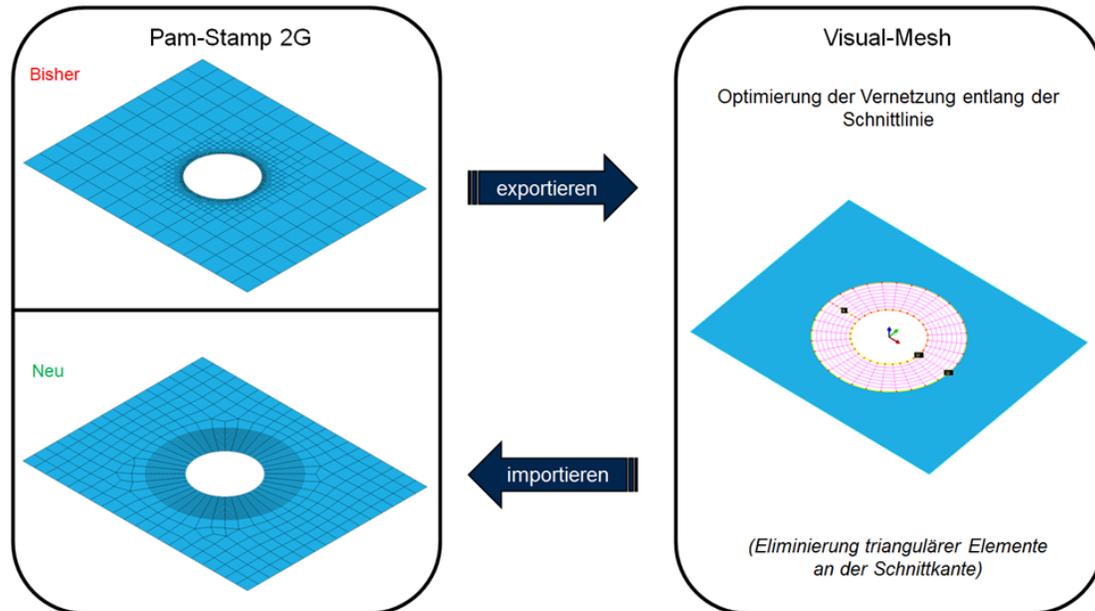
Elementtyp	Belastungsart	Belastungsbereich am Element		
		Innen	Mitte	Außen
Dreieck	Hauptdehnung ( $\epsilon_1$ )	0,69	0,82	0,95
	Nebendehnung ( $\epsilon_2$ )	-0,19	-0,23	-0,27
Viereck	Hauptdehnung ( $\epsilon_1$ )	0,44	0,54	0,65
	Nebendehnung ( $\epsilon_2$ )	-0,13	-0,17	-0,21

Aus den Simulationsergebnissen größerer Aufweitungen geht hervor, dass die größte Ausdünnung (Indiz für hohe Dehnungen) genau längs zur Walzrichtung passiert. Also müsste eigentlich das Viereckselement, das näher zur Walzrichtung liegt, auch höhere Dehnungen aufweisen. Es zeichnet sich jedoch ein anderes Bild ab. Die Dreiecke sind laut der Simulation wesentlich höheren Hauptdehnungen ausgesetzt. Dies führt tendenziell dazu, dass Bauteile eher versagen, als es in der Praxis der Fall ist. Die Begründung liegt in der eingeschränkten mathematischen Beschreibung der Dreiecke.

### Neue Vernetzungsstrategie

In diesem Abschnitt soll eine neue Vernetzungsstrategie dargestellt werden, die darauf abzielt, bei einer Vernetzung trianguläre Elemente an Schnittlinien zu vermeiden. Folglich gilt es für die Versuchsplatten, Dreiecke entlang des kreisrunden Beschnitts zu vermeiden. Es findet daher eine Optimierung der Vernetzung in diesem Bereich statt. Sie hat das Ziel, durch gezielte Veränderungen die Entstehung von triangulären Elementen zu verhindern. Aber ein Löschen der Dreiecke aus dem Platinennetz ist grundsätzlich nicht möglich, da die (Beschnitt-) Geometrie die

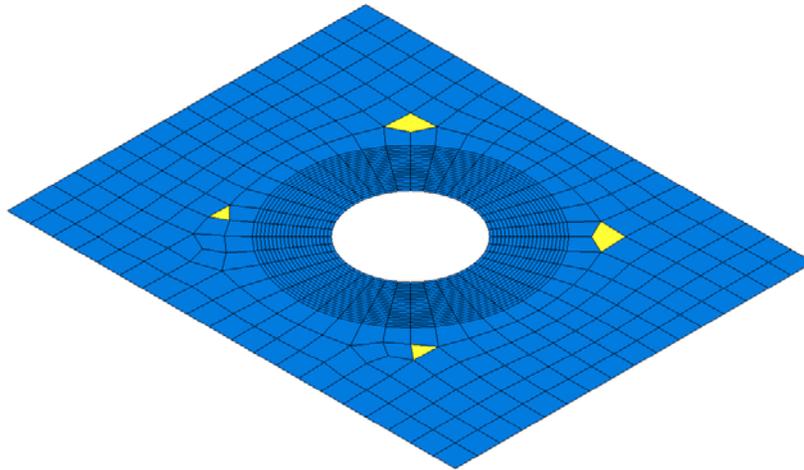
Nutzung von dreieckigen Formen für eine Vernetzung notwendig macht. Deshalb wird das Netz so editiert, dass Dreieckselemente in einen für die Umformung unkritischen Bereich verschoben werden.



**Abbildung 11: Plakative Darstellung der Vorgehensweise für eine Netzoptimierung**

Das Simulationsprogramm *PM2G* bietet keine Editierfunktion für das Netz, deswegen wird die Netzoptimierung mithilfe der ESI Software *Visual-Mesh (VM)* umgesetzt. Um ein Verständnis für die generelle Vorgehensweise zu schaffen, wird die Optimierung beispielhaft in Abbildung 11 gezeigt und in den nächsten Abschnitten allgemein erklärt.

Um das ursprüngliche Netz verändern zu können, muss im ersten Schritt die vernetzte Platine über einen Export-Befehl aus *PM2G* rausgeschrieben werden. Die Exportierung erfolgt in eine für *VM* lesbare Datei. Dies geschieht hauptsächlich über so genannte Schnittstellenprotokolle (z.B. NASTRAN). Anschließend wird die rausgeschriebene Datei in *VM* eingelesen. Über entsprechende Tools kann das alte Netz der Platine verändert werden, um so mit der Neuvernetzung Dreiecke entlang des kreisrunden Beschnitts zu vermeiden. In Abbildung 12 ist die erfolgreiche Verschiebung der Dreiecke (gelb) erkennbar, sie befinden sich nun in einem Bereich, wo keine Umformungen stattfinden. Wenn die Neuvernetzung abgeschlossen ist, muss das optimierte Netz wieder rausgeschrieben werden. Daraufhin wird die Datei mit dem optimierten Netz in *PM2G* reimportiert. Dabei wird die Platine mit der neuen Vernetzung ausgetauscht, jedoch bleiben die Eigenschaften des Versuchsbleches davon unberührt. Damit ist die Optimierung in den Simulationsprozess integriert, und es kann eine (Nach-) Simulation gestartet werden.

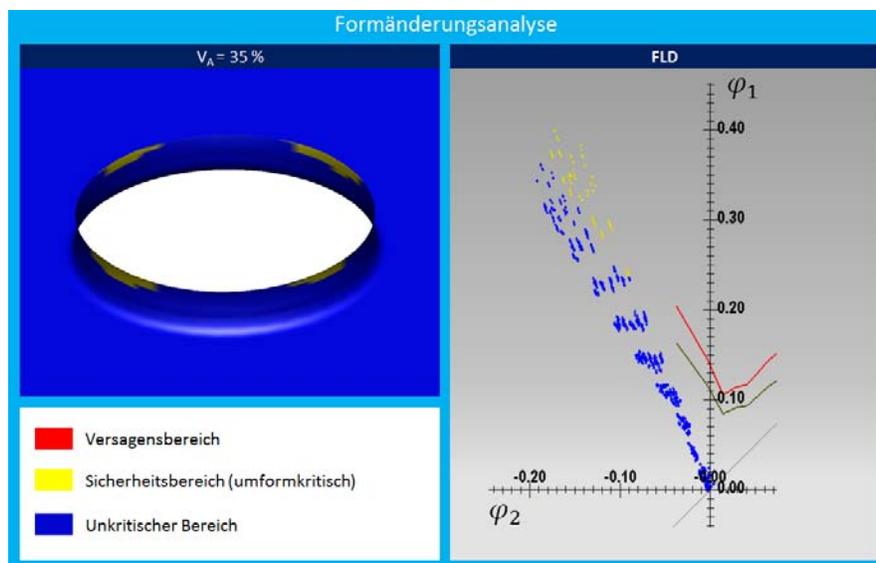


**Abbildung 12: Optimierung des Netzes: Dreiecke (gelb) von der Schnittkante verschoben**

Im Anwendungsbeispiel der Arbeit entstand ein „Radialnetz“. Es besteht aus mehreren Ringen, die ihren Fluchtpunkt in der Mitte des Loches haben. Die Größe der Elemente in der Radialvernetzung sind von  $VM$  an angrenzende Elemente angepasst worden. Da im Fokus der Untersuchungen nur die Vermeidung von Dreiecken an Schnittkanten steht, werden der Einsatz anderer Elementgrößen und deren Auswirkung auf die Simulation in dieser Arbeit nicht behandelt.

### Validierung der optimierten Vernetzungsstrategie

Die Simulationsergebnisse der Kragenziehprozesse mit den neuvernetzten Platinen werden nachfolgend mit den Ergebnissen aus den experimentellen Realversuchen verglichen. Die Analyse der Simulationsrechnung für das kleinste Aufweitverhältnis ( $\lambda = 35\%$ ) legt dar, dass kein Versagen im Bauteil auftritt. Während in der alten Vernetzung an einzelnen Elementen, überwiegend bestehend aus Dreiecken, in der Simulation ein Versagen vorhergesagt wird, befinden sich alle Elemente der neuen Vernetzung unterhalb der Versagenslinie (vgl. Abbildung 13). Lediglich längs und quer zur Walzrichtung ( $r$ -Wert) befinden sich einige Elemente im Sicherheitsbereich und können als umformkritisch angesehen werden.



**Abbildung 13: Formänderungsanalyse nach einer optimierten Vernetzung,  $\lambda = 35\%$**

Im Vergleich mit einem Praxisbauteil beweist sich die neue Vernetzung als die bessere Vorhersage. In fast allen Versuchsproben mit  $\lambda = 35\%$  wurden einwandfreie Krüge gezogen, nur in wenigen Platinen waren Einschnürungen zu sehen. Das hängt damit zusammen, dass auch in der Realität Abweichungen im Umformergebnis (z.B. durch Gefügeunterschiede oder Werkzeugverschleiß) auftreten. Die vielen Einflussfaktoren auf das Umformergebnis in der Realität, begründen daher die Verwendung eines Sicherheitsbereiches von 20% in der Simulation. Ein entscheidender Punkt, der für die neue Vernetzungsstrategie spricht, ist die bessere Aussagegenauigkeit von Rissen. Während die vorherige Vernetzung Risse verteilt an mehreren Stellen der Schnittkante offenbart, konzentrieren sich die Risse in der jetzigen Vernetzung an der Schnittkante  $0^\circ$  und  $90^\circ$  zur Walzrichtung.

Die Formänderungsanalyse für  $\lambda = 60\%$  zeigt ähnliche Resultate (vgl. Abbildung 14). Es lässt sich beobachten, dass vor allem in der höchsten Aufweitung die Aussagequalitäten beider Vernetzungsvarianten stark auseinander gehen.

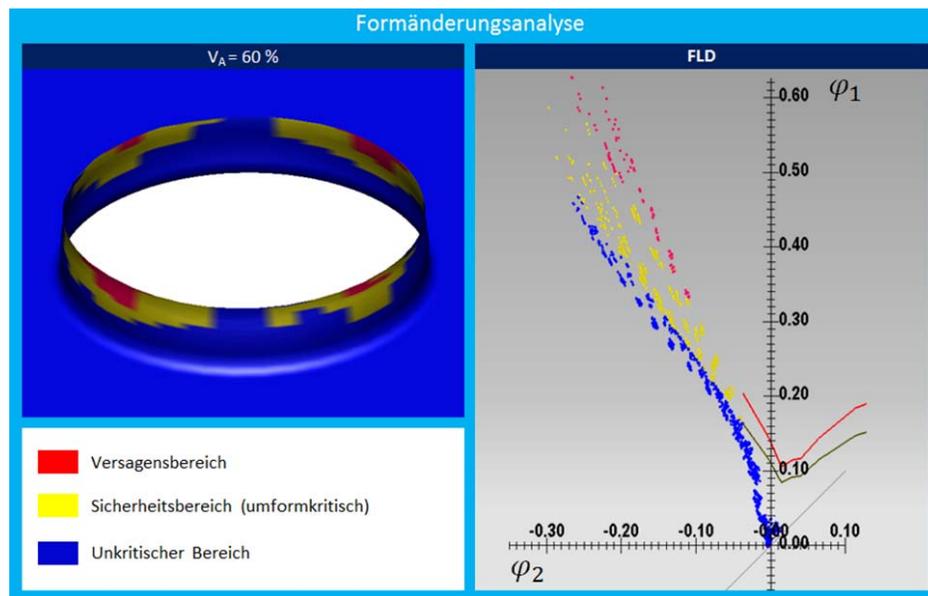


Abbildung 14: Formänderungsanalyse nach einer optimierten Vernetzung,  $\lambda = 60\%$

Die Risse werden in der neuen Vernetzung, trotz hoher Umformgrade, immer noch an den richtigen Orten angezeigt. In der alten Vernetzung wird eine scheinbar zufällige Streuung von Rissen im gesamten Krüge sichtbar, die in der Praxis nicht nachvollziehbar ist (vgl. Abbildung 15).



Abbildung 15: Praxisabgleich mit beiden Vernetzungsarten anhand der FLD

Alle drei Auswertungsmethoden zeigen, dass die neue Vernetzungsstrategie für geschlossene Schnitte eine höhere Aussagequalität erreicht. Entscheidend war die Vermeidung triangulärer Elemente an der Schnittkante, dadurch brachte die veränderte Vernetzung Umformungskräfte

gleichmäßiger in den Kragen ein und konnte genauere Simulationsergebnisse liefern. Ziel sollte es daher sein, die neue Vernetzungsstrategie auf das Serienbauteil, dem Querlenker, anzuwenden.

### Transfer der optimierten Vernetzungsstrategie in die Serie

Aus den voranstehenden Betrachtungen ließ sich die Problematik einer Vergleichbarkeit zwischen Simulation und Praxis feststellen. Hohe Berechnungsungenauigkeiten entstehen vor allem an stark umgeformten Schnittkanten des Querlenkers und führen zu problematischen Prozessvorhersagen. In Grundlagenversuchen wurde deshalb die Simulationssoftware analysiert und mit experimentellen Versuchen abgeglichen. Es wurde festgestellt, dass die ungünstige Vernetzungskonditionierung an Schnittlinien ein entscheidender Faktor für die Simulationsabweichung sein kann. Daher wurde in den Grundlagenuntersuchungen eine neue Vernetzungsstrategie entwickelt, die es ermöglicht, deutlich realitätsnähere Simulationsabbildungen zu schaffen. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen in diesem Abschnitt in die Seriensimulation des Querlenkers integriert werden. Ziel ist es, durch eine Neuausrichtung der Netzelemente an umformkritischen Schnittlinien des Querlenkers die Genauigkeit der Simulationssoftware zu erhöhen. Die Vernetzung wird beispielhaft an einer geschlossenen Schnittlinie optimiert.

Die Vorgehensweise der Vernetzung und die daraus folgenden Resultate aus der Simulationsrechnung werden in diesem Kapitel dargelegt. Dazu wurde das für die Optimierung der Vernetzung die Platine aus einer Umformsimulationsstufe herausgeschrieben, um in *Visual-Mesh* die in Abbildung 16 farblich markierten Vernetzungsbereiche zu optimieren. Nach der Optimierung wird das Platinennetz in *PM2G* reimportiert und die Simulation kann direkt im Anschluss an die nächste Operationsstufe mit der neuen Vernetzung fortgesetzt werden. Die Ergebnisdarstellung der neuen Vernetzungsstrategie beschränkt sich in diesem Abschnitt auf nicht symmetrisch geschlossene B (vgl. Abbildung 16, blaue Markierung). Für kreisrunde Beschnitte (vgl. Abbildung 16, grüne Markierung) wurde zuvor in den Grundlagenuntersuchungen in Kapitel 8 eine nachweisliche Verbesserung gesichert, daher wird an dieser Stelle auf eine erneute Darstellung verzichtet.

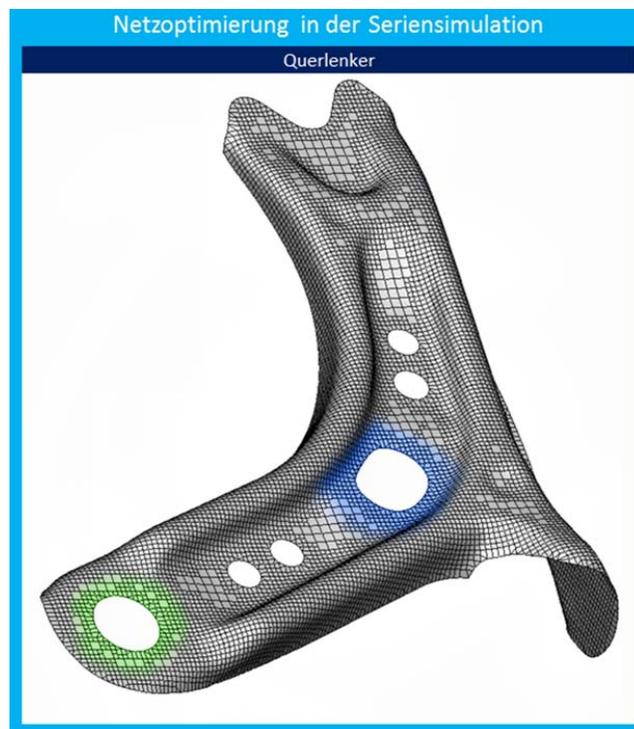
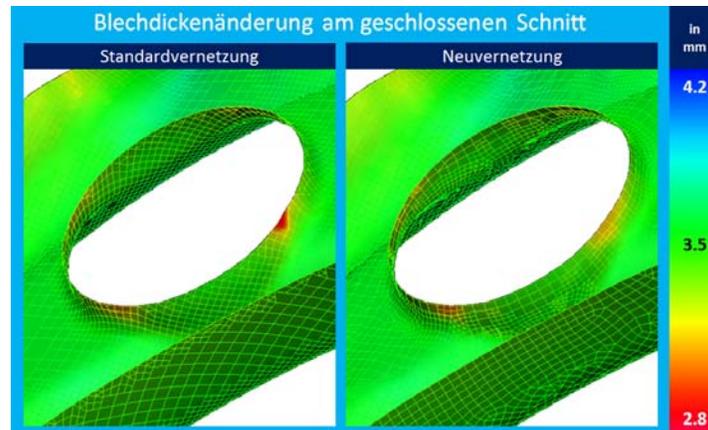


Abbildung 16: Praxisabgleich mit beiden Vernetzungsarten anhand der FLD

Im linken Bild von Abbildung 17 ist zu sehen, dass auch an einem nicht symmetrisch geschlossenen Schnitt erneut trianguläre Elemente entlang der Schnittkante entstehen. Diese werden mithilfe von *Visual-Mesh* in äußere Bereiche verlagert (Abbildung 17, rechtes Bild). Nach Beendigung der Simulation des Querlenkers können deutliche Unterschiede zwischen der herkömmlichen und der neuen Vernetzung anhand der Blechdickenänderung ausgemacht werden.



**Abbildung 17: Vergleich der Standardvernetzung (links) mit der Neuvernetzung**

Auf der linken Seite ist die Durchstellung mit der Standardvernetzung abgebildet. Besonders an einer Stelle (rote Zone) reagiert der Blechwerkstoff umformkritisch auf die Blechdickenänderung. Eine nähere Betrachtung des kritischen Bereiches, zeigt trianguläre Elemente entlang der Kante. Mit der Neuvernetzung verschwinden diese Elemente von der Schnittkante und man erhält eine deutlich homogenere Abbildung der Dickenreduzierung. In der Simulation mit der Standardvernetzung, muss davon ausgegangen werden, dass an der gegebenen Stelle der Querlenker versagen wird. Die Umformungsergebnisse für die geschlossenen Schnitte des Querlenkers entsprechen charakteristisch denen aus den Grundlagenuntersuchungen. Die Neuvernetzung bringt, durch ihre gleichmäßigere Dickenreduzierung, eine bessere Übereinstimmung mit dem Serienbauteil. Zusammen mit der Grundlagenuntersuchung und der Serie konnte bewiesen werden, dass die neue Vernetzungsstrategie bessere Simulationsergebnisse liefert.

## 6. Zusammenfassung/Ausblick

Es hat sich gezeigt, dass bei Kantenrissen an Lagerungselementen (Kragen) des Querlenkers die Simulation von der Praxis abweicht. Während die Simulation ein Versagen des Bauteils vorhersagt, waren die hergestellten Praxisbauteile einwandfrei. Diese Abweichung beeinträchtigt die Prozessvorhersage und erschwert damit die Umsetzung des Umformprozesses in die Serie. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden speziell an geschlossenen, symmetrisch gestanzten Schnittlinien Grundlagenuntersuchungen durchgeführt.

Dazu wurden mit einem Versuchswerkzeug Kragen mit verschiedenen Aufweitverhältnissen hergestellt. Je nach Höhe des Umformgrades entstanden Schädigungen (Risse) an den Versteifungselementen. Parallel dazu sind diese Realversuche mit der Simulationssoftware PAM-STAMP der Fa. ESI untersucht worden. Für eine Beurteilung der Aussagequalität der Simulation wurden die Ergebnisse mit der Praxis abgeglichen. Herangezogen zur Bewertung wurden als Auswertungsmethoden die Blechdickenreduzierung, Ausdünnung und das FLD für ausgewählte Aufweitungen (35 % und 60 %).

In den Grundlagenuntersuchungen wurde festgestellt, dass die Simulation von der Praxis abweicht. Bei näherer Betrachtung der umgeformten Platinen konnten trianguläre Elemente an Schnittkanten ausgemacht werden. Diese Elemente sind in ihrem Umformvermögen durch ihre mathematische Beschreibung eingeschränkt und stellen somit eine der möglichen Ursachen für die

Simulationsungenauigkeiten dar. Weiterhin wurde beobachtet, dass mit steigender Umformung die Abweichung an den triangulären Stellen größer wird.

Aus diesem Grund wurde eine neue Vernetzungsmethode entwickelt, die die Nutzung von Dreieckselementen an Schnittkanten verhindert. Das ursprüngliche Netz der Platine wurde in dem Vernetzungsprogramm *Visual-Mesh* neu ausgerichtet, mit dem Ziel dreieckige Elemente an der Schnittkante zu vermeiden. Das veränderte Netz wurde unter gleichen Versuchsparametern simuliert und mit der Praxis erneut abgeglichen. Es stellte sich heraus, dass mit der neuen Vernetzungsstrategie eine realitätsnähere Abbildung erreicht werden kann.

In enger Zusammenarbeit mit der ESI Engineering System International GmbH aus Neu-Isenburg soll das methodische Wissen und die neue Vernetzungsstrategie jetzt als Lösung in die Simulationssoftware *PAM-STAMP* integriert werden.

## Literaturverzeichnis

- [BATH82] Bathe, K.-J.: Finite element procedures in engineering analysis. Princeton University Press, Prentice Hall, 1982
- [DOEG10] Doege, E.; Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik - Grundlagen, Technologien, Maschinen. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2010, 2. Auflage
- [HENT02] Hentrich, C.: Untersuchungen zum Aushalsen von Rohren mit starrem Werkzeug unter besonderer Berücksichtigung der Vorlochgeometrie. Dissertation, Universität Magdeburg, 2002
- [KLEI12] Klein, B.: FEM – Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau. Springer Vieweg, 9. Auflage, 2012
- [KRES04] Kress, G.: Strukturanalyse mit FEM – Zentrum für Strukturtechnologien. Eidgenössische technische Hochschule Zürich, 2004
- [LANG90] Lange, K. (Hrsg.): Umformtechnik - Handbuch für Industrie und Wissenschaft. Band 3: Blechbearbeitung. Berlin Heidelberg New York Tokio: Springer Verlag, 1990
- [MATH08] Mathiak, F.: Die Methode der finiten Elemente (FEM) – Einführung und Grundlagen, Hochschule Neubrandenburg, 2008
- [OTTO03] Otto, M.: Erweiterung der Umformgrenzen beim Tiefziehen und Kragenziehen durch Nachschieben von Werkstoff. Dissertation, Universität Magdeburg, 2003
- [RIEG03] Rieg, F.; Hackenschmidt, R.: Finite Elemente analyse für Ingenieure. Carl Hanser Verlag, München, 2003
- [SALZ10] Salzgitter AG: SZBS800 – Mehrphasenstahl. Datenblatt, 2012
- [SCHL88] Schlagau, S.: Verfahrensverbesserung beim Kragenziehen durch Überlagern von Druckspannung. Dissertation, TH Darmstadt, 1988
- [VDI96] VDI-Verband: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen – Begriffsdefinitionen. VDI-Richtlinie 3633, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996