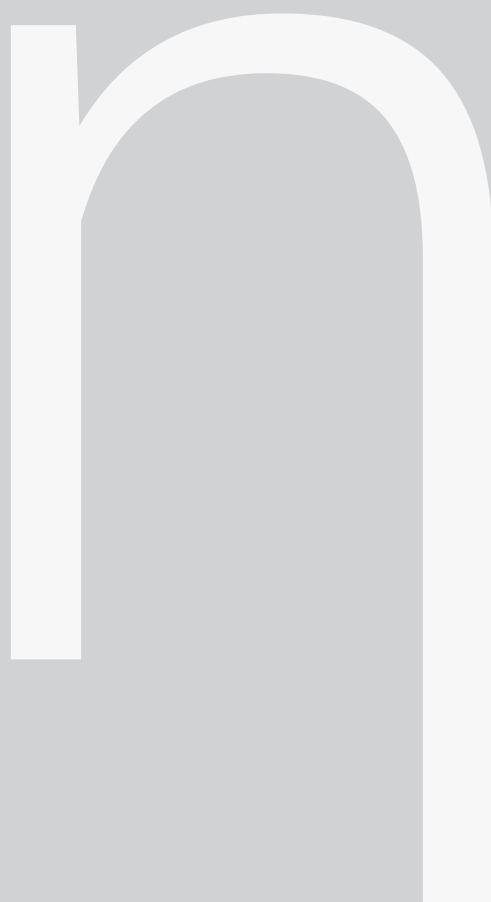


# FAT-Schriftenreihe 377

Untersuchungen zum Einfluss von feuchtem Wasserstoff auf die Spannungsrisskorrosionsempfindlichkeit von Aluminium-Legierungen für den Einsatz in Brennstoffzellenfahrzeugen

A large, white, lowercase letter 'n' is centered on a solid gray background. The letter is rendered in a clean, sans-serif font with a consistent stroke width.

# **Untersuchungen zum Einfluss von feuchtem Wasserstoff auf die Spannungsrissskorrosionsempfindlichkeit von Aluminium-Legierungen für den Einsatz in Brennstoffzellenfahrzeugen**

**Forschungsstelle**

Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsvereinigung Automobil-  
technik e.V. (FAT) gefördert.

# Prüfungsbericht

Spannungsrissskorrosionsempfindlichkeit der Legierung AW 6082a in feuchtem Wasserstoff

Berichts-Nr.: 9040010000\_rev1

Auftraggeber: Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.  
Projektgruppe Mobile Brennstoffzelle  
Behrenstraße 35  
10117 Berlin

Auftrags-Nr. (Kunde):

**Auftrags-Nr. (MPA): 904 0010 000**

**Prüfgegenstand: Wedge Opening Load Proben  
EN AW 6082A**

Prüfspezifikation mit  
Ausgabedatum: HPIS E 103:2018  
DIN EN ISO 7539-6:2018-12, DIN EN ISO 7866:2021-05  
ASTM E1681-03, PVP2020-21277

Eingangsdatum des  
Prüfgegenstandes:

Datum der Prüfung: 12.12.2022 - 18.07.2023

Datum des Berichts: 08.01.2024

Seite 1 von 64 Textseiten

Beilagen: 0

Anlagen: 0

Gesamtseitenzahl: 64

Anzahl der Ausfertigungen:

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Prüfgegenstände.

Veröffentlichung des vorliegenden Berichtes (auch auszugsweise) ist nur mit schriftlicher Genehmigung der MPA Universität Stuttgart zulässig.

## 1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Forschungsprojektes (FAT II) soll der Einfluss von feuchtem Wasserstoff auf die Spannungsrisskorrosionsempfindlichkeit der Aluminiumlegierung EN AW 6082A untersucht werden. Die durchgeführten Untersuchungen basieren auf dem Vorgängerprojekt FAT I „Wasserstoffkompatibilität von Aluminium-Legierungen für Brennstoffzellenfahrzeuge“.

Im Rahmen des Projekts sollen drei Legierungsvarianten von EN AW 6082A mit je zwei Proben in feuchtem Wasserstoff (70 ppm H<sub>2</sub>O) und feuchter Luft (90 %rF) bei 20-30°C auf Spannungsrisskorrosion nach HPIS E 103:2018 (Standard Test Method for Humid Gas Stress Corrosion Cracking of Aluminium Alloys for Compressed Hydrogen Containers, HPIS:High Pressure Institute of Japan) geprüft werden. Ein Vergleich der Ergebnisse zwischen feuchter Luft und feuchtem Wasserstoff ist durchzuführen.

## 2 Abkürzungsverzeichnis

HG-SCC: Humid Gas Stress Corrosion Cracking

R<sub>eg</sub>: garantierte Streckgrenze der Gasflasche

SLC: Rissbildung unter Dauerbeanspruchung (sustained-load cracking)

K<sub>IAPP</sub>: aufgebrachtelastischer Spannungsintensitätsfaktor, in Megapascal x Wurzelmeter

K<sub>I</sub>: tatsächlicher elastischer Spannungsintensitätsfaktor, in Megapascal x Wurzelmeter

K<sub>ISCC</sub>: kritischer Spannungsintensitätsfaktor für die Anfälligkeit für Spannungsrisskorrosion

E: Elastizitätsmodul, in Megapascal

R<sub>eSLC</sub>: Mittelwert der Streckgrenze für zwei Proben der geprüften Gasflasche

σ<sub>0,2</sub>: Mittelwert der Streckgrenze für zwei Proben der geprüften Gasflasche HPIS E 103:2018

P: Kraft in N

Y: Probenformabhängiger Geometriefaktor in Abhängigkeit von a/W zur Berechnung des Spannungsintensitäts K<sub>I</sub>

W (mm): Abstand von der Proben-Rückseite bis zur Lastangriffsebene

B (mm): Maß des Seitenabstands der untersuchten Probe

B<sub>N</sub> (mm): kleinstes Maß des Seitenabstands zwischen den Einkerbungen seitlich gekerbter Proben

C<sub>1</sub> (mm): Abstand von der Lastangriffslinie zur Messschneide (Schneidenversatz)

l (mm): effektive Kerblänge von der Lastangriffslinie bis zur erodierten Kerbe

V<sub>LL</sub> (mm) Auslenkung in der Lastangriffslinie

V<sub>0</sub> (mm) Auslenkung in der Messebene des Clip-on (Schneidenabstand)

a (mm): Abstand von der Risspitze, entweder bis zum Beginn der Kerbe, oder bis zur Lastangriffslinie, je nach der Probengeometrie

WOL: Wedge Opening Load

### **3 Verwendete Literatur und angewendete Normen**

FAT I: Wasserstoffkompatibilität von Aluminium-Legierungen für Brennstoffzellenfahrzeuge

HPIS E 103:2018: Standard Test Method for Humid Gas Stress Corrosion Cracking of Aluminium Alloys for Compressed Hydrogen Containers

DIN EN ISO 7539-6: Korrosion der Metalle und Legierungen – Prüfung der Spannungsrisskorrosion – Teil 6: Vorbereitung und Anwendung von angerissenen Proben für die Prüfung unter konstanter Last oder konstanter Auslenkung

DIN EN ISO 7866: Gasflaschen – Wiederbefüllbare nahtlose Gasflaschen aus Aluminiumlegierungen – Auslegung, Bau und Prüfung

ASTM E1681-03: Standard Test Method for Determining Threshold Stress Intensity Factor for Environment-Assisted Cracking of Metallic Materials

PVP2020-21277: San Marchi, Chris / Ronevich, Joseph / Schwarz, Martina, 2020, Effect of High-Pressure Hydrogen and Water Impurity on Aluminum Alloys

### **4 Durchgeführte Untersuchungen**

Im Rahmen des Projekts FAT II wurden Spannungsrisskorrosionsversuche an Wedge Opening Load Proben (WOL) nach HPIS E103:2018 an EN AW 6082A durchgeführt. Aus dem Vorgängerprojekt FAT I: „Wasserstoffkompatibilität von Aluminium-Legierungen für Brennstoffzellenfahrzeuge“ lagen hierzu bereits gefertigte Proben nach ASTM E1681-03 (2020) mit Seitenkerben der damals betrachteten Varianten A und B der Aluminiumlegierung EN AW 6082A vor. Die Dicke B dieser Proben betrug 18 mm. Zur Ergänzung wurden im Projekt FAT II weitere WOL-Proben aus einem Bauteil der Aluminiumlegierung EN AW 6082A gefertigt. Diese Proben wurden gemäß DIN EN ISO 7539-6 gefertigt. Ihre Dicke B beträgt 18 mm. In Tabelle 1 sind die verschiedenen Legierungsvarianten der Aluminiumlegierung EN AW 6082A hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung einander gegenübergestellt.

Tabelle 1: Legierungszusammensetzung EN AW 6082A Variante A, B, C.

[wt%]	Mg	Si	Mn	Cu	Cr	Fe	Zn	Ti	Pb	Bi
<b>6082A A -T6</b>	1,2	0,7	0,5	0,02	0,02	0,41	0,14	0,03	0,002	0,003
<b>6082A B -T6</b>	0,6	1,3	0,02	0,01	0,02	0,42	0,14	0,03	0,002	0,002
<b>6082A C -T6</b>	0,99	0,96	0,72	0,03		0,23			0,002	<0,0001
<b>DIN EN 573-3</b>	0,6-1,2	0,7-1,3	0,4-1,0	≤0,1	≤0,25	≤0,5	≤0,2	≤0,1	≤0,003	≤0,003

In Fortsetzung der Bezeichnungen aus dem Vorgängerprojekt wurden die im Projekt FAT II untersuchten Proben nach folgendem Schema bezeichnet:

- Proben der Legierungsvariante A (203 MPa Streckgrenze) sind vorne mit „5“ bezeichnet
- Proben der Legierungsvariante B (310 MPa Streckgrenze) mit „6“
- Proben der Legierungsvariante C (310 MPa Streckgrenze) wurden von 1 bis 5 durchnummeriert.

#### **4.1 Verfahrensbeschreibung der durchgeführten Spannungsrissskorrosionsversuche mit WOL-Proben**

Bei den durchgeführten Spannungsrissskorrosionsversuchen wird durch zyklische Belastung ausgehend von einem erodierten Startkerb ein Riss in die Probe eingebracht. Anschließend werden die Proben unter konstanter Verformung in festgelegten Umgebungsbedingungen ausgelagert. Nach der Auslagerung der Probe wird beurteilt, ob und in welchem Ausmaß ein Rissfortschritt während der Auslagerung eingetreten ist.

##### **4.1.1 Normen und Zusammenhänge**

Die Versuche sollten nach HPIS E103: 2018 (High Pressure Institute of Japan) durchgeführt werden. Die HPIS E103: 2018 verweist umfassend auf DIN EN ISO 7539-6:2011 und DIN EN ISO 7866:2012. Da für die Legierungsvariante A und B aus dem Vorgängerprojekt FAT I bereits nach ASTM E1681-03 gefertigte Proben vorlagen, wurde zur besseren Vergleichbarkeit zum Vorgängerprojekt für diese Proben das gleiche Vorgehen wie im Vorgängerprojekt angewandt. Die Versuchsdurchführung an den in FAT II gefertigten Proben der Legierungsvariante C wurde an das Vorgängerprojekt und an die HPIS E103:2018 angelehnt.

Für die aus FAT I stammenden Proben der Legierungsvarianten A und B sind in der ASTM E1681-03 keine Nachgiebigkeitskurven angegeben. Für diese wurde daher analog zu FAT I eine aus der Kooperation zwischen den Sandia National Labs (USA) und der MPA Stuttgart bekannte Nachgiebigkeitskurve verwendet. Für die Legierungsvariante C wurde die in Bild 19 der DIN EN ISO 7539-6:2018 abgebildete Nachgiebigkeitskurve verwendet.

Das allgemeine Vorgehen im Projekt FAT II orientiert sich am Projekt FAT I. Auf Abweichungen gegenüber den Normen HPIS E103 und ASTM E1681, die sich aus dem vorliegenden Probenmaterial und der Datenlage ergaben, wird jeweils im Bericht hingewiesen.

#### 4.1.2 Probenfertigung und Geometrie

Wie bereits dargestellt, lagen durch das Vorgängerprojekt bereits drei WOL-Proben nach ASTM E1681-03 für die Legierungsvarianten A und B vor. Diese waren bereits mit 5 % Seitenkerbe ausgeführt (ohne Schwingriss).

Für die Legierungsvariante C wurden Proben gefertigt. Für die Probenentnahme stand das in Bild 1 dargestellte Bauteil zur Verfügung. Für die Legierungsvariante C wurde die WOL-Probenform aus DIN EN ISO 7539-6 verwendet (siehe Bild 5). Für das Bauteil nach Bild 1 wurde anhand von zwei metallographischen Schlifften die Walzrichtung bestimmt, siehe Bild 2, Bild 3, Bild 4. Die Probenentnahme erfolgte mit der geplanten Rissfortschrittsrichtung parallel zur Walzrichtung. Dies führt in der Rissebene zu vielen Korngrenzen, vgl. Bild 3.



Bild 1: Übersicht Bauteil Legierungsvariante C mit Walzrichtung und Entnahmerichtung der Proben mit Richtung des Schwingrisses.



Bild 2: Abschnitt des Bauteils zur Bestimmung der Walzrichtung. Eingezeichnet ist der Querschliff (SQ) und der Längsschliff in (SL) Bezug auf den Abschnitt

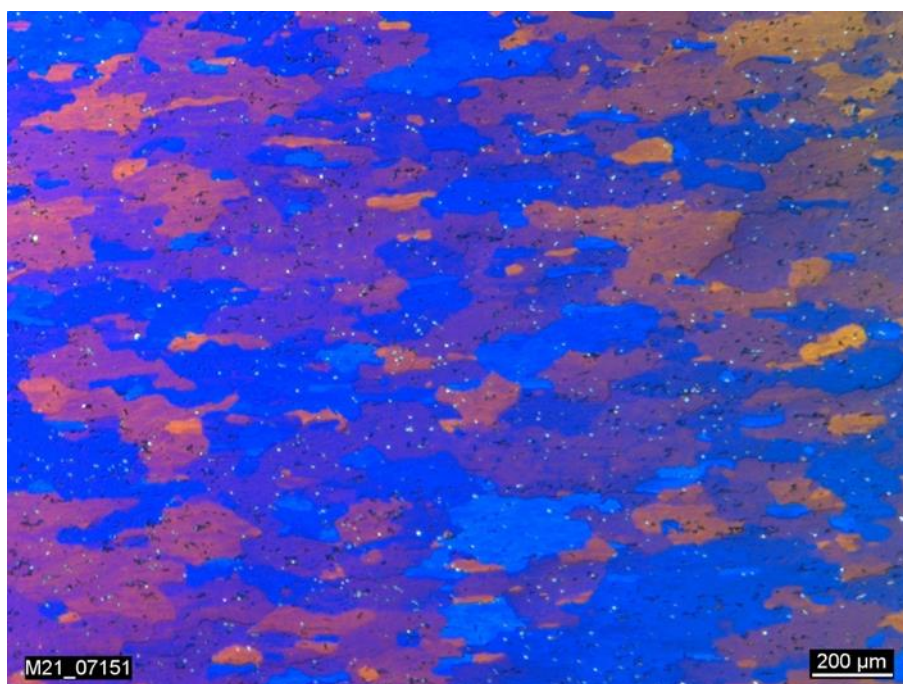


Bild 3: Schliff SL quer zur Walzrichtung, senkrecht zur Rissfortschrittsrichtung (Barker Ätzung)



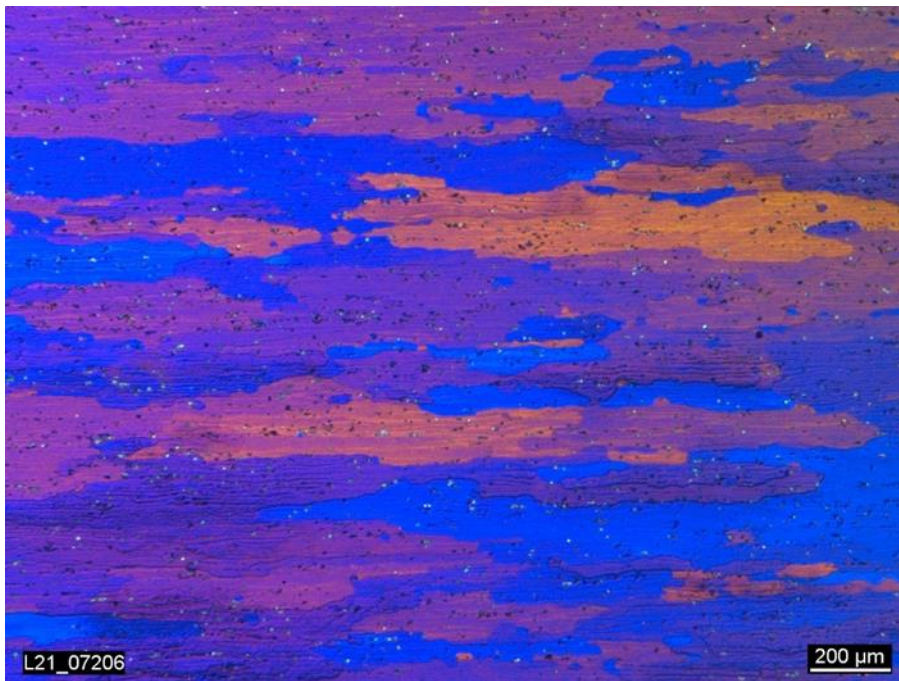
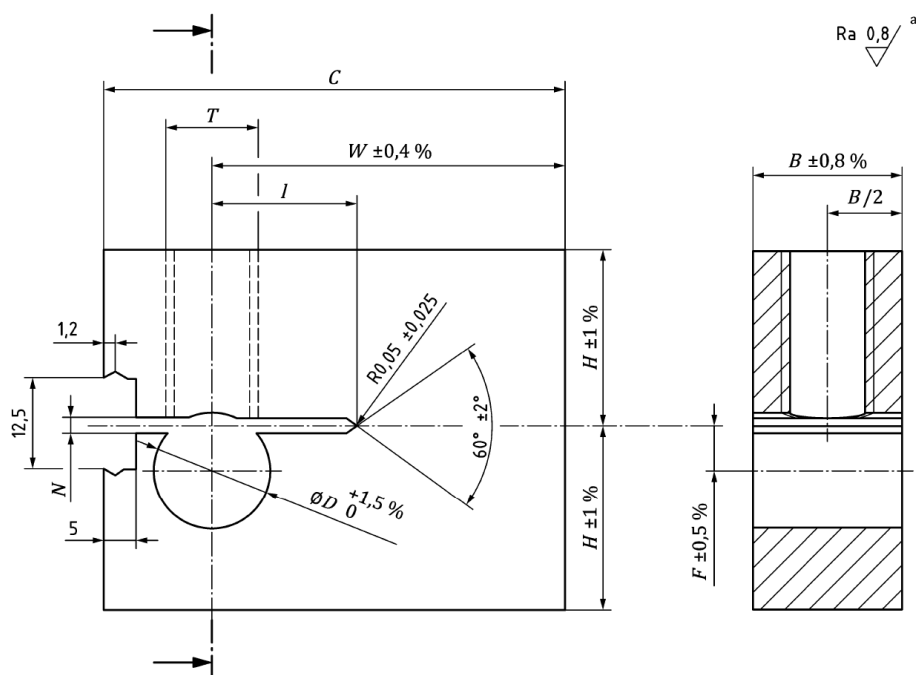


Bild 4: Schliff SQ längs in Walzrichtung parallel zur Rissfortschrittsrichtung (Barker Ätzung)

Die WOL-Probenform nach ASTM E1681-03 (2020) und DIN EN ISO 7539-6 unterscheiden sich bei gleicher Dicke ( $B=18$  mm) signifikant in der Nettobreite ( $W$ ), der halben Höhe ( $H$ ) und hinsichtlich des Verhältnis effektive Kerblänge zu Nettobreite ( $a/W$ ) vor dem Einbringen des Startrisses.

Die ASTM E1681-03 (2020) fordert eine Anfangsrissslänge von  $a/W = 0,45 - 0,55$ . Im Gegensatz dazu erfordert dies die DIN EN ISO 7539-6 nicht. Entsprechend der Vorgabe aus der Norm besitzen die Proben der Legierungsvariante A und B ein minimales  $a/W$  Verhältnis von 0,45. Bei Proben der Legierungsvariante C wurde ein minimales  $a/W$  Verhältnis von 0,3 verwendet. In Folge des geringen  $a/W$  Verhältnisses der Proben nach DIN EN ISO 7539-6 kann das zum Verspannen der Probe genutzte Gewinde sehr hoch belastet sein. Hieraus können potenziell plastischer Verformung im Gewinde resultieren, aus denen wiederum ein potenzieller Beanspruchungsverlust an der Rissspitze resultieren könnte.

Für die Aufbringung der Belastung wurde eine verzinkte Sechskantschraube M8x30 – 8.8 eingesetzt, als Gegenstück in der Querbohrung der Probe fungiert ein Bolzen mit Durchmesser 8 mm aus 1.4301. Dieser wurde eingesetzt, um eine definierte und zentrierte Krafteinleitung in die Querbohrung zu erreichen. Die Kraft auf den Bolzen führte zu einem Einsinken der Schraube in den Bolzen.



**Legende**

<i>B</i>	Dicke	
<i>W</i>	Nettobreite	= 2,55 <i>B</i>
<i>C</i>	Gesamtbreite	= 3,20 <i>B</i>
<i>H</i>	halbe Höhe	= 1,24 <i>B</i>
<i>D</i>	Bohrungsdurchmesser	= 0,718 <i>B</i> ± 0,003 <i>B</i>
<i>l</i>	effektive Kerblänge	= 0,77 <i>B</i>
<i>N</i>	Kerbbreite	= 0,06 <i>B</i>
<i>T</i>	Gewindedurchmesser	= 0,625 <i>B</i>
<i>F</i>	Abstand der Mittellinien von Schraube und Kerbe	= 0,239 <i>B</i>
<sup>a</sup>	für alle Flächen	

Bild 5: WOL Probengeometrie DIN EN ISO 7539-6:2018

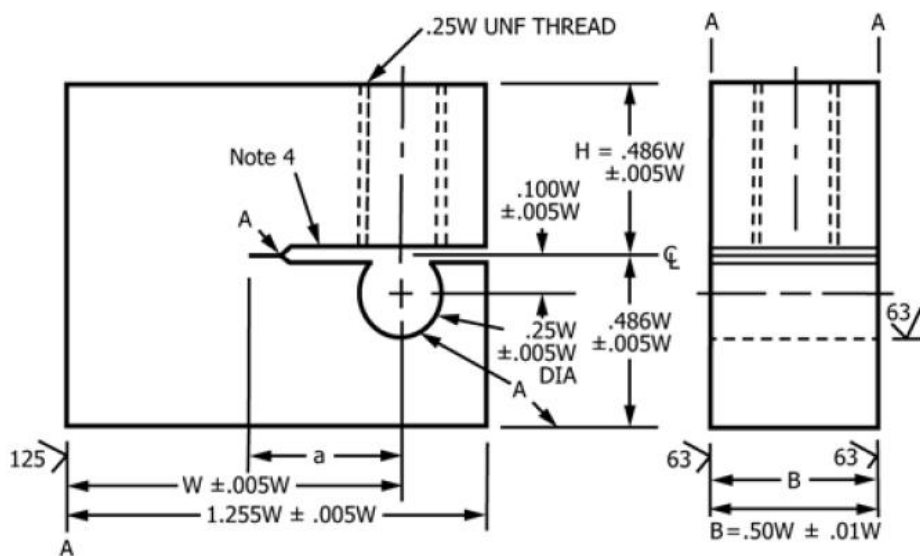


Bild 6: WOL Probengeometrie ASTM E1681-03

#### 4.1.3 Nötige Kennwerte zur Durchführung

Nach HPIS E103 2018 / DIN EN ISO 7866 sind folgenden Bedingungen beim Einbringen des Ermüdungsrisses einzuhalten:

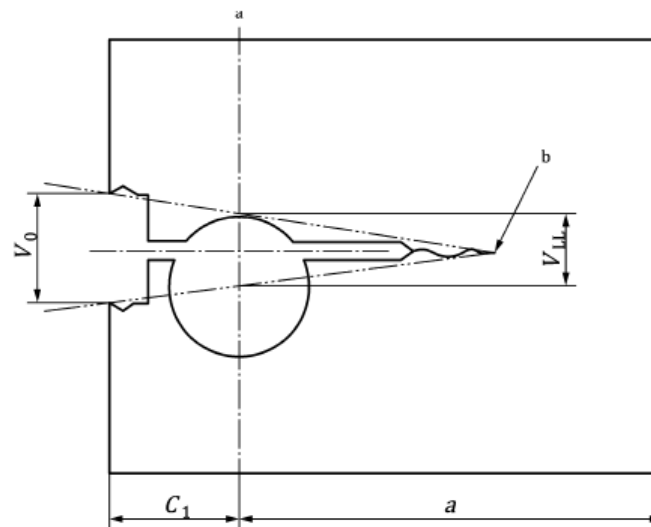
Der Riss muss entweder 2,5 % von  $W$  betragen oder 1,25 mm lang sein, es gilt der größere Wert.  $K_{IAPP}$  wird für die Versuchsdurchführung und für die maximalen  $K_I$  Werte zum Einbringen des Ermüdungsrisses benötigt. Dies berechnet sich wie folgt:

$$K_{IAPP} = 0,056 R_{egSLC} \text{ DIN EN ISO 7866: 2021}$$

$$K_{IAPP} = 0,056 \sigma_{0.2} \text{ HPIS E 103:2018}$$

Bereits im Vorgängerprojekt FAT 1 I wurden für die untersuchten Legierungsvarianten Zugversuche durchgeführt und die realen Streckgrenzen ( $R_{eSLC}$ ) der Werkstoffe ermittelt. Im vorliegenden Vorhaben FAT II wurde mittels zusätzlicher Zugversuche an den Legierungsvarianten diese Datenbasis erweitert. Die ermittelte reale Streckgrenze ( $R_{eSLC}$ ) der jeweiligen Legierungsvariante wurde für die Ermittlung von  $K_{IAPP}$  anstatt der in DIN EN ISO 7866 Kapitel 4 und B6.2 definierten *garantierte Streckgrenze der Gasflasche* ( $R_{eg}$ ) verwendet. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da das in der HPIS E103 definierte Vorgehen nicht zwischen dem garantierten und dem realen Wert für die Streckgrenze unterscheidet.

Die spätere Belastung sowie die daraus resultierende Rissöffnung wurde für die Lastangriffslinie / Load Line (LL) berechnet. Für die Probenform der DIN EN ISO 7539-6:2018 musste hierzu der Wert  $V_{LL}$  bestimmt werden.



$$V_{LL} = \frac{V_0}{\left(1 + \frac{3c_1}{2a}\right)}$$

- a Last
- b Risspitze

Bild 7: Maßverhältnis und Beziehung zwischen  $V_0$  und  $V_{LL}$

#### 4.1.4 Probenvorbereitung, Ausmessen, Compliance

Die gefertigten Proben wurden vermessen (vgl. Bild 5) und anschließend im Ultraschallbad mit Ethanol gereinigt. Für die Proben nach DIN EN ISO 7539-6 wurden Gewinde M 2,5 zu Befestigungen der Schneide eingebracht, um einen vorhandenen Clip-on nutzen zu können. Die Dicke der Schneiden von 0,225 mm wurde im weiteren Verlauf der Untersuchungen vernachlässigt. Aufgrund der Seitenkerben musste die Risslänge über die Compliance der Probe ermittelt werden anstatt über das Ausmessen des Rissfortschrittes an der Probenoberfläche jeder Seite. Dies ist notwendig, da beim Einbringen des Schwingrisses einer bereits seitengekerbten Probe der Riss durch die Kerbe optisch nicht mehr richtig erkannt werden kann. Die Compliance ist die Wegänderung am Clip-on geteilt durch die anliegende Kraft in mm/N:

$$C = \frac{COD (mm)}{Kraft (N)}$$

Für die Compliancemessung muss die Kraft niedriger als die letzte Laststufe der zyklischen Belastung zur Risseinbringung sein. Es wurden erst drei Setzzyklen mit geringer Kraft gefahren (500 N - 1000 N), dann wurden drei Initials (1000 N - 2000 N) auf die Probe aufgebracht. Aus den drei Initials wurde die Compliance errechnet. Nach dem Einbringen des Schwingrisses wurde die Compliance erneut gemessen. Anhand des Unterschieds der Compliance vor dem Einbringen des Schwingrisses und nach dem Einbringen des Schwingrisses wurde die Risslängenänderung errechnet.

#### 4.1.5 Ermüdungsriß

Nach HPIS E 103:2018 muss die Risslänge des Ermüdungsrissses entweder 2,5% von W, eine Länge von 1,25 mm, oder folgende Länge a aufweisen:

$$a \geq 1,27 \left( \frac{K_{IAPP}}{R_{egSLC}} \right)^2 \times 1000$$

Der größere Wert gilt. Das Einbringen des Ermüdungsrissses soll mit einem R-Verhältnis von 0 - 0,1 und mit weniger als 60% des erwarteten  $K_{ISCC}$  bei den letzten 0,5 mm Risswachstum erfolgen. Der Anfangswert für  $K_I$  darf über  $K_{IAPP}$  liegen. Bei den Legierungsvarianten A und B wurde die minimale Länge des Schwingrissses gemäß ASTM E1681 auf 1,8 mm festgelegt. Das Einbringen des Ermüdungsrissses erfolgte in 2 Stufen.

#### 4.1.6 Berechnung der Risslänge und der Kraft für KI-Applied

Formeln:

$$B_{eff} = \sqrt{B * B_N}$$

EBV<sub>LL</sub>/P: Die Nachgiebigkeitskurve bezieht sich auf die Lastangriffslinie. Für die rechnerische Bestimmung der Compliance muss der Schneidensersatz beachtet werden. (Kennlinie):

$$V_{LL} = \frac{V_0}{\left(1 + \frac{3C_1}{2W}\right)}$$

Zur Überprüfung der Risslänge können aufgrund der Seitenkerben keine optischen Verfahren angewendet werden, weshalb die zuvor vorgestellte Compliance-Methode angewendet wurde. Diese Methode beruht auf dem Vergleich des Verhältnisses von Dehnungsinkrement zu Kraftinkrement (vgl. ASTM 1820). Die Berechnung der Risslänge über die Compliance beruht auf dem a/W Verhältnis und der Anpassung des E-Moduls. Die effektive Kerblänge wurde vor dem Einbringen des Ermüdungsrissses mit einem Profilprojektor vermessen. Die Compliance wird im Anschluss experimentell ermittelt. Durch das Ausmessen der Startkerbe wurde das momentane a/W Verhältnis ermittelt. Der experimentell ermittelte Wert wird über das Produkt aus: Kehrwert  $B_N$  multipliziert mit dem E-Modul, mit der Geometriefunktion der Nachgiebigkeitskennlinie multipliziert und ggfs. durch einen Korrekturfaktor für die Lastangriffslinie dividiert:

$$C = \frac{1}{B_N \times E} \times \frac{\text{Kennlinie}}{V_{LL}}$$

Für Legierungsvariante A und B wurde die Nachgiebigkeitskennlinie aus dem Vorgängerprojekt von Sandia National Lab für die WOL Probenform aus ASTM E1681 verwendet, für die Legierungsvariante C wurde die Kennlinie „für experimentell 5% gekerbte Probe“ (Bild 8) verwendet. Für beide Kurven existiert eine rechnerische Kurvenanpassung. Die experimentell ermittelte Compliance wurde mit der rechnerischen Compliance abgeglichen, indem die Compliance für das

$a/W$  Verhältnis der Startkerbe errechnet wurde und über die Veränderung des E-Moduls die rechnerische Compliance an die experimentelle Compliance angeglichen wird. Das für die Berechnung verwendete E-Modul sollte nicht mehr als 10 % vom experimentell ermittelten E-Modul abweichen. Nach dem Einbringen des Ermüdungsrisses in die Probe, wird die Compliance erneut experimentell bestimmt. In der gerechneten Compliance wird nun die experimentell ermittelte Compliance für die Risslänge gesucht um daraus das zugehörige  $a/W$  Verhältnis abzuleiten. Dies kann auch rechnerisch über einen Solver gelöst werden. Aus dem  $a/W$  Verhältnis kann die Länge der Risslänge ermittelt werden. Bedeutende Ungenauigkeiten in der Berechnung bilden die geometrie- und werkstoffabhängige Nachgiebigkeitskurve sowie die Kontur des Ermüdungsrisses. Die benötigte Belastung  $P$  in Newton für die benötigte Spannungsintensität  $K_{IAPP}$  wird über folgende Formel ermittelt:

$$P = \frac{B_{eff} \sqrt{a} K_{IAPP}}{Y}$$

Für die Probenform aus ASTM E1681-03 (2020) wurden die Formeln aus dem PVP2020-21277 verwendet.

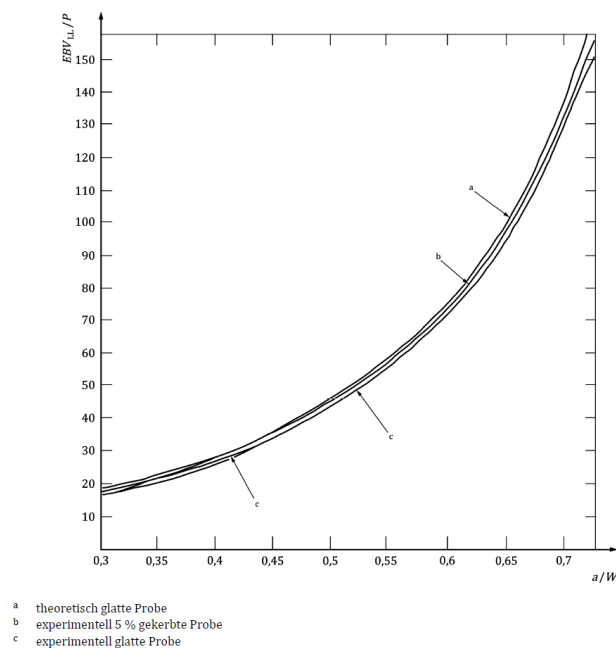


Bild 8: Nachgiebigkeitskennlinie aus DIN EN ISO 7539-6: „Bild 19 — Gegenüberstellung der Nachgiebigkeit von WOL-Proben in der Mitte der Kraftangriffslinie“

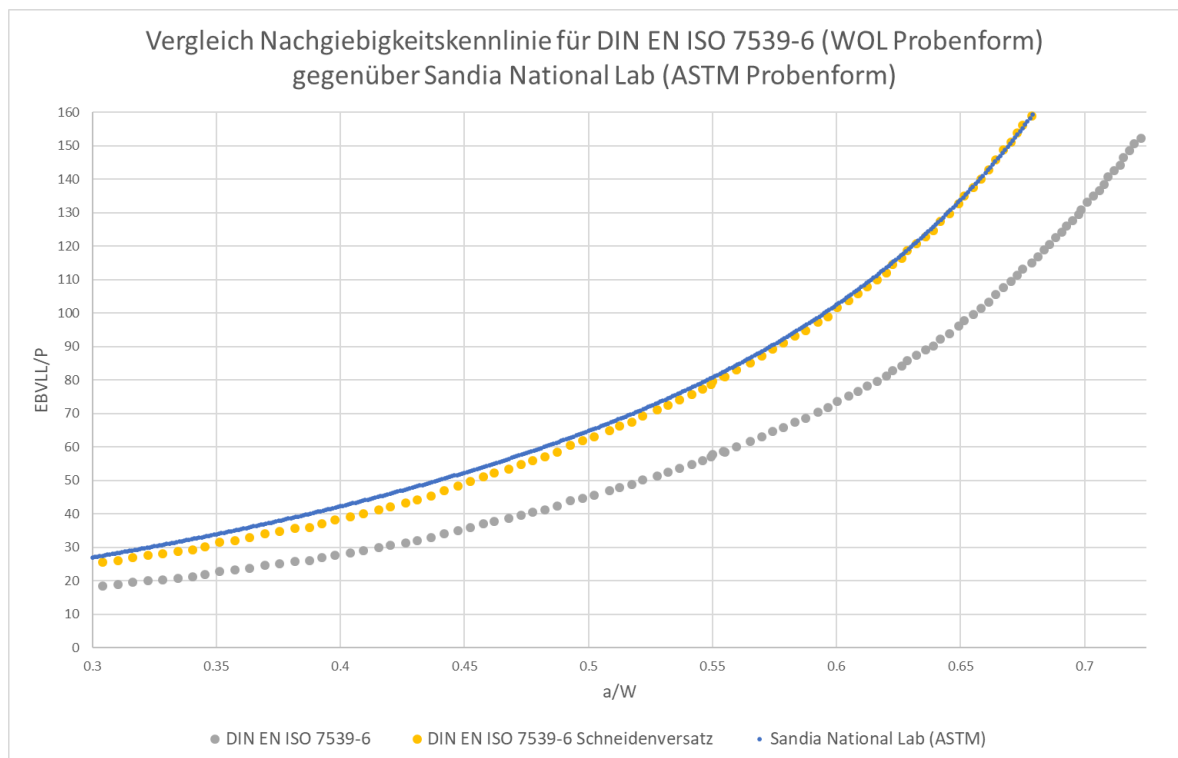


Bild 9: Vergleich Nachgiebigkeitskennlinie für DIN EN ISO 7539-6 (WOL Probenform) gegenüber Sandia National Lab (ASTM Probenform). Gelbe Kurve aus DIN EN ISO 7539-6 (Schneiderversatz) ist von der Kraftangriffslinie um die Entfernung  $C_1$  auf die Linie des Clip-on  $V_0$  (Bild 7) korrigiert. Kurve von Sandia National Lab ist schon für die Linie des Clip-on mit Schneiderversatz berechnet.

#### 4.1.7 Aufbringen der Anfangslast

Die Probe kann unter konstanter Last oder konstanter Auslenkung geprüft werden (HPIS E103 2018 Kapitel 7.1). Bei allen Proben wurde die konstante Auslenkung über eine Schraube gewählt. Zur Einstellung des benötigten  $K_I$  wurde die Probe mit einem Clip-on versehen. Die Probe wurde in der Universalprüfmaschine RMC 100mP (Gerätenummer H2917-006-52220), mit der benötigten Last  $P$  belastet und die Wegänderung des Clip-on Sandner4 (Gerätenummer: H8720-039-55210), aufgezeichnet. Die Probe wurde dann entlastet und ausgebaut ohne den Clip-on zu entfernen. In die Querbohrung der Probe wurde ein Bolzen aus dem Werkstoff 1.4301 mit Durchmesser 8 mm eingeschoben. Die Probe wurde über eine Schraube, die auf den Bolzen in der Lastangriffslinie drückt, vorgespannt, bis die Wegänderung am Clip-on der Wegänderung unter der Last  $P$  entsprach. Anschließend wurde der Clip entfernt. Die Messsignale wurden aufgezeichnet.

#### 4.1.8 Versuchsdurchführung

Die Auslagerungsdauer aller Proben in den betrachteten Medien lag bei 90 Tagen. Eine Hälfte der Proben wurde für 90 Tage in einer feuchten Luftatmosphäre mit 90 % Luftfeuchtigkeit bei 20 °C

ausgelagert, die andere Hälfte in feuchtem Wasserstoff (70 ppm H<sub>2</sub>O) unter einem Druck von 100 bar bei Raumtemperatur.

Für die Auslagerung in feuchter Luftatmosphäre kam ein Klimaschrank „Vötsch VCS 7033“ der MPA Stuttgart zum Einsatz. Die Istwerte der Temperatur und Luftfeuchte im Klimaschrank wurden regelmäßig überprüft. Während der Auslagerungszeit konnten keine Abweichungen von den zuvor genannten Parametern beobachtet werden.

Für die Auslagerung im feuchten Wasserstoff wurde ein Autoklav konzipiert, gefertigt und aufgebaut. Der Aufbau des Autoklaven ist in Bild 10 dargestellt. Nach erfolgreicher Inbetriebnahme wurden mit diesem Autoklav die Auslagerungen in feuchtem Wasserstoff durchgeführt. Für die Versuchsdurchführung wurden zwei T50-Gasflaschen des Prüfgases beschafft, wobei während der kompletten Versuchsdurchführung lediglich Prüfgasflasche Nr. 1 verwendet wurde.

Vor Beginn der Auslagerung wurde der Autoklav in Anlehnung an CSA ANSI/CSA CHMC 1-2014 mittels mehreren Druckspülzyklen gespült. Dabei wurden zuerst fünf Spülzyklen mit 10 bar Helium und anschließend fünf Spülzyklen mit 10 bar feuchtem Wasserstoff durchgeführt.

Zur Überprüfung der Gasqualität während der Versuchsdurchführung wurden zu Beginn und nach Abschluss der Auslagerung Gasproben des feuchten Wasserstoffs entnommen und von der Fa. Westfalen AG analysiert. Bild 11 zeigt einen Auszug des Analysenzertifikats des Prüfgases nach Versuchsbeginn. Auffällig ist, dass der Istwert der Feuchte nicht konkret beziffert wurde und deutlich unter den erwarteten 70 ppm des Prüfgases liegt. Um weitere Einblicke zu erhalten, wurde parallel zur Versuchsdurchführung mit Prüfgasflasche Nr. 1 die Prüfgasflasche Nr. 2 einer Analyse unterzogen. Die Analyse nach Bild 12 bestätigt, dass die Prüfgasflasche Nr. 2 den erwarteten Feuchtegehalt aufweist. Da beide Prüfgasflaschen die gleiche Historie erfahren haben, ist davon auszugehen, dass auch in Prüfgasflasche Nr. 1 während der Versuchsdurchführung der erwartete Feuchtegehalt vorlag. Dies konnte nach Versuchsende über eine Analyse der Prüfgasflasche Nr. 1 bestätigt werden, siehe Bild 13. Bei der nach Versuchsende durchgeführten Analyse des Prüfgases konnte ein ausreichender Feuchtegehalt von 75,00 ppm gemessen werden.

Auf Seiten der Fa. Westfalen AG als auch auf Seiten der MPA Stuttgart liegen keine Erklärungen vor, warum eine zum Erwartungswert abweichende Feuchte bei der Analyse der Gasprobe vor Versuchsbeginn beobachtet wurde, wohingegen die analysierte Feuchte in den Prüfgasflaschen und der Gasprobe nach Versuchsende dem Erwartungswert entsprach.





Bild 10: Aufbau Prüfstand für Auslagerung der Proben in feuchtem Wasserstoff

Kundenmaterial: (material no.)	Behälternummer: (cylinder no.)	27600503188386	Gemischnummer: (gasmixture no.)	G329595
<b>Bestandteil (component)</b>	<b>Sollwert (nominal value)</b>	<b>Istwert (analytical value)</b>	<b>Einheit <sup>1)</sup> (unit)</b>	<b>Analysentoleranz <sup>2)</sup> (analytical accuracy)</b>
Wasserstoff 5.0 [H2]	100,00	-	%	
Sauerstoff [O2]	2,00	<= 2,00	ppm	
Feuchte [H2O]	10,00	<= 10,00	ppm	

Bild 11: Auszug Analysenzertifikat nach Versuchsbeginn

Bd. / Fl.-Nr.	Druck p [bar]	Komponente	Sollwerte lt. Spezifikation	Meßergebnis aus Zertifikat Messung vor Auslieferung	Meßergebnis Reklamation
27600505100114	100,00	Wasser [H2O]	.. 70,000 Vol. ppm	75,60 Vol. ppm	76,000 Vol. ppm
		Wasserstoff 6.0 [H2]	Restkomponente		

Bild 12: Auszug Analysenzertifikat der Prüfgasflasche Nr. 2

Bd. / Fl.-Nr.	Druck p [bar]	Komponente	Sollwerte lt. Spezifikation	Meßergebnis aus Zertifikat Messung vor Auslieferung	Meßergebnis Reklamation
27600505100115	130,00	Wasser [H2O]	.. 70,000 Vol. ppm	75,60 Vol. ppm	77,500 Vol. ppm
		Wasserstoff 6.0 [H2]	Restkomponente		

Bild 13: Auszug Analysenzertifikat der Prüfgasflasche Nr. 1

Kundenmaterial: (material no.)	Behälternummer: (cylinder no.)	27600505735600	Gemischnummer: (gasmixture no.)	G329595
<b>Bestandteil (component)</b>	<b>Sollwert (nominal value)</b>	<b>Istwert (analytical value)</b>	<b>Einheit <sup>1)</sup> (unit)</b>	<b>Analysentoleranz <sup>2)</sup> (analytical accuracy)</b>
Wasserstoff 5.0 [H2]	100,00	-	%	
Sauerstoff [O2]	2,00	6,89	ppm	
Feuchte [H2O]	10,00	75,00	ppm	

Bild 14: Auszug Analysenzertifikat nach Versuchsende

#### 4.1.9 Versuchsentlastung

Nach dem Ende der Auslagerung wurden die Proben entlastet und hierbei die Restkraft ermittelt. Hierfür wurde derselbe Clip-on wie bei der Belastung verwendet, um die Verschiebung bei der Entlastung zu messen. Anschließend wurde diese Verschiebung mit der Prüfmaschine angefahren und die dafür benötigte Kraft aufgezeichnet. Nach HPIS E103 2018 7.3.2 darf die hierfür erforderliche Kraft nicht weniger als 95% der Anfangskraft betragen. Bei weniger als 95% der Anfangslast ist eine Risserweiterung von mehr als 0,16 mm zu erwarten.

Die Proben wurden im nächsten Schritt nochmal mit bis zu 60 % der Last von  $K_{IAPP}$  schwingend beansprucht, bis der Riss um mindestens 1 mm gewachsen war. Im Anschluss wurden die Proben aufgebrochen.

#### 4.1.10 Versuchsauswertung und Validierung

Für die Auswertung und Überprüfung der Gültigkeit wurde die Startrisslänge vor der Prüfung und die Risslänge nach der Prüfung anhand der Rastlinien im Rasterelektronenmikroskop (REM) bei 25 %, 50 % und 75 % der Probenbreite mit einer Genauigkeit kleiner 0,01 mm ausgemessen ( $\alpha_{pre}$  und  $\alpha_{SCC}$ ). Wenn dies nicht möglich war, wurde eine Makroaufnahme verwendet. Der Mittelwert der drei Werte wurde als Risslänge verwendet. Hinsichtlich der  $\alpha_{pre}$  Werten darf der Unterschied zwischen dem kleinsten und größten Wert 5% von W nicht überschreiten. Die Kennwerte a, (W-a) und B müssen die folgenden Bedingung erfüllen:

$$a, B, B_N(W - a) \geq 1,27 \left( \frac{K_I}{R_{egSLC}} \right)^2 \times 1000$$

für ausgelenkte Proben gilt:

$$a_{pre}, B, B_N(W - a_{pre}) \geq 1,27 \left( \frac{K_{IAPP}}{R_{egSLC}} \right)^2 \times 1000$$

Die Gültigkeit des Versuchs und ob ein Werkstoff die Prüfung bestanden oder nicht bestanden hat ergibt sich anhand der in Tabelle 2 dargestellten Zusammenhänge. Der Versuch wird je nach dem Unterschied zwischen der Risslänge nach dem Versuch gegenüber der Risslänge vor dem Versuch, sowie dem Verhältnis des tatsächlichen Spannungsintensitätsfaktors gegenüber dem aufgetragenen Spannungsintensitätsfaktor in 4 Fälle eingeordnet, siehe Tabelle 2.

Tabelle 2: „HPIS E103 2018 Qualification of materials (Page 8)“

Case	Crack extension	$K_{IA}$ versus $K_{IAPP}$	Judge <sup>a</sup>
I	$(a_{SCC} - a_{pre}) \leq 0.16$ mm	$K_{IA} < K_{IAPP}$	invalid
II		$K_{IA} \geq K_{IAPP}$	pass
III	$(a_{SCC} - a_{pre}) > 0.16$ mm	$K_{IA} \leq K_{IAPP}$	fail
IV		$K_{IA} > K_{IAPP}$	invalid

<sup>a</sup> Material shall be judged as follows.

pass :Materials that satisfy this requirement are judged to have applicable resistance to HG-SCC for compressed hydrogen containers as specified in **B.7.3 of ISO 7866:2012**.

fail :Materials are judged to be failed for application for compressed hydrogen containers.

invalid : Materials cannot be judged in these conditions.

In case I , another testing is recommended in the condition  $K_{IA}$  equals to  $K_{IAPP}$  or is in some degree greater than  $K_{IAPP}$ .

In case IV, where  $K_{IA}$  is considerably greater than  $K_{IAPP}$ , another testing is recommended because materials may pass in the condition  $K_{IA}$  is a little greater than  $K_{IAPP}$ .

## 4.2 Beispiel zur Berechnung der Risslänge und der Kraft für $K_{IAPP}$ über die Compliance anhand der Probe 4

### 4.2.1 Benötigte geometrische Größen

Im ersten Schritt müssen die geometrischen Größen (siehe Bild 5 & Bild 7) an der Probe ausgemessen werden. An Probe 4 wurden folgende Werte ermittelt:

W: 45.89 mm

B: 17.998 mm

$B_N$ : 16.255 mm

l: 13.678 mm

$V_0$ : 3 mm (über Messschneiden eingestellt, oder als Schneiden in der Probe erodiert)

$C_1$ : 11.714 mm

### 4.2.2 Bestimmung der experimentellen Compliance zur Ermittlung der effektiven Kerblänge

Für die Bestimmung der Compliance vor dem Einbringen des Startrisses, der effektiven Kerblänge l, wird die Probe drei Mal von 1000 N bis 2000 N mit einer über den Clip-on geregelten

Prüfgeschwindigkeit von 0,1 mm/min belastet und die Wegänderung an den Messschneiden mit dem Clip-on gemessen. Kraft und Weg werden hierbei aufgezeichnet. Die Startlast und Endlast für die Bestimmung der Compliance müssen hierbei unter Beachtung der Steifigkeit des Prüfaufbaus, der zu erwartenden Wegänderung, sowie der ertragbaren Belastung der Probe festgelegt werden. Die Endlast sollte hierbei die Oberlast bei der Einbringung des Schwingrisses nicht überschreiten. Die aufgezeichneten Werte werden mit der Wegänderung (COD/mm) über der Last (Kraft/N) aufgetragen und die Steigung der Kurve ermittelt. Die ermittelte Steigung bzw. der experimentell ermittelte Wert der Compliance für die effektive Kerblänge ist in Bild 15 dargestellt und ergibt sich zu:

$$C = \frac{COD (mm)}{Kraft (N)}; C_I = 0.000025309 \text{ mm/N}$$

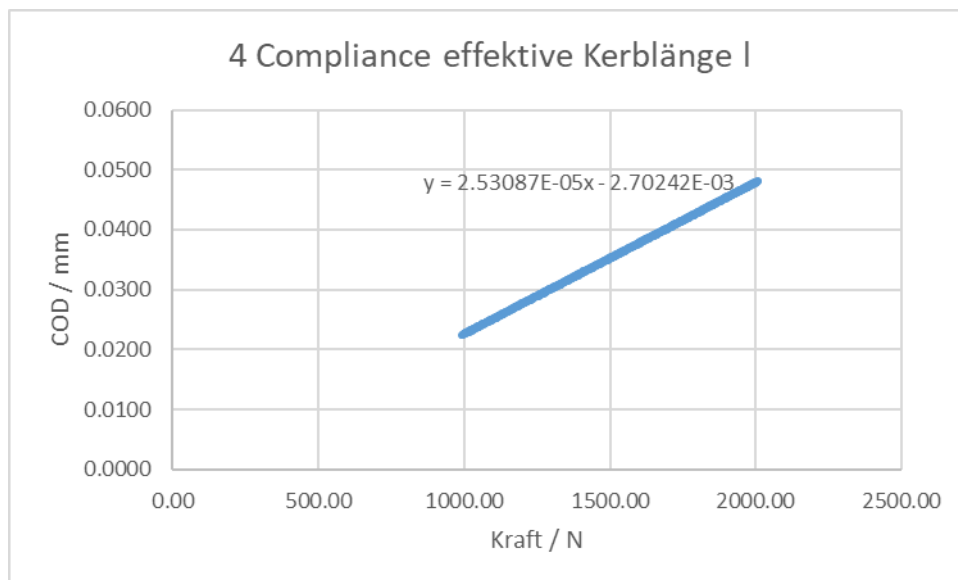


Bild 15: Compliance der Probe 4 für die effektive Kerblänge I

#### 4.2.3 Rechnerische Bestimmung der Compliance für die effektive Kerblänge I

Die rechnerische Bestimmung der effektiven Kerblänge I erfolgt über eine Anpassung des in der Berechnung verwendeten E-Moduls, um so die berechnete Compliance an die experimentell ermittelte Compliance anzugleichen. Dazu wird neben dem werkstoffspezifischen E-Modul auch die Nachgiebigkeitskurve benötigt, die als  $EBV_{LL}/P$  über  $a/W$  aufgetragen ist, siehe Bild 8 und Bild 9. Aufgrund der eingebrachten Seitenkerben wird die Kurve für „experimentell 5% gekerbte Probe“ verwendet. Die Kurve wurde hierzu digitalisiert und ein Polynom 4 Grade angepasst, um für jedes  $a/W$  Verhältnis ein  $EBV_{LL}/P$  errechnen zu können, siehe Bild 16.

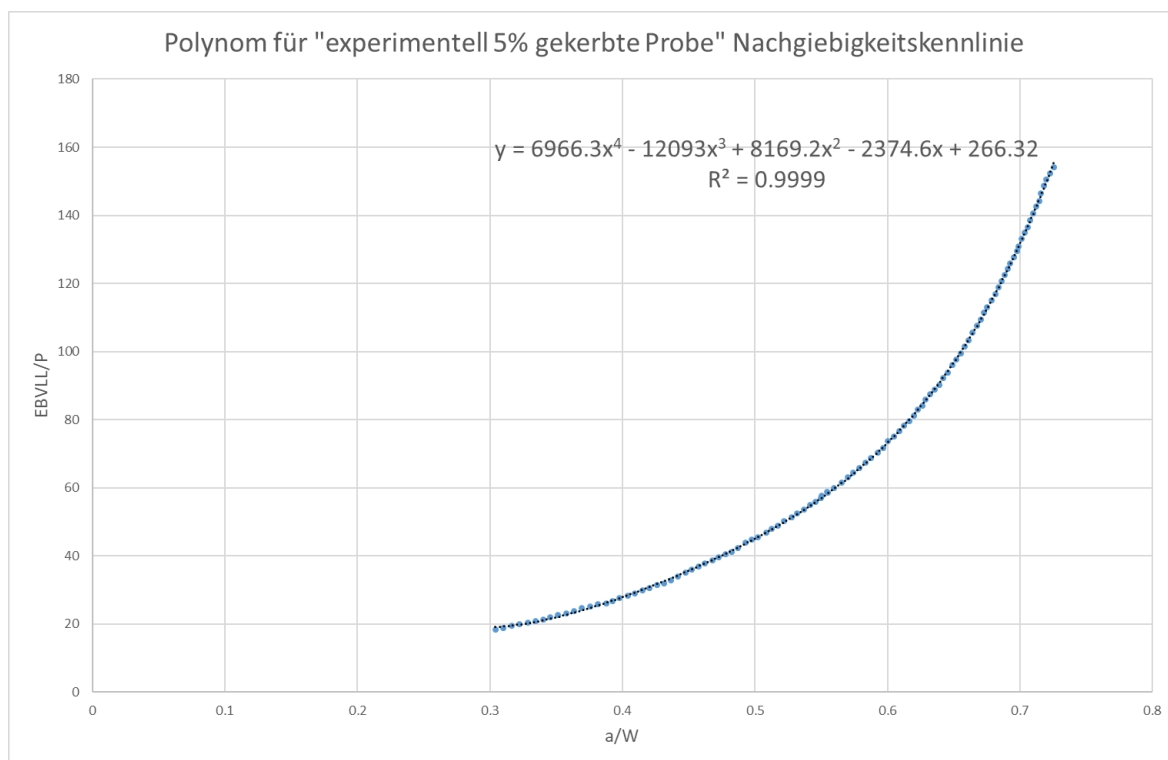


Bild 16: Polynom für "experimentell 5% gekerbte Probe"

Das anfängliche  $a/w$  Verhältnis, mit der effektiven Kerblänge  $l$ , ergibt sich aus:

$$l \text{ (mm): } 13.678 \text{ mm} = a$$

$$W \text{ (mm): } 45.89 \text{ mm} = W$$

$$a/W = 0.298$$

Der Kennwert  $EB_{VLL}/P$  für das  $a/W$  Verhältnis 0.298 der effektiven Kerblänge wird berechnet aus (vgl. Polynom aus Bild 16):

$$\frac{EB_{VLL}}{P} = 6966.3 * 0.298^4 - 12093 * 0.298^3 + 8169.2 * 0.298^2 - 2374.6 * 0.298 + 266.32$$

$$EB_{VLL}/P = 19.05991$$

Der Kennwert  $EB_{VLL}/P$  muss um den Faktor  $V_{LL}$  korrigiert werden, da sich die Kennlinie auf die Lastangriffslinie bezieht, die Messung aber um den Wert  $C_1$  aus der Lastangriffslinie versetzt ist, siehe Bild 7.

$$V_{LL} = \frac{V_0}{\left(1 + \frac{3C_1}{2W}\right)}$$

$$\frac{V_{LL}}{V_0} = \frac{V_0}{\left(1 + \frac{3C_1}{2W}\right)V_0}$$

$V_0$  wird hier mit 1 angenommen um für  $V_{LL}$  einen Verhältnissfaktor zu erhalten

$$V_{LL} = \frac{1}{\left(1 + \frac{3 \cdot 11,714}{2 \cdot 45,89}\right)} = 0.72312$$

Über die Formel:

$$C = \frac{1}{B_N * E} * \frac{EBV_{LL}}{P}$$

wird C über eine Änderung von E an den Wert von  $C_1$  angenähert. Der so ermittelte rechnerische E-Modul sollte um nicht mehr als 10 % vom realen Wert für den Werkstoff (hier 70 GPa für die untersuchten Aluminiumlegierungen) abweichen.

$$C = \frac{1}{16.255 \cdot 64090} * \frac{19.0599}{0.72312} = 0.000025301 \text{ mm/N}$$

Für den rechnerischen E-Modul von 64,09 GPa ergibt sich bei einem  $a/W$  Verhältnis von 0.298 eine ausreichend genaue Annäherung an  $C_1 = 0.000025309 \text{ mm/N}$

#### 4.2.4 Rechnerische Bestimmung der Compliance für den Startriss $a_{pre}$

Nach dem Einbringen des Ermüdungsrisses mittels schwingender Beanspruchung der Probe, siehe Kapitel 4.1.5, wird die Compliance erneut experimentell bestimmt, siehe Kapitel 4.2.2. Für Probe 4 ergibt sich nach Bild 17 der experimentell ermittelte Wert:

$$C_{apre} = 0.000029433 \text{ mm/N}$$

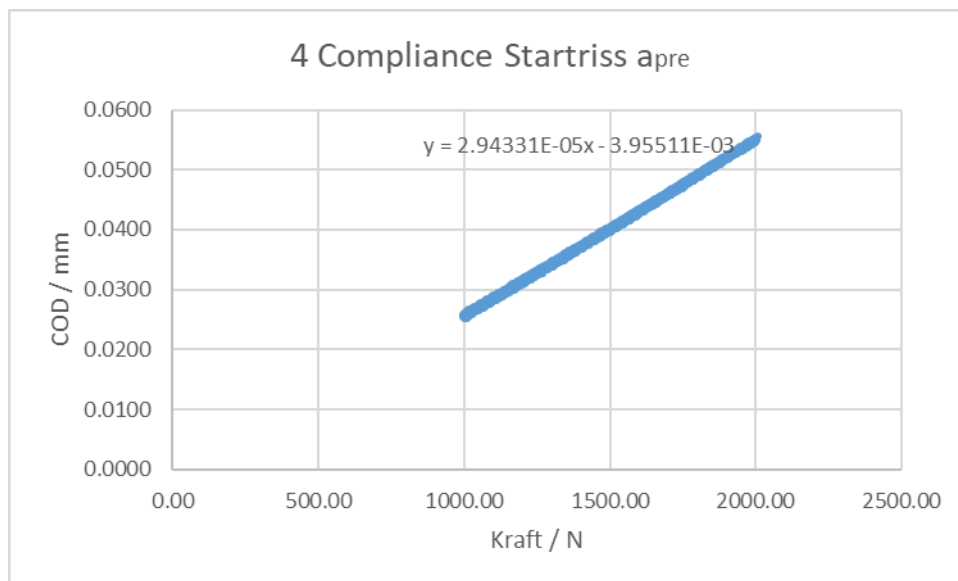


Bild 17: Compliance der Probe 4 für den Startriss  $a_{pre}$

Anhand der experimentell ermittelten Compliance für den Startriss  $a_{pre}$  kann nun, mittels eines Gleichungslösers (z. B. Excel-Solver), auf die Startrisslänge zurückgerechnet werden.

$$\frac{EBV_{LL}}{P} = C * B_N * E * V_{LL}$$

$$\frac{EBV_{LL}}{P} = 22.17878$$

Über einen Solver kann das Polynom der Nachgiebigkeitskennlinie nach x aufgelöst werden (siehe Funktion in Bild 16), das Ergebnis ist das  $a/W$  Verhältnis der spezifischen Probe.

Für  $\frac{EBV_{LL}}{P} = 22.17878$  ergibt sich ein  $a/W$  von 0.352

Mittels dieses  $a/W$ -Verhältnisses kann nun die Startrisslänge  $a_{pre}$  berechnet werden

$$a_{pre} = \frac{a}{W} * W$$

$$a_{pre} = 0.352 * 45.89 = 16.1533$$

Die errechnete Startrisslänge  $a_{pre}$  beträgt 16.153 mm. Für diesen Startwert kann nun die benötigte Kraft für das zu prüfende  $K_{IAPP}$  bestimmt werden.

#### 4.2.5 Rechnerische Bestimmung des $K_{IAPP}$ für den Startriss $a_{pre}$

Für die Bestimmung von  $K_{IAPP}$  wird nach HPIS E 103:2018 Kapitel: „7.1 Loading c)“  $K_{IAPP} = 0.056 \sigma_{0.2}$  angewendet.

Für die Legierungsvariante C wurde  $\sigma_{0.2}$  mit 310 MPa bestimmt.

$$K_{IAPP} = 0.056 * 310 = 17.36 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$$

Über die Beziehung:  $K_{IAPP} = \frac{Y * P}{B_{eff} * \sqrt{a}}$  kann die Last P in N für das zu prüfende  $K_{IAPP}$  ermittelt werden. Zuvor müssen aber die Faktoren  $B_{eff}$  sowie der Geometriefaktor Y ermittelt werden.

$$B_{eff} = \sqrt{B * B_N} = \sqrt{17.998 * 16.255} = 17.1043 \text{ mm}$$

Die Gleichung zur Ermittlung des probenformabhängigen Geometriefaktors Y kann aus der DIN EN ISO 7539-6, siehe Bild 8, entnommen werden.

$$Y = 30.96 \left[ \frac{a}{W} \right]^1 - 195.8 \left[ \frac{a}{W} \right]^2 + 730.6 \left[ \frac{a}{W} \right]^3 - 1186.3 \left[ \frac{a}{W} \right]^4 + 754.6 \left[ \frac{a}{W} \right]^5$$

$$a = a_{pre} = 16.1533 \text{ mm}$$

$$W = 45.89 \text{ mm}$$

$$Y = 4.36758$$

Um die Last P in der Einheit N zu erhalten, muss a hierbei in der der Einheit m eingesetzt werden.

$$P = \frac{B_{eff} \sqrt{a} K_{IAPP}}{Y}$$

$$P = \frac{17.1043 \text{ mm} * \sqrt{0.0161533 \text{ m}} * 17.36 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \sqrt{\text{m}}}{4.36758} * 1000 = 8640 \text{ N}$$

Für die als Beispiel gewählte Probe 4 ergibt sich somit eine Last P = 8640 N um ein  $K_{IAPP}$  von  $17.36 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$  zu erzielen.

#### 4.2.6 Rechnerische Bestimmung der Compliance $C_a$ und des $K_I$ nach Versuchsende

Am Versuchsende wird die Probe entlastet und hierbei die Restkraft ermittelt, siehe 4.1.9. Nach diesem Schritt wird erneut die Compliance nach dem gleichen Vorgehen wie in Kapitel 4.2.4 ermittelt. Sie ergibt sich entsprechend Bild 18 zu:

$$C_a = 0.000031763 \text{ mm/N}$$

Die Compliance der Probe 4 ist mit 0.000031763 mm/N etwas höher als vor der Auslagerung (0.000029433 mm/N). Anhand der Formeln in Kapitel 4.2.4 kann nun die Risslänge nach Versuchsende rechnerisch bestimmt werden. Es ergibt sich:

$$a = 0.369 * 45.89 = 16.9334$$

Nach dem Versuchsende soll der Riss nach HPIS E 103:2018 durch eine zyklische Schwingbeanspruchung um mindestens 1 mm verlängert werden. Anschließend wird er aufgebrochen. Die Risslänge a wird an insgesamt 3 Messstellen, von denen je eine bei 25 / 50 / 75 % der Probenbreite B auf der Bruchfläche liegt, bestimmt. Anschließend wird der Mittelwert der drei Messungen errechnet. Dieser Wert ist die maßgebliche Risslänge a. Mit der Risslänge a kann nun



der tatsächliche Spannungsintensitätsfaktor  $K_I$  bestimmt werden. Bei der Probe 4 war es nicht möglich aufgrund der Bruchflächentopographie das Ende des Risses optisch in der Makroaufnahme oder im Rasterelektronenmikroskop zu bestimmen.

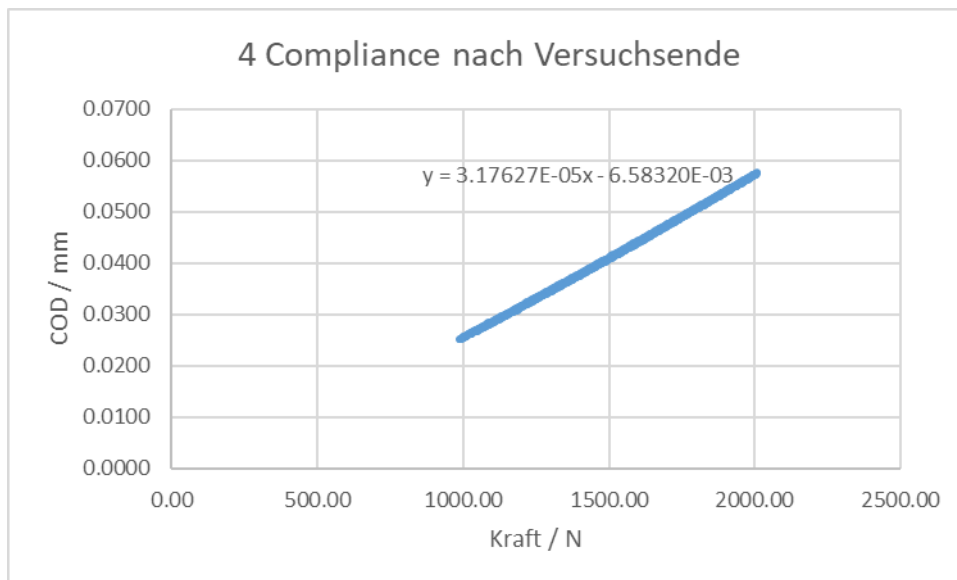


Bild 18: Compliance der Probe 4 nach Versuchsende

### 4.3 Prüfmatrix

Tabelle 3: Prüfmatrix

Probennummer	Probentyp WOL	Legierungsvariante	Prüfzeit (Tage)	Prüfmedium	$K_{IAPP}$ MPa m <sup>1/2</sup>
5.6	ASTM	A	90	Luft, 90%rF, 20°C	11.37
5.b	ASTM	A	90	Wasserstoff, 70 ppm H <sub>2</sub> O, 100bar, RT	11.37
5.5	ASTM	A	90	Wasserstoff, 70 ppm H <sub>2</sub> O, 100bar, RT	11.37
5.a	ASTM	A	90	Luft, 90%rF, 20°C	11.37
6.a	ASTM	B	90	Luft, 90%rF, 20°C	17.36
6.b	ASTM	B	90	Wasserstoff, 70 ppm H <sub>2</sub> O, 100bar, RT	17.36
6.c	ASTM	B	90	Wasserstoff, 70 ppm H <sub>2</sub> O, 100bar, RT	17.36
6.6	ASTM	B	90	Luft, 90%rF, 20°C	17.36
1	DIN ISO EN	C	90	Luft, 90%rF, 20°C	17.36
2	DIN ISO EN	C	90	Luft, 90%rF, 20°C	17.36
3	DIN ISO EN	C	90	Wasserstoff, 70 ppm H <sub>2</sub> O, 100bar, RT	17.36
4	DIN ISO EN	C	90	Wasserstoff, 70 ppm H <sub>2</sub> O, 100bar, RT	17.36
5	DIN ISO EN	C		Begutachtung Schwingriss	Reserve

Je Prüfspezifikation werden 2 gleiche Versuche pro Legierungsvariante und Prüfmedium durchgeführt. Das hierbei verwendete  $K_{IAPP}$  unterscheidet sich aufgrund unterschiedlicher Streckgrenzen ( $\sigma_{0,2}$ ), siehe 4.1.3.

## 5 Prüfergebnisse

Die Auswertung der Versuche erfolgte nach dem Vorgehen und den Kriterien aus HPIS E103 2018. Jeder Versuch wurde an 2 Proben durchgeführt (siehe Tabelle 3: Prüfmatrix). Probe 6.a ist bereits bei der Ermittlung der benötigten Aufweitung gebrochen. Probe 5 wurde nicht geprüft und nach Abschluss der Versuche zur Begutachtung des Schwingrisses aufgebrochen.

Die Ergebnisse sind nachfolgend tabellarisch mit den wichtigsten Kennwerten zusammengefasst. Die Risslängen wurden anhand von Makroaufnahmen und im Rasterelektronenmikroskop (REM) über den XY-Verschiebetisch ermittelt. Bei einzelnen Proben wurde zum Vergleich die Rissfläche des Schwingrisses ausgemessen und in eine Anfangsrisslänge umgerechnet. Wenn es möglich war, wurde die im REM ermittelte mittlere Anfangsrisslänge verwendet, um  $K_I$  zu berechnen.

Bei allen ausgelagerten Proben wurden nach der Auslagerung, der Riss zur Unterscheidung von eventuellem Risswachstum durch Spannungsrisskorrosion während der Auslagerung mittels zyklischer Beanspruchung erweitert (siehe Kapitel 4.1.9).

**5.1 Auslagerung: Luft; 90%rF; 20°C (12.12.2022 – 13.3.2023)**

**5.1.1 Ergebnisse Probe 5.6; Legierungsvariante A; 11.37 MPa m<sup>0.5</sup>, Luft; 90%rF; 20°C**

Tabelle 4: Probe 5.6; Legierungsvariante A; 11.37 MPa m<sup>0.5</sup>

	Probennummer	5.6	
	Probentyp	ASTM	
I	effektive Kerblänge	16.339	mm
a <sub>Kerb_compliance</sub>	effektive Kerblänge über Compliancemethode	16.331	mm
a <sub>pre_compliance</sub>	Anfangsriszlänge über Compliancemethode	18.418	mm
B <sub>N</sub>	Probendicke mit Seitenkerben (5 %)	16.1	mm
a/W	für die Anfangsriszlänge	0.454	
R <sub>P0,2</sub>	Streckgrenze	203	MPa
K <sub>IApp</sub>	Spannungsintensitätsfaktor (0.056*R <sub>P0,2</sub> )	11.368	MPa*m <sup>0.5</sup>
Startlast	benötigte Kraft für K <sub>IApp</sub>	3790	N
Endlast	Kraft nach Versuchsende beim Wiederbelasten	3667	N
	Endlast / Startlast (%)	96.75	%
Auslagerung	90% rel. Luftfeuchte, 20°C, 90 Tage	X	
	H <sub>2</sub> 100bar, 70PPM H <sub>2</sub> O, 20°C, 90 Tage		
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (REM)	19.331	mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (REM)	19.331	mm
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (Makro)	19.468	mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (Makro)	19.468	mm
a <sub>A</sub>	Flächenäquivalent Anfangsriszlänge		mm
K <sub>I</sub>	tatsächlicher Spannungsintensitätsfaktor	12.263	MPa*m <sup>0.5</sup>
	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub>	0	
	K <sub>I</sub> / K <sub>IAPP</sub>	1.08	
I	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16mm K <sub>I</sub> < K <sub>IAPP</sub> (invalid)		
II	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16mm K <sub>I</sub> ≥ K <sub>IAPP</sub> (pass)	x	
III	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16mm K <sub>I</sub> ≤ K <sub>IAPP</sub> (fail)		
IV	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16mm K <sub>I</sub> > K <sub>IAPP</sub> (invalid)		

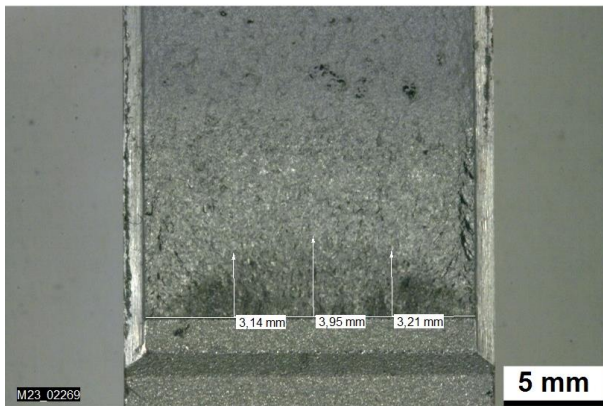


Bild 19: Probe 5.6 Makroaufnahme  
Bruchfläche mit ausgemessenem Schwingriss  
bei 25/50/75% der Breite.

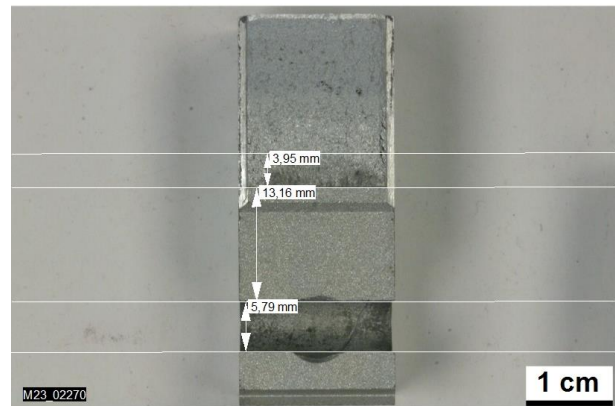


Bild 20: Probe 5.6 Makroaufnahme  
Probenhälfte mit ausgemessener Länge von  
Lastangriffslinie bis zur erodierten Kerbe.

Probe 5.6 ist in Fall II (siehe Tabelle 4) einzuordnen, weil kein Rissfortschritt erfolgte, der tatsächliche Spannungsintensitätsfaktor  $K_I$  größer ist als der Spannungsintensitätsfaktor  $K_{IApp}$ , die Endlast gegenüber der Startlast um weniger als 5 % abweicht und die erlaubte Abweichung der Messpunkte nicht überschritten wurde. Die Probe 5.6 bietet nach HPIS E103 2018 einen ausreichenden Widerstand gegen Spannungsrissskorrosion.

Bild 19 zeigt den ausgemessenen Schwingriss. Der Schwingriss hat eine elliptische Form und ist gut zu erkennen. Die restliche Bruchfläche teilt sich auf in den zyklischen Schwingriss (Kapitel 4.1.9) nach der Auslagerung und den restlichen Gewaltbruch.

**5.1.2 Ergebnisse Probe 5.a; Legierungsvariante A; 11.37 MPa m<sup>0.5</sup>, Luft; 90%rF; 20°C**

Tabelle 5: Probe 5.a; Legierungsvariante A; 11.37 MPa m<sup>0.5</sup>

	Probennummer	5.a	
	Probentyp	ASTM	
I	effektive Kerblänge	16.043	mm
a <sub>Kerb_compliance</sub>	effektive Kerblänge über Compliancemethode	16.026	mm
a <sub>pre_compliance</sub>	Anfangsriszlänge über Compliancemethode	18.218	mm
B <sub>N</sub>	Probendicke mit Seitenkerben (5 %)	16.166	mm
a/W	für die Anfangsriszlänge	0.446	
R <sub>P0,2</sub>	Streckgrenze	203	MPa
K <sub>IApp</sub>	Spannungsintensitätsfaktor (0.056*R <sub>P0,2</sub> )	11.368	MPa*m <sup>0.5</sup>
Startlast	benötigte Kraft für K <sub>IApp</sub>	3840	N
Endlast	Kraft nach Versuchsende beim Wiederbelasten	3649	N
	Endlast / Startlast (%)	95.03	%
Auslagerung	90% rel. Luftfeuchte, 20°C, 90 Tage	X	
	H <sub>2</sub> 100bar, 70PPM H <sub>2</sub> O, 20°C, 90 Tage		
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (REM)	19.567	mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (REM)	(19.815)	mm
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (Makro)	19.612	mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (Makro)	nicht erkennbar	mm
a <sub>A</sub>	Flächenäquivalent Anfangsriszlänge	19.218	mm
K <sub>I</sub>	tatsächlicher Spannungsintensitätsfaktor	12.679	MPa*m <sup>0.5</sup>
	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub>	(0.248)	
	K <sub>I</sub> / K <sub>IAPP</sub>	1.12	
I	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16mm K <sub>I</sub> < K <sub>IAPP</sub> (invalid)		
II	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16mm K <sub>I</sub> ≥ K <sub>IAPP</sub> (pass)	x	
III	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16mm K <sub>I</sub> ≤ K <sub>IAPP</sub> (fail)		
IV	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16mm K <sub>I</sub> > K <sub>IAPP</sub> (invalid)		

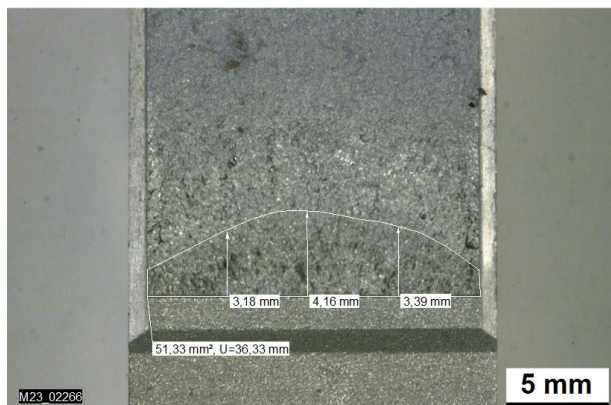


Bild 21: Probe 5.a Makroaufnahme Bruchfläche mit ausgemessenem Schwingriss bei 25/50/75% der Breite und Fläche des Schwingrisses.

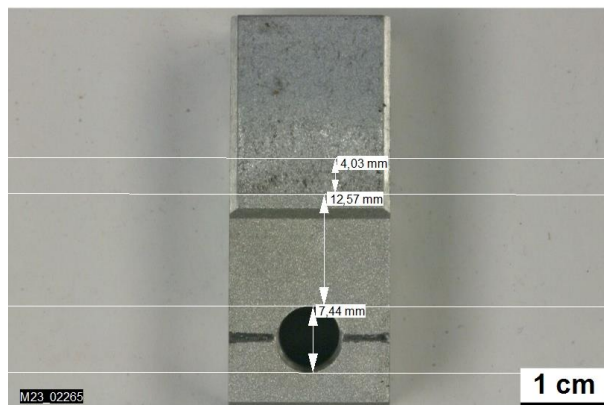


Bild 22: Probe 5.a Makroaufnahme Probenhälfte mit ausgemessener Länge von Lastangriffslinie bis zur erodierten Kerbe.

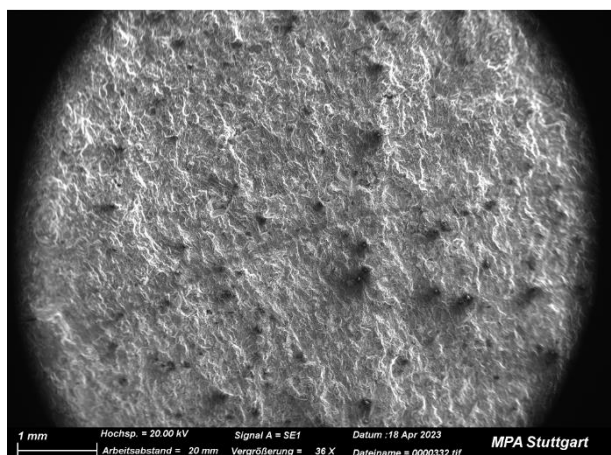


Bild 23: Probe 5.a sichtbare Spaltfläche im REM\_Bild

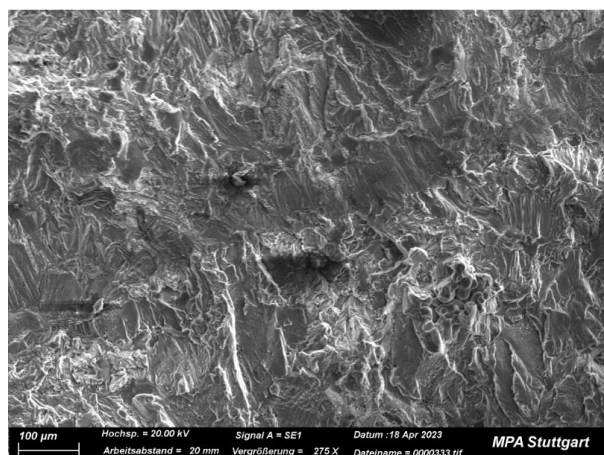


Bild 24: Probe 5.a Spaltfläche zwischen Schwingriss vor und nach der Auslagerung aus Bild 23

Probe 5.a ist nach HPIS E103 2018 in Fall II eingeordnet und bietet einen ausreichenden Widerstand gegen Spannungsrisskorrosion. Zwischen dem Schwingriss vor der Auslagerung und dem eingebrachten Schwingriss nach der Auslagerung weist die Probe eine Spaltfläche mit ~0.25mm auf (Bild 23 & Bild 24). Dies wurde schon im Projekt FAT I bei der Probe 53 beobachtet. Die Ursache konnte nicht bestimmt werden. Eine transkristalline Spaltfläche ist kein typisches Merkmal für Spannungsrisskorrosion bei Aluminium. Da  $K_I \geq K_{IAPP}$  erfolgte die Einteilung in Fall II (pass). In Bild 21 ist die Spaltfläche nicht zu erkennen. Die Grenze zwischen den beiden Schwingrissen ist in Bild 21 nicht eindeutig zu erkennen. Die Rissfront des Schwingrisses hat eine elliptische Form.



**5.1.3 Probe 6.a; Legierungsvariante B; 17.36 MPa m<sup>0.5</sup>, Luft; 90%rF; 20°C**

Tabelle 6: Probe 6.a; Legierungsvariante B; 17.36 MPa m<sup>0.5</sup>

	Probennummer	6.a	
	Probentyp	ASTM	
I	effektive Kerblänge	16.037	mm
a <sub>Kerb_compliance</sub>	effektive Kerblänge über Compliancemethode	16.034	mm
a <sub>pre_compliance</sub>	Anfangsriszlänge über Compliancemethode	17.904	mm
B <sub>N</sub>	Probendicke mit Seitenkerben (5 %)	16.251	mm
a/W	für die Anfangsriszlänge	0.446	
R <sub>P0,2</sub>	Streckgrenze	310	MPa
K <sub>IApp</sub>	Spannungsintensitätsfaktor (0.056*R <sub>P0,2</sub> )	17.36	MPa*m <sup>0.5</sup>
Startlast	benötigte Kraft für K <sub>IApp</sub>	6000	N
Endlast	Kraft nach Versuchsende beim Wiederbelasten		N
	Endlast / Startlast (%)	0.00	%
Auslagerung	90% rel. Luftfeuchte, 20°C, 90 Tage	X	
	H <sub>2</sub> 100bar, 70PPM H <sub>2</sub> O, 20°C, 90 Tage		
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (REM)	19.792	mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (REM)		mm
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (Makro)	19.901	mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (Makro)		mm
a <sub>A</sub>	Flächenäquivalent Anfangsriszlänge	19.228	mm
K <sub>I</sub>	tatsächlicher Spannungsintensitätsfaktor	20.488	MPa*m <sup>0.5</sup>
	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub>	-	
	K <sub>I</sub> / K <sub>IAPP</sub>	1.18	
I	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16mm K <sub>I</sub> < K <sub>IAPP</sub> (invalid)		
II	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16mm K <sub>I</sub> ≥ K <sub>IAPP</sub> (pass)		
III	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16mm K <sub>I</sub> ≤ K <sub>IAPP</sub> (fail)		
IV	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16mm K <sub>I</sub> > K <sub>IAPP</sub> (invalid)		



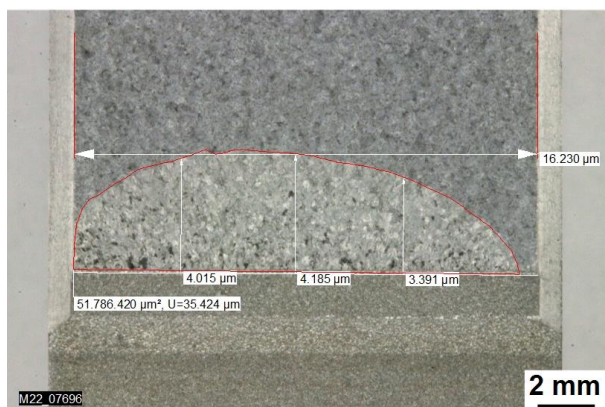


Bild 25: Probe 6.a Makroaufnahme  
Bruchfläche mit ausgemessenem Schwingriss  
bei 25/50/75% der Breite und Fläche des  
Schwingrisses. Probenbruch bei Ermittlung  
der benötigten Aufweitung mit 6000N.

Probe 6.a hat die benötigte Startlast von 6000 N (siehe Tabelle 6) zur Ermittlung der nötigen Aufweitung nicht erreicht. Bei 5950 N ist der Riss weitergewachsen und führte zum vollständigen Bruch der Probe.

Bild 25 zeigt die elliptische Rissfront. Auf der rechten Seite erreichte der Schwingriss den Probenrand nicht. Die Rissfront ist sehr gut sichtbar gegenüber dem Restbruch.

**5.1.4 Probe 6.6; Legierungsvariante B; 17.36 MPa m<sup>0.5</sup>, Luft; 90%rF; 20°C**

Tabelle 7: Probe 6.6; Legierungsvariante B; 17.36 MPa m<sup>0.5</sup>

	Probennummer	6.6	
	Probentyp	ASTM	
I	effektive Kerblänge	15.95	Mm
a <sub>Kerb_compliance</sub>	effektive Kerblänge über Compliancemethode	16.355	Mm
a <sub>pre_compliance</sub>	Anfangsriszlänge über Compliancemethode	18.907	Mm
B <sub>N</sub>	Probendicke mit Seitenkerben (5 %)	16.128	Mm
a/W	für die Anfangsriszlänge	0.444	
R <sub>P0,2</sub>	Streckgrenze	310	MPa
K <sub>IApp</sub>	Spannungsintensitätsfaktor (0.056*R <sub>P0,2</sub> )	17.36	MPa*m <sup>0.5</sup>
Startlast	benötigte Kraft für K <sub>IApp</sub>	5560	N
Endlast	Kraft nach Versuchsende beim Wiederbelasten	4937	N
	Endlast / Startlast (%)	88.79	%
Auslagerung	90% rel. Luftfeuchte, 20°C, 90 Tage	X	
	H <sub>2</sub> 100bar, 70PPM H <sub>2</sub> O, 20°C, 90 Tage		
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (REM)	20.125	Mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (REM)	21.176	Mm
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (Makro)	20.075	Mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (Makro)	21.215	Mm
a <sub>A</sub>	Flächenäquivalent Anfangsriszlänge	19.623	Mm
K <sub>I</sub>	tatsächlicher Spannungsintensitätsfaktor	19.222	MPa*m <sup>0.5</sup>
	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub>	1.051	
	K <sub>I</sub> / K <sub>IAPP</sub>	1.11	
I	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16mm K <sub>I</sub> < K <sub>IAPP</sub> (invalid)		
II	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16mm K <sub>I</sub> ≥ K <sub>IAPP</sub> (pass)		
III	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16mm K <sub>I</sub> ≤ K <sub>IAPP</sub> (fail)		
IV	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16mm K <sub>I</sub> > K <sub>IAPP</sub> (invalid)	X	

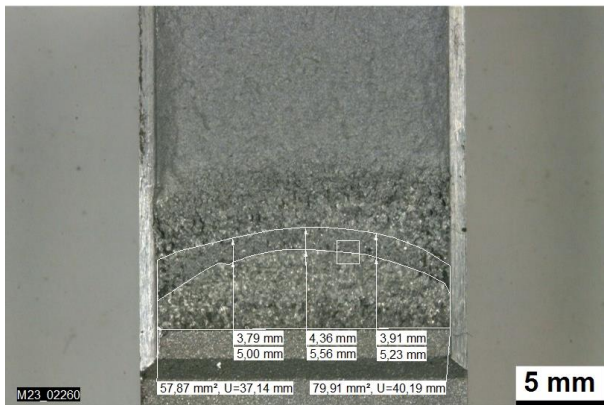


Bild 27: Probe 6.6 Makroaufnahme Rissfläche mit ausgemessenem Schwingriss und Rissfortschritt bei 25/50/75% der Probenbreite und Fläche des Schwingrisses.

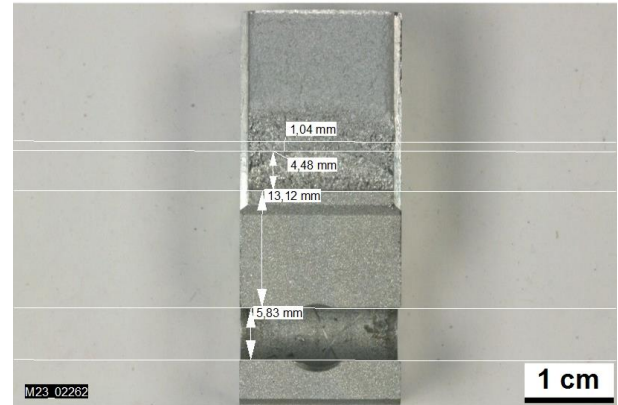


Bild 28: Probe 6.6 Makroaufnahme Probenhälfte mit ausgemessener Länge von Lastangriffslinie bis zur erodierten Kerbe

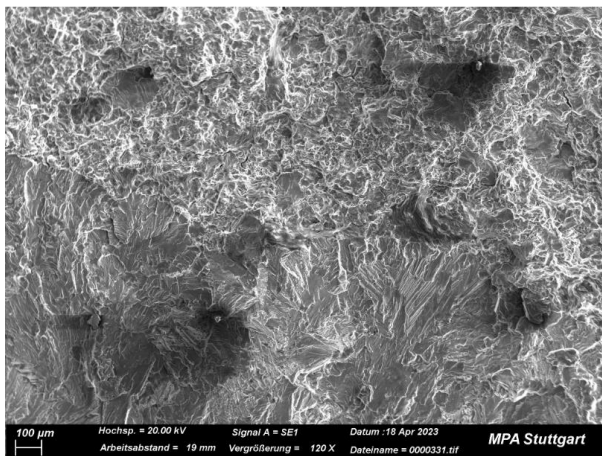


Bild 29: Probe 6.6 Übergang transkristalliner Schwingriss (unten) zu Rissfortschritt mit Wabenstruktur (oben).

Probe 6.6 ist in Fall IV einzuordnen, ungültig. Der Rissfortschritt ist größer als 0,16 mm ebenso ist  $K_I$  größer als  $K_{IApp}$ . In Bild 27 sind der Schwingriss und der Rissfortschritt gut zu erkennen. Bild 29 zeigt deutlich den Übergang vom transkristalliner Schwingriss mit Schwingstreifen (untere Hälfte) zum duktilen Rissfortschritt mit Wabenstruktur (obere Hälfte).

**5.1.5 Probe 1; Legierungsvariante C; 17.36 MPa m<sup>0.5</sup>, Luft; 90%rF; 20°C**

Tabelle 8: Probe 1; Legierungsvariante C; 17.36 MPa m<sup>0.5</sup>

	Probennummer	1	
	Probentyp	DIN EN ISO	
I	effektive Kerblänge	13.647	mm
a <sub>Kerb_compliance</sub>	effektive Kerblänge über Compliancemethode	13.642	mm
a <sub>pre_compliance</sub>	Anfangsriszlänge über Compliancemethode	15.794	mm
B <sub>N</sub>	Probendicke mit Seitenkerben (5 %)	16.229	mm
a/W	für die Anfangsriszlänge	0.298	
R <sub>P0,2</sub>	Streckgrenze	310	MPa
K <sub>IApp</sub>	Spannungsintensitätsfaktor (0.056*R <sub>P0,2</sub> )	17.36	MPa*m <sup>0.5</sup>
Startlast	benötigte Kraft für K <sub>IApp</sub>	8770	N
Endlast	Kraft nach Versuchsende beim Wiederbelasten	8602	N
	Endlast / Startlast (%)	98.08	%
Auslagerung	90 % rel. Luftfeuchte, 20°C, 90 Tage	X	
	H <sub>2</sub> 100bar, 70PPM H <sub>2</sub> O, 20°C, 90 Tage		
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (REM)	nicht auswertbar	mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (REM)	nicht auswertbar	mm
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (Makro)	nicht auswertbar	mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (Makro)	nicht auswertbar	mm
a <sub>A</sub>	Flächenäquivalent Anfangsriszlänge	nicht auswertbar	mm
K <sub>I</sub>	tatsächlicher Spannungsintensitätsfaktor	nicht auswertbar	MPa*m <sup>0.5</sup>
	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub>	-	
	K <sub>I</sub> / K <sub>IAPP</sub>	-	
I	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16 mm K <sub>I</sub> < K <sub>IAPP</sub> (invalid)		
II	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16 mm K <sub>I</sub> ≥ K <sub>IAPP</sub> (pass)		
III	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16 mm K <sub>I</sub> ≤ K <sub>IAPP</sub> (fail)		
IV	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16 mm K <sub>I</sub> > K <sub>IAPP</sub> (invalid)		



Bild 30: Probe 1 Makroaufnahme. Das Ende des Schwingriss ist nicht zu identifizieren.

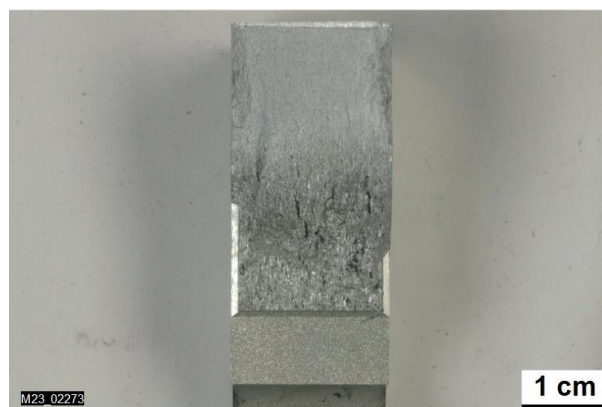


Bild 31: Probe 1 Makroaufnahme. Gesamtansicht der Rissfläche mit restlichem Gewaltbruch

Probe 1 ist nicht auswertbar. Der Schwingriss vor der Auslagerung, möglicher Rissfortschritt und der Schwingriss nach der Auslagerung lassen sich sowohl in der Makroaufnahme (Bild 30) als auch im Rasterelektronenmikroskop nicht voneinander unterscheiden. Der Schwingriss hat zudem die Ebene der Seitenkerbe verlassen.

**5.1.6 Probe 2; Legierungsvariante C; 17.36 MPa m<sup>0.5</sup>, Luft; 90%rF; 20°C**

Tabelle 9: Probe 2; Legierungsvariante C; 17.36 MPa m<sup>0.5</sup>

	Probennummer	2	
	Probentyp	DIN EN ISO	
I	effektive Kerblänge	13.666	mm
a <sub>Kerb_compliance</sub>	effektive Kerblänge über Compliancemethode	13.647	mm
a <sub>pre_compliance</sub>	Anfangsriszlänge über Compliancemethode	16.0286	mm
B <sub>N</sub>	Probendicke mit Seitenkerben (5 %)	16.217	mm
a/W	für die Anfangsriszlänge	0.298	
R <sub>P0,2</sub>	Streckgrenze	310	MPa
K <sub>IApp</sub>	Spannungsintensitätsfaktor (0.056*R <sub>P0,2</sub> )	17.36	MPa*m <sup>0.5</sup>
Startlast	benötigte Kraft für K <sub>IApp</sub>	8660	N
Endlast	Kraft nach Versuchsende beim Wiederbelasten	8485	N
	Endlast / Startlast (%)	97.98	%
Auslagerung	90 % rel. Luftfeuchte, 20 °C, 90 Tage	X	
	H <sub>2</sub> 100 bar, 70 PPM H <sub>2</sub> O, 20 °C, 90 Tage		
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (REM)	nicht auswertbar	mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (REM)	nicht auswertbar	mm
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (Makro)	nicht auswertbar	mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (Makro)	nicht auswertbar	mm
a <sub>A</sub>	Flächenäquivalent Anfangsriszlänge	nicht auswertbar	mm
K <sub>I</sub>	tatsächlicher Spannungsintensitätsfaktor	nicht auswertbar	MPa*m <sup>0.5</sup>
	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub>	-	
	K <sub>I</sub> / K <sub>IAPP</sub>	-	
I	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16 mm K <sub>I</sub> < K <sub>IAPP</sub> (invalid)		
II	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16 mm K <sub>I</sub> ≥ K <sub>IAPP</sub> (pass)		
III	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16 mm K <sub>I</sub> ≤ K <sub>IAPP</sub> (fail)		
IV	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16 mm K <sub>I</sub> > K <sub>IAPP</sub> (invalid)		

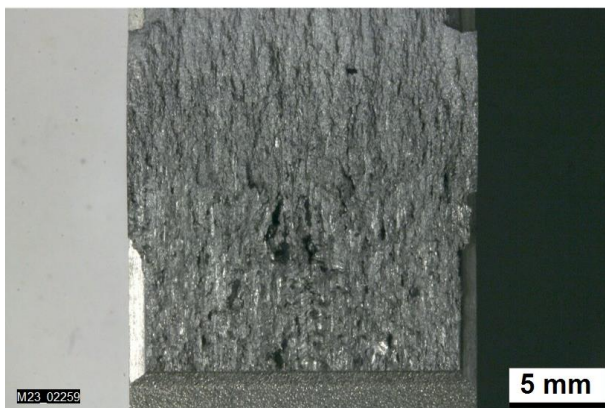


Bild 32: Probe 2 Makroaufnahme Schwingriss vor und nach der Auslagerung, Restbruch.

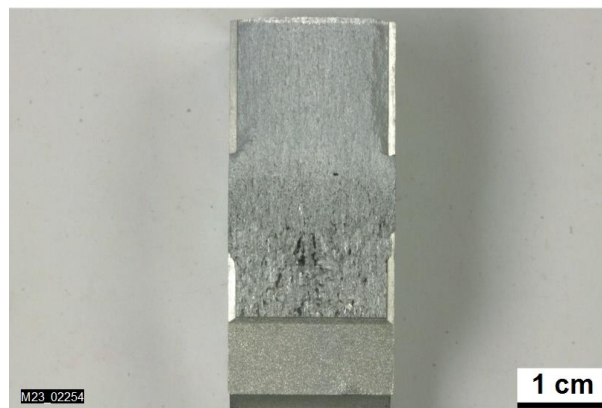


Bild 33: Probe 2 Gesamtansicht Schwingriss vor und nach der Auslagerung, Restbruch.

Analog zu Probe 1 ist Probe 2 nicht auswertbar.

**5.2 Auslagerung: Wasserstoff; 70PPM H<sub>2</sub>O; 100bar, 20°C (19.04.2023 – 18.07.2023)**

**5.2.1 Probe 5.b; Legierungsvariante A; 11.37 MPa m<sup>0.5</sup>; H<sub>2</sub> mit 70 ppm H<sub>2</sub>O; 100bar, RT**

Tabelle 10: Probe 5.b; Legierungsvariante A; 11.37 MPa m<sup>0.5</sup>

	Probennummer	5.b	
	Probentyp	ASTM	
I	effektive Kerblänge	16.038	mm
a <sub>Kerb_compliance</sub>	effektive Kerblänge über Compliancemethode	16.026	mm
a <sub>pre_compliance</sub>	Anfangsriszlänge über Compliancemethode	18.146	mm
B <sub>N</sub>	Probendicke mit Seitenkerben (5 %)	16.192	mm
a/W	für die Anfangsriszlänge	0.446	
R <sub>P0,2</sub>	Streckgrenze	203	MPa
K <sub>IApp</sub>	Spannungsintensitätsfaktor (0.056*R <sub>P0,2</sub> )	11.368	MPa*m <sup>0.5</sup>
Startlast	benötigte Kraft für K <sub>IApp</sub>	3860	N
Endlast	Kraft nach Versuchsende beim Wiederbelasten	3765	N
	Endlast / Startlast (%)	97.54	%
Auslagerung	90% rel. Luftfeuchte, 20°C, 90 Tage		
	H <sub>2</sub> 100bar, 70PPM H <sub>2</sub> O, 20°C, 90 Tage	X	
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (REM)	nicht auswertbar	mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (REM)	nicht auswertbar	mm
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (Makro)	19.092	mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (Makro)	19.092	mm
a <sub>A</sub>	Flächenäquivalent Anfangsriszlänge		mm
K <sub>I</sub>	tatsächlicher Spannungsintensitätsfaktor	12.213	MPa*m <sup>0.5</sup>
	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub>	0	
	K <sub>I</sub> / K <sub>IAPP</sub>	1.07	
I	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16mm K <sub>I</sub> < K <sub>IAPP</sub> (invalid)		
II	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16mm K <sub>I</sub> ≥ K <sub>IAPP</sub> (pass)	x	
III	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16mm K <sub>I</sub> ≤ K <sub>IAPP</sub> (fail)		
IV	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16mm K <sub>I</sub> > K <sub>IAPP</sub> (invalid)		



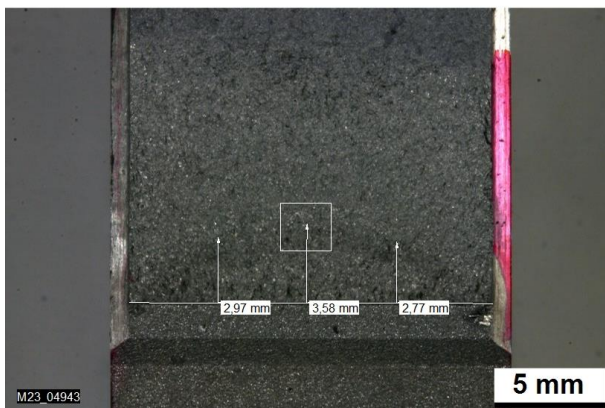


Bild 34: Probe 5.b Makroaufnahme Bruchfläche mit ausgemessenem Schwingriss bei 25/50/75% der Probenbreite

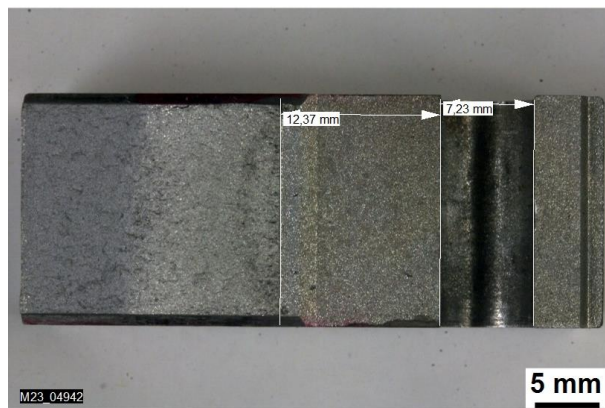


Bild 35: Probe 5.b Makroaufnahme Probenhälfte mit ausgemessener Länge von Lastangriffslinie bis zur erodierten Kerbe

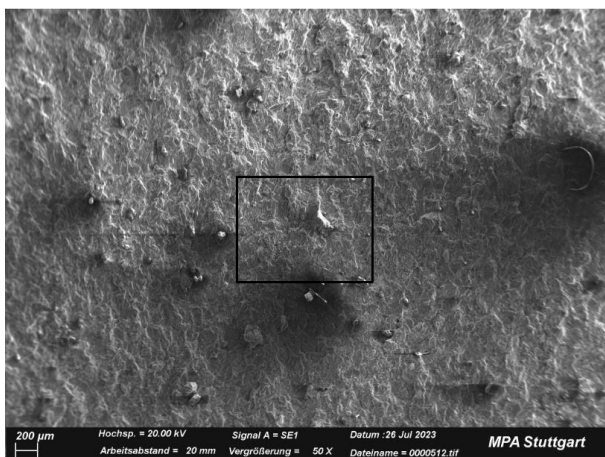


Bild 36: Probe 5.b, Detail aus dem Übergangsbereich Bild 34 Schwingriss vor und nach der Auslagerung

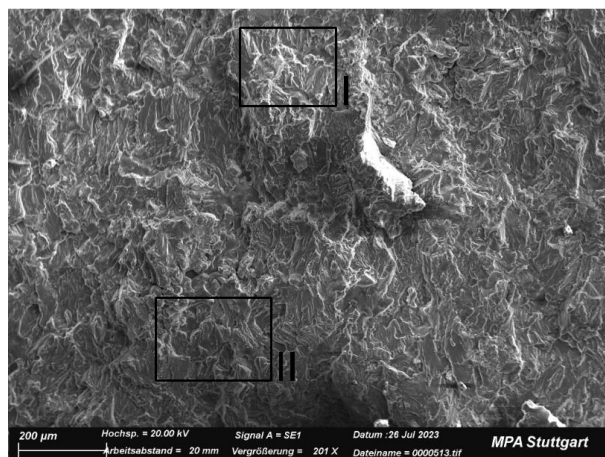


Bild 37: Probe 5.b, Detail Schwingriss vor (Ausschnitt II) und nach der Auslagerung aus (Ausschnitt I) aus Bild 36

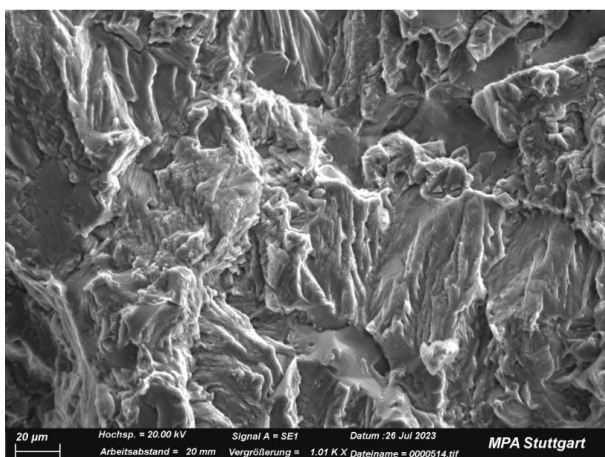


Bild 38: Probe 5.b, Detail I Schwingriss nach der Auslagerung aus Bild 37

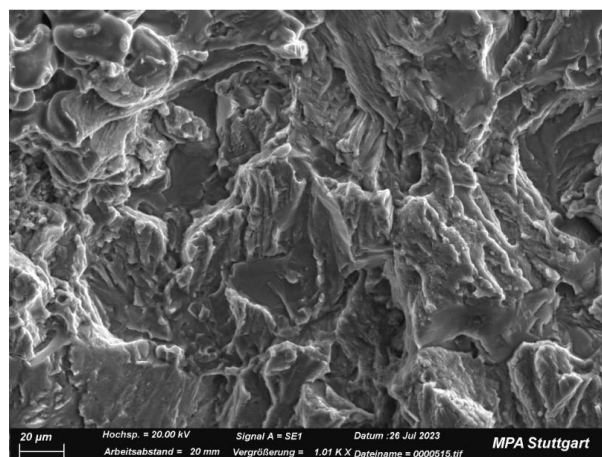


Bild 39: Probe 5.b, Detail II Schwingriss vor der Auslagerung aus Bild 37

Probe 5.b ist in Fall II einzuordnen. Der Schwingriss besteht aus einem hellen Bereich unten und einem dunkleren Bereich darüber, siehe Bild 34. Die Ursache hierfür konnte im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen nicht ermittelt werden. Der markierte Bereich in Bild 34 zwischen Schwingriss vor der Auslagerung und Schwingriss nach der Auslagerung wurde im Rasterelektronenmikroskop detailliert betrachtet (Bild 36). In Bild 38 und Bild 39 ist zu erkennen das es keinen Unterschied in der Struktur der beiden Schwingrisse gibt und dementsprechend die Anfangsrisslänge im Rasterelektronenmikroskop nicht ermittelt werden kann.

**5.2.2 Probe 5.5; Legierungsvariante A; 11.37 MPa m<sup>0.5</sup>; H<sub>2</sub> mit 70 ppm H<sub>2</sub>O; 100bar, RT**

Tabelle 11: Probe 5.5; Legierungsvariante A; 11.37 MPa m<sup>0.5</sup>

	Probennummer	5.5	
	Probentyp	ASTM	
I	effektive Kerblänge	16.01	mm
a <sub>Kerb_compliance</sub>	effektive Kerblänge über Compliancemethode	16	mm
a <sub>pre_compliance</sub>	Anfangsriszlänge über Compliancemethode	18.235	mm
B <sub>N</sub>	Probendicke mit Seitenkerben (5 %)	16.052	mm
a/W	für die Anfangsriszlänge	0.444	
R <sub>P0,2</sub>	Streckgrenze	203	MPa
K <sub>IApp</sub>	Spannungsintensitätsfaktor (0.056*R <sub>P0,2</sub> )	11.368	MPa*m <sup>0.5</sup>
Startlast	benötigte Kraft für K <sub>IApp</sub>	3850	N
Endlast	Kraft nach Versuchsende beim Wiederbelasten	3748	N
	Endlast / Startlast (%)	97.35	%
Auslagerung	90% rel. Luftfeuchte, 20°C, 90 Tage		
	H <sub>2</sub> 100bar, 70PPM H <sub>2</sub> O, 20°C, 90 Tage	X	
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (REM)	nicht auswertbar	mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (REM)	nicht auswertbar	mm
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (Makro)	19.242	mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (Makro)	19.242	mm
a <sub>A</sub>	Flächenäquivalent Anfangsriszlänge		mm
K <sub>I</sub>	tatsächlicher Spannungsintensitätsfaktor	12.301	MPa*m <sup>0.5</sup>
	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub>	0	
	K <sub>I</sub> / K <sub>IAPP</sub>	1.08	
I	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16mm K <sub>I</sub> < K <sub>IAPP</sub> (invalid)		
II	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16mm K <sub>I</sub> ≥ K <sub>IAPP</sub> (pass)	x	
III	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16mm K <sub>I</sub> ≤ K <sub>IAPP</sub> (fail)		
IV	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16mm K <sub>I</sub> > K <sub>IAPP</sub> (invalid)		

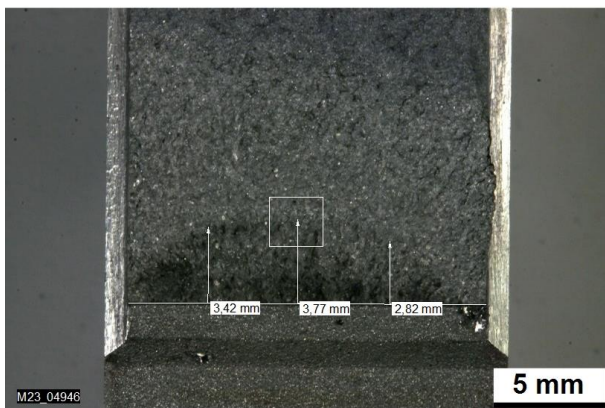


Bild 40: Probe 5.5 Makroaufnahme Bruchfläche mit ausgemessenem Schwingriss bei 25/50/75% der Probenbreite

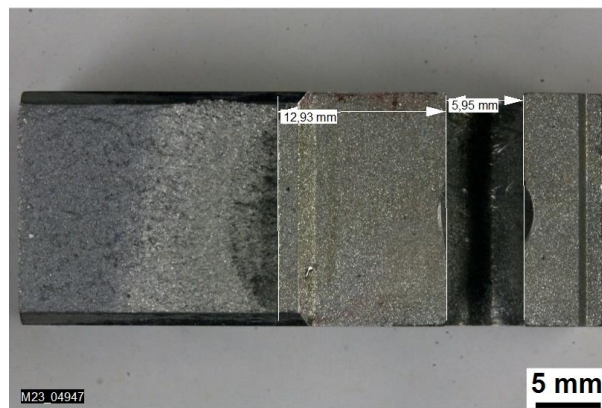


Bild 41: Probe 5.5 Makroaufnahme Probenhälfte mit ausgemessener Länge von Lastangriffslinie bis zur erodierten Kerbe

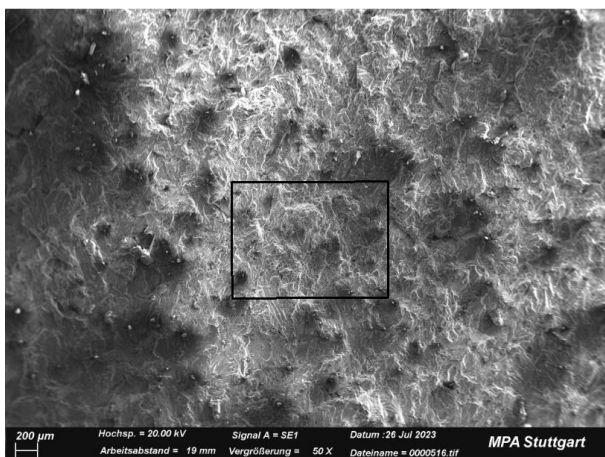


Bild 42: Probe 5.5, Detail aus dem Übergangsbereich Bild 40 Schwingriss vor und nach der Auslagerung

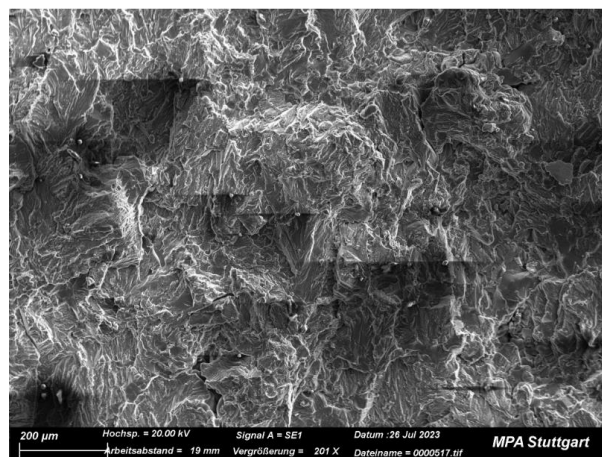


Bild 43: Probe 5.5, Detail Schwingriss vor und nach der Auslagerung aus Bild 42

Probe 5.5 liefert das gleiche Ergebnis wie Probe 5.b, Fall II. Analog zu Probe 5.b ist eine Auswertung der Risslänge nur in der Makroaufnahme möglich. Im Rasterelektronenmikroskop lässt sich die Länge des zyklischen Risswachstum vor der Auslagerung nicht von dem zyklischen Risswachstum, welches nach der Auslagerung eingebracht wurde, differenzieren.

**5.2.3 Probe 6.b; Legierungsvariante B; 17.36 MPa m<sup>0.5</sup>; H<sub>2</sub> mit 70 ppm H<sub>2</sub>O; 100bar, RT 20°C**

Tabelle 12: Probe 6.b; Legierungsvariante B; 17.36 MPa m<sup>0.5</sup>

	Probennummer	6.b	
	Probentyp	ASTM	
I	effektive Kerblänge	16.044	mm
a <sub>Kerb_compliance</sub>	effektive Kerblänge über Compliancemethode	16.032	mm
a <sub>pre_compliance</sub>	Anfangsriszlänge über Compliancemethode	18.153	mm
B <sub>N</sub>	Probendicke mit Seitenkerben (5 %)	16.185	mm
a/W	für die Anfangsriszlänge	0.446	
R <sub>P0,2</sub>	Streckgrenze	310	MPa
K <sub>IApp</sub>	Spannungsintensitätsfaktor (0.056*R <sub>P0,2</sub> )	17.36	MPa*m <sup>0.5</sup>
Startlast	benötigte Kraft für K <sub>IApp</sub>	5900	N
Endlast	Kraft nach Versuchsende beim Wiederbelasten	5259	N
	Endlast / Startlast (%)	89.14	%
Auslagerung	90% rel. Luftfeuchte, 20°C, 90 Tage		
	H <sub>2</sub> 100bar, 70 PPM H <sub>2</sub> O, 20°C, 90 Tage	X	
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (REM)	19.702	mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (REM)	20.505	mm
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (Makro)	19.835	mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (Makro)	20.748	mm
a <sub>A</sub>	Flächenäquivalent Anfangsriszlänge		mm
K <sub>I</sub>	tatsächlicher Spannungsintensitätsfaktor	19.742	MPa*m <sup>0.5</sup>
	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub>	0.803	
	K <sub>I</sub> / K <sub>IAPP</sub>	1.14	
I	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16mm K <sub>I</sub> < K <sub>IAPP</sub> (invalid)		
II	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16mm K <sub>I</sub> ≥ K <sub>IAPP</sub> (pass)		
III	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16mm K <sub>I</sub> ≤ K <sub>IAPP</sub> (fail)		
IV	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16mm K <sub>I</sub> > K <sub>IAPP</sub> (invalid)	X	

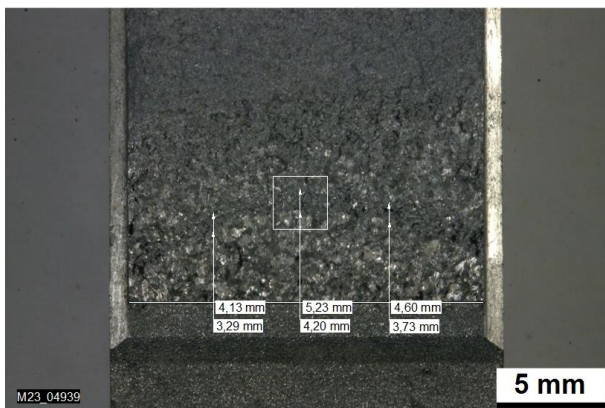


Bild 44: Probe 6.b Makroaufnahme Rissfläche mit ausgemessenem Schwingriss und Rissfortschritt bei 25/50/75% der Probenbreite

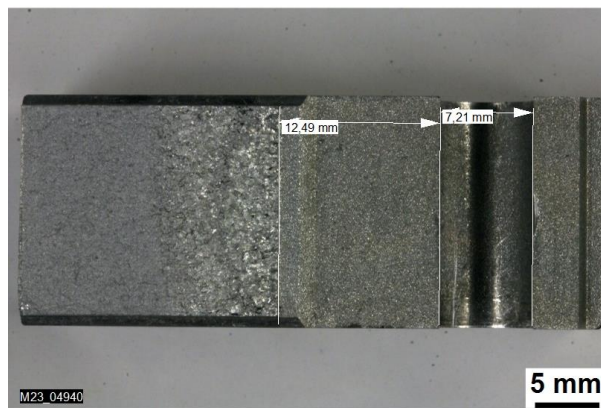


Bild 45: Probe 6.b Makroaufnahme einer Probenhälfte mit ausgemessener Länge von der Lastangriffslinie bis zur erodierten Kerbe

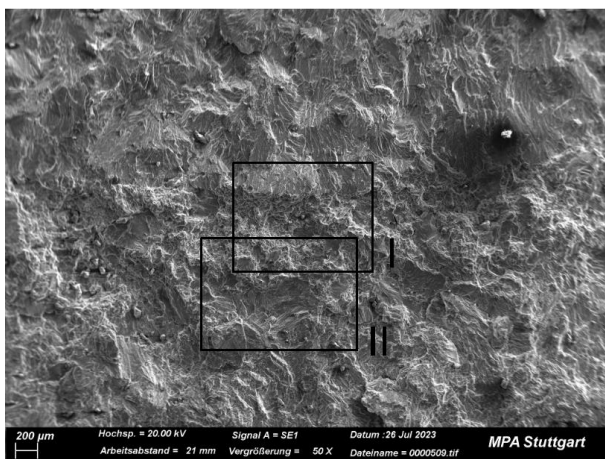


Bild 46: Probe 6.b, Detail aus dem Übergang des Schwingriss vor der Auslagerung zum Rissfortschritt zum Schwingriss nach der Auslagerung

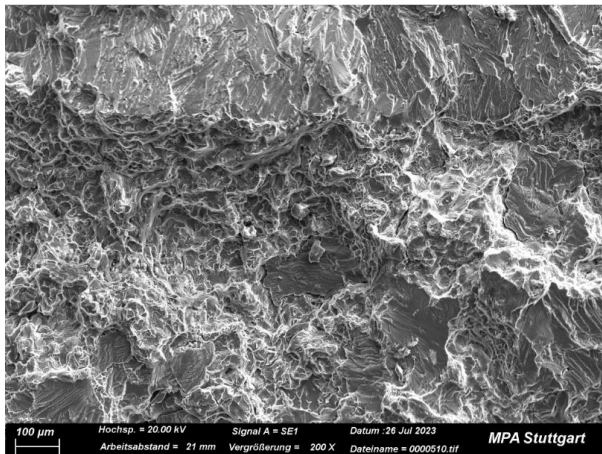


Bild 47: Probe 6.b, Detail I Bild 46, Übergang Rissfortschritt zum Schwingriss nach der Auslagerung

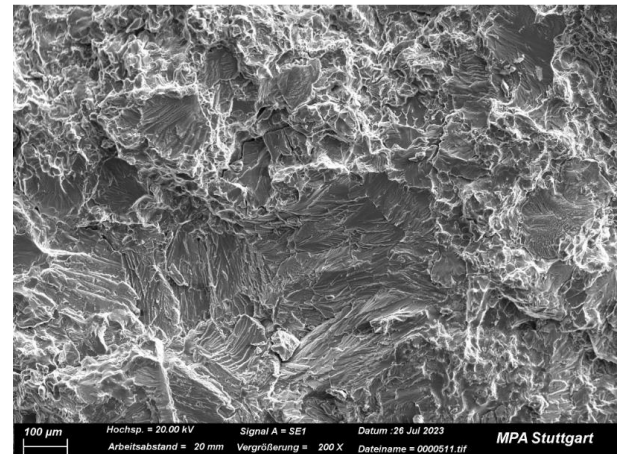


Bild 48: Probe 6.b, Detail II Bild 31, Übergang Schwingriss vor der Auslagerung zum Rissfortschritt

Probe 6.b ist in Fall IV einzuordnen, ungültig. Der Rissfortschritt ist größer als 0,16 mm ebenso ist  $K_I$  größer als  $K_{IApp}$ . In Bild 44 sind der Schwingriss und der Rissfortschritt gut zu erkennen. Bild 48 zeigt deutlich den Übergang vom transkristallinen Schwingriss vor der Auslagerung (untere Hälfte) zum duktilen Rissfortschritt mit Wabenstruktur (obere Hälfte). Bild 47 zeigt den Übergang vom Rissfortschritt zum Schwingriss nach der Auslagerung.

**5.2.4 Probe 6.c; Legierungsvariante B; 17.36 MPa m<sup>0.5</sup>; H<sub>2</sub> mit 70 ppm H<sub>2</sub>O; 100bar, RT**

Tabelle 13: Probe 6.c; Legierungsvariante B; 17.36 MPa m<sup>0.5</sup>

	Probennummer	6.c	
	Probentyp	ASTM	
I	effektive Kerblänge	16.05	mm
a <sub>Kerb_compliance</sub>	effektive Kerblänge über Compliancemethode	16.044	mm
a <sub>pre_compliance</sub>	Anfangsriszlänge über Compliancemethode	17.842	mm
B <sub>N</sub>	Probendicke mit Seitenkerben (5 %)		mm
a/W	für die Anfangsriszlänge	0.446	
R <sub>P0,2</sub>	Streckgrenze	310	MPa
K <sub>IApp</sub>	Spannungsintensitätsfaktor (0.056*R <sub>P0,2</sub> )	17.36	MPa*m <sup>0.5</sup>
Startlast	benötigte Kraft für K <sub>IApp</sub>	6040	N
Endlast	Kraft nach Versuchsende beim Wiederbelasten	4716	N
	Endlast / Startlast (%)	78.08	%
Auslagerung	90 % rel. Luftfeuchte, 20 °C, 90 Tage		
	H <sub>2</sub> 100 bar, 70PPM H <sub>2</sub> O, 20 °C, 90 Tage	X	
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (REM)	20.186	mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (REM)	21.524	mm
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (Makro)	20.065	mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (Makro)	21.982	mm
a <sub>A</sub>	Flächenäquivalent Anfangsriszlänge		mm
K <sub>I</sub>	tatsächlicher Spannungsintensitätsfaktor	20.986	MPa*m <sup>0.5</sup>
	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub>	1.338	
	K <sub>I</sub> / K <sub>IAPP</sub>	1.21	
I	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16 mm K <sub>I</sub> < K <sub>IAPP</sub> (invalid)		
II	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16 mm K <sub>I</sub> ≥ K <sub>IAPP</sub> (pass)		
III	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16 mm K <sub>I</sub> ≤ K <sub>IAPP</sub> (fail)		
IV	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16 mm K <sub>I</sub> > K <sub>IAPP</sub> (invalid)	X	



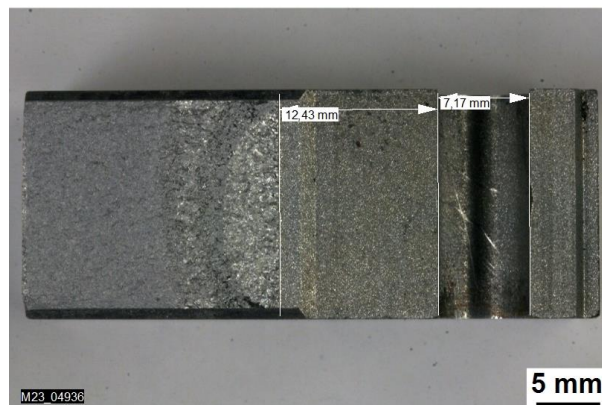
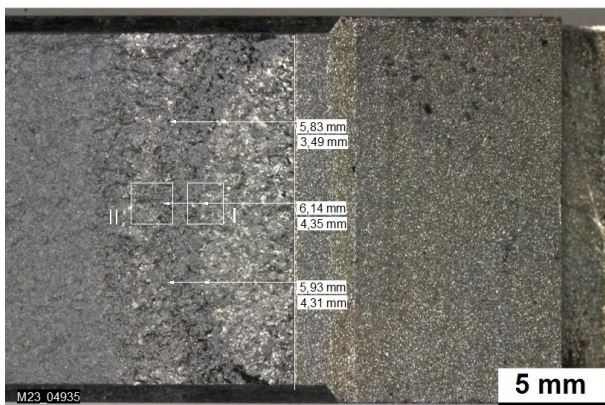


Bild 49: Probe 6.c Makroaufnahme Rissfläche mit ausgemessenem Schwingriss und Rissfortschritt bei 25/50/75% der Probenbreite.

Bild 50: Probe 6.c Makroaufnahme Probenhälfte mit ausgemessener Länge von Lastangriffslinie bis zur erodierten Kerbe

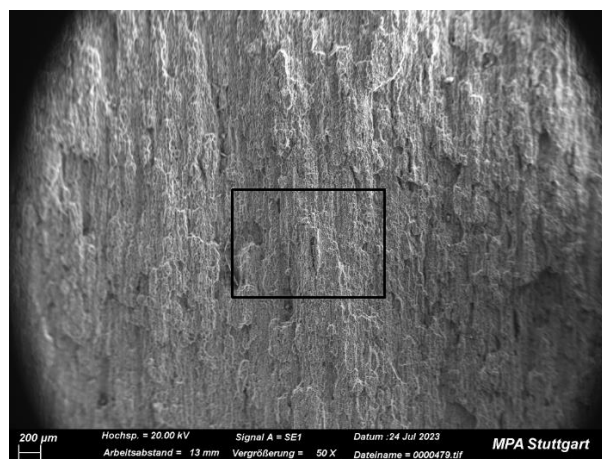
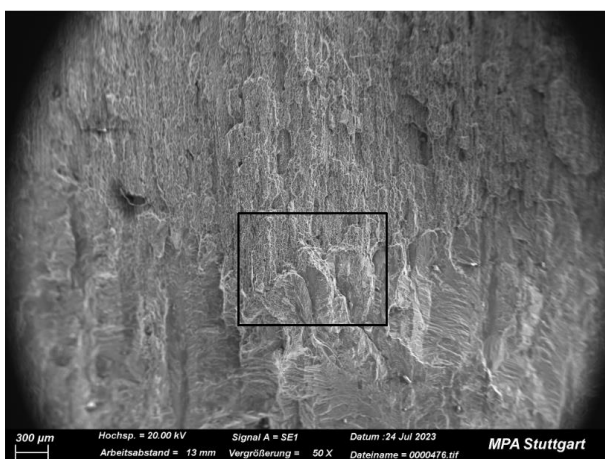


Bild 51: Probe 6.c, Detail I aus Bild 49 . Übergang Schwingriss zum Rissfortschritt

Bild 52: Probe 6.c, Detail II aus Bild 49. Übergang Rissfortschritt zum Schwingriss nach der Auslagerung ist nicht sichtbar

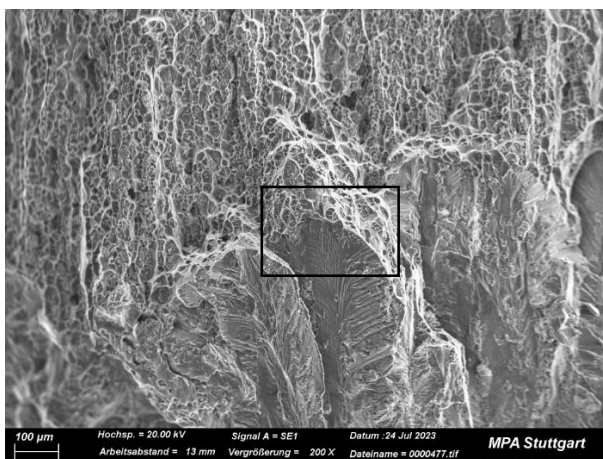


Bild 53: Probe 6.c, Detail aus Bild 51. Übergang Schwingriss zum Rissfortschritt

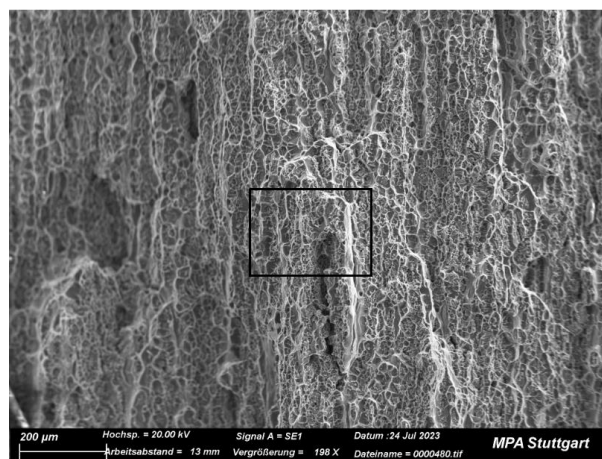


Bild 54: Probe 6.c, Detail aus Bild 52. Übergang Rissfortschritt zum Schwingriss nach der Auslagerung ist nicht sichtbar

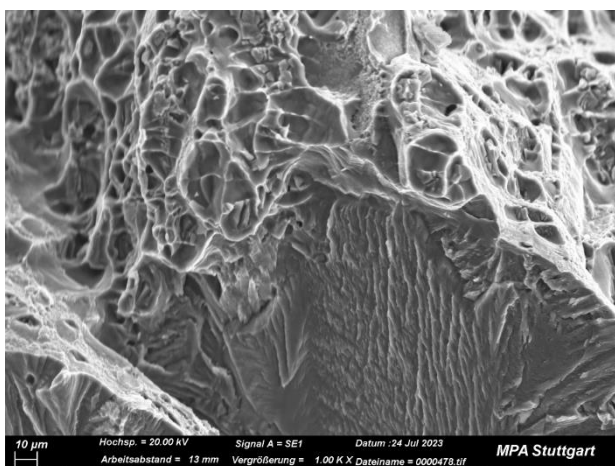


Bild 55: Probe 6.c, Detail aus Bild 53. Übergang Schwingriss zum Rissfortschritt

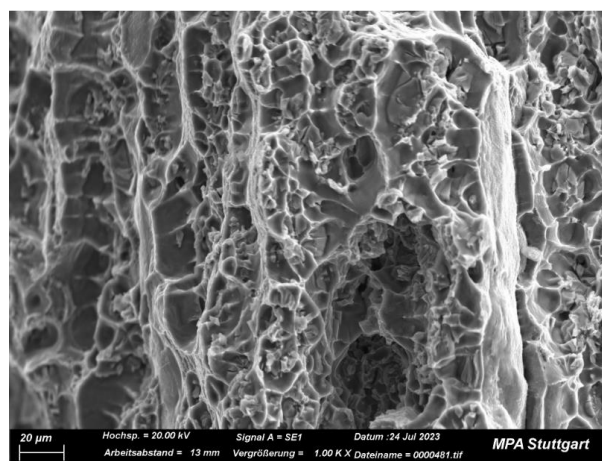


Bild 56: Probe 6.c, Detail aus Bild 54. Übergang Rissfortschritt zum Schwingriss nach der Auslagerung ist nicht sichtbar

Analog zu Probe 6.b ist Probe 6.c in Fall IV einzuordnen. Der Rissfortschritt ist deutlich ausgeprägter als bei Probe 6.c. Schwingriss, Rissfortschritt, Schwingriss nach der Auslagerung und Restbruch sind optisch sehr gut zu unterscheiden. Auffällig ist das der Schwingriss auf der rechten Seite (Bild 49) nicht auf der Breite der Probe austritt. Im Rasterelektronenmikroskop ist der Übergang von Schwingriss zu Rissfortschritt deutlich zu erkennen (Bild 51, Bild 53 und Bild 55). Der Übergang vom Rissfortschritt zum Schwingriss nach der Auslagerung ist in Bild 52, Bild 54 und Bild 56 nicht sichtbar. In Bild 55 ist der Übergang vom transkristallinem Schwingriss zum duktilen Rissfortschritt mit Wabenstruktur gut sichtbar.

**5.2.5 Probe 3; Legierungsvariante C; 17.36 MPa m<sup>0.5</sup>; H<sub>2</sub> mit 70 ppm H<sub>2</sub>O; 100bar, RT**

Tabelle 14: Probe 3; Legierungsvariante C; 17.36 MPa m<sup>0.5</sup>

	Probennummer	3	
	Probentyp	DIN EN ISO	
I	effektive Kerblänge	13.693	mm
a <sub>Kerb_compliance</sub>	effektive Kerblänge über Compliancemethode	13.684	mm
a <sub>pre_compliance</sub>	Anfangsriszlänge über Compliancemethode	16.657	mm
B <sub>N</sub>	Probendicke mit Seitenkerben (5 %)	16.206	mm
a/W	für die Anfangsriszlänge	0.299	
R <sub>P0,2</sub>	Streckgrenze	310	MPa
K <sub>IApp</sub>	Spannungsintensitätsfaktor (0.056*R <sub>P0,2</sub> )	17.36	MPa*m <sup>0.5</sup>
Startlast	benötigte Kraft für K <sub>IApp</sub>	8390	N
Endlast	Kraft nach Versuchsende beim Wiederbelasten	8083	N
	Endlast / Startlast (%)	96.34	%
Auslagerung	90% rel. Luftfeuchte, 20 °C, 90 Tage		
	H <sub>2</sub> 100 bar, 70 PPM H <sub>2</sub> O, 20 °C, 90 Tage	X	
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (REM)	nicht auswertbar	mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (REM)	nicht auswertbar	mm
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (Makro)	nicht auswertbar	mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (Makro)	nicht auswertbar	mm
a <sub>A</sub>	Flächenäquivalent Anfangsriszlänge	nicht auswertbar	mm
K <sub>I</sub>	tatsächlicher Spannungsintensitätsfaktor	nicht auswertbar	MPa*m <sup>0.5</sup>
	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub>	-	
	K <sub>I</sub> / K <sub>IAPP</sub>	-	
I	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16 mm K <sub>I</sub> < K <sub>IAPP</sub> (invalid)		
II	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16 mm K <sub>I</sub> ≥ K <sub>IAPP</sub> (pass)		
III	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16 mm K <sub>I</sub> ≤ K <sub>IAPP</sub> (fail)		
IV	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16 mm K <sub>I</sub> > K <sub>IAPP</sub> (invalid)		

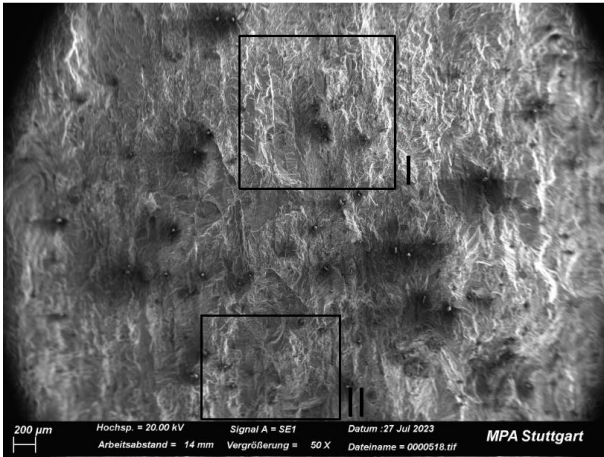
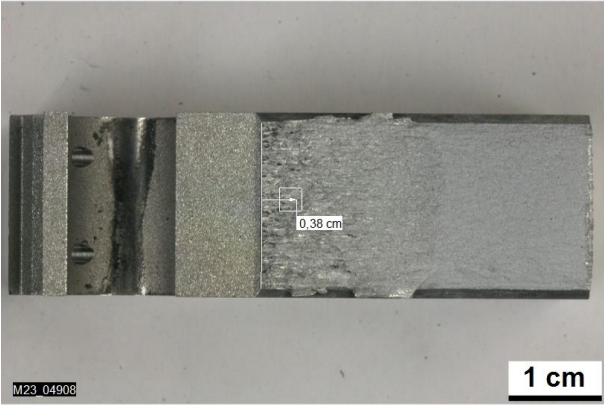


Bild 57: Probe 3 Makroaufnahme Probenhälfte mit Markierung für den Bereich des Schwingrisses

Bild 58: Probe 3 Detail aus Bild 57.

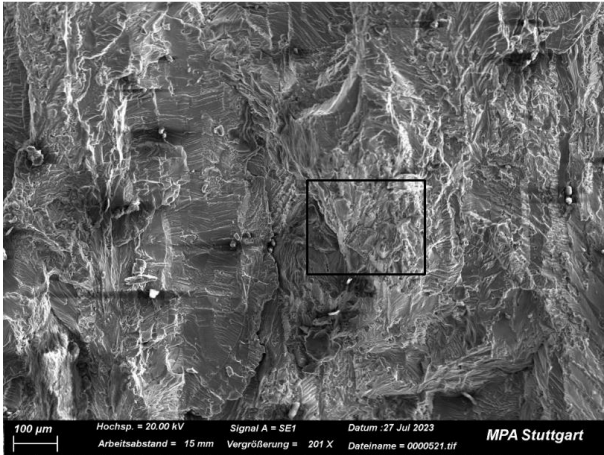
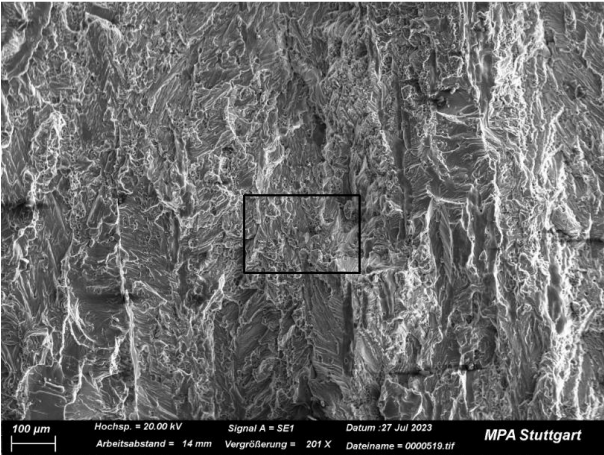


Bild 59: Probe 3 Detail I aus Bild 58.

Bild 60: Probe 3 Detail II aus Bild 58

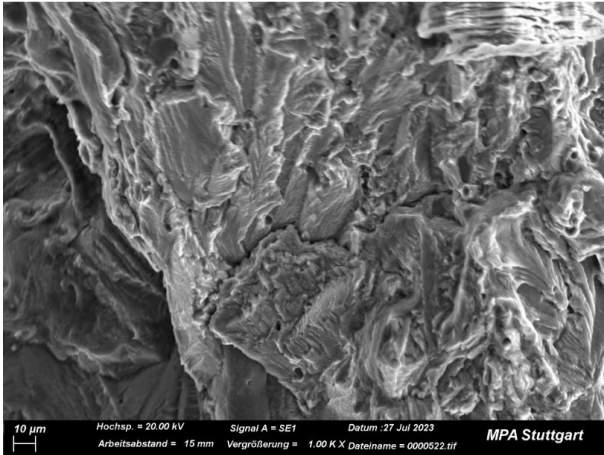
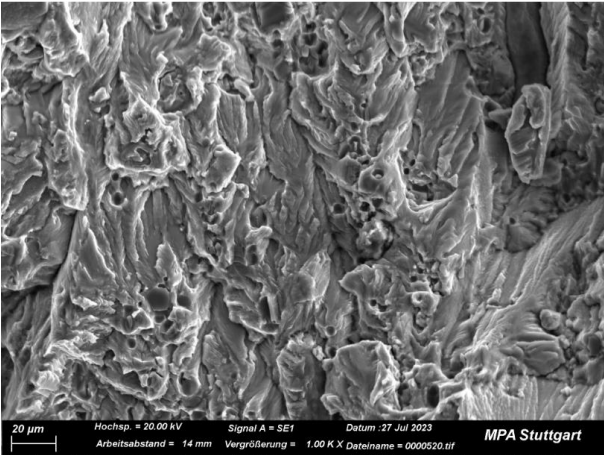


Bild 61: Probe 3 Detail aus Bild 59

Bild 62: Probe 3 Detail aus Bild 60

Probe 3 kann nicht ausgewertet werden. Ein Rissfortschritt lässt sich weder in der Makroaufnahme noch im Rasterelektronenmikroskop identifizieren. Die Schwingstreifen lassen sich im Rasterelektronenmikroskop eindeutig erkennen, Bild 59 und Bild 60. Der Schwingriss vor der Auslagerung, möglicher Rissfortschritt und der Schwingriss nach der Auslagerung lassen sich sowohl in der Makroaufnahme (Bild 57) als auch im Rasterelektronenmikroskop (Bild 58 - Bild 62) nicht voneinander unterscheiden.

**5.2.6 Probe 4; Legierungsvariante C; 17.36 MPa m<sup>0.5</sup>; H<sub>2</sub> mit 70 ppm H<sub>2</sub>O; 100bar, RT**

Tabelle 15: Probe 4; Legierungsvariante C; 17.36 MPa m<sup>0.5</sup>

	Probennummer	4	
	Probentyp	DIN EN ISO	
I	effektive Kerblänge	13.678	mm
a <sub>Kerb_compliance</sub>	effektive Kerblänge über Compliancemethode	13.675	mm
a <sub>pre_compliance</sub>	Anfangsriszlänge über Compliancemethode	16.153	mm
B <sub>N</sub>	Probendicke mit Seitenkerben (5 %)	16.255	mm
a/W	für die Anfangsriszlänge	0.298	
R <sub>P0,2</sub>	Streckgrenze	310	MPa
K <sub>IApp</sub>	Spannungsintensitätsfaktor (0.056*R <sub>P0,2</sub> )	17.36	MPa*m <sup>0.5</sup>
Startlast	benötigte Kraft für K <sub>IApp</sub>	8640	N
Endlast	Kraft nach Versuchsende beim Wiederbelasten	8540	N
	Endlast / Startlast (%)	98.84	%
Auslagerung	90% rel. Luftfeuchte, 20 °C, 90 Tage		
	H <sub>2</sub> 100 bar, 70 PPM H <sub>2</sub> O, 20 °C, 90 Tage	X	
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (REM)	nicht auswertbar	mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (REM)	nicht auswertbar	mm
a <sub>pre</sub>	Mittelwert Anfangsriszlänge (Makro)	nicht auswertbar	mm
a <sub>SCC</sub>	Mittelwert Versuchsriszlänge (Makro)	nicht auswertbar	mm
a <sub>A</sub>	Flächenäquivalent Anfangsriszlänge	nicht auswertbar	mm
K <sub>I</sub>	tatsächlicher Spannungsintensitätsfaktor	nicht auswertbar	MPa*m <sup>0.5</sup>
	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub>	-	
	K <sub>I</sub> / K <sub>IAPP</sub>	-	
I	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16 mm K <sub>I</sub> < K <sub>IAPP</sub> (invalid)		
II	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> ≤ 0,16 mm K <sub>I</sub> ≥ K <sub>IAPP</sub> (pass)		
III	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16 mm K <sub>I</sub> ≤ K <sub>IAPP</sub> (fail)		
IV	a <sub>SCC</sub> - a <sub>pre</sub> > 0,16 mm K <sub>I</sub> > K <sub>IAPP</sub> (invalid)		

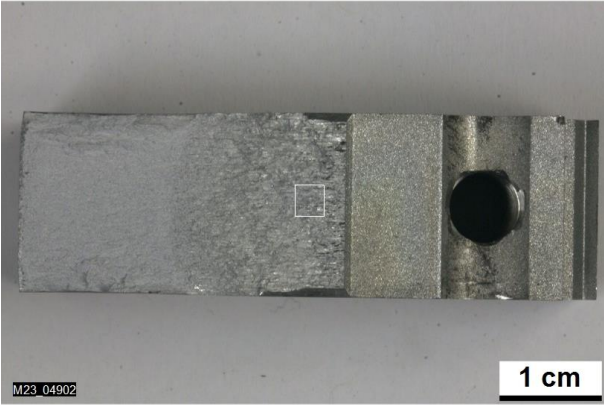


Bild 63: Probe 4 Makroaufnahme Probenhälfte mit Markierung für den Bereich des Schwingrisses

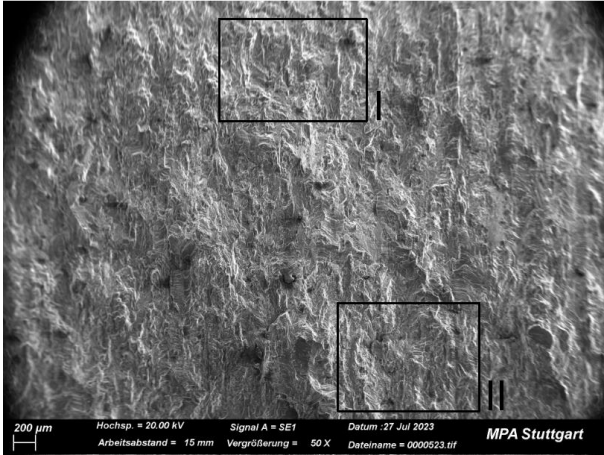


Bild 64: Probe 4, Detail aus Bild 63.

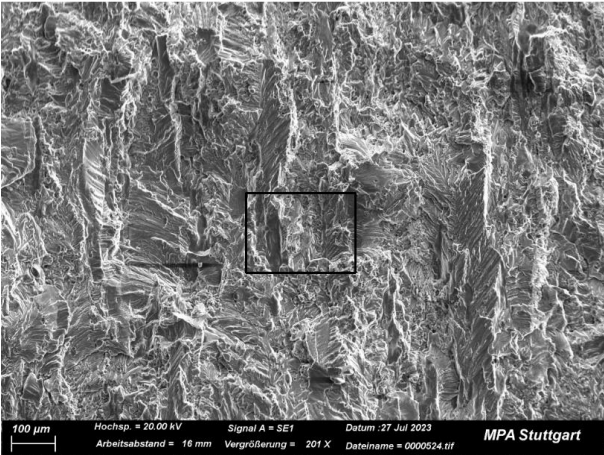


Bild 65: Probe 4, Detail I aus Bild 64.

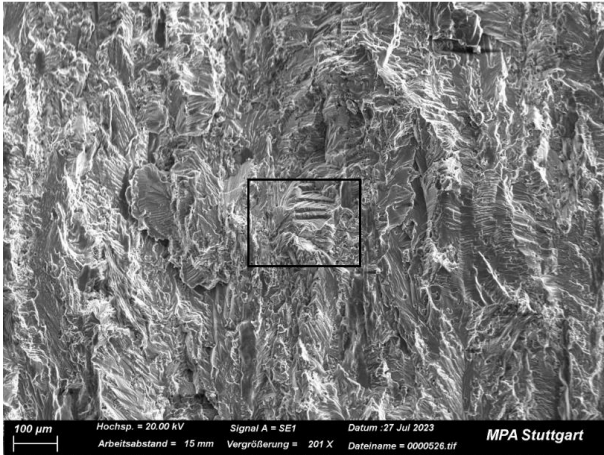


Bild 66: Probe 4, Detail II aus Bild 64.

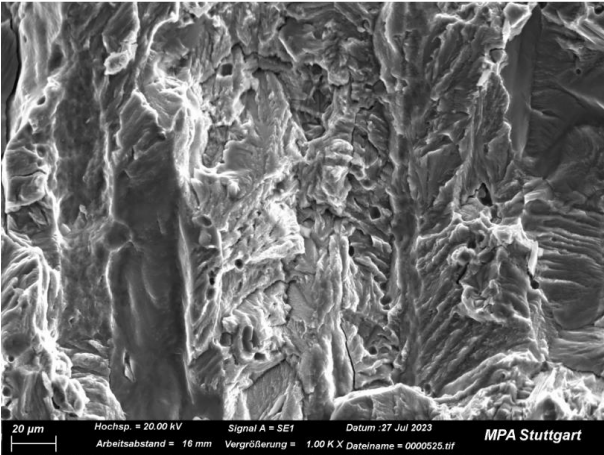


Bild 67: Probe 4, Detail aus Bild 65.

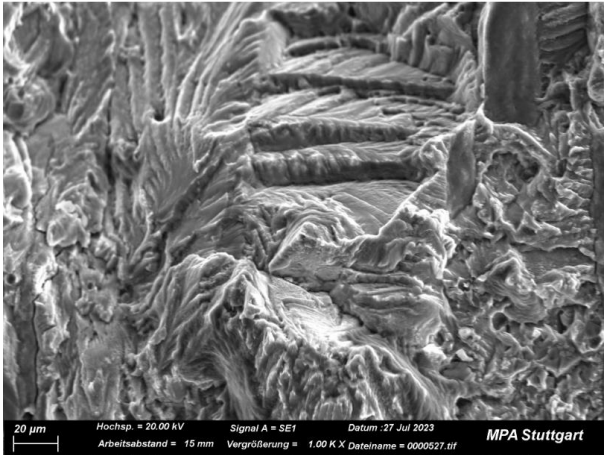


Bild 68: Probe 4, Detail aus Bild 66.

Probe 4 kann analog zu Probe 3 nicht ausgewertet werden. Ein Rissfortschritt lässt sich weder in der Makroaufnahme noch im Rasterelektronenmikroskop identifizieren. Die Schwingstreifen lassen sich im Rasterelektronenmikroskop eindeutig erkennen, Bild 65 und Bild 66. Der Schwingriss vor der Auslagerung, möglicher Rissfortschritt und der Schwingriss nach der Auslagerung lassen sich sowohl in der Makroaufnahme (Bild 63) als auch im Rasterelektronenmikroskop (Bild 64 - Bild 68) nicht voneinander unterscheiden.



### 5.3 Probe 5; Legierungsvariante C; Überprüfung des Schwingrisses

Tabelle 16: Probe 5; Legierungsvariante C

	Probennummer	5	
	Probentyp	DIN EN ISO	
I	effektive Kerblänge	13.728	mm
$a_{\text{Kerb\_compliance}}$	effektive Kerblänge über Compliancemethode	13.725	mm
$a_{\text{pre\_compliance}}$	Anfangsriszlänge über Compliancemethode	16.296	mm
$B_N$	Probendicke mit Seitenkerben (5 %)	16.24	mm
$a/W$	für die Anfangsriszlänge	0.299	
$R_{P0,2}$	Streckgrenze	310	MPa
$K_{I\text{App}}$	Spannungsintensitätsfaktor ( $0.056 \cdot R_{P0,2}$ )	17.36	MPa*m <sup>0.5</sup>
Startlast	benötigte Kraft für $K_{I\text{App}}$		N
Endlast	Kraft nach Versuchsende beim Wiederbelasten		N
	Endlast / Startlast (%)		%
Auslagerung	90 % rel. Luftfeuchte, 20 °C, 90 Tage		
	H <sub>2</sub> 100 bar, 70 PPM H <sub>2</sub> O, 20 °C, 90 Tage		
$a_{\text{pre}}$	Mittelwert Anfangsriszlänge (REM)		mm
$a_{\text{SCC}}$	Mittelwert Versuchsriszlänge (REM)		mm
$a_{\text{pre}}$	Mittelwert Anfangsriszlänge (Makro)	17.381	mm
$a_{\text{SCC}}$	Mittelwert Versuchsriszlänge (Makro)		mm
$a_A$	Flächenäquivalent Anfangsriszlänge		mm
$K_I$	tatsächlicher Spannungsintensitätsfaktor		MPa*m <sup>0.5</sup>
	$a_{\text{SCC}} - a_{\text{pre}}$	-	
	$K_I / K_{I\text{APP}}$	-	
I	$a_{\text{SCC}} - a_{\text{pre}} \leq 0,16 \text{ mm}$ $K_I < K_{I\text{APP}}$ (invalid)		
II	$a_{\text{SCC}} - a_{\text{pre}} \leq 0,16 \text{ mm}$ $K_I \geq K_{I\text{APP}}$ (pass)		
III	$a_{\text{SCC}} - a_{\text{pre}} > 0,16 \text{ mm}$ $K_I \leq K_{I\text{APP}}$ (fail)		
IV	$a_{\text{SCC}} - a_{\text{pre}} > 0,16 \text{ mm}$ $K_I > K_{I\text{APP}}$ (invalid)		

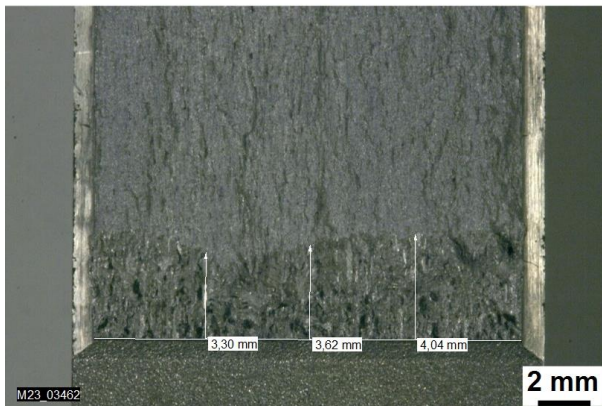


Bild 69: Probe 5 Makroaufnahme Rissfläche mit ausgemessenem Schwingriss bei 25/50/75% der Breite.

Probe 5 wurde als Reserveprobe nicht ausgelagert und im Anschluss an die Auslagerung aller anderen Proben nur mit dem initialen Schwingriss aufgebrochen. Der Schwingriss ist gegenüber dem Restbruch sehr gut zu erkennen und auswertbar.

## 6 Zusammenfassung der Ergebnisse und Ergebnisinterpretation

Im Projekt FAT II wurde ein Vergleich zwischen Spannungsrisskorrosionsversuchen an Legierungsvarianten von EN AW 6082A (Tabelle 1) nach HPIS E103: 2018 in feuchter Luft gegenüber feuchtem Wasserstoff angestrebt, siehe Tabelle 3. Der experimentelle Ablauf der Spannungsrisskorrosionsversuche basiert wesentlich auf dem Ablauf der im Vorgängerprojekt FAT I durchgeführten Versuche sowie den Abläufen der Normen: HPIS E 103:2018, DIN EN ISO 7539-6:2018, DIN EN ISO 7866:2021. Es wurden jeweils zwei Versuche je Legierungsvariante und Medium durchgeführt. Die Auswertung und Bewertung der Versuche erfolgte dabei entsprechend den Auswertekriterien der HPIS E103:2018, siehe Tabelle 2. Die Ergebnisse aus FAT II sind in Tabelle 17 zusammengestellt. Ein Vergleich der Ergebnisse zwischen den Projekte FAT I und FAT II ist in Tabelle 18 dargestellt.

Für die Auslagerung der Proben unter feuchter Wasserstoffatmosphäre wurde ein Autoklav gefertigt und erfolgreich in Betrieb genommen. Dieses System steht nun für weitere Untersuchungen zur Verfügung.

Für die Legierungsvariante A erzielten alle vier Versuche aus dem Projekt FAT II anhand der Auswertung der Risslängen und der Spannungsintensitätsfaktoren eine Einteilung in Klasse II nach HPIS E103: 2018 mit der „pass“-Beurteilung, siehe Tabelle 17. Sowohl für die Versuche in feuchter Luft als auch für die Versuche in feuchtem Wasserstoff konnte kein Risswachstum infolge der Auslagerung bei erfülltem Spannungsintensitätskriterium beobachtet werden. Basierend auf den Ergebnissen konnte kein Einfluss des Umgebungsmediums festgestellt werden. Anhand der Ergebnisse aus FAT I und FAT II hat die Legierung A die Qualifizierung (überwiegend) bestanden, siehe Tabelle 18.

Für die Legierungsvariante B erzielten alle vier Versuche aus Projekt FAT II anhand der Auswertung der Risslängen und der Spannungsintensitätsfaktoren eine Einteilung in Klasse IV nach HPIS E103: 2018 mit der „invalid“-Beurteilung, siehe Tabelle 17. Sowohl für die Versuche in feuchter Luft als auch für die Versuche in feuchtem Wasserstoff konnte Risswachstum bei übertroffenem Spannungsintensitätskriterium beobachtet werden. Da das Risswachstum sowohl unter feuchter Luft als auch unter feuchtem Wasserstoff beobachtet wurde, konnte hier ebenfalls kein Einfluss des Umgebungsmediums festgestellt werden. Anhand der Ergebnisse aus FAT I und FAT II konnte die Legierung B weder nach HPIS E103:2018 qualifiziert noch disqualifiziert werden, da die Versuchsergebnisse trotz korrekter Durchführung nicht den Gültigkeitskriterien nach HPIS E103:2018 entsprachen, siehe Tabelle 18. Mögliche Ursachen hierfür sind:

Bei den Versuchsauswertungen der Rissflächen der Proben aus Legierungsvariante C konnte keine Einteilung in die nach Norm vorgegebenen Klassen erfolgen, da die verschiedenen Rissbereiche (Schwingriss vor der Auslagerung, Risswachstum und Schwingriss nach der Auslagerung) auf den Rissflächen weder im Lichtmikroskop noch im Rasterelektronenmikroskop unterschieden werden konnten, siehe Tabelle 17.

Obwohl keine Vergleichsuntersuchungen in trockener Luft oder reinem Wasserstoff durchgeführt wurden, wird häufig angenommen, dass bei diesen Legierungen unter trockener Luft bzw. reinem Wasserstoff kein Risswachstum auftreten kann, solange ein kritisches Spannungsintensitätskriterium nicht überschritten wird. Ausgehend von dieser Annahme, kann geschlossen werden, dass Feuchtigkeit in Luft und Wasserstoff kein Risswachstum bei Legierungsvariante A bei eingehaltenem Spannungsintensitätskriterium verursacht. Bei Legierungsvariante B hingegen kann geschlossen werden, dass die Feuchtigkeit verantwortlich für das Risswachstum bei eingehaltenem Spannungsintensitätskriterium ist. Unter der Annahme, dass Feuchtigkeit und eingehaltenes Spannungsintensitätskriterium für das Risswachstum erforderlich sind, kann auf Basis der durchgeführten Untersuchungen, der Schluss gezogen werden, dass Feuchtigkeit im Wasserstoff auch bereits zu einem Risswachstum führt.

Tabelle 17: Ergebnis

Probennummer	Legierungsvariante	Prüfmedium	Risslänge	Spannungsintensitätskriterium	Klasse / Bewertung
5.6	A	feuchte Luft	$a_{scc} - a_{pre} \leq 0,16$	$K_I \geq K_{IAPP}$	II / pass
5.b	A	feuchter Wasserstoff	$a_{scc} - a_{pre} \leq 0,16$	$K_I \geq K_{IAPP}$	II / pass
5.5	A	feuchter Wasserstoff	$a_{scc} - a_{pre} \leq 0,16$	$K_I \geq K_{IAPP}$	II / pass
5.a	A	feuchte Luft	$a_{scc} - a_{pre} \leq 0,16$	$K_I \geq K_{IAPP}$	II / pass
6.a	B	feuchte Luft			Bruch beim belasten
6.b	B	feuchter Wasserstoff	$a_{scc} - a_{pre} > 0,16$	$K_I > K_{IAPP}$	IV / invalid
6.c	B	feuchter Wasserstoff	$a_{scc} - a_{pre} > 0,16$	$K_I > K_{IAPP}$	IV / invalid
6.6	B	feuchte Luft	$a_{scc} - a_{pre} > 0,16$	$K_I > K_{IAPP}$	IV / invalid
1	C	feuchte Luft			nicht auswertbar
2	C	feuchte Luft			nicht auswertbar
3	C	feuchter Wasserstoff			nicht auswertbar
4	C	feuchter Wasserstoff			nicht auswertbar
5	C	Begutachtung Schwingriss			Reserve

Tabelle 18: Vergleich Ergebnisse FAT I und FAT II

Legierungsvariante	Prüfmedium	Klasse / Bewertung	Projekt
A	feuchte Luft (20 °C, 90 % rF)	II / pass	FAT II
A	feuchte Luft (20 °C, 85 % rF)	I / invalid	FAT I
A	feuchte Luft (20 °C, 100 % rF)	II / pass	FAT I
A	feuchte Luft (30 °C, 85 % rF)	II / pass	FAT I
A	feuchte Luft (30 °C, 100 % rF)	II / pass	FAT I
A	feuchter Wasserstoff	II / pass	FAT II
B	feuchte Luft (20 °C, 90 % rF)	IV / invalid	FAT II
B	feuchte Luft (20 °C, 85 % rF)	III / fail	FAT I
B	feuchte Luft (20 °C, 100 % rF)	III / fail	FAT I
B	feuchte Luft (30 °C, 85 % rF)	III / fail	FAT I
B	feuchte Luft (30 °C, 100 % rF)	III / fail	FAT I
B	feuchter Wasserstoff	IV / invalid	FAT II

## 7 Einflussfaktoren und Empfehlungen

### 7.1 Einflussfaktoren auf das Ergebnis

Aus den durchgeführten Versuchen lässt sich nur bedingt ein Einfluss der Legierungsbestandteile auf das Ergebnis ableiten. Vorranging aufgrund der unterschiedlichen Probengeometrie und dem damit unterschiedlichen aufgetragenen elastischen Spannungsintensitätsfaktoren  $K_{IAPP}$  bei der Versuchsdurchführung. In den folgenden Kapiteln werden die Einflussfaktoren auf das Ergebnis weiter ausgeführt.

#### 7.1.1 Fehlender Grenzwert für Spannungsrisskorrosion für das Medium

Das angewandte Vorgehen in Anlehnung an FAT I und nach HPIS E103: 2018 lässt keine allgemeine Aussage über den Widerstand gegen Spannungsrisskorrosion der Legierungsvarianten in unterschiedlichen Medien zu. Der Rissintensitätsfaktor  $K_{IA}$  zur Belastung der Proben wird über die Streckgrenze berechnet. Für die Überprüfung des Medieneinflusses ist es aber notwendig den Grenzwert des Spannungsintensitätsfaktors für Spannungsrisskorrosion des Werkstoffes in einem der Prüfmedien zu kennen. Bei Erreichen des kritischen Rissintensitätsfaktors tritt Risswachstum auch ohne korrosive Atmosphäre auf. In einem solchen Fall erscheint eine 90-tägige Auslagerung zur Ermittlung der Spannungskorrosionsanfälligkeit als nicht effizient und abschließend kaum interpretierbar. Es wird empfohlen eine alternative Methodik, wie eine definierte Reduzierung des  $K_{IAPP}$  anzugeben. Elastisch-plastisches Werkstoffverhalten sollte ebenfalls berücksichtigt werden. Ebenso sollten Versuche zur Ermittlung des Grenzwerts des Spannungsintensitätsfaktors in Luft durchgeführt werden.

#### 7.1.2 Unterschiede bei der Bestimmung von $K_{IAPP}$

Zwischen HPIS E103:2018 und DIN EN ISO-7866:2021 besteht ein Unterschied in der Bestimmung von  $K_{IAPP}$ , die nachfolgend erläutert wird.

Nach HPIS E103:2018 wird  $K_{IAPP} = 0,056 \sigma_{0,2}$  berechnet, verweist allerdings auf „B.6.2 of ISO 7866:2012“

Nach DIN EN ISO 7866: 2012 wird  $K_{IAPP} = 0,056 R_{egSLC}$  berechnet.

- $\sigma_{0,2}$ : Mittelwert der Streckgrenze für zwei Proben der geprüften Gasflasche HPIS E 103:2018
- $R_{eSLC}$ : Mittelwert der Streckgrenze für zwei Proben der geprüften Gasflasche DIN EN ISO 7866: 2021
- $R_{eg}$ : garantierte Streckgrenze der Gasflasche DIN EN ISO 7866: 2021

- SLC: Rissbildung unter Dauerbeanspruchung (sustained-load cracking) DIN EN ISO 7866: 2021

Der Spannungsintensitätsfaktor  $K_{IAPP}$  wird nach DIN EN ISO 7866: 2021, auf die in der HPIS E103:2018 verwiesen wird, mit der garantierten Mindeststreckgrenze berechnet und nicht mit dem Mittelwert der Streckgrenze für zwei Proben wie in HPIS E103:2018 angegeben.

$$\sigma_{0,2} = R_{eSLC} \neq R_{eg}$$

Es findet nach HPIS E103:2018 keine Absicherung der Spannungsrissskorrosion gegen den garantierten, für das Bauteil nötigen, Mindestwert der Streckgrenze statt, sondern gegen die aus dem Zugersuch ermittelte maximale Streckgrenze der geprüften Charge der Legierung. Dies führt zudem für Legierungen mit höherer Streckgrenze zu höheren Anforderungen und verhindert einen Vergleich unterschiedlicher Legierungen gegen die gleiche Mindestanforderung. So könnte beispielsweise Legierung B bei einem  $K_{IAPP}$  von Legierung A auch noch keinen Rissfortschritt zeigen und könnte demnach unter ähnlicher Belastung wie Legierung A verwendet werden. Aus HPIS E103:2018 und DIN EN ISO 7866: 2021 geht zudem nicht hervor weshalb 5.6 % der Streckgrenze dem Spannungsintensitätsfaktors  $K_{IAPP}$  entsprechen sollen.

### 7.1.3 Diskussion Rissfortschritt Legierung B nicht durch Spannungsrissskorrosion

Der Rissfortschritt bei den Proben der Legierung B zeigt eine Wabenstruktur. Dies ist typisch für einen duktilen Gewaltbruch. Für Aluminiumlegierungen wird in der Literatur (Ostermann, F.; 2007; Kapitel 5.4.3) hingegen interkristallines Risswachstum beim Auftreten von Spannungsrissskorrosion in aggressiven Medien beschrieben. Die HPIS E103:2018 ordnet die Proben der Legierung B mit  $K_I > K_{IAPP}$  bei zu hohem Risswachstum in die Kategorie IV / ungültig ein und empfiehlt eine erneute Prüfung mit geringerem  $K_I$ . Diese Erkenntnis deckt sich mit den Beobachtungen bei den Proben der Legierung B.

### 7.1.4 Bestimmung Anfangsriszlänge und Rissfortschritt

Bei allen Versuchen wurde die Anfangsriszlänge zu gering errechnet. Ergebnisse sind zudem als ungültig zu betrachten, wenn die Anfangsriszlänge nicht richtig bestimmt werden kann. Nach HPIS E103:2018 werden Versuche mit Rissfortschritt  $< 0,16$  mm ungültig, wenn die Anfangsriszlänge zu kurz angenommen wird, Versuche mit Rissfortschritt  $> 0,16$  mm werden ungültig, wenn die Anfangsriszlänge zu lang angenommen wird. Eine ungenügende Bestimmung der Anfangsriszlänge resultiert in einer zu hohen Abweichung des  $K_I$  Wertes. Entscheidende Einflussfaktoren auf die Berechnung der Anfangsriszlänge sind die verwendete Probenbreite  $B$ ,  $B_n$ ,  $B_{eff}$ .  $B$  geht in die berechnete Compliance ein,  $B_{eff}$  in die Berechnung der benötigten Kraft für das gewählte  $K_{IAPP}$ . Eine Verwendung unterschiedlicher Probenbreite bei gekerbten Proben, auch hinsichtlich der

Übereinstimmung mit dem Geometriefaktor  $Y$  und dem Wert für die Nachgiebigkeit  $EBV_{LL}/P$ , kann zu Abweichungen in der Bestimmung der Anfangsriszlänge  $a_{pre}$  führen. Für den Geometriefaktor  $Y$  und die Nachgiebigkeitskennlinie bei WOL Proben wird in der DIN EN ISO 7539-6, Seite 26 Bild 11 und Seite 36 Kapitel 7.5.3 empfohlen spezifische Kalibrierkurven für die elastische Nachgiebigkeit, oder eine empirische Nachgiebigkeitskalibrierung zu verwenden. Verfahrenstechnische Gründe für die ungenaue Annahme der Anfangsriszlänge können das Tunneln der Rissfront und die Auswertung der Riszlänge an nur drei Stellen sein. Beide Faktoren können Einfluss auf die Compliance haben die experimentell aus der Anfangsriszlänge oder der Riszlänge am Versuchsende ermittelt werden.

Die Anfangsriszlänge konnte bei keiner der geprüften Proben der Legierungsvariante C an der aufgebrochenen Bruchfläche bestimmt werden. Das Vorgehen des weiteren zyklischen Rissfortschritts des Ermüdungsrisses nach der Auslagerung (HPIS E103:2018, Kapitel 7.4.1 b) führte zu einem weder lichtmikroskopisch noch elektronenmikroskopisch erkennbaren Übergang zwischen dem Schwingriss vor und nach der Auslagerung. Die statisch aufgebrochene Probe 5 (Bild 69) zeigt den vorhandenen Schwingriss hingegen deutlich. Die Unterscheidung der Rissflächenbereiche „Schwingriss vor der Auslagerung“, „Rissfortschritt“, „Schwingriss nach der Auslagerung“ ist bei der Legierungsvarianten EN AW 6082A demnach als nicht eindeutig zu betrachten. Entgegen der HPIS E103:2018 wird zur besseren Sichtbarkeit/Unterscheidbarkeit der Übergänge ein Aufbrechen der Probe vorgeschlagen.

Eine Ergänzung zum Ausmessen der Rissflächen zur Bestimmung des Rissfortschrittes nach dem Versuch kann der Vergleich der Compliance vor dem Einbringen des Startrisses, mit Startriss und nach Versuchsende sein, da die Compliance von der Riszlänge abhängig ist. Anhand einer optimierten rechnerischen Ermittlung der Riszlänge auf Basis der Compliance ist eine Vorhersage des Rissfortschrittes theoretisch möglich. Die Qualität der Vorhersagen und die nötigen Rahmenbedingungen müssen noch empirisch und experimentell ermittelt werden.

#### **7.1.5 Probengeometrie**

Die Verwendung unterschiedlicher Probengeometrie zwischen den Legierungsvarianten A/B und C erschwert den Vergleich der Ergebnisse. Die Notwendigkeit der Umrechnung auf die Lastangriffslinie (Bild 7) als auch die geringe effektive Kerblänge (Bild 5) bei Legierungsvariante C führen zu einer geringeren Wegänderung in der Lastangriffslinie und damit einer größeren Abweichungen der errechneten Riszlänge bei geringfügigen Wegänderungen des Clip-on aufgrund der Genauigkeit des Clip-on. Die Bestimmung der Riszlänge über die Compliancemesung der Legierungsvariante C kann durch Inhomogenitäten und eine Anisotropie des Bauteils beeinflusst



sein (Bild 30). In diesem Zusammenhang könnten vergleichende Versuche mit senkrecht zur Walzrichtung orientierter Rissfortschrittsrichtung weitere Erkenntnisse liefern. Dies erscheint insbesondere im Hinblick auf die Verwendung der experimentellen Compliance und den Einfluss der Nachgiebigkeitskennlinie bei der Berechnung der Risslänge relevant.

#### **7.1.6 Fehlendes Toleranzband in den Auswertekriterien nach HPIS E103: 2018**

Im Bewertungsschema wäre es sinnvoll ein Toleranzband für die erlaubte Differenz der Rissintensität vor und nach der Auslagerung anzugeben. Die Abweichung war bei keinem der Versuche Null. Jedoch kann davon ausgegangen werden, dass bei einer Unterschreitung von  $0,1 \text{ MPam}^{1/2}$  trotzdem ein gültiger Versuch vorliegt.

### **7.2 Empfehlungen**

Wie in Kapitel 7.1.1 diskutiert muss für die Bewertung des Einflusses von feuchtem Wasserstoff gegenüber feuchter Luft auf das Prüfergebnis eine ausreichende Anzahl an Spannungsrissskorrosionsversuchen im Bereich des kritischen Rissintensitätsfaktors durchgeführt werden. Im Anschluss kann mit einem Spannungsintensitätsfaktor in feuchtem Wasserstoff geprüft werden der unter feuchter Luft noch keinen Rissfortschritt gezeigt hat. Durch die Unschärfe in der Auslegung des tatsächlichen elastischen Spannungsintensitätsfaktors  $K_I$  sollten Versuche mit verschiedenen  $K_{IAPP}$  durchgeführt werden um Spannungsrissskorrosion zu erzielen. Ein weiterer bisher nicht definierbarer Faktor ist die erforderliche Zeit, um Spannungsrissskorrosion bei einem definierten Spannungsintensitätsfaktor zu erzeugen. Die Bestimmung des benötigten  $K_I$  zur Erzeugung von Spannungsrissskorrosion in feuchter Luft ist notwendig, um den Einfluss von feuchtem Wasserstoff bei Spannungsrissskorrosion ermitteln zu können.

Ein weiterer Ansatz ist die Verwendung der garantierten Mindeststreckgrenze der Gasflasche zur Berechnung des Spannungsintensitätsfaktors  $K_{IAPP}$  wie in DIN EN ISO 7866:2021 Seite 48 B.6.2. ausgeführt. Hier besteht der Ansatz gegen einen festgelegten Grenzwert für  $K_I$ , hier  $0,056 \cdot$  \* garantierte Mindeststreckgrenze, in den verschiedenen Medien zu prüfen. Wie in Kapitel 7.1.2 dargelegt ist die Herkunft des Abminderungsfaktors 0.056 für die Mindeststreckgrenze des eingesetzten Werkstoffs in HPIS E103:2018 und DIN EN ISO 7866: 2021 nicht erläutert.

Um die Anfangsrisslänge sicher bestimmen zu können, wird wie in Kapitel 4.1.6 ausgeführt eine spezifische Kalibrierkurve für die elastische Nachgiebigkeit von WOL Proben benötigt. Durch das Tunneln der Rissfront in Zusammenhang mit nur 3 ausgemessenen Stellen ergibt sich eine zusätzliche Unschärfe der Vermessung der verschiedenen Anteile der Rissfläche. Diese könnte über mehr Messstellen oder eine Flächenberechnung verbessert werden. Zur besseren Sichtbarkeit der

Übergänge auf der Bruchfläche kann über die Wegänderung am Clip-on bei der Entlastung und erneuten Belastung der Probe ein geeignetes Verfahren zum „Öffnen“ der Probe festgelegt werden. Nach der Auslagerung kann anhand des gemessenen Weges am Clip-on für die Anfangs- und Istbelastung vor der Auslagerung entschieden werden, ob ein Aufbrechen oder das Einbringen eines weiteren Schwingrisses sinnvoller ist, um die Sichtbarkeit der Gesamtrisslänge im Rasterelektronenmikroskop zu verbessern. Bei keinem Rissfortschritt wie in Bild 25 & Bild 69 kann ein Aufbrechen der Probe zu mehr Kontrast gegenüber dem Schwingriss führen.

Für die Probengeometrie nach DIN EN ISO 7539-6:2018 (Bild 5) wird empfohlen die effektive Kerblänge zu verlängern. Ein höheres  $a/W$  Verhältnis führt zu geringerer Last bei der Prüfung und verhindert eine hohe Belastung des Innengewindes. Zugleich erhöht sich die Auslenkung in der Lastangriffslinie, was zu einer genaueren Wegmessung des Clip-on führt.

Für eine Fortführung zur Bestimmung des Einflusses von feuchtem Wasserstoff gegenüber feuchter Luft auf die Spannungsrisskorrosion wird wie in Kapitel 7.1.1 beschrieben empfohlen den kritischen  $K_I$  Wert zu bestimmen bei dem Spannungsrisskorrosion in feuchter Luft startet. Im Anschluss kann mit gleichem und in feuchter Luft nicht kritischem  $K_I$  der Einfluss von feuchtem Wasserstoff überprüft werden. Zur effizienteren Durchführung wird empfohlen die Versuchsmethodik zu optimieren und genauer zu spezifizieren.



**Dipl. Ing. (FH) Jan Bußmann**  
Prüfingenieur/in



**Lukas Frank, M.Sc.**  
stellv. Abteilungsleiter der Abteilung  
Betriebsverhalten unter Medieneinfluss

## Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2020)

Nr.	Titel
324	Methodische Aspekte und aktuelle inhaltliche Schwerpunkte bei der Konzeption experimenteller Studien zum hochautomatisierten Fahren, 2020
325	Der Einfluss von Wärmeverlusten auf den Rollwiderstand von Reifen, 2020
326	Lebensdauerberechnung hybrider Verbindungen, 2020
327	Entwicklung der Verletzungsschwere bei Verkehrsunfällen in Deutschland im Kontext verschiedener AIS-Revisionen, 2020
328	Entwicklung einer Methodik zur Korrektur von EES-Werten, 2020
329	Untersuchung zu den Einsatzmöglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Entwicklung von 3D-Rahmenstrukturen in Crashlastfällen, 2020
330	Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen, 2020
331	Effiziente Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von LFT für Crashsimulation, 2020
332	Charakterisierung und Modellierung des Versagensverhaltens von Komponenten aus duktilem Gusseisen für die Crashsimulation, 2020
333	Charakterisierung und Meta-Modellierung von ungleichartigen Punktschweißverbindungen für die Crashsimulation, 2020
334	Simulationsgestützte Analyse und Bewertung der Fehlertoleranz von Kfz-Bordnetzen, 2020
335	Absicherung des autonomen Fahrens gegen EMV-bedingte Fehlfunktion, 2020
336	Auswirkung von instationären Anströmeffekten auf die Fahrzeugaerodynamik, 2020
337	Analyse von neuen Zell-Technologien und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem Batteriepack, 2020
338	Modellierung der Einflüsse von Mikrodefekten auf das Versagensverhalten von Al-Druckgusskomponenten mit stochastischem Aspekt für die Crashsimulation, 2020
339	Stochastisches Bruchverhalten von Glas, 2020
340	Schnelle, breitbandige Datenübertragung zwischen Truck und Trailer als Voraussetzung für das hochautomatisierte Fahren von Lastzügen, 2021
341	Wasserstoffkompatibilität von Aluminium-Legierungen für Brennstoffzellenfahrzeuge, 2021
342	Anforderungen an eine elektrische Lade- und Wasserstoffinfrastruktur für gewerbliche Nutzfahrzeuge mit dem Zeithorizont 2030, 2021
343	Objective assessment of database quality for use in the automotive research and development process, 2021
344	Review of non-exhaust particle emissions from road vehicles, 2021
345	Ganzheitliche Betrachtung von Rollwiderstandsverlusten an einem schweren Sattelzug unter realen Umgebungsbedingungen, 2021
346	Studie zur Abschätzung der Anwendungspotentiale, Risiken und notwendigen Forschungsbedarfe bei der Verwendung von Glashohlkugeln in Kombination mit thermoplastischem Schaumspritzguss, 2021

- 347 Typgenehmigungsanforderungen an Level-3-Autobahnssysteme - Hintergrundbetrachtungen zu technischen Anforderungen für eine automatisierte Fahrfunktion, 2021
- 348 Einfluss der Kantenbearbeitung von Aluminiumblechen auf das Restumformvermögen sowie die Festigkeitseigenschaften unter quasistatischer und schwingender Beanspruchung, 2021
- 349 Verstärkung dünner formgehärteter Bauteile mittels FVK-Verrippungen, 2021
- 350 HMI Anforderungen für den automatisierten Individualverkehr unter Berücksichtigung von Leistungsmöglichkeiten und -grenzen älterer Nutzer, 2021
- 351 Compatibility of polymers for fuel cell automobiles, 2021
- 352 Entwicklung einer gewichtsoptimierten Batteriegehäusestruktur für Volumenfahrzeuge, 2021
- 353 Charakterisierung und Modellierung des Deformations- und Versagensverhaltens von nicht-faserverstärkten Thermoplasten unter mehrachsiger Crashbelastung, 2021
- 354 Untersuchung zum thermischen Komfort im Pkw für den Grenzbereich des Luftzugempfindens, 2021
- 355 Anforderungen an die Güte, Verfügbarkeit und Vorausschau einer Reibwertschätzung aus Funktionssicht, 2021
- 356 Entwicklung einer standardisierten Prüfanordnung zur Bewertung der Übernahmeleistung beim automatisierten Fahren, 2022
- 357 Vorstudie zu Verkehrsemissionen - Räumlich und zeitlich aufgelöste Daten durch Schwarmmessungen, 2022
- 358 Produktivitätssteigerung und Kostensenkung der laser-additiven Fertigung für den Automobilbau, 2022
- 359 Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen mit Fokus auf den Ventilationswiderstand von Nfz-Rädern, 2022
- 360 Werkstoffmodelle und Kennwertermittlung für die industrielle Anwendung der Umform- und Crash-Simulation unter Berücksichtigung der thermischen Behandlungen beim Lackieren im Prozess bei hochfesten Werkstoffen, 2022
- 361 Compatibility of polymers for fuel cell automobiles, 2022
- 362 Ermüdung kurzfaserverstärkter thermoplastischer Polymerwerkstoffe, 2022
- 363 Market research and definition of procedure to comparison of comfort measuring systems for a vehicle cabin, 2022
- 364 Methodische Ansätze zur Auswahl von Bordnetzstrukturen mit erhöhten Zuverlässigkeitsanforderungen, 2022
- 365 Fahrwiderstand von Lenk- und Liftachsen in Kurven und auf gerader Strecke unter realen Umgebungsbedingungen, 2022
- 366 Klimadaten und Nutzungsverhalten zu Auslegung, Versuch und Simulation an Kraftfahrzeug-Kälte-/Heizanlagen, 2022
- 367 Experimentelle und numerische Untersuchung des selbsttätigen Losdrehens von Schraubenverbindungen mit konstanten und variablen Amplituden und Entwicklung einer Bewertungsmethode, 2022
- 368 Objective assessment of database quality for use in the automotive research and development process – Part 2, 2023
- 369 Level 2 hands-off – Recommendations and guidance, 2023
- 370 Funktionale Sicherheitsbewertung und Cybersecurity Analysen relevanter Use Cases für die Datenübertragung zwischen Truck und Trailer als Voraussetzung für das hochautomatisierte Fahren von Lastzügen, 2023

- 371 Study on the technical evaluation of decentralization based de-identification procedures for personal data in the automotive sector, 2023
- 372 Legal evaluation of decentralization based de-identification procedures for personal and non-personal data in the automotive sector, 2023
- 373 Quantifizierung der mechanischen Belastbarkeit von Infrarot-Schweißverbindungen in zyklisch belasteten Thermoplast-Bauteilen, 2023
- 374 Lebensdauerbewertung von geschweißten Verbindungselementen unter Montagevorspannung, 2023
- 375 Einfluss verschiedener Scherschneidparameter auf die elektro-magnetischen Eigenschaften von NO-Elektroblech automobiler Traktionsantriebe, 2023
- 376 Automatisierte Demontage von Traktionsmotoren der E-Mobilität - Eine Studie zur Optimierung der Demontage, 2023
- 377 Untersuchungen zum Einfluss von feuchtem Wasserstoff auf die Spannungsrisskorrosionsempfindlichkeit von Aluminium-Legierungen für den Einsatz in Brennstoffzellenfahrzeugen, 2024

## Impressum

Herausgeber

FAT  
Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.  
Behrenstraße 35  
10117 Berlin  
Telefon +49 30 897842-0  
Fax +49 30 897842-600  
[www.vda-fat.de](http://www.vda-fat.de)

ISSN

2192-7863

Copyright

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2024

Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)  
Behrenstraße 35, 10117 Berlin  
[www.vda.de](http://www.vda.de)  
Twitter @VDA\_online

**VDA** | Verband der  
Automobilindustrie

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)  
Behrenstraße 35, 10117 Berlin  
[www.vda.de/fat](http://www.vda.de/fat)

**FAT** | Forschungsvereinigung  
Automobiltechnik