FORSCHUNGSVEREINIGUNG AUTOMOBILTECHNIK E.V.

FAT-SCHRIFTENREIHE

FAT 250

Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Feinbleche aus Stahl unter Schubbeanspruchung

VDA Verband der Automobilindustrie

Schwingfestigkeit von Nahtenden MSG-geschweißter Feinbleche aus Stahl unter Schubbeanspruchung

(AVIF A 268)

Forschungsstelle:

Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Werkstoffmechanik
Prof. Dr.-Ing. Michael Vormwald

Verfasser:

M.Sc. Ehsan Shams

Das im Folgenden dargestellte Forschungsprojekt

Schwingfestigkeit von Nahtenden MSG-geschweißter Feinbleche aus Stahl unter Schubbeanspruchung

wurde gefördert von der gemeinnützigen 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 wurde das Forschungsvorhaben 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 dem Arbeitskreis AK 25 Fügetechnik der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) im Auftrage des Verbandes der Automobilindustrie e.V. (VDA)

Der nachstehende Bericht fasst Zielsetzung und wichtigste Ergebnisse des Forschungsprojektes zusammen.

Kurzfassung

Im AVIF-Projekt A 249 „Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Dünnbleche aus Stahl“ konnte ein Konzept zur Schwingfestigkeitsbewertung von Schweißnahtenden unter Längs- und Querzug sowie Biegung erarbeitet werden. Im Rahmen des vorliegenden AVIF Projektes A 268 „Schwingfestigkeit von Schweißnahtenden unter Schubbeanspruchung“ sollte dieses Konzept auf den Lastfall Schub erweitert werden.

Kern des Projektes A 268 war die Erfassung der realen Nahtgeometrie mittels eines optischen 3D Scanners (Flächenauflösung: 30µm, Tiefenauflösung: 5µm) zur Berücksichtigung des für den Lastfall Schub maßgebenden Übergangsbereiches vom Nahtfuß zur Nahtwurzel sowie der Wurzelkerbe selbst.

Es ist hierbei erstmals gelungen, durch kryogenisches Aufbrechen der Schweißnaht auch die Geometrie der Wurzelkerbe mit dem Scanner aufzunehmen. Um die aufgebrochene und anschließend gescannte Naht numerisch berechnen zu können, wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem sich aus den Scans vor und nach dem Aufbrechen der Naht ein geschlossener Volumenkörper bilden lässt. Die Berechnung der Kerbspannungen erfolgte mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente unter Zuhilfenahme der Submodelltechnik. In einem ersten Submodell mit komprimiertem Netz kann der Ort der maximalen Kerbspannung identifiziert werden. An einem zweiten Submodell mit höchster Ortsauflösung wurden die Kerbspannungen bestimmt. Das Grobmodell wurde per Hand modelliert und stellt eine Idealisierung der Naht dar.

Auf Basis des im Rahmen des Vorgängerprojektes AVIF A 249 entwickelten parametrisierten Nahtendmodells konnte ein idealisiertes Nahtendmodell für den Lastfall Schub entwickelt werden. Die neuen Parameter wurden durch Geometrieanpassung bestimmt. Mit diesem idealisierten Nahtendmodell, dass für den Lastfall Schub optimiert ist, lassen sich die für diesen Lastfall maßgebenden Kerbspannungen auch örtlich vorhersagen.

In Verbindung mit den Versagensschwingspielzahlen aus den rund 75 Schwingversuchen wurde eine konzeptgebundene Kerbspannungswöhlerlinie für einen Referenzradius $r = 0{,}05$ mm erstellt. Somit liegt eine in sich geschlossene Bewertungsmethode nach dem Kerbspannungskonzept für Schweißnahtenden unter Schubbeanspruchung vor. Hierbei wird die Einwirkung mit dem idealisierten Nahtendmodell berechnet und auf der Widerstandsseite mit der konzeptgebundenen Wöhlerlinie verglichen.

Des Weiteren wurde mit Hilfe der Bruchmechanik ein weiteres Nachweiskonzept vorgeschlagen, in dem der Spannungsintensitätsfaktor K bzw. die Energiefreisetzungsrate G als Beanspruchungsparameter dient. Hierbei entfallen die Scan- und Vernetzungsarbeiten. Die Schweißnaht kann vereinfachend durch einen Dreieckquerschnitt modelliert werden. Jedoch ist der vorhandene Wurzelspalt als Riss zu modellieren. Der zur Berechnung der Spannungsintensitätsfaktoren sowie für die Energiefreisetzungsrate modellierte Riss ist damit genau so lang wie die Naht, womit auch prinzipiell die Beanspruchung über die gesamte Nahtlänge ermittelt werden kann. Die K-Faktoren werden zum Nahtende hin extrapoliert. Auch hier wurde aus den Schwingversuchen eine konzeptgebundene Spannungsintensitätsfaktorwöhlerlinie erstellt.

Bedeutung für die Praxis

Mit den hier angegebenen Hilfsmitteln können nun Schweißnahtenden nach dem Kerbspannungskonzept auch für den Lastfall Schub bewertet werden.

Für die Praxis bedeutet dies einen deutlichen Zugewinn an Präzision und Effizienz bei der Bemessung von Schweißnähten. Desweitern können zeit- und kostenintensive Versuchsreihen im Vorherein viel besser geplant werden, sodass der experimentelle Umfang eingeschränkt werden kann.

Da die für die Konzepte notwendigen Nahtendgeometrien sowie deren Vernetzungsrichtlinen in parametrisierter Form erstellt wurden, können diese in kommerzielle Software eingearbeitet werden.

Danksagung

Für die finanzielle Förderung dieses Projektes sei an dieser Stelle der gemeinnützigen Stahlanwendungsforschung im Stiftverband für die Deutsche Wissenschaft e.V. und der Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall verarbeitenden Industrie e.V. (AVIF) gedankt.

Außerdem bedanken wir uns bei den Mitarbeitern des Arbeitskreises und des Betreuerkreises für die kritischen und konstruktiven inhaltlichen Anmerkungen während der Projektlaufzeit.

Unser Dank geht ebenso an Volkswagen AG, BMW Group, Ford-Werke GmbH, Audi AG und Kirchhoff-Automotive GmbH für die erbrachten Sach-/ Eigenmittel zum vorliegenden Forschungsvorhaben.

Inhalt

1. Einleitung 1
   1.1. Stand der Technik und Forschung 1
   1.2. Ausgangsbasis 3
   1.3. Zielsetzung 8
   1.4. Arbeitspakete 9
2. Experimenteller Teil 11
   2.1. Vorbereitung der Probekörper 11
   2.2. Stecklaschenprobe 12
   2.3. Rohrprobe 18
   2.4. Zusammenstellung der Ergebnisse 22
3. 3D Erfassung der Schweißnähte 23
   3.1. 3D Scanner optoTOP HE 1175 23
   3.2. Arbeitsschritte 24
4. Berechnung der Kerbspannungen mit gescannter Geometrie 29
   4.1. Allgemeines 29
   4.2. Geometrieanalyse 30
   4.3. Numerische Analyse 39
5. Konzeptbildung 43
   5.1. Idealisiertes Nahtendmodell nach A 249 43
   5.2. Bestimmung der neuen Parameter 48
   5.3. Konzeptgebundene Kerbspannungswöhlerlinie 52
6. Bruchmechanische Analysen 55
   6.1. Einleitung 55
   6.2. Spannungsintensitätsfaktoren 57
   6.3. Energiefreisetzungsrate 60
7. Zusammenfassung 63
8. Literatur 64
9. Anhang 66

1. Einleitung

1.1. Stand der Technik und Forschung

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 Nahtendbereichen. 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 3 [8] sind hinsichtlich Nahtenden unter Verwendung des Nennspannungskonzeptes wenige Informationen niedergelegt.

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 Strukturspannungsnachweis 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 Eckensingularitäten.

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 wurde mit den jüngst abgeschlossenen Vorhaben A 154 [11] und insbesondere A 205 [12] „Berechnungsmethoden für die Lebensdauerabschätzung von MSG- bzw. lasergeschweißten Kehlnähten in dünnwandigen Stahlblechstrukturen“, wesentliche Fortschritte 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 schwellender Beanspruchung bei demselben Grundwerkstoff in eine Masterwöhlerlinie unter geringer Streuung vereint werden.

Dabei wird mit einem Kerbradius von r = 0,05mm gerechnet. Schweißnahtenden jedoch wurden hier bisher nicht betrachtet.

Das kürzlich abgeschlossene AVIF-Vorhaben A 222 [13] „Betriebsfeste Bemessung von mehrachsig 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. [14], [15] 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 [16] ansehen. Durch die unterschiedliche Definition, die unterschiedlichen Blechdicken und das spezielle dreidimensionale Beanspruchungsfeld sind die Strukturdehnungswöhlerlinien nach Haibach und Seto jedoch nicht direkt vergleichbar. Eine Schubbelastung wurde nicht untersucht.

Auf die besondere Beanspruchungssituation einiger dreidimensionaler Spannungskonzentrationen weisen auch Bellet et al. [17] hin. Sie haben neben diversen Probenformen mit Schweißnahtenden auch ungeschweißte Proben mit einer scharfen, punkt-konzentrierten 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 Spannungskonzentrationen deutlich höhere Stützziffern als übliche, zweidimensionale Kerbsituationen haben müssen.

Die Ergebnisse der Untersuchung von Schliebner et al. [18], die für eine derartige dreidimensionale Kerbsituation ebenfalls deutlich konservative Lebensdauerabschätzungen nach allen gängigen Konzepten ergeben haben, stützen die Schlussfolgerungen von Bellet. Schliebner [19] hatte im Rahmen seiner Untersuchungen zur Bewertung der Schwingfestigkeit von Hybridschweiß-Verbindungen für das Kerbspannungskonzept die Möglichkeit, in Einzelfällen die reale Geometrie der Schweißnaht zu erfassen. Dabei zeigte sich, 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 [20]-[22]. Erste konzeptgebundene Schwingfestigkeitskennwerte liegen vor, sind jedoch stark unterschiedlich [20],[21]. Die Arbeit von Chmielewski et al. [22] 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.

Im Cluster-Projekt „Anwendbarkeit lokaler Nachweiskonzepte bei Schwingbeanspruchung“ [23] wurden einige wenige Nahtenden untersucht. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Modellierung von Nahtenden großen Einfluss auf die ertragbare Kerbspannungen hat.

1.2. Ausgangsbasis

Vorgängerprojekt „Schwingfestigkeit von Nahtenden“

Da aus den in Kapitel 1.1 genannten Gründen keine ausreichend genaue Bewertung von Nahtenden an Feinblechen möglich war, wurde das Projekt AVIF A 249 „Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Dünnbleche aus Stahl“ [24] initiiert. Kern des Vorhabens war das Scannen der Schweißnähte mit einem hochauflösenden 3D Scanner (Flächenauflösung 30µm, Tiefenauflösung 5µm) zur genauen Ermittlung der Einbrandkerbgeometrie von Nahtenden. Somit konnten erstmals in großem Umfang Kerbspannungen an der tatsächlichen Geometrie berechnet werden. Ein Scan einer im Rahmen dieses Projektes getesteten Naht ist in Abbildung 1 zu sehen.

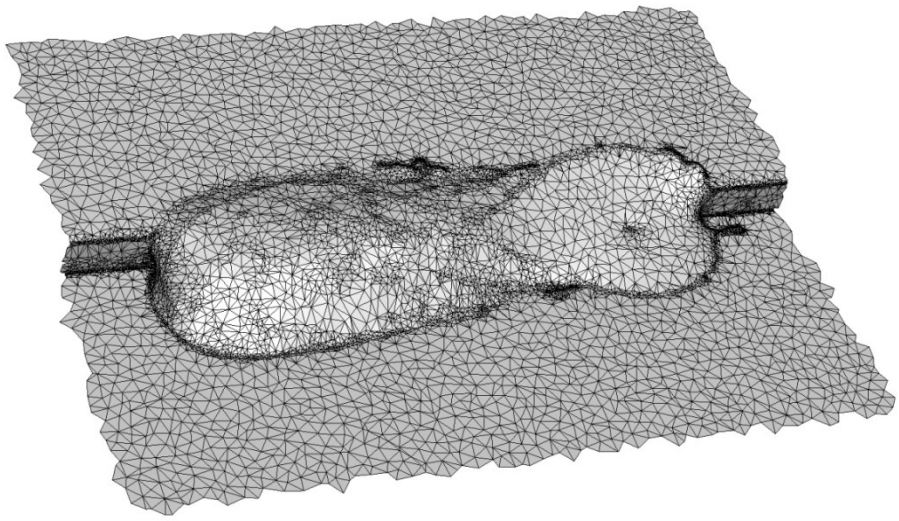

Abbildung 1: Scan einer Schweißnaht

Es ist hierbei gelungen, aus den gescannten Oberflächen Volumenmodelle zu erstellen und diese mit der Methode der Finiten Elemente (FE-Methode) unter Zuhilfenahme der Submodelltechnik zu berechnen. Das Submodell wird als lokaler Schweißnahtbereich in das zuvor berechnete Grobmodell der gesamten

Überlappprobe eingebaut. Ein so entstandenes Submodell ist beispielhaft in Abbildung 2 zu sehen.

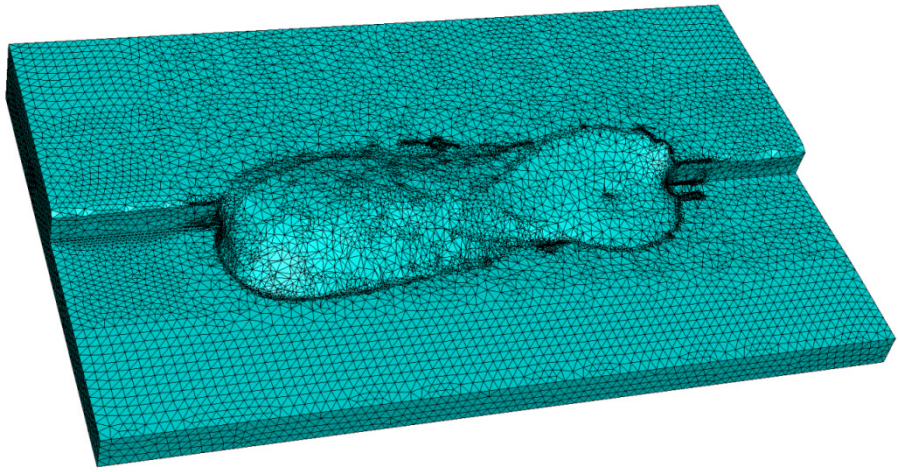

Abbildung 2: Volumenmodell des Scans

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

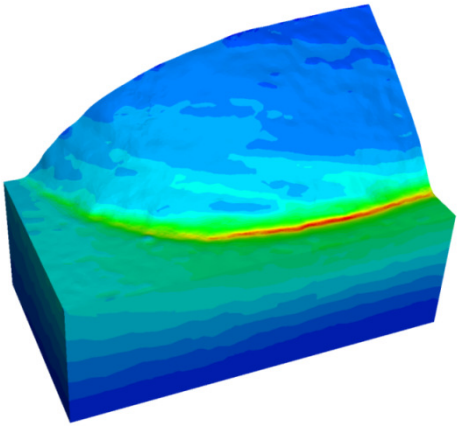

Abbildung 3: Kerbspannung berechnet mit höchster Scanauflösung

Mit den aus der Berechnung gewonnenen Ergebnissen sowie den Versagensschwingspielzahlen 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 idealisiert abgebildet werden kann. Dies geschah für das Kerbspannungskonzept als auch für das Strukturspannungskonzept (Abbildung 4). So kann nun erstmalig eine repräsentative Beanspruchung am Nahtende für das jeweilige Konzept berechnet werden.

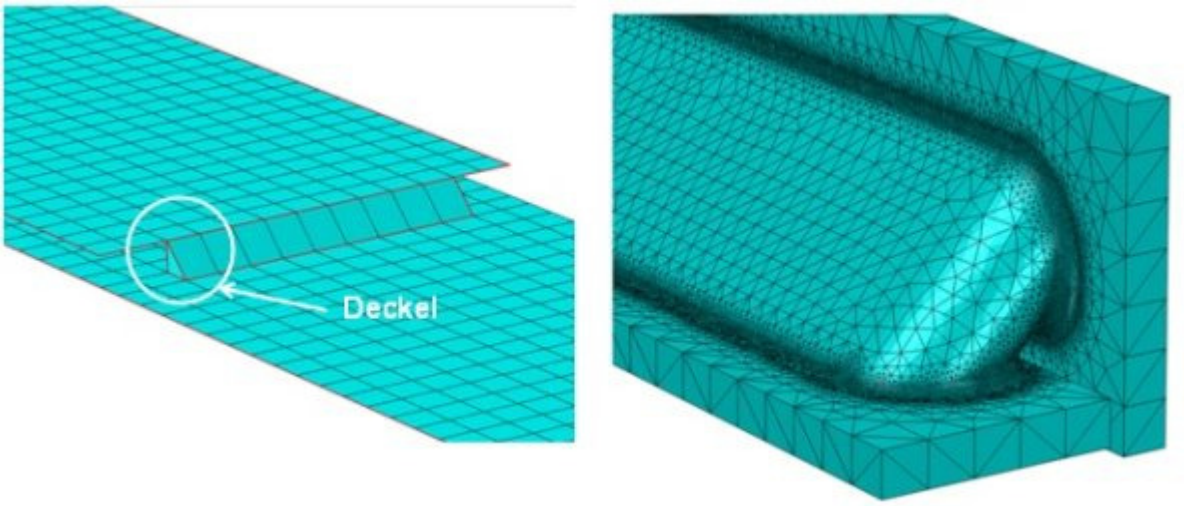

Abbildung 4: Modellierung Strukturspannungskonzept (links) und Kerbspannungskonzept (rechts)

Zur endgültigen Nachweisführung wurden aus den idealisierten Nahtendmodellen in Kombination mit den Versuchsergebnissen die in Abbildung 5 dargestellten konzeptgebundenen Wöhlerlinien berechnet. Somit ist nun ein Nachweis im Rahmen des Struktur- und Kerbspannungskonzeptes möglich.

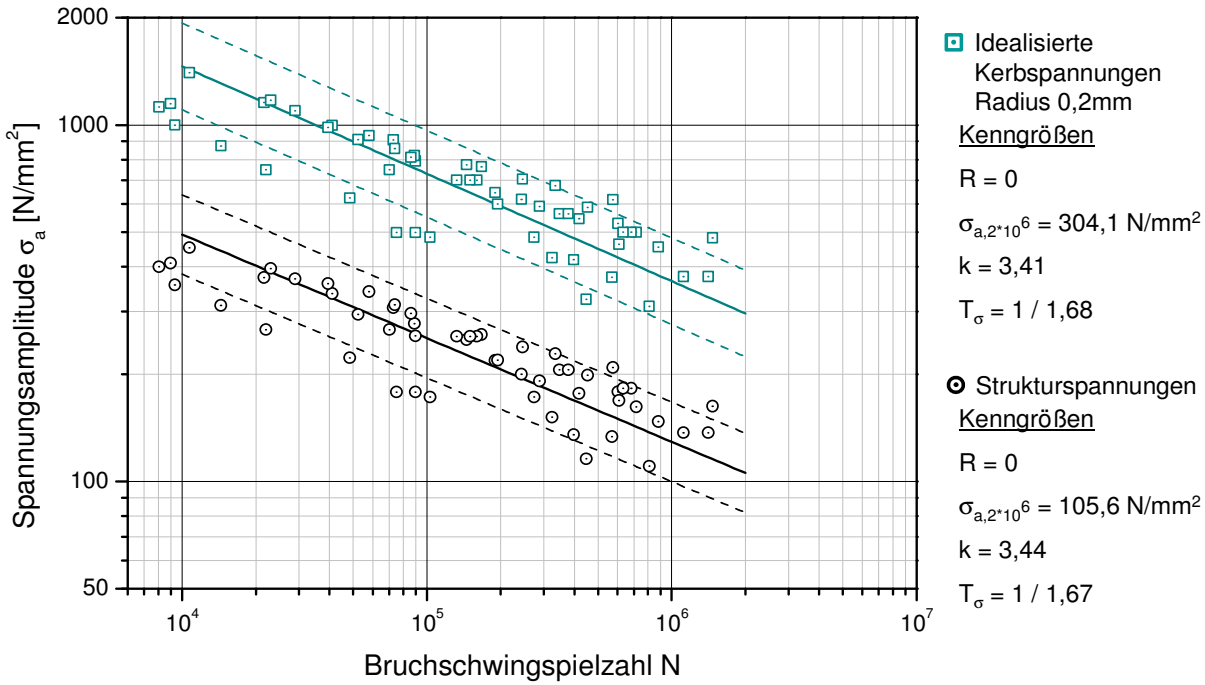

Abbildung 5:Konzeptgebundene Wöhlerlinien

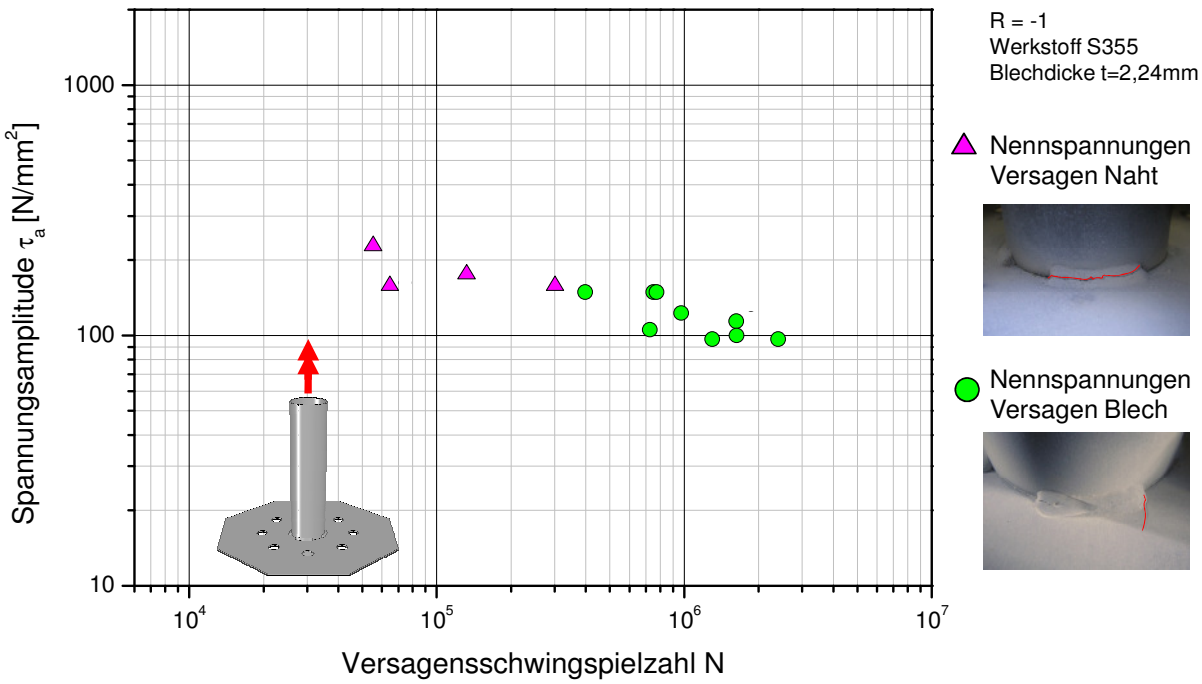

Abbildung 6: Bruchschwingspielzahl N

Alle hier gezeigten Ergebnisse gelten für Längszug, Querzug und Biegung. Der Lastfall Schub stellt einen Sonderfall dar. Bei der hierfür vorgesehenen Versuchsreihe – Rohr durchdringt Blech und ist mit vier Stepnähten angeschlossen (Abbildung 7) – zeigte sich, dass es zwei verschiedene Versagensarten gibt, die lastabhängig scheinen. So wächst bei hoher Last der Riss über den Nahtrücken, bei niedriger Last in das angeschlossene Blech.

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

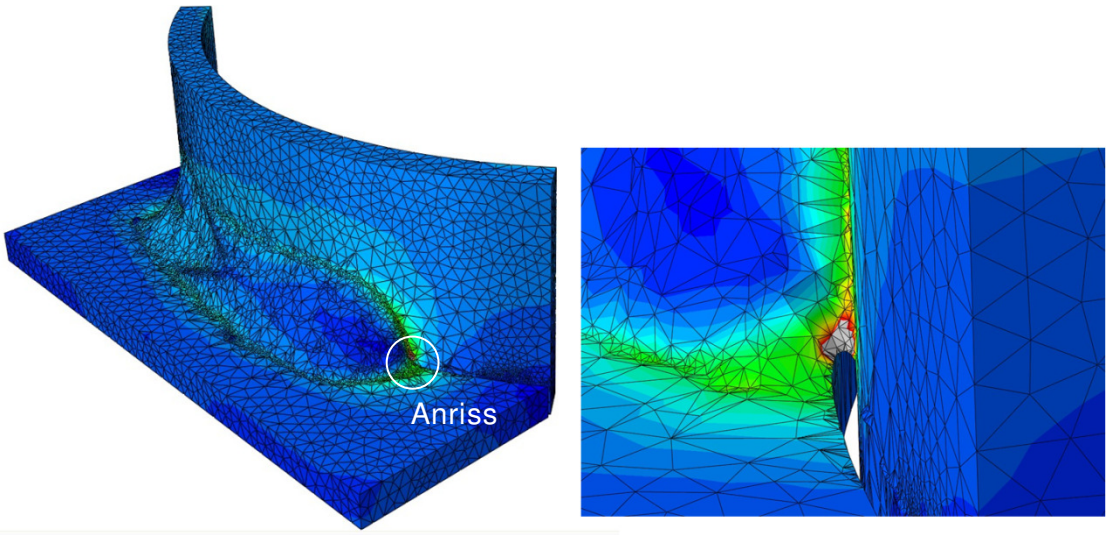

Abbildung 7: Rohrprobe unter Torsionbeanspruchung

Zudem finden durch den Anschluss mit vier Nähten im Versuch Spannungsumlagerungen statt, die die Lebensdauer zusätzlich beeinflussen. Da bei dem Vorgängerprojekt A 249 lediglich eine Versuchsreihe für den Lastfall Schub vorgesehen war, konnte dieser Lastfall aufgrund der gerade beschriebenen Problematik nicht in ausreichendem Maße untersucht werden. Dieser in Bezug auf Schweißnahtenden ohnehin eigenständige Lastfall wurde daher in dem vorliegenden Folgeprojekt bearbeitet, sodass ein an das Vorgängerprojekt A 249 anknüpfendes Nachweisverfahren entsteht. Zusammenfassend lässt sich also die Ausgangsbasis wie folgt beschreiben:

- **Ziel des Vorgängerprojektes:** Die Entwicklung eines allgemeingültigen Nachweiskonzeptes für Schwingfestigkeit von Schweißnahtenden unter Längs- und Querzug, Biege- sowie Schubbeanspruchung.
- **Grad der Erfüllung der Ziele des Vorgängerprojekts:** Das Ziel konnte für alle Beanspruchungsarten außer Schub erfüllt werden.
- **Gründe für Nichterreichen der Ziele und weiterer Forschungsbedarf:** Für Schub war dies nicht möglich, da hier lediglich eine Versuchsreihe zur Verfügung stand, in der sich zeigte, dass mehrere Versagensmechanismen in Abhängigkeit von der Geometrie und der Last auftreten können. Da Schub ohnehin einen gesonderten Lastfall darstellt, sind weitere Versuche an verschiedenen Probenausführungen nötig, um für das hier beschriebene Phänomen eine experimentelle Datenbasis zu schaffen um dieses numerisch beschreiben zu können.
- **Ziel des Anschlussvorhabens:** Ziel ist es daher, auch für den Lastfall Schub ein allgemeingültiges Nachweiskonzept zu erstellen, sodass die Bewertung der Schwingfestigkeit von Nahtenden zusammen mit dem Vorgängervorhaben vollständig möglich ist.

In den nächsten Abschnitten wird auf die Zielsetzung dieses Projektes und die durchgeführten Arbeitspakete näher eingegangen.

1.3. Zielsetzung

Im AVIF-Projekt A 249 wurde ein Konzept zur Schwingfestigkeitsbewertung von Schweißnahtenden unter Längs- und Querzug sowie Biegung erarbeitet. In dieser weiterführenden Untersuchung wird dieses Konzept um den Lastfall Schub erweitert, 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 Untersuchungen in Bezug auf diese Stelle durchgeführt werden. Dadurch wird die gezielte Zuordnung von Kerbgeometrie und Belastung zur experimentell mit der vermessenen Probe ermittelten Lebensdauer ermöglichet.

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 zutreffend berechnet werden können.

Da es sich bei dem Übergangstrichter um eine hoch komplexe, dreidimensionale Kerbe handelt, wird das Strukturspannungskonzept hier ausgeklammert. Stattdessen 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 hier erstmals 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.

1.4. Arbeitspakete

Das Forschungsprojekt A 268 besteht im Wesentlichen aus zwei Arbeitspaketen. 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. Dabei ist es gelungen, eine Methode zu entwickeln, mit der es erstmals möglich ist, eine Schweißnaht mittels optischem 3D Scan inklusive Wurzelkerbe zu erfassen.

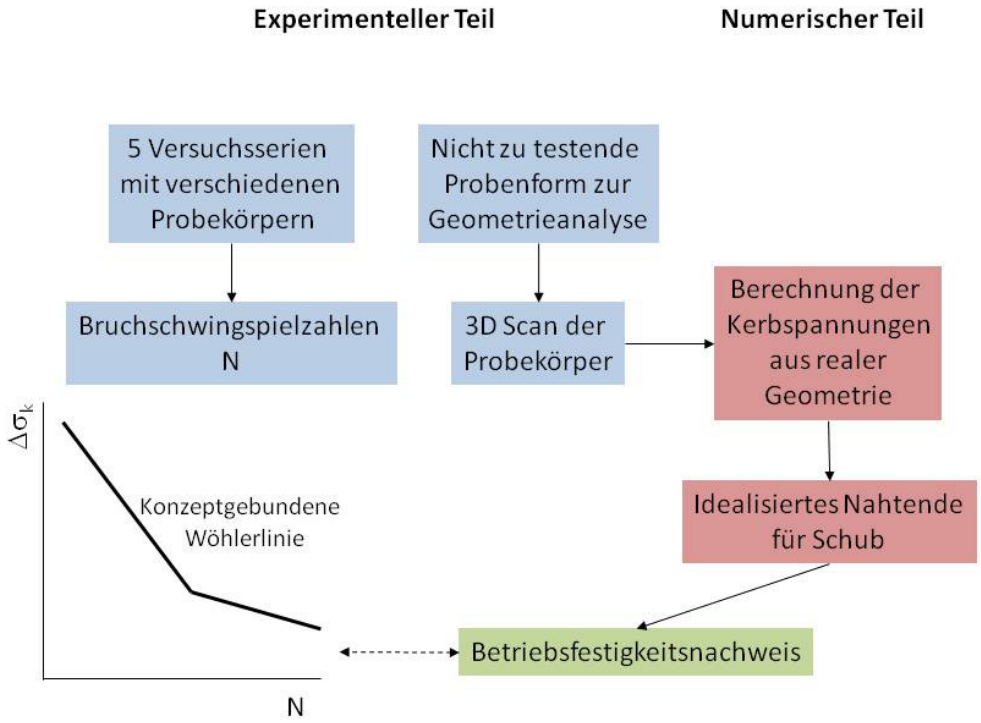

Abbildung 8: Übersicht über das Vorhaben

Im numerischen Teil lässt sich aus den Scandaten 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.

Aus dem Vorgängerprojekt A 249 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 Scannerdaten und deren Weiterverarbeitung zu FE-Modellen bereits vor.

2. Experimenteller Teil

Wie im Vorgängerprojekt sind bei den Probekörpern die Nahtlängen so gewählt, dass sich ein definiertes Nahtende und ein definierter Nahtanfang einstellen. Wie schon bekannt ist, unterschieden sich Nahtanfang und -ende in der Geometrie gründlich. Allerdings hat sich der Begriff "Nahtende" so eingebürgert, dass im vorliegenden Bericht fast ausschließlich der Begriff "Nahtende" verwendet wird. Wie schon aus dem Projekttitel hervorgeht, wird ausnahmslos der Lastfall Schub untersucht. Dabei sind bei allen Versuchsreihen die Nähte kraftübertragend. Die Probekörper können in zwei Typen eingeteilt werden: Stecklaschenprobe und Rohrprobe.

2.1. Vorbereitung der Probekörper

Das Grundmaterial bei den hergestellten Proben war ein S355MC. Alle Probekörper besitzen die Dicke t=3,5mm und wurden mittels Wasserstrahl geschnitten. Der große Vorteil bei diesem Verfahren besteht darin, dass es keine thermischen Belastungen auftreten. Zusätzlich gibt es bei diesem Verfahren keine Gratbildung und es ist für Feinblechstrukturen, wie hier der Fall, gut geeignet.

Die Probekörper wurden spannungsarm geglüht, um die Einflüsse aus Eigenspannungen, die sich infolge ungleichmäßiger Abkühlung nach dem Schweißvorgang entwickelt haben, zu mindern. Dafür wurden die Proben mit einer Temperatur von 600 °C über 6 Stunden im Vakuum geglüht und anschließend langsam abgekühlt.

Bei den Rohrproben wurde das Rohr vor dem Schweißvorgang abgedreht, um Unrundheiten zu beseitigen. Die Rohre wurden nur bis zur Mitte abgedreht, so dass der Dickensprung an den Proben (z.B. Abbildung 20) zu erkennen ist.

Um Risse während der Schwingversuche besser verfolgen zu können und bessere Bilder mit dem 3D Scanner zu erhalten (Kapitel 3), wurden die geschweißten und geglühten Probekörper vor den Schwingversuchen gesäubert. Hierfür wurde die Naht mit geringem Druck bei ungefähr 5-6 bar sandgestrahlt. Somit wurden die Schlacken, die sich durch den Schweißvorgang an einigen Stellen der Naht abgelagert hatten, entfernt.

Vor den Schwingversuchen wurden einige Schliffbilder erstellt, um die IST-Nahtdicken quantifizieren können. In Abbildung 9 links ist beispielhaft das Ergebnis einer Rohrprobe und in Abbildung 9 rechts das Ergebnis einer Stecklaschenprobe dargestellt.

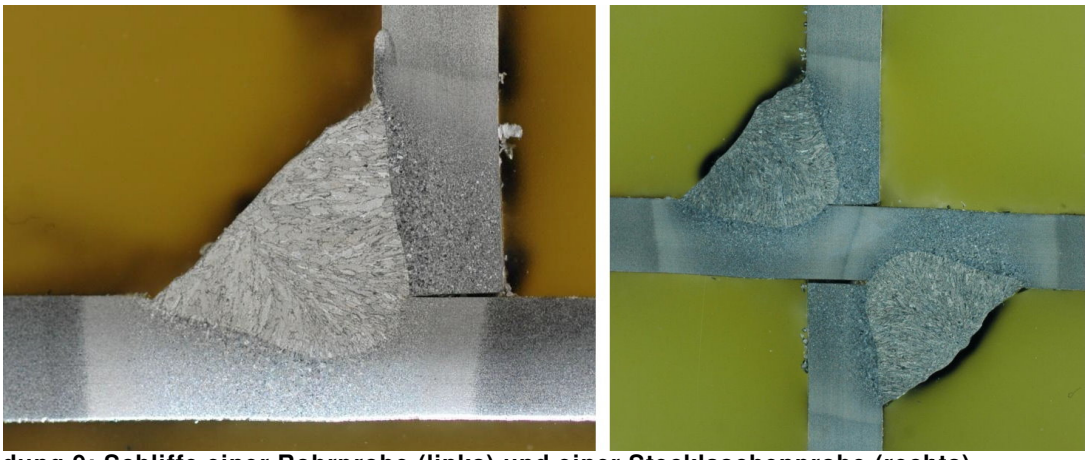

Abbildung 9: Schliffe einer Rohrprobe (links) und einer Stecklaschenprobe (rechts)

Im Folgenden wird auf die Geometrieddaten der Probekörper und die Ergebnisse aus den Schwingversuchen eingegangen.

2.2. Stecklaschenprobe

Allgemeines

Aus Vorversuchen, die im Vorfeld des Forschungsvorhabens durchgeführt wurden, war bekannt, dass sich die einseitig geschlitzte Stecklaschenverbindung als sehr gute Probenform für den Lastfall Schub herausgestellt hat. Einseitig bedeutet, dass im Überlappungsbereich nur eins der beiden Bleche einen Schlitz (am Ende ausgerundet) aufweist. Die Dicke der Bleche ist bei allen Stecklaschenproben konstant. Die Dicke und Länge der Naht wurden variiert (jeweils zwei Werte), so dass insgesamt vier Versuchsreihen entstanden sind. Die Bleche sind 190 mm lang, bestehend aus 60 mm Einspannlänge, 80 mm freie Länge und 50 mm Überlappungslänge (Abbildung 10). somit beträgt die Länge einer Probe 330 mm. Die roten Pfeile in Abbildung 10 geben die Belastungsrichtung vor.

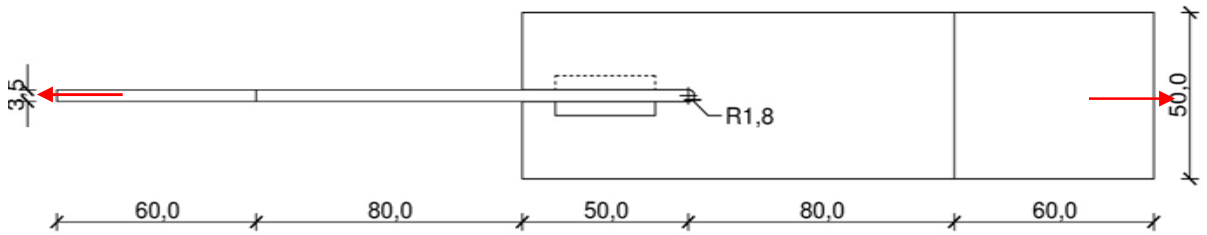

Abbildung 10: Stecklaschenprobe

In Abbildung 11 ist der Querschnitt der Stecklaschenprobe dargestellt. Die Schlitzbreite im Überlappungsbereich beträgt 3,6mm. Nach dem Durchstecken des anderen Bleches bleiben somit planmäßig 0,05mm auf beiden Seiten.

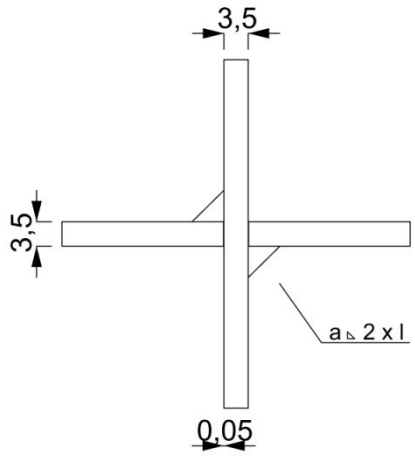

Abbildung 11: Querschnitt der Stecklaschenprobe

Die Proben wurden kraftgesteuert bei R = -1 getestet. Die FE-Berechnungen im Vorfeld haben gezeigt, dass bei diesem R-Wert unter den zu erwartenden Lasten kein Knicken der Probe auftritt und somit ein Stabilitätsproblem ausgeschlossen bleibt. Dieses Ergebnis wurde experimentell bestätigt.

Die getesteten vier Versuchsreihen mit Schweißnahtdaten sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Hierin bezeichnet z.B. die Versuchsreihe Lang/Dünn die Probe mit der längeren Schweißnaht und mit der dünneren Schweißnahtdicke.

Tabelle 1: Versuchsreihen Stecklaschenprobe

Versuchsreihe	Versuchsanzahl	SOLL-Nahtdicke a in mm	SOLL-Nahtlänge l in mm	Geglüht	R
Lang/Dünn	15	3	30	Ja	-1
Kurz/Dünn	15	4	30	Ja	-1
Lang/Dick	15	3	20	Ja	-1
Kurz /Dick	15	4	20	Ja	-1

Als Fügetechnik kommt wie im Vorgängerprojekt das Metall-Schutzgas-Verfahren (MSG) zum Einsatz. Wie der Name schon sagt, umschließt hierbei das Schutzgas, das durch den Schweißbrenner zugeführt wird, während des Schweißvorgangs das Schweißbad. Die einzelnen Schweißparameter sind im Folgenden angegeben:

<u>Schweißparameter</u>

Drahtdurchmesser: 1mm

Drahtgeschwindigkeit: 9,43 m/min

Schweißgeschwindigkeit: 0,2-0,7 m/min

Stromstärke: 178 A

Gasgemisch: 82% Argon + 18% CO_2

Versuchsaufbau

Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in Abbildung 12 zu erkennen. Mit dem speziell für dieses Projekt eingerichteten Aufbau könnten die vier Nahtendbereiche (zwei Anfangspunkte und zwei Endpunkte) als potentielle Rissinitiiierungsstellen stets beobachtet werden. Eine automatisierte Anrisserkennung ist praktisch nicht möglich, da die zu detektierenden Anrisse nur mit einem Mikroskop erkannt werden können. Für die vier Anrissstellen müssten entweder vier Mikroskope mit vier Kameras bereitgestellt werden, was aus Platzgründen nicht möglich ist, oder es muss einzelnes Mikroskop motorisch verfahren werden. Hinzu kommt, dass die Anrissstellen durch Veränderung des Blickwinkels und des Fokusbereiches regelrecht gesucht werden müssen. Eine rechnergestützte, elektromechanische Lösung des Problems erfordert ein Jahresinvestitionsvolumen von über 100.000 Euro.

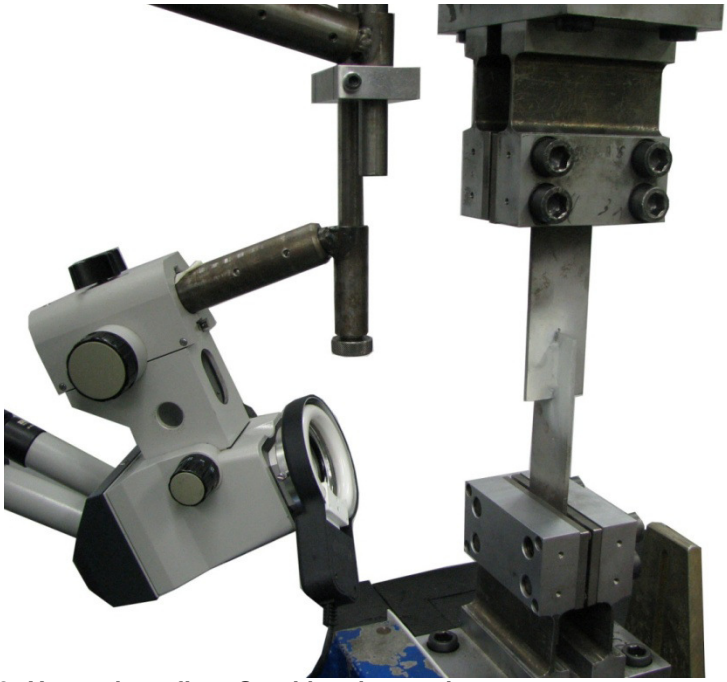

Abbildung 12: Versuchsaufbau Stecklaschenprobe

Versagensformen

Bei der Stecklaschenprobe stellen sich zwei unterschiedliche Versagensarten ein. Entweder wächst der Riss vom Übergangstrichter ins Blech hinein (Versagen Blech) oder es läuft über den Nahtrücken (Versagen Naht). Die zweite Versagensform ist lediglich bei zwei der Stecklaschenproben aufgetreten. Bei allen anderen Proben ist der Riss von Übergangstrichter ins Blech hineingelaufen. Der Versagensort bei dieser Versagensform ist wahlweise der Nahtanfang oder das Nahtende. Das für das Versagen maßgebende Risswachstum findet im geschlitzten Blech statt. Der Rissinitiierungsort ist unabhängig von der Versagensform der Übergangtrichter, also der Übergang zwischen Nahtfuß und Wurzelkerbe. Aus den Versuchen geht hervor, dass die Art des Versagens vom Lastniveau abhängt. Das Versagen in der Naht stellt sich lediglich bei höheren Lastamplituden ein. Diese Versagensmechanismen sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

Als Versagensbedingung wird je nach der Versagensform der Bruch der Naht gewertet oder ein Riss, der entlang der Übergangskerbe genau so lang ist wie im Blech.

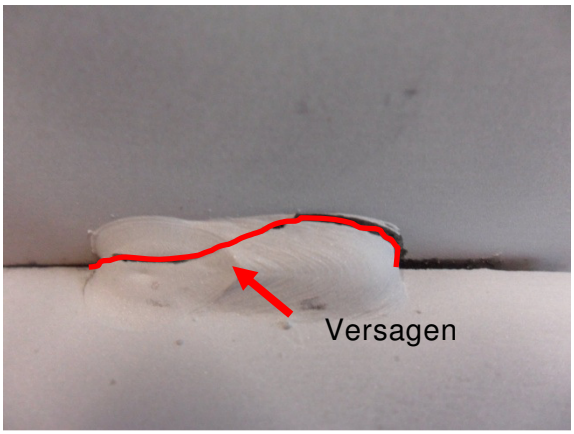

Abbildung 13: Versagen in der Naht

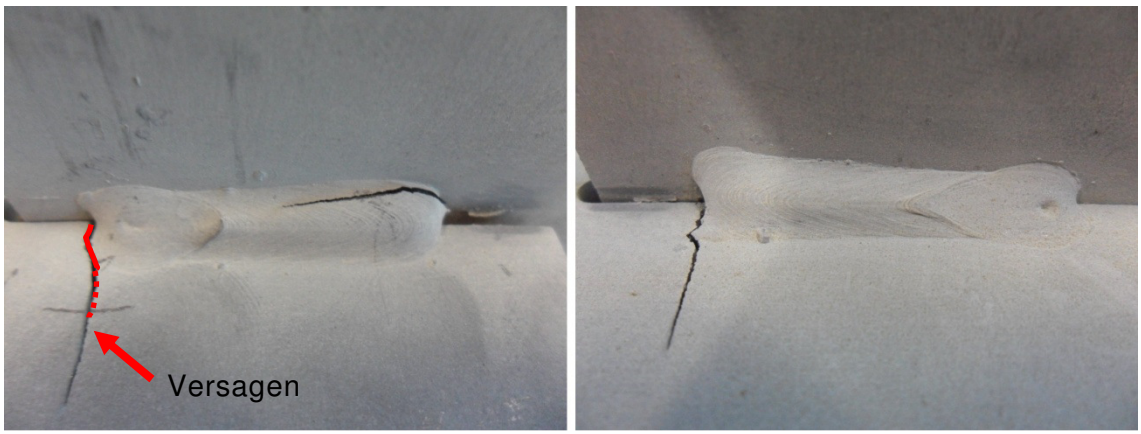

Abbildung 14: Versagen im Blech

Nennspannungsdefinition

Als Bezugsfläche für die Nennspannung wird die rechnerische Schweißnahtfläche unter Ansatz der SOLL-Maße nach Tabelle 1 gewählt.

$$\tau_a = \frac{F_a}{A_{w,ges}} = \frac{F_a}{2l_w \,.\, a_w}$$

Versuchsergebnisse und Wöhlerlinie

In den folgenden vier Diagrammen werden die Ergebnisse aus den Schwingversuchen für die vier Versuchsreihen dargestellt.

Es ist zu beachten, dass bei der Regressionsanalyse zur Bestimmung der Wöhlerlinienparameter die Proben, bei denen die Naht versagt hat, nicht berücksichtigt wurden. Diese Proben sind in der Wöhlerlinien mir roten Punkten gekennzeichnet.

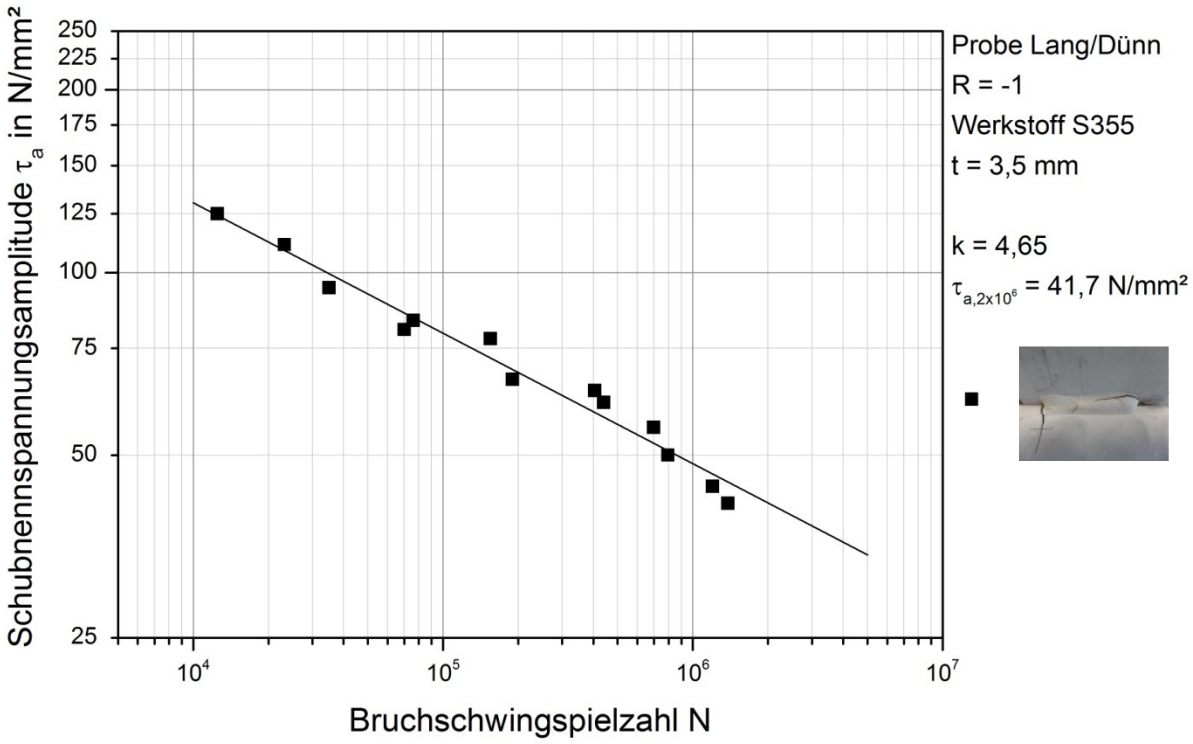

Abbildung 15: Wöhlerlinie für die Stecklaschenprobe Lang/Dünn

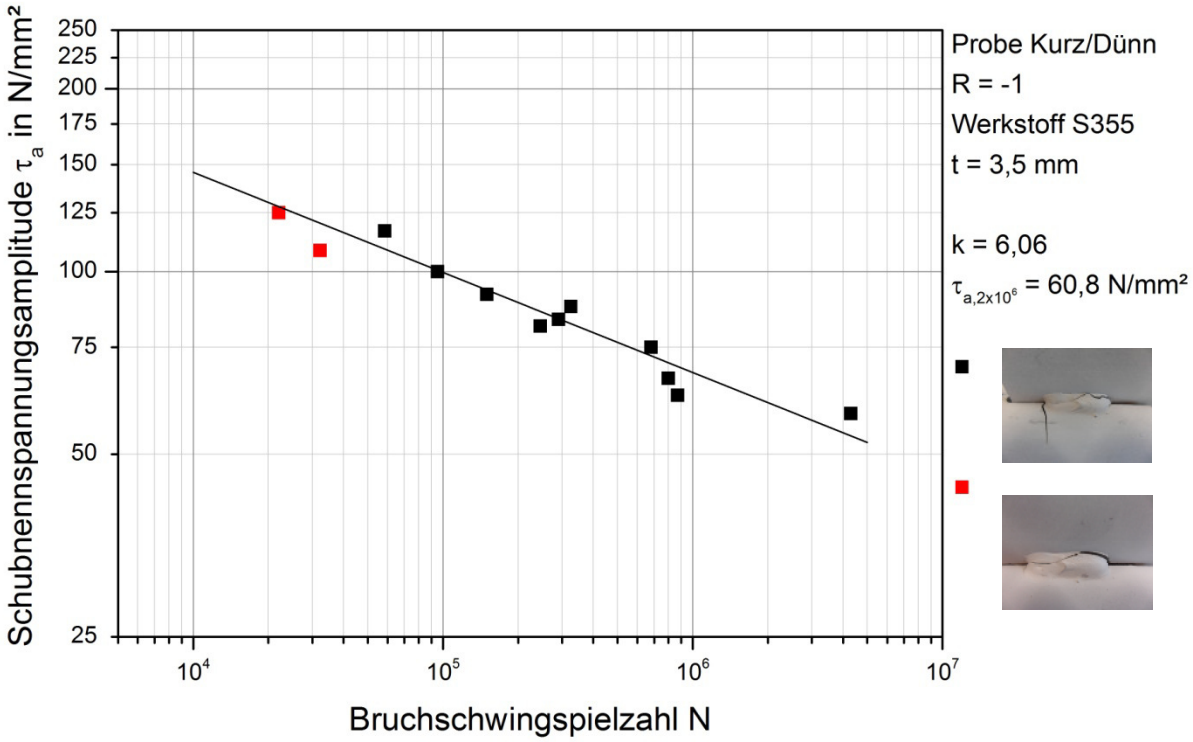

Abbildung 16: Wöhlerlinie für die Stecklaschenprobe Kurz/Dünn

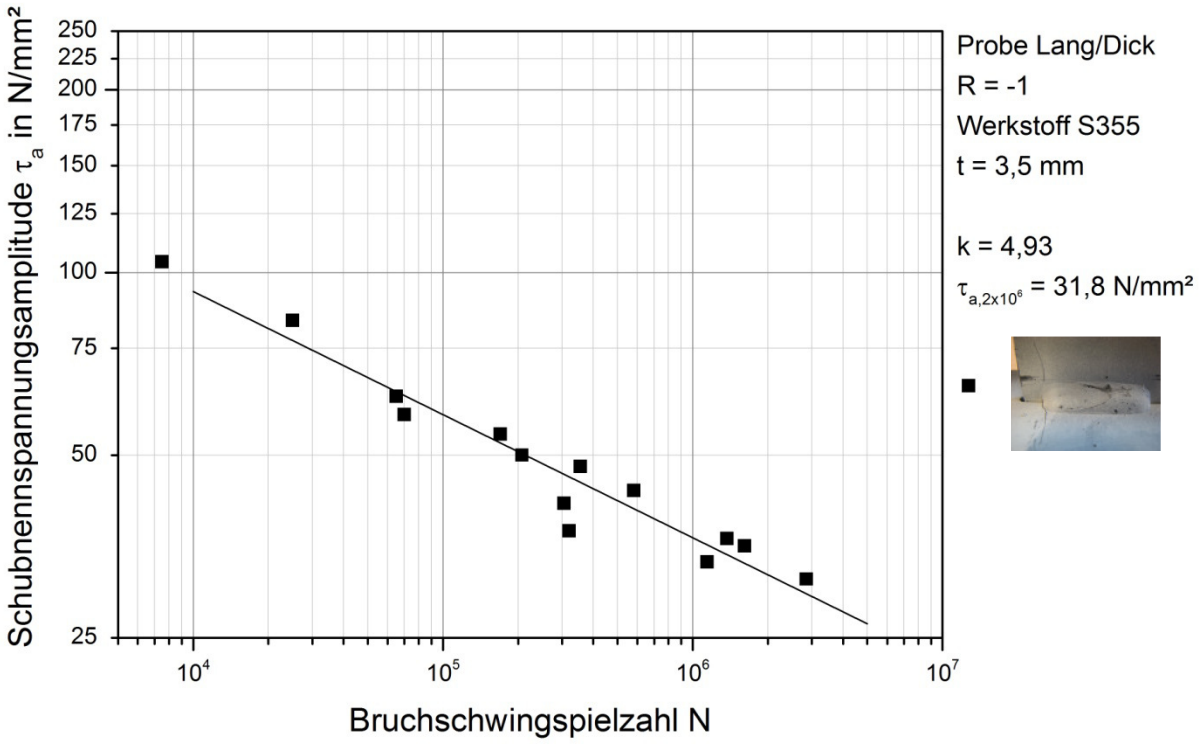

Abbildung 17: Wöhlerlinie für die Stecklaschenprobe Lang/Dick

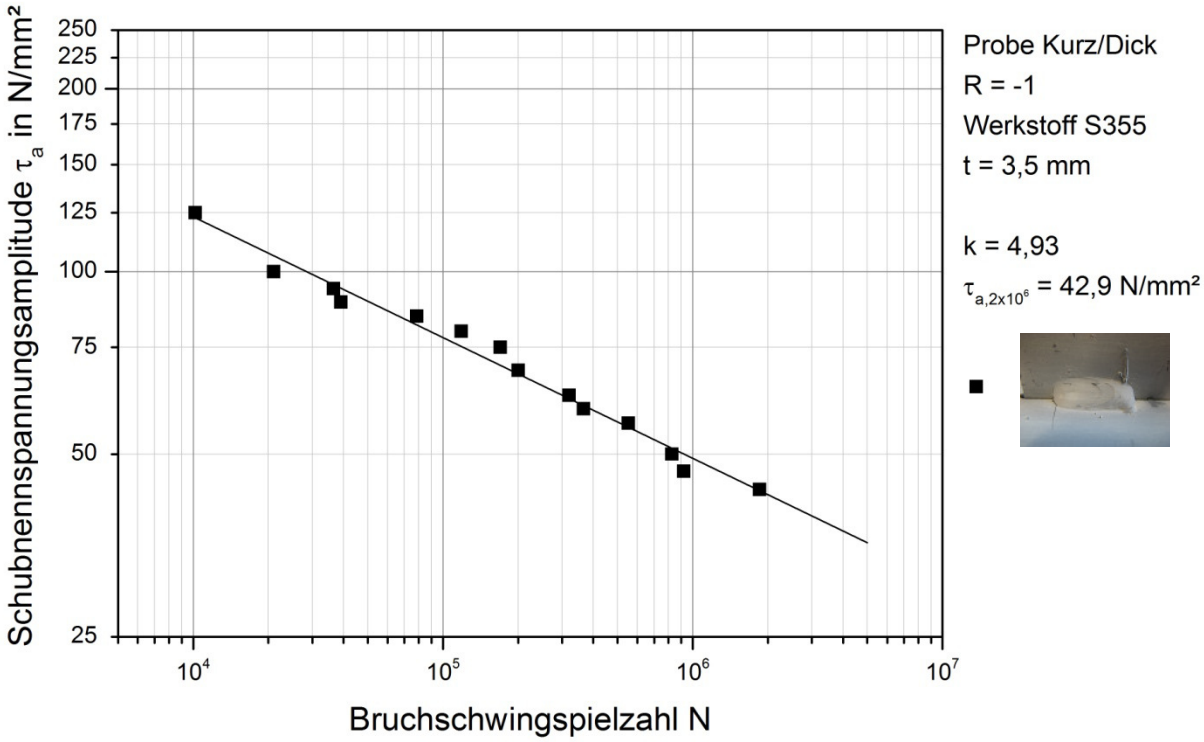

Abbildung 18: Wöhlerlinie für die Stecklaschenprobe Kurz/Dick

Die Einzelergebnisse sind tabellarisch im Anhang angegeben.

2.3. Rohrprobe

Allgemeines

Die Rohrprobe ist weitgehend an die Probenform aus dem Vorgängerprojekt angelehnt. Allerdings wurde die Anzahl der Nähte auf zwei reduziert. Somit wurde der Versagensbereich verkleinert. Außerdem wurden die Spannungsumlagerungen, die mutmaßlich die Lebensdauer stark beeinflusst haben, reduziert. Das Rohr hat eine Gesamtlänge von 400mm und steht durch das untere Blech 60mm über. Die Schrauben (M22 10.9) sind in einem Kreis von 80mm Radius alle 45 Grad angeordnet, so dass das Blech von 8 Schrauben gehalten wird. Die Nähte sind symmetrisch auf einem Winkel von 73,1° angeordnet. Es resultieren bei einem Rohrdurchmesser von 47mm Schweißnähte, die 30mm lang sind. In Abbildung 19 ist die Rohrprobe skizziert. Hierin ist zu erkennen, dass das Rohr bis zur Mitte abgedreht wurde, so dass es durch den Teller durchgesteckt werden konnte.

Die Proben wurden torsionsmomentengesteuert bei R = -1 getestet.

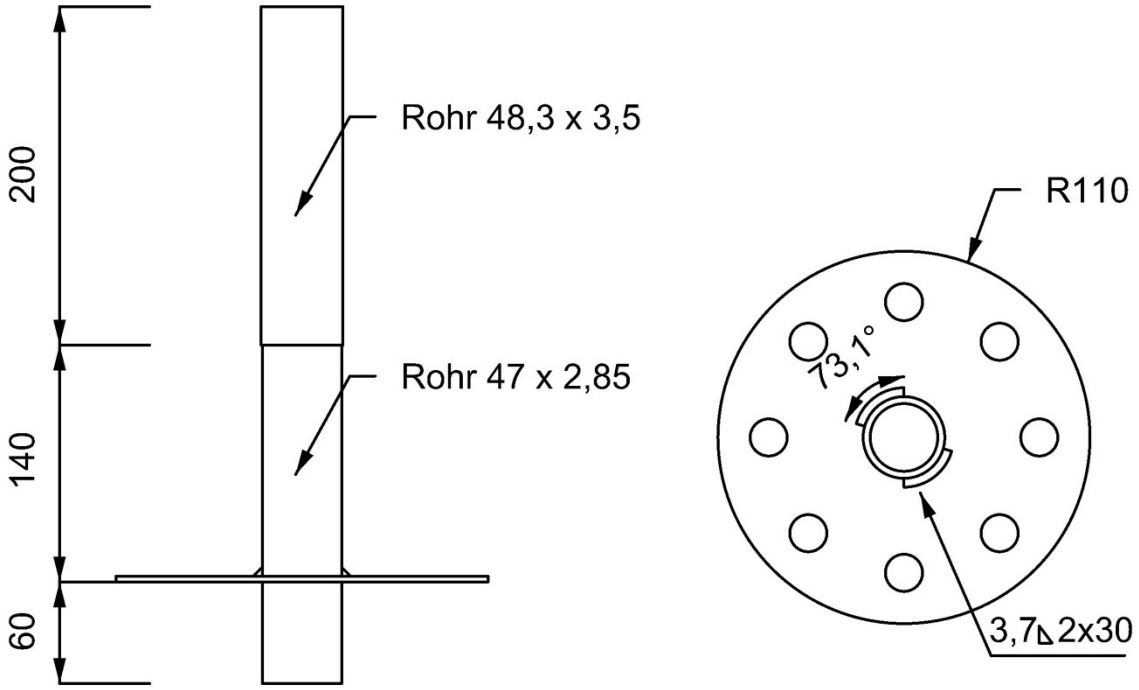

Abbildung 19: Rohrprobe

Tabelle 2: Versuchsreihe Rohrprobe

Versuchsreihe	Versuchsanzahl	SOLL-Nahtdicke a in mm	SOLL-Nahtlänge l in mm	Geglüht	R
Rohrprobe	15	3,7	30	Ja	-1

Schweißparameter

Drahtdurchmesser: 1mm

Drahtgeschwindigkeit: 10,50 m/min

Schweißgeschwindigkeit: 0,4-0,8 m/min

Stromstärke: 200-230 A

Gasgemisch: 82% Argon + 18% CO_2

Versuchsaufbau

Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in Abbildung 20 zu erkennen. Auch hier musste zunächst ein Mikroskopaufbau eingerichtet werden, um die Nahtendbereiche zu beobachten. Zudem musste es möglich sein, senkrecht auf die Risse zu schauen, um die Risslängen richtig bestimmen zu können. Denn wie bei Stecklaschen spielt die Risslänge für die definierte Versagensbedingung eine wichtige Rolle.

Die Einspannung der Rohrprobe am oberen Ende des Rohres erfolgte über Adapter mit Schraubenklemmung. Durch die Einspannung am unteren Ende ist die Möglichkeit zum Ausgleich von Winkelverzug gegeben.

Abbildung 20: Versuchsaufbau Rohrprobe

Versagensformen

Auch hier wie bei den Stecklaschenproben stellen sich die zwei zuvor beschriebenen Versagensarten ein. Ebenfalls hier ist die Versagensform lastabhängig zu sein. Bei höheren Lastamplituden tritt das Versagen in der Wurzelkerbe auf. Bei niedrigeren Lastniveaus aber läuft der Riss ins Blech oder mit einem Winkel von 45 Grad (rechtwinklig zu einer der Hauptspannungen) ins Rohr hinein.

Als Versagensbedingung wird je nach der Versagensform der Bruch der Naht gewertet (Abbildung 21rechts) oder ein Riss, der entlang Übergangskerbe genau so lang ist wie im Blech bzw. Rohr (Abbildung 21 links).

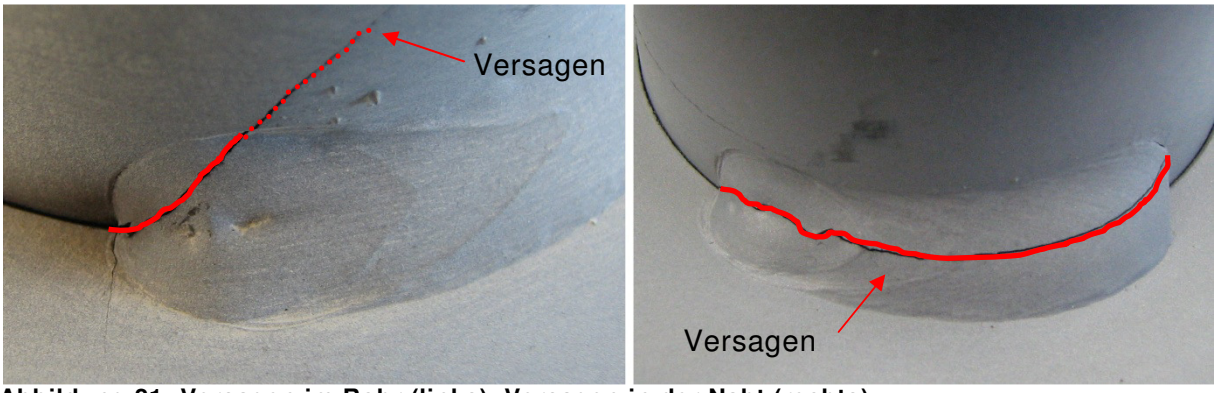

Abbildung 21: Versagen im Rohr (links), Versagen in der Naht (rechts)

Nennspannungsdefinition

Die Schweißnahtfläche dient zur Berechnung der Nennspannung. Hierfür wird das aufgebrachte Torsionsmoment in ein Kräftepaar zerlegt. Zur Berechnung werden die Solllängen verwendet.

$$F_a = \frac{M_{T,a}}{d_{Rohr}}$$

$$\tau_a = \frac{F_a}{A_w} = \frac{M_{T,a}}{d_{Rohr} \cdot l_w \cdot a_w}$$

Versuchsergebnisse und Wöhlerlinie

Die Ergebnisse aus den Schwingversuchen sind im folgenden Diagramm dargestellt. Auch hier wie bei den Stecklaschen werden die Proben mit einem Versagen in der Naht in der zur Ermittlung der Wöhlerlinienparameter durchgeführten Regressionsanalyse nicht berücksichtigt. Diese sind in der Wöhlerlinie rot markiert. Die Einzelergebnisse sind tabellarisch im Anhang angegeben.

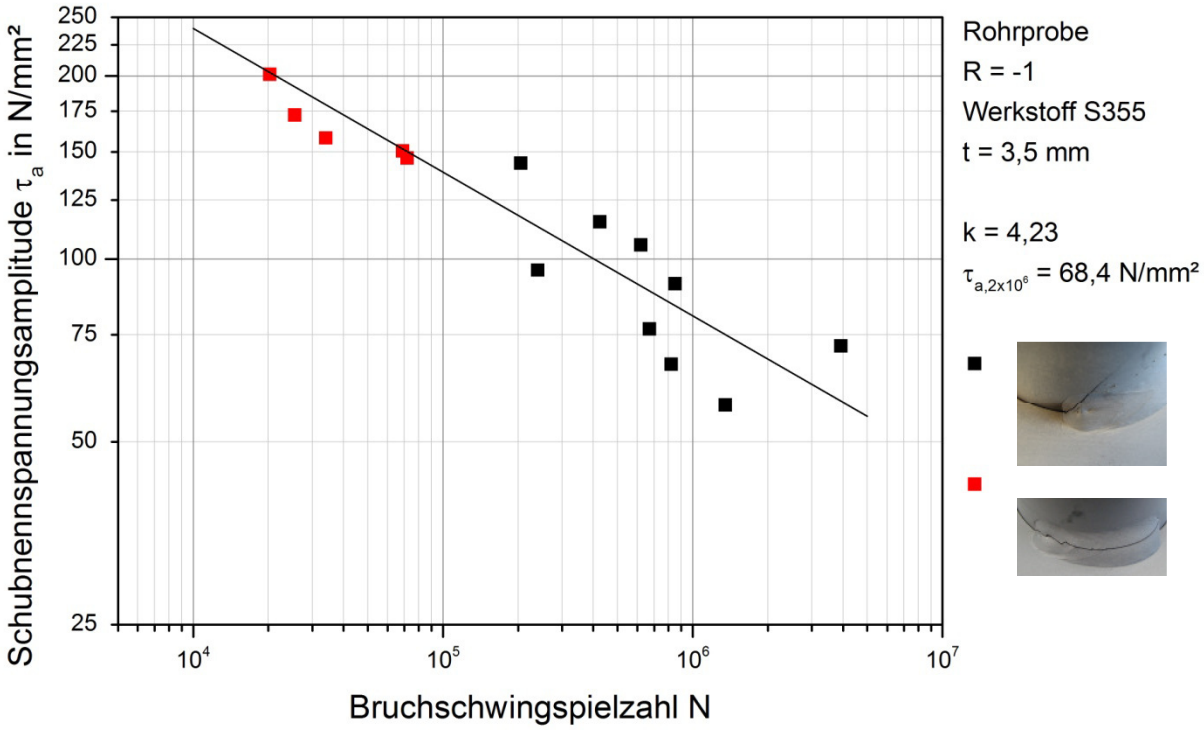

Abbildung 22: Wöhlerlinie für die Rohrprobe

2.4. Zusammenstellung der Ergebnisse

In Abbildung 23 sind die Ergebnisse aus den Schwingversuchen zusammengefasst. Die ausgefüllten Punkte stehen hierbei für die Proben mit einem Versagen in der Naht, und die unausgefüllten Punkte für die Proben mit einem Versagen im Blech/Rohr dar.

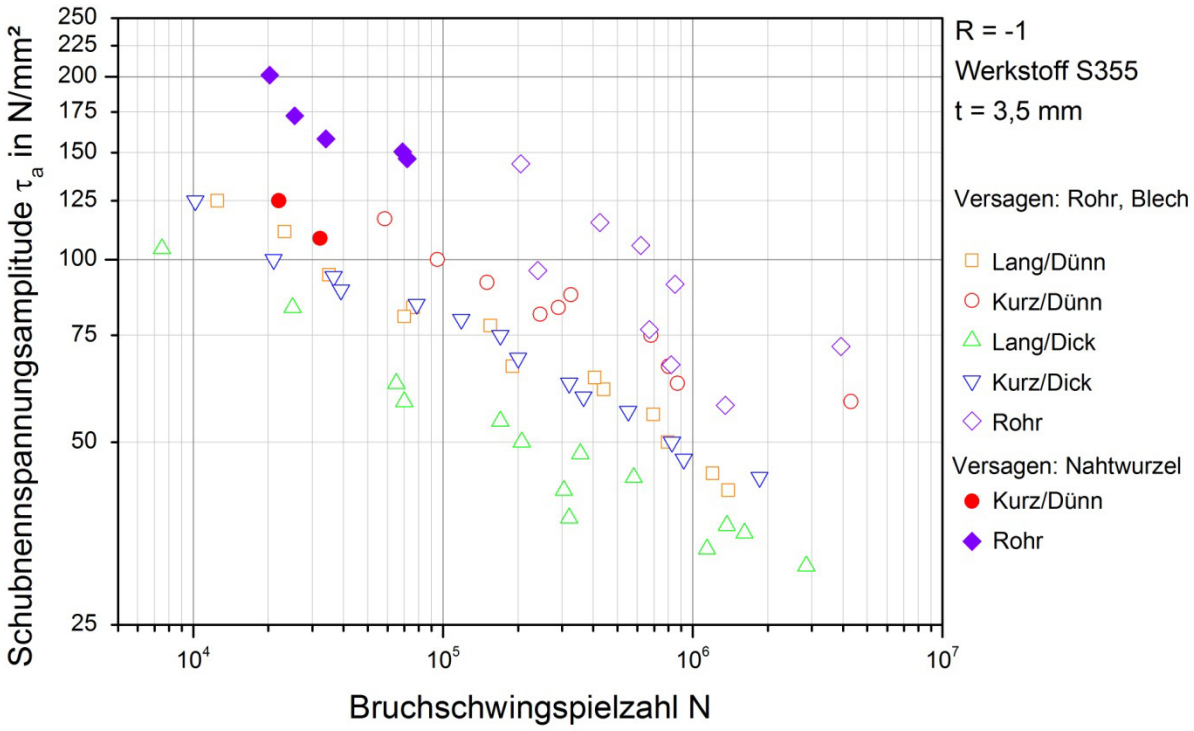

Abbildung 23: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

3. 3D Erfassung der Schweißnähte

3.1. 3D Scanner optoTOP HE 1175

Wie im Vorgängerprojekt A 249 wurde das Gerät opto TOP HE der Firma Breuckmann zum Einsatz gebracht, um die Geometrie der Nahtoberfläche zu erfassen. Der Scanner ist in der Lage, eine Bildfläche von 3 cm x 4 cm aufzunehmen und besteht aus einem Projektor und einer Digitalkamera, die in einem Winkel von 30 Grad zueinander angeordnet sind. Die Auflösungen in der Ebene und in der Tiefe betragen 30 µm und 5 µm. Das aus den Scandaten abgeleitete Oberflächennetz besteht aus Dreiecksflächen, die eine minimale Kantenlänge von 0,03 mm besitzen und bis auf 5 µm genau in der Tiefe ausgerichtet sind. In Abbildung 24 sind eine Stecklaschenprobe bei einem Scanvorgang und der Scanner abgebildet.

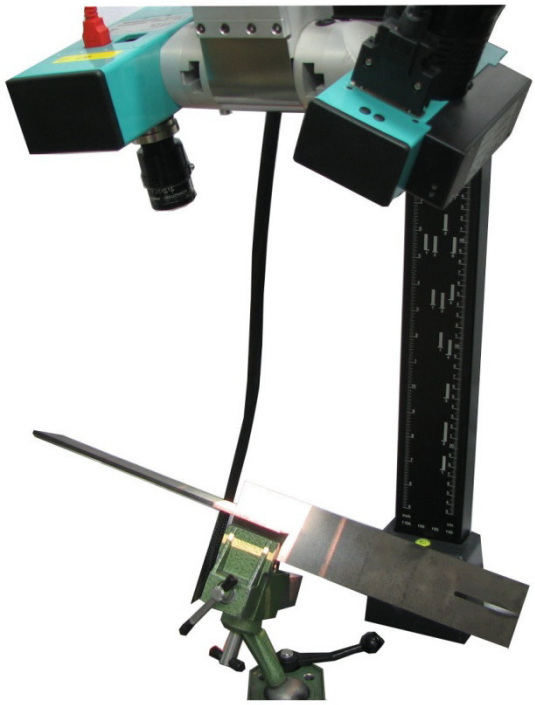

Abbildung 24: 3D Scanner

Im nächsten Abschnitt werden die erforderlichen Arbeitsschritte für einen Scanvorgang kurz beschrieben.

3.2. Arbeitsschritte

Bevor die Probe gescannt werden kann, sind zunächst Vorarbeiten zu erledigen. Damit man ein möglichst gutes Scanergebnis erhält, ist es vom Vorteil, wenn der Probekörper eine matte Oberfläche aufweist. Die Probekörper sind zwar sandgestrahlt (Kapitel 2), reflektieren aber unter Projektionslicht enorm. Diese Information war aus dem Vorgängerprojekt bekannt. Auch im Rahmen dieses Projektes ist auf ein Scanspray der Firma Dentaco zurückgegriffen worden. In Abbildung 25 links ist eine sandgestrahlte Probe und rechts davon ist eine mit dem Spray besprühte Probe dargestellt. Die Reflexionen werden auf ein Minimum reduziert.

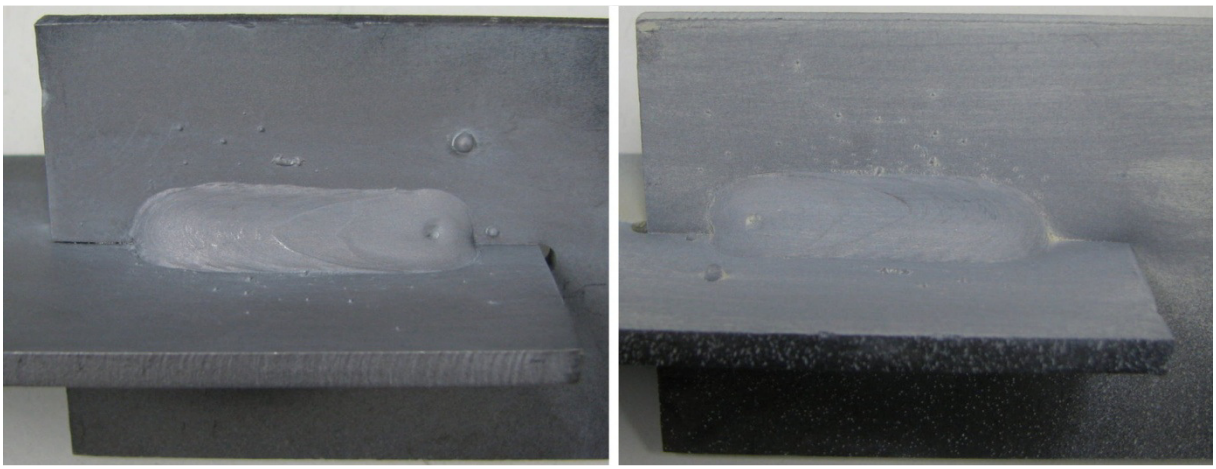

Abbildung 25:sandgestrahlte Probe (links), besprühte Probe (rechts)

Ist die Probe weiß eingesprüht, kann der Scanvorgang begonnen werden. Die Steuerung des Scanners erfolgt über die zugehörige Software OPTOCAT. Die Probe ist zunächst im Arbeitsraum zu positionieren. Dies erfolgt mit Hilfe eines Justierlaserpaares. Der Kontrast der Aufnahmen spielt eine große Rolle für die Qualität der Scans. Der Kontrast hängt von vielen Faktoren wie z.B. Oberflächeneigenschaften der Probe, Projektorhelligkeit, Kamerahöhe, und Raumbeleuchtung ab. Auf die Oberflächeneigenschaften und Verbesserungsmöglichkeiten ist zuvor eingegangen.

Für die Visualisierung der Bilddaten kommen in 3D Metrologie die sogenannten "Lookup Tables" (LUT) zum Einsatz. Die in OPTOCAT benutzten LUTs sind in Abbildung 26 dargestellt.

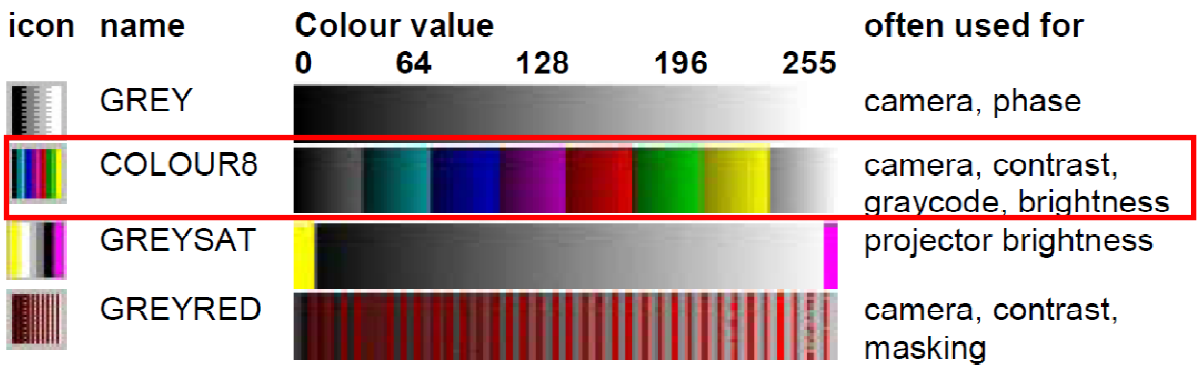

Abbildung 26: Lookup Tables nach [25]

Es wurde die COLOUR8 LUT gewählt. Hierbei werden die überbelichteten Bereiche weiß und die unterbelichteten Bereiche schwarz dargestellt. Das Beste Resultat erhält man, wenn die Bereiche hauptsächlich rot, grün oder gelb markiert werden. Das ist allerdings bei einer Aufnahme nicht immer garantiert. Aus diesem Grund ist es empfehlenswert, mehrere Bilder pro Scan aufzunehmen (Multiple Grabs). OPTOCAT unterstütz eins, zwei oder vier Aufnahmen. Bei den im Rahmen dieses Projektes gescannten Proben wurden stets vier Aufnahmen gewählt. Für die einzelnen Aufnahmen sind zwei Parameter zu definieren, die Helligkeit und die Belichtungszeit. Helligkeit ist bei allen Aufnahmen konstant auf höchstem Wert zu setzen. Belichtungszeit wird bei vier Aufnahmen variiert, so dass die aufzunehmenden Bereiche der Schweißnahtgeometrie rot, grün oder gelb markiert werden. Somit ist es sichergestellt, dass das berechnete Bild möglichst an keiner Stelle über- oder unterbelichtet ist. In Abbildung 27 sind vier Aufnahmen für eine Schweißnaht dargestellt.

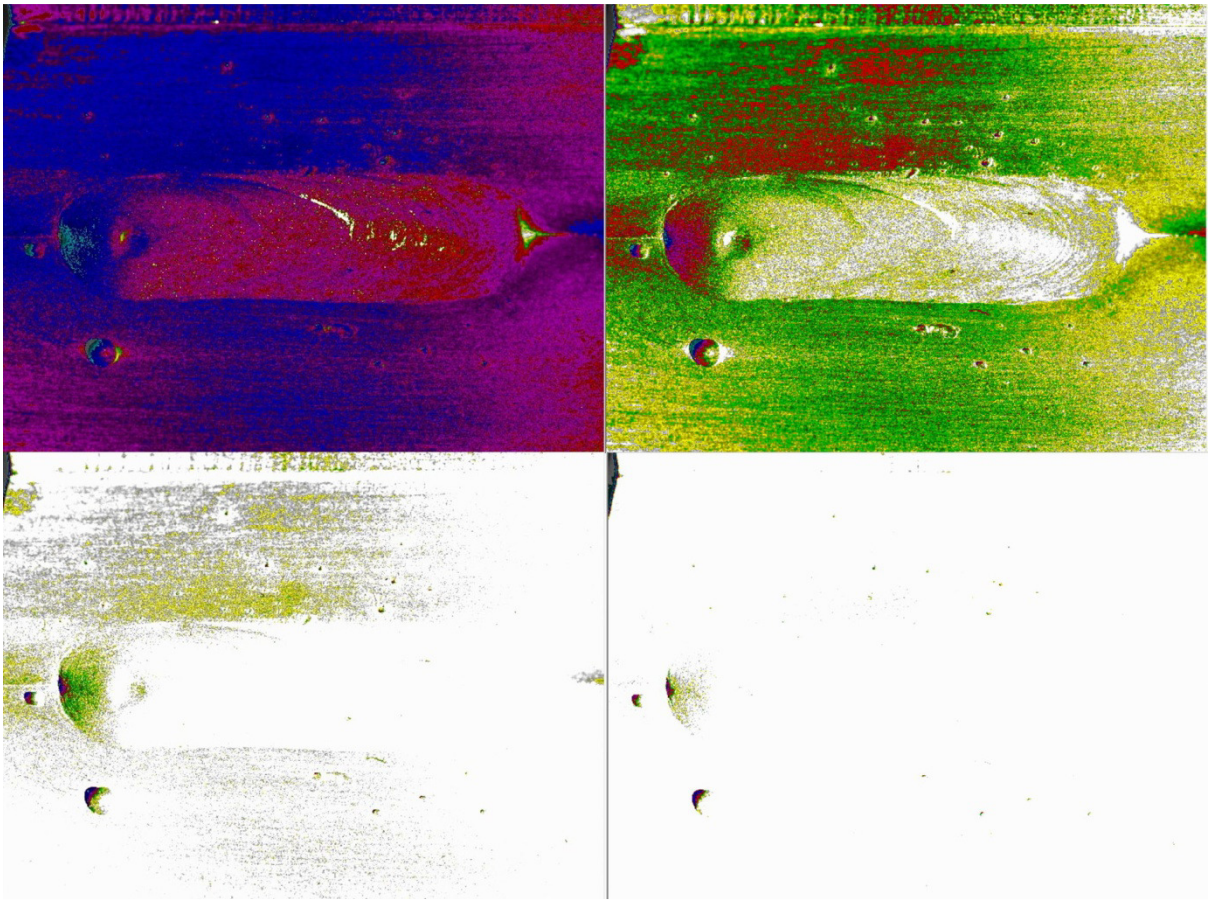

Abbildung 27: Scanaufnahmen einer Schweißnaht

Es ist zu beachten, dass der Raum, in dem der Scanner sich befindet, dunkel zu halten ist. Die Tiefenschärfe des Bildes ist ein weiterer Punkt, die eingestellt werden muss. Dies kann durch das Ausrichten des Scannerkopfes variiert werden.

Ist die Probe positioniert, der Scannerkopf ausgerichtet und die Helligkeit eingestellt, kann die Probe gescannt werden. Die genannten drei Schritte stellen die wesentlichen Aufgaben vor einem Scannvorgang dar. Das Resultat ist ein Bild, welches i.d.R.

zunächst mit Löchern behaftet ist. Da zudem einige Bereiche abgeschattet werden, ist nicht alles auf dem ersten Scan zu sehen. Somit ist die Probe im nächsten Schritt aus einem veränderten Blickwinkel (oder sogar aus zwei weiteren Blickwinkeln) zu scannen, um diese in einem weiteren Schritt aneinander auszurichten. Die Abbildung 28 und Abbildung 29-a stellen beispielhaft für eine Testprobe den ersten Scan dar. Es wird klar, dass die Bereiche des Übergangstrichters (Nahtfuß zu Nahtwurzel) bei diesem Scan nicht erfasst sind.

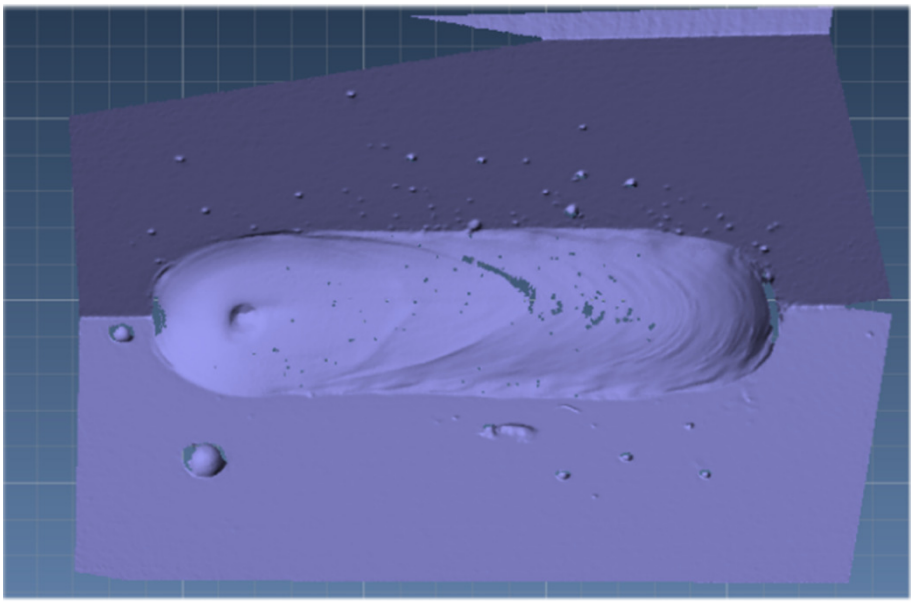

Abbildung 28: Scan einer Schweißnaht

Wie schon zuvor erwähnt, sind in den meisten Fällen mehrere Scans aus unterschiedlichen Blickwinkeln notwendig, um alle Bereiche der Schweißnaht aufzunehmen. Die einzelnen Netze sind danach aneinander auszurichten. Dies geschieht in zwei Schritten. Im ersten Schritt werden die Polygonnetze durch Wahl drei (oder mehr) gemeinsamen Punkte aneinander angepasst (Abbildung 29-b). In Abbildung 29-c stellt das grüne Netz das mögliche Ergebnis dar. Im zweiten Schritt werden dann die Netze fein mit einem numerischen Algorithmus aneinander ausgerichtet (Abbildung 29-d). Das resultierende Netz wird im dreidimensionalen Raum rotiert, so dass die Schweißnaht horizontal liegt. Die überflüssigen Bereiche der Naht werden herausgeschnitten (Abbildung 29-e). Das jetzige Polygonnetz besteht aber weiterhin aus zwei Polygonnetzen. Erst durch das Zusammenfügen (Merge) der Netze entsteht ein einziges Polygonnetz (Abbildung 29-f). Es sind aber weiterhin kleinere Bereiche (Löcher), die von den beiden Scans nicht aufgenommen wurden, vorhanden. Diese sind mit einer internen Funktion von OPTOCAT (Fill Hole Assist) einzeln zu füllen. In Abbildung 29-g sind die gefüllten Bereiche rot markiert. Nun entsteht ein Polygonnetz, das nur entlang der Umrandung offene Kanten aufweist. Es wurde aber bis jetzt mit der höchsten Scannerauflösung gearbeitet. Das in Abbildung 29-h dargestellte Polygonnetz besitzt über 300.000 Dreiecksflächen. Erst durch Komprimierung des Netzes können Oberflächennetze mit z.B. 66.000 (Abbildung 29-i) und 27.000 (Abbildung 29-j) Dreiecksflächen produziert werden. Es ist gut zu sehen, dass mit abnehmender Anzahl der Dreiecksflächen die Detailgenauigkeit abnimmt (siehe Abbildung 29-j), und daher ein vernünftiger

Kompromiss zwischen der hohen Netzdichte mit hoher Detailgenauigkeit und geringer Netzdichte mit geringer Genauigkeit gewählt werden muss. Das spielt vor allem später für die numerischen Analysen eine große Rolle. Das fertige Polygonnetz kann nun exportiert werden. Als Dateityp wird die Format STL (STereoLithography, Dateiformat, um Dreiecksdaten ohne Farbeninformation zu exportieren) empfohlen. Andere Alternativen wären PLY oder VRML, die zusätzlich Farbeninformationen übertragen könnten. Nun sind die Bearbeitungsschritte in OPTOCAT abgeschlossen. In Abschnitt 4 wird auf die weitere Bearbeitung und die numerische Analysen der gescannten Schweißnaht eingegangen.

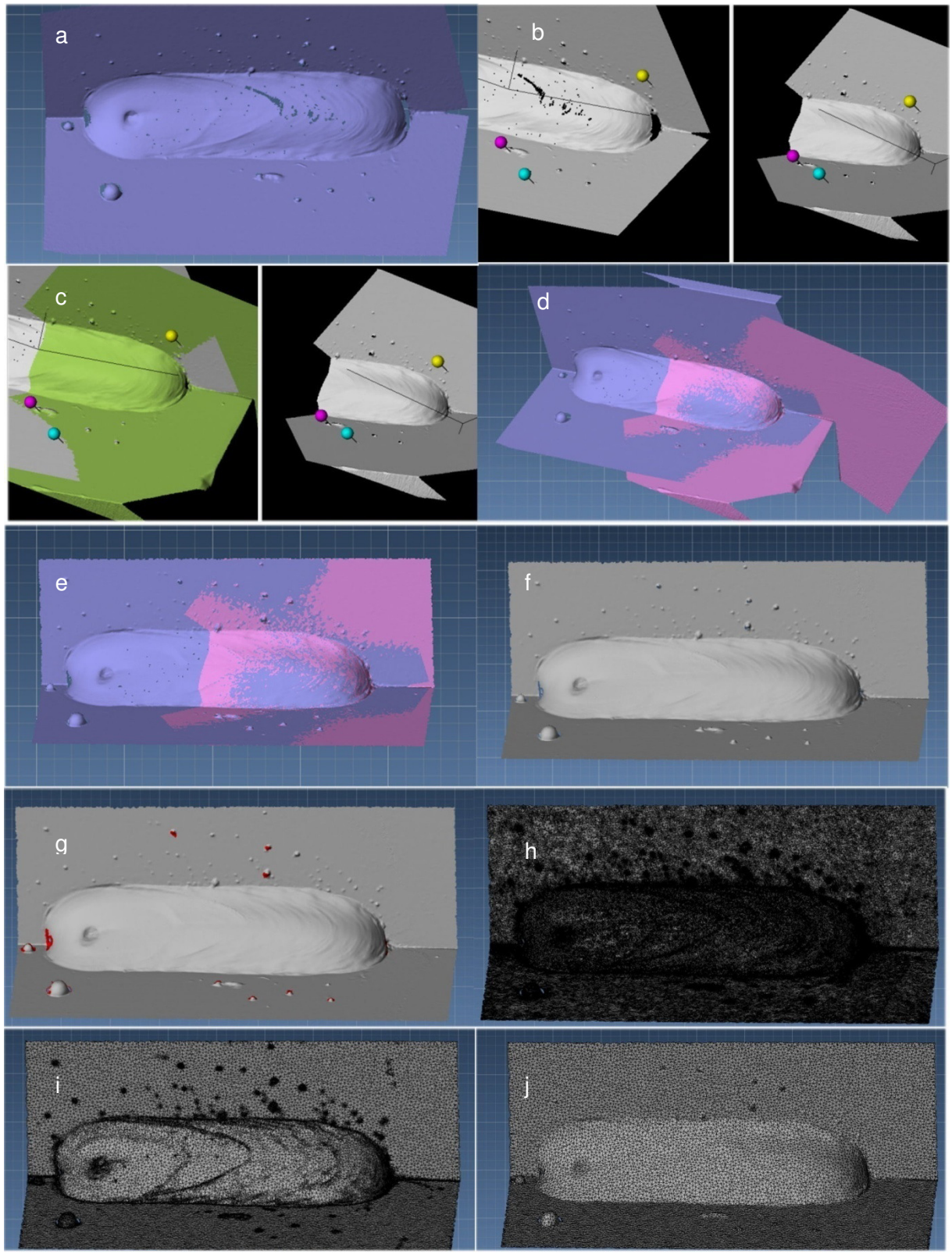

Abbildung 29:Zusammenfassung

4. Berechnung der Kerbspannungen mit gescannter Geometrie

4.1. Allgemeines

Ausgangsdatei für eine numerische Analyse ist das aus dem Scanner-Software OPTOCAT exportierte Polygonnetz. Das Polygonnetz hat den Dateityp Stereolithografie (*.stl) und ist zunächst "nur" ein Oberflächennetz. Für eine numerische Berechnung mittels FE-Methode ist dieses Oberflächennetz in ein Volumenmodell umzuwandeln. Ein gängiger Dateityp für in das FE-Programm Abaqus FEA importierbare Volumenmodelle ist STEP (*.stp). Die Umwandlung geschieht mit der CAD Software Rhinoceros. Bei der Umwandlung sind zwei Aufgaben zu erledigen. Zunächst muss das Oberflächennetz so bearbeitet werden, dass ein fehlerfreies Volumenmodell entsteht. Das bedeutet vor allem, dass das Volumenmodell über keine offene Kanten verfügen darf. Zum Vergleich: Das Oberflächennetz weist entlang der Umrandung offene Kanten auf. Bei einem fehlerfreien Volumenmodell aber ist jede einzelne Kante mit einer anderen verbunden. Deswegen spricht man auch von einem geschlossenen oder wasserdichten Volumen. Ist die Geometrie des Volumenmodells erstellt, muss nur noch das Polygonnetz (auch Mesh genannt) in NURBS (auch solid genannt, **N**on-**U**niform **R**ational **B**-**S**pline) mit dem in Rhinoceros entsprechenden Befehl konvertiert werden. Ist ein NURBS-Volumenmodell vorhanden, kann dieses als STEP File abgespeichert und in das FE-Programm Abaqus FEA importiert werden. Auf diese Weise kann anschließend die Vernetzung des Volumenmodells in FE-Programm Abaqus FEA durchgeführt werden. Solver und Postprocessing von Abaqus FEA kommen ebenfalls zum Einsatz. Für die Berechnung der Kerbspannung wird auf die Submodelltechnik zurückgegriffen.

Tabelle 3: Programme und Aufgaben

Programm	Aufgabe
OPTOCAT	Scannen
Resultat	Oberflächennetz (Polygonnetz)
Dateiformat	.stl
Rhinoceros	Bearbeitung der Geometrie, so dass ein geschlossenes Volumenmodell entsteht.
	Polygonnetz in NURBS konvertieren
Resultat	Volumenmodell (NURBS)
Dateiformat	.stp
Abaqus FEA	Vernetzer
	Solver
	Postprocessing

4.2. Geometrieanalyse

Wie bereits im ersten Kapitel erwähnt, wird im Rahmen dieses Projektes erstmals die Wurzelkerbe der Schweißnaht per 3D Scan erfasst. Hierzu muss die Schweißnaht verformungsarm aufgebrochen werden. Flüssiger Stickstoff (Siedepunkt -195,80 °C) kommt hier als Kühlflüssigkeit zum Einsatz.

Eine bestimmte Anzahl von Stecklaschenproben wird zu dieser Geometrieanalyse herangezogen, vgl. Tabelle 4.

Tabelle 4: Versuchsserie für Geometrieanalyse

Versuchsreihe	Versuchsanzahl	Nahtdicke in mm	Nahtlänge in mm
Lang/Dünn	5	3	30
Lang /Dick	5	4	30

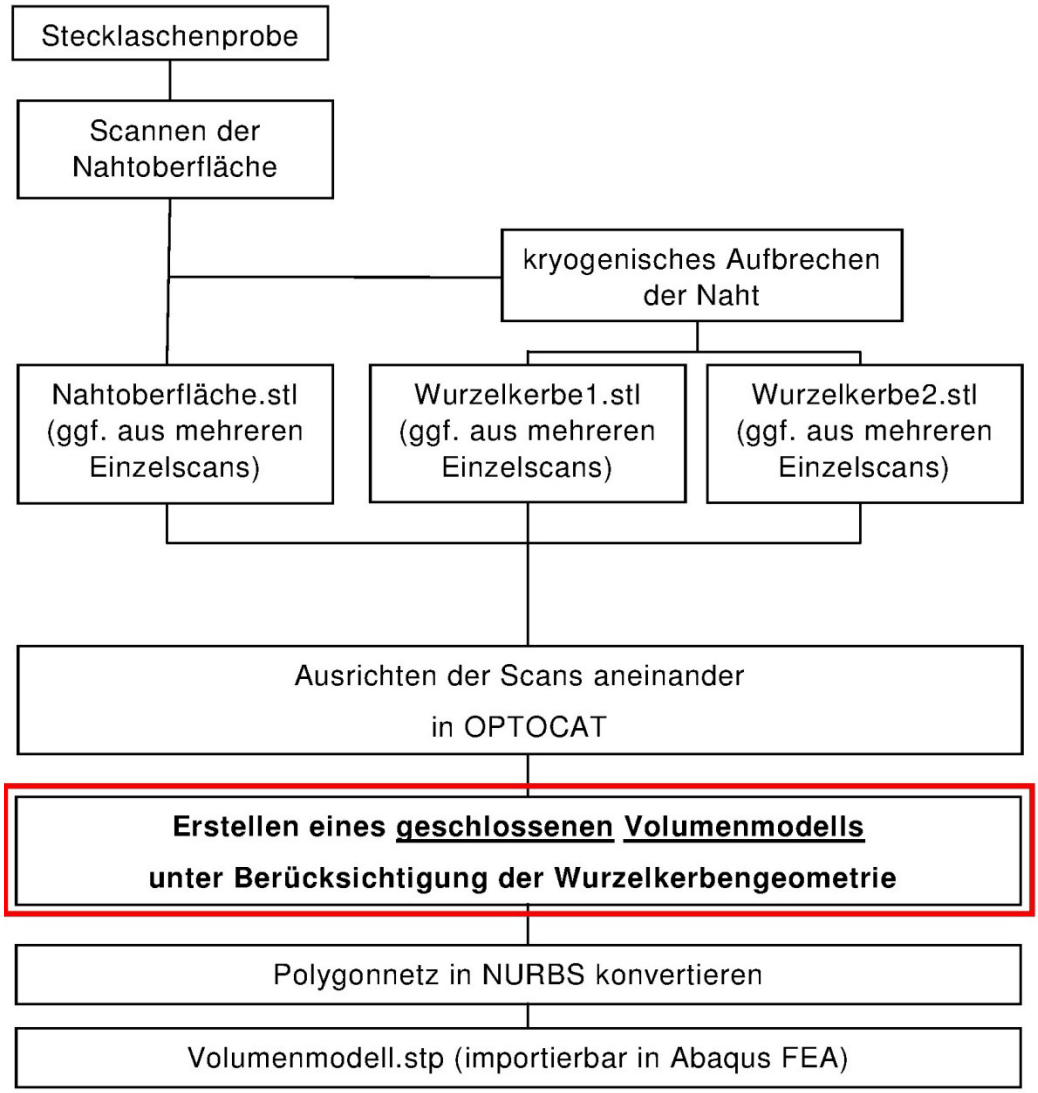

Abbildung 30: Arbeitsschritte

Schon im Rahmen des Vorgängerprojektes A 249 ist es gelungen, aus den gescannten Oberflächen Volumenmodelle zu erstellen und diese mit der FE-Methode unter Zuhilfenahme der Submodelltechnik zu berechnen. Allerdings war ein kryogenisches Aufbrechen der Naht nicht notwendig. Es mussten daher mehrere Methoden untersucht werden, um das ursprüngliche Verfahren so zu erweitern, dass numerische Analysen an aufgebrochenen gescannten Schweißnähten ermöglicht werden.

Die wesentlichen Arbeitsschritte hierzu sind in Abbildung 30 zusammengefasst. Die größte Schwierigkeit ist hierbei gewesen, aus den drei einzelnen Scans ein einziges Volumenmodell abzuleiten. Zunächst aber werden die Schritte bis dahin näher erläutert.

Ausgangspunkt ist eine nicht zu testende Stecklaschenprobe. Zunächst wird die Geometrie der Nahtoberfläche gescannt. Die Vorgehensweise hierfür wurde in Kapitel 3 geschildert. In Abbildung 31 ist ein so erstelltes Polygonnetz dargestellt. Nun sind die Informationen der Nahtoberfläche abgespeichert und die Naht kann kryogenisch aufgebrochen werden.

Abbildung 31: Scan einer Schweißnaht

Die Probe wird in flüssigen Stickstoff eingetaucht (Abbildung 32 links). Der Stickstoff fängt beim Eintauchen der Probe an zu kochen (Abbildung 32 rechts). Es dauert maximal eine Minute, bis die eingetauchte Probe die Stickstofftemperatur erreicht hat. Nun kann die kalte Schweißnaht im Schraubstock aufgebrochen werden (Abbildung 33).

Abbildung 32: Stecklaschenprobe im Stickstoffbehälter

Abbildung 33: Stecklaschenprobe im Schraubstock

Das Ergebnis ist in Abbildung 34 dargestellt. Somit ist die Wurzelkerbe offengelegt.

Abbildung 34: Aufgebrochene Schweißnaht

Die zerstörte Probe, bestehend aus zwei Teilen, kann nun gescannt werden. Daraus folgen zwei Polygonnetze, die zusammen mit dem Scan der Nahtoberfläche die kompletten Informationen der Nahtgeometrie (Oberfläche und Wurzelkerbe) beinhalten.

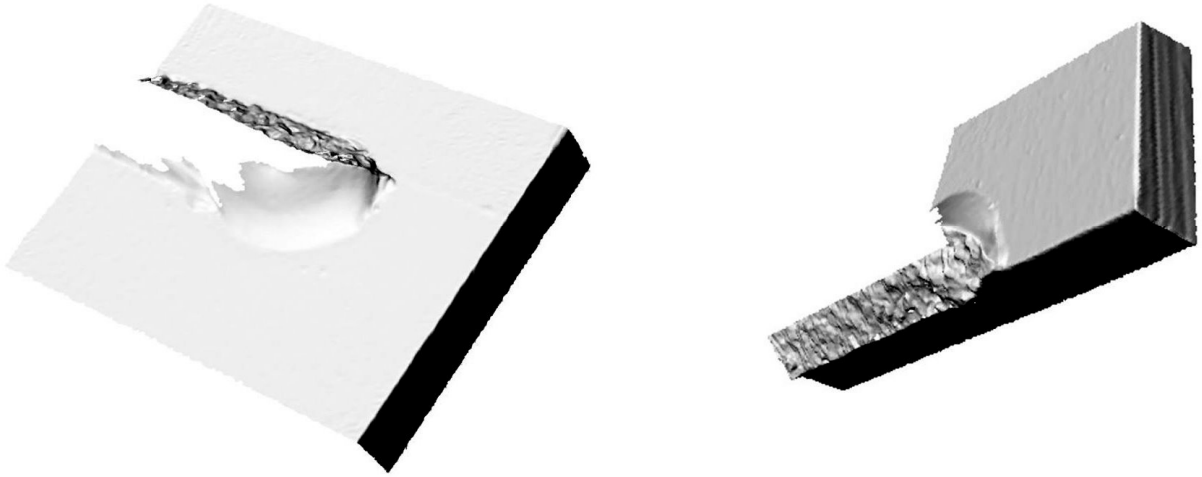

Abbildung 35: Scans der aufgebrochenen Schweißnaht

Im nächsten Schritt werden die drei Polygonnetze (STL Format) aneinander ausgerichtet. Dieser Schritt geschieht in OPTOCAT. Die Scans können durch Wahl drei (oder mehr) gemeinsamen Punkte aneinander platziert werden. Das ist in Abbildung 36 dargestellt. Die rote Linie sollte hierbei die Bruchlinie darstellen. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass, obwohl die Schweißnaht verformungsarm aufgebrochen wird, kein reiner Sprödbruch zu erwarten ist. Das wird vor allem durch die ausgerichteten Scans deutlich, denn nach dem Ausrichten der Scans ist eine

Durchdringung der Bruchflächen zu beobachten. Dieses Detail macht das Erzeugen eines geschlossenen Volumens umso schwieriger. Es wurden mehrere Methoden getestet, um ein Verfahren zu entwickeln, das aus den bisherigen Daten ohne Informationsverlust das gewünschte Volumenmodell erzeugt. Auf das im Rahmen dieses Projektes entwickelte Verfahren wird im Folgenden näher eingegangen.

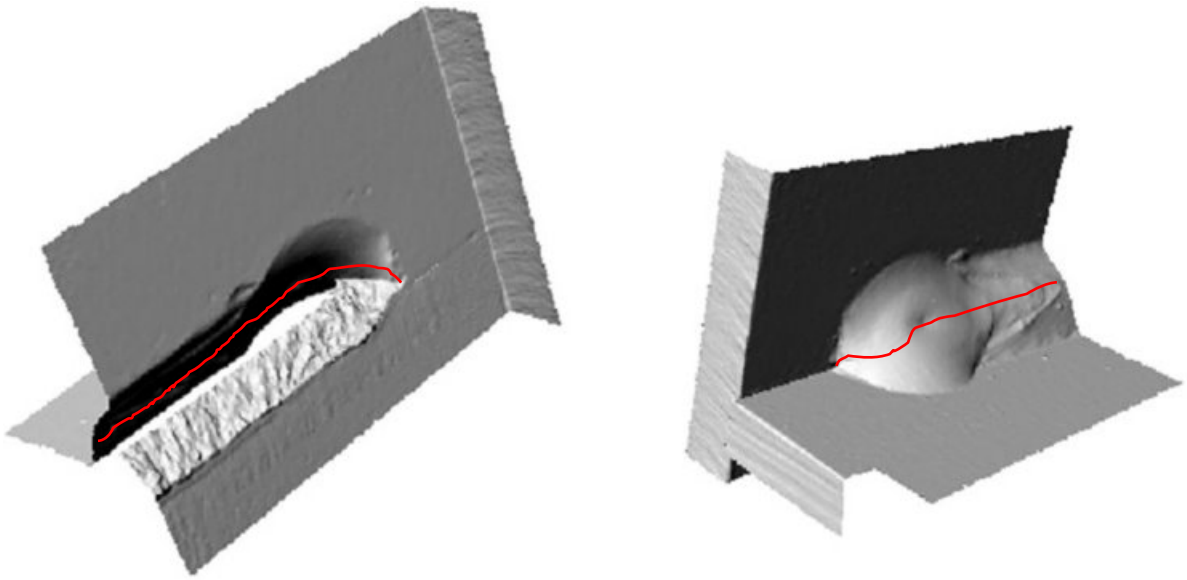

Abbildung 36: Ausgerichtete Scans der aufgebrochenen Naht

Zunächst werden die einzelnen STL Files (2x Wurzelkerbe, Oberfläche) abgespeichert, aus OPTOCAT exportiert und in Rhinoceros importiert. Wie schon mehrmals erwähnt, ist nun die große Aufgabe, aus den einzelnen aneinander ausgerichteten Scans ein geschlossenes Volumenmodell zu erstellen, das die Informationen der Nahtoberfläche und Wurzelkerbengeometrie beinhaltet. Die folgende Abbildung stellt nochmals dar, dass die Bruchflächen nicht genau aufeinander liegen. Hierin sind drei Schnitte aus den Scans der Wurzelkerbe abgebildet. Der Spalt zwischen den Bruchflächen nimmt einen Wert von etwa 0,01mm bis 0,08mm an.

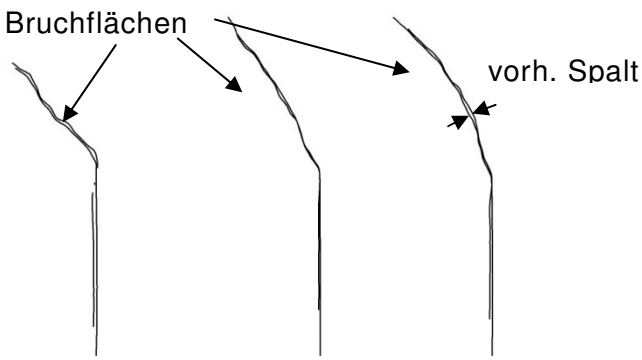

Abbildung 37: Drei Schnitte aus den Bruchflächen

Aufgrund der vorhandenen Durchdringungen der Bruchflächen ist eine automatisierte Konstruktion der Wurzelkerbengeometrie nicht möglich. Vielmehr sind die Scans per Hand zu bearbeiten.

Um einen besseren Eindruck von der Geometrie der Wurzelkerbe zu gewinnen, ist in folgender Abbildung ein Schliffbild der Stecklaschen abgebildet.

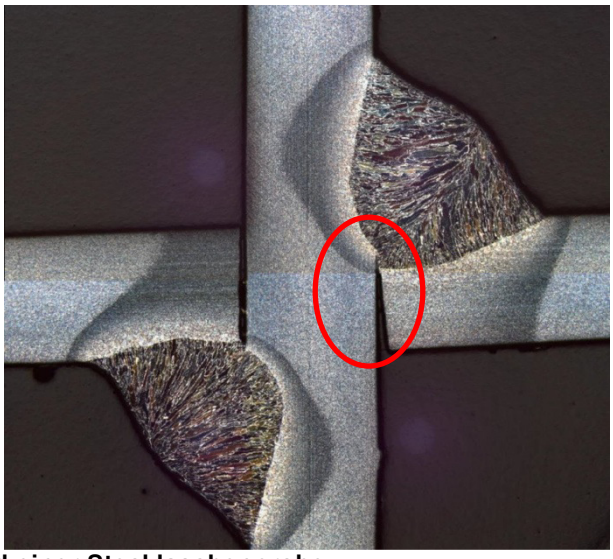

Abbildung 38: Schliffbild einer Stecklaschenprobe

Die rot markierte Geometrie also Wurzelkerbe ist ebenfalls in den Scans zu beobachten. Die Aufgabe ist nun, ein Volumenmodell zu bilden, das auf Basis der Informationen aus den Scans eine möglichst realitätsnahe Form der Wurzelkerbe wiedergibt. Die entwickelte Konstruktionsmethode hat sich bewährt, ist jedoch recht aufwändig. Es wird im Folgenden daher lediglich auf die wesentlichen Schritte eingegangen.

Die markierten fünf Punkte an der Wurzelkerbe (Abbildung 39 links) sind im ersten Schritt für mehrere Schnitte (Abstand 0,5mm) per Hand zu konstruieren. Für eine 30 mm lange Naht ergeben sich somit 300 Punkte, die zunächst per Hand zu konstruieren sind.

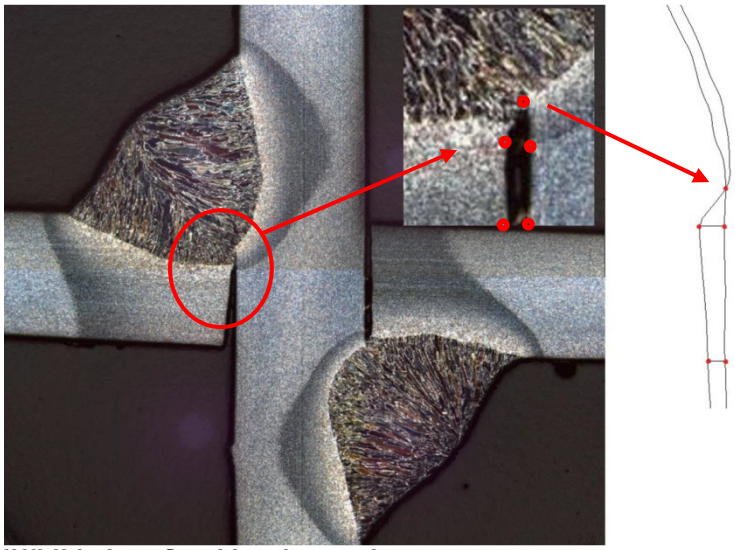

Abbildung 39: Schliffbild einer Stecklaschenprobe

Als Radius für die Konstruktion der Wurzelkerbe wurde der Wert 0,05 mm gewählt. Dieser Wert ergab sich aus den zahlreichen Messungen der Scans. Durch die konstruierten 300 Punkte sind zunächst Linien und anschließend Flächen zu bilden. Das Ergebnis sieht folgendermaßen aus:

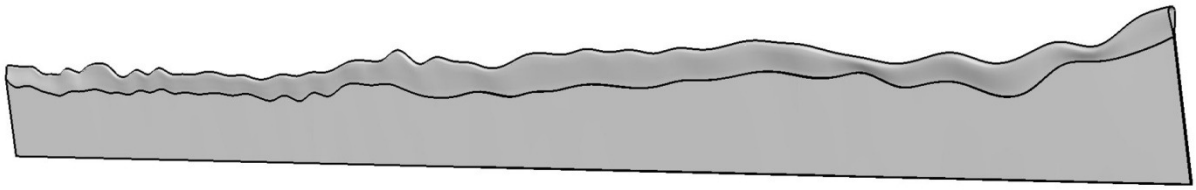

Abbildung 40: Verlauf der konstruierten Wurzelkerbe entlang der Schweißnaht

Ist der Verlauf der Wurzelkerbe modelliert, befasst sich der nächste Schritt mit der Konstruktion des Übergangs der Wurzelkerbe in den Übergangstrichter. Die Geometrie des Übergangstrichters wurde mit dem Scan der Nahtoberfläche ermittelt, sie ist in der Abbildung 41 rot markiert. Diese Geometrie wird an die zuvor konstruierte Wurzelkerbe angebunden. Das Ergebnis ist in Abbildung 41 dargestellt. Mit anderen Worten stellt die folgende Abbildung die Ansicht aus dem Inneren der Schweißnaht auf die Wurzelkerbe dar.

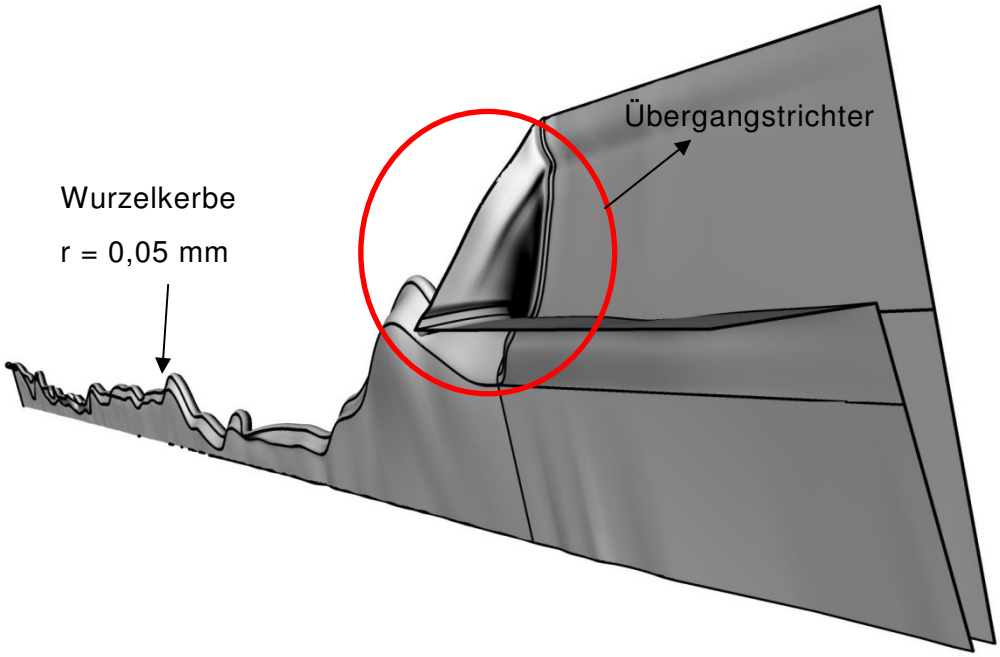

Abbildung 41: Verlauf der Wurzelkerbe und der Übergangstrichter

Im nächsten Schritt ist das entstandene Modell an den Oberflächenscan anzubinden. Es ist darauf hinzuweisen, dass die bisherigen Schritte in der Polygonnetz-Ebene zu erledigen sind. Durch das Verbinden der genannten Polygonnetze entsteht nun ein

einziges Polygonnetz. Dieses Polygonnetz ist in Abbildung 42 in zwei Ansichten dargestellt.

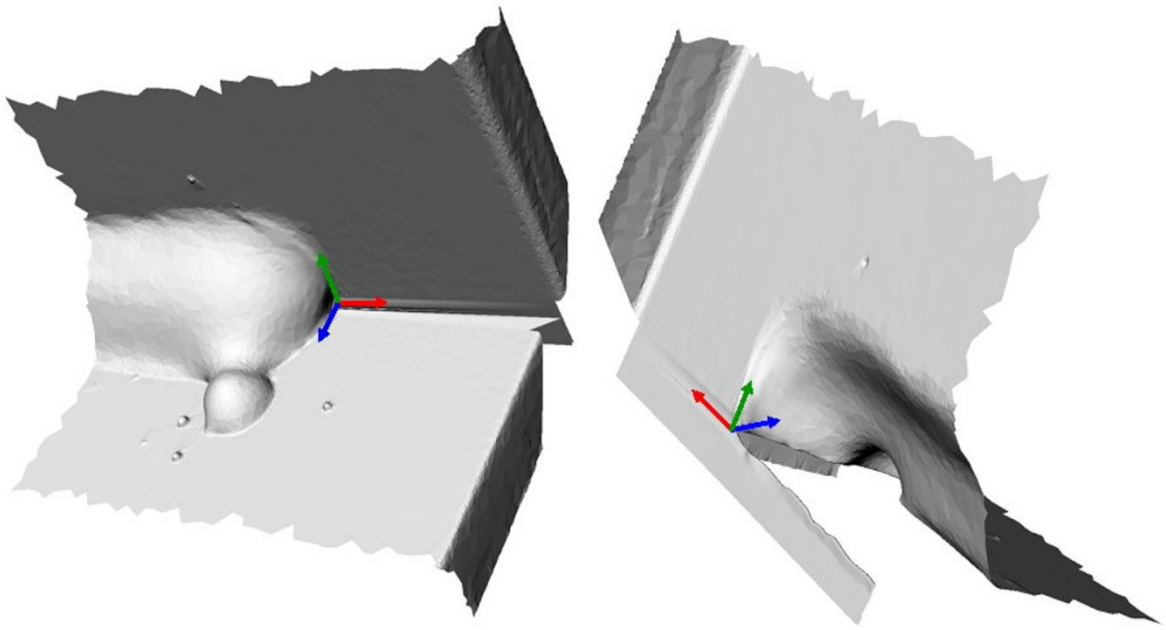

Abbildung 42: Ansicht von außen (links) und von innen (rechts) auf das Polygonnetz

Der letzte Schritt der Konstruktion ist das Erstellen eines Volumenmodells aus dem zuvor erzeugten Polygonnetz. In Abbildung 43-a ist zunächst das zu bearbeitende Polygonnetz dargestellt. Im Nahtendbereich weist das Netz die höchste Auflösung auf. Im restlichen Bereich ist das Netz komprimiert. Außerdem sind die Übergangskanten geglättet, sodass die Verformungen exakt an das Submodell übergeben werden können.

Das Netz wird nun mit einem Quader per Boolescher Operationen (Boolescher Polygonnetzzuschnitt) geschnitten (Abbildung 43-b).

Das erhaltene Modell (Abbildung 43-c) ist ein Volumenkörper ohne jeglichen offene Kanten, also ein geschlossenes Volumenmodell und beinhaltet die Geometrieinformationen der Nahtoberfläche, des Übergangstrichters und (am wichtigsten) der Wurzelkerbe. Das Modell muss nur noch in NURBS umgewandelt werden und als STEP-Datei exportiert werden. Somit sind die Bearbeitungen in Rhinoceros abgeschlossen. Die nächsten Schritte erfolgen mit dem Programm Abaqus FEA. Diese sind: Vernetzen, Berechnen und Postprocessing. Für die Berechnung kommt wiederum die Submodell-Technik zum Einsatz, um lokal die höchste Genauigkeit zu erreichen.

Im Folgenden wird auf die numerische Analysen eingegangen.

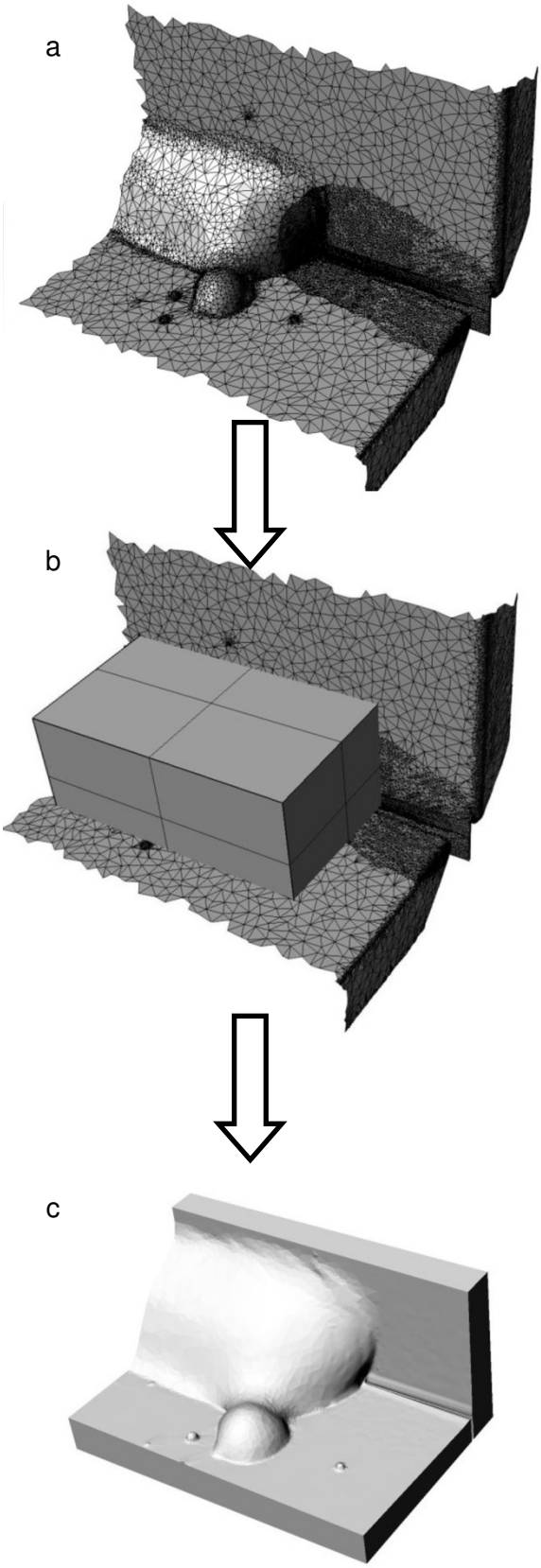

Abbildung 43: Erstellen eines Volumenmodells aus dem Polygonnetz

4.3. Numerische Analyse

Grobmodell

Das Grobmodell stellt eine Idealisierung der Probe dar. Die Schweißnähte sind nach dem idealisierten Nahtendmodell [24] modelliert. Die Berechnung erfolgt für eine Einheitsbeanspruchung 1N/mm². Das numerische Modell besteht aus Tetraeder-Elementen mit quadratischer Ansatzfunktion.

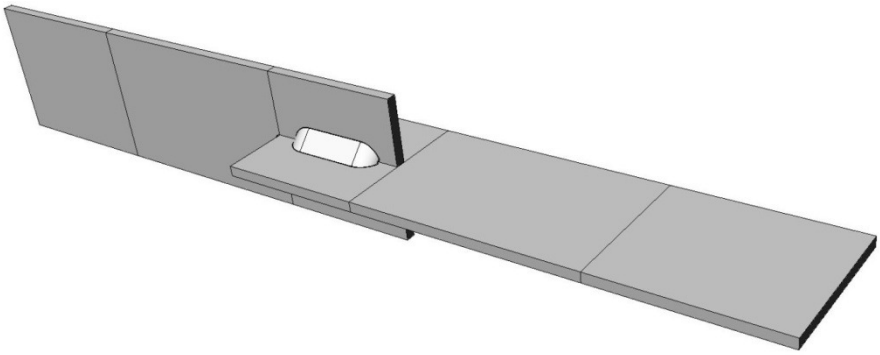

Abbildung 44:Grobmodell erstellt in Rhinoceros

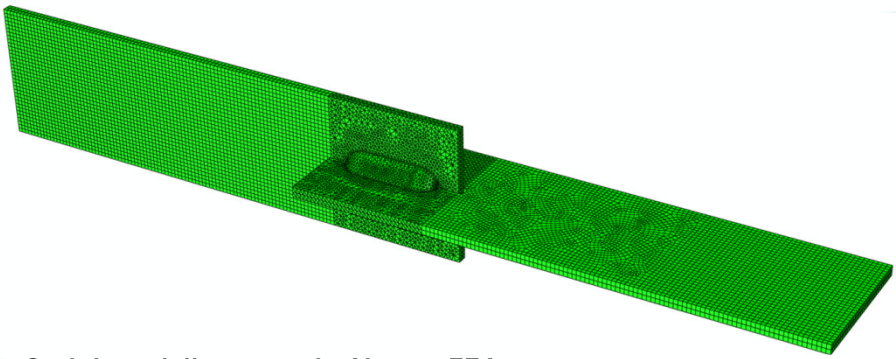

Abbildung 45: Grobdemodell vernetzt in Abaqus FEA

Im Folgenden werden ausgehend von den mit dem Grobmodell berechneten Verformungen zwei Submodelle zu berechnet.

Submodell 1

Das erste Submodell besitzt die gescannte Geometrie der Nahtoberfläche. Es beinhaltet die ganze Schweißnaht. Der Verlauf der Wurzelkerbe entspricht dem konstruierten Verlauf aus den Scans. Das Netz wurde jedoch komprimiert, so dass die höchste Scanner-Auflösung erst im zweiten Submodell zum Einsatz kommt. Die Dreieckselemente auf den Randflächen wurden mit virtueller Topologie zusammengefasst. Somit lässt sich das Submodell an das Grobmodell ausrichten. Eine korrekte Übertragung der Verformungen an das Submodell wird damit sichergestellt. Über die Blechdicke verfügt das Modell über vier Elemente. Die Elementanzahl beträgt für das Modell insgesamt ca. 220.000.

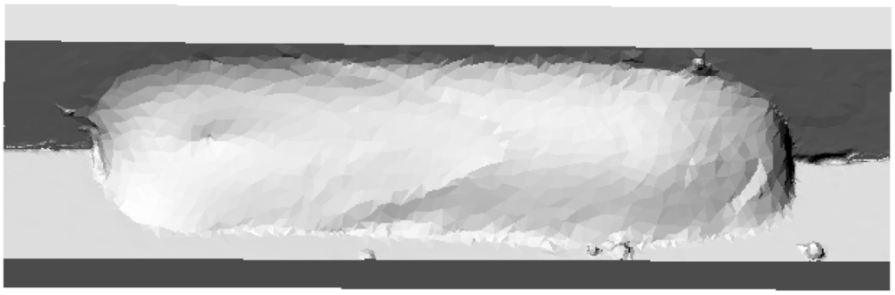

Abbildung 46: Submodell 1 erstellt in Rhinoceros

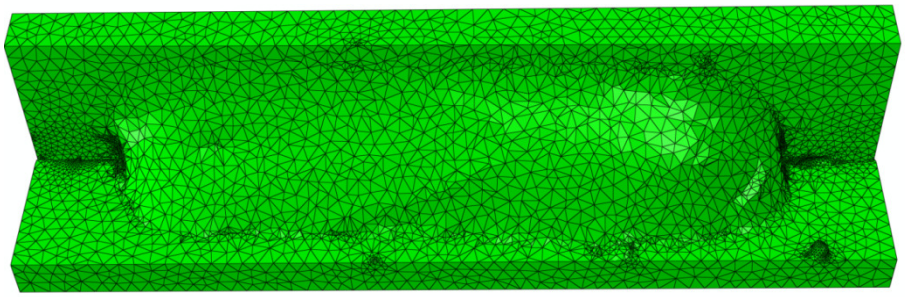

Abbildung 47: Submodell 1 vernetzt in Abaqus FEA

Wie erwartet, befindet sich die höchstbeanspruchte Stelle der Schweißnaht im Nahtendbereich. Hiermit können zunächst die Versuchsergebnisse bestätigt werden. In einem zweiten Submodell basierend auf den unkomprimierten Scannerdaten wird dieser Bereich genauer untersucht, um die Kerbspannungen möglichst genau ermitteln zu können.

Submodell 2

Mit diesem Modell werden nun die Spannungen im Nahtendbereich auf Basis der höchsten Scanner-Auflösung berechnet. Für die Submodell-Technik ist stets zu beachten, dass die Lage der Submodelle im Koordinatensystem mit der des Grobmodells übereinstimmen muss (Einpassen der Submodelle ins Grobmodell). Auch hier werden die Randflächen mittels virtueller Topologie zusammengefasst. Das vernetze Modell, bestehend aus ca 500.000 Elementen, ist in Abbildung 48 dargestellt.

Beim Postprocessing werden die Vergleichsspannungen nach von Mises $\sigma_{V,Mises}$ an den Knoten ausgewertet. Diese werden aus den angrenzenden Elementen gemittelt.

Somit ist die numerische Analyse des gescannten Modells abgeschlossen. Es ist wieder zu betonen, dass die gescannte Geometrie die Geometrieinformationen der Nahtoberfläche und viel wichtiger der Wurzelkerbe beinhaltet. Die Konstruktion der Geometrie ist aber ein sehr aufwändiges Verfahren, das viel Zeit in Anspruch nimmt. Im Rahmen dieses Projekts ist es gelungen, das entwickelte Verfahren auf eine Probe anzuwenden. Die Ergebnisse der numerischen Analyse sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

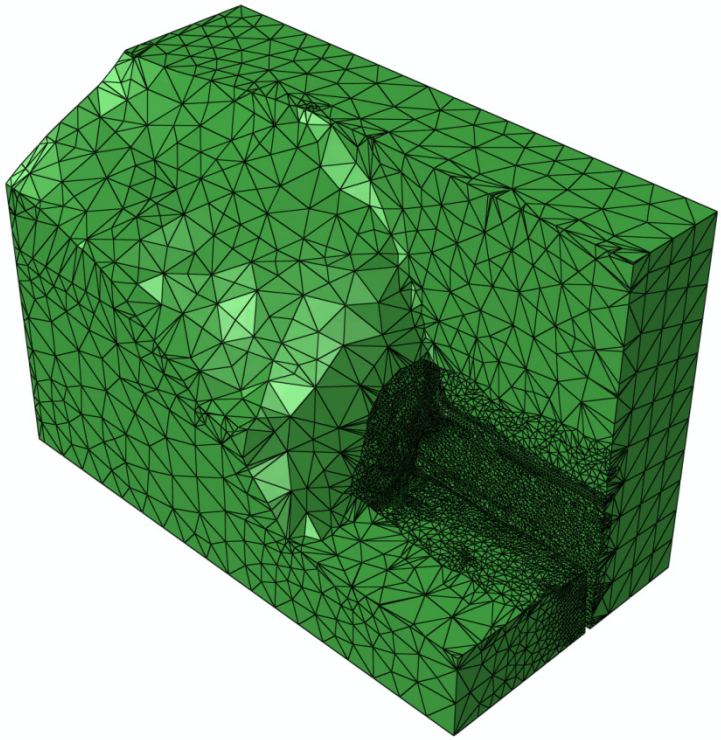

Abbildung 48: Submodell 2 vernetzt in Abaqus FEA

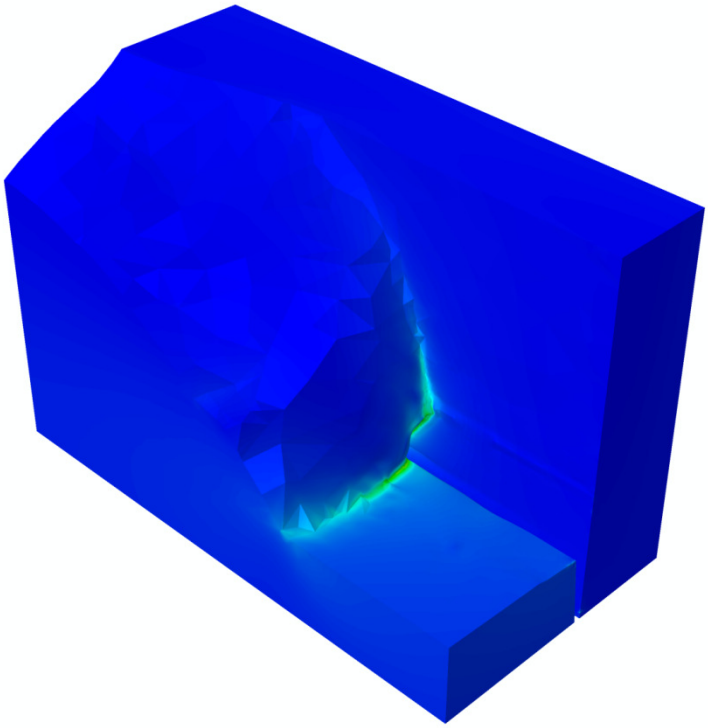

Abbildung 49: Ergebnis von Submodell 2

Die höchstbeanspruchte Stelle kann allerdings in dieser Ansicht nicht eingesehen werden. Der "rote" Bereich ist erst durch Vergrößern und Drehen der obigen Ansicht zu identifizieren. Abbildung 50 rechts ist dieser Detailbereich dargestellt. Hierbei ist die höchstbeanspruchte Stelle mit maximaler Vergleichsspannung zu erkennen. Sie

befindet sich ungefähr 1mm in dem konstruierten "Tunnel". Der Wert der maximalen Spannung beträgt für den berechneten Lastfall 41 N/mm².

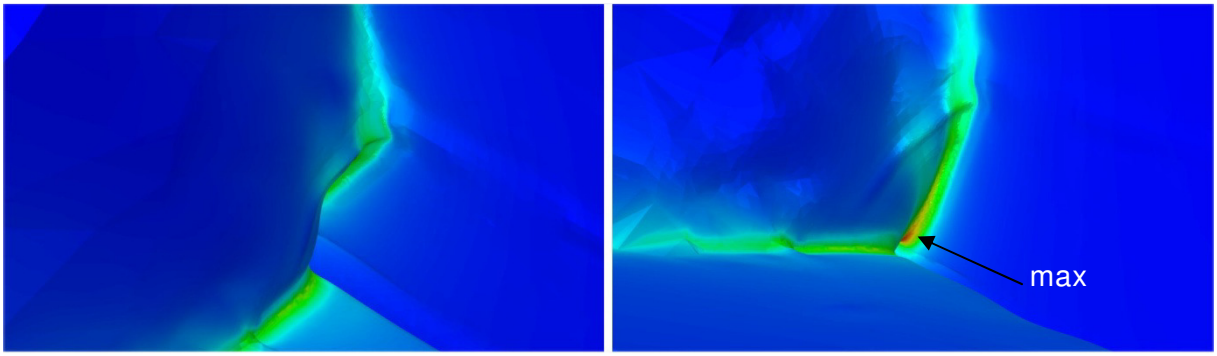

Abbildung 50: Ergebnis von Submodell 2

5. Konzeptbildung

In Abschnitt 4 wurde das im Rahmen dieses Projektes entwickelte Verfahren beschrieben, mit dem die Berechnung der Kerbspannungen auf Basis von aufgebrochenen und gescannten Schweißnähten ermöglicht wird. In diesem Abschnitt wird nun die mit Hilfe der Versuchsergebnisse und aus den Scans berechneten Kerbspannungen erarbeitete Bewertungsmethode für das Kerbspannungskonzept dargestellt. Als Hilfsmittel kommt das im Rahmen des Vorgängerprojektes A 249 entwickelte idealisierte Nahtendmodell zum Einsatz. Im Folgenden wird zunächst auf dieses eingegangen, da es mit verändertem Parametersatz auch für das vorliegende Projekt zum Einsatz kommt.

5.1. Idealisiertes Nahtendmodell nach A 249

Im Rahmen des am Fachgebiet Werkstoffmechanik der Technischen Universität Darmstadt bearbeiteten Forschungsvorhabens „Schwingfestigkeitsbewertung von Schweißnahtenden“ [24] wurde ein idealisiertes Nahtendmodell entwickelt. Dieses basiert auf Analysen der Nahtendgeometrie vieler Proben insbesondere in Bezug auf den Ausrundungsradius und den Nahtstiegswinkel sowie auf vergleichenden Untersuchungen der berechneten Spannungen an gescannten und an idealisierten Modellen. Mit Hilfe des entwickelten idealisierten Modells konnten eine "Master"-Kerbspannungswöhlerline bestimmt werden, anhand der Betriebsfestigkeitsnachweise an Schweißnahtenden für die Lastarten Biegung, Längs- und Querzug geführt werden können. Die Beanspruchungen auf der Einwirkungsseite sind ebenfalls mit dem idealisierten Nahtendmodell zu berechnen. Für die praktische Anwendung wurde eine Vernetzungsrichtlinie erstellt, mit deren Hilfe die Geometrie des idealisierten Nahtendmodells im Rahmen von FE-Berechnungen generiert werden kann.

Um ein Schweißnahtende mit dem entwickelten Modell abzubilden, sind lediglich die folgenden Eingangsparameter notwendig:

Eingangsparameter:

Ausrundungsradius r

Höhe der Seitenfläche der Schweißnaht S

Verhältnis der Übergangsbögen $v = h_1/h_2$

Tangentenwinkel α

In Abbildung 51 ist das Nahtende in der XY-Ebene skizziert. Die Geometrie besteht im Wesentlichen aus einer Geraden $\overline{P_3P_4}$ und zwei Kreisbögen. Der kürzere Kreisbogen geht von Punkt P_3 zu Punkt P_2. Der Mittelpunkt dieses Bogens ist M_2. Der längere Kreisbogen verbindet die Punkte P_2 und P_1. Sein Mittelpunkt ist M_1. Der Tangentenwinkel α ist der Winkel zwischen den Geraden $\overline{M_1P_1}$ und $\overline{M_1P_2}$ beziehungsweise zwischen $\overline{M_2P_3}$ und $\overline{M_2M_1}$, da die Punkte M_1, M_2und P_2 auf einer Geraden liegen. Die Höhe der Seitenfläche S ergibt sich aus den Scans oder kann mit einer guten Näherung mit $a\sqrt{2}$ abgeschätzt werden.

Das Verhältnis der Übergangsbögen berechnet sich aus den Größen h_1 und h_2. Diese sind ebenfalls in Abbildung 51 zu erkennen. Der Ausrundungsradius wird benötigt, um im dreidimensionalen Nahtendmodell an der Übergangs- bzw. Wurzelkerbe Kerbradien abzubilden. In dem entwickelten Nachweiskonzept des Vorgängerprojektes nehmen die Eingangsparameter folgende Werte an:

$r = 0{,}2$ mm

$v = 2$

$\alpha = 90$ Grad

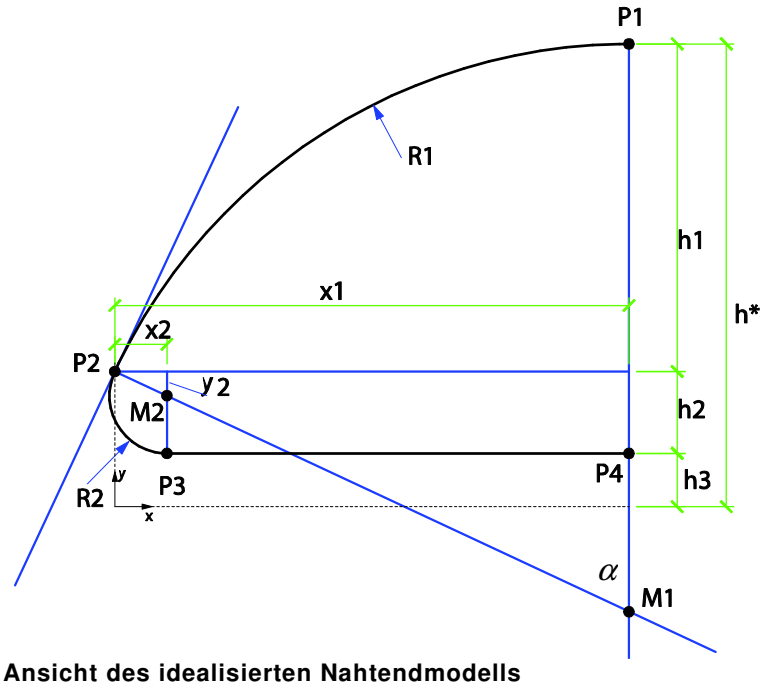

Abbildung 51: 2D Ansicht des idealisierten Nahtendmodells

Um die zweidimensionale Nahtgeometrie zeichnen zu können, werden im Folgenden die Gleichungen für die Bestimmung der Hilfsgrößen in Abhängigkeit von den Eingangsparametern angegeben.

Hilfsgrößen:

$h^* = S + r - r \cdot \tan(22{,}5°)$

$h_3 = \sqrt{2} \cdot r / \tan(22{,}5°)$

$h_1 = \frac{v}{1+v} \cdot (h^* - h_3)$

$h_2 = \frac{1}{1+v} \cdot (h^* - h_3)$

$x_1 = h_1 / \tan(\alpha/2)$

$R_1 = x_1 / \sin(\alpha)$

$x_2 = h_2 \cdot \tan(\alpha/2)$

$y_2 = x_2 / \tan(\alpha)$

$R_2 = x_2 / \sin(\alpha)$

Somit ergeben sich die folgenden sechs Punkte, die in der obigen Abbildung ebenfalls zu finden sind. Die Koordinaten beziehen sich auf das in Abbildung 51 eingezeichnete Koordinatensystem.

Hilfspunkte

$P_1(x_1|h^*)$

$P_2(0|h_2 + h_3)$

$P_3(x_2|h_3)$

$P_4(x_1|h_3)$

$M_1(x_1|h^* - R_1)$

$M_2(x_2|h^* - h_1 - y_2)$

Die einzelnen Modellierungsschritte zur Erstellung des dreidimensionalen Modells werden in Bericht zum [24] sehr genau erläutert. An dieser Stelle sei nur darauf hingewiesen, dass die Aussparung h_3 so gewählt werden muss, dass durch das Verrunden eine zylindrische Fläche für die Wurzelkerbe entsteht. Der Querschnitt und damit die Wurzelkerbe eines so modellierten Nahtendes sieht folgendermaßen aus:

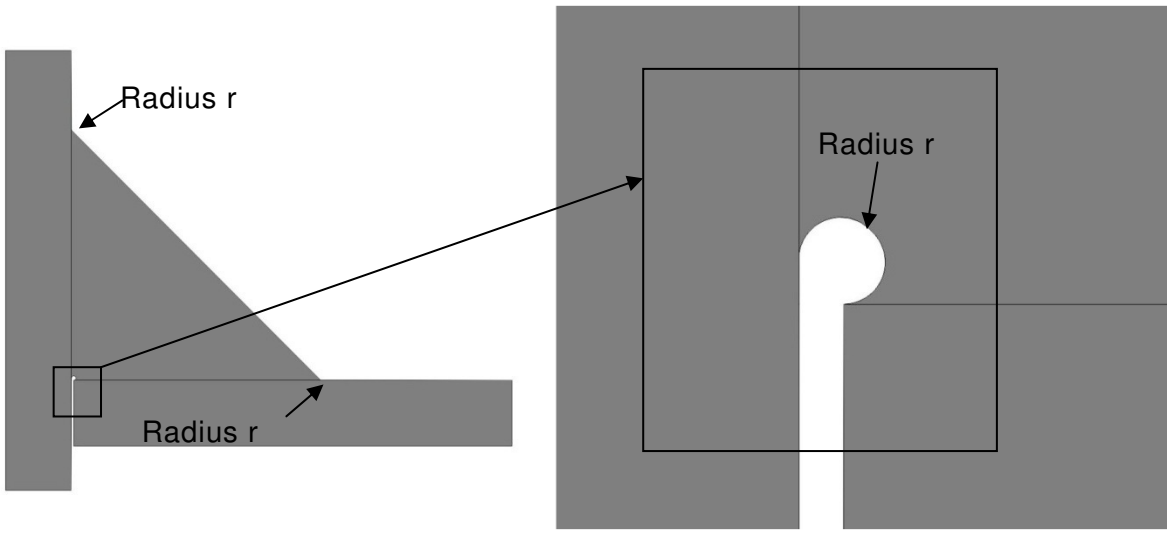

Abbildung 52: Querschnitt des idealisierten Nahtendmodells

In Abbildung 53 ist die dreidimensionale Ansicht eines idealisierten Nahtendmodells, wie es im Vorgängerprojekt entwickelt wurde, dargestellt. Die Modellierungsschritte werden in CAD-Software Rhinoceros durchgeführt. Hierbei kommt vor allem die Funktion "Fillet" für das Verrunden der Flächen zum Einsatz. Das besondere an der Funktion ist, dass hiermit auch gekrümmte Flächen (wie es hier der Fall ist) verrundet werden können.

Das erstellte Modell kann als STEP Datei abgespeichert und ins FE-Programm Abaqus FEA geladen werden, um dort die erforderlichen Vernetzungsarbeiten und die abschließende numerische Analyse durchzuführen.

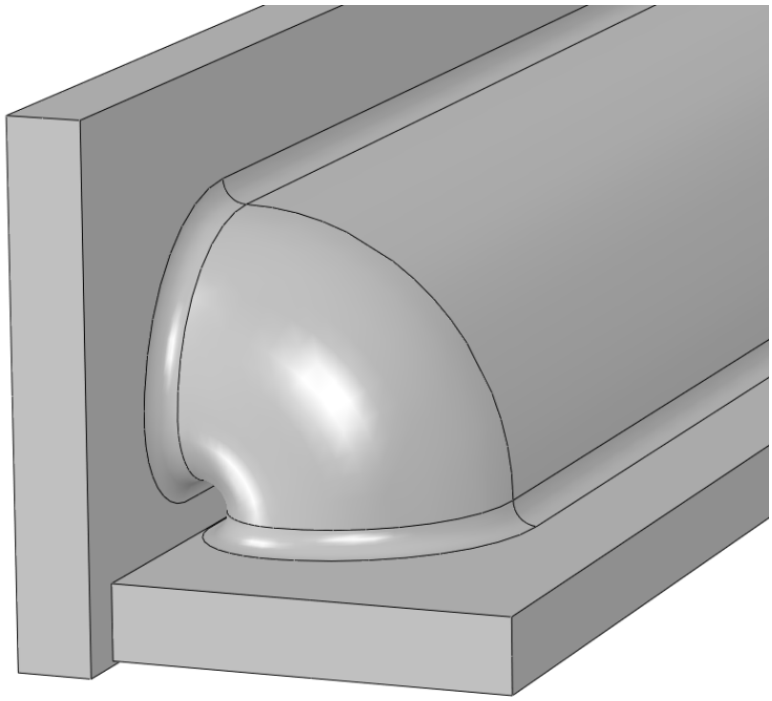

Abbildung 53: Isometrische Ansicht des idealisierten Nahtendmodells nach [24]

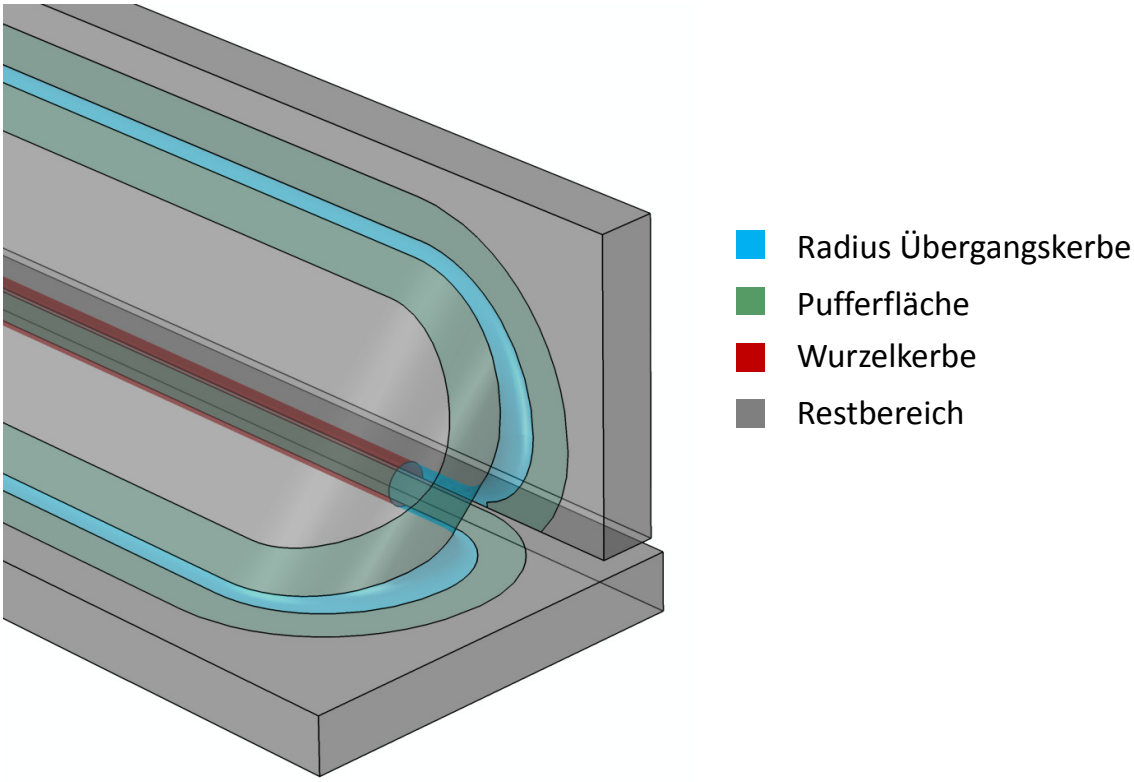

Abbildung 54: Isometrische Ansicht des idealisierten Nahtendmodells mit den verschiedenen Vernetzungszonen nach [24]

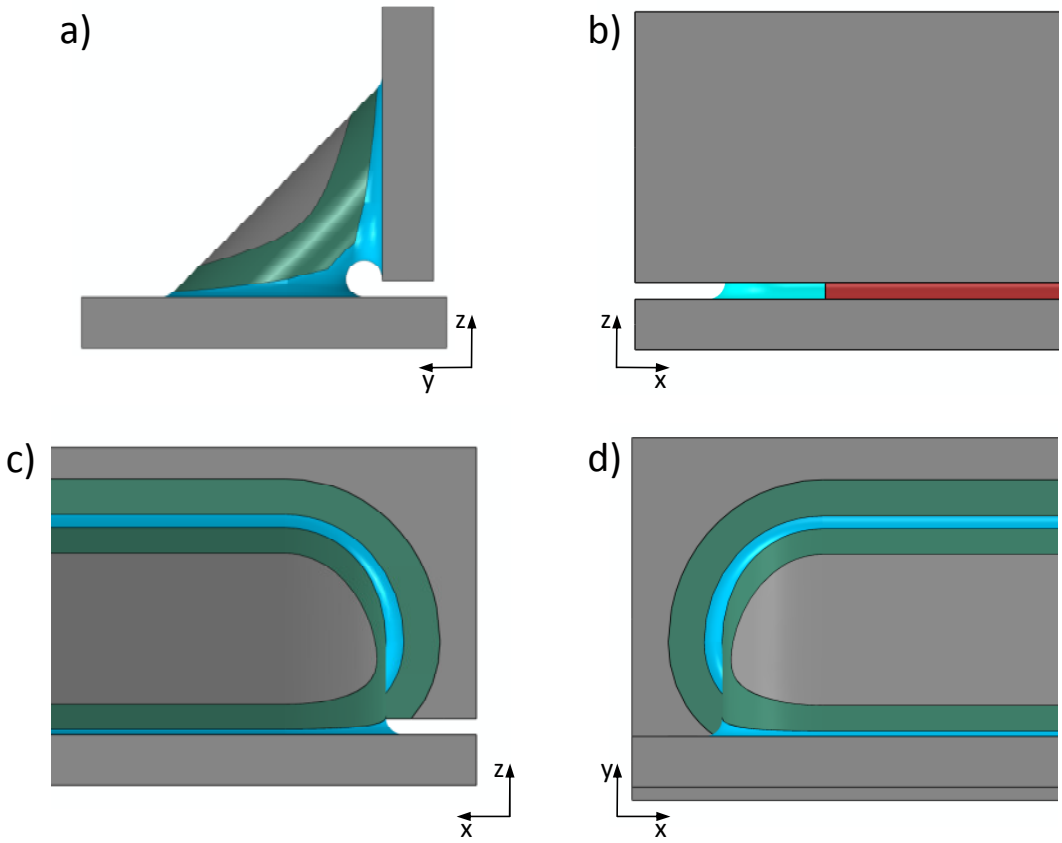

Abbildung 55: Ansichten der zu vernetzenden Geometrie nach [24]

Um das Modell numerisch berechnen zu können, muss dieses sinnvoll vernetzt werden. Hierzu wird die Geometrie zunächst in vier Bereiche partitioniert. Für den Übergang von Übergangskerbe (hellblau) zum Restbereich (grau) wurde eine Pufferfläche mit der konstanten Breite 2r eingeführt. Somit kann das sehr feine Netz der Übergangskerbe in den Restbereich mit gröberer Vernetzung übergehen. Die Wurzelkerbe (rot) ist als vierter Bereich mit der zylindrischen Form in Abbildung 54 zu erkennen. Das partitionierte Modell ist in Abbildung 55 in unterschiedlichen Ansichten dargestellt, um die Geometrieunterteilungen besser darstellen zu können.

Ein so unterteiltes Modell kann nun vernetzt werden. Wie auch bei den auf Basis der eingescannten Nahtendgeometrie durchgeführten Berechnungen, kommen Tetraederelemente mit quadratischer Ansatzfunktion zum Einsatz. Das definierte Materialverhalten ist nach wie vor linear elastisch mit folgenden Werkstoffkennwerten:

$E = 210000$ N/mm²
$\nu = 0{,}3$

Für die Erstellung des FE-Netzes ist es nur noch notwendig, die durch den Partitionierungsvorgang erstellten Begrenzungslinien zu unterteilen. Auch hierfür ist im Rahmen des Vorgängerprojektes ein Vorschlag entwickelt worden. Demnach werden in Abhängigkeit von den Eingangsgrößen Ausrundungsradius und Schweißnahtdicke in den unterschiedlichen vier Bereichen Elementkantenlängen vorgegeben. Die folgende Tabelle fasst die vorgeschlagene Vernetzungsstrategie zusammen:

Tabelle 5: Zusammenfassung der Vernetzungsrichtlinie nach [24]

Bereich	Elementkantenlänge
Radius Übergangskerbe	0,03mm · (r / 0,2mm)
Pufferfläche	a/8
Wurzelkerbe	r/2
Restbereich	a/4

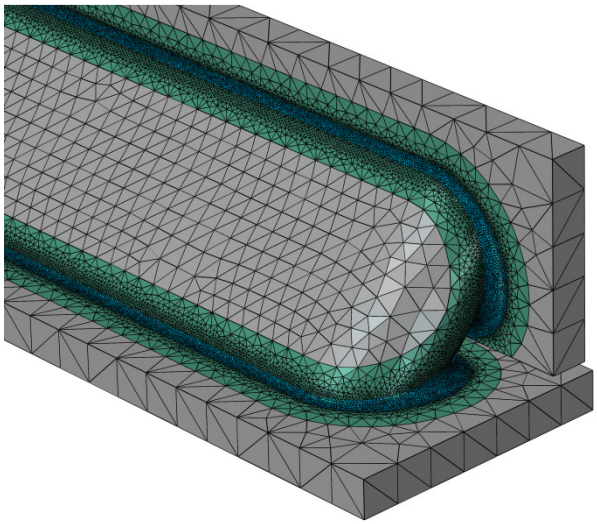

Abbildung 56: Vernetzte Geometrie

Ein derart modelliertes, partitioniertes und vernetztes Nahtende ist in Abbildung 56 dargestellt. Für die Berechnung der Kerbspannungen kommt die einstufige Submodell-Technik zum Einsatz.

Im nächsten Abschnitt wird das für den Lastfall Schub modifizierte Nahtendmodell mit den neuen Parametern vorgestellt.

5.2. Bestimmung der neuen Parameter

Wie schon erwähnt, ist bei einer Schweißnaht durch den Schweißvorgang zwischen Nahtanfang und Nahtende zu unterscheiden. Im Vorgängerprojekt haben Versuche gezeigt, dass der Nahtanfang stets als Versagensort maßgebend ist. Aus diesem Grund bezieht sich die entwickelte Modellierungstechnik auf den Nahtanfang. Das bedeutet also, dass das idealisierte Nahtendmodell aus zwei Nahtanfängen besteht (Worst Case Model). Im aktuellen Projekt hingegen wurden Risse sowohl am Nahtanfang als auch am Nahtende beobachtet. Lediglich bei etwa einem Drittel der getesteten Stecklaschenverbindungen hat sich der versagensmaßgebende Riss am Nahtanfang eingestellt. Da die beiden Geometrien stark voneinander abweichen, muss dies schon bei der Geometrieerstellung des idealisierten Nahtendmodells berücksichtigt werden. Außerdem wurde ein konzeptgebundener Ausrundungsradius r = 0,2 mm ermittelt. Dieser Wert entspricht dem im Mittel tatsächlich vorhandenen

Radius am Versagensort Nahtfuß. Der Versagensort verschiebt sich für den Lastfall Schub in Richtung Wurzelkerbe. Aus den genannten Gründen muss zunächst ein modifiziertes idealisiertes Nahtendmodell bestimmt werden, das in der Lage ist, die Belastungsart Schub richtig abzubilden. Umfangreiche Untersuchungen haben ergeben, dass die Eingangsparameter des Nahtendmodells A 249 hierzu neu bestimmt werden müssen.

Die neuen Eingangsparameter:

Die Höhe der Seitenfläche S hängt lediglich von der Dicke der Schweißnaht ab und kann daher ausgehend von einer gleichschenkligen Naht mit folgender Gleichung abgeschätzt werden:

$$S = a\sqrt{2}$$

Wie schon erwähnt, unterscheiden sich Nahtanfang und Nahtende in ihrer Geometrie grundlegend. Typisch für den Nahtanfang ist der starke Schweißgutauftrag. Dahingegen ist für das Nahtende das kleinere Volumen und die flach auslaufende Form charakteristisch. Um diesen zwei Geometrien als mögliche Versagensorte bei der Modellierung gerecht zu werden, werden die Parameter Tangentenwinkel und Übergangsbögenverhältnis so variiert, bis das Nahtendmodell der Form eines gemittelten Nahtanfangs und Nahtendes ähnelt, denn nur so können die berechneten Kerbspannungen aus den gescannten Geometrien mit dem idealisierten Nahtendmodell näherungsweise erreicht werden. Die Bestimmung des neuen Ausrundungsradius r erfolgte auf Basis von zahlreichen Messungen an den aufgebrochenen und gescannten Schweißnähten in der Wurzelkerbe (siehe Kapitel 4). Im Rahmen dieses Projektes wurde ein konzeptgebundener Radius r = 0,05 mm gewählt. Durch Variation der beiden Parameter α und ν kann das Nahtendmodell an die Geometrie der Scans angepasst werden. In Abbildung 57 ist die zweidimensionale Ansicht des idealisierten Nahtendmodells für die Beanspruchungsarten Biegung, Längs- und Querzug dargestellt (links). Durch die Variation der zuvor genannten Parameter entsteht das Modell für die Belastungsart Schub, in Abbildung 57 rechts dargestellt. In Abbildung 58 erkennt man, dass die entstandene Geometrie eine gemischte Form aus Nahtanfang und Nahtende besitzt.

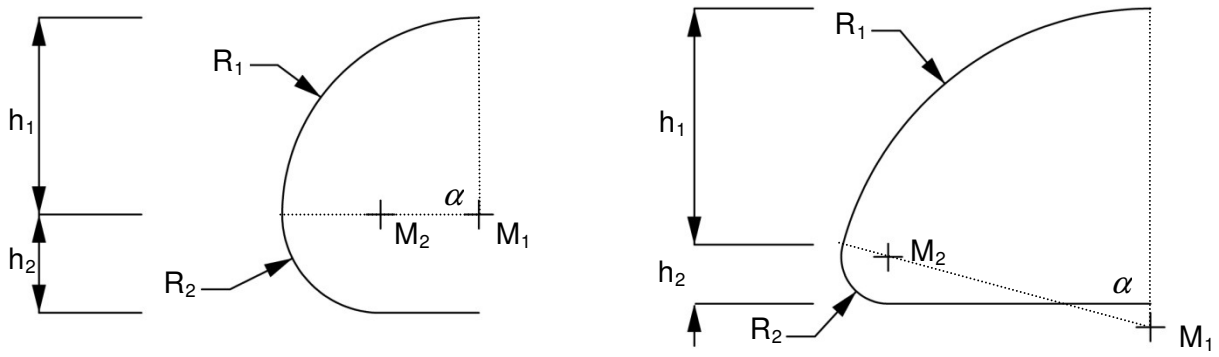

Abbildung 57: idealisiertes Nahtendmodell für Längs- und Querzug sowie Biegung (links) und für Schub (rechts)

In folgender Tabelle sind die Radien und die Höhen der oben skizzierten Bögen für eine Schweißnaht mit der Dicke a = 4 mm angegeben.

Tabelle 6: Geometriemaße der idealisierten Modelle

Schweißnahtdicke a = 4 mm		
Maße in mm	Nahtendmodell für Biegung, Längs- und Querzug (Vorgängerprojekt)	Nahtendmodell für Schub (aktuelles Projekt)
r	0,2	0,05
α in Grad	90	75
v	2	4
R_1	3,68	5,95
R_2	1,84	0,88
h_1	3,68	4,41
h_2	1,84	1,10

In Abbildung 58 sind die Nahtendmodelle mit den oben angegebenen Parametern für eine Naht mit der Dicke a= 4 mm gegenübergestellt.

Wie schon in Kapitel 4 dargestellt, wurde im Rahmen dieses Projektes das Ziel erreicht, mit einem 3D Scanner die genaue Form der Schweißnaht inklusive Wurzelkerbe aufzunehmen. Das idealisierte Nahtendmodell konnte durch die Ermittlung geeigneter Werte für die Eingangsparameter an einem solchen Modell ausgerichtet werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 59 zu erkennen.

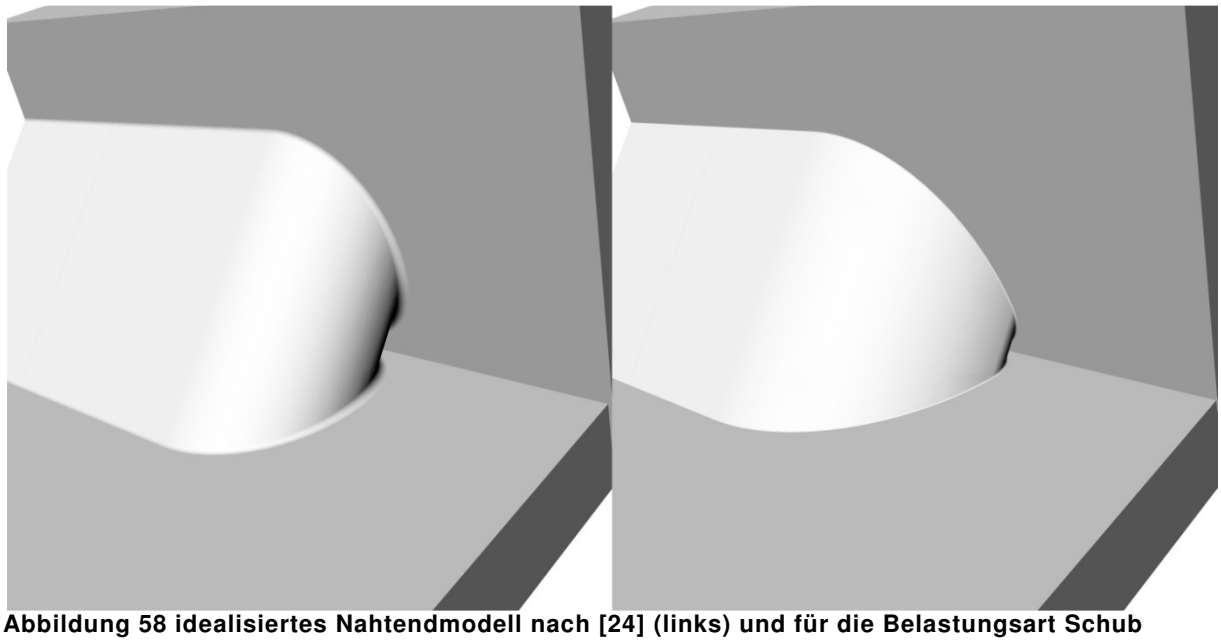

Abbildung 58 idealisiertes Nahtendmodell nach [24] (links) und für die Belastungsart Schub (rechts)

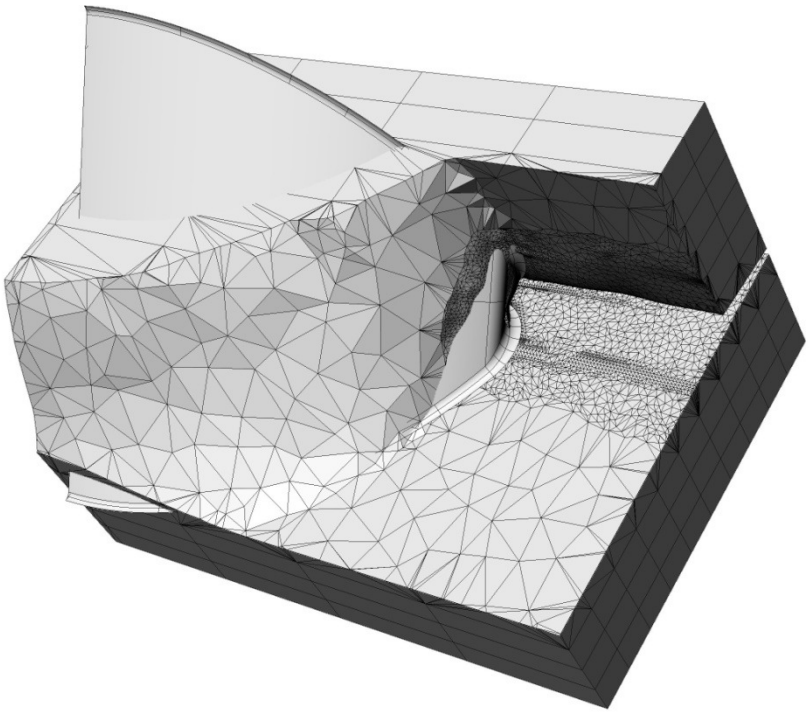

Abbildung 59: idealisiertes Nahtendmodell und eingescannte Geometrie

In Abbildung 60 sind die Stecklaschenprobe (links) und das Detail des Schweißnahtendes (rechts) im letzten Rhinoceros-Arbeitsschritt dargestellt. Im nächsten Schritt wird das in Rhinoceros idealisierte Nahtendmodell als STEP File abgespeichert, um damit in Abaqus FEA die Vernetzung und nachfolgend die numerische Berechnung durchführen zu können.

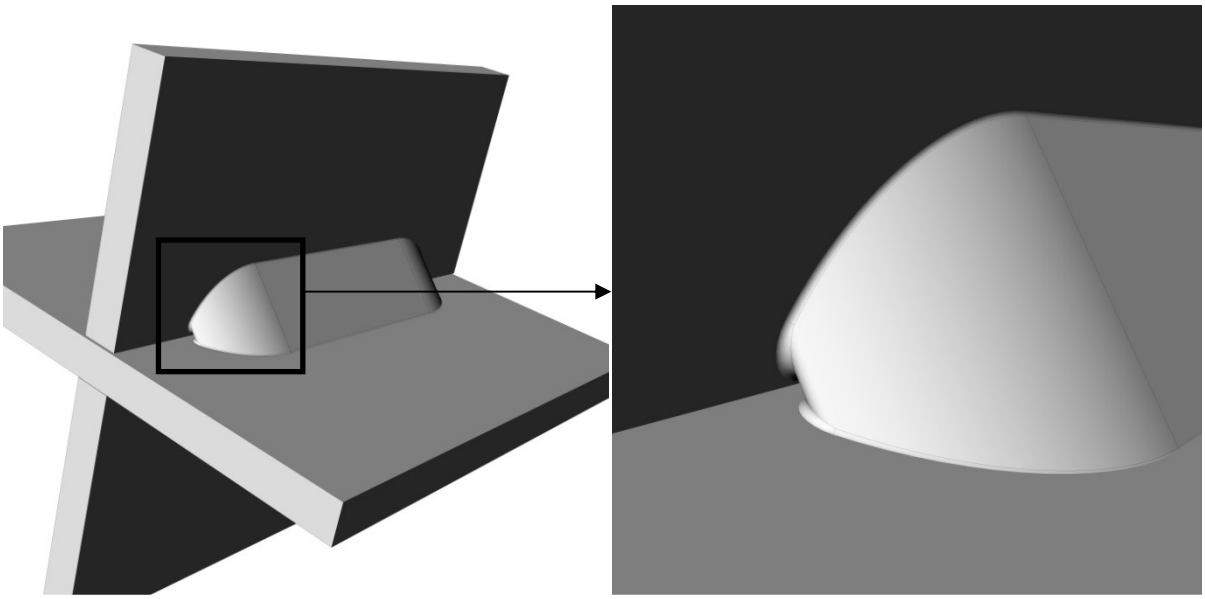

Abbildung 60: modifiziertes Nahtendmodell für die Belastungsart Schub

Im nächsten Abschnitt wird auf die numerische Berechnung und daraus resultierende Kerbspannungswöhlerlinie eingegangen.

5.3. Konzeptgebundene Kerbspannungswöhlerlinie

Die numerische Berechnung der Kerbspannungen für das idealisierte Nahtendmodell erfolgt mit Hilfe der Submodell-Technik. Die Vorgehensweise ist analog zur Berechnung auf Basis der gescannten Geometrie (Kapitel 4). Für die Vernetzung und Partitionierung der in Rhinoceros erstellten Geometrie kommen die Vorschläge gemäß dem Vorgängerprojekt, die sich gut bewährt haben, zum Einsatz.

In folgender Abbildung sind das vernetzte Submodell der Stecklaschenprobe aus der Versuchsreihe Lang / Dick (links) und der Spannungsplot der Struktur infolge einer Einheitsbeanspruchung 1 N/mm² (rechts) dargestellt. Das markierte Detail ist in Abbildung 62 vergrößert dargestellt.

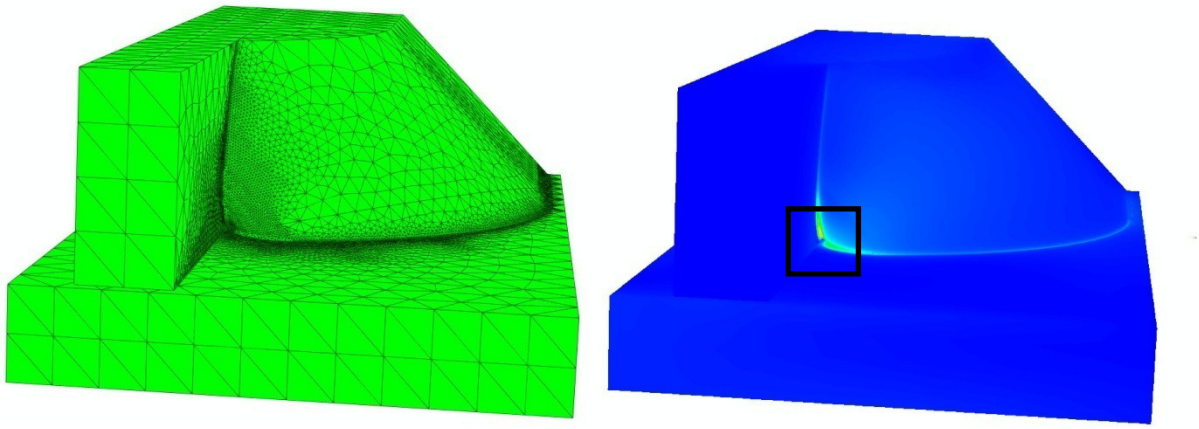

Abbildung 61: Submodell berechnet in Abaqus FEA

Ein Vergleich dieser Abbildung mit Abbildung 50 (Kapitel 4) zeigt, dass sich die hochbeanspruchte Stelle der beiden berechneten Modelle mit guter Übereinstimmung am nahezu gleichen Ort befindet. Der Maximalwert der Vergleichsspannung nach von Mises beträgt für das idealisierte Nahtendmodell 21,8 N/mm².

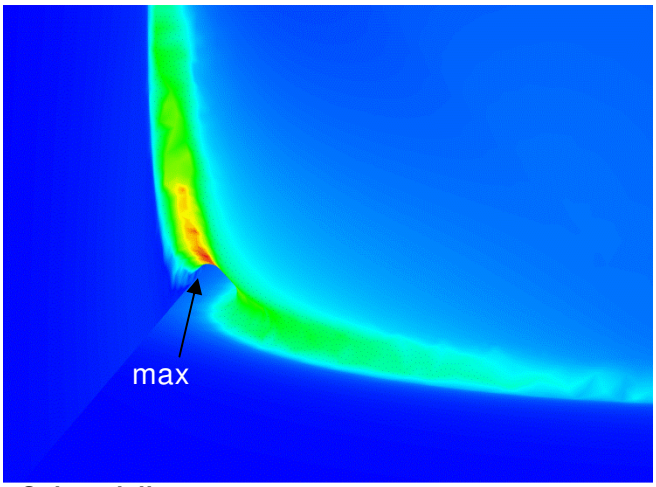

Abbildung 62: Ergebnis Submodell

Der Spannungsunterschied im Vergleich zu der ermittelten Kerbspannung mit der gescannten Geometrie ergibt sich möglicherweise aus dem Grund, dass es sich bei dem idealisierten Nahtendmodell um eine gemittelte Geometrie aus Nahtanfang und Nahtende handelt.

Bei dem zu erstellenden Nachweiskonzept werden die Einwirkungen mit dem zuvor vorgestellten idealisierten Nahtendmodell berechnet. Um das Konzept in sich schlüssig zu halten, müssen die so berechneten Spannungen einer Kerbspannungswöhlerlinie gegenübergestellt werden, die ebenfalls mit dem idealisierten Modell berechnet wird. Hierfür werden den aus den Versuchen ermittelten Versagensschwingspielzahlen die aus dem idealisierten Nahtendmodell berechneten Kerbspannungen zugeordnet. Es ergibt sich abschließend die konzeptgebundene Kerbspannungswöhlerlinie nach Abbildung 63. Hierin werden die Kennwerte der Wöhlerlinie, vor allem die Steigung k und die Spannungsamplitude σ_a bei $2*10^6$ Schwingspielen sowie die Streuspanne T_σ angegeben. Die Streuspanne bezeichnet das Verhältnis der Spannungsamplituden für 90% und 10% Überlebenswahrscheinlichkeit.

$T_\sigma = 1 : (\sigma_{a,10\%} / \sigma_{a,90\%})$

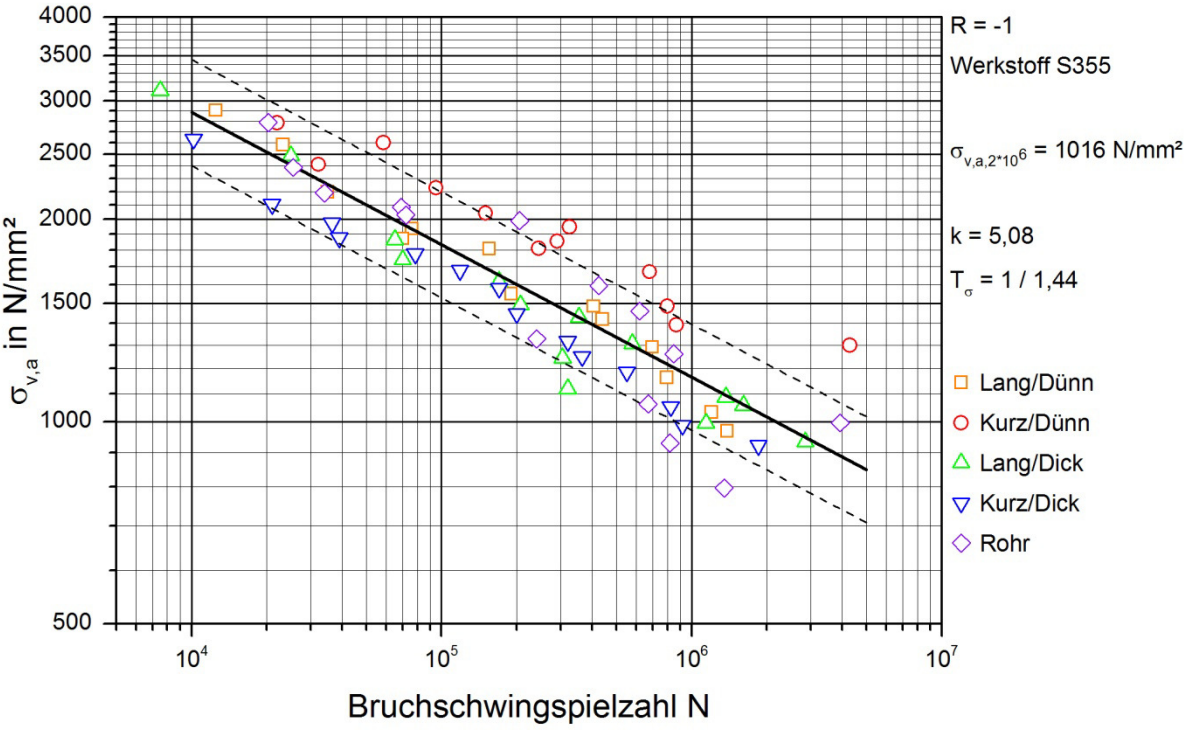

Abbildung 63: konzeptgebundene Wöhlerlinie

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Kerbspannungswöhlerline, die im Rahmen des Vorgängerprojektes für Lastarten Biegung, Längs- und Querzug berechnet wurde, sich nicht mit der Wöhlerlinie für den Lastfall Schub vergleichen lässt. Einerseits sind die zugrunde liegenden Kerbradien nicht identisch (0,2mm und

0,05mm) und andererseits sind die Steigungen der beiden Wöhlerlinien mit 3,32 (Längs- und Querzug, Biegung) und 5,26 (Schub) unterschiedlich. Hier wird auf die Wöhlerlinien für Betriebsfestigkeitsnachweise von Schweißnähten hingewiesen (IIW-Richtlinie [7] und Eurocode 3 Teil 1-9 [8]). Dort werden die Wöhlerlinien ebenfalls in Abhängigkeit von der Belastungsart angegeben. Die Neigung der Wöhlerlinien für die Lastarten Längs- und Querzug sowie Biegung beträgt k = 3, die für den Lastfall Schub k = 5. Die Werte korrelieren hervorragend mit den in den beiden Forschungsvorhaben A 249 und A 268 ermittelten Neigungen.

6. Bruchmechanische Analysen

6.1. Einleitung

Im Rahmen dieses Projekts ist es gelungen, ein Nachweiskonzept zu erstellen, bei dem ein Modellierungsvorschlag für das idealisierte Nahtendmodell auf der Einwirkungsseite und eine konzeptgebundene Kerbspannungswöhlerline auf der Widerstandsseite gegeben ist. Es ist bekannt, dass aus der Sicht der Praxis, der Wunsch nach einem alternativen und bezüglich des Modellierungs- und Vernetzungsaufwandes einfacheren Bewertungskonzept besteht. Im Rahmen dieses Projektes wurde untersucht, ob ein mit Hilfe der Bruchmechanik definierter Rissspitzenparameter ein geeigneter Vergleichswert für den Betriebsfestigkeitsnachweis sein kann. Spannungsintensitätsfaktoren und Energiefreisetzungsrate werden hierfür genauer betrachtet. Damit aber überhaupt solche Größen berechnet werden können, muss ein geeignetes numerisches Modell erzeugt werden. Ein solches Modell muss Rissspitzen bzw. Rissfronten aufweisen, damit die Berechnung der Spannungsintensitätsfaktoren möglich wird. In Abbildung 64 links ist der Querschnitt der Stecklaschenprobe dargestellt. Die Schweißnaht mit der Schweißnahtdicke a besitzt im Querschnitt vereinfachend die Form eines rechtwinkligen Dreiecks. Somit entfällt die Modellierung des Übergangstrichters im Nahtendbereich. Um Rissspitzen zu erzeugen, wird der ohnehin vorhandene Wurzelspalt als Riss modelliert. Die Risslänge entspricht dabei der Schweißnahtlänge. Die Normale zur Rissebene ist in Abbildung 64 rechts zu erkennen.

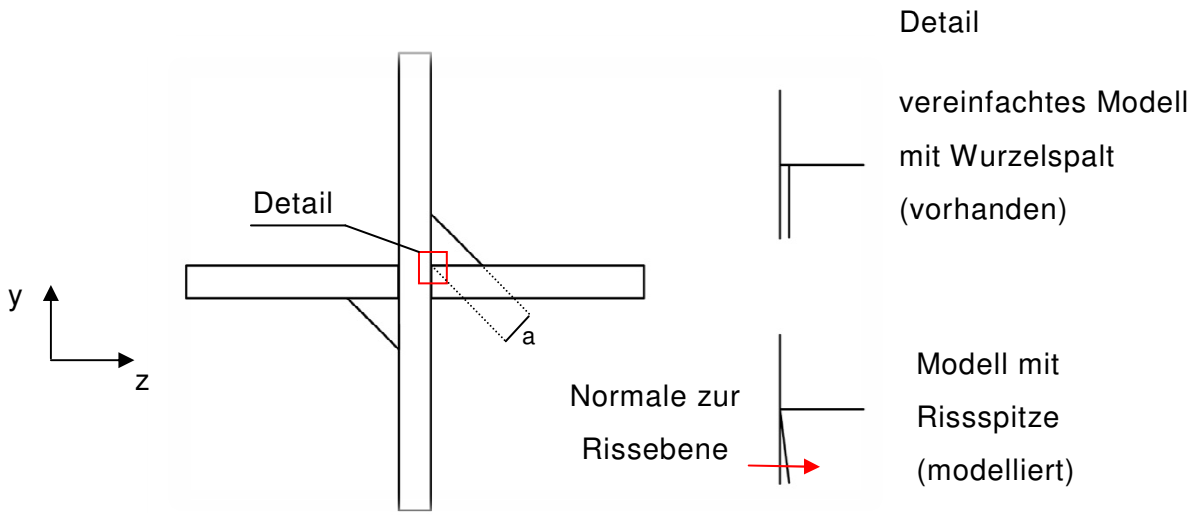

Abbildung 64: Querschnitt der Stecklaschenprobe (links) und Modellierungsvorschlag als Struktur mit Riss (rechts)

Diese verhältnismäßig einfache Modellierungsmethode der Schweißverbindung ermöglicht es nun, Spannungsintensitätsfaktoren entlang der Schweißnaht zu berechnen. Im Folgenden wird zunächst auf das numerische Modell eingegangen. Das numerische Modell besteht aus Elementen mit linearer Ansatzfunktion. Das Materialverhalten wird linear elastisch formuliert. In Abbildung 65 links ist der

Querschnitt der Stecklaschenprobe im Bereich der Schweißverbindung dargestellt. Der rote Punkt stellt den Ort der Rissspitze bzw. der Rissfront in die Darstellungsebene dar. Der Abstand zwischen geschlitztem und nicht geschlitztem Blech an der unteren Kante des geschlitzten Bleches beträgt 0,01 mm. Dieser Betrag wurde gewählt, um die gewünschte Rissfront zu erzeugen. In Abbildung 65 rechts ist das FE-Netz im Bereich der Rissspitze vergrößert dargestellt. Hierin sind die Rissspitze und die Normale zur Rissebene rot markiert.

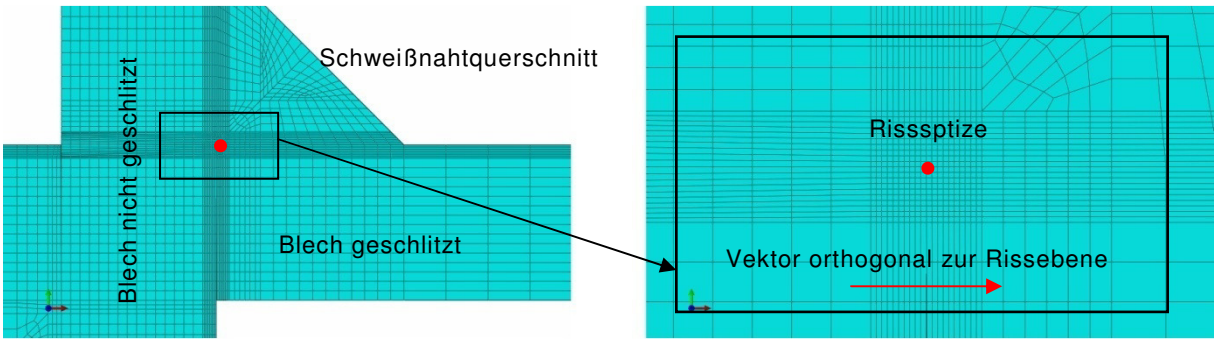

Abbildung 65: Querschnitt der Stecklaschenprobe (links) und die modellierte Rissspitze (rechts)

Die folgende Abbildung zeigt eine dreidimensionale Ansicht des FE-Netzes einer berechneten Stecklaschenprobe im Nahtendbereich. Mit dem roten Punkt wird wieder die Rissspitze markiert. Es ist zu erkennen, dass dieser in der Mitte eines gleichmäßig vernetzten Würfels sitzt. Der Würfel besteht aus Elementen mit einer Elementkantenlänge von a/100. Für die in diesem Projekt definierten SOLL-Werte der Schweißnahtdicken ergeben Elementkantenlängen von 0,03 mm oder 0,04 mm. Diese Elementgröße wird nur im Nahtendbereich benutzt, so dass im Regelbereich der Schweißnaht das FE-Netz entlang der Rissfront vergröbert wird.

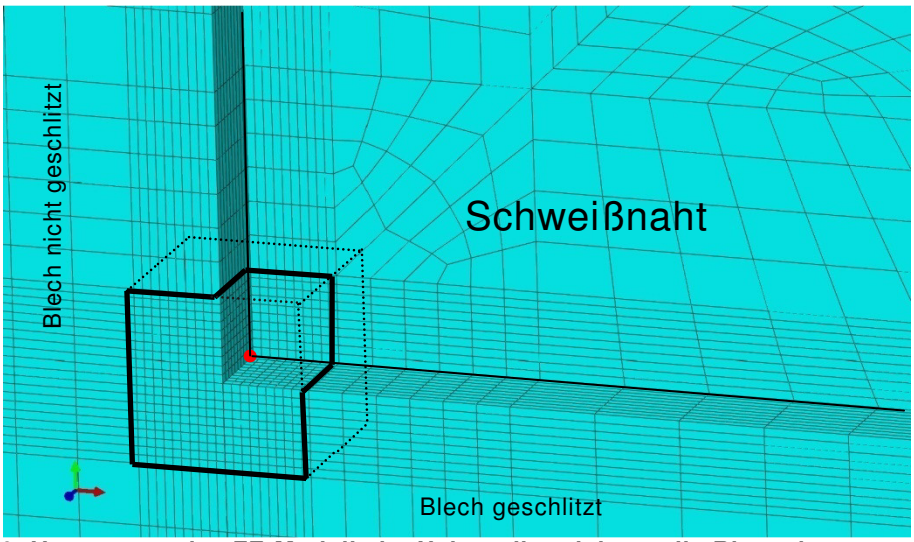

Abbildung 66: Vernetzung des FE-Modells im Nahtendbereich um die Rissspitze

Mit der entwickelten Methodik lassen sich nun Spannungsintensitätsfaktoren entlang der Schweißnaht berechnen. Die Ergebnisse werden nun vorgestellt.

6.2. Spannungsintensitätsfaktoren

In Abbildung 67 sind die Verläufe der Schwingweite der Spannungsintensitätsfaktoren ΔK_I, ΔK_{II} , ΔK_{III} für die Stecklaschenprobe kurz/dick infolge einer Beanspruchung von 1 N/mm² dargestellt. Die Schwingweite des Spannungsintensitätsfaktors wird mit $\Delta K = \Delta K_{max} - \Delta K_{min}$ berechnet. Die Koordinate x weist in Nahtlängsrichtung und nimmt Werte zwischen 0 und l_{Naht} an. Die Berechnung der K-Faktoren erfolgt mit Hilfe der FE-Software Abaqus FEA. Hierbei werden die Spannungsintensitätsfaktoren mittels "Contour Integration Evaluation" berechnet. Aus den Verläufen geht hervor, dass ΔK_{III} (Out of Plane Shear Anteil) praktisch immer dominiert. Der Anteil aus ΔK_{II} (In Plane Shear) ist dagegen vernachlässigbar klein. Die Maximalwerte dieser drei Verläufe treten an den Endpunkten der Naht auf. Da jedoch an den Endpunkten der Rissfront einerseits keine sinnvollen Konturen gelegt werden können und andererseits keine für Rissfronten typische, mit dem üblichen Spannungsintensitätsfaktor beschreibbare Singularität vorliegt, sind die ermittelten Werte mechanisch unbrauchbar. Die modifizierten Maximalwerte der Schwingweiten der K-Faktoren werden durch lineare Extrapolation ermittelt. Der Abstand zwischen den Stützstellen beträgt 1 mm. Das heißt also für den unten dargestellten Fall, dass die K-Werte am Nahtendpunkt (x_0 = 20 mm) aus den ermittelten Werten an den Stellen x_1 = 19 mm und x_2 = 18 mm linear berechnet werden. Das Ergebnis ist für die vorgestellte Berechnung in Abbildung 67 angegeben.

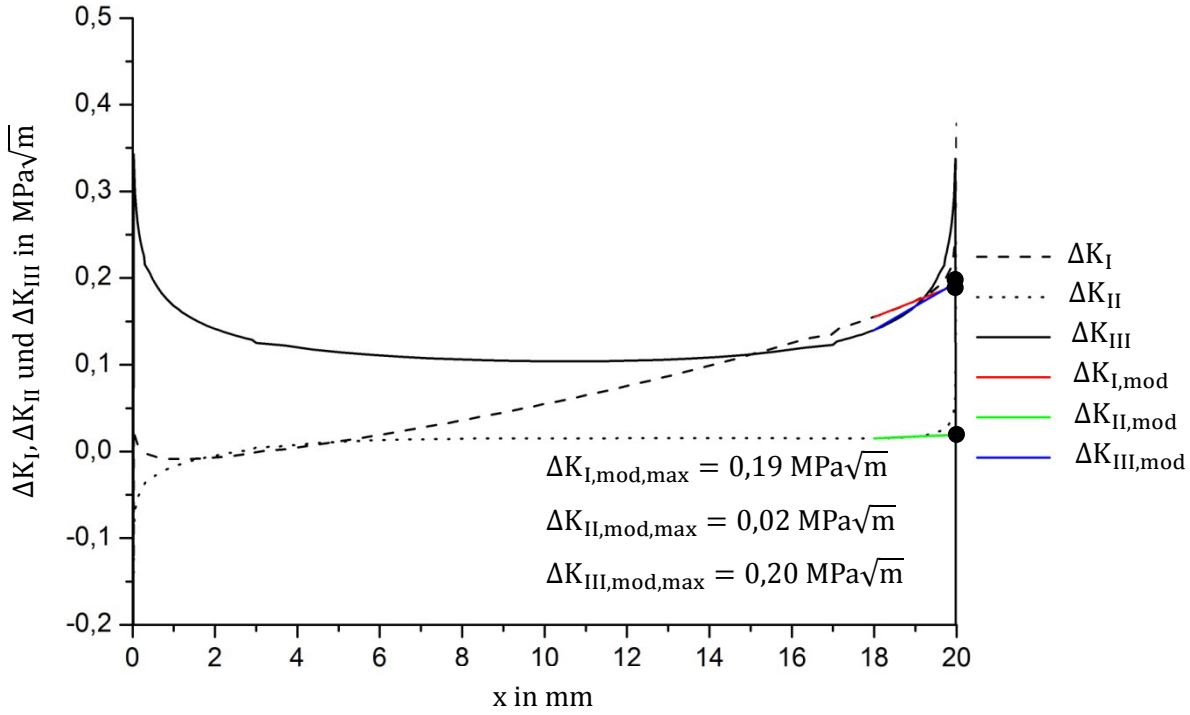

Abbildung 67: Spannungsintensitätsfaktorschwingweiten Stecklaschenprobe Kurz/Dick

Mit den so ermittelten, modifizierten Maximalwerten der Schwingweiten der K-Faktoren für die getesteten vier Versuchsreihen und unter Zuhilfenahme der Ergebnisse aus den Schwingversuchen (Kapitel 2) ist es nun möglich, eine wiederum konzeptgebundene Spannungsintensitätsfaktorwöhlerlinie zu erzeugen, indem den

Versagensschwingspielzahlen aus den Versuchen die ermittelten K-Faktoren für den Modus III zugeordnet werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 68 dargestellt. Die Kennwerte der Regressionsanalyse für die Mittelwertslinie sowie das Streumaß werden ebenfalls angegeben.

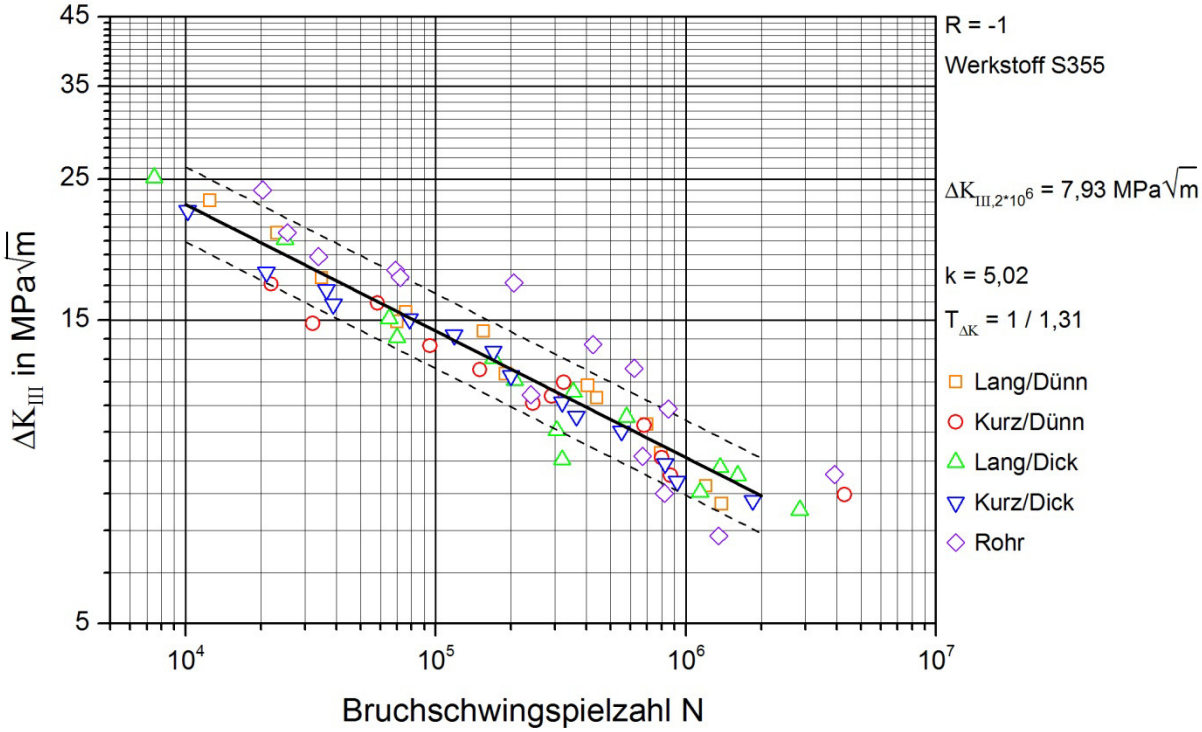

Abbildung 68: konzeptgebundene Spannungsintensitätsfaktorwöhlerlinie für den Modus III

Ein Vergleich der Streumaße der beiden Wöhlerlinien (Abbildung 63 und Abbildung 68) deutet darauf hin, dass die berechneten Punkte in der Spannungsintensitätsfaktorwöhlerlinie viel enger zusammenliegen.

Auch wenn mit ΔK_{III} gute Ergebnisse erreicht wurden, sind im Rahmen dieses Projektes aber auch weitere bruchmechanische Größen untersucht worden. Der nächste Parameter ist die Schwingweite des Vergleichsspannungsintensitätsfaktors ΔK_V. Dieser ist vor allem deswegen interessant, weil im maßgebenden Nahtendbereich ein dreidimensionaler Beanspruchungszustand vorliegt (räumliches Mixed-Mode-Problem). Der Vergleichsspannungsintensitätsfaktor hängt von den einzelnen Spannungsintensitätsfaktoren und der Rissrichtung ab. Der Rissrichtungswinkel φ_0 (Abaqus FEA: crack propagation angle) wird nach dem Kriterium der maximalen Tangentialspannung (The maximum tangential stress criterion) berechnet. Dieses besagt, dass der Riss in einer um den Winkel φ_0 gegenüber der Rissachse y geneigten Richtung weiterwächst (siehe Abbildung 69). Der Rissrichtungswinkel lässt sich mit Hilfe der folgenden Gleichung bestimmen:

$$\varphi_0 = -\arccos\left\{\frac{3K_{II}^{\ 2} + K_I\sqrt{K_I^{\ 2} + 8K_{II}^{\ 2}}}{K_I^{\ 2} + 9K_{II}^{\ 2}}\right\}$$

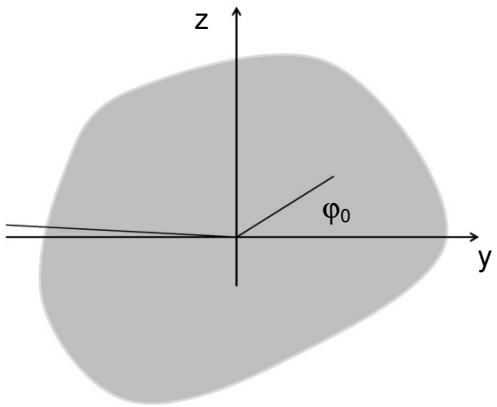

Abbildung 69: Rissrichtungswinkel bei gemischter Beanspruchung

Der Rissrichtungswinkel ist aber auch eine Ausgabegröße der FE-Software Abaqus FEA und kann im Rahmen des Postprocessings ausgewertet werden. Mit den ermittelten Spannungsintensitätsfaktoren und dem Rissrichtungswinkel kann nun der Vergleichsspannungsintensitätsfaktor berechnet werden. Die Gleichung hierfür sieht folgendermaßen aus [26]:

$$K_V = \frac{1}{2}\cos(\frac{\varphi_0}{2})\left\{K_I \cos^2(\frac{\varphi_0}{2}) - \frac{3}{2}K_{II}\sin(\varphi_0) + \sqrt{\left[K_I \cos^2(\frac{\varphi_0}{2}) - \frac{3}{2}K_{II}\sin(\varphi_0)\right]^2 + 4K_{III}^{\ 2}}\right\}$$

Wenn in der obigen Gleichung die K-Faktoren durch deren Schwingweite ersetzt werden, kann mit Hilfe der Schwingversuchsergebnisse eine Vergleichsspannungsintensitätsfaktorwöhlerline erstellt werden. Diese ist in Abbildung 70 dargestellt und liefert ähnliche Ergebnisse wie die ΔK_{III}-Wöhlerlinie (Abbildung 68).

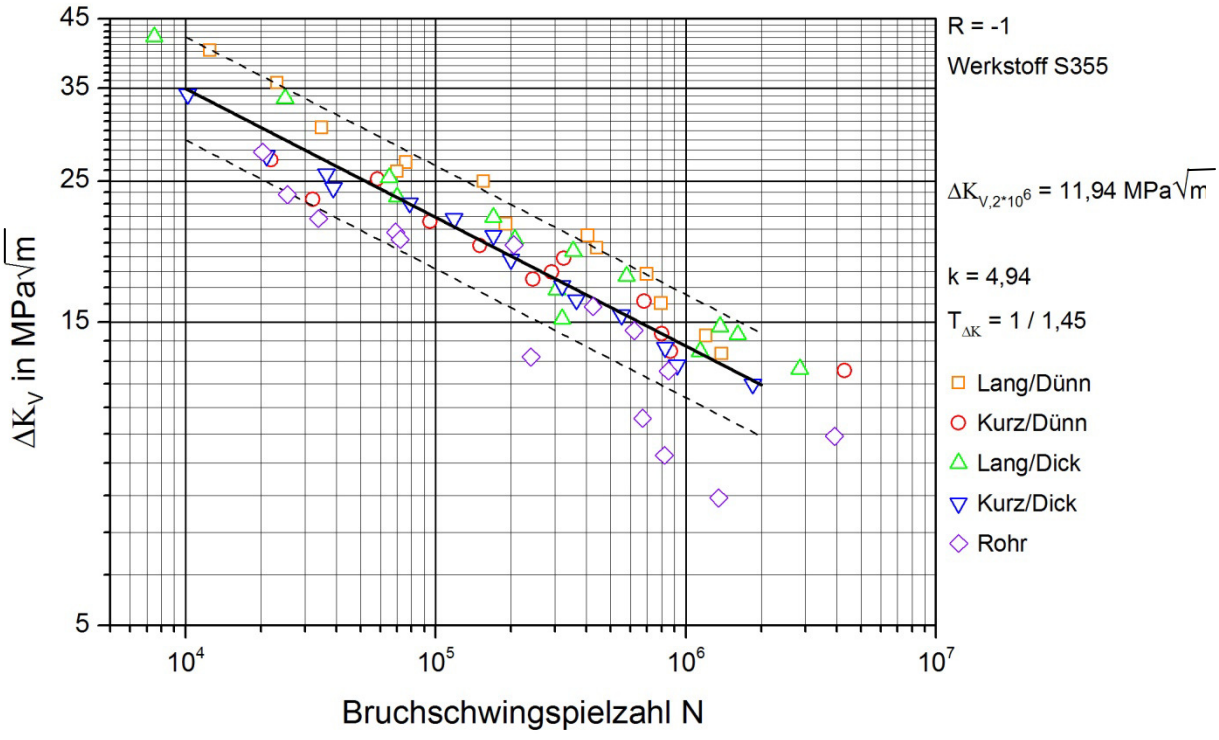

Abbildung 70: konzeptgebundene Vergleichsspannungsintensitätsfaktorwöhlerlinie

Die Ergebnisse der Spannungsintensitätsfaktoren werden tabellarisch im Anhang angegeben.

6.3. Energiefreisetzungsrate

Abschließend werden die Ergebnisse der Berechnungen basierend auf der Energiefreisetzungsrate vorgestellt. Hierbei handelt es sich um die bei einer Rissverlängerung freigesetzte Energie. Der Vorteil hierbei ist, dass keine Berechnung von Spannungsintensitätsfaktoren notwendig ist. Die Energiefreisetzungsrate G steht zwar für ein linear elastisches Materialverhalten mit dem Spannungsintensitätsfaktor K im quadratischen Zusammenhang und kann somit aus den Spannungsintensitätsfaktoren zurückgerechnet werden, sie kann aber ebenfalls aus dem Vergleich der energetischen Zustände zweier Strukturen mit unterschiedlichen Risslängen berechnet werden. Für den ersten Fall gilt:

$$G = \frac{K^2}{\mathrm{E}'} \qquad \begin{cases} \mathrm{E}' = \mathrm{E} & \text{für ESZ} \\ \mathrm{E}' = \dfrac{\mathrm{E}}{(1-\upsilon^2)} & \text{für EVZ} \end{cases}$$

Für den zweiten Fall entfällt die Berechnung der K-Faktoren, es ist aber wie erwähnt eine zweite Rechnung mit veränderter Risslänge notwendig. Die Länge des Risses entspricht bei der ersten Rechnung, hier festgelegt als Zustand 1, der Blechdicke t. Der Riss in der zweiten zu berechnenden Struktur, hier festgelegt als Zustand 2, ist um ein Element länger (Abbildung 71). Wie schon beschrieben, besitzen die Elemente um die Rissspitze herum eine Länge von a/100. Das bedeutet, dass die Risslänge in der zweiten Struktur t+(a/100) beträgt. Mit der Blechdicke von 3,5 mm und Schweißnahtdicken von 3 mm und 4 mm ergeben sich neue Risslängen von 3,53 mm bzw. 3,54 mm. An der Rissspitze herrscht für den Zustand 1 die Knotenkraft $\vec{P} = \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{pmatrix}$.

Im Zustand 2 existiert an diesem Ort kein Rissspitzenknoten mehr, weil der Riss länger geworden ist. Auf der Höhe des Rissspitzenknotens existieren nun zwei Knoten, die sich frei verschieben können. Diese sind in der Abbildung 71 blau gekennzeichnet. Dabei wurde angenommen, dass der Riss in seiner Ebene ohne Abknicken wächst.

$\vec{v}_1 = \begin{pmatrix} v_{1x} \\ v_{1y} \\ v_{1z} \end{pmatrix}$ und $\vec{v}_2 = \begin{pmatrix} v_{2x} \\ v_{2y} \\ v_{2z} \end{pmatrix}$

Die Energie, die freigesetzt wird, wenn das System von Zustand 1 in Zustand 2 geht, kann in Betracht auf den linearen Zusammenhang zwischen Kraft und Verschiebung wie folgt berechnet werden:

$$\Delta U = \frac{1}{2}\vec{P} \circ (\vec{v}_2 - \vec{v}_1)$$

Das Skalarprodukt des Knotenkraft- und Verschiebungsvektors liefert die freigesetzte Energie. Um nun die Energiefreisetzungsrate G für den Risslängenzuwachs e zu bestimmen, muss die Energie ΔU auf die neue entstandene Rissfläche $\Delta A=0{,}5e^2$ bezogen werden. Der Faktor 0,5 erscheint, weil dem Nahtendknoten nur eine halbe Elementkantenlänge in Rissfrontrichtung als relevante Einzugsfläche zugeordnet wird.

$$G = \frac{\Delta U}{\Delta A} = \frac{\frac{1}{2}\vec{P} \circ (\vec{v}_2 - \vec{v}_1)}{\frac{1}{2}e^2} = \frac{\vec{P} \circ (\vec{v}_2 - \vec{v}_1)}{e^2}$$

Hierin ist e die Elementkantenlänge bzw. der Risslängenzuwachs (e = a/100). Die Energiefreisetzungsrate ist eine skalare Größe und besitzt die Einheit Kraft/Länge z.B. N/mm. Die folgende Skizze verdeutlicht die Vorgehensweise bei dieser Methodik. Hierin ist der Querschnitt der Stecklaschenprobe im Nahtendbereich skizziert, um den Vorgang für die Berechnung der Energiefreisetzungsrate zu verdeutlichen. Die roten Punkte stellen nach wie vor die Rissspitze dar. Die blauen Punkte (Abbildung 71 rechts) kennzeichnen die frei verschieblichen Knoten auf den Rissebenen.

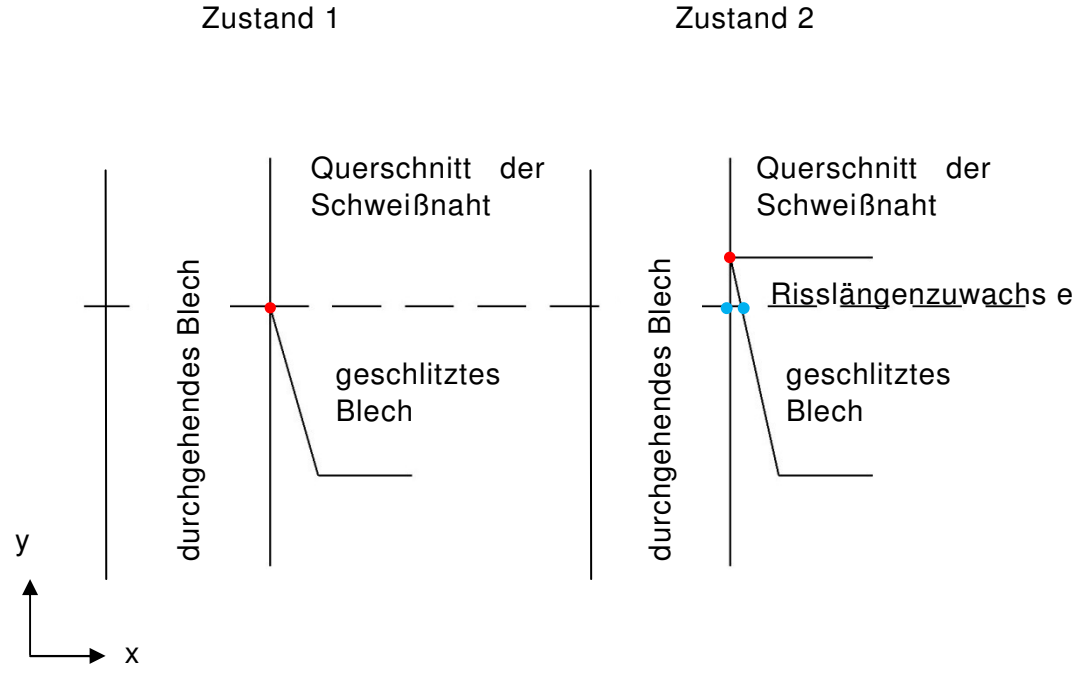

Abbildung 71: Zustand 1 (links) und Zustand 2 (rechts) zur Bestimmung der Energiefreisetzungsrate G

Mit der vorgestellten Methodik lassen sich Energiefreisetzungsraten für die getesteten Versuche berechnen. Den Bruchschwingspielzahlen werden nun die berechneten Energiefreisetzungsraten zugeordnet, so dass (analog zu der Vorgehensweise bei der Kerbspannungs- und Spannungsintensitätsfaktorwöhlerlinie) eine sogenannte G-

Wöhlerlinie entstehen kann. Da wie erwähnt für linear elastisches Materialverhalten ein quadratischer Zusammenhang zwischen den Energiefreisetzungsrate G und Spannungsintensitätsfaktoren K_I,K_{II} und K_{III} besteht, wird hier $G^{0,5}$ als Vergleichswert angesetzt. Die so entstandene Wöhlerline ist in Abbildung 72 dargestellt. Die einzelnen Werte werden im Anhang tabellarisch angegeben.

Durch die erarbeiteten Methoden ist es nun möglich, die Schwingfestigkeit von Schweißnahtenden unter Schub auch basierend auf der linear elastischen Bruchmechanik zu bewerten. Ein Vergleich der ermittelten Wöhlerlinien liefert das Ergebnis, dass die drei Wöhlerlinien (Abbildung 68, Abbildung 70, Abbildung 72) fast dieselbe Neigung besitzen. Bei Schweißverbindungen aus Stahl wird die Neigung für Schubspannungen üblicherweise mit 5 angegeben. Neben der Steigung k ist die Streuspanne T der Wöhlerline ein weiterer Parameter, mit dem die Qualität der einer Wöhlerlinie zugrunde liegenden Eingangswerte bewertet werden kann. Die Streumaße der drei vorgeschlagenen auf Bruchmechanik basierten Wöhlerlinien liefern vergleichbare Werte und liegen in der Größenordnung der spannungsbasierten Wöhlerlinien.

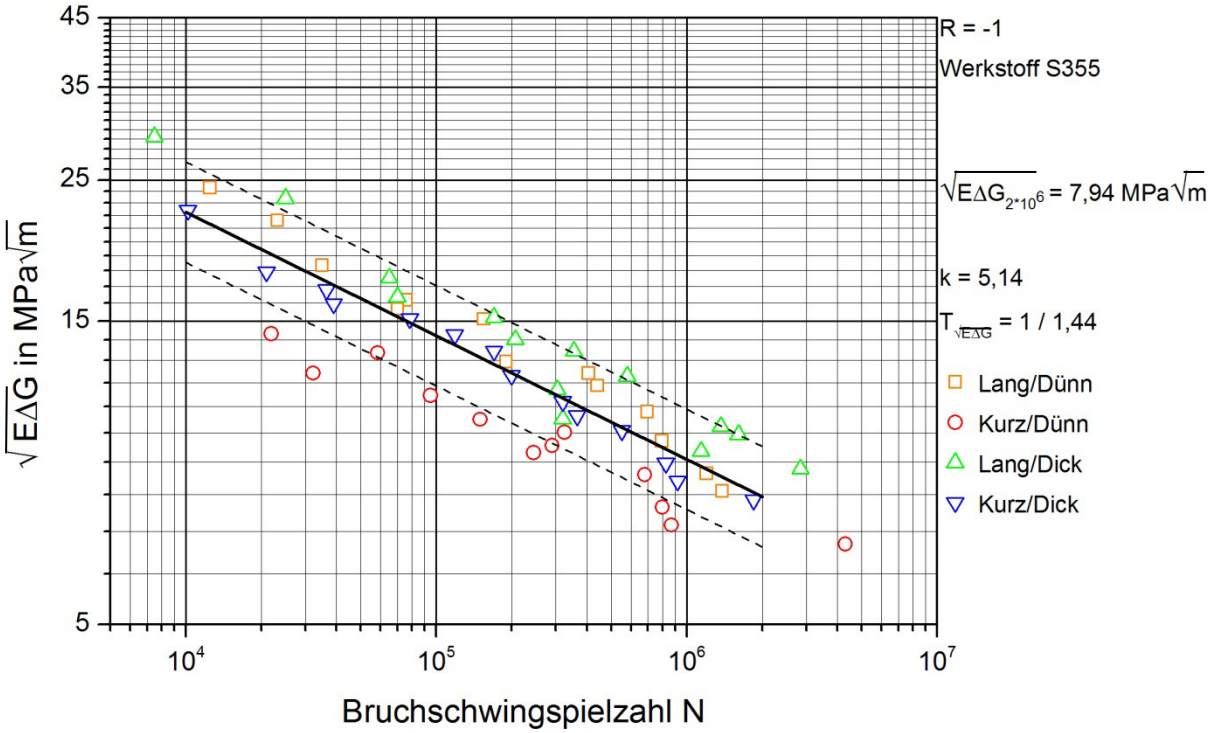

Abbildung 72: konzeptgebundene Wöhlerlinie

Die Untersuchungen an schubbeanspruchten Nahtenden zeigen, dass Wöhlerlinien die auf bruchmechanisch abgeleiteten Beanspruchungsparametern basieren, grundsätzlich zur Bewertung der Schwingfestigkeit herangezogen werden können.

Der Aufwand zur Ermittlung der erforderlichen rissbehafteten FE-Modelle ist im Vergleich zum Modellierungsaufwand für die kerbbehafteten Strukturen des Kerbspannungskonzeptes für Nahtenden deutlich geringer.

Die Anwendbarkeit der Methode für allgemeine Schweißnähte und Beanspruchungen und eine dafür geeignete Modellerstellung muss in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

7. Zusammenfassung

Kern des AVIF Projektes A 268 „Schwingfestigkeit von Schweißnahtenden unter Schubbeanspruchung“ war die Erfassung der realen Nahtgeometrie mittels eines optischen 3D Scanners (Flächenauflösung: 30µm, Tiefenauflösung: 5µm). Es ist hierbei erstmals gelungen, durch kryogenisches Aufbrechen der Schweißnaht auch die Geometrie der Wurzelkerbe mit dem Scanner aufzunehmen. Um die aufgebrochene und anschließend gescannte Naht numerisch berechnen zu können, wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem sich aus den Scans vor und nach dem Aufbrechen der Naht ein geschlossener Volumenkörper bilden lässt. Die Berechnung der Kerbspannungen erfolgte mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente unter Zuhilfenahme der Submodelltechnik. In einem ersten Submodell mit komprimiertem Netz kann der Ort der maximalen Kerbspannung identifiziert werden. An einem zweiten Submodell mit höchster Ortsauflösung wurden die Kerbspannungen bestimmt. Das Grobmodell wurde per Hand modelliert und stellt eine Idealisierung der Naht dar.

Auf Basis des im Rahmen des Vorgängerprojektes entwickelten parametrisierten Nahtendmodells konnte ein idealisiertes Nahtendmodell für den Lastfall Schub entwickelt werden. Die neuen Parameter wurden durch Geometrieanpassung bestimmt. Mit diesem idealisierten Nahtendmodell, das für den Lastfall Schub optimiert ist, lassen sich die den Ort der für diesen Lastfall maßgebenden Kerbspannungen vorhersagen.

In Verbindung mit den Versagensschwingspielzahlen aus den rund 75 Schwingversuchen wurde eine konzeptgebundene Kerbspannungswöhlerlinie für einen Referenzradius r = 0,05 mm erstellt. Somit liegt eine in sich geschlossene Bewertungsmethode nach dem Kerbspannungskonzept für Schweißnahtenden unter Schubbeanspruchung vor. Hierbei wird die Einwirkung mit dem idealisierten Nahtendmodell berechnet und auf der Widerstandsseite mit der konzeptgebundenen Wöhlerlinie verglichen.

Des Weiteren wurde mit Hilfe der Bruchmechanik eine weiteres Nachweiskonzept vorgeschlagen, in dem der Spannungsintensitätsfaktor K bzw. die Energiefreisetzungsrate G als Beanspruchungsparameter dient. Hierbei entfallen die Scan- und Vernetzungsarbeiten. Die Schweißnaht kann vereinfachend durch einen Dreieckquerschnitt modelliert werden. Jedoch ist der vorhandene Wurzelspalt als Riss zu modellieren. Der zur Berechnung der Spannungsintensitätsfaktoren sowie für die Energiefreisetzungsrate modellierte Riss ist damit genau so lang wie die Naht, womit auch prinzipiell die Beanspruchung über die gesamte Nahtlänge ermittelt werden kann. Die K-Faktoren werden zum Nahtende hin extrapoliert. Auch hier wurde aus den Schwingversuchen eine konzeptgebundene Spannungsintensitätsfaktorwöhlerlinie erstellt. Damit wurde gezeigt, dass ein Konzept basierend auf bruchmechanisch abgeleiteten Beanspruchungsparametern, die mit vereinfachten FE-Modellen der Schweißnaht ermittelt wurden, ebenfalls zur Bewertung der Schwingfestigkeit herangezogen werden kann.

Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes erzielten Ergebnisse ermöglichen eine Bewertung der Schwingfestigkeit von Schweißnahtenden unter Schubbeanspruchung nach dem Kerbspannungskonzept.

8. 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] Sonsino, C.M., Hanselka, H., Wallmichrath, M., Eibl, M., „Ingenieurmäßiges Berechnungsverfahren zur Lebensdauerabschätzung von geschweißten Dünnblechverbindungen”, FAT-Schriftreihe Nr. 179, 2003.
[12] Willen, J., Esderts, A..: „Berechnungsmethoden für die Lebensdauerabschätzung von MSG- bzw. lasergeschweißten Kehlnähten dünnwandiger Stahlbaukonstruktionen“, FAT-Schriftenreihe Nr. 197, 2005.
[13] 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.
[14] 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.
[15] Yoshida, Y., Seto, A., Galtier, A.: „Fatigue Life Prediction for Arc Welded Sheet Structural Parts”, Proceedings FatigueDesign2005, Cetim Senlis, S. 37ff
[16] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit. Verfahren und Daten zur Bauteilbeurteilung. Springer, 2. Auflage. 2002.
[17] 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.
[18] Schliebner, R., Vormwald, M.: „Schwingfestigkeitsanalyse eines geschweißten Winkelknotens auf der Basis von lokalen Konzepten“ Stahlbau, 72(4), S. 245-253, 2003.
[19] Schliebner, R., Vormwald, M.: „Fatigue of Welded Hybrid-Joints“, Mat.-wiss. U. Werkstofftech. 2005, 36(11), S. 706–714.

[20] Eibl, M.: „Berechnung der Schwingfestigkeit laserstrahlgeschweißter Feinbleche mit lokalen Konzepten", Dissertation, TU Darmstadt, 2003.
[21] Barkey, M.E., Zingsheim, F., Hack, M., Speckart, M., Schäfer, G.: „LMS Falancs User Manual", LMS international. Kaiserslautern 1998-2002.
[22] 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.
[23] Festigkeit geschweißter Bauteile: „Anwendbarkeit lokaler Nachweiskonzepte bei Schwingungsbeanspruchung", DVS-Berichte Band 256, DVS Media 2009
[24] Vormwald, M., Kaffenberger, M.: „Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Dünnbleche aus Stahl", Projekt A 249 der FAT – Forschungsvereinigung Automobiltechnik, Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik, TU Darmstadt, 2011.
[25] Breuckmann GmbH, Brief Instruction Manual optoTOP, 2009
[26] Erdogan, F., Sih, G. C.: „On The Crack Extension in Plates Under Plane Loading and Transverse Shear", Journal of Basic Engineering 85D (1963), S. 519-527.

9. Anhang

Stecklaschenverbindung gem. Abbildung 10 und Tabelle 1, Lang / Dünn R = -1				
Versagen Übergang				
Probe	Amplitude	Lastschwingweite	Bruch-schwingspielzahl	Nennschubspannungs-amplitude
Nr.	F_a in kN	ΔF in kN	N	τ_a in N/mm²
1	15	30	76.000	83,34
2	10	20	696.000	55,56
3	20	40	23.200	111,11
4	8	16	1.200.000	44,45
5	12	24	190.000	66,67
6	11	22	440.000	61,11
7	11,5	23	405.000	63,89
8	14	28	155.000	77,78
9	17	34	35.000	94,45
10	14,5	29	70.000	80,56
12	7,5	15	1.385.000	41,67
13	9	18	795.000	50,00
14	22,5	45	12.500	125,00
Ungültig				
11	-	-	-	
15	-	-	-	

Stecklaschenverbindung gem. Abbildung 10 und Tabelle 1, Kurz / Dünn R = -1				
Versagen Übergang				
Probe	Amplitude	Lastschwingweite	Bruch-schwingspielzahl	Nennschubspannungs-amplitude
Nr.	F_a in kN	ΔF in kN	N	τ_a in N/mm²
2	10	20	290.000	83,34
3	12	24	95.000	100,00
5	8	16	800.000	66,67
6	11	22	150.000	91,67
8	14	28	58.500	116,67
10	10,5	21	325.000	87,50
11	9	18	680.000	75,00
12	7,5	15	870.000	62,50
13	7	14	4.300.000	58,34
14	9,8	19,5	245.000	81,25
Versagen Wurzel				
1	15	30	22.000	125,00
9	13	26	32.250	108,34
Ungültig				
7	-	-	-	
15	-	-	-	
4	-	-	-	

Stecklaschenverbindung gem. Abbildung 10 und Tabelle 1, Lang / Dick
R = -1

Versagen Übergang				
Probe	Amplitude	Lastschwingweite	Bruch-schwingspielzahl	Nennschubspannungs-amplitude
Nr.	F_a in kN	ΔF in kN	N	τ_a in N/mm²
1	25	50	7.500	104,15
2	20	40	25.000	83,35
3	15	30	65.000	62,50
4	10	20	305.000	41,65
5	12	24	207.000	50,00
6	14	28	70.000	58,35
7	8	16	1.140.000	33,35
8	7,5	15	2.850.000	31,25
9	9	18	320.000	37,50
10	8,5	17	1.610.000	35,40
11	13	26	170.000	54,15
12	8,75	17,5	1.370.000	36,45
14	11,5	23	355.000	47,90
15	10,5	21	580.000	43,75
Ungültig				
13	-	-	-	

Stecklaschenverbindung gem. Abbildung 10 und Tabelle 1, Kurz / Dick
R = -1

Versagen Übergang				
Probe	Amplitude	Lastschwingweite	Bruch-schwingspielzahl	Nennschubspannungs-amplitude
Nr.	F_a in kN	ΔF in kN	N	τ_a in N/mm²
1	20	40	10.200	125,00
2	16	32	21.000	100,00
3	12	24	170.000	75,00
4	11	22	200.000	68,75
5	10	20	320.000	62,50
6	9	18	552.000	56,25
7	8	16	825.000	50,00
8	7,5	15	920.000	46,90
9	7	14	1.850.000	43,75
10	13,5	27	78.500	84,40
11	15	30	36.500	93,75
12	9,5	19	365.000	59,40
13	12,75	25,5	118.500	79,70
14	14,25	28,5	39.000	89,05
Ungültig				
15	-	-	-	

Rohrprobe gem. Abbildung 19 und Tabelle 2
R = -1

Versagen Übergang				
Probe	Amplitude	Lastschwingweite	Bruch-schwingspielzahl	Nennschubspannungs-amplitude
Nr.	F_a in kN	ΔF in kN	N	τ_a in N/mm²
2	500	1000	240.000	95,85
3	750	1500	205.000	143,75
6	400	800	670.000	76,65
7	350	700	820.000	67,10
8	300	600	1.350.000	57,50
10	375	750	3.920.000	71,90
11	475	950	850.000	91,05
12	600	1200	425.000	115,00
13	550	1100	620.000	105,40
Versagen Wurzel				
4	900	1800	25.500	172,50
5	825	1650	34.000	158,15
14	785	1570	69.000	150,45
15	765	1530	72.000	146,65
16	1050	2100	20.300	201,25
Ungültig				
1	-	-	-	
9	-	-	-	

Konzeptgebundene Wöhlerlinie aus idealisierter Modellierung für Kerbspannungen

Stecklaschenverbindung gem. Abbildung 10 und Tabelle 1 Lang / Dünn	**i**	**N**	**F_a bzw. $M_{T,a}$ in kN bzw. Nm**	**$\sigma_{v,a}$ in N/mm²**
$\sigma_{v,a}$ für σ_a = 1N/mm²: 22,61 N/mm²	1	76.000	15,00	1937,62
	2	696.000	10,00	1291,75
	3	23.200	20,00	2583,49
	4	1.200.000	8,00	1033,40
	5	190.000	12,00	1550,09
	6	440.000	11,00	1420,92
	7	405.000	11,50	1485,51
	8	155.000	14,00	1808,44
	9	35.000	17,00	2195,97
	10	70.000	14,50	1873,03
	12	1.385.000	7,50	968,81
	13	795.000	9,00	1162,57
	14	12.500	22,50	2906,43
Stecklaschenverbindung gem. Abbildung 10 und Tabelle 1 Kurz / Dünn	2	290.000	10,00	1857,13
$\sigma_{v,a}$ für σ_a = 1N/mm²: 32,5 N/mm²	3	95.000	12,00	2228,55
	5	800.000	8,00	1485,70
	6	150.000	11,00	2042,84
	8	58.500	14,00	2599,98
	10	325.000	10,50	1949,99
	12	870.000	7,50	1392,85
	13	4.300.000	7,00	1299,99
	14	245.000	9,75	1810,70
Stecklaschenverbindung gem. Abbildung 10 und Tabelle 1 Lang / Dick	1	7.500	25,00	3109,70
$\sigma_{v,a}$ für σ_a = 1N/mm²: 21,77 N/mm²	2	25.000	20,00	2487,76
	3	65.000	15,00	1865,82
	4	305.000	10,00	1243,88
	5	207.000	12,00	1492,66
	6	70.000	14,00	1741,43
	7	1.140.000	8,00	995,10

Fortsetzung nächstes Blatt

	8	2.850.000	7,50	932,91
	9	320.000	9,00	1119,49
	10	1.610.000	8,50	1057,30
	11	170.000	13,00	1617,04
	12	1.370.000	8,75	1088,40
	14	355.000	11,50	1430,46
	15	580.000	10,50	1306,07
Stecklaschenverbindung gem. Abbildung 10 und Tabelle 1 Kurz / Dick	1	10.200	20,00	2632,80
$\sigma_{v,a}$ für σ_a = 1N/mm²: 23,04 N/mm²	2	21.000	16,00	2106,24
	3	170.000	12,00	1579,68
	4	200.000	11,00	1448,04
	5	320.000	10,00	1316,40
	7	825.000	8,00	1053,12
	8	920.000	7,50	987,30
	9	1.850.000	7,00	921,48
	10	78.500	13,50	1777,14
	11	36.500	15,00	1974,60
	12	365.000	9,50	1250,58
	13	118.500	12,75	1678,41
	14	39.000	14,25	1875,87
Rohrprobe gem. Abbildung 19 und Tabelle 2	2	240.000	500	1327,50
$\sigma_{v,a}$ für $M_{T,a}$ = 1Nmm: 0,00266 N/mm²	3	205.000	750	1991,25
	4	25.500	900	2389,50
	5	34.000	825	2190,38
	6	670.000	400	1062,00
	7	820.000	350	929,25
	8	1.350.000	300	796,50
	10	3.920.000	375	995,63
	11	850.000	475	1261,13
	12	425.000	600	1593,00
	13	620.000	550	1460,25
	14	69.000	785	2084,18
	15	72.000	765	2031,08
	16	20.300	1050	2787,75

Konzeptgebundene Wöhlerlinie aus idealisierter Modellierung für Spannungsintensitätsfaktoren und Energiefreisetzungsrate

Stecklaschenverbindung gem. Abbildung 10 und Tabelle 1 Lang / Dünn	i	N	ΔF in kN Bzw. ΔM in Nm	ΔK_{III} in $MPam^{0,5}$	ΔK_V in $MPam^{0,5}$	$(E\Delta G)^{0,5}$ in $MPam^{0,5}$
	1	76.000	30,0	15,43	26,76	16,20
	2	696.000	20,0	10,29	17,84	10,80
	3	23.200	40,0	20,57	35,69	21,60
	4	1.200.000	16,0	8,23	14,27	8,64
	5	190.000	24,0	12,34	21,41	12,96
	6	440.000	22,0	11,31	19,63	11,88
	7	405.000	23,0	11,83	20,52	12,42
	8	155.000	28,0	14,40	24,98	15,12
	9	35.000	34,0	17,49	30,33	18,36
	10	70.000	29,0	14,91	25,87	15,66
	12	1.385.000	15,0	7,71	13,38	8,10
	13	795.000	18,0	9,26	16,06	9,72
	14	12.500	45,0	23,14	40,15	24,30
Stecklaschenverbindung gem. Abbildung 10 und Tabelle 1 Kurz / Dünn	2	290.000	20,0	11,39	17,98	9,55
	3	95.000	24,0	13,67	21,58	11,46
	5	800.000	16,0	9,11	14,38	7,64
	6	150.000	22,0	12,53	19,78	10,50
	8	58.500	28,0	15,94	25,17	13,37
	10	325.000	21,0	11,96	18,88	10,03
	11	680.000	18,0	10,25	16,18	8,59
	12	870.000	15,0	8,54	13,48	7,16
	13	4.300.000	14,0	7,97	12,59	6,68
	14	245.000	19,5	11,10	17,53	9,31

Fortsetzung nächstes Blatt

Stecklaschenverbindung gem. Abbildung 10 und Tabelle 1 Lang / Dick	1	7.500	50,0	25,13	42,15	29,23
	2	25.000	40,0	20,10	33,72	23,39
	3	65.000	30,0	15,08	25,29	17,54
	4	305.000	20,0	10,05	16,86	11,69
	5	207.000	24,0	12,06	20,23	14,03
	6	70.000	28,0	14,07	23,60	16,37
	7	1.140.000	16,0	8,04	13,49	9,35
	8	2.850.000	15,0	7,54	12,65	8,77
	9	320.000	18,0	9,05	15,17	10,52
	10	1.610.000	17,0	8,54	14,33	9,94
	11	170.000	26,0	13,07	21,92	15,20
	12	1.370.000	17,5	8,79	14,75	10,23
	14	355.000	23,0	11,56	19,39	13,45
	15	580.000	21,0	10,55	17,70	12,28
Stecklaschenverbindung gem. Abbildung 10 und Tabelle 1 Kurz / Dick	1	10.200	40,0	22,29	34,21	22,40
	2	21.000	32,0	17,83	27,37	17,92
	3	170.000	24,0	13,37	20,53	13,44
	4	200.000	22,0	12,26	18,81	12,32
	5	320.000	20,0	11,15	17,10	11,20
	6	552.000	18,0	10,03	15,39	10,08
	7	825.000	16,0	8,92	13,68	8,96
	8	920.000	15,0	8,36	12,83	8,40
	9	1.850.000	14,0	7,80	11,97	7,84
	10	78.500	27,0	15,05	23,09	15,12
	11	36.500	30,0	16,72	25,66	16,80
	12	365.000	19,0	10,59	16,25	10,64
	13	118.500	25,5	14,21	21,81	14,28
	14	39.000	28,5	15,88	24,37	15,96

Rohrprobe gem. Abbildung 19 und Tabelle 2	2	240.000	1000	11,44	13,22	-
	3	205.000	1500	17,16	19,83	-
	4	25.500	1800	20,59	23,79	-
	5	34.000	1650	18,88	21,81	-
	6	670.000	800	9,151	10,58	-
	7	820.000	700	8,01	9,25	-
	8	1.350.000	600	6,86	7,93	-
	10	3.920.000	750	8,58	9,91	-
	11	850.000	950	10,87	12,56	-
	12	425.000	1200	13,73	15,86	-
	13	620.000	1100	12,58	14,54	-
	14	69.000	1570	17,96	20,75	-
	15	72.000	1530	17,50	20,23	-
	16	20.300	2100	24,02	27,76	-

Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 www.vda-fat.de
ISSN	2192-7863

Copyright Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2013

VDA | Verband der Automobilindustrie

FAT | Forschungsvereinigung Automobiltechnik

Behrenstraße 35
10117 Berlin
www.vda.de
www.vda-fat.de