



Damage Tolerant Metallic Fuselage -DaTMet-

Schlussbericht
zum Projekt im Verbund
Cost efficient Metallic Fuselage
-CoMe-



Schlussbericht zum Projekt DaTMet

Damage Tolerant Metallic fuselage

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen: 20W1713E
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2018 – 31.12.2021
Verbundpartner: Airbus Operations GmbH
Premium Aerotec GmbH
Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der Angewandten Forschung e.V.
Interne Bericht-Nr.: IB 334-01/22

Projektleiter Dr.-Ing. Eric Breitbarth

Autoren: Ulises Alfaro Mercado
Eric Breitbarth
Ulrike Dreßler
Guillermo Requena

Der hier vorliegende Schlussbericht zum Projekt DaTMet gibt eine Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse des Projektes DaTMet wieder

Köln, 22.06.2022

Dr.-Ing. Eric Breitbarth
Projektleiter

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzdarstellung des Projektes	4
1.1. Aufgabenstellung.....	4
1.2. Voraussetzungen	5
1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.4. Stand der Wissenschaft und Technik.....	6
1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
2. Eingehende Darstellung	8
2.1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse.....	8
2.1.1. AP1 – Ermüdungslebensdauer.....	8
2.1.1.1. Biaxiale Prüfung unter zweiachsigen Belastungen	8
2.1.1.2. Ermüdungsverhalten von FSW-Stumpfstößen aus AA2024-T3 mit „Lack of Penetration“ (LOP) unter multiaxialer Belastung.....	25
2.1.1.3. Ermüdungsverhalten von FSW-Stumpfstößen aus AA2024-T3.....	30
2.1.2. AP2 – Schädigungsmechanismen bei zyklischer Belastung.....	50
2.1.2.1. Einachsige Schädigungsmechanismen	50
2.1.2.2. Mehrachsige Schädigungsmechanismen.....	56
2.2. Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	63
2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	63
2.4. Nutzen und Verwertbarkeit	63
2.5. Fortschritt anderer Stellen.....	64
2.6. Veröffentlichungen	64
3. Abbildungsverzeichnis	66
4. Tabellenverzeichnis	69
5. Literaturverzeichnis	70

1. Kurzdarstellung des Projektes

Um die Kosteneffizienz bei aktuellen Flugzeugprodukten weiter zu steigern, sollen aufwändige Nietverbindungen durch friction stir welding (FSW) Nähte im Bereich der Längsstöße ersetzt werden. Voraussetzung für dieses Vorhaben ist die genaue Kenntnis der zu erwartenden Lebensdauern solcher Verbindungen unter realitätsnahen mehrachsigen Belastungen. Da diesbezüglich bisher nur einachsige Ermüdungsversuche durchgeführt wurden, werden die Schweißverbindungen mit einem relativ großen Sicherheitsfaktor beaufschlagt. Dies bedeutet, dass hier die Blechdicken erhöht werden müssen, was in Abbildung 1-1 dargestellt ist.

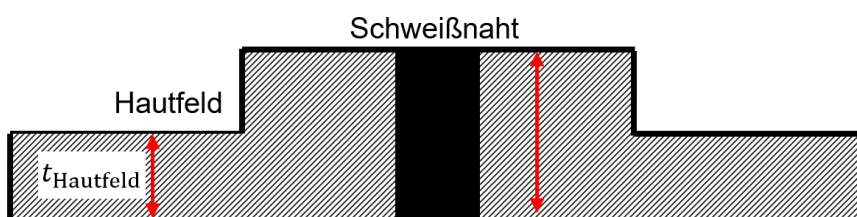


Abbildung 1-1: Aufdickung des Hautfeldes im Bereich der Schweißnaht

Die Aufdickung im Bereich der Schweißnaht hat zur Folge, dass Bleche mit größeren Dicken eingekauft und mechanisch bearbeitet werden müssen. Beide Aspekte erhöhen diesen Teil der Produktionskosten. Um dem Leitkonzept des CoMe Verbunds, der kostenoptimierten, metallischen Rumpfbauweise zu folgen, soll die Ermüdungslebensdauer einer solchen Schweißverbindung unter zweiachsigen Belastungen untersucht werden. Ebenso zielt dieses Vorhaben darauf ab, Grundlagenkenntnisse für den Zertifizierungsprozess zu liefern. Dabei geht es auch darum, den Schädigungsprozess innerhalb der Schweißnaht genauer zu verstehen. Hinzu kommt hier der Aspekt von möglichen Schweißfehlern, welche die Lebensdauer beeinflussen

1.1. Aufgabenstellung

Es soll im Rahmen des Projekts ein Lebensdauermodell entwickelt werden, mit welchem die Anrissentstehung von FSW-Nähten unter realitätsnahen mehrachsigen Ermüdungslasten abgeschätzt werden kann. Zu diesem Zweck werden sogenannte Wöhler Versuche an geschweißten Aluminiumblechen der Legierung AA2024 durchgeführt. Neben defektfreien Nähten, werden auch die Auswirkungen von Schweißdefekten untersucht werden. Die zugrundeliegenden Schädigungsmechanismen sollen durch Einsatz von digitaler Bildkorrelation als auch fraktographischen Bruchflächenuntersuchungen identifiziert werden. Letztlich soll das Zusammenspiel von lokalen mechanischen Belastungen und der Mikrostruktur des Werkstoffs in das Modell einlieBen.

1.2. Voraussetzungen

Das Institut für Werkstoff-Forschung ist auf metallische Rumpfkonzeppte und metallische Rumpffertigungstechnologien spezialisiert. Es hat sich in mehreren Jahrzehnten grundlagenorientierter als auch angewandter Forschung einen herausragenden Ruf auf dem Gebiet der wissenschaftlichen Beurteilung des Verhaltens und Versagens metallischer Werkstoffe im Luftfahrtsektor und dort speziell im Bereich Flugzeugrumpf erworben. Um dem wachsenden Bedarf und Interesse von Seiten der Industrie im Bereich metallischer Primärstrukturen gerecht zu werden, hat das Institut mit eigenen Mitteln einerseits die experimentelle Infrastruktur gezielt ausgebaut, um z.B. größere Kreuzproben biaxial zu prüfen. Andererseits wurden gezielt Kompetenzen aufgebaut, um metallische Rumpfstrukturen und das Risswachstum in Rumpfstrukturen mit Hilfe von Simulationsmethoden beurteilen zu können. Um die experimentellen Ergebnisse auch in ortaufgelöster Form systematisch mit denen der Simulationsmethoden vergleichen und validieren zu können ist die digitale Bildkorrelation eine Schlüsselkomponente. Es wird dabei stetig an zugehörigen Auswertelgorithmen weitergearbeitet, die open-source veröffentlicht werden sollen. Es wurde ein spezieller Postprozessor entwickelt, um die reale Risspitzenbeanspruchung der Probe exakt auszuwerten. Der Postprozessor basiert dabei auf dem J-Integral und dem Wechselwirkungsintegral zur Berechnung von J , K_I und K_{II} (1).

Aufgrund der jahrzehnte-langen Erfahrungen ist das Institut für Werkstoff-Forschung auf dem Gebiet des metallischen Rumpfes gut positioniert, um die wissenschaftlich-technischen Ziele umsetzen zu können, da die vorhandenen Kompetenzen schon in den Lufo-Projekten HERMET, HERMO, MTEXT und MetLife aufgebaut wurden.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die nachfolgenden Ausführungen geben die wesentlichen wissenschaftlichen Ergebnisse des Projekts DaTMet wieder. Eine Übersicht der beiden Arbeitspakete ist hierzu in Abbildung 1-2 dargestellt. In AP1 werden biaxiale Kreuzproben mit einer FSW-Naht unter mehrachsiger Beanspruchung getestet, während AP2 den lokalen Prozess der Schädigung ausgehend von einem Schweißdefekt charakterisiert.

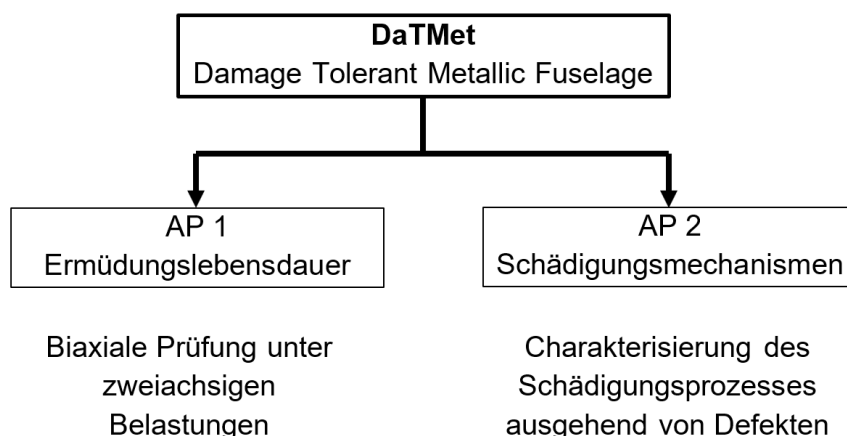


Abbildung 1-2: Arbeitspaketübersicht von DaTMet

1.4. Stand der Wissenschaft und Technik

In einem optimierten FSW-Prozess mit geeigneten Schweißparametern kann man eine hochfeste, metallurgisch fehlerfreie Naht mit geringem Verzug und geringen Eigenspannungen herstellen (2). Jedoch können Abweichungen in der Produktionsumgebung wie z.B. Toleranzen in der Naht (Dicke, Ausrichtung der zu schweißenden Bleche, etc.) sowie lokale Unterschiede der Schweißparameter zur Bildung von Schweißfehlern führen (3) (4) (5). Ein „Lack of penetration“ (LOP) entsteht bei einer nicht ausreichenden Durchdringungstiefe des Pins oder einer Fehlausrichtung des Schweißwerkzeugs (6). Dahingegen treten Tunnel, „Lack of consolidation“ und nur teilweise verbundene Fehler an der Wurzel (root flaw / kissing bond) aufgrund von unzureichendem Materialfluss auf (7). Ein sogenannter „joint line remnant“ (JLR) kann aus bereits vorhandenen Oxidpartikeln, die ihren Ursprung in den Stumpfstoßen der zu verschweißenden Bleche haben, entstehen. Die Oxidpartikel reihen sich auf zu einer dünnen Zickzack-Linie, die sich durch die Rührzone ausbreitet (8) (9).

Fehler an der Wurzel, die eine bestimmte Größe überschreiten, können die mechanischen Eigenschaften und die Ermüdungsfestigkeit von reibrührgeschweißten Komponenten herabsetzen (10). Root flaws oder schwache Verbindungen auf der Wurzelseite verursachen hauptsächlich geringere Ermüdungsfestigkeiten (8) (10) (11) (12) (13). Zhou et al. (14) berichten für 4 mm dicke LOP-behaftete AA2024-T3 Schweißnähte über eine Reduktion der Ermüdungsfestigkeit um das 30- bis 80-fache gegenüber fehlerfreien Nähten. Die Stelle der Rissbildung ist jedoch zufällig und scheint von der Aluminium-Legierung abhängig zu sein. Zum Beispiel entsteht ein Ermüdungsriss bei einer FSW-Naht aus AA7075 am kissing bond, und wird dort meist von den Hohlräumen nahe des kissing-bond-Endes induziert (10). Dahingegen entstehen bei FSW-Nähten aus AA2024 mikroskopische Risse eher an der Wurzelspitze (11). Besel et al. (15) untersuchten den Effekt von JLR auf den Ermüdungsrissverlauf bei durchgeschweißten AA5024-H116 Nähten. Sie berichteten über keinen Einfluss von JLR auf die Rissinitiierung.

Deshalb ist das Ziel in diesem Projekt, den Einfluss von Schweißfehlern, insbesondere des LOPs, auf die Ermüdungsfestigkeit einer reibrührgeschweißten Luftfahrt-Legierung zu untersuchen; hierfür wird zwischen fehlerfreien und fehlerbehafteten Schweißnähten verglichen. Also wurden 1,8 mm dicke AA2024-Bleche mit einem gekürzten Pin reibrührgeschweißt, um einen LOP zu erzeugen. Mittels Ultraschall-Untersuchung und Nanotom-Tomograph wurden Ort und Morphologie der Schweißfehler ermittelt. Die Bruchflächen-Analysen zeigten, wo genau die Risse sich bildeten, sowohl bei fehlerfreien als auch bei fehlerbehafteten Schweißnähten.

Die Verwertbarkeit der geplanten Arbeiten wird durch keine Schutzrechte oder Schutzrechtsanmeldungen dritter gefährdet werden. Bei allen anderen Arbeiten im Rahmen von DaTMet werden keine fremden Schutzrechte berührt. Alle benötigten eventuell geschützten Werkstoffe werden direkt von den Projektpartnern bezogen und nur für die projektspezifischen Untersuchungen herangezogen, so dass auch hierfür keine weiteren Genehmigungen / Lizensierungen erfolgen müssen.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Abgesehen von den Projektpartnern gab es keine Firmen und Institute, die am Projekt beteiligt waren.

2. Eingehende Darstellung

2.1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

- Die wissenschaftlichen Ergebnisse erlauben dem DLR dazu beizutragen, die Verbesserungspotentiale metallischer Herstellungs- und Fügeverfahren weiter zu entwickeln und sich selbst damit im Rahmen von Industrie- und auch Forschungsk Kooperationen als kompetenter Partner zu empfehlen.
- Erweiterung der Position und Sichtbarkeit des DLR als Know-How-Träger auf dem Gebiet metallischer Leichtbaustrukturen.
- Erleichterung der Drittmittelakquise für das DLR. Insbesondere kann den Verbundpartnern sowie Airbus Deutschland ein professionelles Technologietransferpotential geboten werden.
- Die Arbeiten dienen zur Ausbildung und Weiterqualifizierung des wissenschaftlichen Nachwuchses auf allen Ebenen.
- Bessere Vermarktung der Kompetenzen auf dem Gebiet des Reibrührschweißens und der Bewertung FSW-geschweißter Leichtbaustrukturen.

2.1.1. AP1 – Ermüdungslebensdauer

2.1.1.1. Biaxiale Prüfung unter zweiachsigen Belastungen

Zur Charakterisierung der Ermüdungslebensdauer von FSW-geschweißten Hautfeldstrukturen sind umfangreiche Untersuchungen an biaxial belasteten Kreuzproben vorgesehen. Der detaillierte Ablaufplan dieses Arbeitspakets ist in Abbildung 2-1 dargestellt. Zunächst müssen die Lastzustände definiert werden, woraufhin die Proben ausgelegt werden können.

Die bereitgestellten geschweißten Probenbleche wurden im ersten Schritt mittels Ultraschallprüfung untersucht, um mögliche Defekte in der Schweißnaht zu erkennen. Während der biaxialen Prüfung unter zyklischen Lasten, können identifizierte Defekte dann zum Beispiel mittels digitaler Bildkorrelation untersucht werden. Letztlich sollen durch die Versuche fundierte Aussagen zur Lebensdauer von geschweißten Strukturen abgeleitet werden, auch unter Berücksichtigung möglicher Defekte.

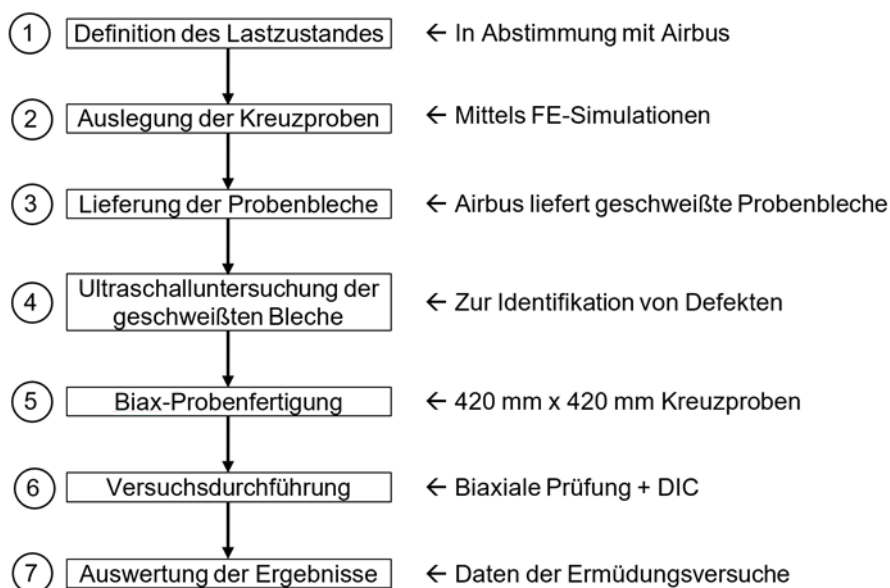


Abbildung 2-1: Ablaufplan zur Durchführung der biaxialen Ermüdungsversuche

2.1.1.1.1. Definition des Lastzustandes

In der ersten Phase des Projekts wurden die zu untersuchenden Lastfälle bereits mit dem Projektpartner Airbus abgestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2-1 zusammengefasst.

Tabelle 2-1: Maximale Spannungen für Kreuzproben mit 1,8 mm Blechdicke

(a) Defektfreie Schweißnaht				
Nr.	Umfangsspannung [MPa]	Längsspannung [MPa]	Schub [MPa]	Bereich
1	200	200	0	P6
2	200	0	80	P18
3	200	0	0	
(b) Defektbehaftete Schweißnaht				
Nr.	Umfangsspannung [MPa]	Längsspannung [MPa]	Schub [MPa]	Bereich
4	130	130	0	P6
5	130	0	50	P18
6	130	0	0	

In Summe wurden Biax-Proben untersucht, die in zwei Kategorien eingeordnet sind. Zum einen sollen Schweißnähte ohne Defekte in idealer Qualität untersucht werden, also dem Zustand entsprechen, wie sie auch im Flugzeug eingesetzt werden. In der zweiten Kategorie geht es darum, gezielt defektbehaftete Schweißnähte zu prüfen. Diese sollen einen sogenannten „lack of

penetration“ (LOP) mit ca. 0,2 mm Defektgröße aufweisen und somit schlecht geschweißte Bleche abbilden. Der Fokus der Versuche liegt jedoch in den verschiedenen Kombinationen von Spannungszuständen mit Zugspannungen in Umfangs- und Längsrichtung, sowie Schubspannungen. Diese Lastkombinationen repräsentieren dabei bestimmte Teilsektionen (P6 und P18) im Flugzeugrumpf.

Neben der nominellen Spannung ist es wichtig, dass die Spannungsverläufe in der Schweißnaht, möglichst die Verläufe im Flugzeugrumpf abbilden. Exemplarisch ist dies in Abbildung 2-2 dargestellt. Der nutzbare Prüfbereich der Probe hat Abmessungen von etwa 380 mm x 380 mm. Es ist dabei vorgesehen, dass die jeweiligen Spannungsverläufe in der Mitte einen Plateaubereich aufweisen und zum Rand hin um ca. 10-15 % abfallen. Neben der Realitätsnähe soll hierdurch auch sichergestellt werden, dass der Riss in der Probenmitte startet. Es soll während der Ermüdungsphase die multiple Entstehung von Rissen und deren Interaktion miteinander beobachten werden können.

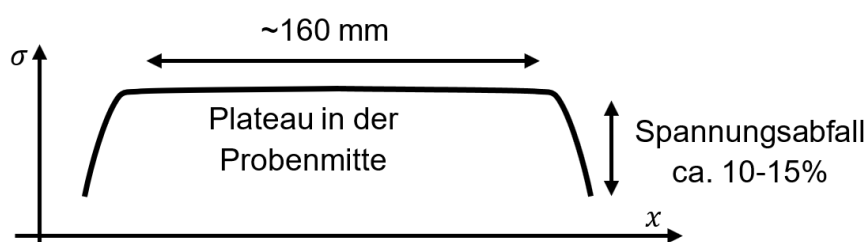


Abbildung 2-2: Gewünschter Spannungsverlauf in der Schweißnaht

2.1.1.1.2. Auslegung der Kreuzproben

Die Kreuzproben wurden anhand von Finite Elemente Simulationen auf die in Tabelle 2-1 vorgegebenen Lastbedingungen ausgelegt. Eine Skizze der geplanten Kreuzproben, sowie deren Lasteinleitung ist in Abbildung 2-3 dargestellt.

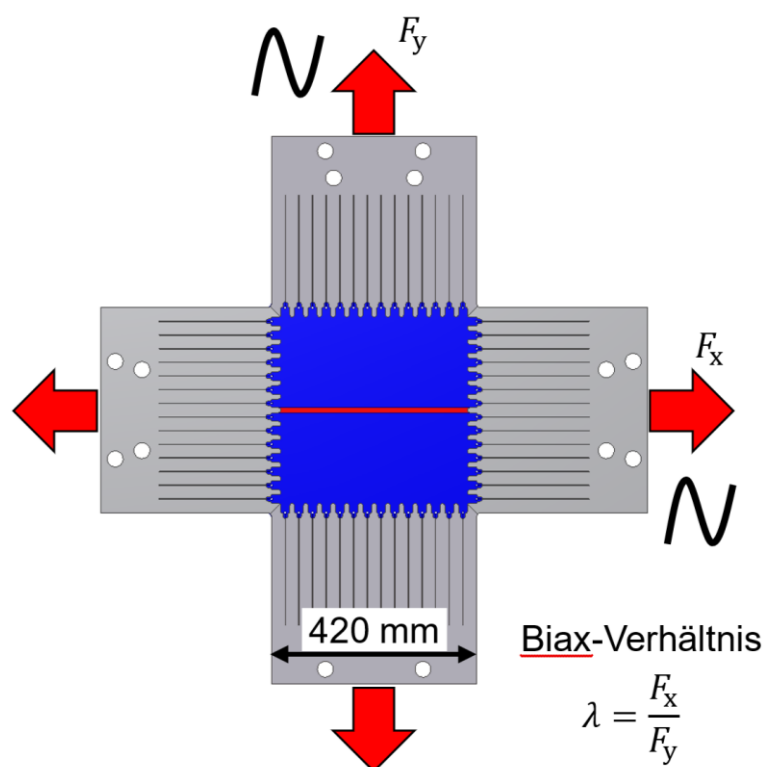


Abbildung 2-3: Biaxiale Kreuzprobe. Das Prüffeld ist in blau dargestellt, die Kräfteinleitungsarme in grau

Um die gewünschten Schubspannungen in der Schweißnaht für die Lastfälle (2) und (5) einzustellen, muss diese entsprechend zu den Lastachsen der Maschine orientiert sein. Hierzu sind in Abbildung 2-4 die Mohrschen Spannungskreise für die Spannungszustände aus Tabelle 2-1 dargestellt. Die Lastzustände „1“ und „4“ stellen dabei den hydrostatischen Spannungsfall dar. Bei „3“ und „6“ wird die Probe einachsrig belastet. Diese Versuche dienen als Vergleich zu Standardversuchen. Die Spannungskreise „2“ und „5“ zeigen, dass die Schweißnaht in etwa um 19° relativ zu einer Lastachse orientiert sein muss, sodass sich der Schubspannungszustand einstellt.

Um im nächsten Schritt die gewünschten nominellen Spannungen, sowie die Spannungsverläufe einzustellen, mussten die Kreuzproben entsprechend modifiziert werden. Hierbei wurden verschiedene Varianten diskutiert.

(a) Defektfreie Schweißnaht

(b) Defektbehaftete Schweißnaht

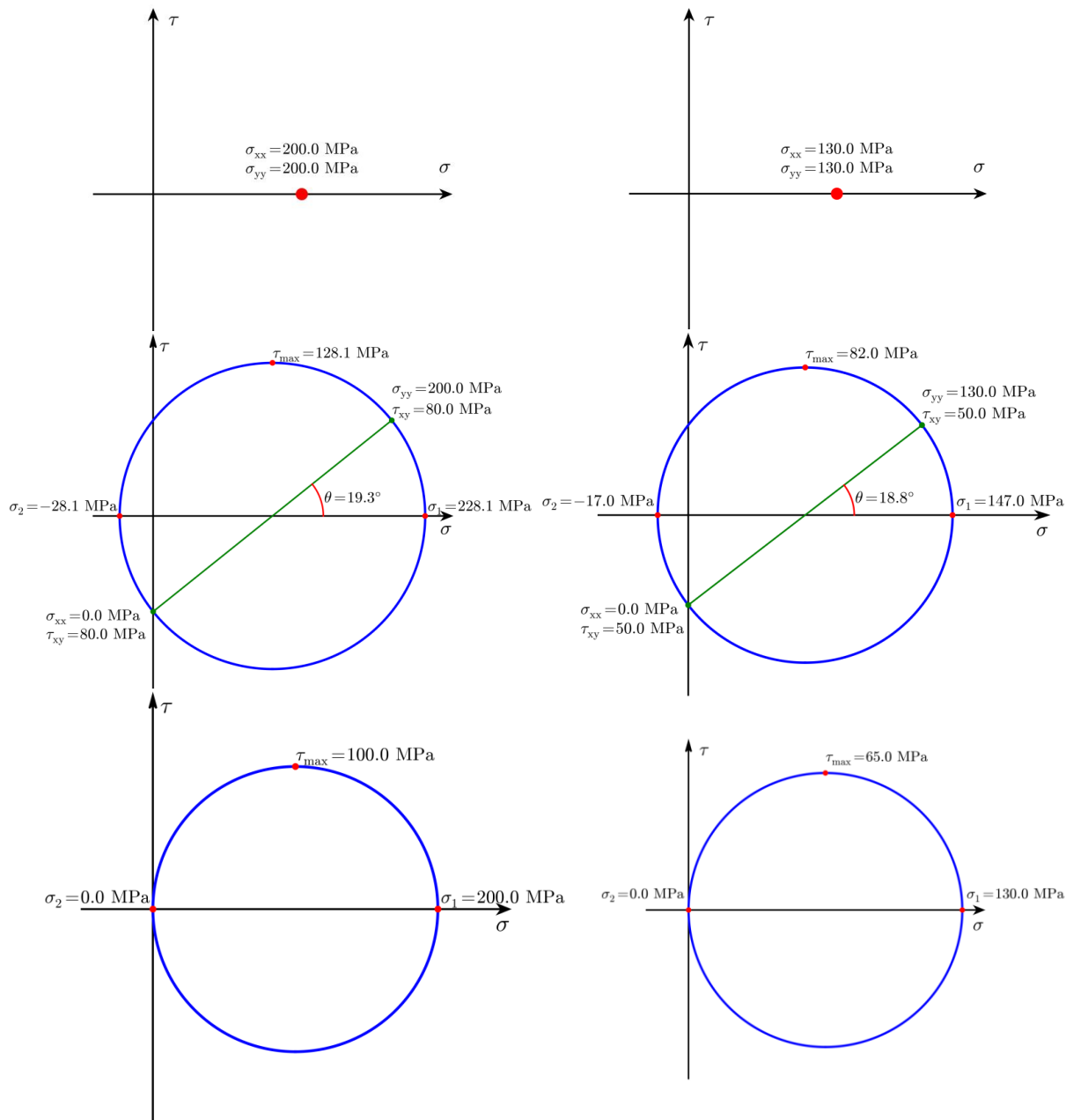


Abbildung 2-4: Mohrsche Spannungskreise zu den Spannungszuständen von Tabelle 2-1

2.1.1.1.3. Detailauslegung der Kreuzproben

Zur lokalen Anpassung des Lastverlaufs entlang der Schweißnaht wurden verschiedene Möglichkeiten des Probendesigns untersucht. Dabei sollte ein Spannungsplateau erzeugt werden, sodass im Zentrum der Probe, entlang der Schweißnaht ein konstanter Spannungszustand herrscht, der zum Rand hin abnimmt. Als meistgeeignete Lösung hat sich herausgestellt, auf das Prüffeld ein

Patch zu kleben. Dessen Auslegung und damit das finale Probendesign werden im Folgenden beschrieben.

Bevor der Patch angepasst wurde, wurde zunächst der Bereich der Lasteinleitungsarme der Probe mittels FE-Analysen genauer untersucht. Aus vorherigen Versuchen ist bekannt, dass sich in den Entlastungsbohrungen Risse bilden können. Der zugehörige Ausschnitt ist in Abbildung 2-5 dargestellt. Hierbei wurden Proben mit 1,8 mm dickem Prüffeld simuliert, welche zweiachsig mit jeweils 100 kN belastet wurden. Abbildung 2-5 (a) zeigt die von Mises Vergleichsspannung im Bereich der Zungen der Krafteinleitungsarme. Die Bohrungen weisen eine Spannungsüberhöhung bis deutlich über 200 MPa auf. Unter Ermüdungsbelastung ist hier das Auftreten von Rissen sehr wahrscheinlich. Ein Kragen um die Bohrungen reduziert hingegen deutlich das Spannungsniveau Abbildung 2-5 (b).

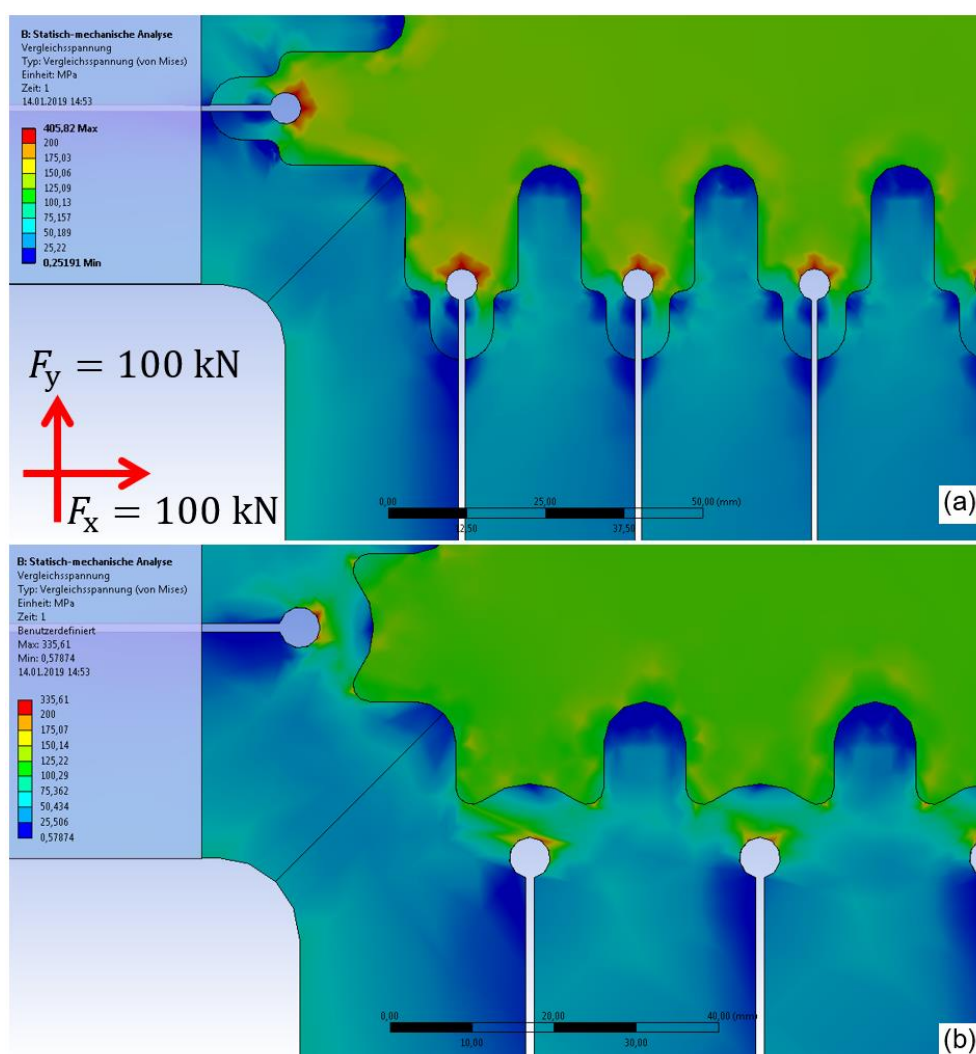


Abbildung 2-5: Detailansicht der FE-Berechnung einer biaxialen Kreuzprobe im Bereich der Krafteinleitungsarme.

Die genaue geometrische Form des Patches wurde im nächsten Schritt mittels Finite Elemente (FE) Simulationen angepasst. Die Grundform der Kreuzprobe, d.h. ohne den Patch, ist dabei mittels Autodesk Inventor modelliert. Das detaillierte Volumenmodell wurde dann in ANSYS Classic V19 importiert. Zur weiteren Auslegung des Patches wurde anschließend mittels APDL (ANSYS Parametric Design Language) von diesem ein parametrisches Volumenmodell erstellt. Die Parameter dieses Modells sind in Abbildung 2-6 dargestellt.

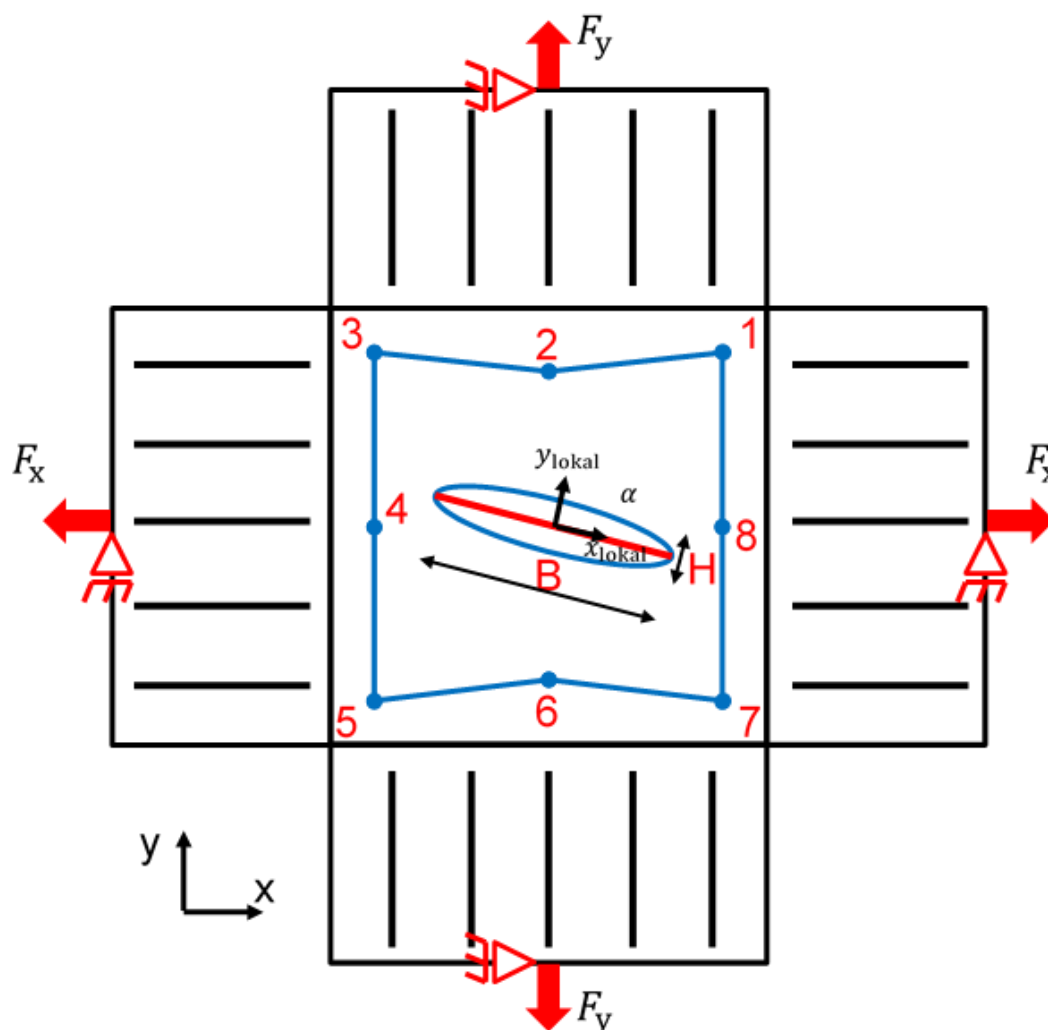


Abbildung 2-6: Schematische Skizze des parametrischen FE Modells der 420 mm x 420 mm Biax Probe zur Optimierung des Flächenpatches

Die Außenkontur des Patches stellt eine Aneinanderreihung von Linien dar. Die Kontur kann mittels acht Knotenpunkten modifiziert werden, die jeweils in x- und y-Richtung verschiebbar sind. Im Zentrum befindet sich ein ellipsenförmiger Ausschnitt, welcher die Schweißnaht freilegt. Von der Ellipse können Drehwinkel, Höhe und Breite verändert werden. Wie in Abbildung 2-6 ersichtlich, sind die Randbedingungen so gewählt, dass sich die Probe nur in Richtung der jeweiligen Kräfte verschieben kann. Die Kräfte gehen dabei als zusätzliche Parameter in die Simulation ein. Alle Simulationen wurden linear-elastisch durchgeführt. Die Schweißnaht wurde dabei nicht separat

modelliert. Insgesamt lassen sich also 20 Parameter des Modells frei anpassen. Zur Auswertung des Spannungsverlaufs im Schweißnahtbereich wurde im Postprozessor ein entsprechender Pfad definiert, auf den jeweils im lokalen Koordinatensystem die gesuchten Spannungskomponenten σ_x , σ_y und σ_{xy} projiziert wurden.

Die gezielte Anpassung des Spannungsverlaufs erfolgte im Rahmen einer Optimierung. Hierzu wurde die Software OptiSlang genutzt. Der hierin verwendete Optimierer basiert auf einem adaptivem Antwortflächenverfahren, welches ähnlich einer DoE (Design of Experiment) arbeitet. Besonders für Optimierungsprobleme mit vielen Parametern, deren Wechselwirkungen nicht zwingend linear zusammenhängen, eignet sich dieses Verfahren sehr gut und wurde daher hier angewendet. Im Rahmen der Optimierungen stellte sich dennoch heraus, dass sich nicht alle Parameter zusammen optimieren lassen, da dies zu ungünstigen Lösungen führte. Die Versuchskonfigurationen der Proben mit LOP sind nochmals in Tabelle 2-2 zusammengefasst. Im Folgenden wurden die Proben mit der Kennzeichnung V1 und V2 detailliert ausgelegt. V3 ist hierbei äquivalent zu V1 jedoch ohne die Längsspannung und stellt daher nur einen uniaxialen Lastfall dar.

Tabelle 2-2 Maximale Spannungen für Kreuzproben mit 1,8 mm Blechdicke

(b) Schweißnaht in poor weld quality					
Nr.	Umfangsspannung [MPa]	Längsspannung [MPa]	Schub [MPa]	Bereich	Probenvariante
4	130	130	0	P6	V1
5	130	0	50	P18	V2
6	130	0	0		V3 -> V1

Tabelle 2-3 fasst daher für die Auslegung der Varianten 1 und 2 die durchgeführten Optimierungen zusammen. Für jedes Projekt wurden etwa 300 Rechnungen durchgeführt. Bei V1 wurde die Symmetrie ausgenutzt, sodass letztlich nur sechs Parameter optimiert werden mussten. Durch weitere Nutzung von Symmetrien konnte ebenfalls bei V2 die Anzahl der zu optimierenden Parameter auf sieben reduziert werden.

Tabelle 2-3 Durchgeführte Optimierungs-Projekte

Nr.	Projektname	Kommentar
1	V1_mitLOP_mitKraft_Sensitiv	Sensitivitätsanalyse
2	V1_mitLOP_mitKraft	Die gleichzeitige Optimierung aller 6 Parameter führte zu nicht eindeutigen Lösungen aufgrund von Wechselwirkung zwischen Kraft und Patchgeometrie
3	V1_mitLOP_ohneKraft	Die Kraft wurde fest vorgegeben und es wurden noch 4 Parameter optimiert

4	V1_mitLOP_NurKraft	Die Lösung aus dem vorherigen Schritt wurde genutzt und letztlich nochmals die Kräfte in x- und y-Richtung optimiert
5	V2_mitLOP_ohneKraft_Constraints	Es wurde vorgegeben, dass die Kante zwischen K1 und K2 stets parallel zur Schweißnaht ausgerichtet ist. Dies reduzierte die Anzahl der Parameter auf 3, führte jedoch nicht zum gewünschten Spannungsverlauf
6	V2_mitLOP_FreieKontur_mitKraft	Durch Erweiterung der Konturparameter konnte der Patch im nächsten Schritt frei angepasst werden. Zusammen mit der Kraft ergaben sich 7 Inputparameter für die Optimierung. Auch hierbei stellt sich das Problem ein, dass keine brauchbare Lösung gefunden werden konnte.
7	V2_mitLOP_FreieKontur_ohneKraft	Die Kraft wurde vorgegeben und es wurden nur noch 5 Parameter optimiert. Somit konnte eine geeignete Kontur des Patch gefunden werden.
8	V2_mitLOP_FreieKontur_nurKraft	Die Lösung aus dem vorherigen Schritt wurde genutzt und letztlich nochmals die Kräfte in x- und y-Richtung optimiert

Die Ergebnisse der Auslegungsschritte sind in den nachfolgenden Unterabschnitten dargestellt. Neben der Kontur des Patches wurden ebenfalls die maximalen Prüflasten ermittelt.

2.1.1.1.4. Kreuzprobe mit Schweißnaht in 0° Richtung –V1

Das 3D CAD Modell der ausgelegten Kreuzprobe zur Prüfung einer Schweißnaht unter zweiachsiger Beanspruchung ist in Abbildung 2-7 Optimierter Patch von V1 zusammen mit den zugehörigen Prüflastendargestellt. Während das Prüffeld eine Dicke von 1,8 mm aufweist, sind die Patches 2,0 mm dick und werden jeweils auf Vorder- und Rückseite der Probe angebracht. Die Optimierung hat ergeben, dass zur Spannungsanpassung der Patch in der Probenmitte breiter sein muss, als zum Rand hin. Um den Patch auf der Kreuzprobe positionieren zu können, sind jeweils links und rechts Ösen angebracht, welche in die Zungen der Krafteinleitungsarme greifen.

Die Probe wird während des Versuchs mit maximalen Kräften von 106,2 kN, bzw. 195,2 kN in y- und x-Richtung belastet. Abbildung 2-8 zeigt die zugehörigen Simulationsergebnisse für diese Variante. Die von Mises Vergleichsspannung im Nahtbereich beträgt etwa 130 MPa. Die Bereiche zwischen den Zungen und dem Patch weisen hingegen Spannungsüberhöhungen auf. Diese Bereiche sind im FE-Modell jedoch ideal miteinander verbunden. In der geklebten Probe sind diese Spannungsbereiche aufgrund der Klebeschicht nicht vorhanden. Zudem würde sich hier die Klebeschicht auch lokal ablösen, zur Reduktion der Spannungsspitzen. Abbildung 2-8(b) zeigt den genauen Spannungsverlauf entlang der Schweißnaht für die gesuchten Komponenten σ_x und σ_y .

Diese weisen bis zu einem Abstand von ca. 100 mm ausgehend von der Mitte ein ausgeprägtes Plateau auf. Zum Rand des ellipsenförmigen Ausschnitts hin fallen die Spannungen jedoch deutlich ab, sodass im Idealfall hier keine Risse initiieren sollten.

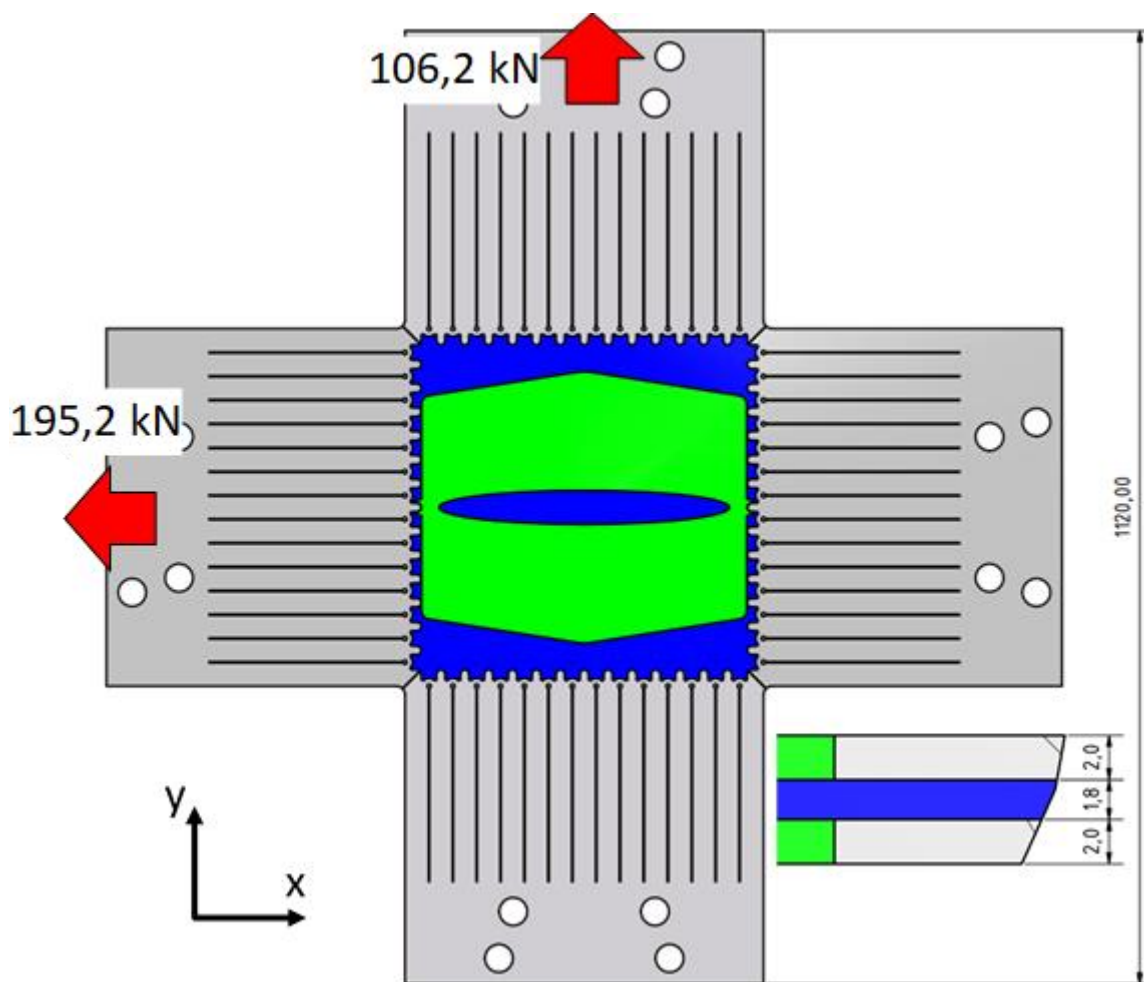


Abbildung 2-7 Optimierter Patch von V1 zusammen mit den zugehörigen Prüflasten

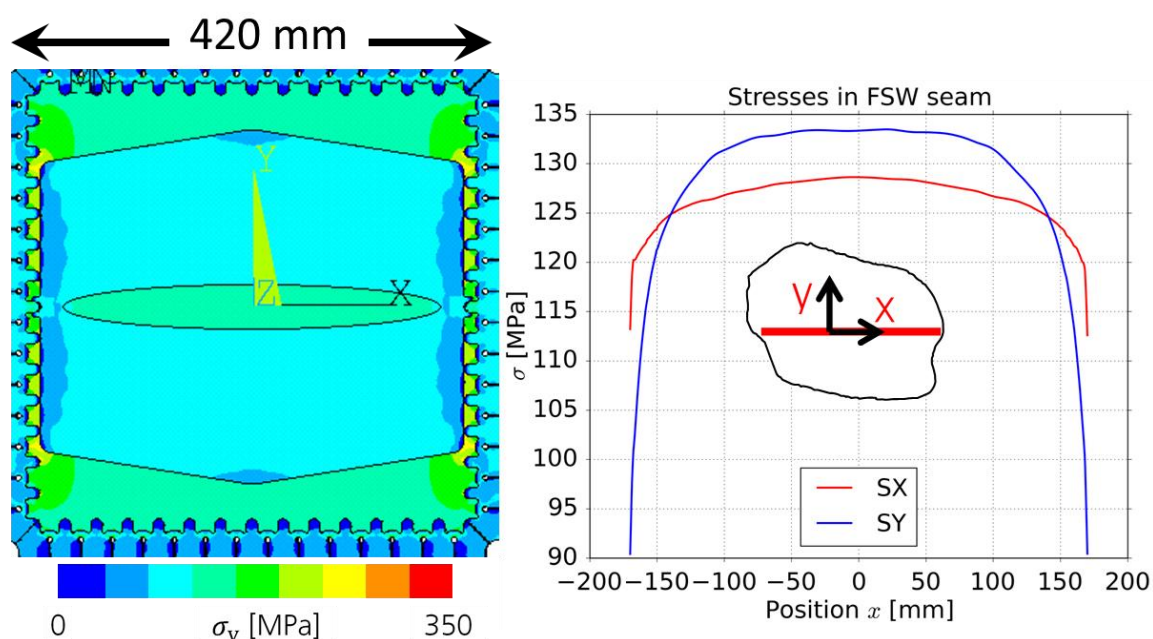


Abbildung 2-8 Simulationsergebnisse des Prüfbereichs von V1. (a) Von Mises Vergleichsspannung und (b) Spannungskomponenten im Nahtbereich

2.1.1.1.5. Kreuzprobe mit Schweißnaht in 19° Richtung – V2

Wie im Vorfeld definiert, muss die Schweißnaht zum Hervorrufen von Schubbeanspruchung einen Winkel von 19° aufweisen. Das optimierte Modell des Patches ist in Abbildung 2-9 dargestellt. Es hat sich dabei ergeben, dass die Außenkonturen ein Rechteck abbilden. Identisch zur Variante 1 wird der Patch ebenfalls eine Dicke von 2 mm aufweisen. Hierbei stellen sich Kräfte von 111,1 kN und -12,8 kN in y- bzw. x-Richtung ein. Hervorzuheben ist dabei die Druckkraft in x-Richtung, welche zu einer Druckbelastung führt. Daher muss sichergestellt werden, dass diese kein Knicken, Biegen oder Beulen innerhalb der Probe verursachen und diese sich somit entsprechend der Stabilitätstheorie stabil verhält. Hierzu wurde die finale Konfiguration der Probe mittels ANSYS Workbench V19 auf lineares Beulen untersucht. Anschließend erfolgte eine strukturmechanische Analyse, welche auch nicht-lineare Effekte und große Deformationen mit berücksichtigt (nlgeom,on). Die Simulationen ergaben, dass es bei der Probe nicht zu unerwartetem Beulen kommen sollte. Dies ist auch dadurch erklärbar, dass das Prüffeld mit einer Zugkraft von 111,1 kN vorgespannt wird. Die negative Querkraft liegt betragsmäßig lediglich im Bereich von ca. 10 % dieser Kraft.

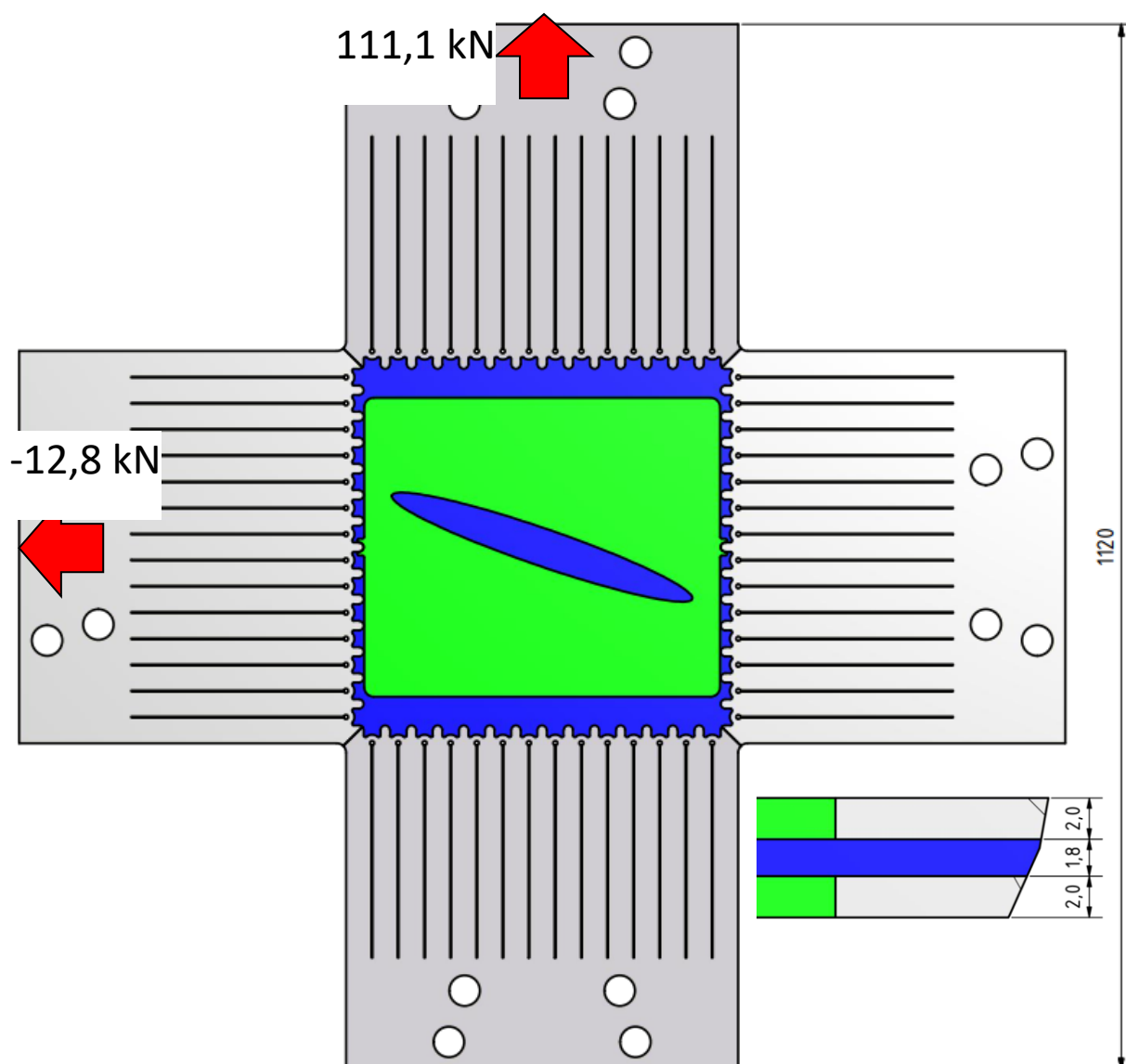


Abbildung 2-9 Optimierter Patch von V2 zusammen mit den zugehörigen Prüflasten

Die Simulationsergebnisse für Variante 2 der Kreuzprobe sind in Abbildung 1 7 dargestellt. Die von Mises Vergleichsspannung zeigt, dass sich hier keine Spannungsüberhöhungen in dem Bereich zwischen Patch und Zungen bilden. Dies kann durch die anliegenden Drucklasten erklärt werden. Abbildung 1 7 (b) zeigt die Spannungsverläufe von σ_x , σ_y und σ_{xy} entlang der Schweißnaht im lokalen Koordinatensystem. Die maximalen Werte innerhalb der Plateaus von σ_y und σ_{xy} sind in guter Übereinstimmung mit den geforderten Werten von 130 MPa bzw. 50 MPa. Hierbei weicht σ_x mit einer Spannung von ca. 20 MPa vom vorgegeben Spannungsniveau ab und konnte auch nicht weiter reduziert werden. Den größten Einfluss auf die Schädigungsentwicklung sollte jedoch die Normalspannung in y-Richtung aufweisen, womit σ_x lediglich einen Anteil von ca. 15 % hiervon aufweist und damit vernachlässigbar ist.

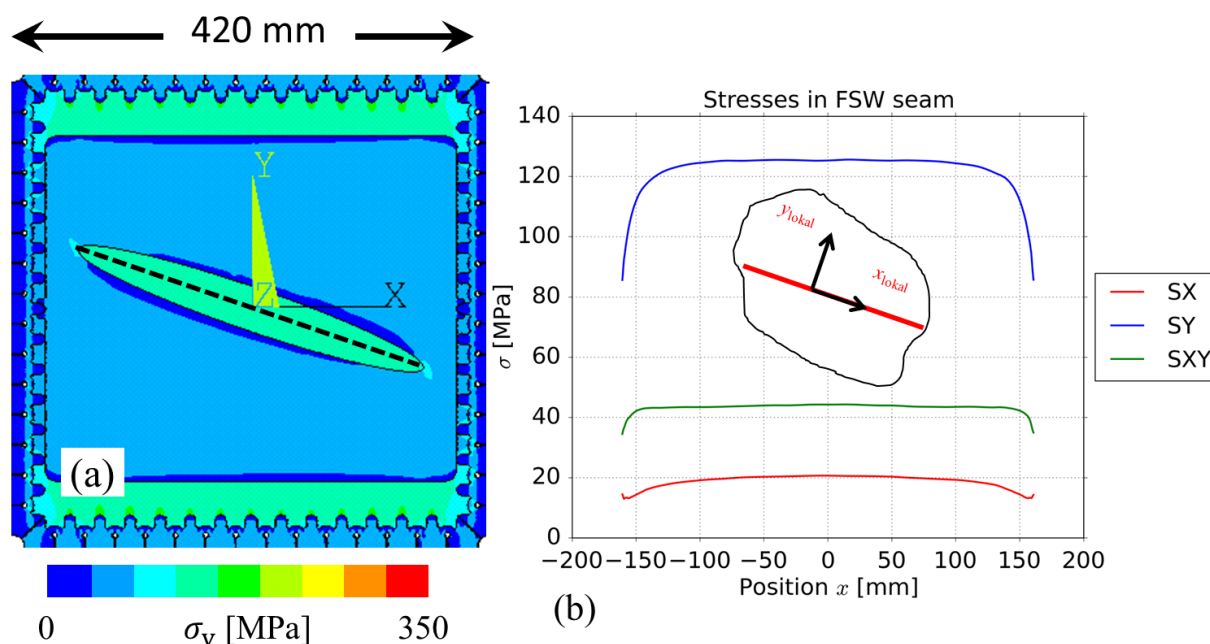


Abbildung 2-10 Simulationsergebnisse des Prüfbereichs von V2. (a) Von Mises Vergleichsspannung und (b) Spannungskomponenten im Nahtbereich

2.1.1.1.6. Ermüdungstest unter zweiachsigen Belastungen

Nach der Optimierung der Geometrie der Kreuzprobe und der Berechnung der gewünschten Lasten wurden Proben für die Ermüdungsversuche mit zyklischer biaxialer Belastung aus den von Airbus zur Verfügung gestellten FSW 2024-T3 Blechen hergestellt, die einen LOP Schweißfehler enthielten. Die Proben wiesen eine Größe von 420 x 420 mm² und eine Dicke von 1,8 mm auf. Die Schweißnaht wurde senkrecht zur Sekundärachse ausgerichtet. Sowohl die Ärmchen zur Lasteinleitung als auch der Patch wurden vor dem Testen auf die Proben geklebt. Abbildung 2-11 a zeigt die biaxiale Probe mit geklebten Ärmchen für die Lastübertragung und „Patch“ in der Mitte des Prüfbereichs.

Die Ermüdungsversuche wurden auf einer servohydraulischen biaxialen Prüfmaschine mit einer Maximalspannung von $\sigma_y = 130$ MPa (Sekundärachse) bzw. $\sigma_x = 65$ MPa (Hauptachse) bei Raumtemperatur in Laborluft durchgeführt. Die Kreuzproben wurden zyklisch mit einer sinusförmigen Last-Zeit-Funktion mit einem Spannungsverhältnis $R (\sigma_{\min}/\sigma_{\max}) = 0,1$ belastet. Die Frequenz der zyklischen Belastung betrug 5 Hz. Die Entstehung und Entwicklung von Ermüdungsrissen wurde mit Hilfe von digitaler Bildkorrelation aufgezeichnet (DIC). Abbildung 2-11 b gibt einen Überblick über den Versuchsaufbau mit der auf der biaxialen Prüfmaschine montierten Kreuzprobe und dem System für digitale Bildkorrelation (GOM-Aramis 12M). Zu diesem Zweck wurde die Probe vor dem Test mit einem Schwarz-Weiß stochastischen Muster auf der Wurzelseite der Naht (LOP-Seite) versehen, wie in Abbildung 2-11 c gezeigt. Die Probe wurde intermittierend

belastet und alle 1000 Belastungszyklen bei der niedrigsten und höchsten Last gehalten, um die Bilder für die DIC aufzunehmen. Dieser Vorgang wurde so lange wiederholt, bis die Probe versagte. Abbildung 2-11 d zeigt eine schematische Darstellung der Belastungssequenz für die DIC-Bildgebung.

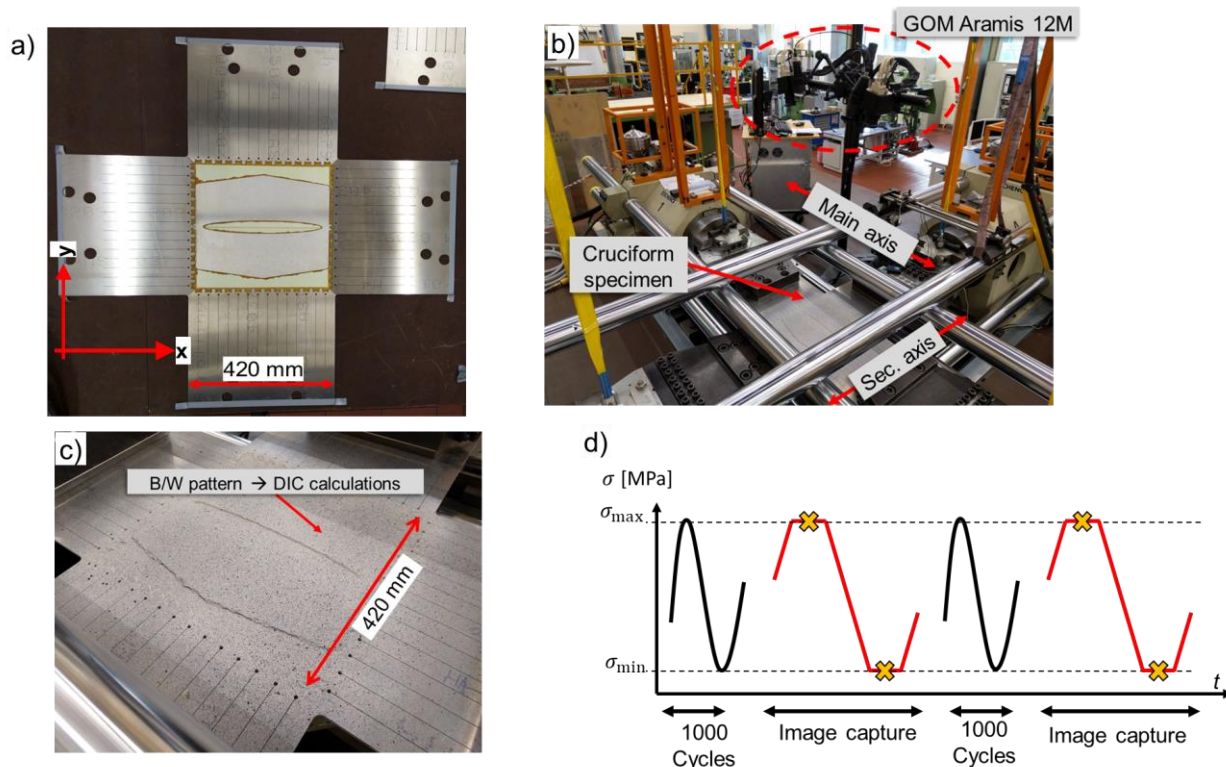


Abbildung 2-11: Ermüdungsversuch unter biaxialer Belastung: a) LOP-haltige FSW 2024-T3 mit Patch und Krafteinleitungsarmen, b) Aufbau der Kreuzprobe in der biaxialen Prüfmaschine, c) stochastisches schwarz/weiß Muster für die DIC-Aufnahmen, d) intermittierende Belastungssequenz für die DIC-Bildgebung

Abbildung 2-12 zeigt die Entstehung eines Ermüdungsrisses in der Mitte der Kreuzprobe. Der Patch erzeugt ein gleichmäßiges Dehnungsfeld (zwischen 0,10 und 0,15 %). Die Schadensentwicklung ist sehr gut erkennbar. Das erste Anzeichen von Rissbildung konnte erst bei einer Lebensdauer von $1,77 \times 10^5$ Schwingspiele in einer Entfernung von 15 mm von der Mitte der Probe registriert werden. Hier stieg kontinuierlich die von Mises Dehnung von 0,30 % bis auf etwa 0,85 %. Der Riss wuchs innerhalb $1,3 \times 10^4$ Lastzyklen 15 mm parallel zur Schweißrichtung (senkrecht zur Richtung der Hauptlast). Bei visuellen Inspektionen der gegenüberliegenden Seite zum DIC war der Riss jedoch nicht zu erkennen. Darüber hinaus wurde der LOP selbst unter maximaler Last nicht durch das DIC erfasst.

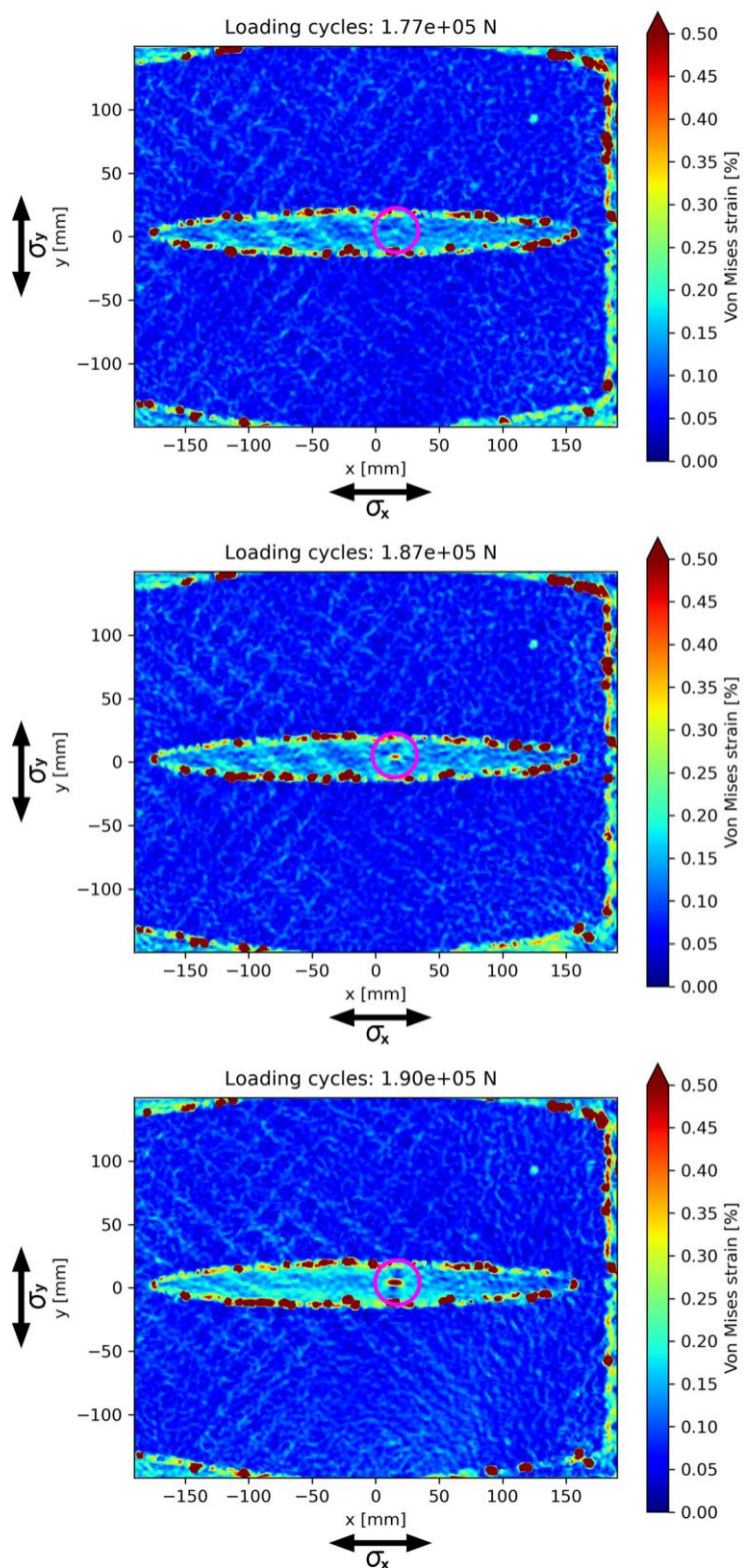


Abbildung 2-12: DIC-Bilder mit Rissentstehung im Bereich des Spannungsplateaus der Kreuzprobe. Der pinke Kreis markiert den Riss.

Ein ursprünglicher Schweißfehler im Wurzelbereich wurde durch Ultraschallprüfung an der gleichen Stelle wie der Ermüdungsriss "schwach" erkannt. Außer an dieser Stelle konnte kein kontinuierlicher LOP durch US-Prüfung festgestellt werden. Eine Post Mortem Ultraschallprüfung ergab ein starkes Signal an der gleichen Stelle, an der der Ermüdungsriss erfasst wurde. Die Länge des mit der US-Prüfung detektierten Fehlers stimmt mit der Länge des DIC-Rissbereichs überein. (Abbildung 2-13)

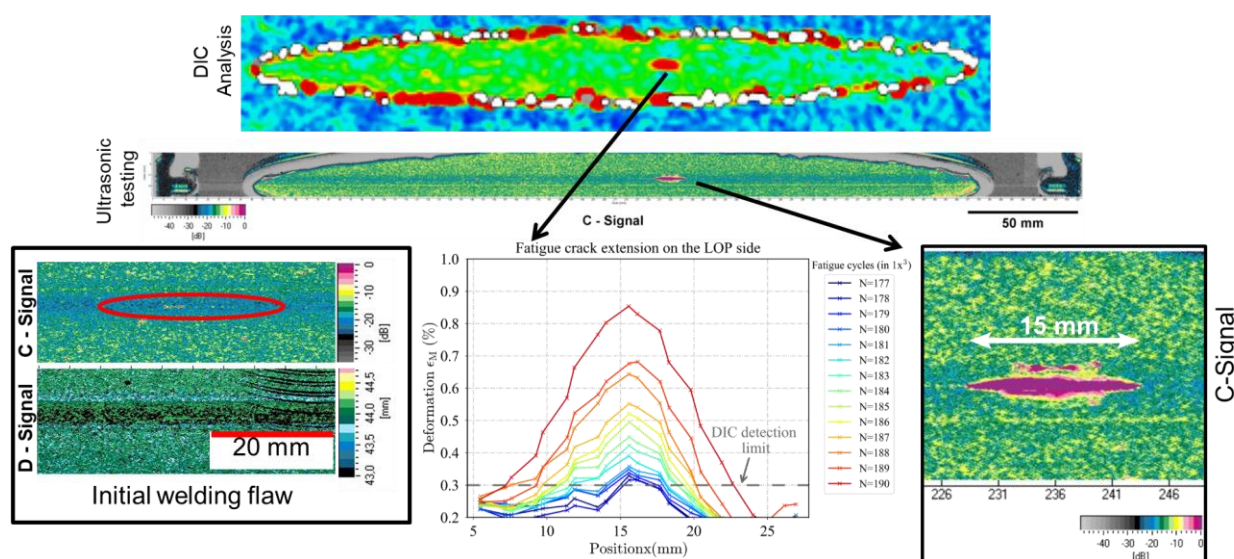


Abbildung 2-13: Vergleich der DIC-Aufnahme mit den Ultraschall-Bildern vor und nach dem Ermüdungsversuch

Um die Rissinitiierung zu bestimmen, wurde die aus den DIC-Ergebnissen resultierende Riss-Zone aus der biaxialen Probe entnommen und bis zum Versagen quasi-statisch gezogen. In Abbildung 2-14 ist zunächst der Querschliff zur Übersicht dargestellt (a). In (b) und (c) ist ein halbelliptischer Ermüdungsriss zu sehen, bei dem das Risswachstum im LOP beginnt und sich dann bis zur Oberseite ausbreitet.

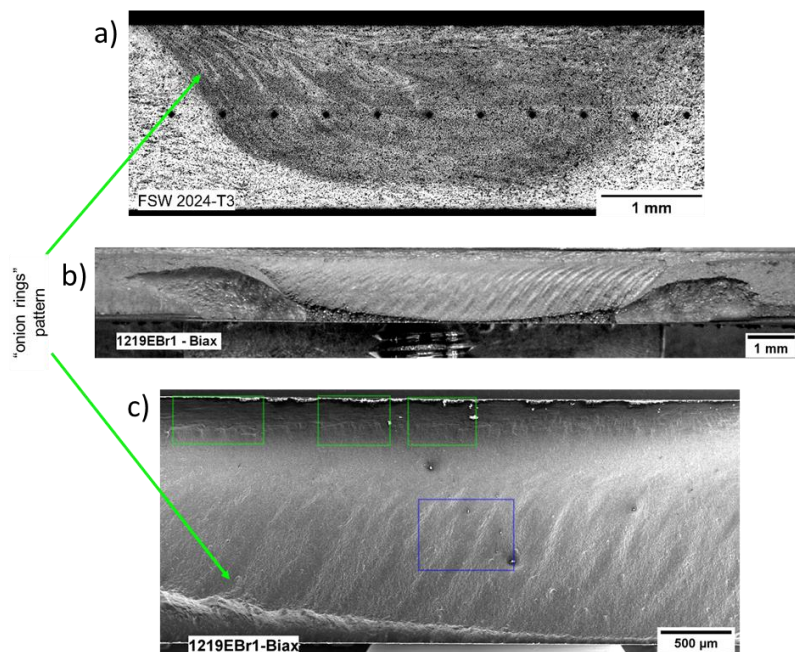


Abbildung 2-14: Rissinitiierung in der Kreuzprobe; a) Querschliff der FSW 2024-T3 mit LOP mit Zwiebelring Muster, b) Halbelliptischer Ermüdungsrisss und c) Rissinitiierung (grüne Rechtecke)

Nach den Rissinitiierungen im LOP (Abbildung 2-15 a) und der weiteren Ausbreitung erfolgte schließlich der Bruch durch die „Trennung“ der Zwiebelringe; deutlich ist das Zwiebelringmuster auf der Bruchfläche zu sehen (b).

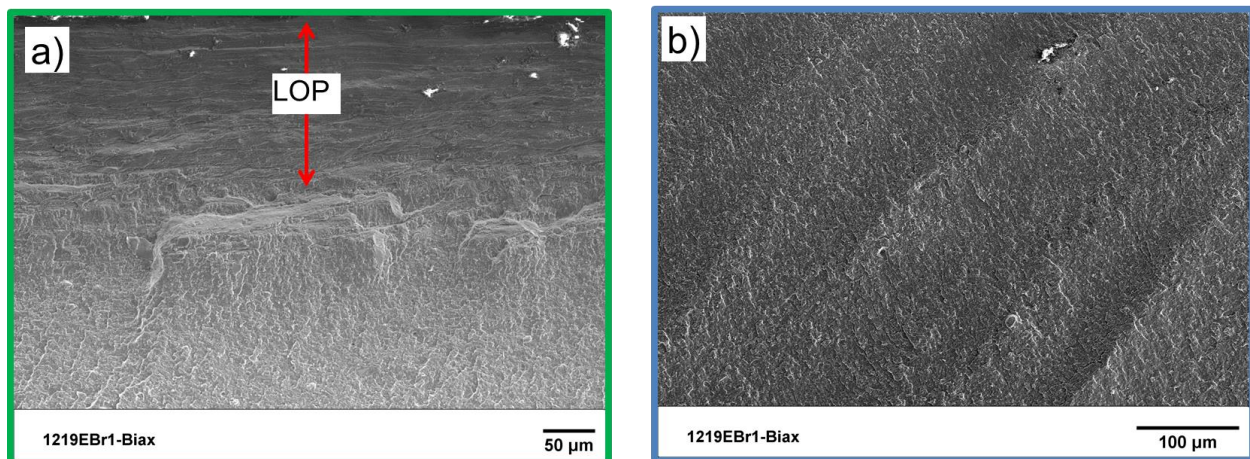


Abbildung 2-15: Details von der Bruchfläche der Biax-Probe: a) Rissinitiierung, b) Onion ring Pattern

2.1.1.2. Ermüdungsverhalten von FSW-Stumpfstößen aus AA2024-T3 mit „Lack of Penetration“ (LOP) unter multiaxialer Belastung

2.1.1.2.1. Optimierung der Schweißparameter

Im Allgemeinen sind für die Optimierung der FSW-Parameter eine hohe Festigkeit der Schweißnähte, fehlerfreie Schweißverbindungen, sowie eine hohe Oberflächenqualität ausschlaggebend. Basierend auf den im Rahmen von MetLife gewonnenen Erkenntnissen für FSW-Stumpfstöße aus AA2024-T3 mit einer Blechdicke von 1,6 mm konnten die zugehörigen Parameter (Vorschub und Drehzahl) auch für die hier genutzten 2,0 mm Bleche abgegrenzt und optimiert werden. Es wurde eine 0,5 mm dicke Ti6Al4V Folie verwendet, um glatte Oberflächen an der Unterseite der geschweißten Aluminiumbleche zu erzeugen. Die FSW-Verbindungen wurden unter Position-Control ausgeführt. Dies bedeutet, dass die Position des Schweißwerkzeugs in Bezug auf die Schweißunterlage konstant blieb.

Da das Ziel in diesem Arbeitspaket darin bestand, die Schädigungsmechanismen bei zyklischer multiaxialer Belastung von reibrührgeschweißten Verbindungen mit „Lack of Penetration“ (LOP) zu bestimmen, wurde daher eine Schweißparameteroptimierung zur Erzeugung eines ca. 0,2 mm langen LOP-Fehlers in der FSW Stumpfverbindung durchgeführt, wobei die Länge des Schweißpins geändert wurde. Tabelle 2-4 fasst die Schweißparameter zusammen.

Tabelle 2-4 FSW Parameter für AA2024-T3 mit 2,0 mm Dicke

Schweißung	Drehzahl (U/min)	Vorschub (mm/min)	Pin-Länge (mm)	Normal Schweißkraft, Fz (kN)	Biegetest
1332	1200	400	1,6	-----	WN-LOP
1333			1,8	9,7	Bestanden
1334	1000		1,7	9,6	WN-LOP
1335				9,2	
1336				9	
1337	800			7,5	

2.1.1.2.2. Biegeversuch

Die Existenz des LOP im Wurzelbereich der Schweißnähte wurde durch Biegeversuche getestet. Hierbei wurden Streifen mit einer Breite von 10 mm quer zu Naht entnommen und um eine Matrize mit ~35 mm Radius gebogen. Die Unterseite der Naht wurde auf die Außenseite gelegt, d.h. diese liegt im Bereich der maximalen Zugspannungen bzw. Zugdehnungen. Die Biegeversuche enthüllen die Existenz sowohl von LOPs als auch von weiteren kritischen Schweißfehlern in unterem Bereich der Schweißnaht (Tunnel, Remanenzoxid-Linien) durch ein direktes Versagen der Biegeprobe. Alle

getesteten Proben zeigten keinerlei Fehler innerhalb der Rührzone. Dennoch erzeugte eine Pinlänge von 1,6 mm bzw. 1,7 mm einen LOP, der während der Biegetests in offenen Stellen im Wurzelbereich resultierten. Die mit einem 1,8 mm langen Pin hergestellte Schweißnaht zeigte hierbei keinerlei LOP; die Biegeproben wurden jeweils bis zu 135° gebogen, ohne dass offene Stellen im Wurzelbereich entstanden.

Abbildung 2-16 zeigt die Querschnitte der Biegeproben der in Tabelle 2-4 gelisteten Schweißparameter. Die Länge des offenen Schweißfehlers im Wurzelbereich nahm mit zunehmender Pinlänge ab. Bei einer Pinlänge von 1,6 mm war die offene Stelle etwa 0,5 mm lang (Abbildung 2-16a), was deutlich länger als für diesen Versuch erforderlich ist. Daher wurde bei der Probe 1334.1 der Pin auf 1,7 mm verlängert, was zu einem 0,35 mm langen Schweißfehler führte. Eine weitere Reduzierung des LOP war möglich, indem die Drehzahl von 1200 U/min auf 1000 U/min bzw. 800 U/min reduziert wurde, während der Vorschub konstant bei 400 mm/min und die Pinlänge bei 1,7 mm gehalten wurde. Infolgedessen wurde die Fehlerlänge auf 0,25 mm weiter gekürzt. Beim Biegetest der BL1336.2-Probe kam es zu einer Bifurkation des Schweißfehlers, so dass die Schweißparameter ($\omega = 800$ U/min, $v = 400$ mm/min) für die nachfolgenden Untersuchungen ungeeignet waren.

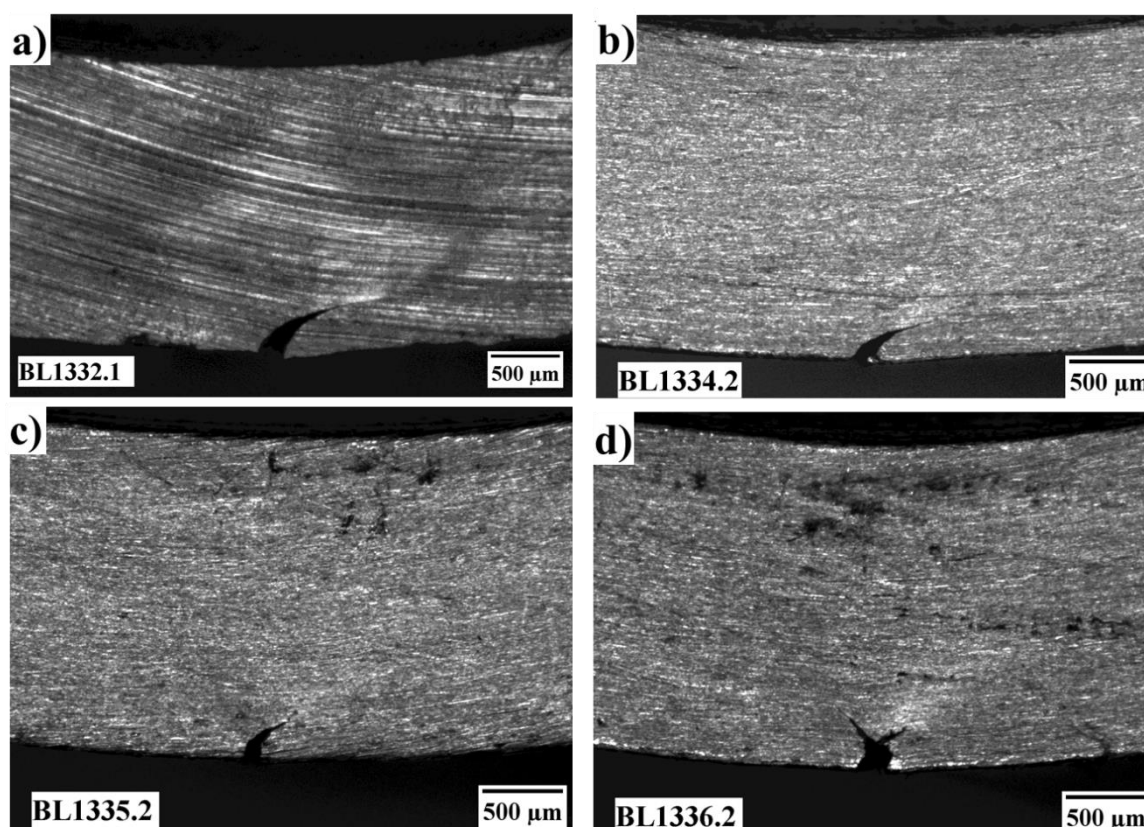


Abbildung 2-16: Biegetest: Einfluss der Schweißparameter auf die Größe des Schweißfehlers im Wurzelbereich

Die Drehzahl des Werkzeugs scheint mit der Verkürzung des LOP nicht zu korrelieren. Es ist zwar bekannt, dass je niedriger die Drehzahl, desto weniger Material plastifiziert wird, und daher zu erwarten wäre, dass der Defekt wächst; in diesem Fall führte die Verringerung der Geschwindigkeit jedoch zu einer Abnahme der Anpresskraft (F_z), was eine geringere Durchbiegung in der Z-Achse des Schweißkopfes bedeutet und ein größeres Eindringen des Schweißwerkzeugs ermöglicht.

2.1.1.2.3. Mikrostrukturelle Charakterisierung

Die Querschliffe der mit einem 1,7 mm langen Pin geschweißten AA2024-T3 Proben (Abbildung 2-17) zeigen runde Schweißnähte. Alle drei Verbindungen besitzen die für FSW-Nähte charakteristischen Ausprägungen in Form der sogenannten „Zwiebelringe“ (Onion Rings). Die Zwiebelringe bestehen aus fein rekristallisierten Körnern. In der thermo-mechanisch beeinflussten Zone (TMAZ) auf beiden Seiten der Naht wurden die Körner teilweise rekristallisiert und um bis zu 90° verdreht. Die Unterseite der Schweißnaht verläuft flach. Mit Ausnahme der Probe 1334 (Abbildung 2-17a) sind die ursprünglichen Kanten der Grundplatten auf den Makrobildern in Abbildung 2-17b und c nicht zu erkennen. Darüber hinaus befindet sich unterhalb der Naht ein Bereich mit größeren Körnern, was darauf hindeutet, dass das Gefüge in dieser Region nicht durch den Pin vollständig verformt wurde.

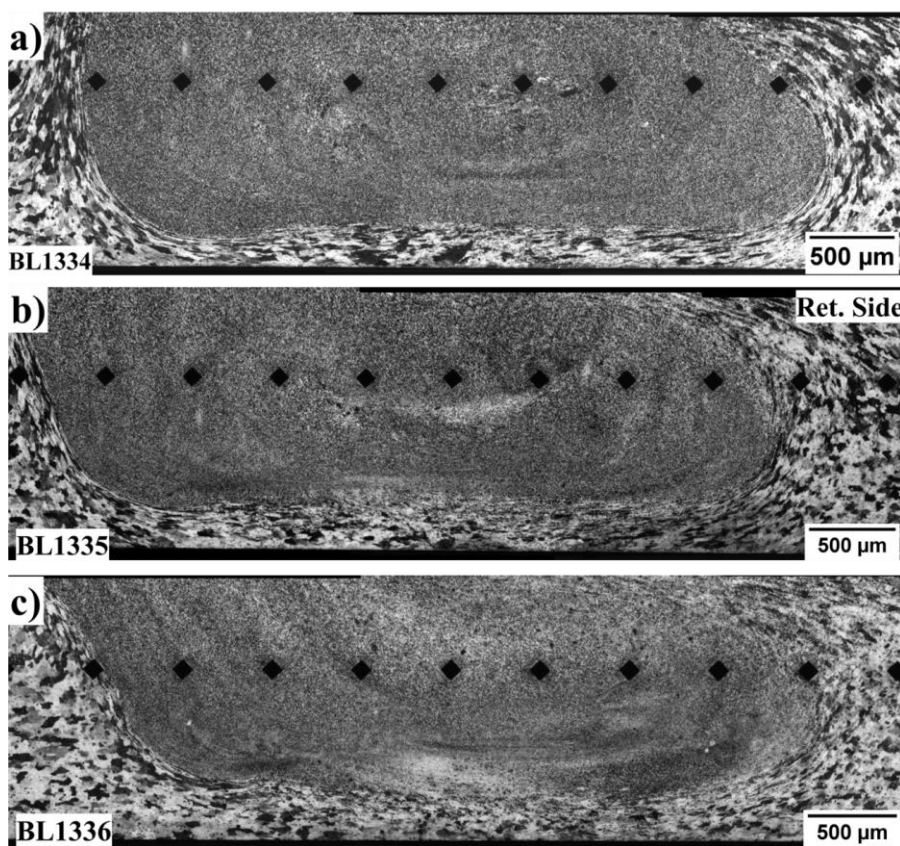


Abbildung 2-17: Einfluss der Drehzahl auf die Geometrie von LOP-behafteten AA2024-T3 FSW-Nähten: a) 1200 U/min, b) 1000 U/min und c) 800 U/min

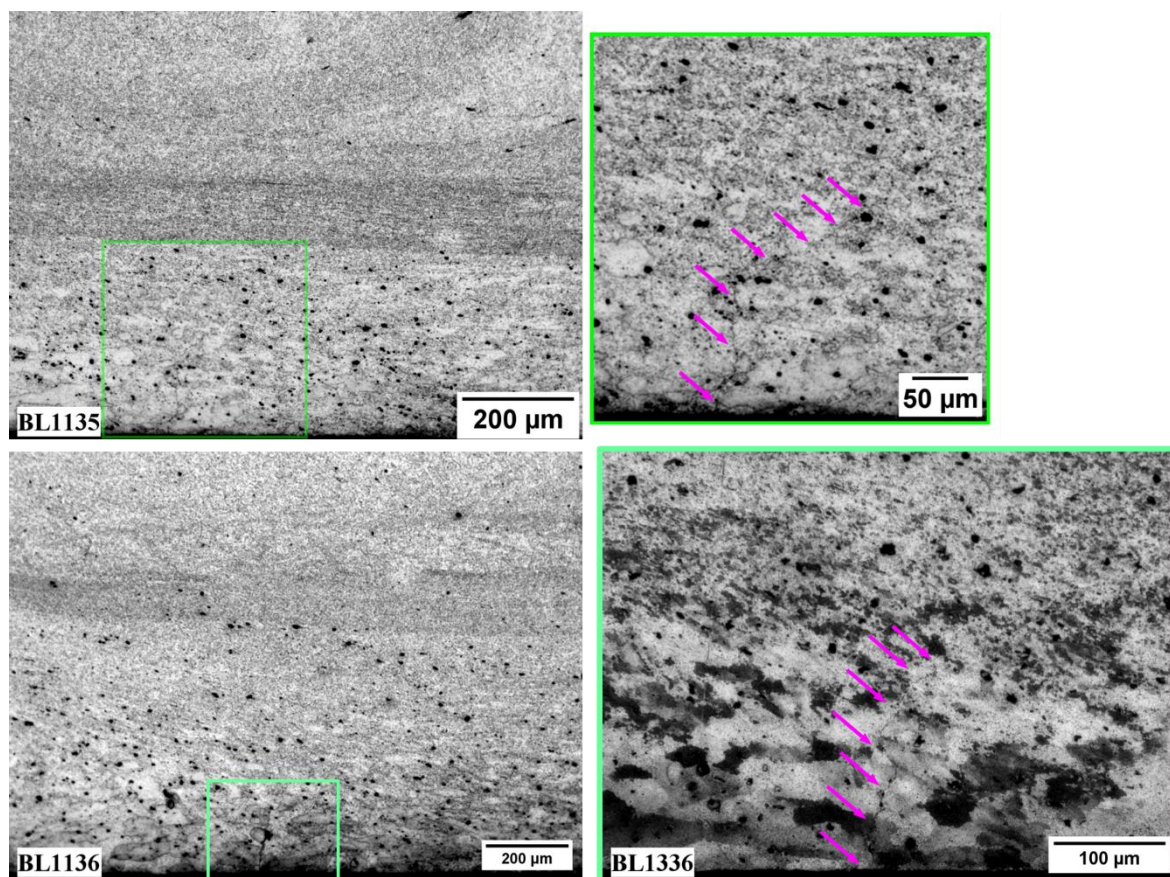


Abbildung 2-18: Verlauf des LOP bei den Schweißungen BL1335 und BL1336

2.1.1.2.4. Härtemessung

Als weiteres Optimierungskriterium für die Herstellung der fehlerhaften Schweißnähte wurde die Veränderung der mechanischen Eigenschaften der Legierung AA2024-T3 durch den FSW-Prozess gewählt. Zu diesem Zweck wurden im Querschnitt der geschweißten Bleche Vickers-Härteprofile erstellt. Die Eindrücke wurden in der Mitte der Dicke und in einem Abstand von 0,5 mm ausgeführt.

Abbildung 2-19 zeigt den Einfluss der Pin-Länge auf die Härte-Profile der FSW-Stumpfstöße. Alle Verbindungen weisen den typischen Härteverlauf von kaltausgelagerten reibrührgeschweißten Aluminiumlegierungen auf. Alle drei Pinlängen erzeugten sehr ähnliche Veränderungen der Härte. Die Schweißnaht in der Mitte des Profils (zwischen -2,5 mm und 0,5 mm) wies höhere Härten als das Grundmaterial auf, die zwischen 140 HV1 bis 147 HV1 lagen. Die höchsten Härtewerte in der Schweißnaht wurden bei einer Entfernung von -2,5 mm von der Mitte gemessen. Diese deuten auf einen relativ warm-thermischen Schweißzyklus hin, bei dem eine ausreichend hohe „Peak“-Temperatur und eine relativ langsame Wärmeabfuhr (bedingt durch die Ti6Al4V Schweißunterlage) erreicht werden können, um die Ausscheidung von härtenden S'-Partikeln zu ermöglichen.

In der Wärme Einfluss Zone (WEZ) zwischen -6 mm und -2,5 mm bzw. 0,5 und 5,5 erfolgte eine Enthärtung der FSW-geschweißten Legierung AA2024-T3. Die Entfestigung in diesen Bereichen wird mit Überalterungsprozessen in Verbindung gebracht, die durch Vergrößerung der S(S') entsteht. In größerer Entfernung von diesen entfestigten Zonen kam es zu einer Härtesteigerung, wobei Höchstwerte von ca. 140 HV1 bei -7,5 mm bzw. 7,5 mm erreicht wurden. Ein zweiter Härteabfall trat in einem Abstand $\pm 9 - \pm 10,5$ mm von der Mitte der Schweißnaht auf. Hierbei ist eine Rückbildung von GPB-Zonen für die zweite Entfestigung der Verbindung verantwortlich.

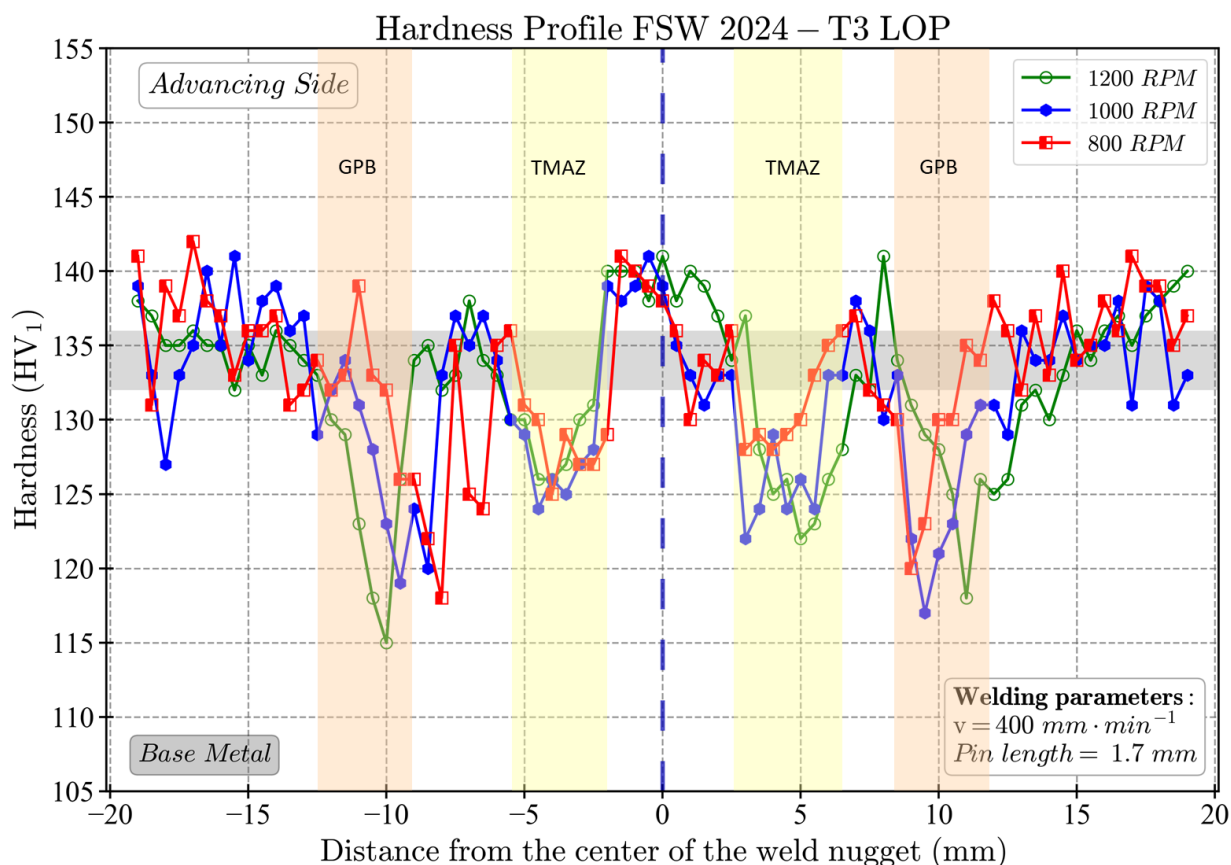


Abbildung 2-19: Auswirkung der Pin-Länge auf das Härteprofil von FSW-Nähten AA2024-T3 in 2 mm Dicke

Um die mechanischen Eigenschaften der geschweißten Verbindung zu verbessern, wurde der Wärmeeintrag reduziert, indem die Drehzahl des Schweißwerkzeugs von 1200 U/min auf 1000 U/min bzw. 800 U/min gesenkt wurde, wobei die Länge des Stifts bei 1,7 mm konstant blieb. Abbildung 2-20 stellt die Auswirkung der sinkenden Drehzahl auf das Härteprofil von FSW-Nähten in AA2024-T3 dar. Alle drei Proben wiesen ähnliche Härteprofile auf. Wie bei den Schweißnähten, die mit unterschiedlichen Pin-Längen hergestellt wurden, führte die Verringerung der Drehzahl zu ähnlichen Härteprofilen, die dieselben Zonen wie in Abbildung 2-19 erkennen lassen. Jedoch wurde bei der Verringerung der Drehzahl festgestellt, dass die Härte der Schweißnaht bei 140 HV1 relativ homogen blieb. Die Position der entfestigten Zonen (ZAT und Rückbildung der GPB-Zonen) lag näher an der Mitte der Schweißnaht, wobei die gleichen Härtewerte wie in Abbildung 2-19 erreicht wurden.

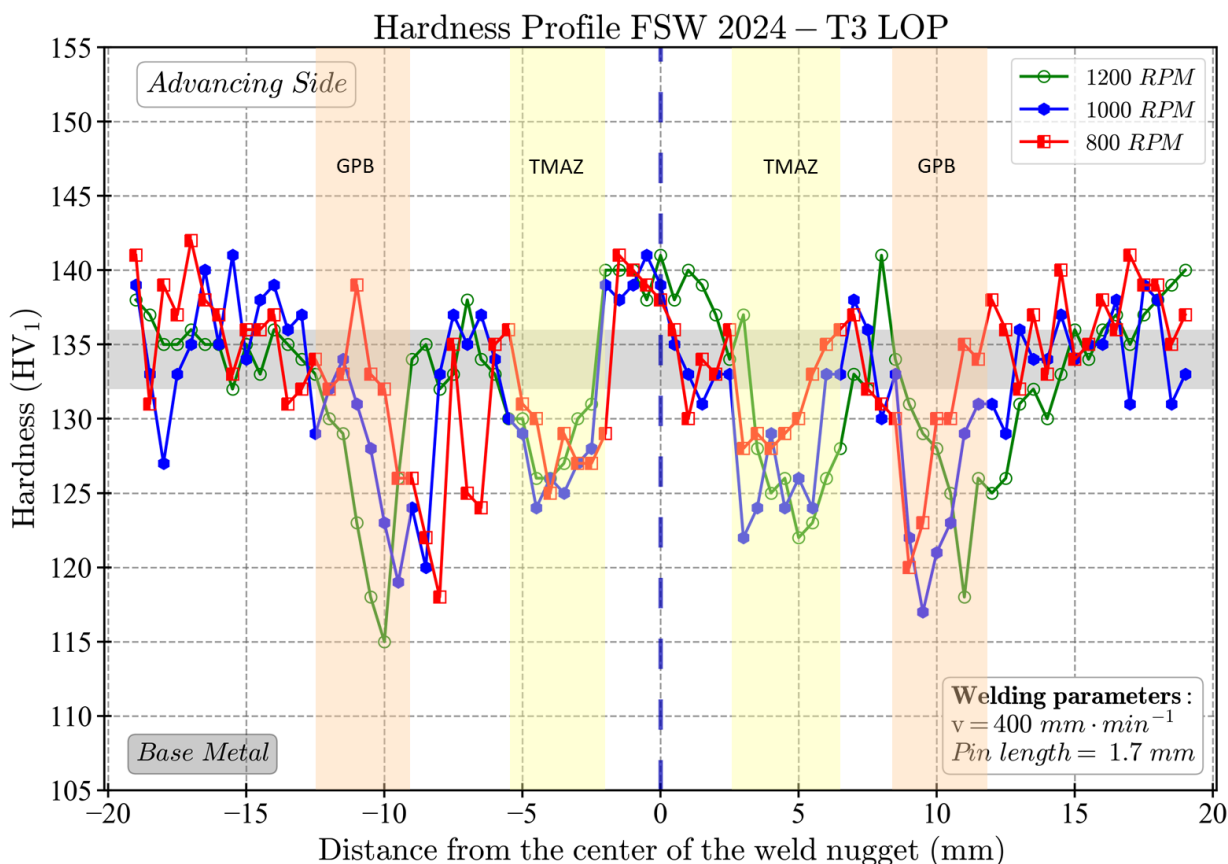


Abbildung 2-20: Einfluss der Drehzahl auf das Härteprofil von FSW-Nähten in 2024-T3

Nach den Ergebnissen der Mikrostrukturanalyse und Härtemessungen konnten die Schweißparameter 1000 U/min, 400 mm/min und 1,7 mm Pin-Länge als optimal eingestuft werden, um Schweißungen mit einem LOP von 0,2 mm herzustellen. Für die fehlerfreie Verbindung wurde die Pin-Länge auf 1,8 mm erhöht, während alle anderen Parameter konstant gehalten wurden. Mit den optimierten Schweißparameter wurden geschweißte Bleche mit und ohne Schweißfehler hergestellt, um Proben für weitere Prüfungen zu produzieren.

2.1.1.3. Ermüdungsverhalten von FSW-Stumpfstößen aus AA2024-T3

Um den Einfluss von multiaxialer Belastung auf das Ermüdungsverhalten von 2 mm dicken FSW-Schweißverbindungen mit LOP zu untersuchen, wurde die Orientierung der Schweißnähte um 0°, 22,5° und 45° in Bezug auf die x-Achse rotiert, wie in Abbildung 2-21 gezeigt. Im Folgenden werden die Ermüdungsproben daher nach der Rotation der Naht bezeichnet: FSW-0°, FSW-22,5° und FSW-45° sowie LOP-0°, LOP-22,5° und LOP-45°. Abbildung 2-21 zeigt die Orientierung der Schweißnaht.

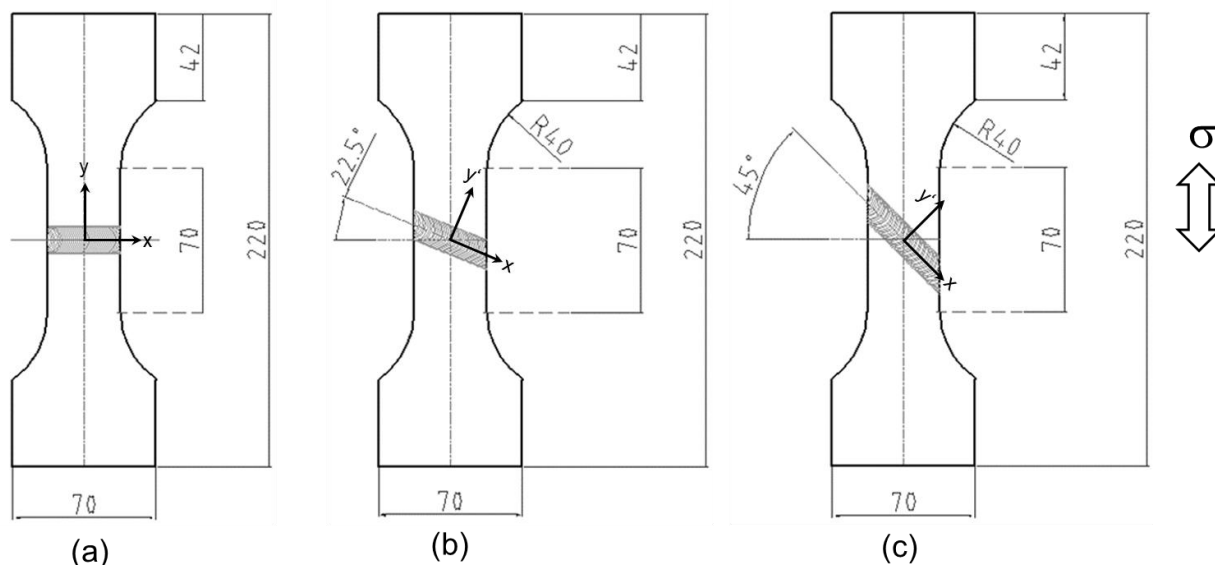


Abbildung 2-21: Orientierung der Schweißnähte sowohl mit LOP als auch fehlerfrei, FSW 2024-T3; Dicke = 2 mm, (a) 0°; (b) 22,5° und (c) 45°

Anhand des Mohrschen Spannungskreises in Abbildung 2-22 lassen sich die auf die Schweißnaht wirkenden Spannungen veranschaulichen. Die Hauptspannung beträgt jeweils $\sigma_1 = 130 \text{ MPa}$. Da die Proben einseitig belastet werden, wird die Hauptspannung als Vergleichsspannung σ_{eqv} betrachtet. Offensichtlich wird die nicht gedrehte Schweißnaht (FSW-0° und LOP-0°) unter maximaler Normalspannung ermüdet, die der Hauptspannung σ_1 (σ_{eqv}) entspricht. Bei der 22,5° geneigten FSW-Verbindung nimmt die Normalspannung ($\sigma_{yy'}$) ab und gleichzeitig steigt die Spannung parallel zum LOP ($\sigma_{xx'}$), sowie die Scherspannung ($\tau_{xy'}$). Die maximalen Schubspannungen werden bei 45° erreicht. Es wird grundsätzlich erwartet, dass die unterschiedlichen Spannungszustände verschiedene Versagensmechanismen verursachen.

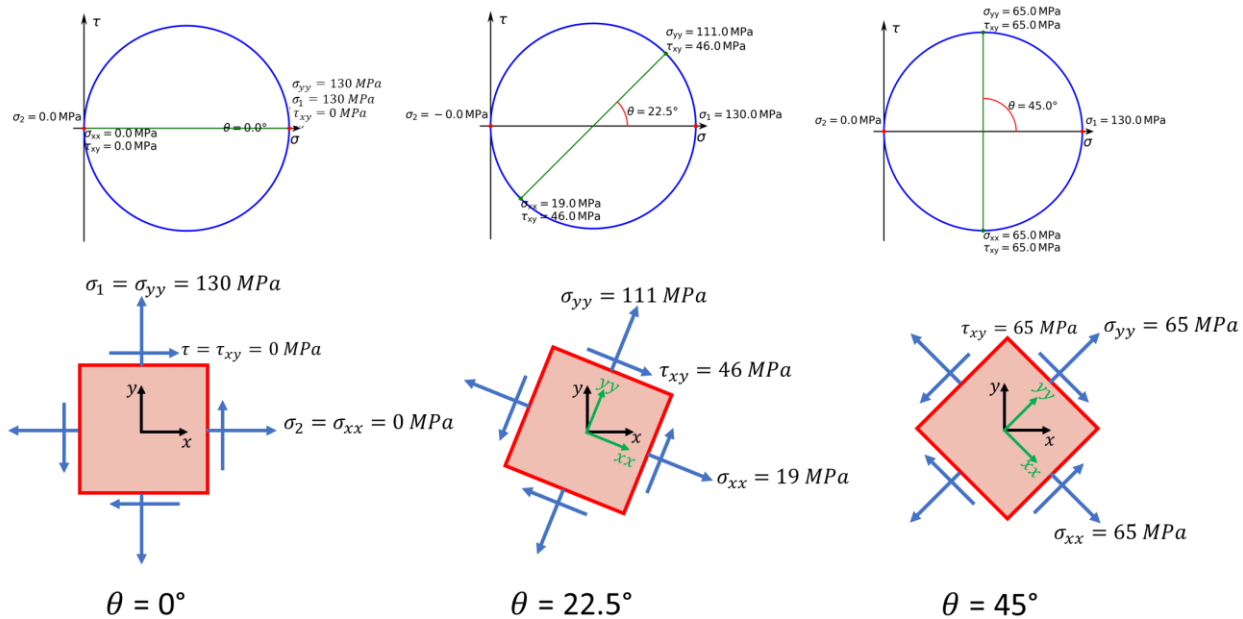


Abbildung 2-22: Mohrsche Spannungskreise zu den Spannungszuständen der Schweißnahtorientierungen

Da durch das FSW-Verfahren entstandene Rauigkeiten wie Grate und Werkzeugspuren auf der Oberseite der Schweißnaht ungewollte Spannungskonzentrationen verursachen könnten, wurden diese durch Schleifen mit SiC-Schleifpapier entfernt und sorgfältig poliert, um eine spiegelglatte Oberfläche zu erhalten. Die Kanten der Proben wurden ebenfalls gebrochen. Die Oberfläche der Wurzelseite der Proben wurde nur leicht mit 2500er Schleifpapier geschliffen, um die größten Querkratzer zu entfernen, ohne die Länge des LOP zu beeinträchtigen.

Die Ermüdungsversuche wurden auf einer servo-hydraulischen Prüfmaschine mit einer Maximalkraft von 20 kN bei Raumtemperatur in Laborluft durchgeführt. Die FSW-Proben wurden zyklisch mit einer sinusförmigen Last-Zeit-Funktion mit einem Spannungsverhältnis $R (=s_{\min}/s_{\max})$ von 0,1 belastet. Die Frequenz der zyklischen Belastung betrug 20 Hz. Das Ermüdungsverhalten der geschweißten Proben wurde als S-N-Kurven dargestellt, wobei die maximale Spannung σ (MPa) gegen die entsprechende Lebensdauer bis zum Versagen (d. h. die Anzahl der Belastungszyklen, N) aufgetragen wurde. Die Ermüdungsgrenze wurde auf einen Wert von 1×10^6 Belastungszyklen festgelegt.

Die Entstehung und Entwicklung von Ermüdungsrissen wurde mit Hilfe von digitaler Bildkorrelation aufgezeichnet (DIC). Zu diesem Zweck wurde die Probe nach definierten Belastungsintervallen bei der niedrigsten und höchsten Last gehalten, um die Bilder für die DIC aufzunehmen. Dieser Vorgang wurde so lange wiederholt, bis die Probe versagte oder die Ermüdungsgrenze erreicht wurde. Um die DIC-Messung durchzuführen, wurden die Oberflächen der Ermüdungsprobe mit einem geeigneten stochastischen schwarz/weiß Muster vorbereitet. Die Bilder für die DIC-Analysen wurden mit 12 Megapixel Basler acA4024-8gm Basler® Kameras und Canon EFS 18-55mm

Objektiven aufgenommen. Die Kameras wurden an beiden Seiten der Ermüdungsprobe positioniert, wie in Abbildung 2-23 gezeigt.

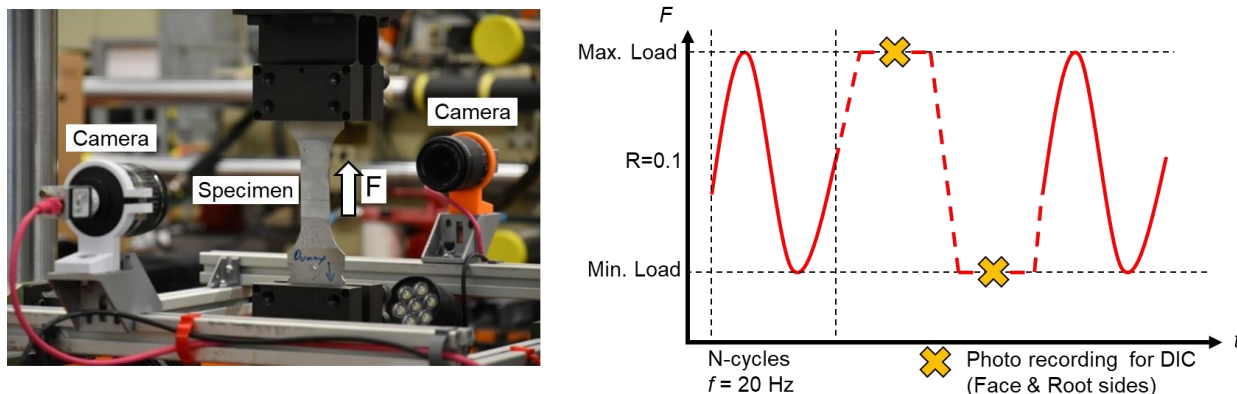


Abbildung 2-23: Versuchsaufbau des Ermüdungstests

In Abbildung 2-24 ist die Ermüdungslebensdauer der FSW 2024-T3 Verbindungen mit und ohne LOP in Abhängigkeit von der maximalen Hauptspannung zusammengefasst. Die fehlerfreien und defekten Schweißnähte weisen unterschiedliche Ermüdungsverhalten auf. Die fehlerfreien FSW-Nähte verfügen im Allgemeinen über eine höhere Ermüdungsfestigkeit. Dabei ist der Einfluss der Nahtorientierung auf das Ermüdungsverhalten nicht deutlich. Die Kurven aller fehlerfreien Schweißnähte liegen relativ dicht beieinander im gleichen Streubereich. Im Vergleich dazu liegen die Kurven der LOP-behafteten Schweißnähte weiter auseinander. Die LOP-45° Proben besitzen die größte Ermüdungsfestigkeit, gefolgt von den LOP-22,5° Proben, während die LOP-0°-Verbindungen hier die niedrigste Ermüdungsfestigkeit aufweisen.

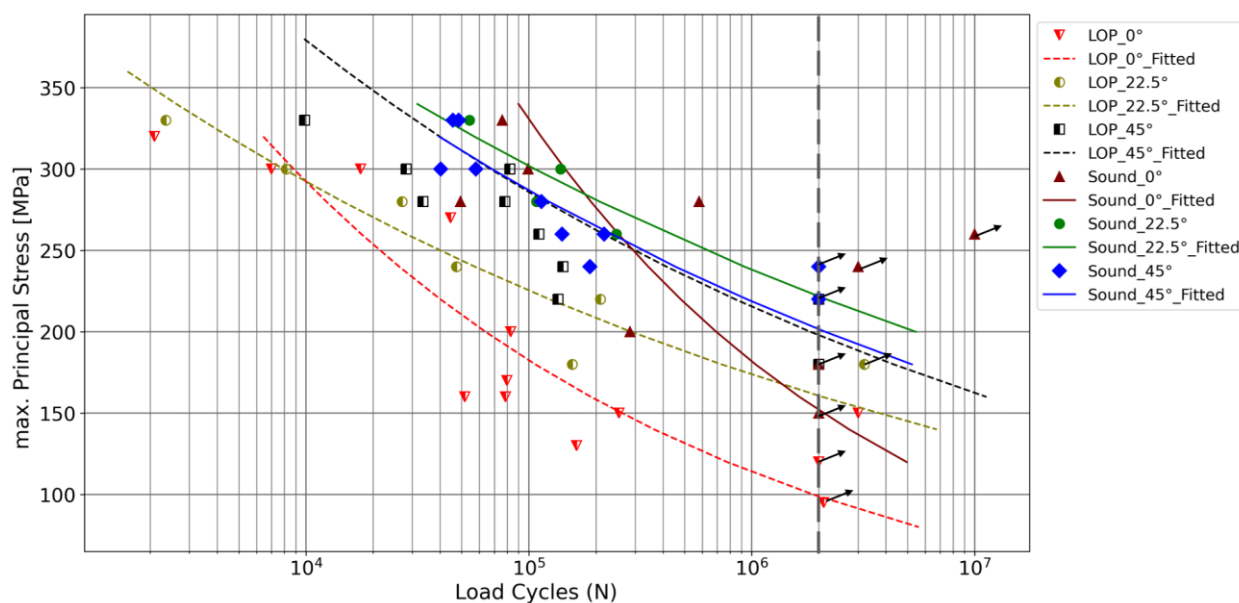


Abbildung 2-24: Ermüdungslebensdauer von fehlerfreien und LOP-behafteten FSW-Verbindungen aus AA2024-T3 in 2mm Dicke

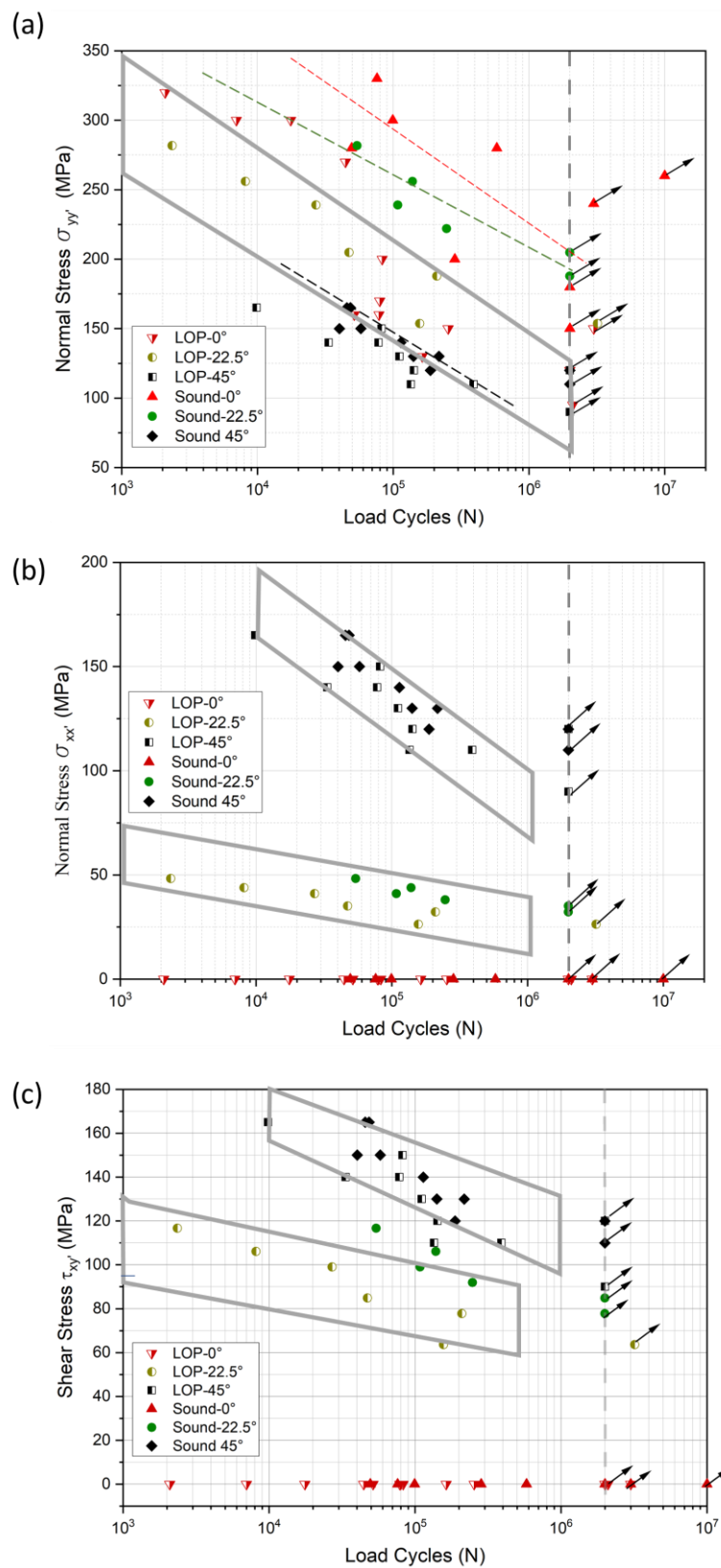


Abbildung 2-25: Ermüdungslebensdauer von fehlerfreien und LOP-behafteten FSW 2024-T3 Verbindungen im Verhältnis zu den Normalspannungen (a) σ_{yy} , (b) σ_{xx} sowie der (c) Schubspannung τ_{xy}

Abbildung 2-25 zeigt die Ermüdungslebensdauer der fehlerfreien und defektbehafteten FSW-Verbindungen als Funktion der Spannungskomponenten. Bei Betrachtung des Effekts der Normalspannung σ_{yy}' (Abbildung 2-25a) wird deutlich, dass bei den nicht gedrehten Schweißnähten (0°) und den $22,5^\circ$ geneigten Schweißnähten die Proben ohne Fehler eine höhere Ermüdungsfestigkeit aufweisen als die Proben mit LOP, besonders im Kurzlebensdauerbereich. Im Gegensatz dazu weisen 45° -Schweißnähte eine ähnliche Ermüdungsfestigkeit auf. Alle 45° -Proben liegen im gleichen Streuband.

In Abbildung 2-25b sind die Ermüdungslebensdauern der FSW 2024-T3 Verbindungen in allen 3 Nahtorientierungen in Abhängigkeit von der Normalspannung σ_{xx}' dargestellt. Es wurde kein Einfluss auf die Lebensdauer der 45° orientierten Verbindungen (fehlerfrei und LOP) festgestellt. Das heißt, alle Proben mit gleicher Nahtorientierung mit und ohne LoP liegen jeweils in einem identischen Streuband.

Im Gegensatz zum Effekt der Normalspannung σ_{xx}' auf die Ermüdungsfestigkeit der geneigten FSW-Verbindungen, verursachte die Scherspannung keine großen Unterschiede. Sowohl die fehlerfreien und LOP-behafteten 45° orientierten FSW-Verbindungen, als auch die fehlerfreie $22,5^\circ$ -Schweißnaht zeigen im $\tau_{xy} - N$ Diagramm sehr ähnliche Ermüdungsfestigkeiten.

DIC-Ergebnisse: Fehlerfreie FSW 2024-T3 Verbindungen

Die DIC-Daten in Abbildung 2-26 zeigt die Ermüdungsrissentstehung kurz vor dem Versagen bei fehlerfreien Schweißnähten in allen Nahtorientierungen. In allen Proben entstand der Ermüdungsriss in Spannungskonzentrationen der Wärmeeinflusszone. Diese korrespondieren mit den Härte minima in den Härteverläufen der Schweißnähte. Die pinken Linien markieren die Mitte der Schweißnaht.

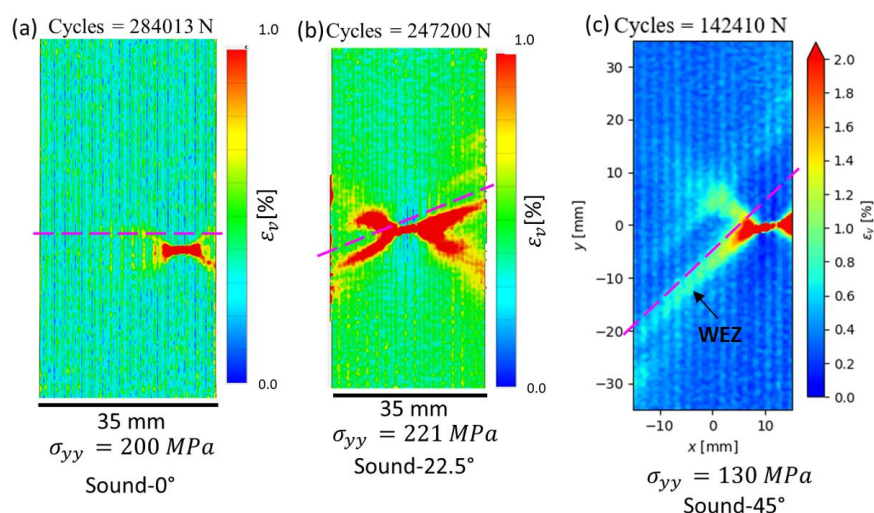


Abbildung 2-26: DIC Bild mit Ermüdungsriss von (a) 0° - (b) 22.5° - und (c) 45° -orientierten fehlerfreien FSW-Naht 2024-T3. Die pinken Linien markieren die Mitte der Schweißnaht

FSW 2024-T3 Verbindungen mit LOP

Die DIC-Daten in Abbildung 2-27 zeigen die von Mises Vergleichsdehnungen der Proben LOP-0°. Die Anzahl der Zyklen am oberen Rand der Bilder zeigt die Ermüdungslebensdauer der Probe kurz vor dem Versagen. Die größte Verformung tritt in der Mitte der Proben auf. Bei der mit $\sigma_{\text{eqv}} = 320$ MPa geprüften Probe ist der LoP die gesamte Breite der Probe ersichtlich, während die Risse bei den übrigen Proben etwas kürzer sind. Bemerkenswert bei der Probe mit $\sigma_{\text{eqv}} = 270$ MPa liegt die plastische Zone, die sich an den Risspitzen bzw. an der Rissfront bildet, nicht an den Enden der hochverformten Zonen, sondern etwa in der Mitte des LoPs. Die mit $\sigma_{\text{eqv}} = 320$ MPa und $\sigma_{\text{eqv}} = 300$ MPa geprüften Proben weisen dagegen lokale Dehnungskonzentrationen auf beiden Seiten der Schweißnahtmitte auf. Diese Zonen entsprechen den im Härteprofil beobachteten entfestigten Regionen von WEZ und Rückbildung der GPB-Zonen.

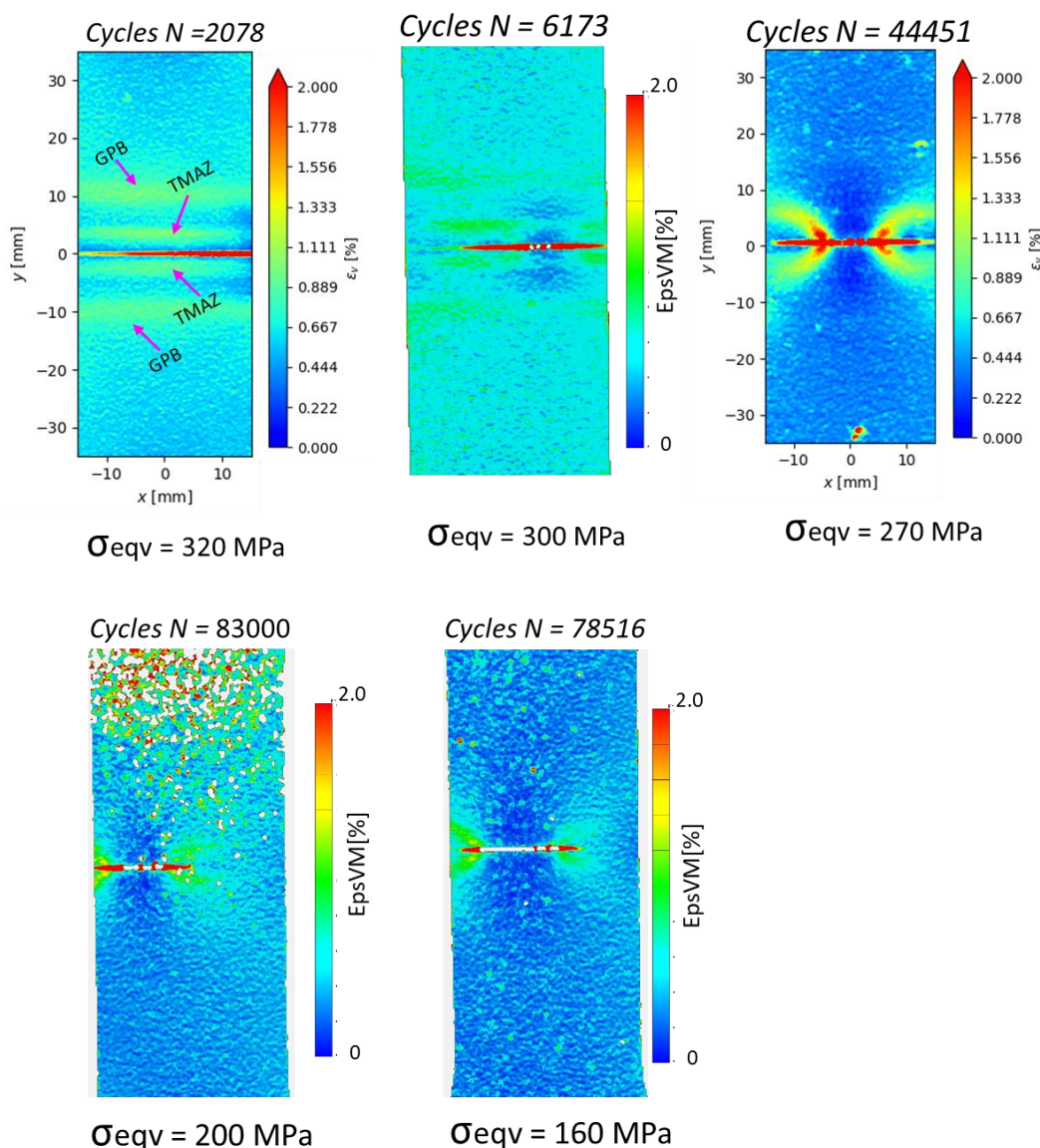


Abbildung 2-27: DIC Bilder von 0°-orientierten FSW-Nähten mit LOP zeigen den Ermüdungsriss kurz vor dem Bruch bei verschiedenen maximalen Hauptspannungen

Bei der mit $\sigma_{\text{eqv}} = 270$ MPa ermüdeten LOP-0° Probe ist die Rissentstehung im LOP deutlich zu sehen und wurde bei $N = 43439$ Schwingspielen festgestellt, gezeigt in Abbildung 2-28a. Es gibt eine Verzögerung bei der Risserkennung zwischen der Oberseite und der LOP-Seite der FSW-Verbindung. Zunächst erkennt man den LOP an drei verschiedenen Stellen auf der Wurzelseite der Schweißnaht (markiert mit den pinken Pfeilen als LOP-1, LOP-2, LOP-3) und erst später bei einer Lebensdauer von $N = 43967$ Zyklen auf der Oberseite (Kreis in Abbildung 2-28b). Es gibt Unterschiede in der Position der plastischen Zonen des Ermüdungsrisses an der Wurzel und der Oberseite der Probe. Auf der Wurzelseite befindet sich die plastische Zone auf beiden Seiten des offenen LOP-2, obwohl die Spannungskonzentration sich über alle drei Abschnitte des offenen LOP erstreckt. Auf der Oberseite konzentriert sich die plastische Zone an einem Punkt auf der gegenüberliegenden Seite des LOP-2.

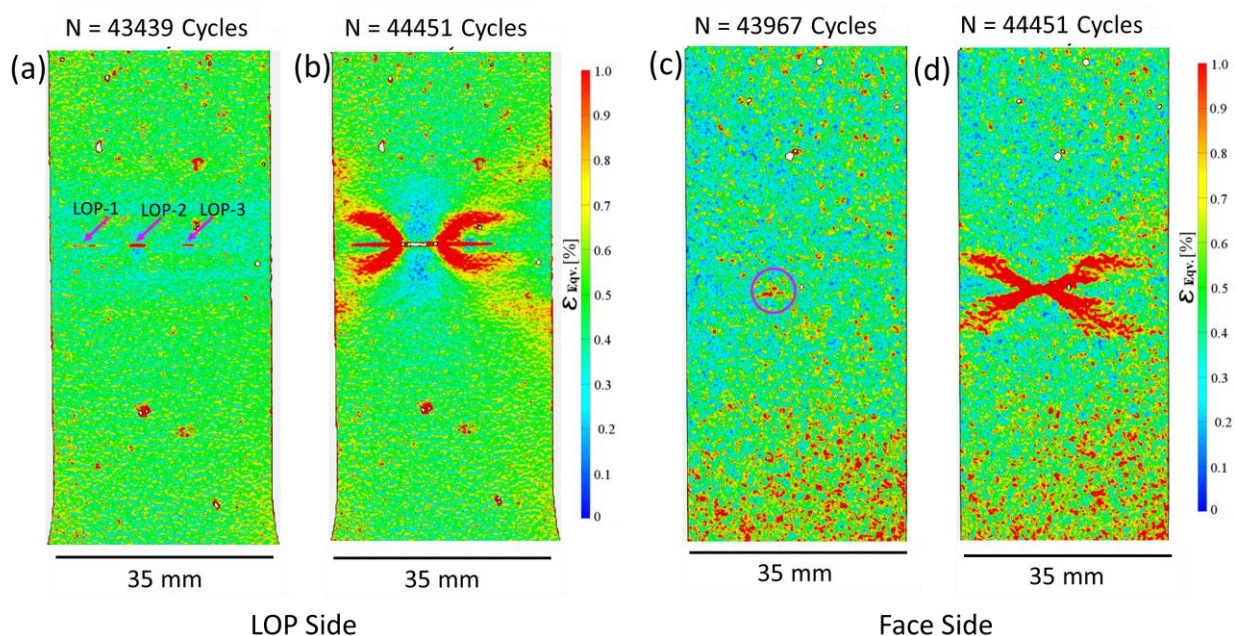


Abbildung 2-28: Rissinitiation (a,c) und Endphase des Risses (b,d) an der Werkzeugseite und Wurzelseite der LOP-0° Probe ermüdet mit $\sigma_{\text{eqv}} = 270$ MPa

Eine Sequenz des Risswachstums in der Probe ist in Abbildung 2-29 dargestellt. Die Bereiche mit hoher Spannungskonzentration LOP 1 bis 3 in der Mitte der Probe blieben vom Zeitpunkt der ersten Detektion ($N = 43439$ Zyklen) bis zu einer Ermüdungslebensdauer von $N = 43593$ Schwingspiele relativ unverändert. Kurz danach bei $N = 43604$ Zyklen sind die ersten Anzeichen des Risswachstums, gekennzeichnet durch das Auftreten von leicht ausgeprägten plastischen Zonen an den Enden von LOP-2, zu erkennen. Mit fortschreitender Ermüdung nahmen die erkennbaren Bereiche der LOPs zu, jedoch entwickelten LOP-1 und LOP-3 keine plastischen Zonen. Andererseits vergrößerte sich die plastische Zone von LOP-2, was bedeutet, dass sich nur in diesem Bereich der Ermüdungsriss entwickelte. Bei $N = 44242$ Zyklen wuchsen LOP-1 und LOP-2 zusammen. Gleichzeitig nahm die Größe der plastischen Zone weiter zu (siehe $N = 44319$). Dieses Phänomen setzte sich bis zu $N = 44374$ Zyklen fort, als sich die drei Teile (LOP1-3) zu einem einzigen Riss verbündeten. Die plastische Zone blieb jedoch praktisch an der gleichen Stelle und vergrößerte sich nur ($N = 44418$ und $N = 44451$), bis die Probe bei $N = 449516$ Schwingspiele brach.

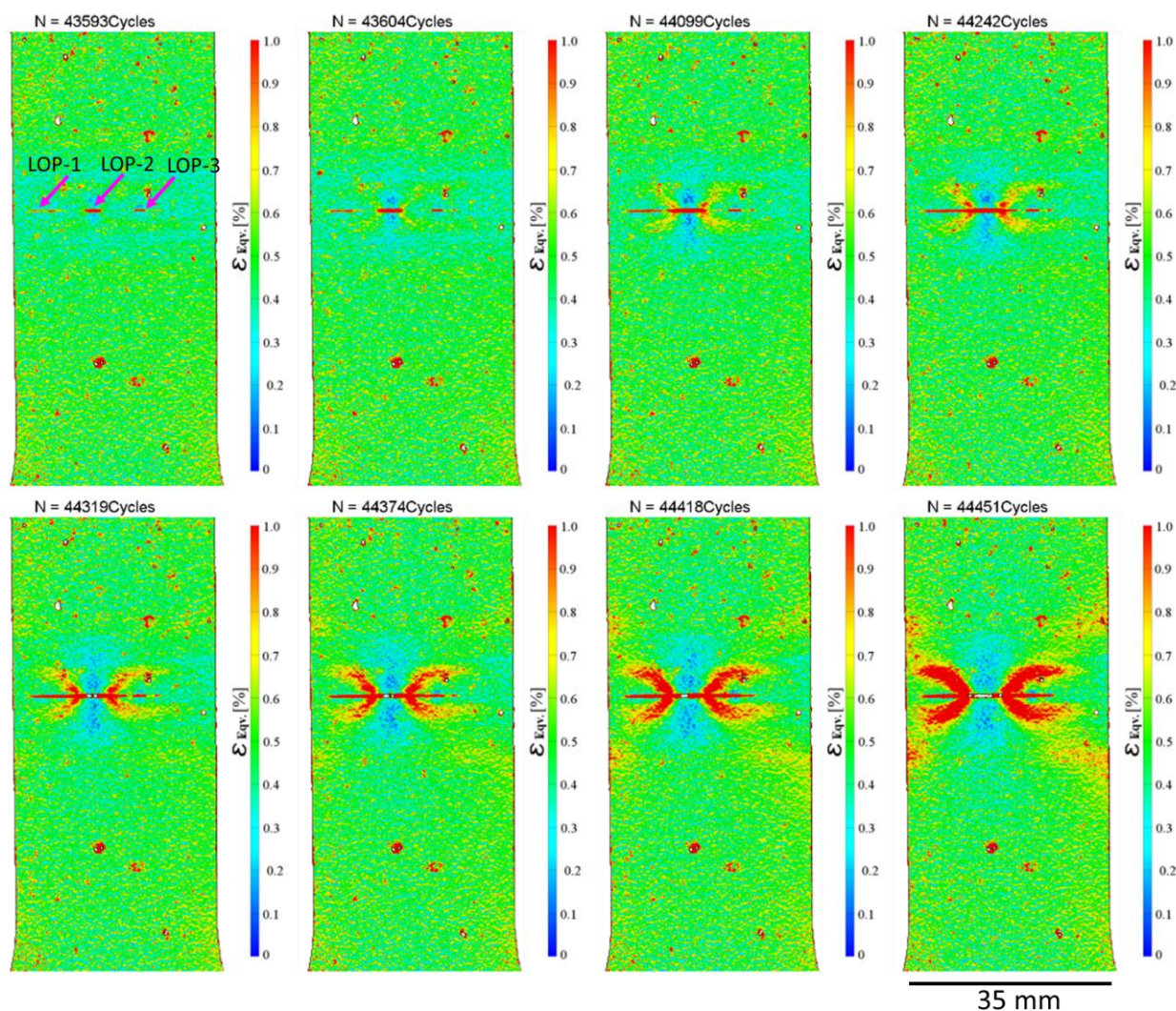


Abbildung 2-29: DIC-Bilder der Entwicklung des Ermüdungsrisses bei der LOP-0° Probe ($\sigma_{\text{eqv}} = 270$ MP)

Abbildung 2-30 zeigt die DIC-Ergebnisse der LOP-22,5° Proben. Die vertikalen Streifen in den DIC-Bildern sind auf den „rolling shutter effect“ der Digitalkamera zurückzuführen. Dennoch ist es möglich, die Rissstelle auf den Proben zu bestimmen. Mit Ausnahme der Proben 205 MPa und 187 MPa, die in der WEZ versagten, zeigen die übrigen Proben den Ermüdungsriss im LOP-Fehler. Hierbei werden zwei Arten von Ermüdungsrissen beobachtet: 1. Risse, die parallel zur Schweißnaht verlaufen (Proben ermüdet mit: $\sigma_{yy'}$ = 281 MPa, 256 MPa, 239 MPa), und 2. Risse, die senkrecht zur Hauptspannungsachse liegen (Proben ermüdet mit: $\sigma_{yy'}$ = 205 MPa, 187 MPa, 154 MPa). Die plastischen Zonen der Risse scheinen auch in dieselbe Richtung wie die Schweißnaht ausgerichtet zu sein. Dies ist besonders deutlich bei den mit $\sigma_{yy'}$ = 256 MPa und $\sigma_{yy'}$ = 239 MPa Normalspannung getesteten Proben. Ähnlich wie bei LOP-0° sind auch hier die entfestigte WEZ und Rückbildung von GPB sichtbar.

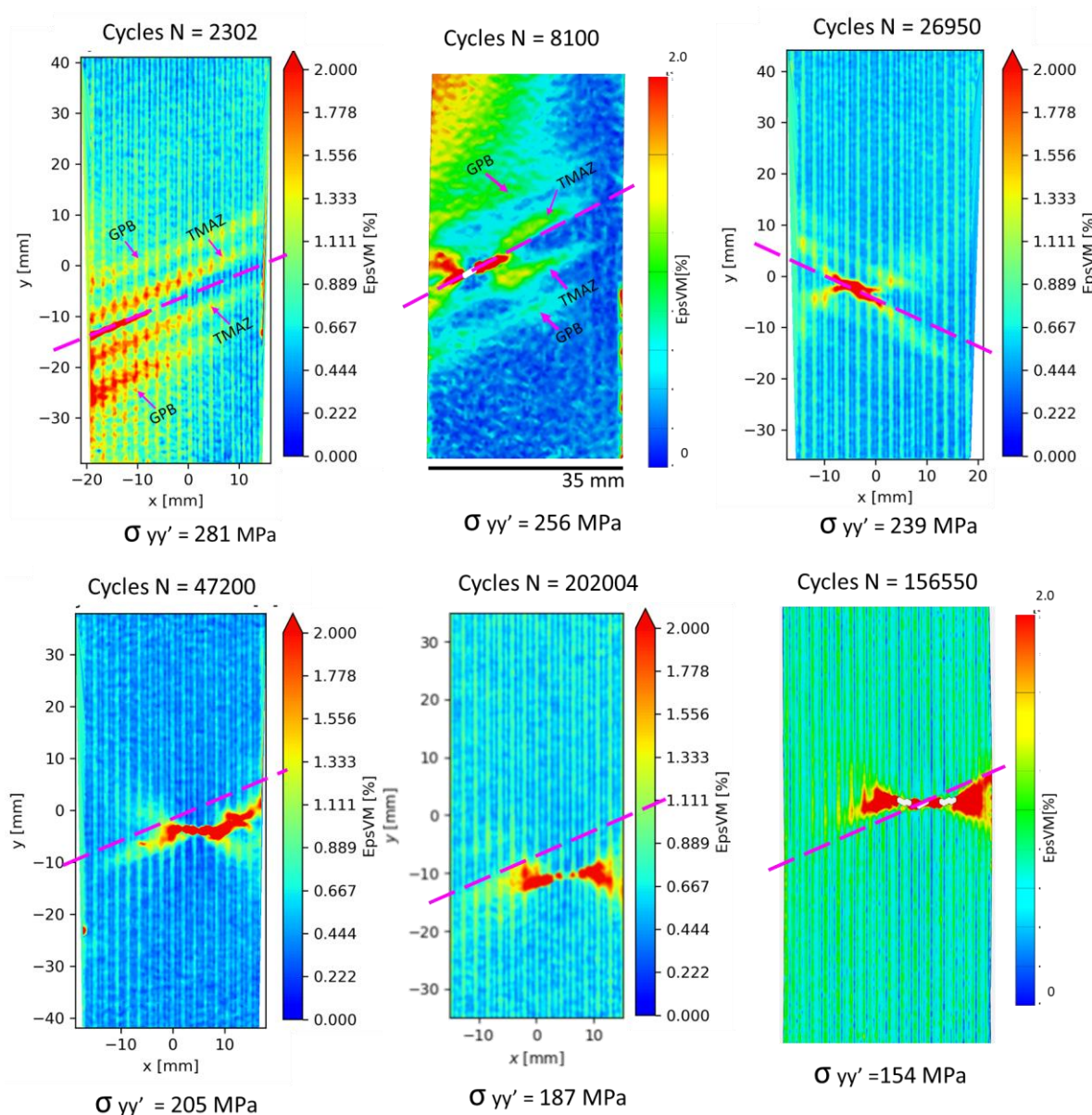


Abbildung 2-30: DIC Bilder von 22,5°-orientierten FSW-Nähten mit LOP zeigen den Ermüdungsriss vor dem Bruch. Die pinkle Linie kennzeichnet die Mitte der Schweißnaht bzw. LOP.

Wie bei den LOP-0°-Verbindungen ist auch bei den um 22,5° geneigten LOP-Schweißnähten eine Verzögerung zwischen der Rissentstehung auf der Wurzelseite und der Rissdetektion auf der gegenüberliegenden Seite, der Oberseite der Schweißnaht, festzustellen. Wie in Abbildung 2-31a gezeigt, initiierte der Ermüdungsriss in der mit $\sigma_{yy}' = 256$ MPa getesteten Probe bei einer Zyklenzahl von $N = 5850$ auf der LOP-Seite und wurde 1050 Schwingspiele später auf der Oberseite der Schweißverbindung detektiert (Abbildung 2-31c). Der Riss entstand in einem einzigen Bereich mit einer hohen Spannungskonzentration, die parallel zum LOP verläuft (Abbildung 2-31b). Die plastische Zone befindet sich an den Rissspitzen. Die Flügel der plastischen Zone sind auf die niedrigeren Festigkeitszonen der Schweißnaht (WEZ und GPB-Rückbildung) beschränkt. Das DIC-Bild auf der Oberseite der Schweißnaht zeigt den schräg verlaufenden Riss (Abbildung 2-31d). Dies deutet darauf hin, dass der Riss in der Ebene senkrecht zur Normalspannung σ_{yy}' gewachsen ist.

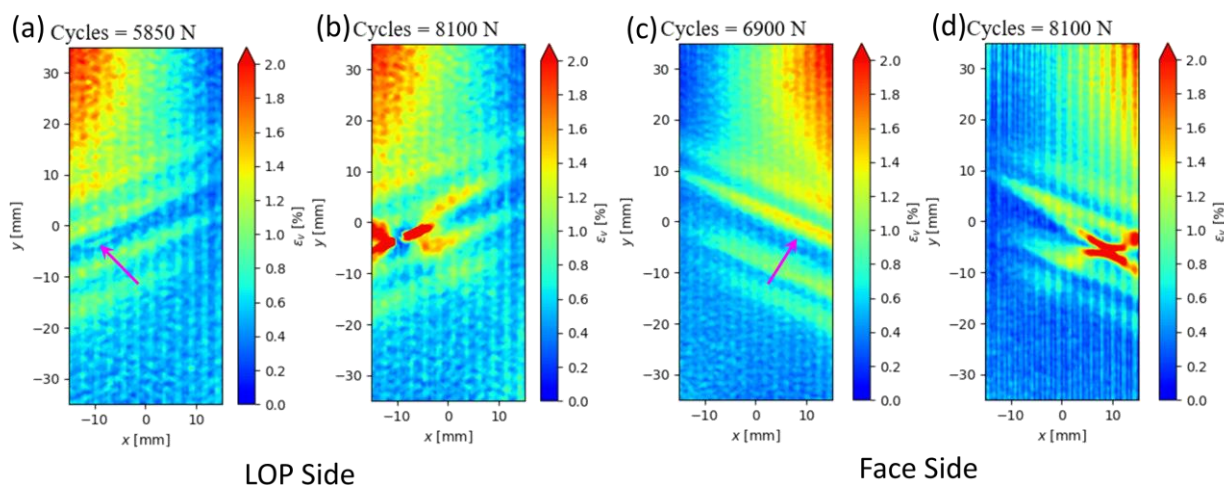


Abbildung 2-31: DIC-Bilder mit Rissinitiation (a,c) und Endphase des Risses (b,d) auf der Wurzelseite und Werkzeugseite der LOP-22,5° Probe ermüdet mit $\sigma_{yy}' = 256$ MPa

Die Rissentwicklung in der Probe LOP-22,5° mit ein Normalspannung von $\sigma_{yy}' = 256$ MPa ist recht kontinuierlich, wie in Abbildung 2-32 gezeigt. Ausgehend von der Rissöffnung in der Region mit der hohen Spannungskonzentration in der Schweißnahtmitte wuchs der Riss parallel zur Normalspannung σ_{yy}' entlang des LOP bis zum Bruch der Probe. In den DIC-Bildern ist der Ursprung der plastischen Zone erst knapp am Ende der Lebensdauer der Probe bei $N = 8050$ Zyklen sichtbar. Eine frühere Erkennung der plastischen Zone kann durch die in der WEZ auftretende Verformung verdeckt werden.

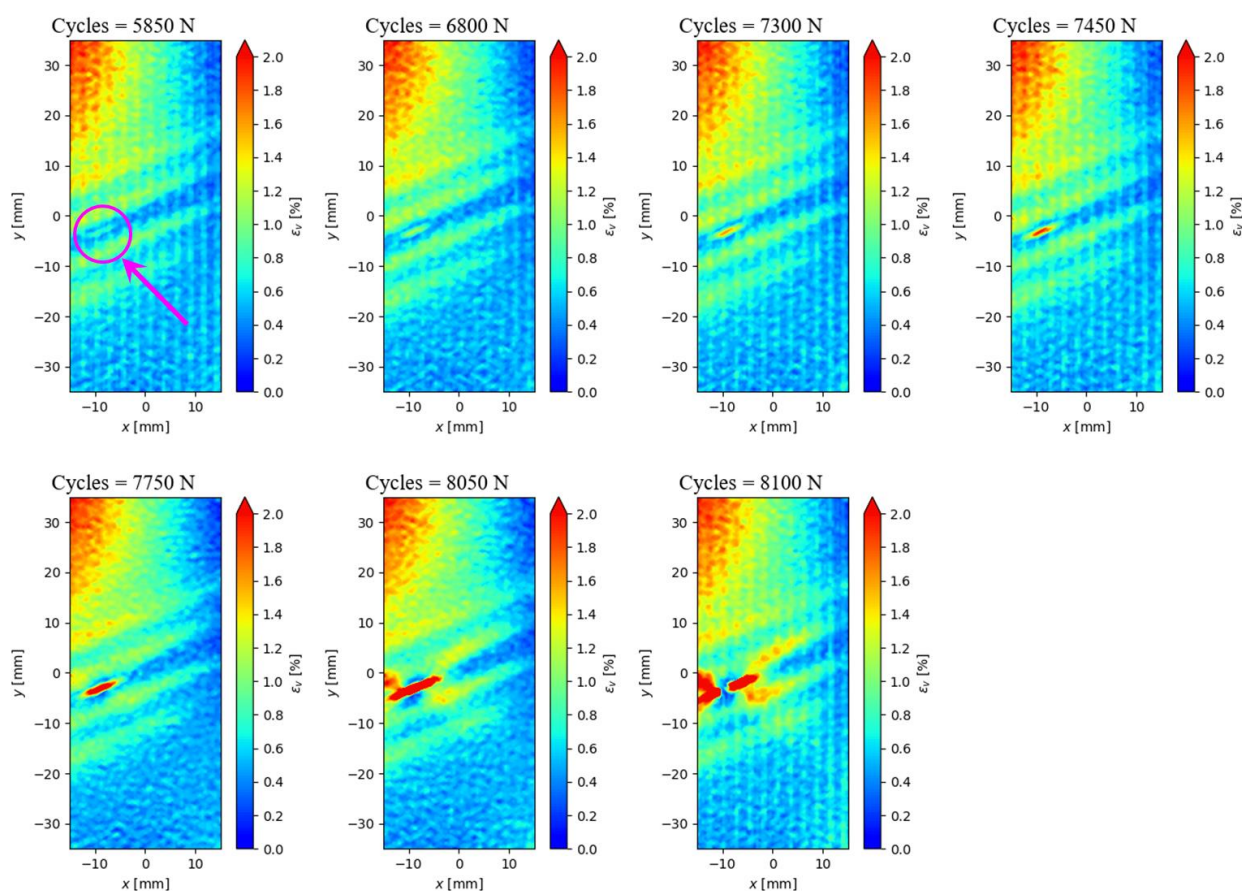


Abbildung 2-32: DIC-Bilder der Entwicklung des Ermüdungsrisses bei der LOP-22,5° Probe ($\sigma_{yy}' = 256$ MPa)

Die Endstadien der Ermüdungsriss der 45° orientierten Schweißnähte mit LOP sind in Abbildung 2-33 dargestellt. Die meisten Proben versagten im LOP, mit Ausnahme der mit $\sigma_{yy}' = 150$ MPa ermüdeten Probe, die zwei Risse auf beiden Seiten der WEZ ($y = -12$ mm und $y = 5$ mm im DIC-Bild) aufweist. Die meisten der 45° orientierten Proben weisen Risse auf, die senkrecht zur Hauptspannungsachse ausgerichtet sind. Nur der Riss der ermüdeten Probe mit $\sigma_{yy}' = 165$ MPa folgt der Richtung des LOP. Es ist zu bemerken, dass sowohl der untere linke Flügel als auch der obere rechte Flügel der plastischen Zone durch die LOPs begrenzt sind.

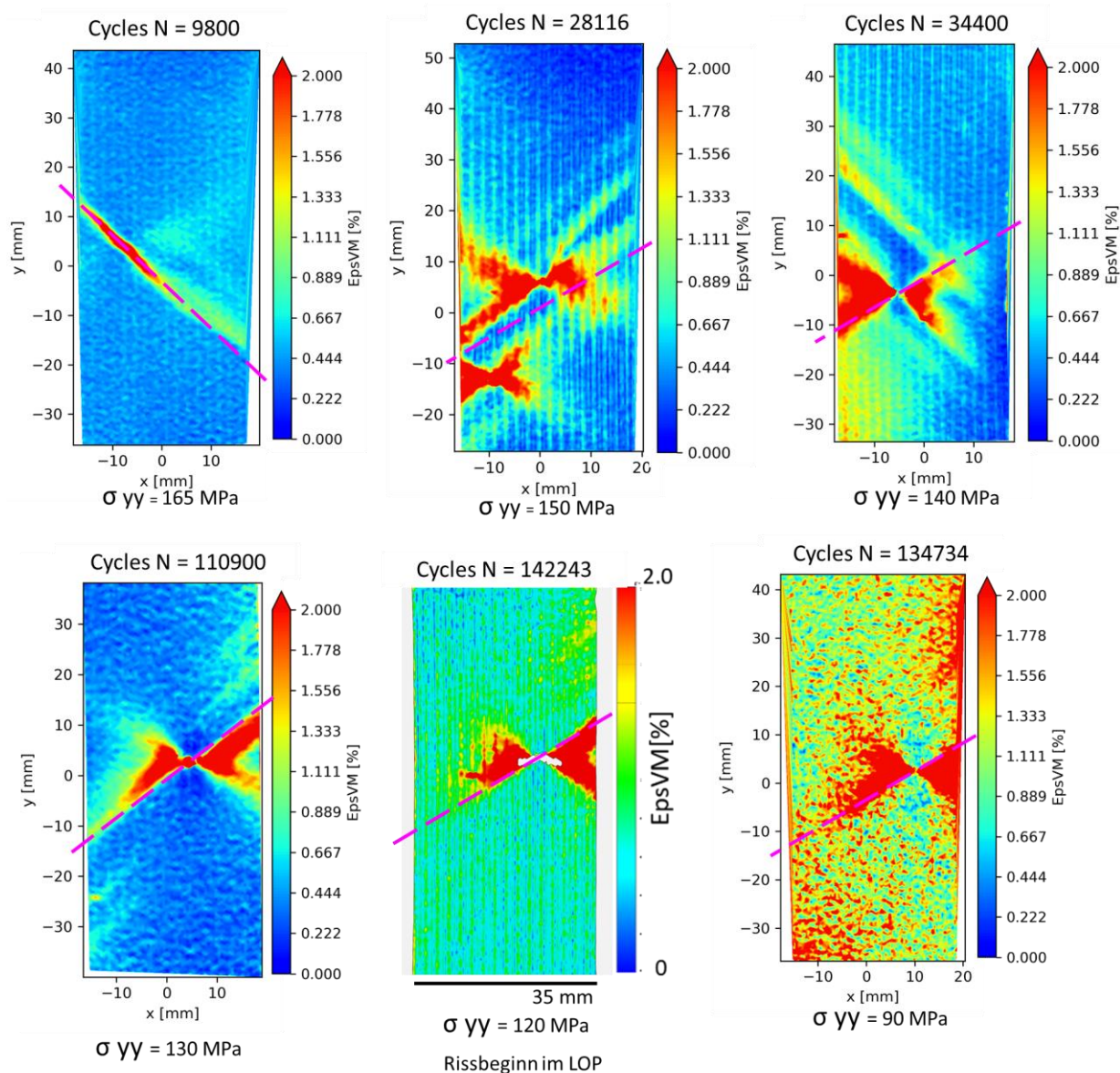


Abbildung 2-33: DIC Bilder mit Ermüdungsriss bei verschiedenen maximalen Hauptspannungen von 45°-orientierten FSW-Nähten. Die pinke Linie kennzeichnet die Mitte der Schweißnaht bzw. LOP.

Abbildung 2-34 zeigt die DIC-Bilder der Rissinitiierung und des endgültigen Risses der mit $\sigma_{yy}' = 120$ MPa geprüften LOP-45°-Probe. Wie in den vorherigen FSW-Verbindungen mit LOP wird der Riss zunächst am LOP und anschließend an der Oberseite der Schweißnaht erfasst. Der Riss ist in einem kleinen Bereich konzentriert und verläuft durch die Dicke der Probe senkrecht zur Hauptspannung, wie die Größe der plastischen Zonen auf beiden Seiten der Schweißnaht zeigt.

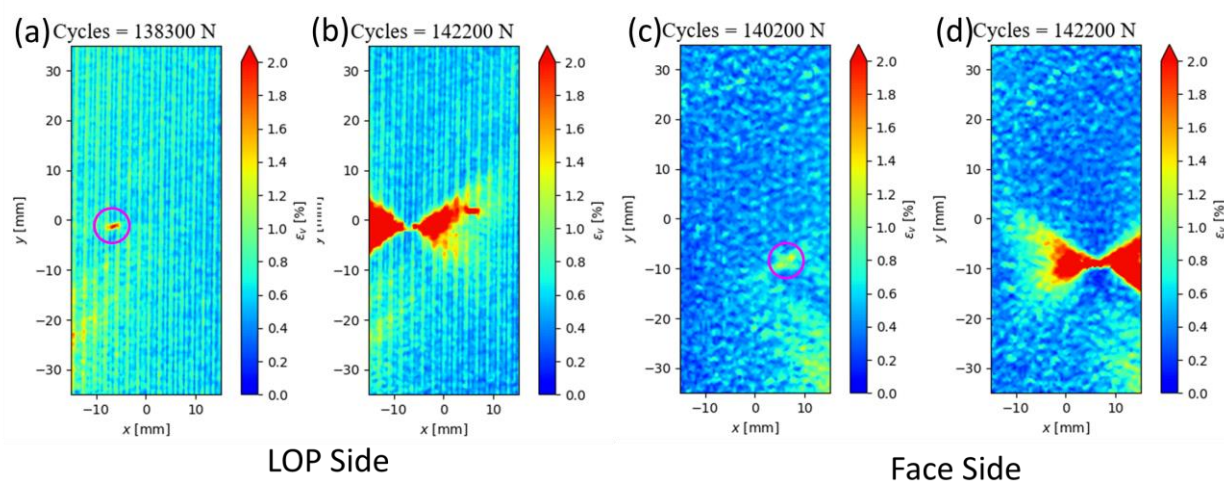
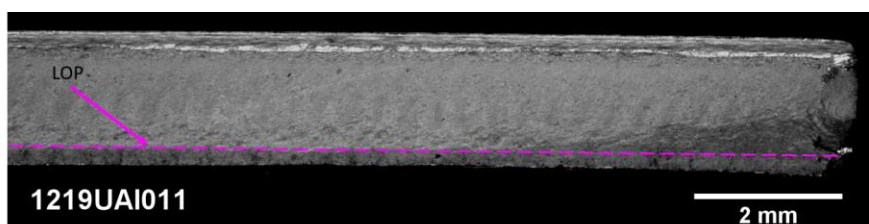


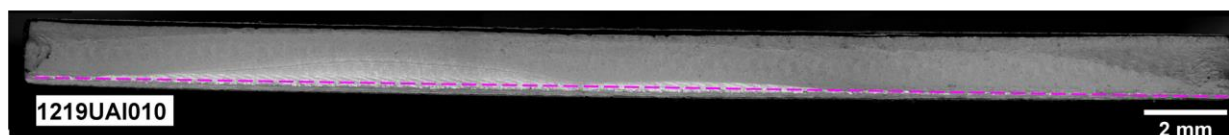
Abbildung 2-34: DIC-Bilder mit Rissinitiierung (a,c) und Endphase des Risses (b,d) an der Wurzelseite und Werkzeugseite der LOP-45° Probe ermüdet mit $\sigma_{yy}' = 120$ MPa

Bruchflächen LOP 0°

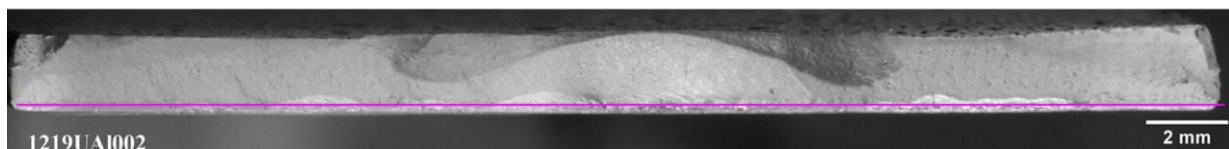
Abbildung 2-35 zeigt die Bruchflächen der LOP-0°-Proben. Die Risse, die das Versagen verursachten, haben eine halb elliptische Form und entstanden an der Grenze (rosa Linien auf den Bruchflächen) zwischen dem LOP und der Schweißnahtwurzel. Bei den LOP-0°-Proben $\sigma_{yy}' = 300$ MPa und $\sigma_{yy}' = 270$ MPa sind mehrere Schadensstellen zu beobachten. Auf der Bruchfläche sind mehrere Risse (Halbellipsen) zu sehen, von denen sich jedoch nur einer über die gesamte Bruchdicke erstreckt. Die Risse wuchsen in der Ebene senkrecht zur Hauptspannung.



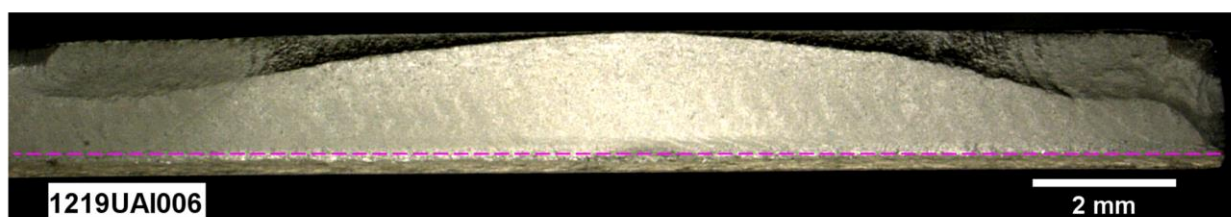
$\sigma_{eqv} = 320$ MPa



$\sigma_{eqv} = 300$ MPa



$\sigma_{eqv} = 270$ MPa



$\sigma_{eqv} = 200$ MPa



$\sigma_{eqv} = 160$ MPa

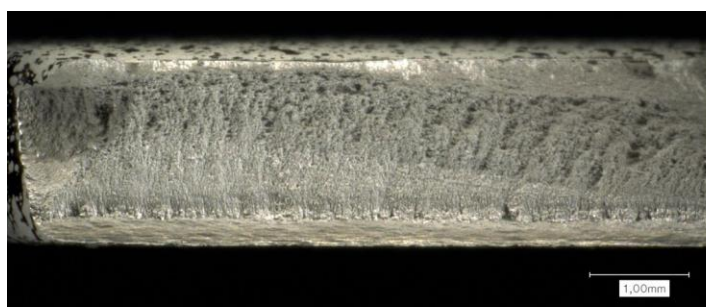
Abbildung 2-35: Bruchflächen der LOP-0°-Proben entsprechend den DIC-Bildern in Abbildung 2-27. Die pinke Linie stellt die Grenze der LOPs dar.

Bruchflächen LOP 22,5°

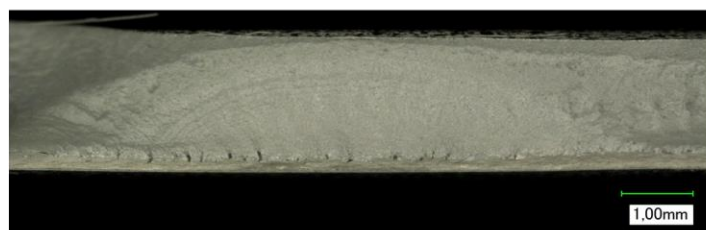
Die Bruchflächen der Proben 22,5° zeigen halb elliptische Ermüdungsriss (Abbildung 2-36) mit verschiedenen Arten der Rissentstehung. Die Proben $\sigma_{yy}' = 205$ MPa und $\sigma_{yy}' = 187$ MPa versagten außerhalb der Schweißnahtmitte in einem Bereich mit Lochfraß in der WEZ auf der Werkzeugseite bzw. der Wurzelseite der Schweißnaht. Ansonsten ist die Rissbildung in der Schweißnaht. Diese weisen jedoch unterschiedliche Versagensmorphologien auf. Bei den mit $\sigma_{yy}' = 281$ MPa geprüften Proben z. B. war der Probenbruch auf die Bildung eines Eckrisses zurückzuführen, der sich durch die Schweißnaht parallel zum LOP ausbreitete. Bei $\sigma_{yy}' = 256$ und 231 MPa zeigen die Proben auch Risse parallel zum LOP mit einer einzigen Initiationsstelle bzw. mehreren Rissen. Bei der Probe $\sigma_{yy}' = 231$ MPa wuchsen die beiden Risse parallel durch die Schweißnahtdicke, was zum Versagen der Probe führte. Bei der mit $\sigma_{yy}' = 154$ MPa geprüften Probe hingegen begann der halb elliptische Riss in einem Teil der 22,5° orientierten LOP, jedoch wuchs der Riss in einer Ebene senkrecht zur Hauptspannung, was zur Trennung der Zwiebelringe der Schweißnaht führte, wodurch verschiedene Plateaus entstanden.

Bruchflächen LOP 45°

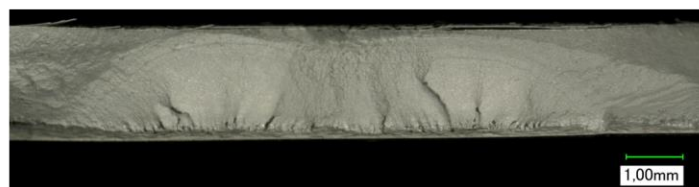
Abbildung 2-37 zeigt die Bruchflächen der Proben mit einer 45° geneigten Schweißnaht. Die Bruchmorphologie ist ähnlich wie bei den LOP-22,5°-Proben. Die höhere Spannung $\sigma_{yy}' = 165$ MPa führte zu einer fast vollständigen Trennung des LOP, den mehrere halb elliptischen Rissen mit einer 45° geneigten Ebene in Bezug auf die Hauptbelastungsachse aufwies. Bei niedrigeren σ_{yy}' -Niveaus befindet sich die Rissinitiation in einem Teil des LOP, jedoch entwickelte sich der Riss versetzt in unterschiedlichen Ebenen senkrecht zur Hauptspannung. Wie bei den 22,5°-Proben war das Versagen der Proben auf die Trennung der Zwiebelringe in der Schweißnaht zurückzuführen.



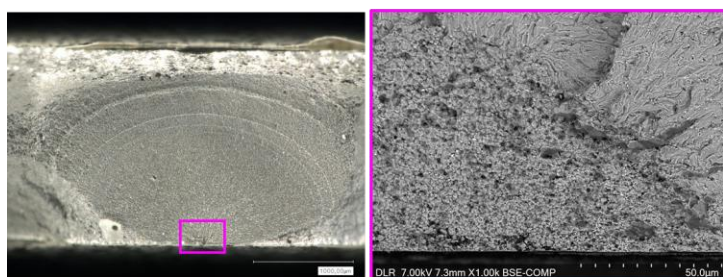
$\sigma_{yy}' = 281 \text{ MPa}$



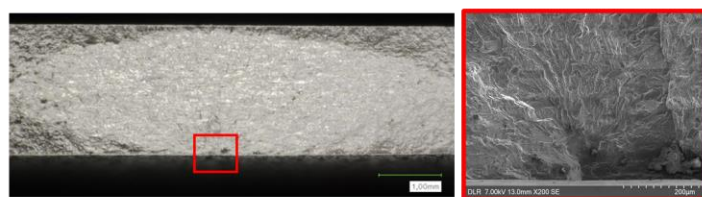
$\sigma_{yy}' = 256 \text{ MPa}$



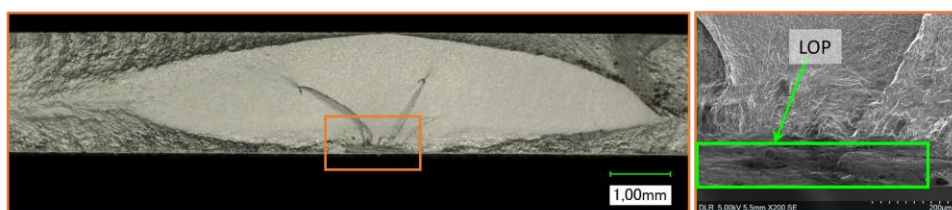
$\sigma_{yy}' = 239 \text{ MPa}$



$\sigma_{yy}' = 205 \text{ MPa}$



$\sigma_{yy}' = 187 \text{ MPa}$



$\sigma_{yy}' = 154 \text{ MPa}$

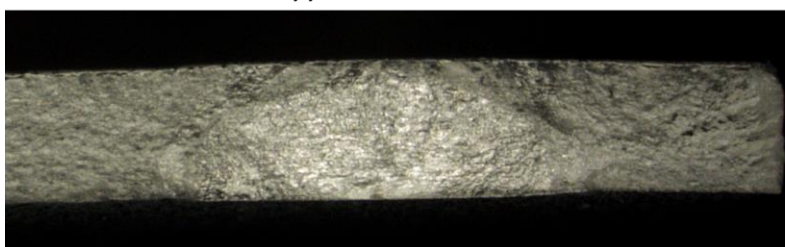
Abbildung 2-36: Bruchflächen der LOP-22,5° Proben entsprechend den DIC-Bildern in Abbildung 2-30.



LOP

2 mm

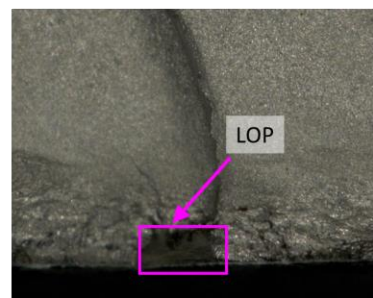
$\sigma_{yy}' = 165 \text{ MPa}$



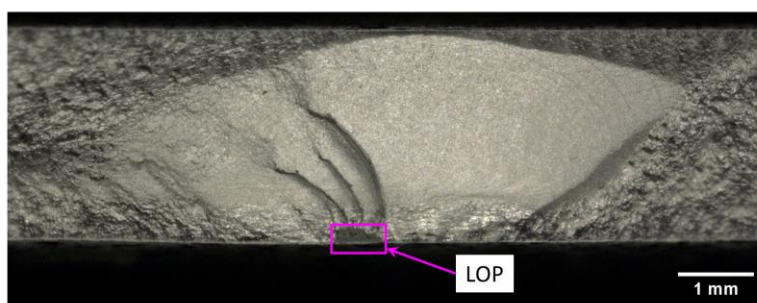
$\sigma_{yy}' = 150 \text{ MPa}$



$\sigma_{yy}' = 130 \text{ MPa}$



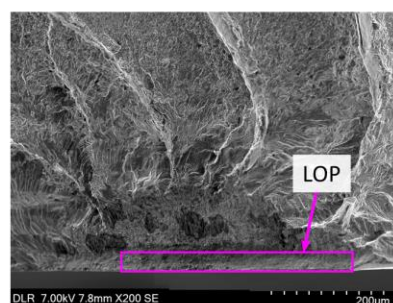
LOP



LOP

1 mm

$\sigma_{yy}' = 120 \text{ MPa}$

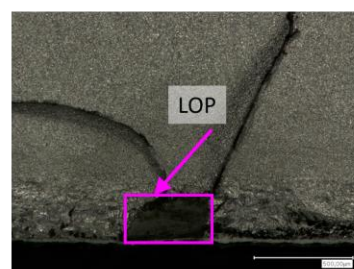


LOP

DLR 7.00kV 7.8mm X200 SE 200µm



$\sigma_{yy}' = 90 \text{ MPa}$



LOP

Abbildung 2-37: Bruchflächen der LOP-45° Proben entsprechend den DIC-Bildern in Abbildung 2-33.

Diskussion

Anhand der Ausgleichskurven im σ_{eqv} -N Diagramm (Abbildung 2-24) kann gezeigt werden, dass es grundsätzliche Unterschiede zwischen den Proben mit und ohne LoP gibt. Die defektfreien Schweißungen versagen weitgehend unabhängig der Nahtorientierung. Das heißt, die Vergleichsspannung bzw. größte Hauptspannung dominiert die Ermüdungslbensdauer. Im LCF-Bereich ergeben sich zudem recht hohe Ermüdungsfestigkeiten, die nahe der Fließgrenze ($R_{p02} = 350$ MPa) liegen.

Die Ausgleichskurven der LOP-behafteten Proben im σ_{eqv} -N Diagramm sortieren sich aufsteigend der Nahtorientierung von 0° bis 45° . Die Proben mit 0° Orientierung weisen dabei die niedrigsten Ermüdungsfestigkeiten auf, die teils weniger als 50% im Vergleich zu den defektfreien Schweißungen aufweisen. Die Abhängigkeit der Nahtorientierung ist dabei auf die Spannungskomponenten des gedrehten Schweißnaht-Koordinatensystems zurückzuführen.

Die Datenpunkte im σ_{yy} -N liegen bei den LOP-behafteten Proben alle in einem gemeinsamen Streuband. Das Öffnen des LOPs und damit die Rissinitiation wird also vor allem durch dessen Normalspannungskomponente begünstigt. Ein solches gemeinsames Streuband ist bei den defektfreien Schweißungen nicht erkennbar.

Demgegenüber zeigen die σ_{xy} -N und τ_{xy} -N Diagramme gemeinsame Streubänder für alle Proben mit gleicher Nahtorientierung, sodass sich hieraus kein spezieller Einfluss des LOPs erkennen lässt.

Die Ermüdungsproben der LOP-behafteten Schweißnähte mit $22,5^\circ$ und 45° Orientierung weisen hauptsächlich zwei Versagensarten auf:

1. Risse, die parallel zum LOP verlaufen und versagen, bei relativ hohen Spannungen.
2. Risse, die senkrecht zur Hauptspannung wachsen

Diese Mechanismen können durch die entsprechenden DIC-Diagramme erklärt werden. Im ersten Fall ist der Riss in einer Zone mit einem geringeren Verformungsfeld als die angrenzende TMAZ-Zone begrenzt (siehe Abbildung 2-32), die beide bereits einen gewissen Grad an plastischer Verformung aufweisen. Wenn Ermüdungsrisse vorzugsweise in nicht plastifizierten Zonen wachsen, kann sich der Riss nur in der Richtung parallel zum LOP entwickeln.

Im Gegensatz dazu kommt es bei niedrigeren Hauptspannungen, wie bei der LOP- 45° -Probe (siehe Abbildung 2-34), zu keinen ausgeprägten Dehnungen der WEZ, so dass die "Dehnungsbarrieren" nicht vorhanden sind und der Riss bei der höchsten auf die Probe wirkenden Normalspannung, in diesem Fall der Hauptspannung (16) wächst.

Dieses Phänomen wird auch beim Ermüdungstest unter Mix-Mode Belastung (Abbildung 2-54) beobachtet, bei dem der Ermüdungsriss vom Schweißfehler ausging, eine kurze Wachstumszeit parallel zum Drehwinkel der Probe hatte und dann senkrecht zur Hauptlast wuchs und versagte.

2.1.2. AP2 – Schädigungsmechanismen bei zyklischer Belastung

In diesem Arbeitspaket ging es um die Auswirkungen eines möglichen Defekts in FSW-Nähten, wenn beispielsweise die Bleche nicht vollständig durchgeschweißt sind. Ein solcher LOP wirkt sich hierbei sowohl auf die Ermüdungslebensdauer, als auch auf den Risspfad aus. Besonders die Rissinitiierung an einem solchen Defekt macht einen Großteil der letztlichen Lebensdauer aus. Aus diesem Grund wurde dieser Aspekt näher untersucht.

2.1.2.1. Einachsige Schädigungsmechanismen

Die Auswirkungen eines LOPs sind in der Regel lediglich an der Proben- oder Bauteiloberfläche gut erkennbar. Ein Blick ins Innere des Materials ist nur mit größerem Aufwand möglich. Die Untersuchungen haben jedoch beide Sichtweisen zusammengeführt. Das Untersuchungsprogramm stellte sich wie folgt dar (Abbildung 2-38).

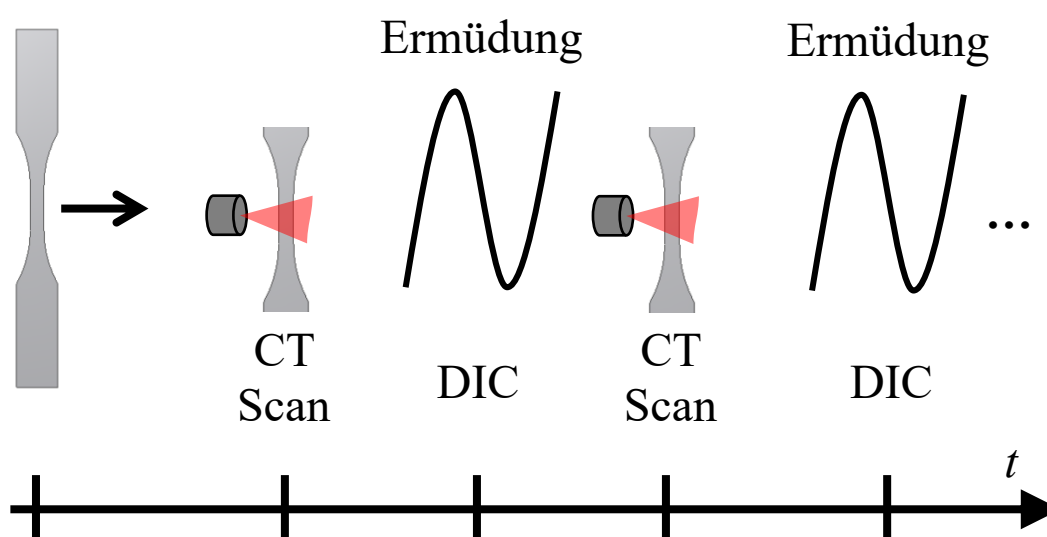


Abbildung 2-38: Ablauf zur Untersuchung des Schädigungsprozesses unter Ermüdungsbelastung innerhalb einer Schweißnaht

Sequenziell wurde die Schadensentwicklung anhand einer Ermüdungsprobe untersucht. Die Probe wurde dabei zunächst mittels Computertomographie (CT) gescannt, um ein 3D-Volumenmodell des Ausgangszustands zu erhalten. Im nächsten Schritt wurde die Probe dann mittels einer servohydraulischen Prüfmaschine ermüdet. Breitete sich dabei ein Defekt im Inneren des Materials aus, machte sich dieser durch Veränderungen im Verschiebungsfeld an der Oberfläche bemerkbar. Mittels DIC wurde das Verschiebungsfeld während des Ermüdungsversuchs beobachtet. In Abständen wurde der Versuch unterbrochen, um CT Scans durchzuführen und so die Schadensentwicklung zu untersuchen.

Die Versuche wurden an Proben mit FSW-Schweißnaht, welche 90° zur Zugrichtung verlief, durchgeführt. Außerdem war die Schweißnaht bewusst mit einem LOP versehen. Die Rissinitiierungsphase wurde anhand von knochenförmigen Flachproben aus AA2024-T3 mit Abmessungen von 9 mm x 80 mm x 1,8 mm (siehe Abbildung 2-39) untersucht. Hierzu wurden die Proben in einer einachsigen Servo-Hydraulischen Prüfmaschine (max. Kraft 10 kN) bei einer Maximalspannung von 130 MPa ermüdet. Für lokale DIC Untersuchungen im Schweißnahtbereich wurde ein Stereomikroskop mit einer Spiegelreflexkamera vor der Probe montiert. Identisch zu den Biax-Versuchen aus AP1 wurden alle 1000 Lastwechsel DIC Aufnahmen bei maximaler und minimaler Last aufgenommen, um den Schädigungsprozess zeitlich aufzulösen. Abbildung 2-40 zeigt den Aufbau der Ermüdungsversuche mit Lichtmikroskop und DSLR zur Auswertung mittels digitaler Bildkorrelation. Die Versuchsbedingungen waren wie folgt:

$$\sigma_{\max} = 130 \text{ MPa}$$

$$F_{\max} = 702 \text{ N}$$

$$R = 0.1$$

$$f = 5 \text{ Hz}$$

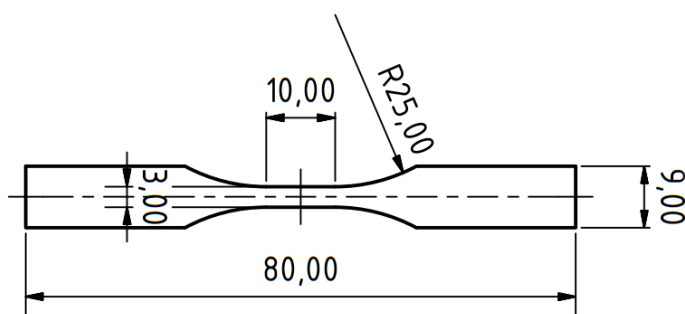
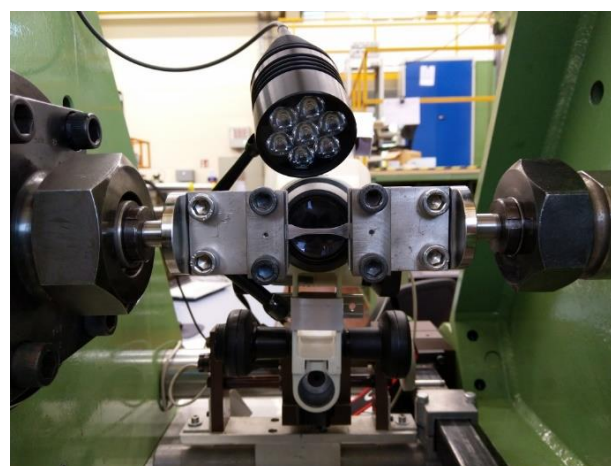


Abbildung 2-39: Probengeometrie CT-Probe, einachsiger Spannungszustand



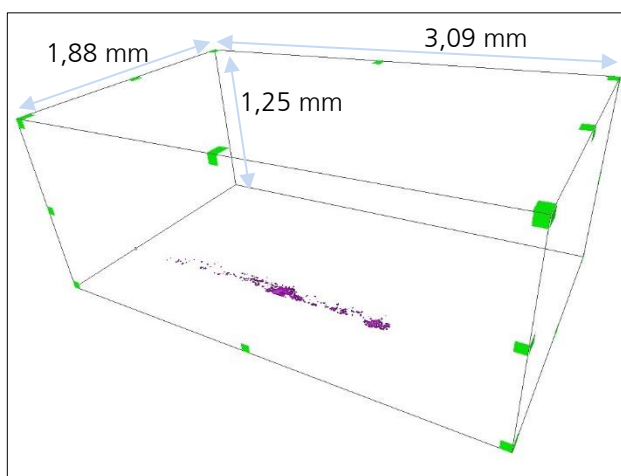
a)



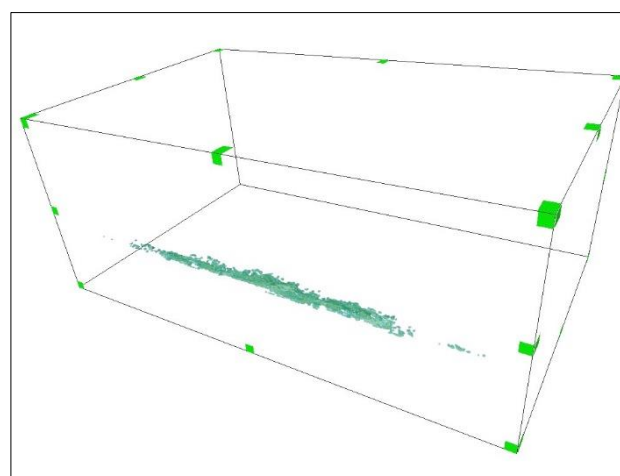
b)

Abbildung 2-40: Aufbau Ermüdungsversuch: a) Maschinen-Übersicht mit horizontaler Probeneinspannung, b) Eingespannte Probe in der Bildmitte, dahinter die Kamera für die DIC-Aufnahmen mit Lichtquelle darüber

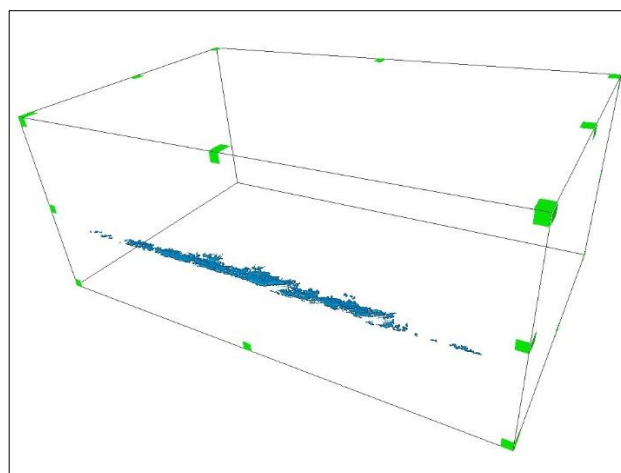
Für eine volumetrische Auswertung der Rissentstehung wurden Scans mittels Mikrotomographie mit einer Voxelgröße von $2,5\ \mu\text{m}$ erstellt. Der erste Scan erfolgte dabei vor dem Ermüdungsversuch. Für drei weitere zeitlich versetzte Scans wurde die Probe jeweils nach 50.000, 70.000 und 72.000 Schwingspielen demontiert (Abbildung 2-41). Mittels der 3D Daten, den DIC Auswertungen, REM Aufnahmen der Bruchflächen und FE Simulationen lässt sich die initiale Schädigungsentwicklung somit sowohl mikrostrukturell als auch bruchmechanisch im Detail analysieren.



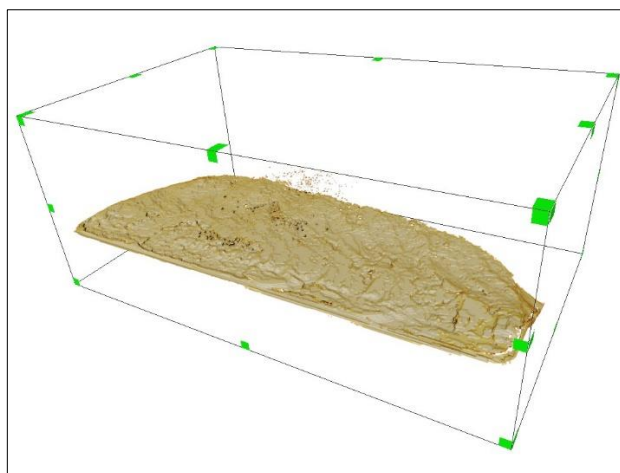
Vor Versuchsbeginn (LOP)



Nach 50.000 Schwingspielen



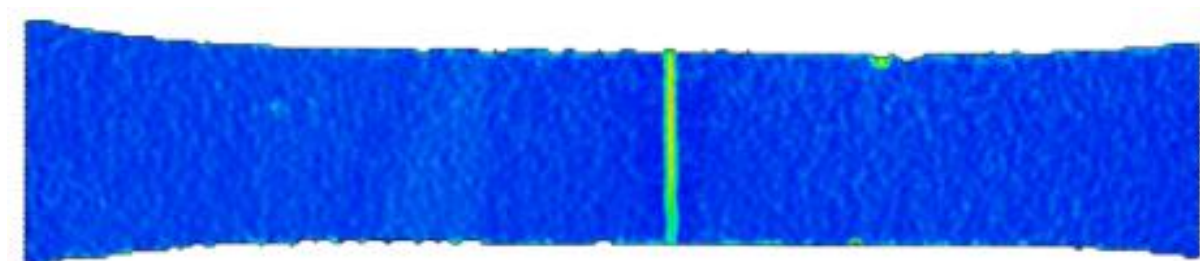
Nach 70.000 Schwingspielen



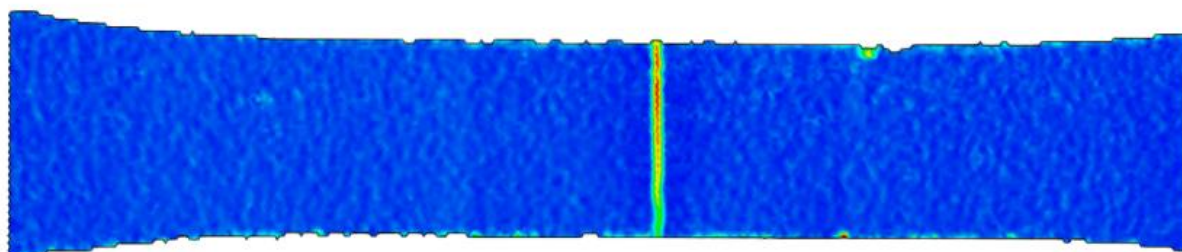
Nach 72.000 Schwingspielen

Abbildung 2-41: Tomographie-Aufnahmen des Risses zu verschiedenen Zeitpunkten des Rissverlaufs

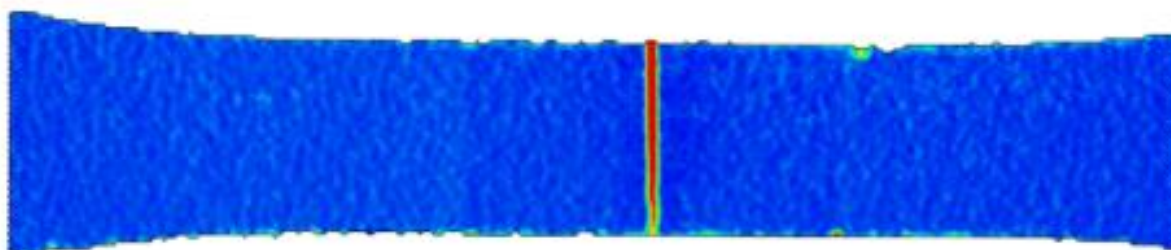
Abbildung 2-42 zeigt die DIC-Aufnahmen in verschiedenen Stadien des Versuchs. Deutlich ist das Risswachstum zu erkennen.



Nach 51.000 Schwingspielen



Nach 60.000 Schwingspielen



Nach 70.000 Schwingspielen

↔ 3 mm

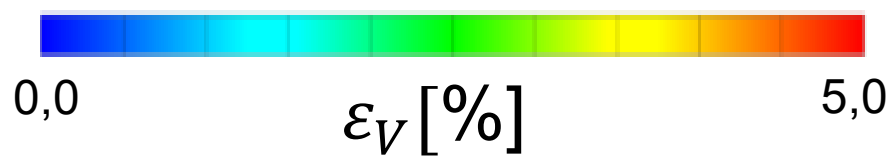


Abbildung 2-42: DIC-Aufnahmen (bei Maximal-Last) während des Ermüdungsversuchs

Abbildung 2-43 zeigt die gesamte Bruchfläche, wobei in Abbildung 2-44 die verschiedenen Bereiche deutlich zu erkennen sind.

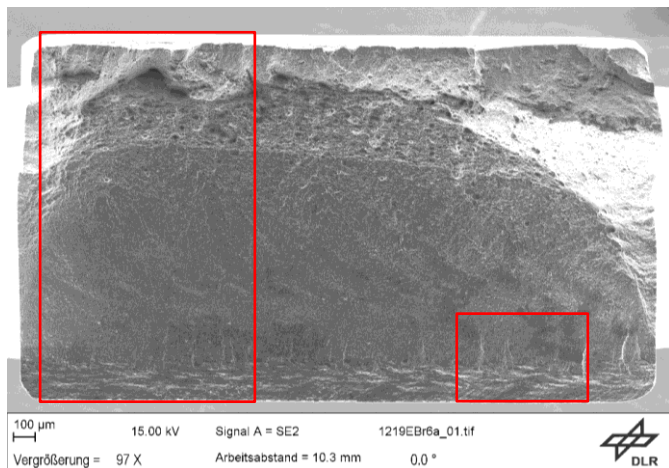


Abbildung 2-43: Übersicht, Bruchfläche Ermüdungsprobe

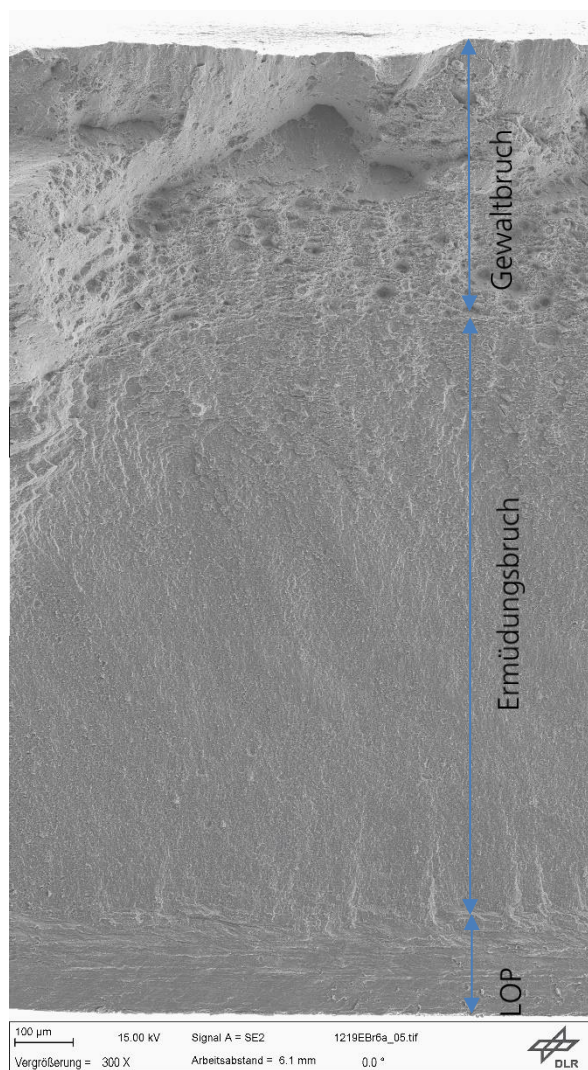


Abbildung 2-44: Bruchbereiche

Die Bruchfläche zeigt, wie zuvor auch schon die CT-Aufnahmen und die DIC-Bilder, dass die Rissinitiierung nicht punktuell, sondern über die ganze Breite des LOP erfolgt ist. Die Abbildung 2-45 und Abbildung 2-46 zeigen den Übergang vom LOP zum Ermüdungsriss nochmals im Detail. Die Bruchflächen zeigen außerdem ähnliche Mechanismen wie bei der Biax-Probe, d.h. die Vergleichbarkeit der Ergebnisse von großen und kleinen Proben ist gegeben.

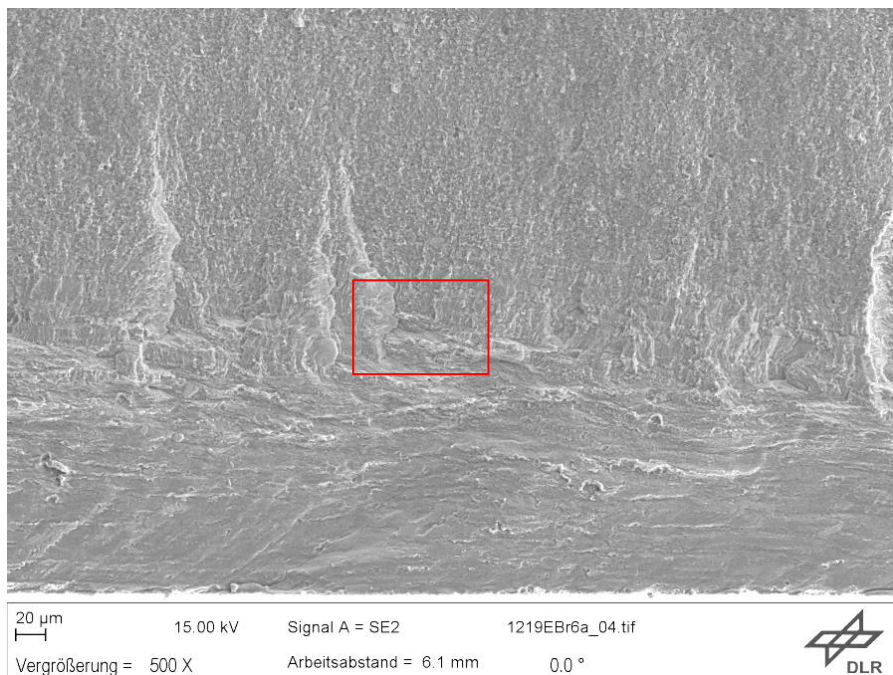


Abbildung 2-45: LOP-Bereich

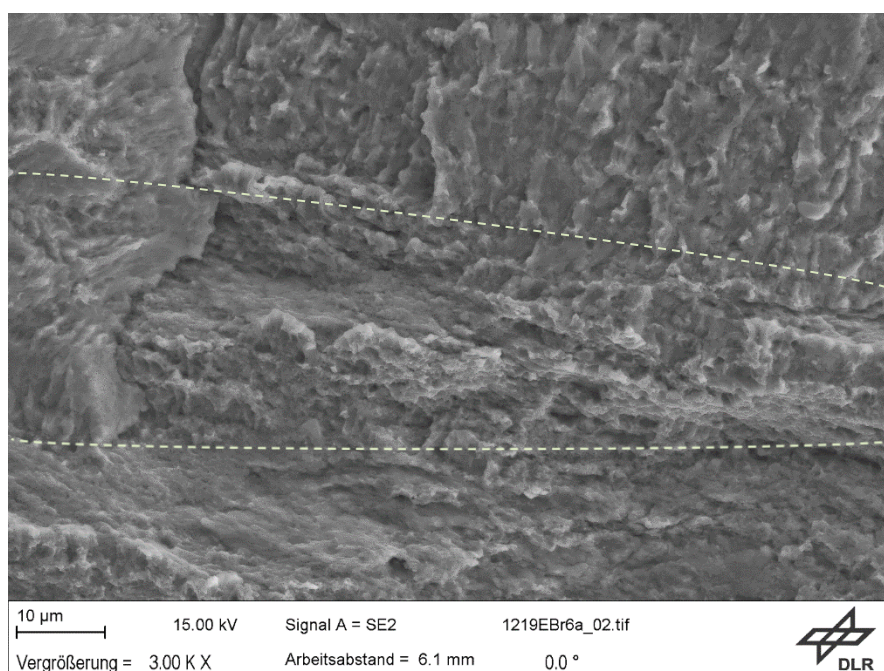


Abbildung 2-46: Übergangsbereich (mittig) vom LOP (unten) zum Ermüdungsriss (oben)

2.1.2.2. Mehrachsige Schädigungsmechanismen

Bei der 0° Orientierung betrug die nominelle Spannung in der Probe als auch in der Schweißnaht 130 MPa. Das Versagen setzte bei ca. 70.000 Lastwechseln ein.

Im Rahmen von Laststeigerungsversuchen wurde bei der 45° Probe (Abbildung 2-47) die nominelle Spannung schrittweise erhöht, bei Blöcken von jeweils 100.000 Schwingspielen. Die Probe versagte hierbei erst bei etwa 300 MPa (Abbildung 2-48).

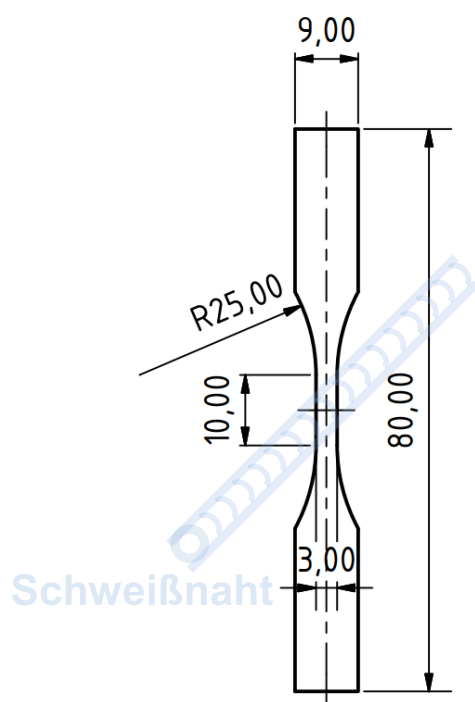


Abbildung 2-47: Probe mit FSW-Naht im 45°-Winkel

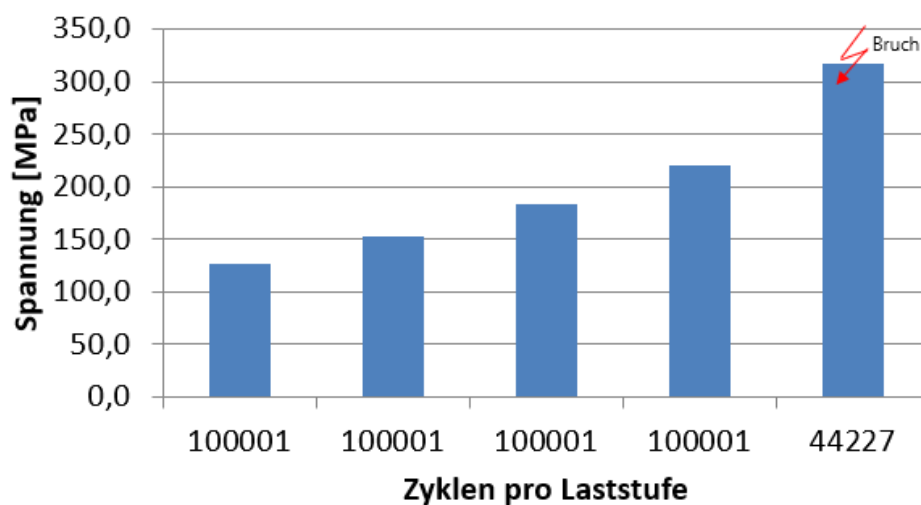


Abbildung 2-48: Laststeigerungsversuche bei einer Probe mit 45° Schweißnaht (Probe 1219UDr3)

Die Spannungskomponenten bei der 45° Probe lassen sich mit dem Mohrschen Spannungskreis veranschaulichen. Die Normalspannung, die also zur Öffnung des LOPs führt, beträgt hier nur noch die Hälfte der nominellen äußeren Spannung der Probe.

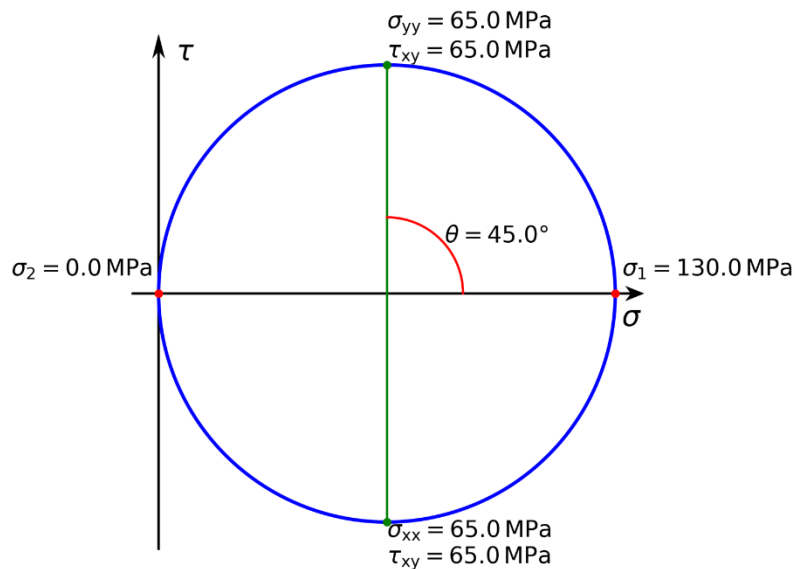


Abbildung 2-49: Mohrscher Spannungskreis

Die Simulation (Abbildung 2-50) zeigt die Spannungsverläufe einer Probe mit gerader FSW-Naht und einer Probe mit schräger FSW-Naht. Der Rissverlauf bei der Probe mit schräger FSW-Naht wäre an der Stelle der Spannungsüberhöhungen und/oder in der FSW-Naht im LOP zu erwarten.

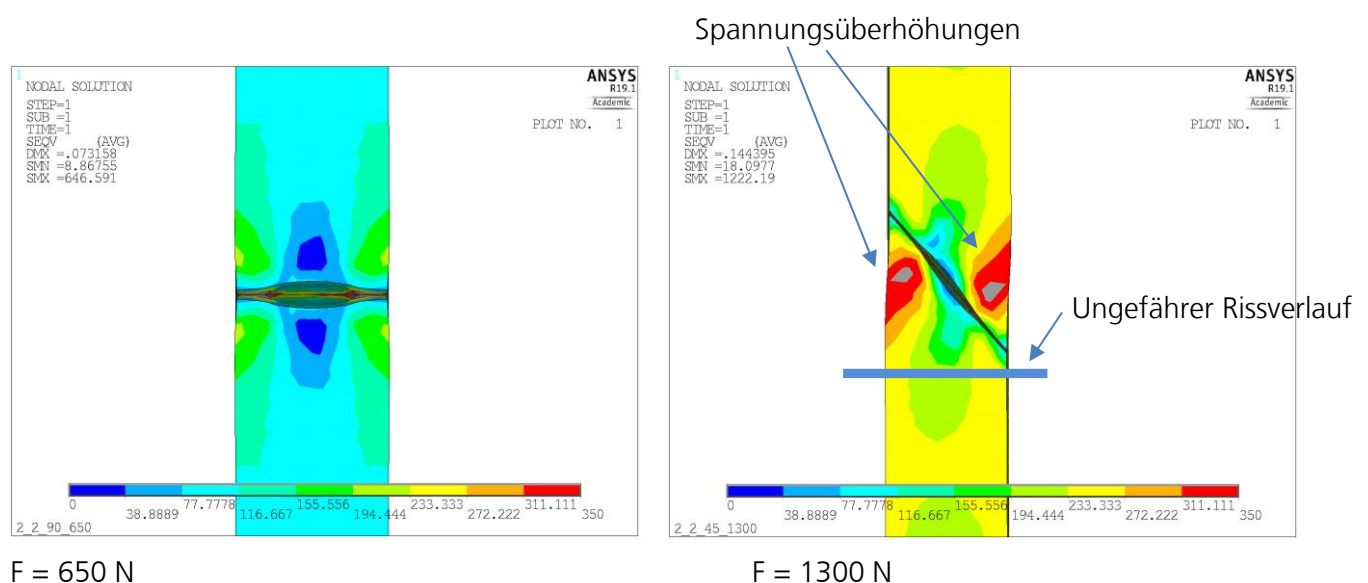


Abbildung 2-50: Simulierter Spannungsverlauf bei einer geraden (links) und einer schrägen (rechts) FSW-Naht

Die DIC Untersuchungen zeigen jedoch, dass die Rissinitiierung nicht direkt im LOP selbst, sondern im Bereich der Wärmeeinflusszone stattfindet (Abbildung 2-51).

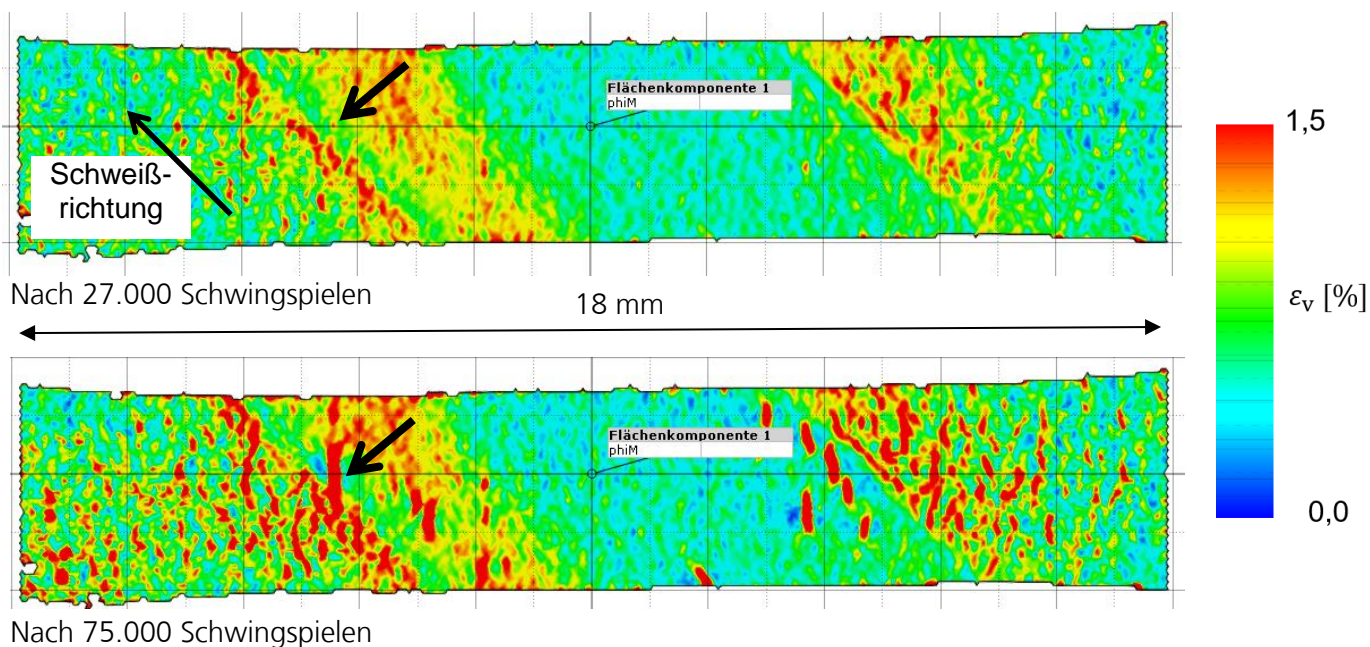


Abbildung 2-51: DIC-Bilder mit Rissentstehung in der WEZ (Draufsicht)

Abbildung 2-52 zeigt den Bruch entlang der Wärmeeinflusszone in der Queransicht. Rissentstehung und -verlauf sind weit entfernt vom LOP (Abbildung 2-53).

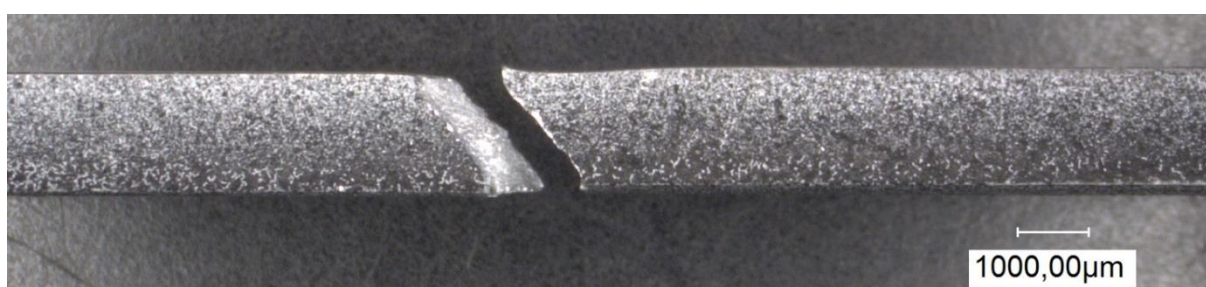


Abbildung 2-52: Queransicht der Probe mit Bruch entlang der WEZ

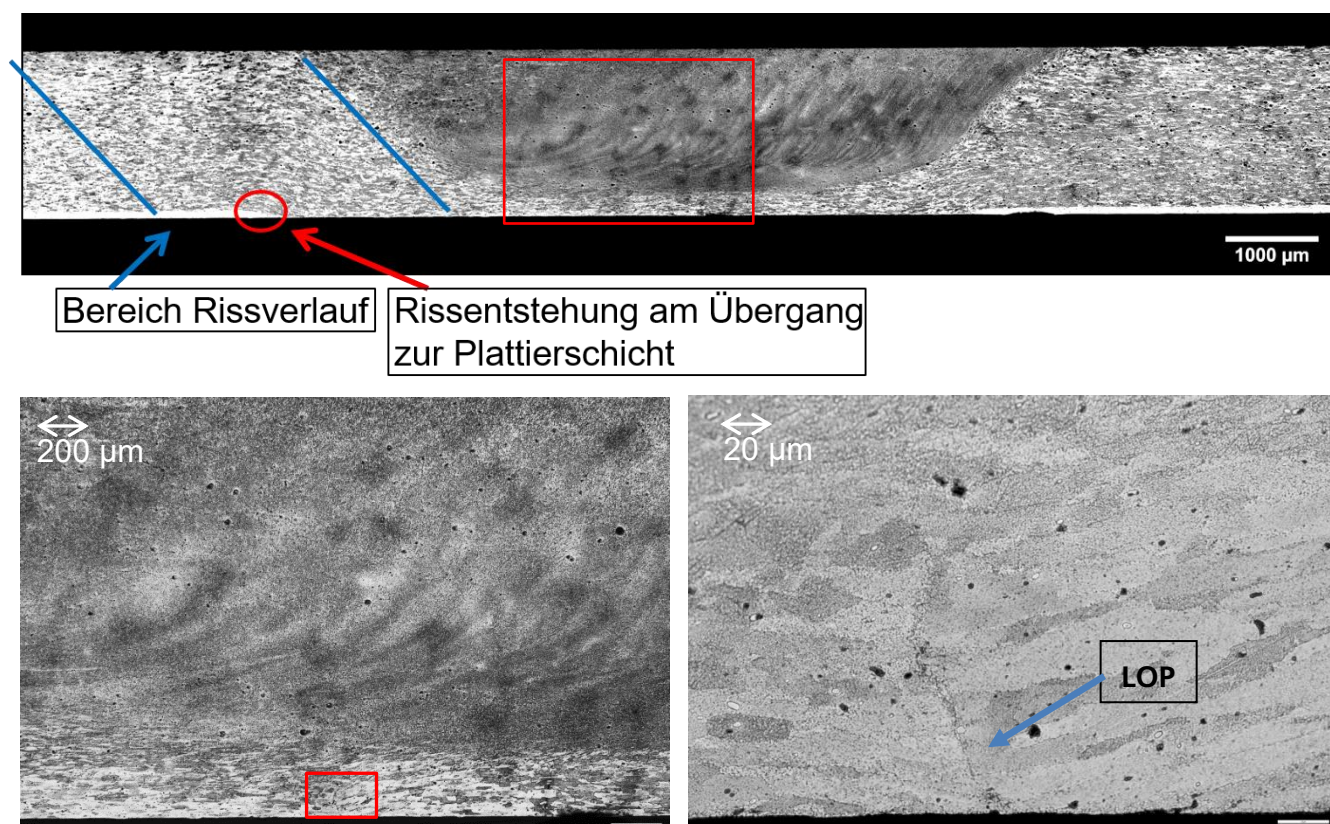
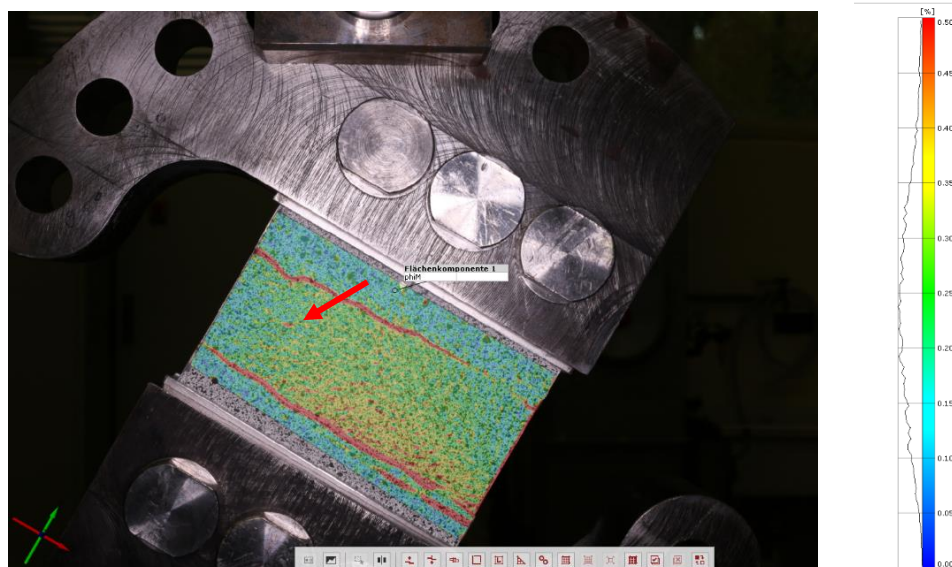


Abbildung 2-53: Die FSW-Naht im Querschliff

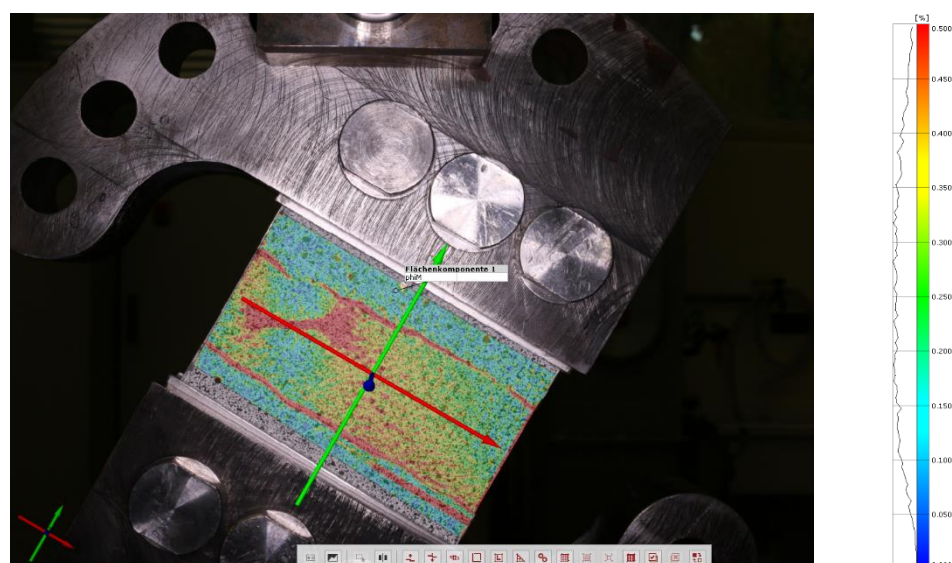
Offenbar ist hier bei der 45°-Orientierung der Schweißnaht die Schwächung durch den Einfluss der Wärmeeinflusszone so groß, dass die Rissentstehung an dieser Stelle beginnt. Der weitere Rissverlauf ist dann wiederum nicht in der WEZ, sondern im 90°-Winkel zur Hauptspannungsachse (Abbildung 2-51).

Mixed-Mode Belastung

Weiterhin wurde bei den mehrachsigen Spannungszuständen auch eine Orientierung der Schweißnaht im Winkel von 30° untersucht. Hierbei ist in der DIC-Aufnahme deutlich die Rissentstehung bei ca. 25.000 Schwingspielen zu sehen; ebenso die senkrecht zur Hauptspannungsachse verlaufende weitere Rissausbreitung (beides in Abbildung 2-54).



Erster erkennbarer Defekt bei 25.000 Schwingspielen



Versagen bei 70.000 Schwingspielen

Abbildung 2-54: DIC-Aufnahmen einer Ermüdungsprobe mit 30° Orientierung der Schweißnaht

Auch die folgende Abbildung 2-55 zeigt im linken Bereich den senkrecht zur Hauptspannungsachse verlaufenden Bruch. Der Bruch kann auf der rechten Seite nicht in dieser Ebene durchlaufen, da er von der Verdickung der Probe im Einspannbereich abgelenkt wird.



Abbildung 2-55: Bruchverlauf der 30°-Probe (90x145mm)

Der Ort der Rissentstehung im Bruchbild (Abbildung 2-56) korrespondiert mit dem Ort des verstärkten LOP in Abbildung 2-57. Diese Ultraschall-Untersuchung wurde zerstörungsfrei vor dem Ermüdungsversuch durchgeführt.



Abbildung 2-56: Bruchbild mit Rissentstehung

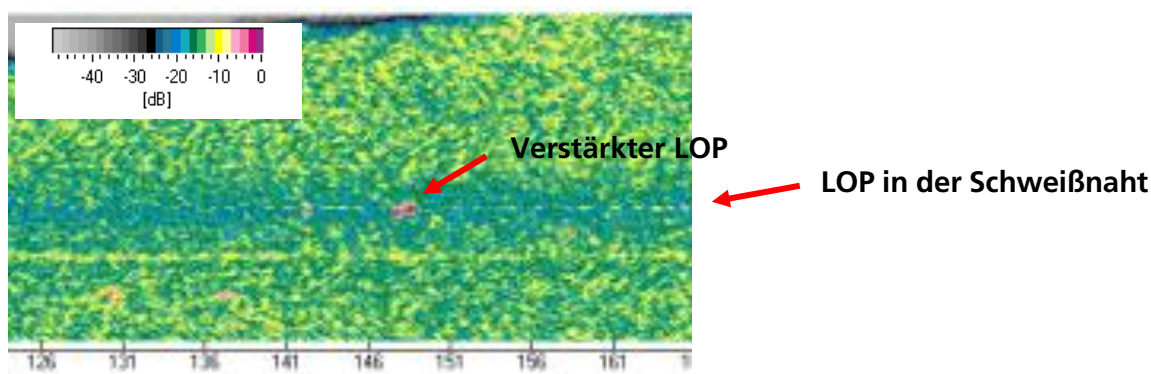


Abbildung 2-57: Ultraschall-Bild mit LOP und verstärktem LOP

Zusammenfassend für AP2 lässt sich sagen, dass bei den Ermüdungsversuchen der Verlauf des Risses unabhängig von der Orientierung der Schweißnaht immer quer zur Hauptspannungsachse verlief. Die Entstehung des Ermüdungsbruchs fand abhängig von der Orientierung der Schweißnaht statt. Bei der 0°-Orientierung entstand der Riss im LOP, bei der 45°-Orientierung begann der Riss in der Wärmeeinflusszone. Bei der 30°-Orientierung startete der Riss ebenfalls wie bei 0° im LOP. Jedoch ist die Aussagekraft ggf. eingeschränkt, da der Riss an einer Stelle mit verstärktem LOP begann.

2.2. Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Folgenden ist der zahlenmäßige Nachweis aufgeführt, wobei in der linken Spalte die vorkalkulierten Kosten und in der rechten Spalte die tatsächlich abgerechneten Kosten dargestellt sind.

Tabelle 2-5: Zahlenmäßiger Nachweis.

		Vorkalkulation	Entstandene Kosten
0813	Material	4.448,17 €	2.827,17 €
0823	FE-Fremdleistungen	0,00 €	0,00 €
0837	Personalkosten	378.066,13 €	391.782,60 €
0838	Reisekosten	2.921,67 €	2.493,35 €
0850	sonst. unmittelbare Vorhabenkosten	11.379,43 €	11.916,52 €
0856	Kosten für innerb. Leistungen	1.284,60 €	1.073,48 €
Summe		398.100,00 €	410.093,12 €

2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Sämtliche im Projekt geleisteten Arbeiten waren notwendig und angemessen. Ohne den CoMe Verbund und die resultierenden Zuwendungen wäre das Vorhaben DatMet für das DLR nicht tragbar gewesen. Mit der Förderung im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms wurde somit ein wesentlicher Beitrag geleistet, die vorhandenen Kompetenzen des Instituts für Werkstoff-Forschung zu erweitern und die realitätsnahe Prüfung von flugzeugrumpfnahen Strukturen auszubauen.

2.4. Nutzen und Verwertbarkeit

Der Verwertungsplan des Vorhabens basiert, wie in dem Zuwendungsbescheid gefordert, wesentlich auf den folgenden Punkten:

- Die im Vorhaben verwendeten und teilweise entwickelten Methoden zur Beurteilung der Lebensdauer von FSW-geschweißten Strukturen können interessierten Industrieunternehmen zu marktüblichen Preisen zur Verfügung gestellt werden.
- Die Entwicklung einer umfassenden Methode zur Untersuchung von repräsentativen FSW Flugzeugrumpfstrukturen durch DIC basierte Defekterkennung erweitert das Forschungsportfolio des Instituts für Werkstoff-Forschung und somit seine Positionierung für die Teilnahme in künftigen Forschungsprojekten.
- Präsentation der Ergebnisse auf Fachtagungen, Messen oder Workshops

- Darüber hinaus werden die in dem Projekt gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse ebenfalls für wissenschaftliche Publikationen, Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses sowie für die Akquise weiterer Forschungsvorhaben mit industrieller Relevanz genutzt.

Für das Institut für Werkstoff-Forschung ergibt sich eine wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse des Vorhabens durch:

- Die wissenschaftlichen Ergebnisse erlauben dem DLR dazu beizutragen, die Verbesserungspotentiale metallischer Herstellungs- und Fügeverfahren weiter zu entwickeln. Die Fortschritte im Bereich der bruchmechanischen Prüfmethode durch Kopplung aus Experiment und Simulation bilden die Basis für weiterführende Arbeiten zur realitätsnahen Prüfung rumpfstrukturähnlicher Proben. Insgesamt ergibt sich durch das Projekt ein deutlicher Kompetenzgewinn in diesen Bereichen, und hierdurch die Möglichkeit für das DLR, sich insbesondere den Industriepartnern auch weiterhin als kompetenter Partner zu empfehlen.
- Erweiterung der Position und Sichtbarkeit des DLR als Know-How-Träger auf dem Gebiet metallischer Leichtbaustrukturen.
- Alle Arbeiten dienen auch zur Ausbildung und Weiterqualifizierung des wissenschaftlichen Nachwuchses auf den unterschiedlichsten Ebenen.

2.5. Fortschritt anderer Stellen

Es sind keine Ergebnisse verbundexterner Dritter bekannt, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind.

2.6. Veröffentlichungen

Referierte Veröffentlichungen

- (1) Strohmann T, Starostin-Penner D, Breitbarth E, Requena G. Automatic detection of fatigue crack paths using digital image correlation and convolutional neural networks. *Fatigue Fract Eng Mater Struct.* 2021;44: 1336–1348.

Konferenzbeiträge

- (1) Ulises Alfaro Mercado, Ulrike Dressler, Eric Breitbarth, Guillermo Requena. Influence of multiaxial cyclic loading on the fatigue behavior of defective friction stir welded joints. 6th International Virtual Conference of Engineering Against Failure. 2021
- (2) Breitbarth, Eric und Strohmann, Tobias und Starostin-Penner, Denis (2021) Experimentelle Ermittlung komplexer Rissfortschrittsdaten mittels smarterer Algorithmen und digitaler Bildkorrelation. 53. Tagung des DVM Arbeitskreises Bruchmechanik und Bauteilsicherheit, online. doi: 10.48447/Br-2021-012.

Bachelor-, Master-, -Studien-, Diplomarbeiten und Promotionen

- (1) Starostin-Penner, Denis (2020) Neuronale Netze zur Erkennung von Ermüdungsrissen basierend auf digitaler Bildkorrelation. Masterarbeit, Hochschule Koblenz.

3. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Aufdickung des Hautfeldes im Bereich der Schweißnaht.....	4
Abbildung 1-2: Arbeitspaketübersicht von DaTMet.....	6
Abbildung 2-1: Ablaufplan zur Durchführung der biaxialen Ermüdungsversuche.....	9
Abbildung 2-2: Gewünschter Spannungsverlauf in der Schweißnaht	10
Abbildung 2-3: Biaxiale Kreuzprobe. Das Prüffeld ist in blau dargestellt, die Krafteinleitungsarme in grau	11
Abbildung 2-4: Mohrsche Spannungskreise zu den Spannungszuständen von Tabelle 2-1	12
Abbildung 2-5: Detailansicht der FE-Berechnung einer biaxialen Kreuzprobe im Bereich der Krafteinleitungsarme.	13
Abbildung 2-6: Schematische Skizze des parametrischen FE Modells der 420 mm x 420 mm Biax Probe zur Optimierung des Flächenpatches	14
Abbildung 2-7 Optimierter Patch von V1 zusammen mit den zugehörigen Prüflasten.....	17
Abbildung 2-8 Simulationsergebnisse des Prüfbereichs von V1. (a) Von Mises Vergleichsspannung und (b) Spannungskomponenten im Nahtbereich	18
Abbildung 2-9 Optimierter Patch von V2 zusammen mit den zugehörigen Prüflasten.....	19
Abbildung 2-10 Simulationsergebnisse des Prüfbereichs von V2. (a) Von Mises Vergleichsspannung und (b) Spannungskomponenten im Nahtbereich	20
Abbildung 2-11: Ermüdungsversuch unter biaxialer Belastung: a) LOP-haltige FSW 2024-T3 mit Patch und Krafteinleitungsarmen, b) Aufbau der Kreuzprobe in der biaxialen Prüfmaschine, c) stochastisches schwarz/weiß Muster für die DIC-Aufnahmen, d) intermittierende Belastungssequenz für die DIC-Bildgebung.....	21
Abbildung 2-12: DIC-Bilder mit Rissentstehung im Bereich des Spannungsplateaus der Kreuzprobe. Der pinke Kreis markiert den Riss.	22
Abbildung 2-13: Vergleich der DIC-Aufnahme mit den Ultraschall-Bildern vor und nach dem Ermüdungsversuch	23
Abbildung 2-14: Rissinitiierung in der Kreuzprobe; a) Querschliff der FSW 2024-T3 mit LOP mit Zwiebelring Muster, b) Halbelliptischer Ermüdungsriss und c) Rissinitiierung (grüne Rechtecke).....	24
Abbildung 2-15: Details von der Bruchfläche der Biax-Probe: a) Rissinitiierung, b) Onion ring Pattern	24
Abbildung 2-16: Biegetest: Einfluss der Schweißparameter auf die Größe des Schweißfehlers im Wurzelbereich	26
Abbildung 2-17: Einfluss der Drehzahl auf die Geometrie von LOP-behafteten AA2024-T3 FSW- Nähten: a) 1200 U/min, b) 1000 U/min und c) 800 U/min	27
Abbildung 2-18: Verlauf des LOP bei den Schweißungen BL1335 und BL1336.....	28
Abbildung 2-19: Auswirkung der Pin-Länge auf das Härteprofil von FSW-Nähten AA2024-T3 in 2 mm Dicke.....	29
Abbildung 2-20: Einfluss der Drehzahl auf das Härteprofil von FSW-Nähten in 2024-T3	30

Abbildung 2-21: Orientierung der Schweißnähte sowohl mit LOP als auch fehlerfrei, FSW 2024-T3; Dicke = 2 mm, (a) 0°; (b) 22,5° und (c) 45°	31
Abbildung 2-22: Mohrsche Spannungskreise zu den Spannungszuständen der Schweißnahtorientierungen	32
Abbildung 2-23: Versuchsaufbau des Ermüdungstests	33
Abbildung 2-24: Ermüdungslebensdauer von fehlerfreien und LOP-behafteten FSW-Verbindungen aus AA2024-T3 in 2mm Dicke	33
Abbildung 2-25: Ermüdungslebensdauer von fehlerfreien und LOP-behafteten FSW 2024-T3 Verbindungen im Verhältnis zu den Normalspannungen (a) σ_{yy}' , (b) σ_{xx}' sowie der (c) Schubspannung τ_{xy}'	34
Abbildung 2-26: DIC Bild mit Ermüdungsriß von (a) 0°- (b) 22.5- und (c) 45°-orientierten fehlerfreien FSW-Naht 2024-T3. Die pinken Linien markieren die Mitte der Schweißnaht	35
Abbildung 2-27: DIC Bilder von 0°-orientierten FSW-Nähten mit LOP zeigen den Ermüdungsriß kurz vor dem Bruch bei verschiedenen maximalen Hauptspannungen	36
Abbildung 2-28: Rissinitiierung (a,c) und Endphase des Risses (b,d) an der Werkzeugseite und Wurzelseite der LOP-0° Probe ermüdet mit $\sigma_{eqv} = 270$ MPa	37
Abbildung 2-29: DIC-Bilder der Entwicklung des Ermüdungsrisse bei der LOP-0° Probe ($\sigma_{eqv} = 270$ MP)	38
Abbildung 2-30: DIC Bilder von 22,5°-orientierten FSW-Nähten mit LOP zeigen den Ermüdungsriß vor dem Bruch. Die pinke Linie kennzeichnet die Mitte der Schweißnaht bzw. LOP.	39
Abbildung 2-31: DIC-Bilder mit Rissinitiierung (a,c) und Endphase des Risses (b,d) auf der Wurzelseite und Werkzeugseite der LOP-22,5° Probe ermüdet mit $\sigma_{yy}' = 256$ MPa	40
Abbildung 2-32: DIC-Bilder der Entwicklung des Ermüdungsrisse bei der LOP-22,5° Probe ($\sigma_{yy}' = 256$ MPa)	41
Abbildung 2-33: DIC Bilder mit Ermüdungsriß bei verschiedenen maximalen Hauptspannungen von 45°-orientierten FSW-Nähten. Die pinke Linie kennzeichnet die Mitte der Schweißnaht bzw. LOP.	42
Abbildung 2-34: DIC-Bilder mit Rissinitiierung (a,c) und Endphase des Risses (b,d) an der Wurzelseite und Werkzeugseite der LOP-45° Probe ermüdet mit $\sigma_{yy}' = 120$ MPa	43
Abbildung 2-35: Bruchflächen der LOP-0°-Proben entsprechend den DIC-Bildern in Abbildung 2-27. Die pinke Linie stellt die Grenze der LOPs dar.	44
Abbildung 2-36: Bruchflächen der LOP-22,5° Proben entsprechend den DIC-Bildern in Abbildung 2-30.....	46
Abbildung 2-37: Bruchflächen der LOP-45° Proben entsprechend den DIC-Bildern in Abbildung 2-33.....	47
Abbildung 2-38: Ablauf zur Untersuchung des Schädigungsprozesses unter Ermüdungsbelastung innerhalb einer Schweißnaht.....	50

Abbildung 2-39: Probengeometrie CT-Probe, einachsiger Spannungszustand	51
Abbildung 2-40: Aufbau Ermüdungsversuch: a) Maschinen-Übersicht mit horizontaler Probeneinspannung, b) Eingespannte Probe in der Bildmitte, dahinter die Kamera für die DIC-Aufnahmen mit Lichtquelle darüber	51
Abbildung 2-41: Tomographie-Aufnahmen des Risses zu verschiedenen Zeitpunkten des Rissverlaufs.....	52
Abbildung 2-42: DIC-Aufnahmen (bei Maximal-Last) während des Ermüdungsversuchs	53
Abbildung 2-43: Übersicht, Bruchfläche Ermüdungsprobe	54
Abbildung 2-44: Bruchbereiche.....	54
Abbildung 2-45: LOP-Bereich	55
Abbildung 2-46: Übergangsbereich (mittig) vom LOP (unten) zum Ermüdungsriss (oben)	55
Abbildung 2-47: Probe mit FSW-Naht im 45°-Winkel	56
Abbildung 2-48: Laststeigerungsversuche bei einer Probe mit 45° Schweißnaht (Probe 1219UDr3)	56
Abbildung 2-49: Mohrscher Spannungskreis	57
Abbildung 2-50: Simulierter Spannungsverlauf bei einer geraden (links) und einer schrägen (rechts) FSW-Naht.....	57
Abbildung 2-51: DIC-Bilder mit Rissentstehung in der WEZ (Draufsicht).....	58
Abbildung 2-52: Queransicht der Probe mit Bruch entlang der WEZ	58
Abbildung 2-53: Die FSW-Naht im Querschliff	59
Abbildung 2-54: DIC-Aufnahmen einer Ermüdungsprobe mit 30° Orientierung der Schweißnaht	60
Abbildung 2-55: Bruchverlauf der 30°-Probe (90x145mm)	61
Abbildung 2-56: Bruchbild mit Rissentstehung.....	62
Abbildung 2-57: Ultraschall-Bild mit LOP und verstärktem LOP	62

4. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Maximale Spannungen für Kreuzproben mit 1,8 mm Blechdicke	9
Tabelle 2-2 Maximale Spannungen für Kreuzproben mit 1,8 mm Blechdicke	15
Tabelle 2-3 Durchgeführte Optimierungs-Projekte	15
Tabelle 2-4 FSW Parameter für AA2024-T3 mit 2,0 mm Dicke.....	25
Tabelle 2-5: Zahlenmäßiger Nachweis.....	63

5. Literaturverzeichnis

1. **Breitbarth, Eric and Besel, Michael.** Energy based analysis of crack tip plastic zone of AA2024-T3 under cyclic loading. 2017, Vol. 100, 1, pp. 263-273.
2. **Mishra, R. S. and Z. Y. Ma.** Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports* 50(1-2). 2005, S. 1-78.
3. **Kim, Y. G. et al.** Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy. *Materials Science and Engineering: A* 415(1). 2006, S. 250-254.
4. **Li, B., et al.** The study on defects in aluminum 2219-T6 thick butt friction stir welds with the application of multiple non-destructive testing methods. *Materials & Design* 32(4). 2011, S. 2073-2084.
5. **Chen, H.-B., et al.** The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds. *Materials Science and Engineering: A* 433(1). 2006, S. 64-69.
6. **Arbegast, W. J.** A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding. *Scripta Materialia* 58(5). 2008, S. 372-376.
7. **Oosterkamp, A., et al.** Kissing bond'phenomena in solid-state welds of aluminum alloys. 83(8). 2004, S. 225.
8. **Dickerson, T. L. and J. Przydatek.** Fatigue of friction stir welds in aluminium alloys that contain root flaws. *International Journal of Fatigue* 25(12). 2003, S. 1399-1409.
9. **Sato, Y. S., et al.** FIB-assisted TEM study of an oxide array in the root of a friction stir welded aluminium alloy. *Scripta Materialia* 50(3). 2004, S. 365-369.
10. **Kadlec, M., et al.** Mechanical behaviour of AA 7475 friction stir welds with the kissing bond defect. *International Journal of Fatigue* 74. 2015, S. 7-19.
11. **Zhou, C., et al.** Effect of oxide array on the fatigue property of friction stir welds. *Scripta Materialia* 54(8). 2006, S. 1515-1520.
12. **Lomolino, S., et al.** On the fatigue behaviour and design curves of friction stir butt-welded Al alloys. *International Journal of Fatigue* 27(3). 2005, S. 305-316.
13. **Di, S., et al.** Comparative study on fatigue properties between AA2024-T4 friction stir welds and base materials. *Materials Science and Engineering: A* 435-436. 2006, S. 389-395.
14. **Zhou, C., et al.** Effect of root flaws on the fatigue property of friction stir welds in 2024-T3 aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: A* 418(1). 2006, S. 155-160.
15. **Besel, Y., et al.** Influence of joint line remnant on crack paths under static and fatigue loadings in friction stir welded Al-Mg-Sc alloy. 10(35). 2016, S. 295-305.
16. **Sander, H. Richard and M.** *Ermüdungsrischwachstum bei zyklischer Belastung mit konstanter Amplitude.* Wiesbaden, Germany : Springer Viewweg, 2012 .