

## Förderung

Das Forschungsvorhaben wird gefördert von der Stiftung Stahlanwendungsforschung im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e.V.. Zweck der Stiftung ist die Förderung der Forschung auf dem Gebiet der Stahlverarbeitung und -anwendung in der Bundesrepublik Deutschland. Geprüft wird das Forschungsvorhaben A268 von einem Gutachtergremium der Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall verarbeitenden Industrie e.V. (AVIF), das sich aus Sachverständigen der Stahl anwendenden Industrie und der Wissenschaft zusammensetzt. Begleitet wurde das Projekt von einem Arbeitskreis der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) im Auftrage des Verbandes der Automobilindustrie e.V. (VDA).

1. **Forschungsthema:** Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden  
MSG-geschweißter Feinbleche aus Stahl  
unter Schubbeanspruchung

### 2. **Forschungsziel: (Kurzfassung)**

Dieses Vorhaben knüpft direkt an das AVIF-Projekt A249 an, in dem eine Methode zur Schwingfestigkeitsbewertung von Schweißnahtenden unter Querkraft und Längskraft sowie Biegung für das Kerbspannungskonzept erarbeitet wurde. Die Untersuchungen zur Schubbeanspruchung in diesem Projekt haben gezeigt, dass diese Beanspruchungsart einen Sonderfall darstellt, welcher gesondert betrachtet werden muss.

In dem hier beantragten Vorhaben sollen zum einen durch Schwingversuche die ertragbare Lebensdauer von Schweißnahtenden unter Schubbeanspruchung ermittelt werden. Zum anderen wird bei den Nahtenden durch eine erweiterte Methode die Wurzelkerbe mit optischem 3D Scan aufgenommen und analysiert. Hiermit soll die bestehende Vernetzungsrichtlinie aus dem Vorgängerprojekt dahingehend modifiziert werden, dass auch Schubversagen abgebildet wird. Durch diese Vervollständigung ist das Gesamtkonzept in sich geschlossen.

### 3. **Projektbeschreibung**

#### **Stand der Technik, Verankerung in der vorhandenen Normung**

Bezüglich der heute üblichen Geometrien von Schweißnähten und insbesondere der Vielfalt der Möglichkeiten hinsichtlich Gestaltung und Positionierung von Nahtenden liefert das Nennspannungskonzept nahezu keine Unterstützung bei der betriebsfesten Auslegung von Nahtendebereichen. Ältere Datensammlungen [1]-[5] und Auswertungen [6] enthalten keine Daten bezüglich der Schweißnahtenden. Der neueste Katalog mit Wöhlerlinienkennwerten, die Empfehlungen des International Institute of Welding (IIW) [7], liefert nur einige wenige Hinweise bezüglich Nahtenden. Auch im Eurocode [8] sind hinsichtlich Nahtenden unter Verwendung des Nennspannungskonzeptes wenige Informationenniedergelegt.

Die in den IIW-Richtlinien verankerten Nachweise auf der Basis von Struktur- und Kerbspannungen nehmen für sich in Anspruch, die Schwingfestigkeit von Nahtenden mit abdecken zu können. Explizit ausgewiesen ist dies nur für Längssteifen beim Strukturspan-

nungsnachweis gemäß der IIW-Richtlinie und dem Eurocode. In der IIW-Richtlinie wird das Extrapolationsverfahren (bzgl. Der Spannungen an der Blechoberfläche) zur Berechnung der Strukturspannungen empfohlen, neuere Methoden der Innenlinearisierung [9], [10] überwinden dagegen besser die Schwierigkeiten in Verbindung mit den Ecken-singularitäten.

Allen bisher genannten regelwerksbasierten Bewertungskonzepten liegen Erfahrungen an dickeren Blechen zu Grunde. Insbesondere ist die Anwendung des Kerbspannungskonzepts gemäß der IIW- Richtlinie [7] auf Blechdicken größer oder gleich 5mm beschränkt.

### **Stand der Forschung**

Im Karosseriebereich spielt jedoch das Fügen von dünnwandigen Stahlblechstrukturen eine bedeutende Rolle. Zur Auslegung von Bauteilen sind zuverlässige Lebensdauer- und Festigkeitsberechnungsverfahren heute schon in der frühen Entwicklungsphase unerlässlich. Hier haben die jüngst abgeschlossenen Vorhaben A154 [13] und insbesondere A205 [14] „Berechnungsmethoden für die Lebensdauerabschätzung von MSG- bzw. lasergeschweißten Kehlnähten in dünnwandigen Stahlblechstrukturen“, einen wesentlichen Fortschritt erzielt. Es hat sich herausgestellt, dass die besten Berechnungsergebnisse mit dem Kerbspannungskonzept erzielt werden. Es können dabei sowohl die Laser- als auch die MSG-Nähte für alle Versuche unter schwelender Beanspruchung bei demselben Grundwerkstoff in eine Masterwöhlerlinie unter geringer Streuung vereint werden. Dabei wird mit einem Kerbradius von  $r = 0.05\text{mm}$  gerechnet. Schweißnahtenden jedoch wurden hier bisher nicht betrachtet.

Das kürzlich abgeschlossene AVIF-Vorhaben A222 [15] „Betriebsfeste Bemessung von mehrachsigt belasteten Laserstrahl-Schweißverbindungen aus Stahl-Feinblechen des Karosseriebaus“ sorgt für eine zusätzliche Erweiterung des Kenntnisstands hinsichtlich der mehrachsigen Beanspruchungen. Hier waren zwar Proben mit Nahtenden enthalten, wurden jedoch auf Grund der Zielsetzung nicht weiter betrachtet. Des weiteren wurden die Proben mit Nahtenden lediglich unter Zugbelastung geprüft. Torsion wurde nur auf Probekörper ohne Nahtende aufgebracht. Eine Empfehlung für Nahtenden wurde daher nicht ausgesprochen allerdings wurde ein Vorschlag zur Wahl des Ausrundungsradius in Abhängigkeit von der Blechdicke getrennt nach Wurzel- und Übergangskerbe gemacht.

Von Seto et al.[16][17] wurden Überlappstöße untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass der Anriss mit Ausnahme langer Nähte an den Enden entsteht. Einflussgrößen sind die Eigenspannungen und die Kerbwirkung. Wöhlerlinien für unterschiedliche Geometrien ließen sich leidlich gut einheitlich darstellen, wenn als Beanspruchungsmaß eine im Abstand von 1mm vor der Einbrandkerbe am Anrissort gemessene Dehnung verwendet wurde. Diesen Wert kann man als Strukturdehnung im Sinne von Haibach [18] ansehen. Durch die unterschiedliche Definition, die unterschiedlichen Blechdicken und das spezielle dreidimensionale Beanspruchungsfeld sind die Strukturdehnungswöhlerlinien nach Haibach und Seto jedoch nicht vergleichbar. Zudem wurde hier keine Schubbelastung untersucht.

Auf die besondere Beanspruchungssituation einiger dreidimensionaler Spannungskonzentrationen weisen auch Bellet et al. [19] hin. Sie haben neben diversen Probenformen mit Schweißnahtenden auch ungeschweißte Proben mit einer scharfen, punktkonzentrierten Kerbe untersucht. In dieser Situation erweisen sich die üblichen Bewertungsverfahren als hochgradig konservativ. Sie folgern, dass der Hauptgrund für dieses Phänomen eher in der Geometrie der Spannungskonzentration liegt als in irgendeiner speziellen Eigenschaft der Schweißverbindung und ihrer Wärmebehandlung. Ausgedrückt in der Terminologie von Stützziffern hätten nach Bellet die punktförmigen Spannungskon-

zentrationen deutlich höhere Stützziffern als übliche, zweidimensionale Kerbsituationen haben müssen.

Die Ergebnisse der Untersuchung von Schliebner et al. [20], die für eine derartige dreidimensionale Kerbsituation ebenfalls deutlich konservative Lebensdauerabschätzungen nach allen gängigen Konzepten erhalten haben, stützen die Schlussfolgerungen von Bellet. Schliebner [25] hatte im Rahmen seiner Untersuchungen zur Bewertung der Schwingfestigkeit von Hybridschweißverbindungen für das Kerbspannungskonzept die Möglichkeit, in Einzelfällen die reale Geometrie der Schweißnaht zu erfassen. Dies zeigte, dass die Modellierung mit 1mm Ausrundung gerade in Bezug auf komplexere Nahtgeometrien nicht geeignet ist

Für Blechdicken größer als 5mm wird gemäß den IIW-Empfehlungen der Kerbradius auf 1mm gesetzt. Für kleinere Blechdicken muss ein neuer, konzeptgebundener Kerbradius bei der Anwendung des Kerbspannungskonzepts festgelegt werden. Dies führte dazu, dass mehrere Autoren die Verwendung eines Radius von 0,05mm favorisieren [22]-[24]. Erste konzeptgebundene Schwingfestigkeitskennwerte liegen vor, sind jedoch stark unterschiedlich [22], [23] Die Arbeit von Chmielewski et al. [24] zeigt darüber hinaus, dass die Technik des Kerbspannungskonzepts unter Verwendung von Masterwöhlerlinien, die an einen definierten Kerbradius gebunden sind, auch auf Schweißnahtenden in Aluminiumkonstruktionen angewendet werden können.

## **Ausgangsbasis**

### **Vorgängerprojekt „Schwingfestigkeit von Nahtenden“**

Da aus den hier genannten Gründen keine ausreichend genaue Bewertung von Nahtenden an Dünnsblechen möglich war, wurde das Projekt AVIF-A249 „Schwingfestigkeit von Schweißnahtenden“ initiiert. Kern des Vorhabens war das Scannen der Schweißnähte mit einem hochauflösenden 3D Scanner (Flächenauflösung 30µm, Tiefenauflösung 5µm) zur genauen Ermittlung der Einbrandkerbgeometrie in der Schweißnaht. Somit konnten erstmals in großem Umfang Kerbspannungen an der tatsächlichen Geometrie berechnet werden. Ein Scan einer im Rahmen dieses Projektes getesteten Naht ist in Bild 1 zu sehen.

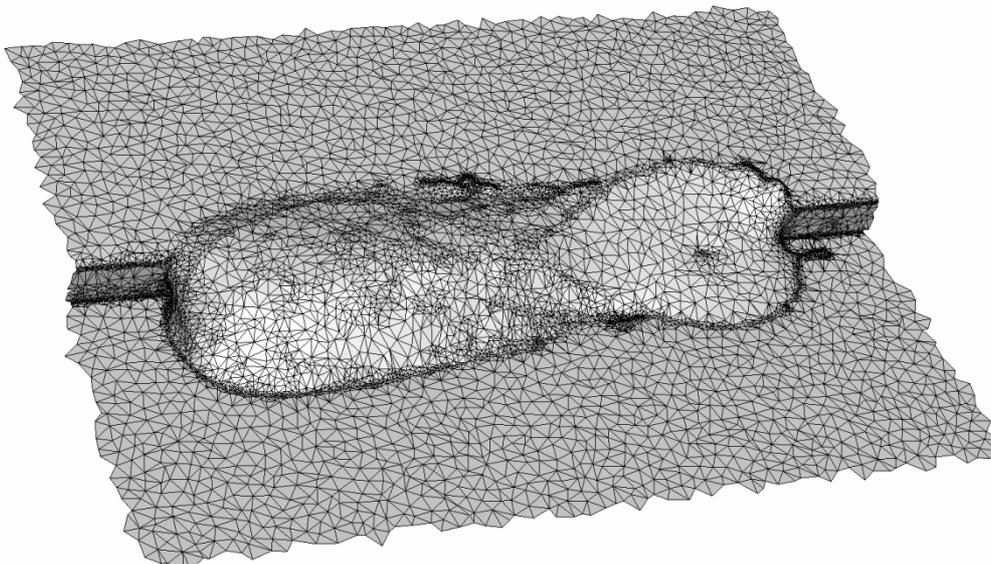


Bild 1: Scan einer Schweißnaht

Es ist hierbei gelungen aus den gescannten Oberflächen Volumenmodelle zu erstellen und diese mit der FE-Methode unter Zuhilfenahme der Submodelltechnik zu berechnen. Ein so entstandenes Submodell ist beispielhaft in Bild 2 zu sehen.

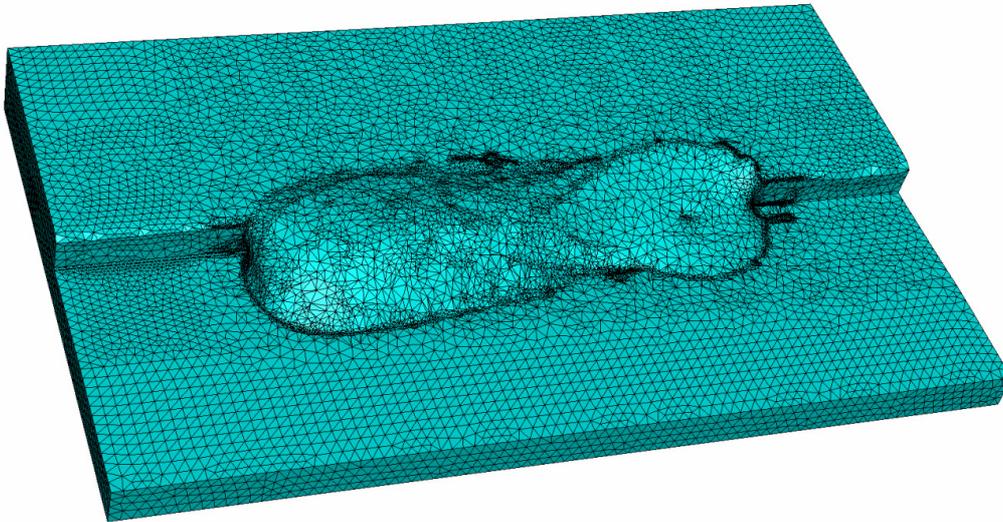


Bild 2: Volumenmodell des Scans

In einem weiteren Submodell mit der höchsten Scanauflösung wurden die Kerbspannungen berechnet. Das Ergebnis zeigt Bild 3. Im Versuchsprogramm waren Proben für die Lastfälle Längszug, Querszug, Biegung und Torsion vorgesehen.

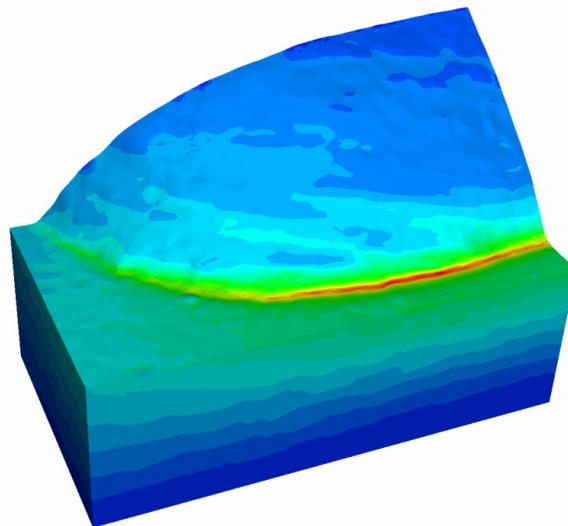


Bild 3: Kerbspannung berechnet mit höchster Scanauflösung

Mit den aus der Berechnung gewonnenen Ergebnissen sowie den Versagenschwingungszahlen aus den Versuchen konnte eine Kerbspannungswöhlerlinie für die reale Geometrie erstellt werden.

Außerdem war durch die so geschaffene große Datenbasis eine ausführliche Analyse der Nahtendgeometrie insbesondere in Bezug auf Ausrundungsradius und Nahtanstiegswinkel möglich. Hieraus konnten Geometrie- und Vernetzungsrichtlinien erarbeitet werden, mit denen das Nahtende abgebildet werden kann. Dies geschah für das Kerbspannungskonzept als auch für das Strukturspannungskonzept (Bild 6). So kann nun erstmalig die tatsächliche Beanspruchung am Nahtende für das jeweilige Konzept berechnet werden.

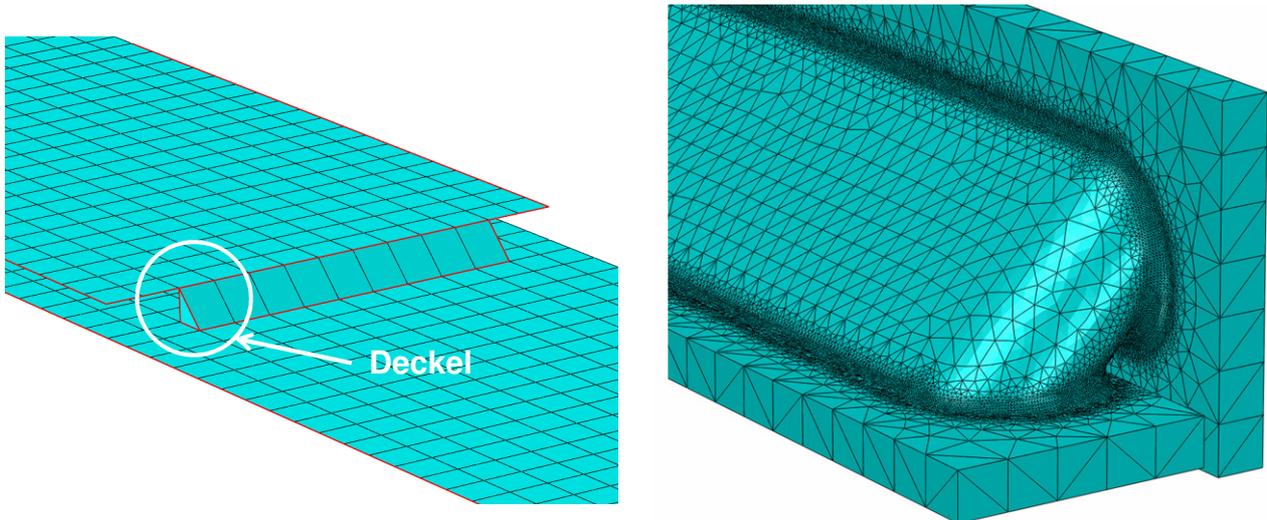


Bild 4: Modellierung Strukturspannungskonzept (links) und Kerbspannungskonzept (rechts)

Zur endgültigen Nachweisführung wurden aus den idealisierten Nahtendmodellen in Kombination mit den Versuchsergebnissen die in Bild 7 dargestellten konzeptgebundenen Wöhlerlinien berechnet. Somit ist nun ein Nachweis im Rahmen des Struktur- und Kerbspannungskonzeptes möglich.

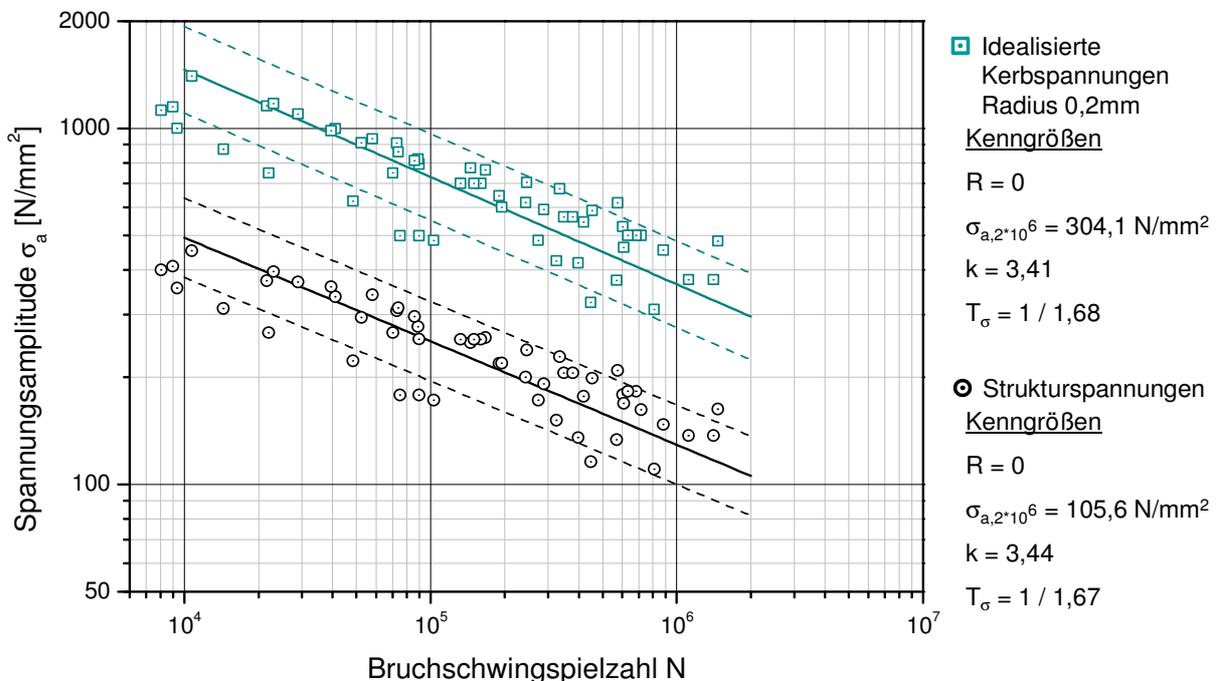


Bild 5: Konzeptgebundene Wöhlerlinien

Alle hier gezeigten Ergebnisse gelten für Längszug, Querszug und Biegung. Der Lastfall Schub stellt hierbei einen Sonderfall dar. Bei der hierfür vorgesehenen Versuchsreihe – Rohr durchdringt Blech und ist mit vier Stepnähten angeschlossen (vgl. Bild 6) – zeigte sich, dass es zwei verschiedene Versagensarten gibt die lastabhängig scheinen. So

wächst bei hoher Last der Riss über den Nahrücken, bei niedriger Last in das angeschlossene Blech (vgl. Bild 7).

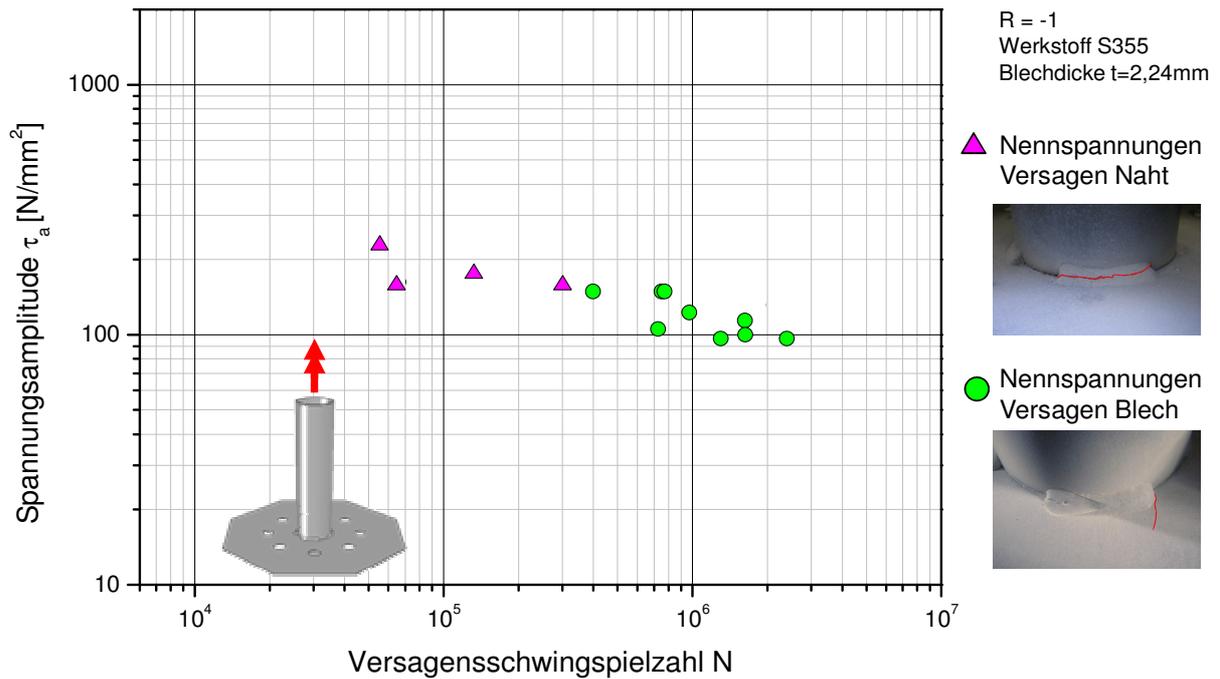


Bild 6: Lastabhängigkeit der Versagensmechanismen

Zudem startet der Riss jeweils am Übergang von Übergangs- zu Wurzelkerbe (Bild 8 links). Dieser Bereich ist jedoch durch den 3D Scan nicht einsehbar. Die Modellierung hier erfolgt per Hand und stellt somit einen künstlich erzeugten Übergang dar (Bild 8 rechts). Somit können keine zuverlässigen Kerbspannungen für die beiden Versagensformen berechnet werden.

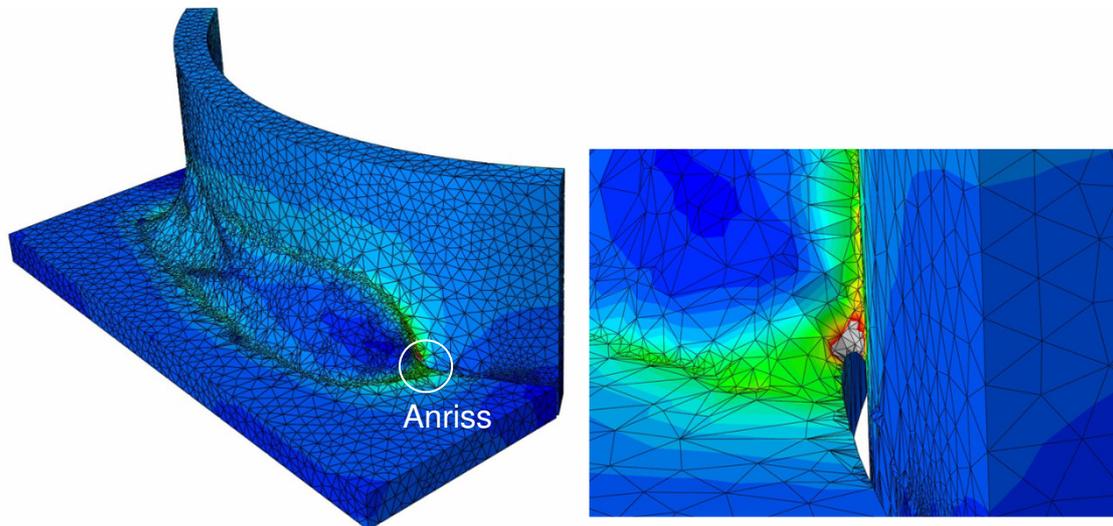


Bild 7: Schub

Außerdem finden durch den Anschluss mit vier Nähten im Versuch Spannungsumlagerungen statt, die die Lebensdauer zusätzlich beeinflussen.

Da bei dem Vorgängerprojekt A249 lediglich eine Versuchsreihe für den Lastfall Schub vorgesehen war, konnte dieser Fall aufgrund der gerade beschriebenen Problematik nicht in Gänze verifiziert werden. Daher soll nun dieser ohnehin eigenständige Lastfall in Bezug

auf Schweißnahtenden in dem hier beantragten Folgeprojekt bearbeitet werden, sodass ein an das Vorgängerprojekt anknüpfendes Nachweisverfahren entsteht.

### **Vorversuche**

Im Vorfeld zu diesem Forschungsantrag wurden bereits einige Testversuche durchgeführt. Zum einen sollte hierbei nach einer Probenform gesucht werden, die leichter zu handhaben ist als die Rohrprobe im Vorgängerprojekt, um dessen beschriebene Nachteile zu umgehen. Zum anderen sollte das Versagensbild und dessen Lastabhängigkeit bestätigt werden. Die Wahl fiel hierbei auf eine Steckflaschen-Verbindung (Bild 8). Die Überlappung kann entweder durch ein einseitig geschlitztes Blech (langer Schlitz) hergestellt werden oder aber beide Bleche werden mit einem kurzen Schlitz versehen. Bei der zweiten Variante kann jedoch die Schweißnaht nicht ungestört ausgeführt werden (Spaltsprung in der Mitte). Bei den Vorversuchen kam es zu unerwünschten Rissen in Nahtmitte. Daher wurde die Variante mit nur einem Schlitz gewählt.

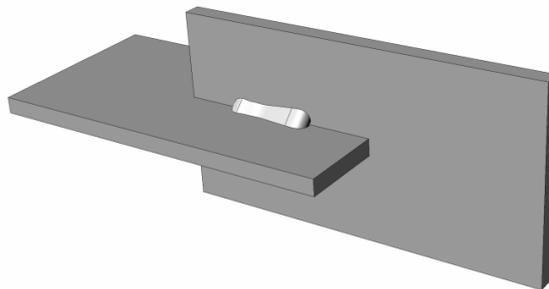
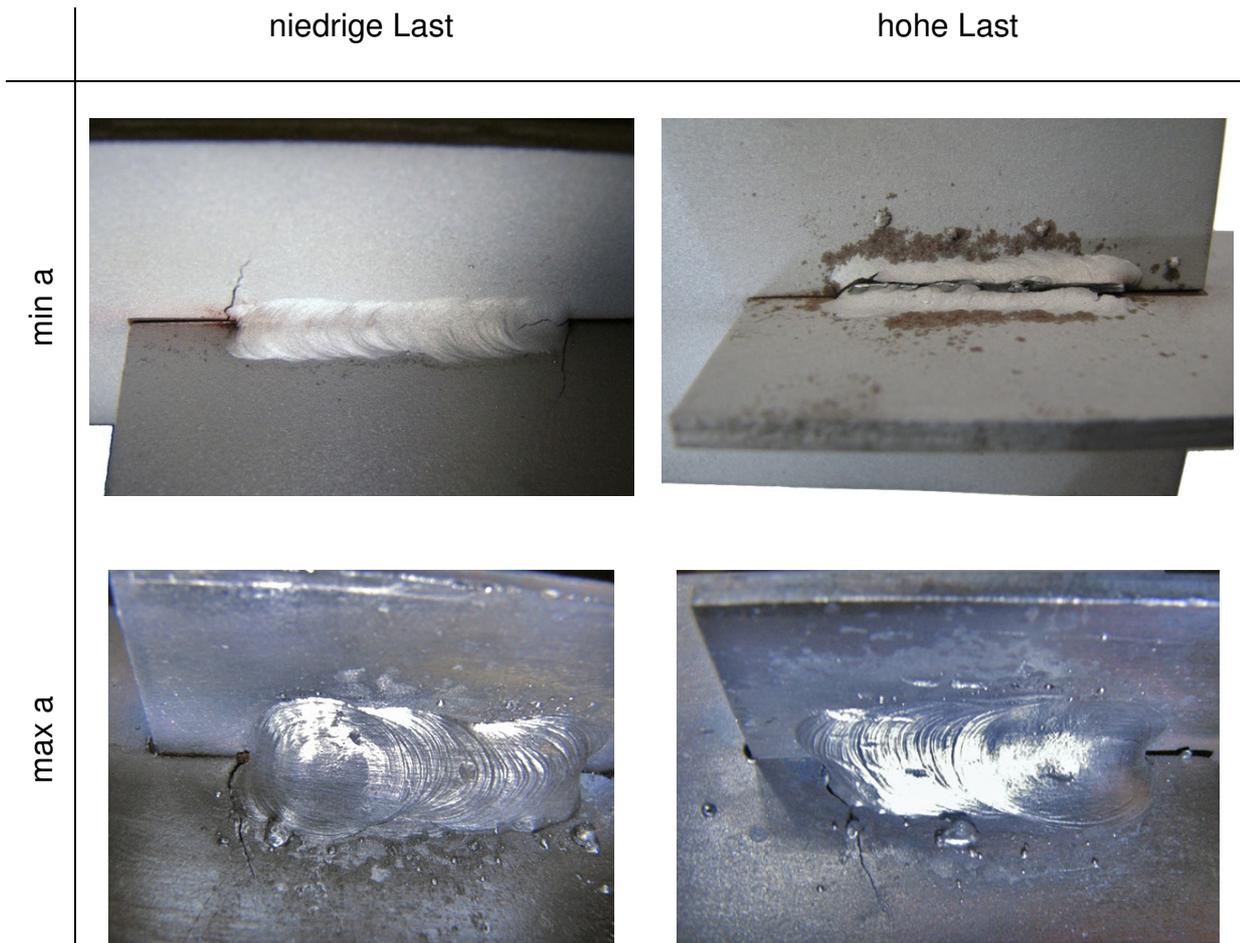


Bild 8: Vorversuch mit Steckflaschenverbindung

Da davon ausgegangen werden kann, dass die Versagensart vom Verhältnis Nahtdicke zu Blechdicke abhängt, wurden bei den Vorversuchen eine Serie mit minimaler und eine Serie mit maximaler Nahtdicke ausgeführt. Wie auch bei der Rohr-Blech-Verbindung führte die Variante mit dünner Naht bei niedrigen Lasten zu Versagen im Blech und bei hohen Lasten zum Versagen in der Naht. Die Variante mit dicker Naht führte ausschließlich zum Versagen im Blech. Dieses Versagensschema ist in der folgenden Tabelle dargestellt:



Das zu untersuchende Phänomen stellt sich also wie folgt dar: Das bei hoher Last vorherrschende Versagen der Naht infolge Schub geht bei einer bestimmten Schwingspielzahl in Versagen des Bleches auf Längsspannung über (vgl. Bild 9) – hier schematisch durch zwei Wöhlerlinien mit unterschiedlichen Neigungen dargestellt. Die sich einstellende Übergang-Schwingspielzahl hängt vom Verhältnis Nahtdicke zu Blechdicke ab.

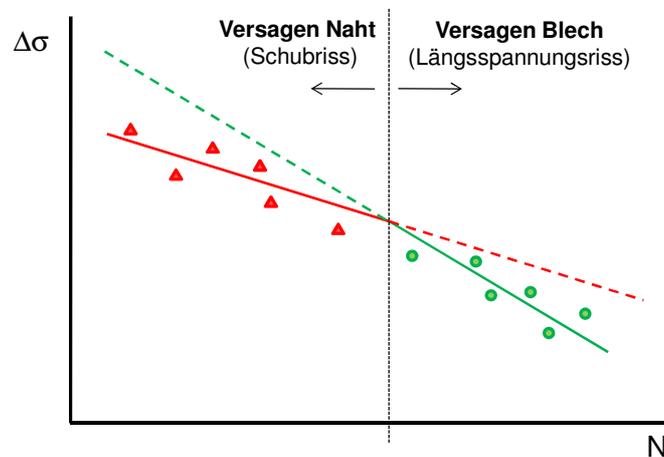


Bild 9: Versagensphänomen Nahtenden Schub

## **Zielsetzung**

Im AVIF-Projekt A249 wurde ein Konzept zur Schwingfestigkeitsbewertung von Schweißnahtenden unter Längs- und Querkraft sowie Biegung erarbeitet. In dieser weiterführenden Untersuchung soll dieses Konzept um den Lastfall Schub erweitert werden, um somit die Bewertbarkeit von Nahtenden zu vervollständigen.

Da die lokale Geometrie von Schweißnahtenden derzeit noch nicht ausreichend erfasst ist, insbesondere was die geometrische Ausbildung des Übergangstrichters betrifft, sollen im Rahmen des Vorhabens umfangreiche Messungen in Bezug auf diese Stelle durchgeführt werden. Dies wird dann die gezielte Zuordnung von Kerbgeometrie und Belastung zur experimentell mit der vermessenen Probe ermittelten Lebensdauer ermöglichen.

Zum anderen werden parallel zur experimentellen Untersuchung die in der Praxis nötigen Berechnungsverfahren – aufbauend auf den Ergebnissen vorangegangener Forschungsvorhaben – entwickelt und deren Treffsicherheit quantifiziert. Als Berechnungskonzepte wird in erster Linie das Kerbspannungskonzept untersucht, da sich dieses Konzept inzwischen in der Praxis bewährt hat und diesbezüglich umfangreiche Erfahrung vorliegt.

Aufgrund des lastabhängigen Versagensbildes sollte es also das Ziel sein, auf der Widerstandsseite eine „einhüllende“ Wöhlerlinie zu erstellen, die alle ungünstigen Versagensarten mit abdeckt. Auf der Einwirkungsseite soll die bestehende Modellierung weitergehend so modifiziert werden, dass die zur Wöhlerlinie zugehörigen Beanspruchungen richtig berechnet werden können.

Da es sich bei dem Übergangstrichter um eine hoch komplexe dreidimensionale Kerbe handelt, wird das Strukturspannungskonzept hier zunächst ausgeklammert. Statt dessen soll hier – einen Schritt weiter gehend – untersucht werden, ob sich der Spannungsintensitätsfaktor als Bewertungskriterium eignet.

Insgesamt soll das Vorhaben einen wesentlichen Beitrag dazu leisten, dass die Schwingfestigkeit der Enden von Schweißnähten in dünnwandigen Stahlblechkonstruktionen mit derselben Treffsicherheit wie für die Nahtmitte rechnerisch bewertbar wird. Da – wie Kapitel „Vorgesehener Lösungsweg“ auch die Wurzelkerbe per 3D Scan erfasst werden soll, stellt dieses Vorhaben nicht nur in Bezug auf Nahtenden einen wegweisenden Schritt dar. Es liefert zusätzlich weitere Erkenntnisse, die zur Vereinheitlichung des Kerbspannungskonzeptes dienen, da durch das „rundum“ Erfassen der Schweißnaht Übergangs- und Wurzelkerbe nun direkt miteinander verglichen werden können.

## **Vorgesehener Lösungsweg**

### **Arbeitspakete**

Das hier beantragte Vorhaben besteht im Wesentlichen aus zwei Arbeitspaketen (siehe Bild 10). In dem experimentellen Teil werden Schwingversuche mit zwei verschiedenen Probekörpern zur Bestimmung der Versagensschwingspielzahlen durchgeführt. Hierbei werden bestimmte Parameter wie Nahtlänge und Nahtdicke (siehe weiter unten) variiert, sodass insgesamt 5 Versuchsserien bei der späteren Auswertung zur Verfügung stehen. Außerdem wird ein gesonderter Teil der Proben zur Geometrieanalyse genutzt. Es ist in den Vorversuchen gelungen, eine Methode zu entwickeln, mit der es erstmals möglich ist, eine Schweißnaht mittels optischem 3D Scan inklusive Wurzelkerbe zu erfassen.

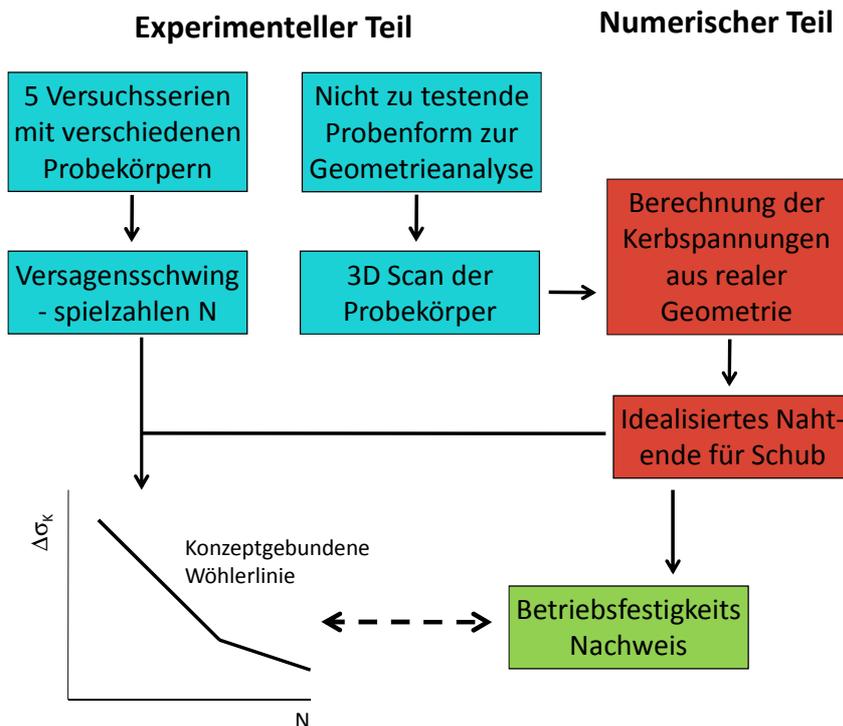


Bild 10: Übersicht über das Vorhaben

Im numerischen Teil lässt sich aus den Scan Daten ein räumliches FE-Modell analog zum Vorgängervorhaben erstellen. Aus den so gewonnenen Ergebnissen ist es möglich, ein idealisiertes Schweißnahtende zu abstrahieren, welches die Versagensmechanismen des Lastfalles Schub abbilden kann. Zusammen mit den im experimentellen Teil ermittelten Versagensschwingspielzahlen kann so eine konzeptgebundene Wöhlerlinie für Schubbeanspruchung ermittelt werden. Somit ist ein vollständiges Nachweiskonzept vorhanden, bei dem die Beanspruchung mit dem idealisierten Nahtendmodell ermittelt und der Beanspruchbarkeit der konzeptgebundenen Wöhlerlinie gegenübergestellt wird. Da es sich hier um das Versagen an einer lokalen, komplexen Geometrie handelt wird das Strukturspannungskonzept hier nicht betrachtet, da dies nicht in der Lage ist, eben diese lokalen Effekte abbilden zu können.

Aus dem Vorgänger Projekt A249 sind zum einen bereits alle Versuchs- und Messeinrichtungen – in erster Linie der 3D Scanner – vorhanden. Zum anderen liegt aufgrund der guten Ergebnisse des Vorgängerprojektes das hierzu notwendige Know-How im Umgang mit den Scanner Daten und deren Weiterverarbeitung zu FE Modellen bereits vor.

## Experimenteller Teil

### Steckflaschen-Verbindung

Wie bereits in den Vorversuchen gezeigt, hat sich die einseitig geschlitzte Steckflaschen-Verbindung als sehr gut geeignete Probenform für den Lastfall Schub herausgestellt. Die Risse lassen sich leicht beobachten und es liegt für beide Versagensformen (Riss im Blech/ Riss in der Naht) ein klarer Bruch vor. Auch wurde im Vorfeld durch eine FE-Berechnung nachgewiesen, dass unter den zu erwartenden Lasten bei einem Spannungsverhältnis von  $R=-1$  kein Knicken der Probe auftritt.

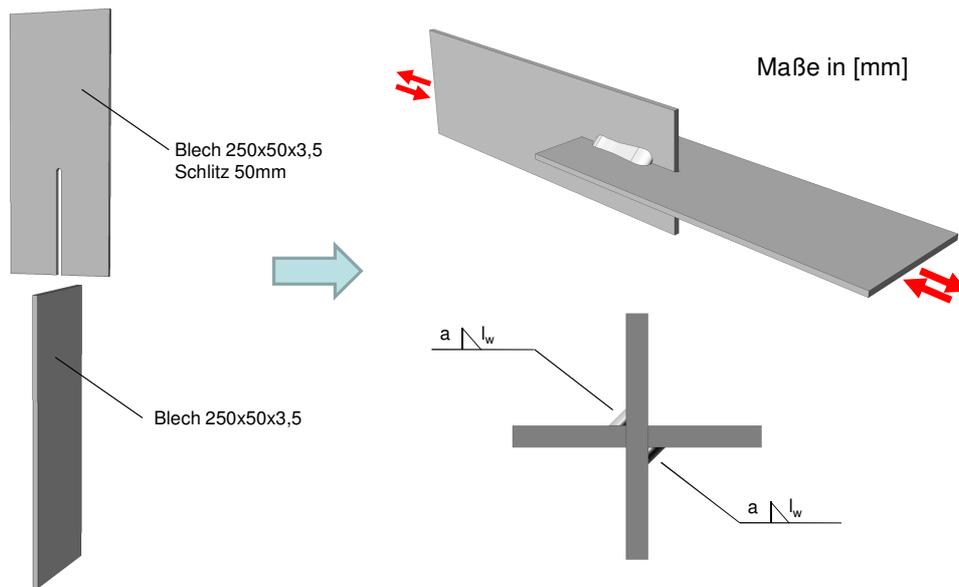


Bild 11: Steckverbindung

Die beiden Bleche werden mit zwei Nähten zusammengefügt. Diese werden hierbei anti-metrisch angeordnet. Wie bereits beschrieben, wird vermutet, dass der Effekt des lastabhängigen Versagensbildes von dem Verhältnis Nahtdicke zu Blechdicke Verhältnis abhängig ist. Da es aus logistischen Gründen einfacher ist, mit einer einheitlichen Blechstärke zu operieren, wird hier also die Nahtdicke variiert. Somit wird eine Versuchsserie mit der maximal und eine mit der minimal zulässigen Nahtdicke ausgeführt. Die gültigen Begrenzungen sind in Bild 12 dargestellt.

$$a > \sqrt{t} - 0,5$$

$$< 0,7 \cdot t$$

Bild 12: Nahtdickenbegrenzung nach DIN 18800

Des Weiteren soll zur Verifizierung der Ergebnisse im Sinne einer Übertragbarkeit auf andere Nähte auch noch die Nahtlänge variiert werden. Für eine Blechdicke von  $t=3,5\text{mm}$  ergeben sich also folgende Versuchsreihen:

R = -1		
Versuche	Nahtdicke	Nahtlänge
15	max a = 2,45 mm	$l_w = 30\text{ mm}$
15	max a = 2,45 mm	$l_w = 20\text{ mm}$
15	min a = 1,37 mm	$l_w = 30\text{ mm}$
15	min a = 1,37 mm	$l_w = 20\text{ mm}$

Die Bleche sollen hierbei eine Breite von 50mm aufweisen und 250mm lang sein. Jeweils ein Blech hat einen 50 mm langen Schlitz (am Ende ausgerundet), sodass die Gesamtlänge der Probe nach Zusammenbau 450mm beträgt. Nach der 50mm langen Überlappung sind hier noch 100 mm für die freie Länge vorgesehen, die restlichen 100mm dienen als Einspannlänge.

## Rohrprobe

Die Rohrprobe ist weitestgehend an die Probenform aus dem Vorgänger Projekt angelehnt und dient in erster Linie zum Vergleich der Ergebnisse beider Vorhaben. Allerdings wurde die Anzahl der Nähte auf zwei reduziert (siehe Bild 13), da es mit den im vorigen Projekt vorhandenen vier Nähten zu enormen Spannungsumlagerungen gekommen ist, die die Lebensdauer stark beeinflusst haben.

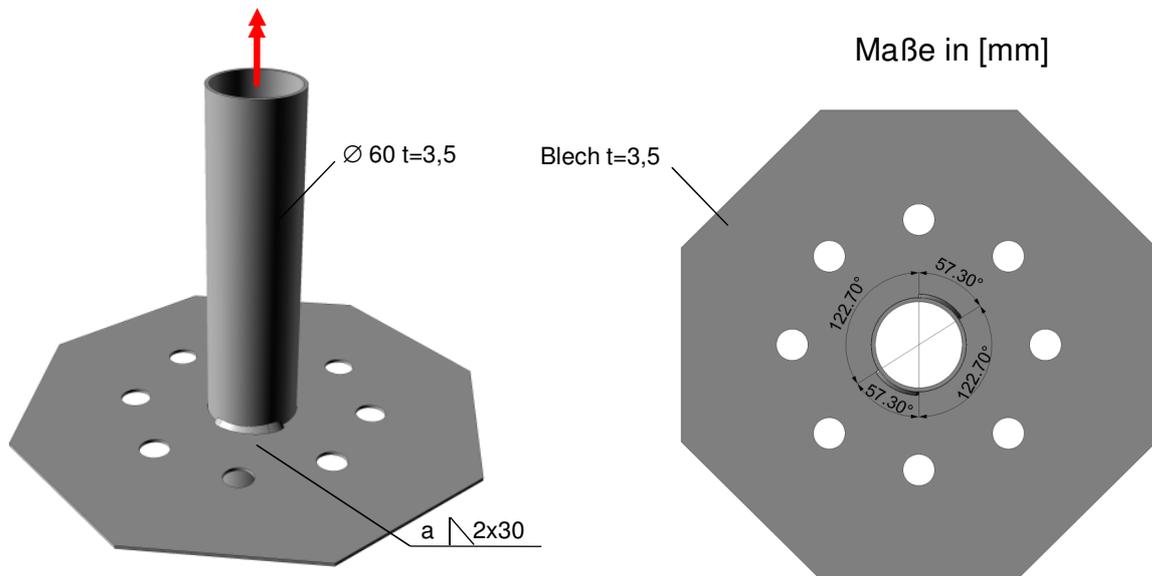


Bild 13: Rohrprobe

Da hier vor allem das Versagen der Naht interessiert, wird diese entsprechend Bild 12 mit der minimalen Nahtdicke ausgeführt. Eine Nahtlängen-Variation ist nicht vorgesehen. Somit ergibt sich für die Blechdicke  $t = 3,5$  mm folgende Versuchsreihe:

R = -1		
Versuche	Nahtdicke	Nahtlänge
15	min $a = 1,37$ mm	$2 \times l_w = 30$ mm

Zu den Maßen: Das 3,5 mm starke Blech soll von einem Rohr mit Außendurchmesser 60mm durchdrungen werden. Die Wandstärke des Rohres beträgt ebenfalls 3,5mm. Das Rohr wird mit zwei 30mm Kehlnähten an das Blech gefügt. Die Nähte werden hierbei symmetrisch angeordnet.

## Proben zur Geometrieanalyse

Eine bestimmte Anzahl von den Stecklaschen-Verbindungen wird zur Geometrieanalyse herangezogen. Damit auch erstmalig die Wurzelkerbe mit dem 3D Scanner erfasst werden kann, wird die Probe verformungsarm aufgebrochen. Die hierzu nötigen Schritte sind im Folgenden beschrieben:

Zunächst wird das geschlitzte Blech der Stecklaschen-Verbindung durchtrennt, sodass an der Kehlnaht ein freistehendes Teilstück des abgetrennten Bleches stehenbleibt (Bild 14a und b). Als nächstes folgt ein Referenzscan der noch unzerstörten Schweißnaht, an dem später die Scans der aufgebrochenen Probe ausgerichtet werden können. Nun wird die Probe in flüssigen Stickstoff getaucht, bis sie auf  $-196^{\circ}\text{C}$  abgekühlt ist. Nun kann der freistehende Teil verformungsarm abgetrennt werden, sodass die Wurzelkerbe offengelegt wird (Bild 14c). Anschließend kann der Scan an der zerstörten Probe erfolgen und an dem Referenzscan ausgerichtet werden. Somit erhält man einen vollständigen „Rundumscan“ der Schweißnaht.

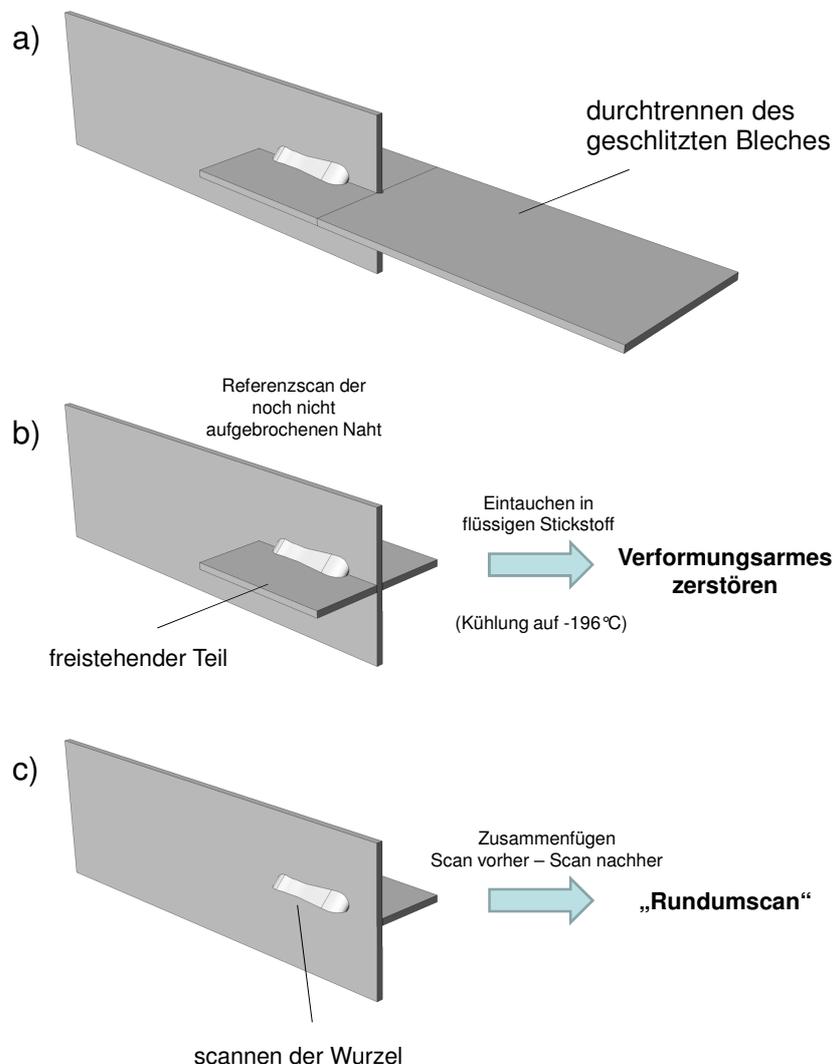


Bild 14: Vorbereitung der Geometrieanalyse Proben

Den höchsten Aufwand stellt hierbei das Nachbearbeiten der Scans dar. Diese müssen von Scanschatten und fehlerhaften Elementen befreit werden, sodass eine genaue Ausrichtung zueinander möglich ist. Dies alles kann nur per Hand geschehen und nimmt daher sehr viel Zeit in Anspruch. Daher wurde entschieden, auf diese Weise 10 Proben zu analysieren. Die Hälfte je mit dicker und dünner Naht. Eine Übersicht gibt folgende Tabelle:

Anzahl	Nahtdicke	Nahtlänge
5	max a = 2,45 mm	$l_w = 30$ mm
5	min a = 1,37 mm	$l_w = 30$ mm

Selbstverständlich wurde diese Methode im Vorfeld überprüft. Hierzu wurden restliche Probekörper des Vorgängerprojektes benutzt. In Bild 15 links ist eine in flüssigen Stickstoff eingetauchte und aufgebrochene Naht zu sehen. Den hieraus resultierenden 3D Scan zeigt Bild 15 rechts.

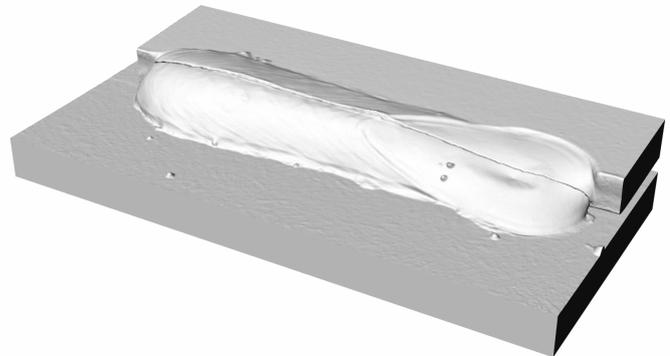


Bild 15: Aufgebrochene Naht (links), Scan (rechts)

Schaut man nun in diesen Scan hinein (Bild 16 links) lässt sich der Verlauf der Wurzelkerbe erkennen. Vergrößert man den Nahtanfangsbereich (Bild 16 rechts), lässt sich nun der bislang abgeschattete Übergangstrichter einsehen. Man kann den genauen Übergang von der Kerbe am Nahtfuß hin zur Wurzelkerbe erkennen.

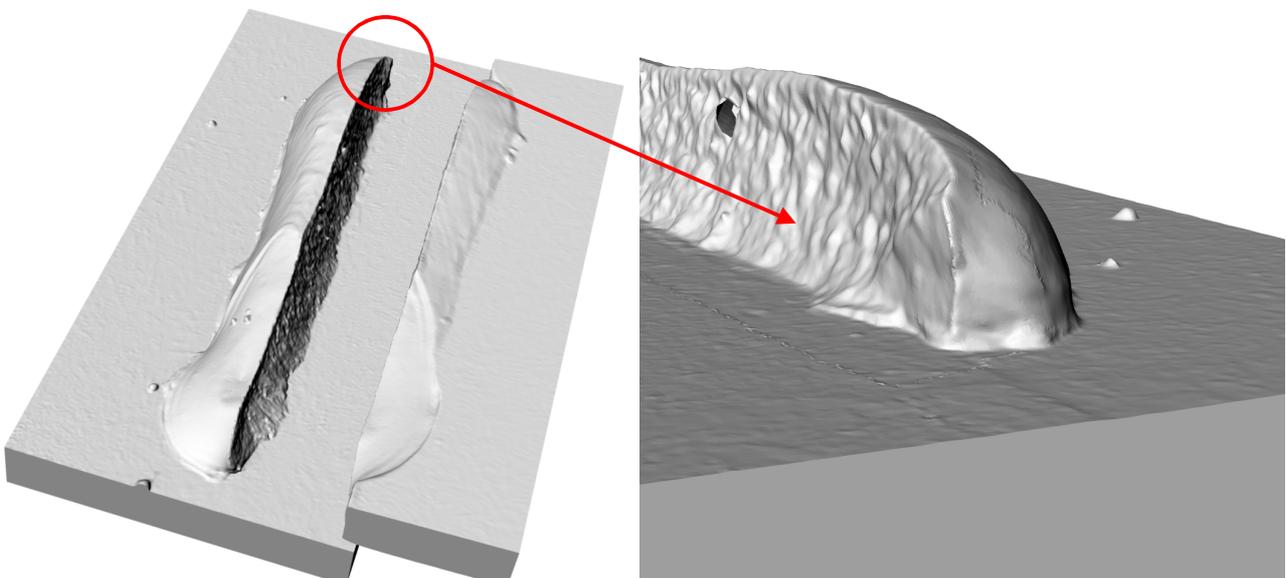


Bild 16: Geöffneter Scan (links), Detailansicht Übergangstrichter (rechts)

### Numerischer Teil

Die Berechnung der Kerbspannungen erfolgt analog zum Vorgängerprojekt (vgl. Bild 1 bis Bild 3). Das dort erarbeitete Vorgehen hat sich als sehr robust heraus gestellt. Als Grundlage für die FE Modelle dienen hierzu die Scanergebnisse von den Proben zur Geometrieanalyse. Hiermit könne zunächst die realen Kerbspannungen berechnet werden. Daraus folgend soll eine Nahtendmodell abstrahiert – bzw. das bereits erarbeitete Modell des Vorgängerprojektes modifiziert – werden, welches die gleichen Ergebnisse liefert wie die gesannten Modelle.

Hierbei sollen insbesondere die Spannungen in dem Übergangstrichter richtig abgebildet werden, da dieser den Ausgangsort beider Versagensformen unter Schubbelastung darstellt. Schematisch ist dies in Bild 17 zu sehen.

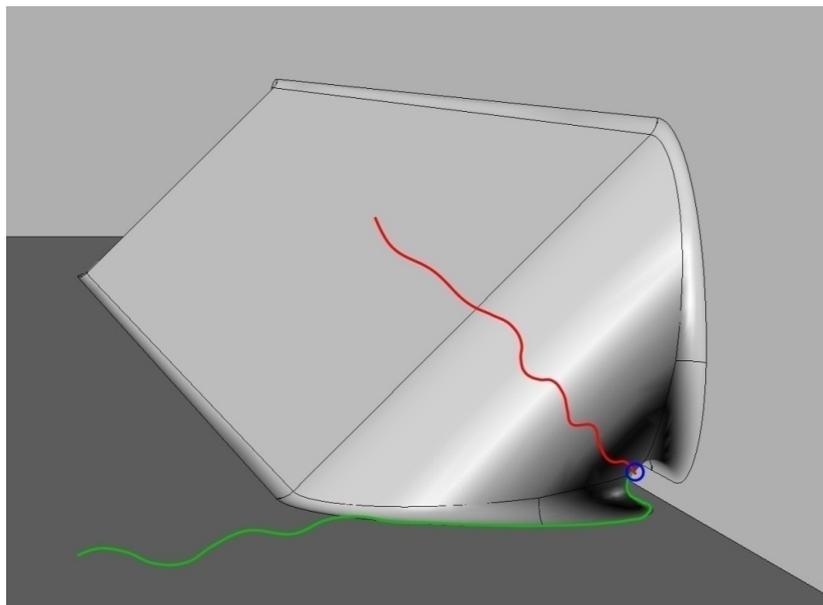


Bild 17: Rissausgang Übergangstrichter

Die so gewonnen Kerbspannungen werden mit den in den Versuchen ermittelten Lebensdauern zu einer konzeptgebundenen Wöhlerlinie zusammengefasst (Bild 18).

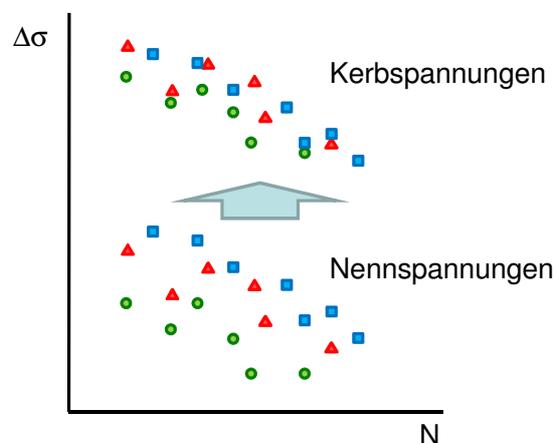


Bild 18: Erstellung einer konzeptgebundenen Wöhlerlinie

## K<sub>eq</sub> Konzept

Für die hier zu Untersuchung stehende Nahtendsituation kann keine Strukturspannung sinnvoll definiert werden. Dennoch besteht aus Sicht der Praxis der Wunsch nach einem alternativen, hinsichtlich des Vernetzungsaufwandes einfacheren Bewertungskonzeptes. Im vorliegenden Fall besteht die Aussicht, ein weniger aufwendiges Konzept zu erstellen, darin, den Wurzelspalt als Riss zu modellieren. Dadurch entfallen die arbeitsintensiven Modellerstellungen für den Übergangstrichter. Jedoch wird – wenn dieser Abstraktionsschritt gegangen wird – erforderlich, dass Beanspruchung und Beanspruchbarkeit in einer mechanischen Größe formuliert werden, die der Bewertung einer Rissituation angepasst ist.

Deshalb soll im Rahmen dieses Projektes geprüft werden, ob eine Bewertung der Wurzelkerbe mit dem sogenannten K<sub>eq</sub> Konzept zu tauglichen Ergebnissen führt. Dieses wurde bereits erfolgreich für Punktschweißverbindungen (FAT Schriftenreihe 196) eingesetzt. Eine Übersicht über die bekannten Konzepte gibt Bild 19. Hieraus ist zu erkennen, dass das K<sub>eq</sub> Konzept gegenüber dem Strukturspannungskonzept einen Schritt weiter geht, da es in der Lage ist, die einen Teil der geometrischen Randbedingungen mit abzubilden.

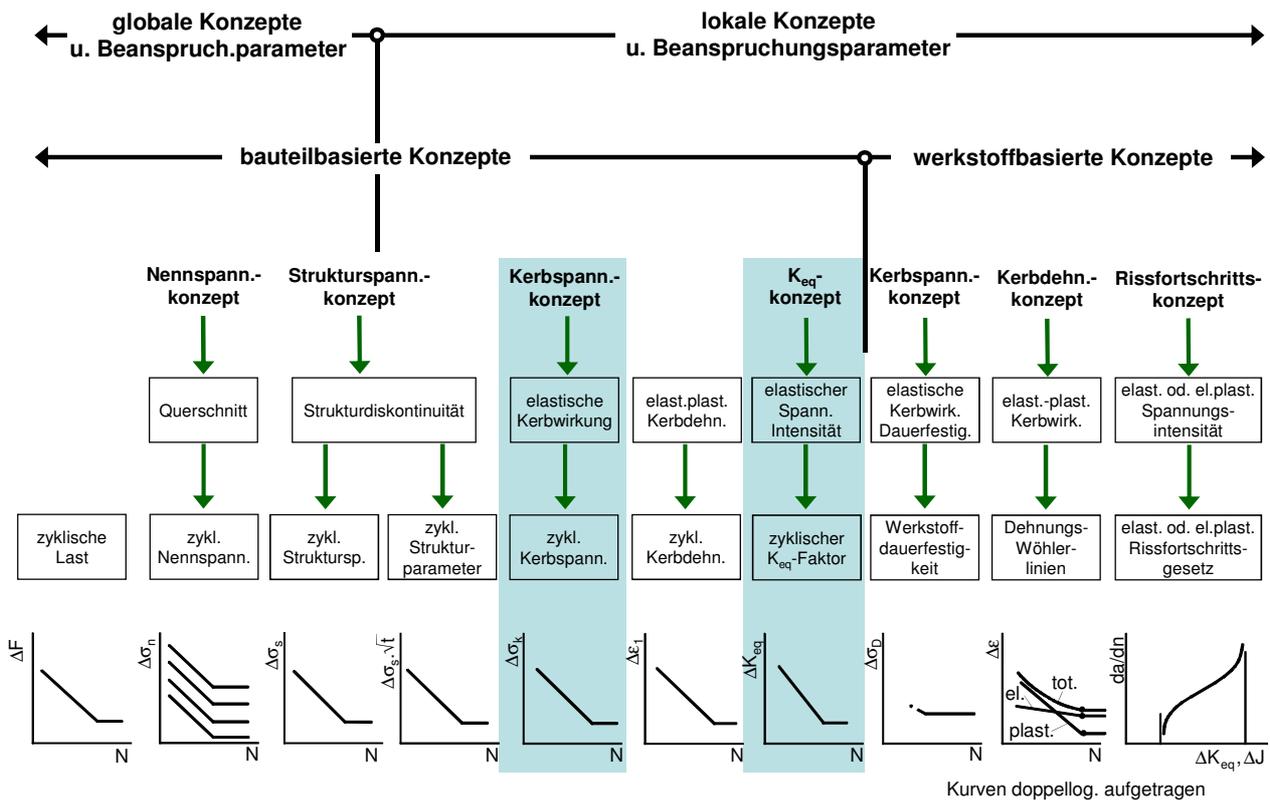


Bild 19: K<sub>eq</sub> Konzept

Bei dem K<sub>eq</sub> Konzept wird der Spalt in der Wurzelkerbe als Riss definiert und hierfür ein Spannungsintensitätsfaktor berechnet. Die Idee hierbei ist, dass nun nicht mehr eine Struktur- oder Kerbspannung als Vergleichswert dient, sondern mit K ein Riss Spitzenparameter, welcher mit bruchmechanischen Mitteln berechnet wird. An dieser Stelle sei jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich hier nicht um eine Rissfortschrittsrechnung handelt. Auch ist in diesem Zusammenhang der Begriff „Riss“ irreführend. Die ohnehin vorhandene Wurzelkerbe wird lediglich ersatzweise als Riss abgebildet, sodass nun der Spannungsintensitätsfaktor als Vergleichswert genutzt werden kann (siehe Bild 20)

rechts). Dieser kann beispielsweise in einem einzigen Rechenschritt mit dem FE Programm Abaqus® berechnet werden (Berechnung erfolgt intern über ein Gebietsintegral).

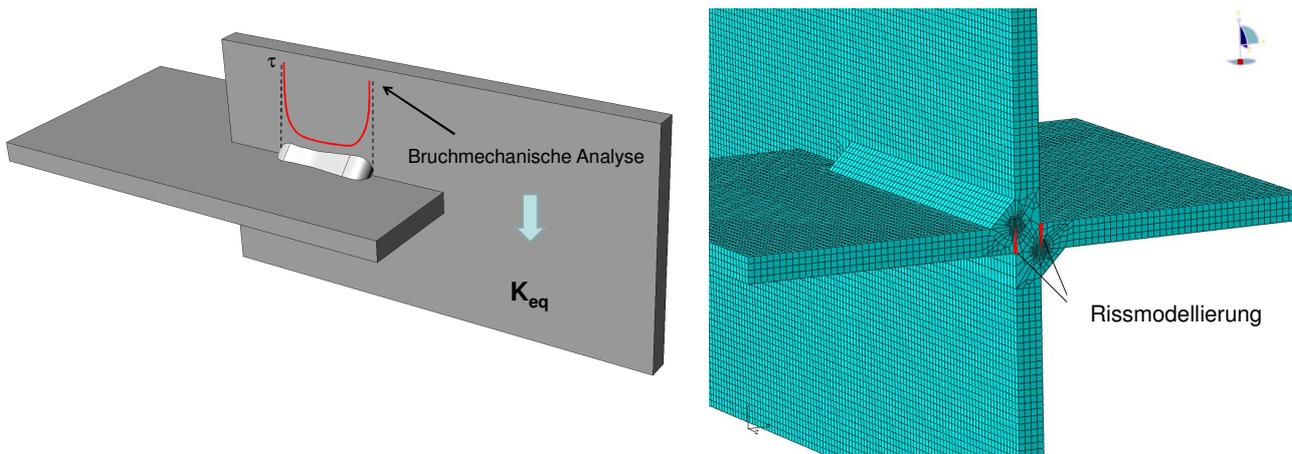


Bild 20: Vorgehen  $K_{eq}$  Konzept

Ziel wäre es also, eine Vernetzungsrichtlinie zu erstellen, mit der auf der einen Seite eine konzeptgebundene Spannungsintensitätsfaktor-Wöhlerlinie auf der Widerstandsseite gegeben werden kann. Auf der anderen Seite können hiermit die Einwirkungen berechnet werden und so ein Betriebsfestigkeitsnachweis geführt werden.

### Umsetzung der Ergebnisse

Die Umsetzung der Ergebnisse, die im Wesentlichen aus einer erweiterten Vernetzungsrichtlinie für das Kerbspannungskonzept bestehen wird, wird unmittelbar in den Berechnungsabteilungen der beteiligten Firmen erfolgen. Sie bekommen ein Verfahren an die Hand, mit dem die Schwingfestigkeit der Nahtenden unter Schubbelastung in Dünnschichtstrukturen mit derselben Treffsicherheit bewertbar sein wird wie bisher die Schweißverbindung an sich. Dadurch können in bewährter Weise bereits im Entwurfstadium zuverlässige Aussagen zu Konstruktionsvarianten durchgeführt werden, was letztlich zur Verkürzung von Produktentwicklungszeiten beitragen wird.

### Bezug der angrenzenden FuE-Arbeiten; Vorarbeiten; Literaturangaben

Das Vorhaben setzt eine erfolgreiche Reihe von Vorhaben zur Entwicklung und Erprobung von Berechnungsverfahren für die Schwingfestigkeit von Dünnschichtstrukturen aus dem betreuenden Arbeitskreis fort. Allen voran ist hier natürlich das Vorgänger Projekt A249 zu nennen, in dem bereits gezeigt wurde, dass die Bewertung nach den hier angestrebten Methoden möglich ist. Außerdem sind die Vorhaben A154 [13], A205 [14] und A222 [15] zu erwähnen die ebenfalls im Bereich der Dünnschichtstrukturen gute Ergebnisse brachten.. Dabei wird es zu keinerlei Überschneidung kommen, da im hier beantragten Vorhaben der Fokus ausschließlich auf der Lösung des in bisherigen Untersuchungen ausgeklammerten Problems der Schweißnahtenden liegt.

Darüber hinaus soll erstmals das Kerbspannungskonzept systematisch dahingehend erweitert werden, dass individuelle Nahtwurzelgeometrie bewertbar werden. Diesbezüglich hat die Forschungsstelle in früheren Untersuchungen gezeigt [20], [25] dass die Technik der Spannungsberechnung mittels FEM auch für Strukturen einsetzbar ist, deren individuelle Geometrie durch einen dreidimensionalen Oberflächenscan erhalten wurde. Diese Technik kann künftig auch zur Bewertung anderer Schweißnaht- bzw. Geometriedetails eingesetzt werden, da im Rahmen des Vorhabens Empfehlungen zur Modellierung typischer Nahtengeometrien erarbeitet werden.

Die Forschungsstelle, das Fachgebiet Werkstoffmechanik der TU Darmstadt unter der Leitung von Prof. M. Vormwald, befasst sich seit Jahren mit der konzeptkonformen Modellierung und Lebensdauerberechnung von komplexen geschweißten Bauteilen. Dabei entstand eine Reihe von Veröffentlichungen. In [28] wurden geschweißte Rohrknoten einer bruchmechanischen Bewertung unterzogen. Neuere Arbeiten befassen sich vornehmlich mit der vergleichenden Bewertung von Nenn- und Strukturspannungskonzept sowie dem Konzept der örtlich elastischen Beanspruchungen [29], [30], [31], [32]. Darüber hinaus wurde in einem kürzlich abgeschlossenen Forschungsvorhaben die Festigkeit von Schweißverbindungen aus hoch- und höchstfesten mit normalfesten Stählen unter statischer und zyklischer Belastung sowohl experimentell als auch unter Anwendung oben genannter Konzepte untersucht [25], [33], [34]. Die Bewertung lokaler Berechnungskonzepte zur Ermüdungsfestigkeit von Punktschweißverbindungen war Gegenstand einer Studie [35] die am Fachgebiet Werkstoffmechanik der TU Darmstadt in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF) sowie Prof. Radaj angefertigt wurde.

## Literatur

- [1] Ritter, W., Olivier, R.: „Wöhlerlinienkatalog für Schweißverbindungen aus Baustählen, Teil 1: Stumpfstoß“, DVS Berichte 56/I, Düsseldorf 1979.
- [2] Ritter, W., Olivier, R.: „Wöhlerlinienkatalog für Schweißverbindungen aus Baustählen, Teil 2: Quersteife“, DVS Berichte 56/II, Düsseldorf 1980.
- [3] Ritter, W., Olivier, R.: „Wöhlerlinienkatalog für Schweißverbindungen aus Baustählen, Teil 3: Doppel-T-Stoß (Kreuzstoß)“, DVS Berichte 56/III, Düsseldorf 1981.
- [4] Ritter, W., Olivier, R.: „Wöhlerlinienkatalog für Schweißverbindungen aus Baustählen, Teil 4: Längssteife“, DVS Berichte 56/IV, Düsseldorf 1982.
- [5] Ritter, W., Olivier, R.: „Wöhlerlinienkatalog für Schweißverbindungen aus Baustählen, Teil 5: Längskehlnaht, aufgeschweißter Bolzen, Brennschnittkante“, DVS Berichte 56/V, Düsseldorf 1985.
- [6] Ritter, W.: „Kenngrößen der Wöhlerlinien für Schweißverbindungen aus Stählen“, Heft 53, Veröffentlichung des Instituts für Stahlbau und Werkstoffmechanik der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt 1994.
- [7] Hobbacher, A.: „Recommendations for fatigue Design of Welded Joints and Components“, IIW-Document XIII-1965-03/XV-1127-03, Paris, 2007.
- [8] Eurocode 3, prEN 1993-1-9: „Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1.9: Ermüdung“, Entwurf Status 49, 17. Mai 2003.
- [9] Xiao, Z.-G.; Yamada, K. A.: „Method of Determining Geometric Stress for Fatigue Strength Evaluation of, Steel Welded Joints“, Int. J. Fatigue, 26 (2004), S. 1277 – 1293
- [10] Dong, P.A.: „Structural Stress Definition and Numerical Implementation for Fatigue Analyses“, Int. J. Fatigue, 23 (2001), S. 865-876.
- [11] Radaj, D., Sonsino, C.M.: „Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches“, Abington Publishing, Cambridge England, 1998.
- [12] Radaj, D.: „Kerbwirkung von Schweißstößen hinsichtlich Ermüdung“, Konstruktion 36 (8), S. 285-292, 1984.
- [13] Sonsino, C.M., Hanselka, H., Wallmichrath, M., Eibl, M., „Ingenieurmäßiges Berechnungsverfahren zur Lebensdauerabschätzung von geschweißten Dünnschweißverbindungen“, FAT-Schriftreihe Nr. 179, 2003.
- [14] Willen, J., Esderts, A.: „Berechnungsmethoden für die Lebensdauerabschätzung von MSG- bzw. lasergeschweißten Kehlnähten dünnwandiger Stahlbaukonstruktionen“, FAT-Schriftenreihe Nr. 197, 2005.

- [15] Sonsino, C.M., Bruder, T.: „Betriebsfeste Bemessung von mehrachsig belasteten Laserstrahl-Schweißverbindungen aus Stahl-Feinblechen des Karroseriebaus“, Projekt A222 der FAT – Forschungsvereinigung Automobiltechnik, Fraunhofer Institut Betriebsfestigkeit Systemzuverlässigkeit, LBF Darmstadt, 2009.
- [16] Seto, A., Yoshida, Y., Galtier, A.: „Fatigue properties of arc-welded lap joints with weld start and end points“, *Fatigue Fract Engng Mater Struct* 27, pp. 1147-1155, 2004.
- [17] Yoshida, Y., Seto, A., Galtier, A.: „Fatigue Life Prediction for Arc Welded Sheet Structural Parts“, *Proceedings FatigueDesign2005*, Cetim Senlis, S. 37ff
- [18] Haibach, E.: *Betriebsfestigkeit. Verfahren und Daten zur Bauteilbeurteilung*. Springer, 2. Auflage. 2002.
- [19] Bellet, D., Taylor, D., Marco, S., Mazzeo, E., Guillois, J., Pircher, T.: „The Fatigue Behaviour of three-dimensional stress concentrations“, *Int. J. Fatigue* 27 (2005), S. 207–221.
- [20] Schliebner, R., Vormwald, M.: „Schwingfestigkeitsanalyse eines geschweißten Winkelknotens auf der Basis von lokalen Konzepten“ *Stahlbau*, 72(4), S. 245-253, 2003.
- [21] Köttgen, V.B., Zingsheim, F., Hack, M., Speckart, M.: „A New Approach for Numerical Fatigue Life Prediction of Parts or Systems with Seam Welds“, LMS international. Kaiserslautern 2003-01-2772.
- [22] Eibl, M.: „Berechnung der Schwingfestigkeit laserstrahlgeschweißter Feinbleche mit lokalen Konzepten“, Dissertation, TU Darmstadt, 2003.
- [23] Barkey, M.E., Zingsheim, F., Hack, M., Speckart, M., Schäfer, G.: „LMS Falangs User Manual“, LMS international. Kaiserslautern 1998-2002.
- [24] Chmielewski, R., de Bruyne, F., Heuler, P., Waltz, M.: „Rechnerische Bewertung geschweisster Karosseriestrukturen mit einer Submodelltechnik“, in 32. Tagung des DVM-Arbeitskreises Betriebsfestigkeit, Darmstadt, DVM-Bericht 132, S. 223–234, 2005.
- [25] Schliebner, R., Vormwald, M.: „Fatigue of Welded Hybrid-Joints“, *Mat.-wiss. U. Werkstofftech.* 2005, 36(11), S. 706–714.
- [26] Radaj, D., Stoppler, W.: „Loading state in spot-like overlap joints determined by correlation of deformation patterns“, *Mat.-wiss. U. Werkstofftech.* 2004, 35(1), S. 5–12.
- [27] Sonsino, C.M., Hahn, O.: „Entwicklung einer Methode zur vergleichenden Bewertung von Schwingfestigkeitsversuchen mit gefügten Stahlblechen in Abhängigkeit des Versagensverhaltens“, Projekt A233 der FAT- Forschungsvereinigung Automobiltechnik, Fraunhofer Institut Betriebsfestigkeit Systemzuverlässigkeit, LBF Darmstadt und LWF, Universität Paderborn, 2006.
- [28] Vormwald, M.: „A Fracture Mechanics Based Fatigue Life Prediction for Offshore Tubular Joints“, *Proc. Of the First International Offshore and Polar Engineering Conference*, Edinburgh, S. 451-457, 1991.
- [29] Savaidis, G., Savaidis, A., Schliebner, R., Vormwald, M.: „Hot-Spot Stress Evaluation of Fatigue Evaluation of Fatigue of Fillet Welded Joints in Vehicle Components Under Multiaxial Service Loads“ in: A.M. de Freitas, Carpinteri (ed): *Biaxial and Multiaxial Fatigue*, ESIS-STP, S. 23-42, 2002.
- [30] Savaidis, G., Schliebner, R., Vormwald M.: „Lebensdauerermittlung von geschweißten, mehrachsig belasteten Nutzfahrzeugkomponenten – Vergleich von Schwingfestigkeiten aus Rechnung und Versuch bei nichtproportionaler Beanspruchung“, *Materialprüfung* 43 (10), S. 381-386, 2001.
- [31] Savaidis, G., Vormwald, M.: „Hot-Spot Stress Evaluation of Fatigue in Welded Structural Connections Supported by Finite Element Analysis“, *International Journal of Fatigue* 22, S. 85-91, 2000.
- [32] Savaidis, G., Savaidis, A., Schliebner, R., Vormwald, M.: „Evaluation of Fatigue of Fillet Welded Joints in Vehicle Components Under Multiaxial Service Loads“ in: Bi-

axial and Multiaxial Fatigue, ESIS Publication 31, Elsevier, ISBN: 0-08-044129-7, S. 23-41, 2003.

- [33] Schliebner, R., Hildebrandt, J., Vormwald, M., Werner, F.: „Simulation, Berechnung und Schwingfestigkeitsuntersuchung von Schweißverbindungen zwischen normal- und höchstfesten Feinkornbaustählen“ in: Konferenz-Einzelbericht, DVS-Berichte, Band 232, Schweißen und Schneiden, Große Schweißtechnische Tagung, S.288-194 Magdeburg 22.-24.Sept., 2004.
- [34] Vormwald, M., Schliebner, R.: „Lebensdauerbewertung hochfester Hybridschweißverbindungen unter Schwingbeanspruchung“, Materialprüfung, 48 (7-8), S. 352-357, 2006.
- [35] Seeger, T., Greuling, S., Brüning, J., Leis, P., Radaj, D., Sonsino, C.M.: „Bewertung lokaler Berechnungskonzepte zur Ermüdungsfestigkeit von Punktschweißverbindungen“, Heft 196 in der Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Automobiltechnik, 2005.
- [36] Festigkeit geschweißter Bauteile, Anwendbarkeit lokaler Nachweiskonzepte bei Schwingbeanspruchung, DVS Bericht Band 256, 2009