

**Bernadette Gsellmann, BSc**

**Einfluss des linearen Reibschweißens und  
des Abbrennstumpfschweißens von  
Kettengliedern aus AISI 316L und  
AISI 440B auf deren  
Korrosionsbeständigkeit  
Vergleich unterschiedlicher Korrosionsprüfmethoden**

**MASTER THESIS**

For obtaining the academic degree  
Diplom-Ingenieurin

Master Programme of  
Advanced Materials Science



Supervisor: Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr.techn. Christof Sommitsch

Co-Supervisor: Dipl. Ing. Dr. Rudolf Vallant

Institute of Materials Science and Welding

Graz, April 2015

## DANKSAGUNG

Ich möchte mich zuerst bei Institutsvorstand Prof. Christof Sommitsch bedanken, für die Möglichkeit am Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik zu lernen und zu arbeiten.

Vielen Dank auch an Assoc. Prof. Norbert Enzinger und Dr. Kemal Mucic für die Chance am Projekt Join 2.3 einen Beitrag zu leisten.

Durch die gute Betreuung von Dr. Rudolf Vallant, positive Kritik und die vielen aufschlussreichen Gespräche hat diese Arbeit Form angenommen.

Auch gilt mein Dank Wilfried Huemer, der immer ein offenes Ohr für jedes kleinste Problem hatte und mich über die ganze Arbeit hinweg unterstützt hat.

Ein weiteres Dankeschön geht an die Labormitarbeiter und meine Kollegen, die mich durch ihre Erfahrung und ihren Einfallsreichtum oft über Hindernisse hinweggeholfen haben.

An meine Familie und meine Freunde. Ihr haltet zu mir und glaubt an mich, Danke.

Zu guter Letzt Jürgen, ohne dich hätte ich es nicht bis hierhin geschafft und wir schaffen es auch noch weiter, gemeinsam!

# EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit/Diplomarbeit/Dissertation identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis/diploma thesis/doctoral dissertation.

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature

---

## KURZFASSUNG

Eine neu entwickelte Methode des Linearreibschißens von Kettengliedern ermöglicht es diese aus martensitischen rostbeständigen Stählen herzustellen.

Linearreibgeschweißte- bzw. abbrennstumpfgeschweißte Kettenglieder aus austenitischen (1.4404 / AISI 316L / X2CrNiMo17-12-2), und martensitischen rostbeständigen Stahl (1.4112/ AISI 440B / X90CrMoV18), werden potentiodynamischen und chemischen Tests unterzogen um deren Korrosionsbeständigkeit an der Schweißnaht, der Wärmeeinflusszone und dem Grundwerkstoff bei Raumtemperatur zu überprüfen.

Die Sensibilisierung auf interkristalline Korrosion (Cihal-Test) und das Durchbruchpotential wurden mit potentiodynamischen Tests ermittelt.

Mit den chemischen Tests wurde der Sensibilisierungszustand des austenitischen Stahls einerseits auf interkristalline Korrosion und andererseits auf die Anfälligkeit auf Loch- und Spaltkorrosion für beide Schweißverfahren überprüft. Auch der martensitische rostfreie Stahl wurde auf Anfälligkeit auf Loch- und Spaltkorrosion untersucht.

Aus den erhaltenen Ergebnissen wird versucht auf die Einflüsse der Schweißprozesse bezüglich der Korrosionsbeständigkeit zu schließen.

## ABSTRACT

A newly developed method of linear friction welding of chain links allows these to be made of martensitic stainless steels.

Linear friction welded and flash butt welded chain links made of austenitic (1.4404 / AISI 316L / X2CrNiMo17-12-2) and martensitic stainless steel (1.4112 / AISI 440B / X90CrMoV18) were tested with potentiodynamic and chemical methods to check their corrosion resistance of the welding zone, the heat affected zone and the base material at room temperature.

The sensitization to intergranular corrosion (Cihal-Test) and breakdown potential were determined by potentiodynamic tests.

The austenitic stainless steel was examined for sensitization to intergranular corrosion and to the susceptibility to pitting and crevice corrosion by chemical methods. Also, the martensitic stainless steel was tested for susceptibility to pitting and crevice corrosion.

From the results obtained it is attempted to conclude to the influences of welding processes with respect to the corrosion resistance.

---

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b><u>EINLEITUNG UND ZIEL</u></b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b><u>THEORETISCHE GRUNDLAGEN</u></b>	<b>9</b>
<b>2.1</b>	<b>KORROSION ALLGEMEIN</b>	<b>9</b>
2.1.1	ELEKTROCHEMISCHE KORROSION	11
<b>2.2</b>	<b>WICHTIGE KORROSIONSARTEN</b>	<b>16</b>
2.2.1	LOCHKORROSION	16
2.2.2	SPALTKORROSION	17
2.2.3	INTERKRISTALLINE KORROSION	18
2.2.4	MARTENSITISCHER UND AUSTENITISCHER ROSTBESTÄNDIGER STAHL	19
<b>2.3</b>	<b>SCHWEIßVERFAHREN</b>	<b>21</b>
2.3.1	LINEARREIBSCHWEIßEN (LRS)	21
2.3.2	ABBRENNSTUMPFSCHEIßEN (RA)	23
<b>3</b>	<b><u>UNTERSUCHUNGSMETHODEN</u></b>	<b>25</b>
<b>3.1</b>	<b>KETTENGLIEDER</b>	<b>25</b>
3.1.1	LINEARREIBGESCHWEIßTE KETTENGLIEDER	25
3.1.2	ABBRENNSTUMPGESCHWEIßTE KETTENGLIEDER	25
3.1.3	PROBENENTNAHME	25
<b>3.2</b>	<b>DL-EPR TEST</b>	<b>28</b>
3.2.1	PROBEN UND PROBENVORBEREITUNG	29
3.2.2	GERÄTE	31
3.2.3	PROBELÖSUNG	32
3.2.4	PARAMETERFINDUNG	32
3.2.5	DURCHFÜHRUNG	33
3.2.6	AUSWERTUNG	34
<b>3.3</b>	<b>ELEKTROCHEMISCHER LOCHKORROSIONSTEST</b>	<b>36</b>
3.3.1	PROBEN UND PROBENVORBEREITUNG	36
3.3.2	VERSUCHSAUFBAU	39
3.3.3	PROBELÖSUNG	39
3.3.4	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	39
3.3.5	AUSWERTUNG	40
<b>3.4</b>	<b>STREICHER-TEST</b>	<b>41</b>
3.4.1	PROBEN UND PROBENVORBEREITUNG	41
3.4.2	VERSUCHSAUFBAU	42
3.4.3	PROBELÖSUNG	42
3.4.4	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	43
3.4.5	AUSWERTUNG	43
<b>3.5</b>	<b>CHEMISCHER TEST AUF LOCH- UND SPALTKORROSION (METHODE A UND B)</b>	<b>44</b>
3.5.1	METHODE A: EISENCHLORID LOCHKORROSIONSTEST	44
3.5.2	METHODE B: EISENCHLORID SPALTKORROSIONSTEST	44
3.5.3	PROBEN UND PROBENVORBEREITUNG	44
3.5.4	VERSUCHSAUFBAU	47
3.5.5	PRÜFLÖSUNG	48

---

3.5.6	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG .....	48
3.5.7	AUSWERTUNG .....	48
<b>3.6</b>	<b>MAKROSKOPISCHE UND MIKROSKOPISCHE UNTERSUCHUNGEN.....</b>	<b>49</b>
<b>4</b>	<b><u>ERGEBNISSE .....</u></b>	<b><u>50</u></b>
<b>4.1</b>	<b>DL-EPR TEST .....</b>	<b>50</b>
4.1.1	GÜLTIGE PROBEN .....	50
4.1.2	FREIES KORROSIONSPOTENTIAL, PH-WERT UND TEMPERATUR .....	52
4.1.3	KURVENVERLAUF UND KURVENFORM .....	53
4.1.4	IDENTIFIZIERUNG DES KORROSIONSANGRIFFES .....	55
4.1.5	KORNGRÖßENBESTIMMUNG .....	58
4.1.6	PASSIVIERUNGS- UND REAKTIVIERUNGSSTROM.....	58
4.1.7	PASSIVIERUNGS- UND REAKTIVIERUNGSLADUNG .....	60
4.1.8	ZUSAMMENFASSUNG .....	61
<b>4.2</b>	<b>ELEKTROCHEMISCHER LOCHKORROSIONSTEST.....</b>	<b>64</b>
4.2.1	FREIES KORROSIONSPOTENTIAL, TEMPERATUR UND PH-WERT .....	64
4.2.2	DURCHBRUCHSPOTENTIAL (DBP).....	66
4.2.3	FORM UND LAGE DER KURVEN.....	68
4.2.4	ZUSAMMENFASSUNG .....	70
<b>4.3</b>	<b>STREICHER-TEST.....</b>	<b>71</b>
4.3.1	MASSENVERLUST UND KORROSIONSRATE.....	71
4.3.2	IDENTIFIZIERUNG DES KORROSIONSANGRIFFES .....	73
4.3.3	ZUSAMMENFASSUNG .....	76
<b>4.4</b>	<b>CHEMISCHER TEST AUF LOCH- UND SPALTKORROSION (METHODE A UND B).....</b>	<b>77</b>
4.4.1	TEMPERATURVERLAUF .....	77
4.4.2	MASSENVERLUST .....	77
4.4.3	LOCHDICHTHE – METHODE A.....	79
4.4.4	IDENTIFIZIERUNG DES KORROSIONSANGRIFFES .....	85
4.4.5	MITTLERE UND MAXIMALE LOCHTIEFE – METHODE A .....	87
4.4.6	SPALTTIEFE METHODE B .....	88
4.4.7	ZUSAMMENFASSUNG .....	89
<b>5</b>	<b><u>ZUSAMMENFASSUNG.....</u></b>	<b><u>90</u></b>
<b>5.1</b>	<b>VERGLEICHBARKEIT DER METHODEN .....</b>	<b>90</b>
<b>5.2</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE.....</b>	<b>90</b>
	<b><u>LITERATURVERZEICHNIS.....</u></b>	<b><u>91</u></b>
	<b><u>FORMELVERZEICHNIS .....</u></b>	<b><u>94</u></b>
	<b><u>TABELLENVERZEICHNIS .....</u></b>	<b><u>94</u></b>
	<b><u>ANHANG.....</u></b>	<b><u>95</u></b>

---

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

EMK	Elektromotorische Kraft
IK	Interkristalline Korrosion
LK	Lochkorrosion
LRS	Linearreibschweißen
RA	Abbrennstumpfschweißen
GW	Grundwerkstoff
WEZ	Wärmeeinflusszone
SN	Schweißnaht bzw. Schweißlinie
R	Rand
NHE	Normal-Wasserstoff-Elektrode
OCP	Freies Korrosionspotential
DBP	Durchbruchspotential
CPT	Kritische Lochfraßtemperatur
TMZ	Thermomechanisch beeinflusste Zone
RT	Raumtemperatur

# 1 EINLEITUNG UND ZIEL

Viele Schadensfälle sind auf Korrosionsschäden zurückzuführen. Vor allem entstehen dabei Kosten, die durch frühzeitige Untersuchungen und Korrosionstests hätten verhindert werden können. [1]

Kettenglieder wurden lange Zeit nur durch Widerstandsschweißen und Abbrennstumpfschweißen gefertigt. Das vom IWS im Rahmen des Projektes 2.3 in JOIN 4+ mitentwickelte Linearreibschweißen ermöglicht nun nicht nur, wie zum Beispiel den austenitischen rostbeständigen Stahl 1.4404 zu schweißen, sondern auch als nicht schweißbare geltende Materialien, wie zum Beispiel den martensitischen rostbeständigen Stahl 1.4112 zu fügen. Zusätzlich ermöglicht dieses Verfahren größere Kettenglieddurchmesser zu verbinden.[2],[3]

Ausgehend aus diesem Ansatz wurde die Projektarbeit [4] begonnen, um die Korrosionsbeständigkeit dieser linearreibgeschweißten Kettenglieder mit anderen Kettengliedern zu vergleichen.

In dieser Arbeit, weiterführend zu [4], werden der Einfluss des Linearreib- und des Abbrennstumpfschweißens auf die Korrosionsbeständigkeit des austenitischen rostbeständigen Stahles 1.4404 / AISI 316L / X2CrNiMo17-12-2 und des martensitischen rostbeständigen Stahls 1.4112 / AISI 440B / X90CrMoV18, sowie auf deren Fügezonen (Schweißzone und Wärmeeinflusszone) untersucht.

Das Feld der Korrosionsuntersuchungen bietet viele Möglichkeiten die Werkstoffe zu analysieren. Die Untersuchung der häufigsten Korrosionsarten wie die interkristalline Korrosion und die Loch- und Spaltkorrosion lagen im Vordergrund. Um ein möglichst ganzheitliches Bild über die Korrosionsanfälligkeit zu erhalten, wurden zum einen elektrochemische Untersuchungen durchgeführt und zum anderen chemische Versuche ohne Fremdstrom.

Für jede untersuchte Korrosionsart wurden eine elektrochemische und eine chemische Methode ausgewählt. Somit wurden zwei chemische und zwei elektrochemische Tests durchgeführt.

Zu den Methoden mit Fremdstrom, gehörten zum einen der Double-loop-EPR-Test, der auch unter Cihal-Test bekannt ist, verwendet, um die Sensibilisierung der Proben auf interkristalline Korrosion zu untersuchen.

Als zweite Methode wurde die Ermittlung des Durchbruchpotentials verwendet. Bei dieser Methode wird vorzugsweise Lochkorrosion ermittelt.

Die beiden chemischen Korrosionsuntersuchungsmethoden, der Streicher-Test und jene nach Norm ASTM G 48, werden beim freien Korrosionspotential des Materials durchgeführt und simulieren somit die Korrosion ohne Fremdstrom, jedoch unter verstärkten Korrosionsbedingungen. Beim Streicher-Test wird wieder die Sensibilisierung auf Interkristalline Korrosion und beim chemischen Test nach ASTM G 48 die Loch- und Spaltkorrosion untersucht.

Aus den erhaltenen Ergebnissen soll eine Aussage über die Korrosionsbeständigkeit der Materialien unter Einfluss der unterschiedlichen Fügemethoden getroffen werden. Auch sollen die einzelnen Methoden miteinander verglichen und die Vor- und Nachteile für die Zukunft festgehalten werden.



## 2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Begriffe und Grundlagen kurz erklärt, um einen Überblick über das komplexe Thema der Korrosion zu schaffen.

### 2.1 KORROSION ALLGEMEIN

Korrosion ist ein weiter Begriff, der ganz einfach erklärt werden kann. Ein Werkstoff reagiert mit seiner unmittelbaren Umgebung, dabei kommt es zur Veränderung der Eigenschaften des Werkstoffes. Diese Umgebung kann fest, flüssig, oder gasförmig sein. [5] Die genauen Definitionen der Begriffe sind der DIN EN ISO 8044:2015-02 [6] zu entnehmen. Die drei Reaktionsarten sind [7][8]:

- chemische Korrosion
- metallphysikalische Korrosion
- elektrochemische Korrosion

Bei der **chemischen Korrosion** reagiert das Metall mit seiner gasförmigen Umgebung bei hohen Temperaturen. Sie wird deshalb auch „Hochtemperaturkorrosion“ genannt. Die wichtigsten Reaktionsmechanismen sind hierbei die Oxidation, Sulfidierung, Aufkohlung, Aufstickung und auch die Heißgaskorrosion. Bei der Heißgaskorrosion reagiert das Material mit Salzschnmelzen, die auf der Oberfläche abgelagert sind.[7][9]

In der **Metallphysikalischen Korrosion** spielen physikalische Grundprozesse wie zum Beispiel die Diffusion oder Gitterumwandlungen bei tiefen Temperaturen eine Rolle. Dazu gehören aber auch Reaktionen der Oberfläche mit Metallschmelzen. Als Beispiel für die Gitterumwandlung kann die Zinnpest herangezogen werden. Dabei geht die tetragonale Gitterstruktur bei Temperaturen unter 13°C in ein rhomboedrisches Gitter über, das mehr Volumen einnimmt. Das befallene Zinn zerbröseln langsam. [7]

Die **elektrochemische Korrosion** [5]–[10] ist die bedeutendste Korrosionsart. Sie tritt auf bei Reaktionen des Werkstoffes mit einem Elektrolyten. Diese Elektrolyten sind meist wässrige Medien. Der Werkstoff selbst leitet Elektronen, wodurch elektrische Ströme entstehen. Es entsteht ein sogenanntes galvanisches Element.

Eine weitere Einteilungsmöglichkeit liegt darin zwischen Korrosionsarten mit und ohne mechanischer Beanspruchung zu unterscheiden. In folgender Abbildung 1 sind Beispiele für diese Einteilungsmöglichkeit angeführt.

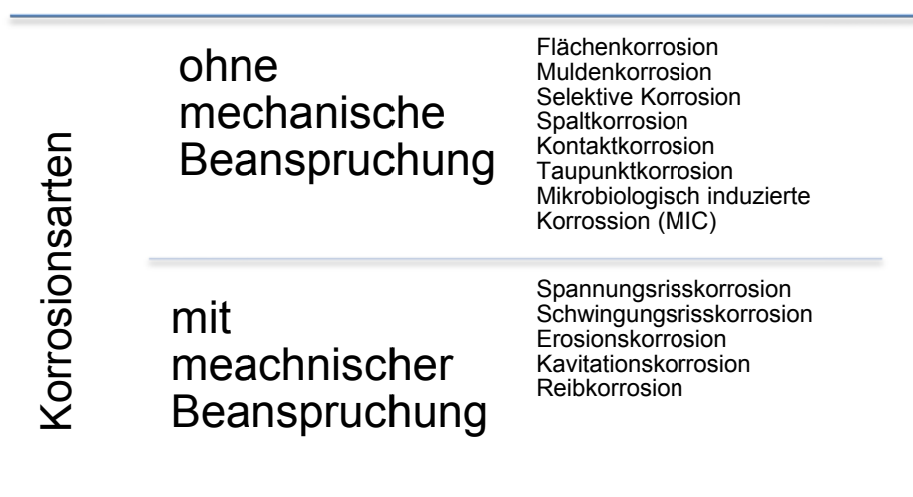


Abbildung 1 Korrosionsarten mit und ohne mechanischer Beanspruchung [6].

Eine weitere wichtige Korrosionsart, die in keine der beiden Kategorien eindeutig zugeordnet werden kann ist die **Wasserstoffkorrosion**. Bei dieser Korrosionsart diffundiert atomarer Wasserstoff, der durch vorhergehende chemische oder elektrochemische Reaktionen erzeugt wird, in das Metallgitter und verändert die Eigenschaften des Werkstoffes. Dies führt zur Versprödung und Zerstörung des Materials [10].

Korrosionserscheinung wird laut [6] als "Die messbare Veränderung eines metallischen Werkstoffes durch Korrosion" beschrieben. In Abbildung 2 werden die Korrosionserscheinungen benannt und kurz beschrieben [9][11]. In Abbildung 3 sind Korrosionsarten, die bei der elektrochemischen Korrosion auftreten, schematisch abgebildet.

<b>Korrosionserscheinung</b>	Gleichmäßiger Flächenabtrag	Fläche gleichmäßig abgetragen
	Muldenfraß	Durchmesser > Tiefe
	Lochfraß	Tiefe > Durchmesser
	Korrosionsrisse	Risse ausgehend von Oberfläche oder Werkstoffinneren (interkristallin oder transkristallin)
	Fadenförmige Angriffsform	fadenförmige Ausbreitung eines lokalen Angriffes
	Selektive Angriffsform	bevorzugter Angriff bestimmter Gefügebestandteile oder Gefügeregionen
	Interkristalline Angriffsform	bevorzugter Angriff korngrenzennaher Zonen
	Schichtförmige Angriffsform	Aufwölben des Werkstoffes durch Angriff von Seigerungszone

Abbildung 2 Korrosionserscheinungen

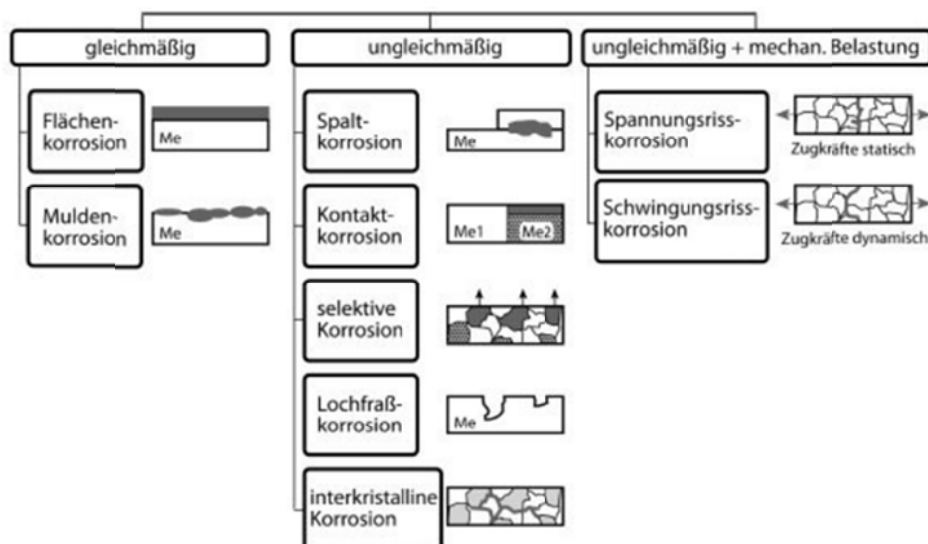


Abbildung 3 Erscheinungsarten elektrochemischer Korrosion [9]

Die beiden wichtigsten Reaktionsarten sind die chemische und die elektrochemische Korrosion, wobei auf die letztere genauer eingegangen wird, da dies der vorherrschende Reaktionsmechanismus der Prüfmethode ist. Des Weiteren werden die Lochkorrosion, Spaltkorrosion und die interkristalline Korrosion genauer beschrieben.

### 2.1.1 ELEKTROCHEMISCHE KORROSION

Elektrochemische Korrosion tritt auf, wenn zwei unterschiedliche Metalle und ein Elektrolyt vorliegen. Die beiden Metalle müssen in elektrisch leitenden Kontakt zueinander stehen, sodass eine galvanische Zelle entsteht. Hierbei werden dann die beiden Metalle Elektroden genannt.

#### 2.1.1.1 Elektrolyt

In einem Elektrolyten [12] sind Ionen gelöst, die den elektrischen Stromfluss zwischen den beiden Metallen ermöglichen. Die elektrische Leitfähigkeit der Elektrolyten ist in deren Ionenbeweglichkeit begründet, da sie keine Elektronen leiten. [9] Elektrolyten können wässrige Lösungen, Salzschnmelzen oder Festelektrolyte sein.

Ionen [13] sind positiv und negativ geladene Teilchen, die sich ursprünglich in einem Kristallgitter befunden haben und im Elektrolyten gelöst wurden. Sie erhalten Ihre elektrische Ladung durch Aufnahme oder Abgabe von Valenzelektronen [7]. Bei wässrigen Elektrolyten sind die positiven und negativen Ionen von einer Hydrathülle umgeben, wie in Abbildung 4 anhand einer Solvatisierung von NaCl beschrieben ist.

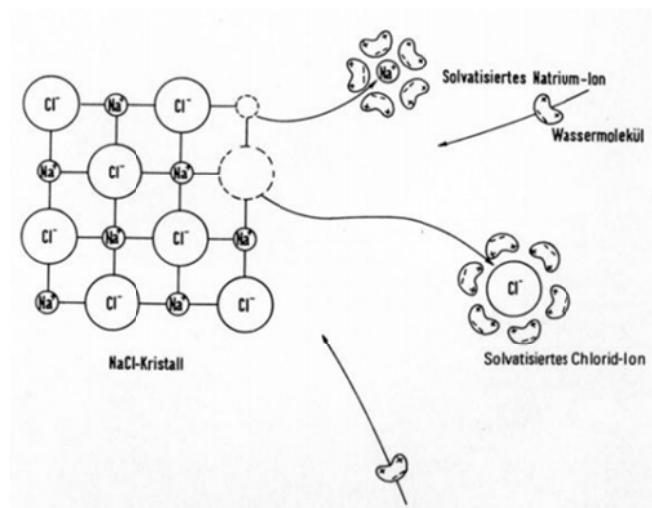


Abbildung 4 Dissoziation eines Ionenkristalls (NaCl) in einzelne Ionen, die von Hydrathüllen umgeben sind [13]

#### 2.1.1.2 Galvanisches Element

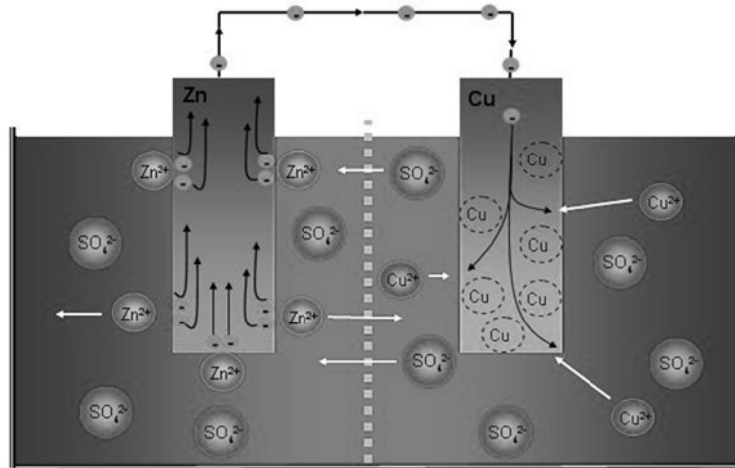
Als galvanisches Element [9][14]–[16], zu sehen in Abbildung 5, beschreibt man die elektrochemischen Gesamtreaktionen, die in einem System ablaufen. Die Reaktionen können in Oxidation und Reduktion unterteilt werden. Sie können in zwei getrennten Halbzellen, die entweder über eine Ionenbrücke verbunden, oder durch ein Diaphragma getrennt sind, ablaufen. Das Diaphragma und die Ionenbrücke sind nur für Ionen einer bestimmten Art durchlässig.

Die Oxidation findet an der Anode statt, die als negative Elektrode gilt. Das Metall an der Anode wird ionisiert und gibt Elektronen ab. Die positiv geladenen Ionen können in weiterer Folge Korrosionsprodukte bilden.



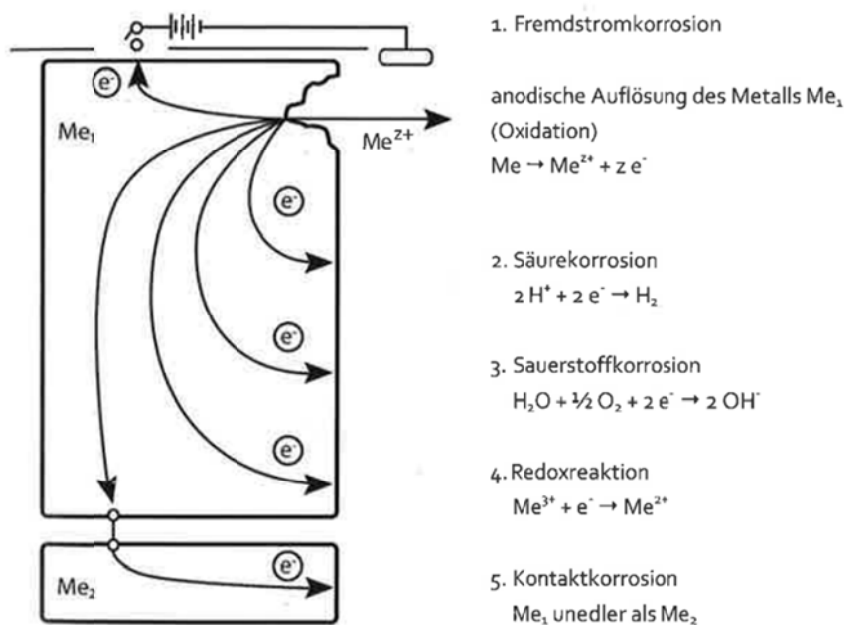
Kathodische Teilreaktionen finden an der positiveren, edleren Elektrode als Reduktionen statt. Elektronen, die über den Elektronenleiter zur Kathode transportiert werden, werden von Ionen aufgenommen, die an der Kathode vorliegen.

**Kathodische Teilreaktion (Reduktion):  $\text{Me}^{z+} + z \text{e}^- \rightarrow \text{Me}$**



**Abbildung 5 Galvanisches Element mit Diaphragma (Daniell-Element)<sup>1</sup>**

Als kathodische Teilreaktionen gibt es mehrere Korrosionsfälle, abhängig vom Medium, dargestellt in Abbildung 6.



**Abbildung 6 Kathodische Teilreaktionen abhängig vom Korrosionsmedium [9]**

**2.1.1.3 Potential**

Die treibende Kraft für die elektrochemische Reaktion, ist das Elektrodenpotential  $E$ , welches auch Elektromotorische Kraft EMK genannt wird. Jede Elektrode hat ihr Eigenelektrodenpotential  $\varphi_{\text{Me}}$ , das mit dem Potential ihres Elektrolyten  $\varphi_{\text{El}}$  im Gleichgewicht steht. Wenn man die beiden Halbzellen nun mit einem Elektronenleiter verbindet, versucht sich das gesamte Elektrodenpotential  $E$  einzustellen und ins Gleichgewicht zu gelangen. Je größer das Elektrodenpotential  $E$ , also der Unterschied zwischen den beiden Eigenelektrodenpotentialen  $\varphi_{\text{Me}}$ , desto stärker laufen die Reaktionen an den Elektroden ab. Es gibt unterschiedliche Ursachen für das Auftreten von Potentialdifferenzen zwischen den Elektroden. Die möglichen Gründe sind in der folgenden Abbildung 7 dargestellt [9].

<sup>1</sup><http://www.chempage.de/theorie/galvanischezelle.htm>

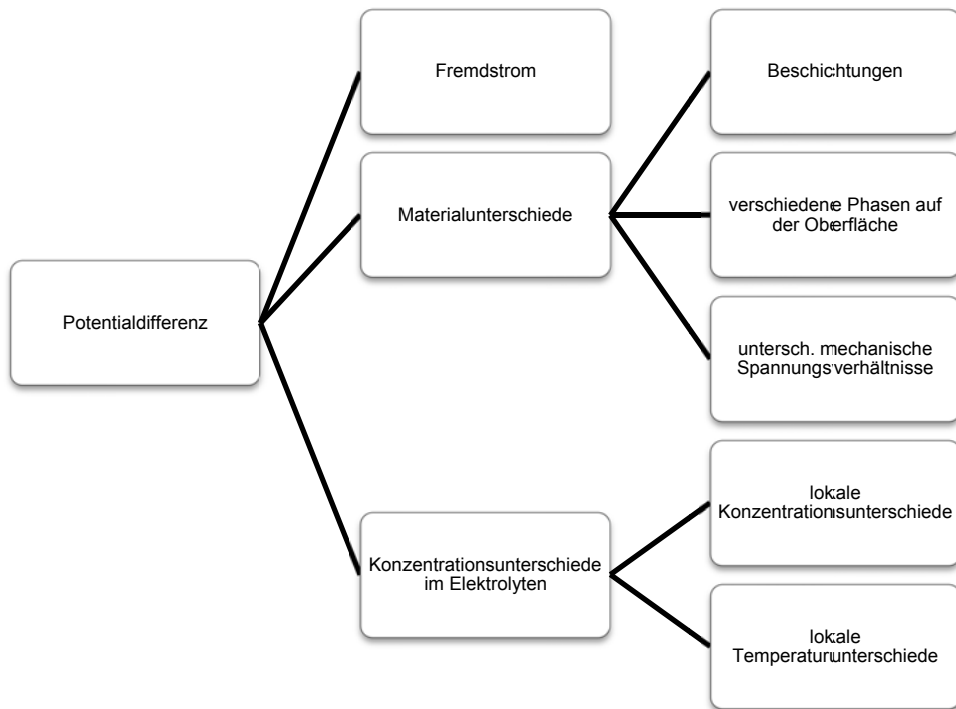


Abbildung 7 Ursachen für das Auftreten von Potentialdifferenzen

Nicht nur der Potentialunterschied von zwei unterschiedlichen Metallen im gleichen Elektrolyten (siehe Abbildung 8), sondern auch der Potentialunterschied aufgrund von Konzentrationsunterschieden im Elektrolyten bei gleichen Elektroden kann als Anstoß zum Ablauf der elektrochemischen Reaktion dienen.

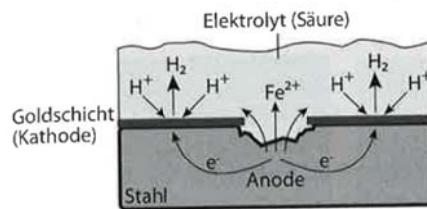


Abb. 3.7 Kontaktkorrosion durch eine undichte, edle Schicht auf einem unedlen Grundwerkstoff in Säure

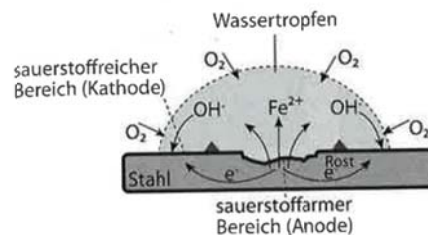
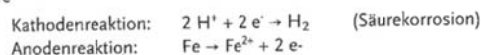


Abb. 3.8 Tropfenkorrosion nach Evans (Belüftungselement)

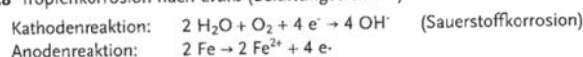


Abbildung 8 Schematische Darstellung der Kontaktkorrosion und eines Belüftungselementes: Abb. 3.7 Kontaktkorrosion auf einer Metalloberfläche und Abb. 3.8 Tropfenkorrosion nach Evans [9]

Die Sauerstoffkorrosion ist die häufigste Ursache für Korrosion und kommt in den so genannten Belüftungselementen vor, siehe Abbildung 8. Diese wiederum können unter Ablagerungen, in Löchern und Spalten, durch Kondensatbildung, oder durch unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeit des Elektrolyten über die Oberfläche entstehen.

### 2.1.1.4 Standardpotential

Die Elektrodenpotentiale können nur gegen eine Bezugselektrode gemessen werden. Als Standardelektrode wurde die Wasserstoffelektrode festgelegt. Man nennt sie auch Normal-Wasserstoff-Elektrode NHE. Der Wert der NHE wurde als 0,000V in der Spannungsreihe festgelegt. [9]

Es handelt sich bei der NHE um eine Halbzelle mit einem platinieren Blech als Elektrode, wie in Abbildung 9 schematisch gezeigt. Die Elektrode ist mit amorphem Platin beschichtet, um die Absorption von Wasserstoff  $H_2$  zu ermöglichen. Als Elektrolyt dient eine 1,53mol/l HCl-Lösung, die einer Messionenaktivität von genau 1mol/l entspricht. Es wird bei 25°C gemessen und der Umgebungsdruck beträgt 1,013bar, was den Standardbedingungen entspricht.[17]

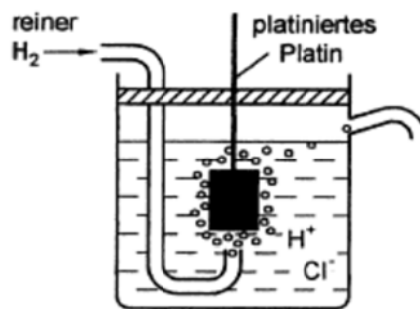


Abbildung 9 Schematische Darstellung einer Standardwasserstoffelektrode [18]

Das Standardpotential  $E_H^0$  für jedes Metall ist in der sogenannten elektrochemischen Spannungsreihe aufgelistet. Je negativer das Potential in der Spannungsreihe ist, desto eher reagiert es und desto unedler ist das Material. Es gilt auch, je weiter zwei Metalle in der Spannungsreihe voneinander entfernt stehen, desto höher ist die Reaktionswirkung (Oxidation und Reduktion) der Metalle. Die gemessenen Potentiale in den Spannungsreihen gelten nur bei den oben genannten Standardbedingungen.

Die Platinelektrode wird sehr leicht verunreinigt, deshalb werden andere Bezugselektroden verwendet, die weniger wartungsintensiv sind, jedoch ein konstantes Elektrodenpotential gegenüber der NHE haben, sodass eine Umrechnung leicht möglich ist. Bei solchen Elektroden handelt es sich um zum Beispiel die Kalomel-Elektrode, oder die Silber/Silberchloridelektrode. Die Letztere wurde auch für die Experimente in dieser Arbeit verwendet.

Bei der Silberchloridelektrode handelt es sich um einen Silberdraht, der mit Silberchlorid beschichtet ist und sich in einer gesättigten Silberchloridlösung befindet, wie in Abbildung 10 zu sehen ist. Diese Bezugselektrode ermöglicht auch Messungen bei hohen Temperaturen, von bis zu 275°C [17].

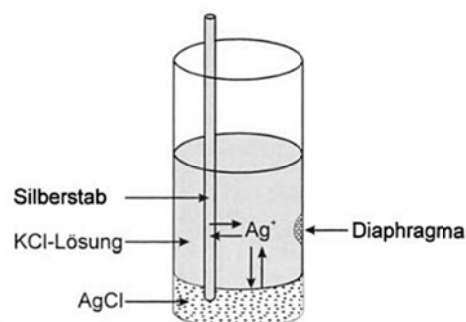


Abbildung 10 Schematischer Aufbau der Ag/AgCl-Elektrode [19]

### 2.1.1.5 Freies Korrosionspotential

Zwischen den Elektroden und dem Elektrolyten stellt sich ein freies Elektrodenpotential ein, das auch *freies Korrosionspotential* genannt wird. Sobald eine Komponente, also zum Beispiel Elektroden oder Elektrolyt, im Gleichgewicht verändert wird, verändert sich auch das freie Korrosionspotential. Auch hier gilt wieder, je negativer das Potential, desto unedler und korrosionsanfälliger ist das System.[9]

### 2.1.1.6 Passivität

Die Geschwindigkeit und der Verlauf der Korrosion können durch Bildung fester Korrosionsprodukte beeinflusst werden. Diese Korrosionsprodukte können schützende Deckschichten bilden, die auch Passivschichten genannt werden. Sie haben Eigenschaften und Strukturen, die das darunterliegende Material schützen.

Es gibt mehrere Modelle um die Passivität zu erklären. Die verbreitetste ist das Oxidfilmmodell, nach dem sich eine schützende Oxidschicht über das Material legt. Wenn die Korrosionsgeschwindigkeit sinkt, geht man davon aus, dass dies mit der Bildung einer schützenden Passivschicht zu tun hat. Die Bildung der Oxidschicht ist stark pH-Wert abhängig, da bei der Bildung von Oxidschichten Hydroxide bzw. Oxide benötigt werden. [9][20]

### 2.1.1.7 Stromdichte-Potential-Kurve

Um elektrochemische Korrosionsvorgänge auch graphisch darstellen zu können, werden sogenannte Stromdichte-Potentialkurven aufgenommen. Es beschreibt die Reaktion des untersuchten Materials auf die Veränderung des Potentials, mit den resultierenden Strömen. Diese Kurven sind charakteristisch für das jeweilige Metall in einem bestimmten Elektrolyten. Es kann eine grobe Einteilung der Kurve in fünf Bereiche erfolgen.

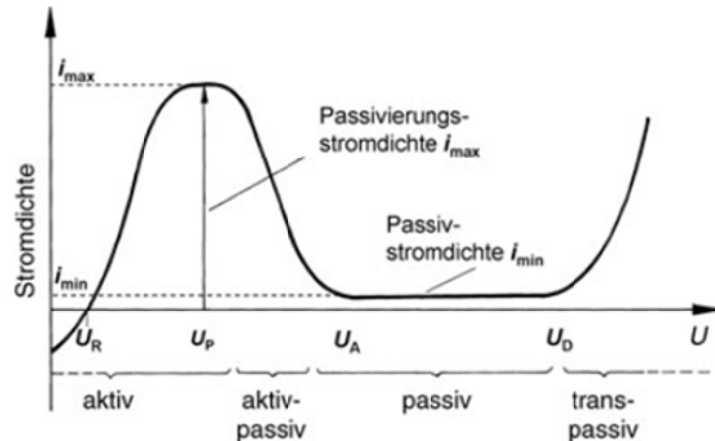


Abbildung 11 Schematische Darstellung einer Stromdichte-Potential-Kurve [20]

Der erste Bereich, der in Abbildung 11 durch die gestrichelte Linie im aktiven Bereich beschrieben ist, zeigt das Vorherrschen der kathodischen Teilreaktion. Ab dem Punkt  $U_R$  herrscht die anodische Teilreaktion vor und das Metall wird aufgelöst, dies wird auch aktiver Bereich genannt. Wenn die Kurve ihr Maximum bei  $U_P$  erreicht, beginnt sich die Passivschicht auszubilden, dies beschreibt den Aktiv-Passiv-Bereich. Wenn die Passivschicht ausgebildet ist, verändert sich der Strom nicht mehr wobei die Bildung und die Auflösung der Passivschicht im Gleichgewicht sind. Sobald die Auflösung der Passivschicht überhandnimmt, steigt der Strom wieder stark an und das Metall wird wieder angegriffen. Dies nennt man den transpassiven Bereich. Führt man die Kurve nun zurück und verringert das Potential wieder schrittweise, werden die gleichen markanten Punkte durchlaufen, jedoch treten sie bei anderen Potentialen auf. [1]

## 2.2 WICHTIGE KORROSIONSARTEN

Die unterschiedlichen Korrosionsarten ([9], [1]) wurden schon in Kapitel 2.1 genannt. Hier wird genauer auf die in dieser Arbeit untersuchten Korrosionsarten eingegangen.

### 2.2.1 LOCHKORROSION

Es handelt sich bei der Lochkorrosion um einen lokalen Korrosionsangriff, der nur an kleinen Oberflächenbereichen auftritt und Löcher erzeugt. Die Tiefe des Loches muss größer sein als sein Durchmesser, um als Lochfraßstelle zu gelten. Lochkorrosion tritt bei rostbeständigen Stählen bevorzugt dann auf, wenn in der Deckschicht des Metalls Poren oder Fehlstellen vorliegen. Die elektronenleitende Deckschicht wird zur Kathode des Korrosionselementes und die Fehlstelle zur Anode, wie in Abbildung 12 schematisch gezeigt wird.

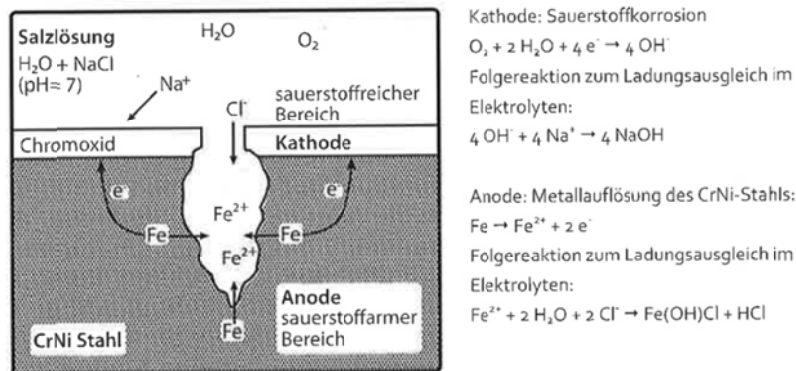


Abbildung 12 Schematische Darstellung der Lochkorrosion [9]

Die Stärke des Korrosionsangriffes steigt, wenn die Fläche der Kathode sehr groß, die der Anode jedoch sehr klein ist. Es stellt sich auch ein Konzentrationsunterschied im Elektrolyten ein. Der Elektrolyt im Loch wird immer saurer, was den Korrosionsangriff verstärkt, da zusätzlich Säurekorrosion am Lochboden stattfindet. Diese Art der Korrosion wird vor allem durch Halogenid-Ionen verursacht, überwiegend Chlorid-Ionen. Begünstigt wird Lochkorrosion auch durch erhöhte Temperaturen, saure Elektrolyte und inhomogenes Gefüge.

Das Lochkorrosionspotential ermöglicht eine Identifizierung des Lochangriffes. Nach Überschreiten dieses Potentials beginnt die Lochkeimbildung. Die Lage des Lochkorrosionspotentials ist abhängig von mehreren Faktoren: Dem pH-Wert des Elektrolyten, der Temperatur, der Chlorid-Konzentration und auch den Legierungselementen.

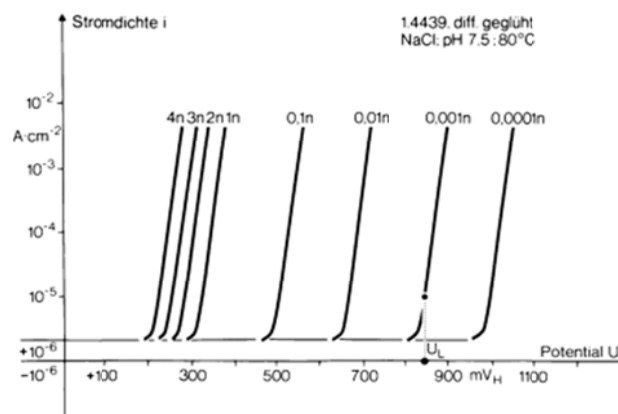


Abbildung 13 Schematische Darstellung von Lochkorrosionspotentialen an 1.4439 mit unterschiedlichen Chloridkonzentrationen [1]



Ein weiterer Faktor, der zur Bestimmung der Anfälligkeit auf Lochkorrosion wichtig ist, ist die kritische Lochfraßtemperatur (CPT), ab der Lochfraß auftreten kann und die direkt mit dem Lochfraßpotential zusammenspielt. In Abbildung 14 sind der Zusammenhang zwischen einer potentialunabhängigen und potentialabhängigen CPT beschrieben.

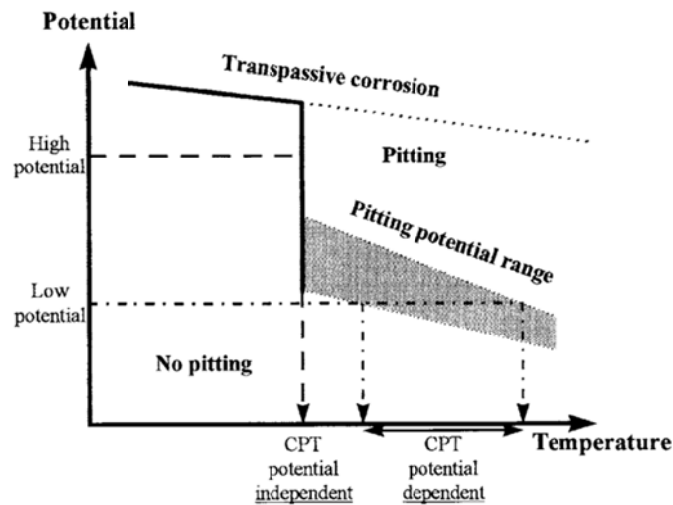


Abbildung 14 Zusammenhang zwischen Lochfraßpotential und CPT [21]

### 2.2.2 SPALTKORROSION

Bei der Spaltkorrosion handelt es sich auch um einen lokalen Korrosionsangriff in Spalten, die konstruktionsbedingt an Bauteilen auftreten. Durch diese Spalten können sich Konzentrationsunterschiede im Elektrolyten ergeben. Es bildet sich im Spalt ein sauerstoffarmer Bereich, der als Anode wirkt, da der Nachtransport des Sauerstoffs im Spalt gehemmt ist. In diesem Bereich sinkt der pH-Wert durch die Anreicherung an Wasserstoffionen und Chloridionen im Elektrolyten, die die Spaltkorrosion begünstigen. Die Spaltflüssigkeit wird immer saurer und somit nimmt die Korrosionsgeschwindigkeit immer mehr zu. Ab einer kritischen Spaltbreite von 1mm ist die Spaltkorrosion besonders häufig zu beobachten. An der Anode werden die gebildeten Eisenionen von den Chloridionen des Elektrolyten neutralisiert, es entsteht somit Eisenchlorid  $\text{FeCl}_2$ . Die Hydroxydionen bilden mit den positiven Natriumionen Natronlauge  $\text{NaOH}$ . Eisenchlorid ist in Wasser nicht stabil. Es reagiert zu Eisenhydroxid  $\text{Fe(OH)}_2$  und Salzsäure  $\text{HCl}$ , wodurch sich die Lösung im Bereich der Anode immer weiter ansäuert und somit die Korrosionsreaktion beschleunigt. An der Kathode nimmt der pH-Wert jedoch immer weiter zu. Eine schematische Darstellung der Korrosionsabläufe bei der Spaltkorrosion mit einem Elektrolyten aus Salzlösung ist in Abbildung 15 erklärt.

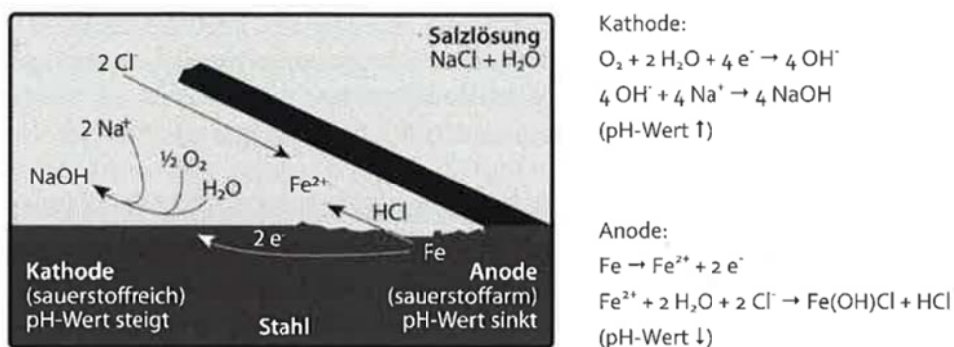


Abbildung 15 schematische Darstellung der Spaltkorrosion [9]

### 2.2.3 INTERKRISTALLINE KORROSION

Die interkristalline Korrosion zählt zur selektiven Korrosion, da nur die Korngrenzen angegriffen werden. Es ist eine schwer erkennbare Korrosionsart, die sehr häufig bei hochlegierten Chrom- und Chromnickelstählen vorkommt. Durch Ausscheidungen von korrosionshemmenden Legierungsbestandteilen in Karbiden an den Korngrenzen, wird die Korrosionsbeständigkeit in korngrenzennahen Bereichen verringert. Dies kann durch Wärmebehandlung oder Schweißen, hervorgerufen werden, da durch die Wärmeeinwirkung die Diffusion der Legierungselemente zur Bildung der Ausscheidungen erleichtert wird. Als klassisches Beispiel gilt die Chromverarmung an den Korngrenzen durch Chromkarbidbildung bei rostbeständigen Stählen. Weitere Ursachen, können auch ein chemischer Angriff auf Korngrenzenausscheidungen oder die Anreicherung von Phosphor und Silizium, die den Korngrenzenangriff fördern. Die interkristalline Korrosion zeichnet sich dadurch aus, dass bei längerem Fortschreiten es zum Kornzerfall kommt. In Abbildung 16 ist der selektive Angriff auf korngrenzennahe Bereiche dargestellt.

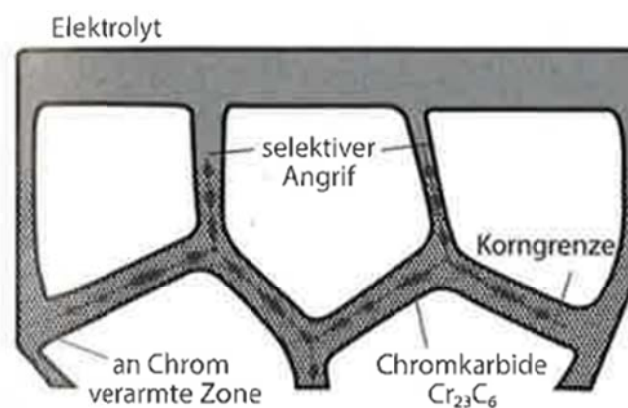


Abbildung 16 Schematische Darstellung der Interkristallinen Korrosion [9]

Die für rostbeständige Stähle wichtigste Ursache ist die oben erwähnte Chromverarmung. Gelöster Kohlenstoff muss zur Karbidbildung zur Korngrenze diffundieren. Bei niedrigen Glühtemperaturen ist die Löslichkeit von Kohlenstoff in der Matrix gering. Je höher die Temperatur, desto höher die Löslichkeit des Kohlenstoffs. Es scheidet sich ein chromreiches Karbid  $M_{23}C_6$  an den Korngrenzen aus und je mehr Chromkarbide ausgeschieden werden, desto geringer wird der Chromgehalt um den Bereich dieser Ausscheidungen. Sobald der Chromgehalt unter die Resistenzgrenze von 12% fällt, kann es zur interkristallinen Korrosion kommen, da diese Bereiche bei der elektrochemischen Korrosion als unedlere Anode reagieren. Die restliche Kornoberfläche befindet sich im passiven Zustand durch den höheren Chromgehalt und dient als Kathode. Eine schematische Darstellung des Chromgehaltes um eine Korngrenze herum ist in Abbildung 17 dargestellt.

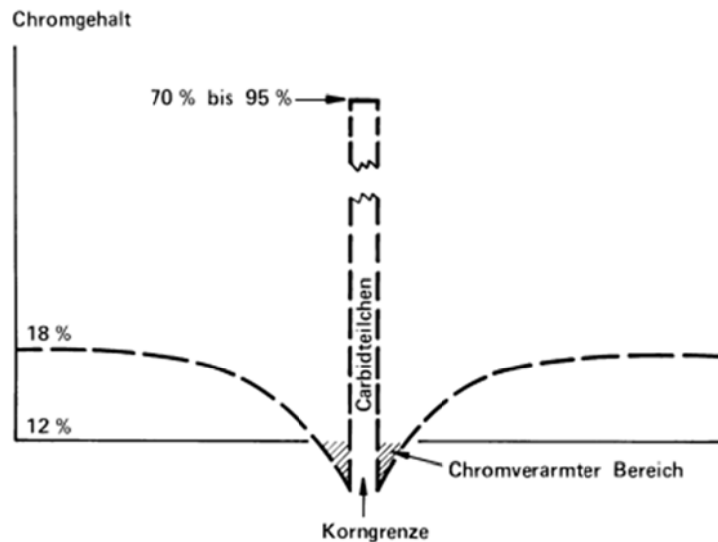


Abbildung 17 Schematische Darstellung des Chromgehaltes um eine Korngrenze [1]

Der Temperaturbereich, in dem sich die Chromausscheidungen bilden, wird als kritischer Temperaturbereich bezeichnet und befindet sich bei rostbeständigen Stählen zwischen 350°C bis 800°C. Erst wenn der Chromgehalt unter die Resistenzgrenze fällt, wird die Korngrenze anfällig für IK, was auch Sensibilisierung genannt wird. Dieser Unterschied zwischen Beginn der Chromausscheidungsbildung und Sensibilisierung wird im folgenden Kornerfallsschaubild in Abbildung 18 dargestellt.

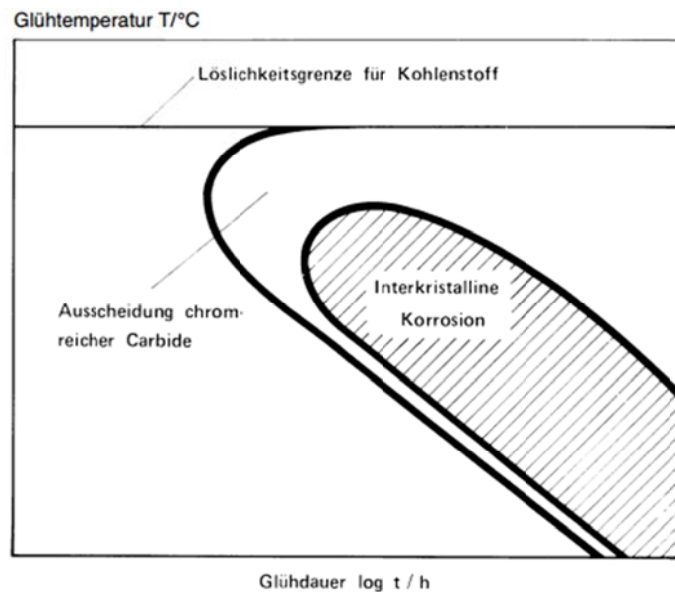


Abbildung 18 schematisches Kornerfallsschaubild [1]

Zur Vermeidung der interkristallinen Korrosion wird eine gute Wärmebehandlung, die Senkung des Kohlenstoffgehaltes, oder die Zugabe von starken Karbidbildnern wie Tantal oder Niob empfohlen.

#### 2.2.4 MARTENSITISCHER UND AUSTENITISCHER ROSTBESTÄNDIGER STAHL

In dieser Diplomarbeit wurden die beiden Stähle 1.4404 bzw. AISI 316L, ein austenitischer rostbeständiger Stahl und 1.4112 bzw. AISI 440B, ein martensitischer rostbeständiger Stahl untersucht. Beide Stähle zählen zu den hochlegierten Stählen und als rostbeständige Stähle haben sie per Definition einen Chrom-Gehalt über 12%. Dadurch bilden diese Stähle eine

Passivschicht, die den Stahl schützen kann. Die chemische Zusammensetzung der beiden Stähle wurde mit Hilfe von optischer Emissionsspektroskopie ermittelt [22]. Die Gefügestruktur hängt von der Wärmebehandlung und auch von der mechanischen Fertigung ab. Die chemische Zusammensetzung der Stähle ist Tabelle 1 zu entnehmen.

**Tabelle 1 chemische Zusammensetzung der Stähle 1.4404 und 1.4112**

	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	V
1.4404	0,016	17,5	11,2	2,05	1,68	0,37	0,031	0,03	-
1.4112	0,92	18,04	-	0,97	0,48	0,46	0,026	0,0005	0,12

Die Stähle sind aufgrund der Zusammensetzungen und auch ihrer Gefüge unterschiedlich korrosionsbeständig. Es können sich während der Wärmebehandlungen und des Schweißprozesses Karbide ausbilden, die die unterschiedliche Korrosionsbeständigkeit bedingen. Jedoch nicht nur Karbide sondern auch andere intermetallische Phasen werden gebildet. Die Ausscheidungsphasen und das Ausscheidungsverhalten sind somit entscheidend für die Korrosionsbeständigkeit der Stähle. Laut [23]–[26] kommt es vorwiegend zu intermetallischen Ausscheidungen von Sigma-, Laves- oder Chi-Phasen. Bei den Karbiden handelt es sich vorwiegend um  $M_23C_6$ ,  $M_7C_3$  und  $MC$ .

Die komplexeren Karbide  $M_23C_6$  und  $M_7C_3$  werden meist als Chromkarbide gebildet und scheiden sich an den Korngrenzen aus. Um diese Chromkarbide bildet sich eine chromverarmte Zone, die zur erhöhten Korrosionsanfälligkeit führt, sollte der Chromgehalt unter die Resistenzgrenze fallen. Damit nimmt die Anfälligkeit für interkristalline Korrosion somit zu.

Wenn starke Karbidbildner wie Ti oder Nb im Werkstoff vorhanden sind, bilden diese bevorzugt  $TiC$ ,  $NbC$ . Somit bleibt das Chrom im Gefüge gelöst und die Korrosionsbeständigkeit bleibt bestehen. Diese Karbide wirken sich positiv auf die Festigkeit des Werkstoffes aus (Ausscheidungshärtung).

#### **2.2.4.1 Austenitischer rostbeständiger Stahl 1.4404**

Dieser Werkstoff hat die Kurzbezeichnung X2CrNiMo18-10 bzw. AISI 316L (American Iron and Steel Institute). 1.4404 gilt als ein sehr korrosionsbeständiger Stahl, da er nur wenig Kohlenstoff aufweist und auch stabilisiert ist durch Nickel, wodurch die Karbide sich eher an Nickel als an Chrom binden, da Nickel ein schwacher Karbidbildner ist. [27] AISI 316L wird wegen seiner guten mechanischen Eigenschaften und seiner guten Polierbarkeit oft eingesetzt.

Aus [27]–[29] geht hervor, dass der Test auf interkristalline Korrosion bzw. Sensibilisierung von vielen Parametern (Elektrolyt, Geschwindigkeit, Dauer und so weiter) abhängt und nur schwer für ein System ohne Vorversuche zu adaptieren ist. Die Anfälligkeit auf Lochfraß wird in [30]–[34] diskutiert. Lochfraß ist die wahrscheinlichste Angriffsform für diesen Stahl, abhängig vom Medium.

Der Einfluss der Legierungselemente auf die kritische Lochfraßtemperatur wird in [35] beschrieben. Aus dem Molybdängehalt des austenitischen Stahles kann die CPT überschlagsmäßig aus [35] berechnet werden, die für 1.4404 bei mindestens  $19,35^\circ\text{C}$  liegt, wobei nur der Effekt des Molybdäns miteinbezogen wurde. Auch weitere Legierungselemente spielen bei der Berechnung der tatsächlichen CPT eine Rolle, die hier nicht experimentell bestimmt wurde. Dies deutet darauf hin, dass bei Raumtemperatur Lochkorrosion der bevorzugte Korrosionsmechanismus ist.

### 2.2.4.2 Martensitischer rostbeständiger Stahl 1.4112

Die Kurzbezeichnung für diesen Werkstoff lautet X90CrMoV18 bzw. AISI 440B.

Durch den hohen Kohlenstoff- und Chromgehalt beinhaltet dieser Stahl viele Karbide und hat somit generell geringere Korrosionsbeständigkeit als ein hochlegierter Cr-Ni-Stahl [36]. Für 1.4112 liegt die ungefähr berechnete CPT [35] nur auf Grundlage des Molybdängehaltes bei 11,79°C nach [35], was weit unter Raumtemperatur liegt. Es ist zumindest Lochkorrosion zu erwarten, wenn auch die Korrosion aufgrund seines hohen Chrom- und Kohlenstoffgehaltes eher in Richtung interkristalline Korrosion abzielt.

## 2.3 SCHWEIßVERFAHREN

### 2.3.1 LINEARREIBSCHWEIßEN (LRS)

Es handelt sich hierbei um ein Pressschweißverfahren [37][38][39], bei dem Werkstücke im festen Zustand durch Druck und Reibungswärme miteinander verbunden werden, das heißt die Schmelztemperatur wird nicht überschritten. Dieses Verfahren ist besonders geeignet für Materialien die mit schmelzflüssiger Phase schlecht oder nicht schweißgeeignet sind. Eines der Werkstücke steht fest, wobei das andere oszilliert. Durch die angelegte Kraft entsteht Reibungswärme, die das Material weich werden lässt und dabei deformiert wird. Der entstehende Grat (Flash) durch das herausgedrückte Material ist charakteristisch für das Linearreibschweißen, siehe Abbildung 19.

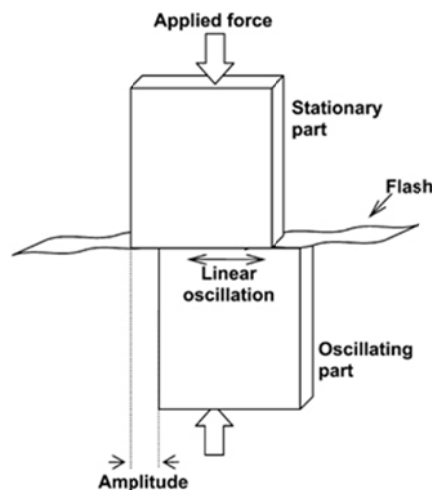


Abbildung 19 Schematische Darstellung des Linearreibschweißens

Ein weiterer Vorteil des Schweißverfahrens ist die feine Gefügestruktur der Schweißnaht, die durch Rekristallisation zu Stande kommt. Dadurch werden gute mechanische Eigenschaften (Festigkeit und Zähigkeit) der Schweißnaht und eine schmalere Wärmeeinflusszone erreicht. Die geringe Schweißzeit, die gute Reproduzierbarkeit und die gleichmäßige Wärmeeinbringung sind weitere Vorteile dieses Schweißverfahrens. Nachteilig sind jedoch die hohen Anschaffungskosten einer LRS-Schweißanlage.

### 2.3.1.1 Schweißprozess

Das Linearreibschweißen erfolgt in vier Phasen, die in Abbildung 20 dargestellt sind:

- Anlaufphase (A)
- Reibphase (B)
- Stauchphase (C)
- Abbauphase (D)

In der Anlaufphase (A) erreicht das oszillierende Werkstück die gewünschte Amplitude der Auslenkung. Diese Phase ist durch eine bestimmte Zeit bei geringer Anpresskraft bestimmt. Danach geht es direkt in die Reibphase (B) über. Die Reibkraft wird erhöht und durch die gleichbleibende Oszillation entsteht Wärme. Durch die hohe Anpresskraft wird das plastifizierte Material aus der Schweißnaht herausgepresst, wodurch der Grat entsteht. Der Verlust an Material durch den Grat verursacht eine Verkürzung des Schweißsteiles (burn-off). Die Reibphase wird durch die Reibzeit und die Anzahl der Oszillationen, deren Amplitude bzw. durch die verursachte Längenänderung bestimmt. Bei der anschließenden Stauchphase (C) wird die Amplitude der Oszillation stark verringert. Die daran anschließende hohe Stauchkraft bewirkt eine weitere Rekristallisation und Diffusion in der Fügezone, die die hohe Qualität dieser Schweißverbindung ausmacht. In der letzten Phase (D) wird das Werkstück aus der Maschine entnommen, die Abbauphase genannt wird.

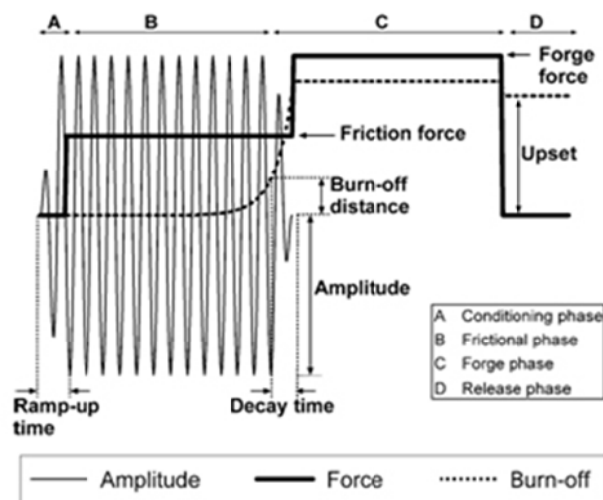


Abbildung 20 Darstellung der Phasen beim Linearreibschweißen - Amplitude, Kraft (Force) und Verkürzung (Burn-off) [37]

Die Schweißphase kann in drei weitere Phasen unterteilt werden (Abbildung 21). In Phase 1 (initial) werden durch die erzeugte Wärme und die angelegte Kraft Unebenheiten der Oberfläche ausgeglichen, sodass die gesamten Flächen im Kontakt stehen. In Phase 2 (transition), steigt die Temperatur, wodurch die Plastizität steigt und die Festigkeit sinkt. In Phase 3 (equilibrium), der Gleichgewichtsphase, wird das plastifizierte Material durch die oszillierende Bewegung und die angelegte Kraft aus der Kontaktstelle herausgedrückt.

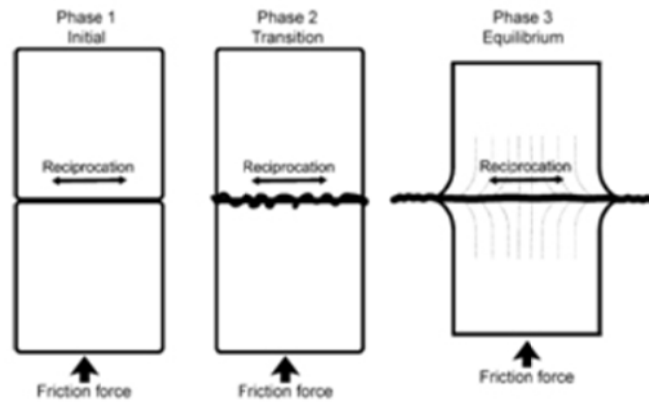


Abbildung 21 Schematische Darstellung der Vorgänge in der Reibphase [40]

### 2.3.1.2 Gefügezonen

Die Gefügezonen [37] ähneln den Zonen, die bei Verfahren wie dem Rotations- und Rührreißschweißen entstehen. Der Grundwerkstoff (GW) bzw. sein Gefüge wird durch das Schweißverfahren nicht verändert. In der Wärmeeinflusszone (WEZ) werden das Gefüge und dessen mechanische und physikalische Eigenschaften durch den Wärmeeintrag verändert. Zusätzlich tritt auch eine thermomechanisch beeinflusste Zone (TMZ), welche den Übergang zur Schweißnaht (SN) darstellt, auf. Die plastische Verformung durch den Wärmeeintrag ist an Hand der unterschiedlichen Eigenschaften der WEZ zu erkennen. Die Schweißzone selbst zeigt ein sehr feines Gefüge, das durch starke Rekristallisation und Diffusion entsteht und hohe Festigkeit und Zähigkeit aufweist.

### 2.3.2 ABBRENNSTUMPFSCHEIßEN (RA)

Das Abbrennstumpfschweißverfahren [41]–[44] ist ein Widerstandspressschweißverfahren und ist schematisch in Abbildung 22 dargestellt. Die Schmelzwärme wird durch Widerstand erzeugt, der durch den durch die Berührungsflächen fließenden Strom entsteht. Der Strom wird über zwei Spannbacken zugeführt, über die auch die Presskraft aufgebracht wird. Eine Spannbacke ist beweglich, die andere fest in ihrer Position. Durch das anschließende Stauchen entsteht ein Wulst.

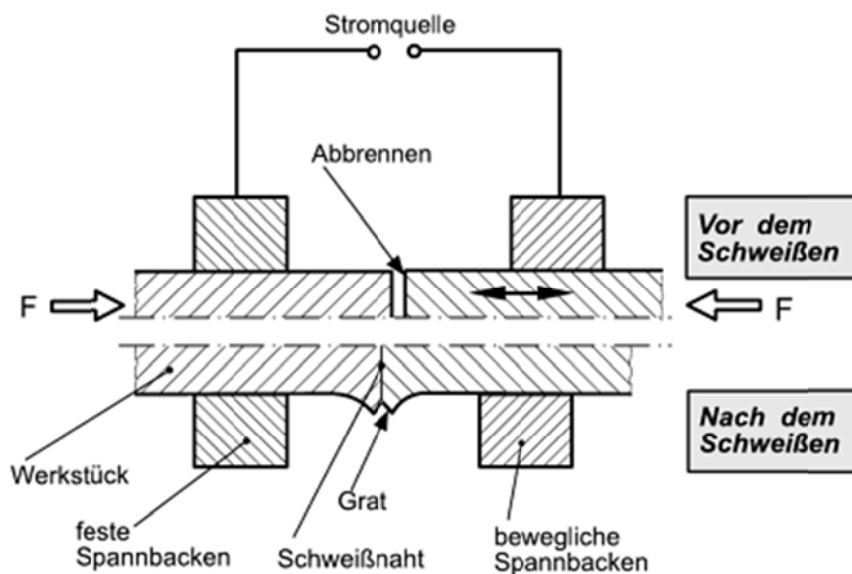


Abbildung 22 Schematische Darstellung des Abbrennstumpfschweißens [41]

Der Schweißvorgang wird in drei Phasen unterteilt:

- Vorwärmen
- Abbrennen
- Stauchen

Das Vorwärmen kann, muss aber nicht, durchgeführt werden. Durch die Berührungsflächen wird Strom geleitet. Beim Vorwärmen wird eine Seite zurückgefahren und über den entstehenden Abstand bilden sich durch die angelegte Spannung Lichtbögen, die das Vorwärmen bewirken. Das Zurückfahren wird wiederholt bis die gewünschte Abbrenntemperatur erreicht ist. Beim Abbrennen ist die Temperatur so hoch, dass der Werkstoff teilweise verdampft und Verunreinigungen (etwa Oxide) herausgeschleudert werden. Der Metaldampf wirkt als Schutzgas und verhindert die Oxidation der Berührungsflächen. Anschließend werden die Berührungsflächen stark gestaucht. Die WEZ bei diesem Schweißverfahren ist klein und die gesamten Verunreinigungen werden in den entstehenden Wulst hinausgedrückt.

Der Anwendungsbereich des Abbrennstumpfschweißens umfasst das Schweißen von Stangen, Rohren und Profilen. Fast alle Metalle können mit dieser Methode verschweißt werden. Beispiele der Anwendung sind Karosserieteile und Fenster in der Fahrzeugindustrie, Rahmenkonstruktionen aus Rohren und Profile, sowie Seile, Drähte oder Kettenglieder.



## 3 UNTERSUCHUNGSMETHODEN

### 3.1 KETTENGLIEDER

Die untersuchten linearreibgeschweißten Kettenglieder bestehen aus den Werkstoffen 1.4404 und 1.4112 und den abbrennstumpfgeschweißten Kettengliedern aus 1.4404. Die Kettenglieder wurden von Firma Pewag im Rahmen des Projektes 2.3 im JOIN4+ gefertigt und geliefert.

#### 3.1.1 LINEARREIBGESCHWEIßTE KETTENGLIEDER

Die Kettenglieder werden gesenkgeschmiedet bevor sie durch Linearreibschweißen gefügt werden. Die Spezifikationen sind dem Anhang A – Allgemeines (Seite 95ff) zu entnehmen. Die Kettenglieder haben eine ungefähre Außenbreite von 73mm und eine Innenbreite von 33mm. Die Gesamtlänge beträgt 152mm und die Stärke des Kettengliedes beträgt ungefähr 23mm.

In Abbildung 23 sieht man ein linearreibgeschweißtes Kettenglied, das im Rahmen dieser Diplomarbeit untersucht wurde.



Abbildung 23 Linearreibgeschweißtes Kettenglied AISI 316L

#### 3.1.2 ABBRENNSTUMPGESCHWEIßTE KETTENGLIEDER

Die abbrennstumpfgeschweißten Kettenglieder aus 1.4404 wurden drahtgezogen, bevor sie gefügt wurden. Die Spezifikationen der Rundstahlkette sind Anhang A – Allgemeines (Seite 95ff) zu entnehmen. Die Stärke der Kettenglieder beträgt 16mm, die Außenlänge 74mm und die Innenlänge 49mm.

#### 3.1.3 PROBENENTNAHME

Für die verschiedenen Korrosionsuntersuchungsmethoden wurden Proben in verschiedenen Geometrien entnommen. Diese wurden den Zonen entnommen, die für die Korrosionsuntersuchung von Interesse sind. Dazu gehören das unbeeinflusste Grundmaterial (GW), die Wärmeeinflusszone (WEZ) und die Schweißnaht (SN). Die Proben für den Grundwerkstoff wurden immer im Mindestabstand von 4cm zur Schweißnaht

entnommen, um eine etwaige Beeinflussung durch die Schweißprozesswärme ausschließen zu können.

In Abbildung 24 sind die Probenentnahmestellen für linearreibgeschweißte Kettenglieder schematisch eingezeichnet. In Rot für die elektrochemischen Korrosionstests und in blau für chemische Korrosionstests.

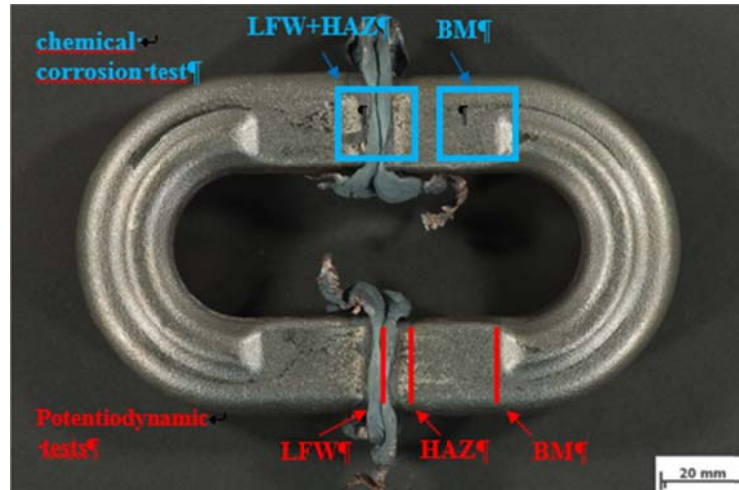


Abbildung 24 Schematische Darstellung der Probenentnahmestellen aus linearreibgeschweißten Kettengliedern für chemische (blau) und elektrochemische (rot) Korrosionstests

Bilder zur Probenentnahme für elektrochemische und chemische Tests sind aus Anhang A – Allgemeines (Seite 95ff) zu entnehmen.

### 3.1.3.1 Proben für elektrochemische Korrosionstests

Um die Lage der Zonen in den LRS- und RA- geschweißten Kettengliedern zu ermitteln wurden Härtemessungen im Rahmen der Projektarbeit [4] durchgeführt. Über die Härteverläufe konnten einzelnen Zonen (SN, WEZ und GW) ermittelt werden.

In Abbildung 25 sind die Härteverläufe für das LRS-geschweißte Kettenglied aus 1.4404 dargestellt. Die WEZ mit einer maximalen Härte von annähernd 200HV1 befindet sich ungefähr in 5mm Abstand zur Schweißnaht SN. Die Schweißlinie SN weist die geringste Härte von ca.150HV1 auf, wobei die Härte des Grundwerkstoffes GW auch in diesem Härtebereich liegt.

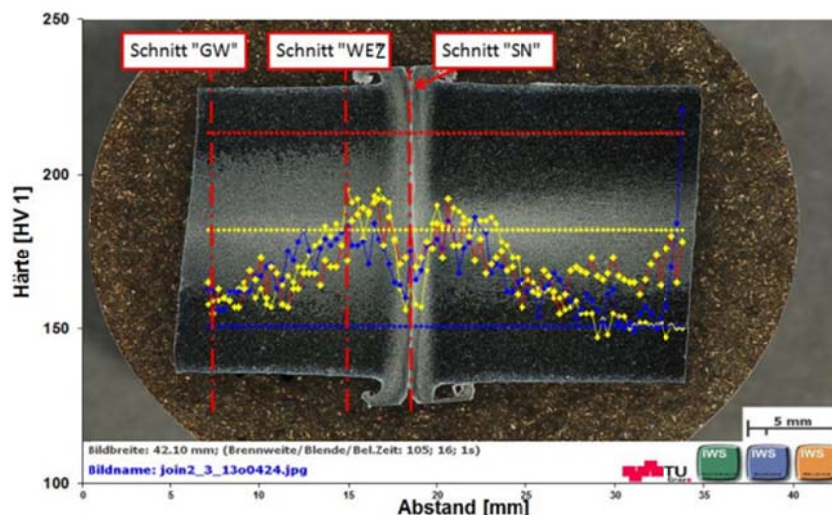


Abbildung 25 Härteverlauf nach Vickers HV1 eines reibgeschweißten 1.4404 Kettengliedes [4]

Für die linearreibgeschweißten Kettenglieder aus 1.4112 wurde, wie in Abbildung 26 zu sehen, eine deutlich höhere Härte von bis zu 750HV1 gemessen. Die Schweißlinie SN weist die geringste Härte mit ca. 350HV1 auf. In einem Abstand von ca. 3mm wurde die WEZ mit einer Härte von ungefähr 470HV1 identifiziert.

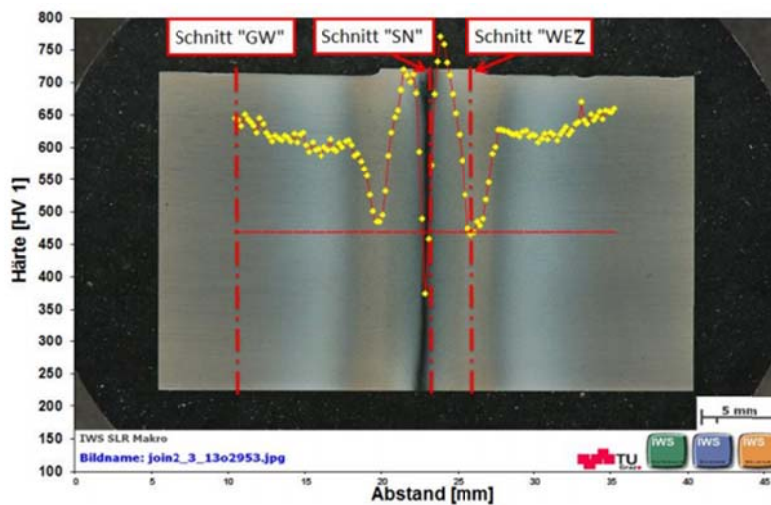


Abbildung 26 Härteverlauf HV1 eines linearreibgeschweißten 1.4112 Kettengliedes [4]

Bei den abbrennstumpfgeschweißten Kettenglieder zeigt die Schweißlinie SN eine Härte von ca. 250HV10, wobei die die Grenze der WEZ, die ungefähr 5mm von der SN entfernt liegt, eine Härte von ca. 200HV10 zeigt. Der Rand bzw. der Grundwerkstoff GW - ca. 10mm von SN entfernt - weist ca. 270HV10 Härte auf. Hier kommt also es also zu einer Härtesteigerung durch die einwirkende Schweißwärme (vermutlich Ausscheidungsbildung) Aus dem Randbereich (GW) wurden in den elektrochemischen Versuchen zusätzliche Proben untersucht, siehe Abbildung 27.

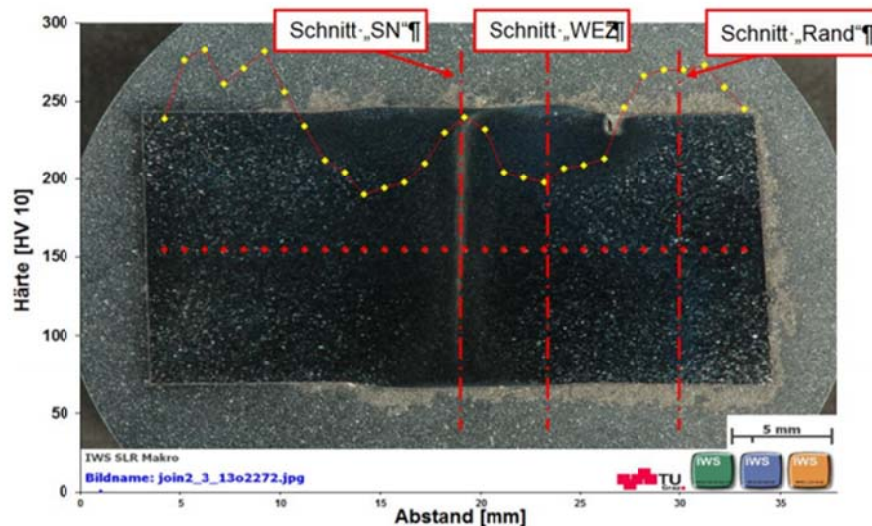


Abbildung 27 Härteverlaufsmessung HV10 eines abbrennstumpfgeschweißten 1.4404 Kettengliedes [4]

### 3.1.3.2 Proben für chemische Korrosionstests

Die Probengeometrie für die chemischen Korrosionstests werden in den Kapiteln 3.4.1 und 3.5.3 besprochen. Die Probe für diese Korrosionstests umfasst die Schweißlinie SN und die Wärmeinflusszone WEZ. Die Probenentnahmestellen werden in Anhang A – Allgemeines (Seite 98ff) dargestellt.

### 3.2 DL-EPR TEST

Die im folgenden vorgestellte Korrosionsuntersuchungsmethode wurde in der Norm ISO 12732:2008 [45] festgelegt und vorgestellt. Es handelt sich dabei um ein so genanntes Double-Loop Verfahren, bei dem das Potential der Probe einmal in den positiven (Passivbereich) und darauf in den negativen Bereich zurück zum Ausgangswert (Reaktivierung) verändert wird. Man nennt dieses Verfahren auch Cihal-Test [46]–[49]. Die Ergebnisse geben Aufschluss über die Sensibilisierung gegenüber interkristalliner Korrosion. Man verwendet Stromdichte-Potentialkurven zur Beschreibung der Korrosionsvorgänge (Abbildung 11, Seite 11).

Zur Überprüfung der Sensibilisierung von rostbeständigen Stählen durch Wärmebehandlung, also Karbidbildung, wurden zwei Methoden entwickelt. Zum einen das Single-Loop und zum anderen das Double-Loop Verfahren, das im Rahmen dieser Diplomarbeit verwendet wurde. Diese beiden kann man als EPR-Verfahren zusammenfassen. EPR bedeutet **E**lektrochemische **P**otentiodynamische **R**eaktivierungsmessung, die durch Stromdichte-Potential-Kurven beschrieben werden. Die erhaltenen Kurven geben Aufschluss über den Sensibilisierungsgrad der Probe nach der jeweiligen Wärmebehandlung bzw. nach dem Schweißverfahren. Es muss jedoch vor einer Auswertung die Korrosionsart bestimmt werden, da bei dieser Testmethode nur die Sensibilisierung auf interkristalline Korrosion überprüft wird.

Für den DL-EPR Test verwendet man eine saure Lösung, die als Elektrolyt bei diesem elektrochemischen Verfahren dient. Die Probe befindet sich im aktiven Zustand und wird polarisiert (steigendes Potential), das heißt es findet hier anodische Polarisierung statt, die dann in den Passivzustand übergeht (Abbildung 28 - 1). Sobald sich die Passivschicht ausgebildet hat, kann daraufhin die Probe kathodisch polarisiert werden und das Potential wird in der Reaktivierungspolarisierung zurückgeführt (Abbildung 28 - 2). Man kann somit überprüfen, ob auf der Probenoberfläche eine Reaktivierung passiert. Dafür müssen also Fehlstellen in der Passivschicht vorhanden sein die eine Zurückführung in den aktiven Oberflächenzustand zulassen und einen anodischen Strom während der kathodischen Polarisierung bewirken.

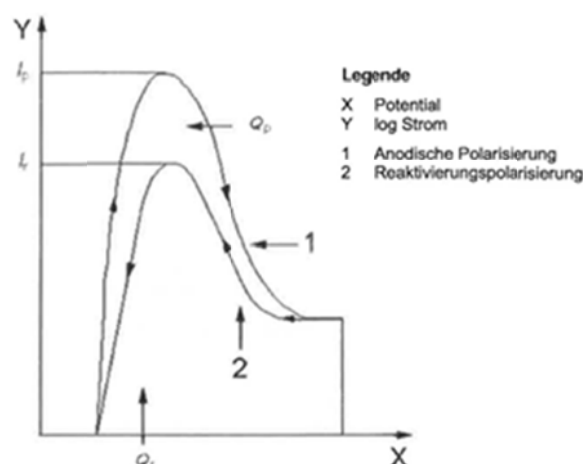


Abbildung 28 Schematische Darstellung der Polarisationskurven des DL-EPR Test

Solche Fehlstellen in der Passivschicht können auf Zonen zurückgeführt werden, die an bestimmten Legierungselementen verarmt sind. Der Reaktivierungsstrom steigt, da nicht nur an den Stellen an denen die Passivschicht nicht mehr funktioniert eine aktive Oberfläche bietet, sondern auch die Passivschicht dünner wird, und somit immer mehr

Oberflächenbereiche zu aktiven Zonen werden.

Aus den erhaltenen Stromdichte-Potentialkurven kann aus dem Verhältnis zwischen Passivierungs- und Reaktivierungspeak und den jeweiligen Ladungen der Sensibilisierungsgrad berechnet werden. Eine Normalisierung auf die Korngröße und eine damit verbundenen Korngrößenbestimmung muss durchgeführt werden. Auch ist eine mikroskopische Untersuchung der Probe notwendig, um die Art des Korrosionsangriffes zu identifizieren.

### 3.2.1 PROBEN UND PROBENVORBEREITUNG

Laut Norm [45] sollen die Proben keine Angriffsfläche für Spaltkorrosion und keine hervorstehenden Kanten aufweisen. Auch soll bei der Bearbeitung der Proben zu starke Temperatureinwirkung vermieden werden, um das Gefüge nicht zu verändern. In der Projektarbeit [4] wurde die Probengeometrie, Probenfläche und Probenanzahl festgelegt.

Die **Probengeometrie** wurde so gewählt, dass die aktive Probenoberfläche  $1\text{cm}^2$  beträgt, um die Stromdichteberechnungen bei der Auswertung zu erleichtern. Die Probe mit einer Fläche von  $1\text{cm}^2$  wurde eingebettet, um so den benötigten Durchmesser von 5cm für den Einsatz in der so genannten Flachzelle (Flat Cell) zu erreichen. Um einen leitenden Kontakt zur Probe herzustellen, wurde auf der Rückseite eine Öffnung in die Einbettmasse gefräst (Abbildung 29, Abbildung 30). Die Dicke der Proben wurde mit 2mm festgelegt.

Die **Probenfläche** von  $1\text{cm}^2$  wurde entweder durch eine kreisförmige oder durch eine quadratische Form erzielt. Da es sich beim Werkstoff 1.4112 um einen harten Werkstoff handelt, wurde die Probe rechteckig zugeschnitten, da ein Herausdrehen, wie bei den Proben aus 1.4404, mit den in der IWS Werkstätte zur Verfügung stehenden Mitteln nicht möglich war.



Abbildung 29 Probengeometrie für den DL-EPR-Test 1.4112 Vorder- und Rückseite



Abbildung 30 Probengeometrie für den DL-EPR-Test 1.4404 Vorder- und Rückseite

Als **Probenanzahl** wurde für jede Zone (SN-WEZ-GW) je vier Proben pro Schweißverfahren und Werkstoff festgelegt. Es wurden beide Werkstoffe, 1.4404 und 1.4112, untersucht.

Für LRS Proben aus 1.4404 wurden die Kettenglieder mit der Bezeichnung 4 und 16 verwendet. Der Zusatz 1 und 2 beschreibt aus welcher SN die Proben entnommen wurden, da auf jedem LRS Kettenglied zwei SN zur Verfügung stehen.

Für RA Proben aus 1.4404 wurden die Kettenglieder 1-4 verwendet. Dieses Schweißverfahren bietet nur eine Schweißnaht pro Kettenglied, deshalb wurde keine Zusatzbezeichnung verwendet. Die LRS Proben aus 1.4112 wurden aus zwei unterschiedlichen Kettengliedern mit der Bezeichnung 26 und 24 gefertigt. Die Proben wurden hierbei mit Buchstaben und Zahlen bezeichnet, wie als Beispiel KG 26 in Anhang A – Allgemeines (Seite 95ff) gezeigt wird.

Eine Übersicht über die Probenbezeichnungen bietet Abbildung 31. In Blau und Grün sind die Proben dargestellt, die in dieser Diplomarbeit auch getestet wurden. Die RA Proben (Abbildung 31- Rot) aus 1.4404 wurden im Rahmen der Projektarbeit [4] untersucht und die Ergebnisse werden vergleichend miteinbezogen. Somit wurden 24 Proben mit dem DL-EPR Test in dieser Diplomarbeit untersucht.

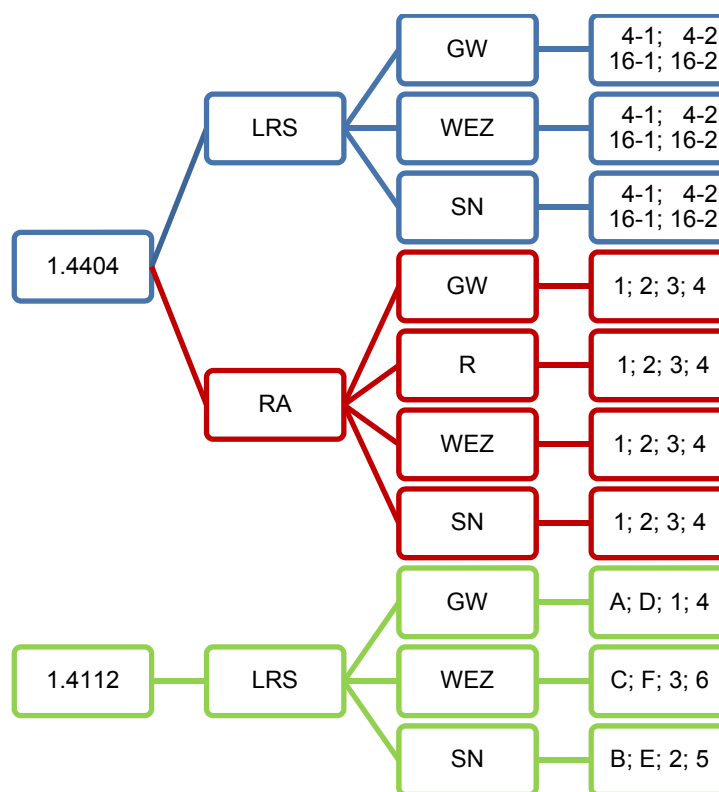


Abbildung 31 Übersicht Probenbezeichnungen für DL-EPR Test

Zur Probenvorbereitung soll die Probenoberfläche laut Norm [45] auf einen  $R_a$ -Wert von  $0,25\mu\text{m}$  gebracht werden. Das wurde durch Schleifen und Polieren erzielt. Geschliffen wurde über mehrere Schritte mit SiC-Papier bis zu einer Rauigkeit von  $6\mu\text{m}$  mit einer Körnung von 4000 (Anzahl Siebmaschen je Zoll / 25,4 mm) und danach weiter bis zu einer Rauigkeit von  $0,25\mu\text{m}$  poliert. Die Dauer der Zwischenschritte und die Kraft beim Schleifen bzw. Polieren variieren mit dem Werkstoff. Für 1.4404 wurde die Anpresskraft beim Schleifen auf 30N festgelegt und beim Polieren auf 80N erhöht. Beim martensitischen Werkstoff, wurde von Anfang an ein höherer Anpressdruck verwendet, mit 60N beim Schleifen und 100N beim Polieren. Nach dem Schleifen und Polieren wurden die Proben im Ultraschallbad gereinigt, mit Wasser und Ethanol gespült und anschließend im Exsikkator bis zur Untersuchung gelagert. Es wurde darauf geachtet, dass die Proben der Luftatmosphäre nicht länger als 10min ausgesetzt sind, um eine Ausbildung der Passivschicht vor der Überprüfung zu verhindern.

### 3.2.2 GERÄTE

Es werden mehrere Geräte zur Messung der Stromdichte-Potentialkurven verwendet. Dies sind zum einen der Potentiostat und das Bedienungsprogramm und zum anderen die EPR-Messzelle.

#### 3.2.2.1 Potentiostat

Beim verwendeten Potentiostat handelt es sich um das Gerät AUTOLAB Potentiostat/Galvanostat/PGSTAT128N<sup>®</sup> (Abbildung 32), der mit der Software Nova 1.8<sup>®</sup> ausgestattet wurde. Die Verwendung des Programmes und die einzelnen Unterprogramme sind in [50] sehr gut beschrieben und werden von mir hier nur namentlich genannt und deren Funktion erklärt.



Abbildung 32 Potentiostat Autolab PGSTAT 128N [4]

#### 3.2.2.2 EPR-Messzelle – Flachzelle

Die Flachzelle (Flat Cell) in Abbildung 33 erhält ihren Namen durch die flache Probengeometrie, die durch diese Zelle ermöglicht wird. Die Besonderheit ist, dass die Probe selbst den Boden der Zelle bildet und durch ein Kontaktstück zum Stecker der Arbeitselektrode (rot) an der Bodenplatte verbunden wird. Die maximale Probengröße ist auf 58x58x2mm beschränkt. Auf die Probe wird ein Glaszylinder mit einem Durchmesser von 43mm aufgesetzt, woraus sich eine Probefläche von 16,9cm<sup>2</sup> ergibt. Um ein Auslaufen der Elektrolytflüssigkeit zu verhindern, wird ein Dichtungsring aus Viton<sup>®</sup> zwischen Probe und Glaszylinder gebracht. Das Befestigen der Probe unter dem Glaszylinder erfolgt durch drei Flügelmutter, die den Glaszylinder auf die Probenoberfläche drücken. Es können maximal 100ml des Elektrolyten in die Zelle eingebracht werden. Ein weißer Deckel aus Kunststoff (Polyoxymethylen) dient als Abdeckung. Drei Bohrungen ermöglichen die Verwendung einer Referenz-, einer Gegenelektrode, sowie eines Ein-/Auslasses zur Spülung des Elektrolyten mit Gasen. Als Genelektrode wird ein rostbeständiger Stahl (AISI 316L) verwendet. Die scheibenförmige Gegenelektrode (C-Form) ermöglicht einen besseren Stromfluss, als bei einer stabförmigen möglich wäre. Die Gegenelektrode wird durch eine schwarze Steckbuchse und die Referenzelektrode durch den blauen Stecker mit dem Potentiostaten verbunden. Der Abstand der Gegenelektrode und der Referenzelektrode wurde auf 1,5cm eingestellt, wie es in der Projektarbeit [4] vorgeschlagen wurde.

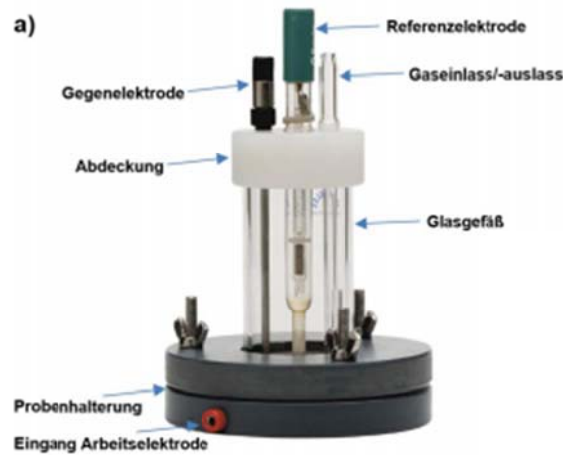


Abbildung 33 Flachzelle / Flat Cell [4]

### 3.2.2.3 Referenzelektrode

Es handelt sich hierbei um eine Silber-Silberchloridelektrode (Ag/AgCl), die mit 3M KCl gefüllt ist. Die Elektrode hat ein konstantes Potential (je nach eingestellter Temperatur) und kann in einem Temperaturbereich von 0°C bis 80°C verwendet werden. Bei 20°C beträgt die Potentialdifferenz zur Standardwasserstoffelektrode +210mV, bei 25°C 207mV (vgl. Abbildung 9 Seite 14 u. Abbildung 10 Seite 14). Durch Extrapolation kann die genaue Differenz bei der jeweilig verwendeten Temperatur einfach ermittelt werden.

### 3.2.2.4 pH-Meter

Der pH-Meter Thermo Scientific Orion 3-Star® kann durch Kalibrierlösungen in einem bestimmten Bereich eingestellt werden. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche wurde der pH-Meter zwischen 1,09 und 7,00 kalibriert, da der pH-Wert des Elektrolyten sich im stark sauren Bereich befindet.

### 3.2.3 PROBELÖSUNG

Da das Arbeiten mit ätzenden Chemikalien notwendig ist, müssen die Sicherheitsbestimmungen eingehalten werden. Die Prüflösung darf nur mit Handschuhen, Labormantel und Schutzbrille unter dem Abzug gehandhabt werden.

Die Probelösung aus Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) und Kaliumthiocyanat (KSCN) wird mit destilliertem Wasser hergestellt. Laut Norm kann die Mischung zwischen den Konzentrationen von 0,5M  $\text{H}_2\text{SO}_4$  bis 2,5M  $\text{H}_2\text{SO}_4$  und zwischen 0,001M KSCN bis 0,05M KSCN, je nach Werkstoff variieren. Die Konzentrationen der Prüflösung wurde in Kleinarbeit im Rahmen von [4] ermittelt und in der vorliegenden Arbeit die Lösung mit den gleichen Konzentrationen verwendet, um die Vergleichbarkeit zu gewähren. Die Konzentration der Prüflösung wurde somit als 2,2M  $\text{H}_2\text{SO}_4$  mit 0,019M KSCN festgelegt. Für jede Messung muss ein neuer Elektrolyt verwendet werden. Es wird immer 1l der Prüflösung auf einmal hergestellt, was für zehn Messungen reicht. Für 1l benötigt man 215,78g  $\text{H}_2\text{SO}_4$  und 1,85 KSCN, das in destilliertem Wasser gelöst wird.

### 3.2.4 PARAMETERFINDUNG

Es müssen Vorversuche mit einigen Proben unternommen werden, um die Parameter zu finden, mit denen die Messungen durchgeführt werden können. Somit werden einige Proben öfter geschliffen und poliert und mehrmals getestet. Es wurde versucht Parameter zu finden, die für beide Werkstoffe sowohl eine Passivierung als auch eine Reaktivierung ergeben. Bei der Parameterfindung wurde bei den bereits bekannten Parametern für die Proben RA aus 1.4404 begonnen und versucht, diese zu verfeinern.



Laut Norm [45] müssen folgende Parameter festgelegt werden, bevor die Messungen gestartet werden können. Das **freie Korrosionspotential**, der **Umkehrpunkt** des Potentials, das **Startpotential** und das **Steppotential**, das die Schrittweise Erhöhung des Potentials beschreibt. Ebenso die **Scanrate**, die bestimmt wie schnell das Potential erhöht wird. Einmal festgelegt, können sie für alle von mir durchgeführten Messungen verwendet werden.

Der **Widerstand** des Systems muss kompensiert werden, da sonst die Messung dadurch verfälscht werden kann. Dies wird mit dem Programm "i-interrupt" durchgeführt, der den Kompensationswert zwischen  $0,4\Omega$  und  $1\Omega$  festlegt. Dies ist ein Parameter, der von der Zellgeometrie und dem Elektrolyten mit genau dieser Zusammensetzung abhängig ist und wurde mit  $0,8\Omega$  fixiert, da dieser Wert im ermittelten Bereich liegt, und auch in den Versuchen mit den RA Proben verwendet wurde [4]

Das **Steppotential** wurde wie in [4] gewählt, d.h.  $0,15\text{mV}$ . Als **Umkehrpotential** wurde für beide Werkstoffe  $+535\text{mV}$ , bezogen auf  $3\text{M Ag/AgCl}$ , festgelegt. Dies liegt deutlich höher als in [4] festgelegt ( $235\text{mV}$ ) .

Das **freie Korrosionspotential** soll sich 1-2min einstellen können. Dies wurde durch das Programm "Chronopotentiometry" durchgeführt.

Das **Startpotential** bzw. Leerlaufpotential ist für jede Messung neu einzutragen. Dieses wurde um  $50\text{mV}$  erniedrigt und vom freien Korrosionspotential abgezogen, um im negativen Strombereich starten zu können und etwaige Oberflächenverunreinigungen zu beseitigen. Für die **Scanrate** gab es zwei Möglichkeiten, die in der Norm [45] vorgestellt wurden. Zum einen die etwas schnellere Scanrate von  $4,1667\text{mV/s}$  und jene die für  $1.4404$  in RA verwendet wurde ( $0,5556\text{mV/s}$ ). Die langsamere Geschwindigkeit wurde zuerst getestet, da sie eine Vergleichbarkeit mit den RA Proben bietet. Festgelegt wurde jedoch die schnellere Rate, da sich bei den langsameren Versuchen keine Reaktivierung gezeigt hat.

### 3.2.5 DURCHFÜHRUNG

Der Potentiostat wird in Betrieb genommen und das Bedienungsprogramm Nova 1.8<sup>®</sup> gestartet. Der Versuchsaufbau entspricht einem typischen Dreielektrodenaufbau mit der Probe als Arbeitselektrode, einer Gegen- und einer Referenzelektrode. Die Probe wird aus dem Exsikkator entnommen und dieser wieder evakuiert. Nach dem Reinigen der Probe mit Wasser und Ethanol wird die Probe in die Flach-Zelle gespannt und  $100\text{ml}$  der vorbereiteten Prüflösung in den Zylinder gefüllt. Der pH-Wert der Lösung wird mit dem kalibrierten pH-Meter gemessen und die Anfangstemperatur vermerkt. Die Elektroden werden in die Prüflösung getaucht und die Kontakte mit dem Potentiostaten verbunden. Erst jetzt wird die Zelle aktiviert und der Strom kann zwischen den Elektroden fließen. Zuerst wird das Programm "Chronopotentiometry" gestartet um das freie Korrosionspotential zu messen und die Stetigkeit des freien Korrosionspotentials zu bestätigen. Vom ermittelten Leerlaufpotential werden  $50\text{mV}$  abgezogen und in das Programm "Cyclicvoltametry", mit den oben ermittelten fixen Parametern (Widerstand und Umkehrpotential), als Startpotential eingetragen und das Programm gestartet. Damit wird nun das Stromdichte-Potential-Diagramm ermittelt und danach ausgewertet. Nach dem Versuch wird die Zelle deaktiviert und die Kontakte abgesteckt. Der pH-Wert und die Temperatur des Elektrolyten werden notiert. Danach wird der Elektrolyt entsorgt und die Probe aus der Halterung genommen. Die Probe muss nun wieder mit Wasser und Ethanol gespült werden. Sie wird bis zur weiteren Untersuchung im Exsikkator aufbewahrt.

Die metallographische Untersuchung dient der Identifikation des Korrosionsangriffes, d.h. zur Überprüfung auf Sensibilisierung (interkristalline Korrosion). Lochkorrosion würde die Ergebnisse beeinflussen. Auch müssen die mathematischen Ergebnisse der Auswertung auf

die Korngröße normiert werden, um die Ergebnisse zu normalisieren. Dies erfolgt durch das Auflegen von ISO-Gittern auf die Fotos zur Ermittlung der Korngröße nach [51].

### 3.2.6 AUSWERTUNG

Die Auswertung erfolgt nach ISO 12732 [45] und ISO 643 [51]. Zum einen werden die maximalen Peakströme der Passivierung ( $I_p$ ) und der Reaktivierung ( $I_r$ ) aus dem Stromdichte-Potential-Diagramm herausgelesen und zum anderen müssen die Ladungen der Passivierung und der Reaktivierung berechnet werden. Dies erfolgt durch die Ermittlung des Integrals Strom über der Zeit und entspricht der Fläche unter dem Peak. Das erhaltene Verhältnis gibt Auskunft über die Sensibilisierung und somit die Abreicherung von Legierungselementen.

Um die unterschiedlichen Korngrößen miteinzubeziehen werden die Verhältnisse auf die Korngröße normiert. Dies erfolgt nach Ermittlung der Kennzahl nach [51].

$$\left(\frac{I_r}{I_p}\right)_{GBA} = \frac{I_r}{I_p 10^{-3} \sqrt{2^{G+5}}}$$

$$\left(\frac{Q_r}{Q_p}\right)_{GBA} = \frac{Q_r}{Q_p 10^{-3} \sqrt{2^{G+5}}}$$

**Formel 1 Verhältnis der maximalen Ströme des Passivierungs- und Reaktivierungsloops normiert auf die Korngrenzenfläche**

**Formel 2 Verhältnis der maximalen Ladungen des Passivierungs- und Reaktivierungsloops normiert auf die Korngrenzenfläche**

- Q<sub>r</sub>.....Ladung für Reaktivierungsloop [C]
- Q<sub>p</sub>.....Ladung für Passivierungsloop [C]
- I<sub>r</sub>.....maximaler Strom für Reaktivierungsloop [ $\mu\text{A cm}^{-2}$ ]
- I<sub>p</sub>.....maximaler Strom für Passivierungsloop [ $\mu\text{A cm}^{-2}$ ]
- G.....Korngrößenzahl nach ISO 643
- GBA.....Korngrenzenfläche
- GBL.....Korngrenzenlänge

Wenn die Verhältnisse mit 100 multipliziert werden, erhält man die Ergebnisse in Prozent. Als zweite Möglichkeit könnte man auch die Korngrenzenlänge anstatt der Korngrenzenfläche zur Normalisierung verwenden. Die Formeln ändern sich nur geringfügig, so dass sich der Faktor im Nenner auf 10 erhöht.

$$\left(\frac{I_r}{I_p}\right)_{GBL} = \frac{I_r}{I_p 10 \sqrt{2^{G+5}}}$$

$$\left(\frac{Q_r}{Q_p}\right)_{GBL} = \frac{Q_r}{Q_p 10 \sqrt{2^{G+5}}}$$

**Formel 3 Verhältnis der maximalen Ströme des Passivierungs- und Reaktivierungsloops normiert auf die Korngrenzenlänge**

**Formel 4 Verhältnis der maximalen Ladungen des Passivierungs- und Reaktivierungsloops normiert auf die Korngrenzenlänge**

Als Auswertehilfe gibt es in der Norm [45] die Tabelle D.1 (Anhang D, Seite 112ff), die den Zusammenhang zwischen  $I_r/I_p$  und Sensibilisierungsgrad beschreibt, siehe Tabelle 2.

Tabelle 2 Zusammenhang zwischen  $I_R/I_P$  und Sensibilisierungsgrad [43]

Wert für $I_R/I_P$	Allgemeine Interpretation des Sensibilisierungsgrades
<0,010	Nicht sensibilisiert
0,01 to 0,05	Leicht sensibilisiert (kann die Tests nach Streicher, Strauss und Huey bestehen)
>0,05	Sensibilisiert (kann in den Tests nach Streicher, Strauss und Huey versagen)

In Abbildung 34 sind Werte für die Sensibilisierungsgrenze aus der Literatur zusammengefasst.

Quelle	Werkstoffe/Medien	Bewertungskriterien
Čihal-80	2 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Stähle mit 18 % Cr, 10 % Ni und 0,07–0,1 % C	$Q_R/Q_P$ bis 18 % - keine Sensibilisierung über 37 % - starke Sensibilisierung
Umemura-80	0,5 N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 0,01 M KSCN X5CrNi18-10, X2CrNi19-11	$i_R/i_P$ bis 1 % keine Sensibilisierung 1-10 % schwache Sensibilisierung >10 % starke Sensibilisierung
Majidi-84	0,5 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 0,01 M KSCN AISI 304	$I_R/I_P = f(\text{KSCN-Konzentration})$ z. B. für 0,01 M KSCN starker Angriff ab 0,11-0,12
Garz-90	0,5 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 0,01 M KSCN X12CrNi18-8, X8CrNiTi18-10	$Q_R/Q_P > 0,11$ Sensibilisierung
Kilian-97	0,5 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 0,01 M KSCN X5CrNi18-10, X6CrNiTi18-10, X6CrNiNb18-10	$I_R/I_P < 0,5$ % nicht sensibilisiert 0,5 bis 1 % schwach sensibilisiert > 1 % sensibilisiert
ISO-98	0,5-2,5 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 0,001-0,05 M KSCN X5CrNi18-10	$i_R/i_P < 0,01$ keine Sensibilisierung 0,01 - 0,05 schwache Sensibilisierung > 0,05 starke Sensibilisierung
ASTM-92	0,5 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 0,01 M KSCN X5CrNi18-10, X2CrNi19-11	normierte Ladung $P_s$

Abbildung 34 Zusammenfassung von Grenzwerten zur Sensibilisierung aus weiteren Literaturquellen [52]

Als Grenzwerte für die Sensibilisierung in dieser Arbeit wurden somit aus [4] für das Verhältnis  $I_R/I_P$  auf 0,019 und für das Verhältnis  $i_R/i_P$  auf 0,11 festgelegt.

### 3.3 ELEKTROCHEMISCHER LOCHKORROSIONSTEST

Dieser elektrochemische Versuch leitet sich aus [33] ab. Es beschreibt unter anderem die Ermittlung des Lochkorrosionspotentials durch einen potentiodynamischen Test.

Die Untersuchungen in dieser Arbeit wurden bei Raumtemperatur durchgeführt und der Elektrolyt wurde zum einen belüftet und zum anderen mit Stickstoff durchsetzt, um den Sauerstoffeinfluss auf den Korrosionsvorgang zu überprüfen. In der Projektarbeit [4] wurden die zu testenden Proben festgelegt. In [53] wurden bereits die Proben für die Grundwerkstoffe aus 1.4404 und 1.4112 in belüfteten und sauerstoffarmen Elektrolyten gemessen. Diese Messungen wurden von mir teilweise wiederholt und auch zusätzlich Messungen der Schweißzonen von LRS-Kettengliedern aus beiden Werkstoffen und RA-Kettengliedern aus 1.4404 durchgeführt.

Die Messung wurde in einem typischen Dreielektrodenaufbau durchgeführt, mit einer Referenzelektrode, der Gegenelektrode und der Probe, die als Arbeitselektrode dient. Die potentiodynamische Untersuchung dient dazu das Potential zu erhöhen, bis die Probe einen deutlichen Stromanstieg zeigt, der das Lochkorrosionspotential am Punkt des Anstieges darstellt (Abbildung 13, Seite 16). Ab diesem Potential findet eine messbare Schädigung der Passivschicht statt und Strom fließt zwischen den Fehlstellen der Passivschicht. In [33] wurde vorgeschlagen das Potential mit 10mV pro Minute zu erhöhen. Die Messung wurde unterbrochen, nachdem eine Stromdichte von  $0,05\text{A}/\text{cm}^2$  erreicht wurde, in [33] wird jedoch schon einen Abbruch bei  $0,05\text{mA}/\text{cm}^2$  vorgeschlagen.

#### 3.3.1 PROBEN UND PROBENVORBEREITUNG

Die Proben für den potentiodynamischen Test auf Lochkorrosion wurden für beide Werkstoffe - 1.4404 und 1.4112 - durchgeführt. Die Probengeometrie passt sich auf den Probenhalter an, der es ermöglicht eine Probenoberfläche von genau  $1\text{cm}^2$  zu testen.

Die Proben der Grundwerkstoffe aus 1.4404 und 1.4112 wurden für [53] von Firma Stübinger GmbH funkenerosiv hergestellt. In der folgenden Skizze sind die Entnahmestellen zu erkennen (Abbildung 35). Zuerst wurden Scheiben mit einer Stärke von 2mm erodiert und daraus zylindrische Proben entnommen. Diese hatten einen Durchmesser von 14mm und eine Dicke von 2mm.

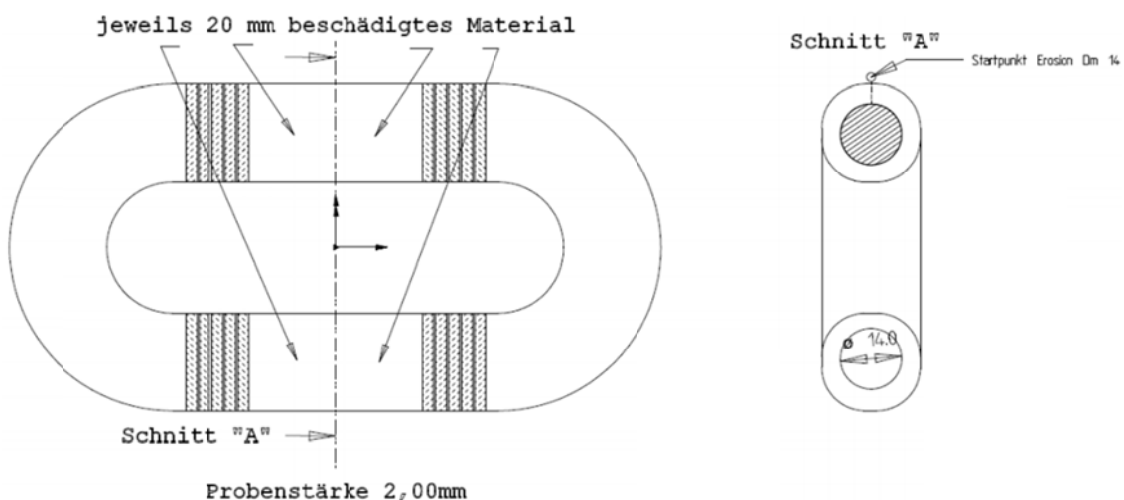


Abbildung 35 Skizze zu Auftrag Herstellung Materialproben Grundwerkstoff 1.4404 und 1.4112, runderodiert" (Mail 08.08.2013 Riedlecker)

Die Geometrie für die Proben aus den Schweißzonen für LRS- und RA-Kettenglieder sollte gleich sein wie die der Proben des Grundwerkstoffes, jedoch wurde bei der Fertigung der Durchmesser unabsichtlich verkleinert und somit die Probengeometrie verändert. Die Proben hatten nun einen Durchmesser von 11mm, und eine Dicke variierend von 2mm bis zu 11mm. Der ursprüngliche Probenhalter konnte nun nicht mehr verwendet werden.

Als Lösung für dieses Problem wurden an den Proben ein Draht angeschweißt und an den Flächen, die nicht korrodiert werden sollten wurden mit Nagellack bestrichen. Diese Probenform konnte nun in den Probenhalter (Zweezer) eingeführt werden, Abbildung 36.



**Abbildung 36 Proben für Lochkorrosionstest 1.4404 Schweißzonen mit angeschweißtem Draht; links: Prüffläche; rechts: Rückseite mit Lack beschichtet**

Die Proben für die Schweißzonen der LRS-Kettenglieder aus beiden Werkstoffen wurden von Firma Stübinger mittels Funkenerosion hergestellt. Die Proben wurden in den gleichen Schritten wie die Proben der Grundwerkstoffe gefertigt. Es wurden Scheiben mit einer Stärke von 2mm aus den Kettengliedern gefertigt und daraus zylindrische Proben mit einem Durchmesser von 11mm runderodiert. Die Positionen der Proben wurden in Kapitel 3.1.3.1 (Seite 26) beschrieben.

Als Übersicht findet man in Abbildung 37 die Bezeichnung und die Anzahl der geprüften Proben. Die Probenbezeichnungen ergeben sich aus den Kettengliedern, aus denen sie gefertigt wurden. Hierbei bedeutet eine nachgesetzte „2“ die zweite Schweißnaht bei LRS-Proben - z.B. LRS N SN 3-2, ist die zweite Schweißnaht auf dem Kettenglied 3, da bei LRS-Proben zwei Schweißnähte pro Kettenglied zur Verfügung stehen.

Die Proben wurden vor dem Versuch geschliffen und poliert, bis eine Oberfläche  $R_a$  von  $0,25\mu\text{m}$  erreicht wurde. Danach mit Ethanol im Ultraschallbad gereinigt und im Exsikkator verwahrt. Die Probe wurde im Exsikkator zur Punktschweißmaschine transportiert und der o.g. Draht angeschweißt. Der nächste Schritt war das Lackieren der Flächen, die nicht angegriffen werden sollten. Diese Flächen beinhalteten auch den Draht, der sich im Elektrolyten befindet. Nach dem Trocknungsprozess wird die Versuchsoberfläche gereinigt und wieder im Exsikkator gelagert.

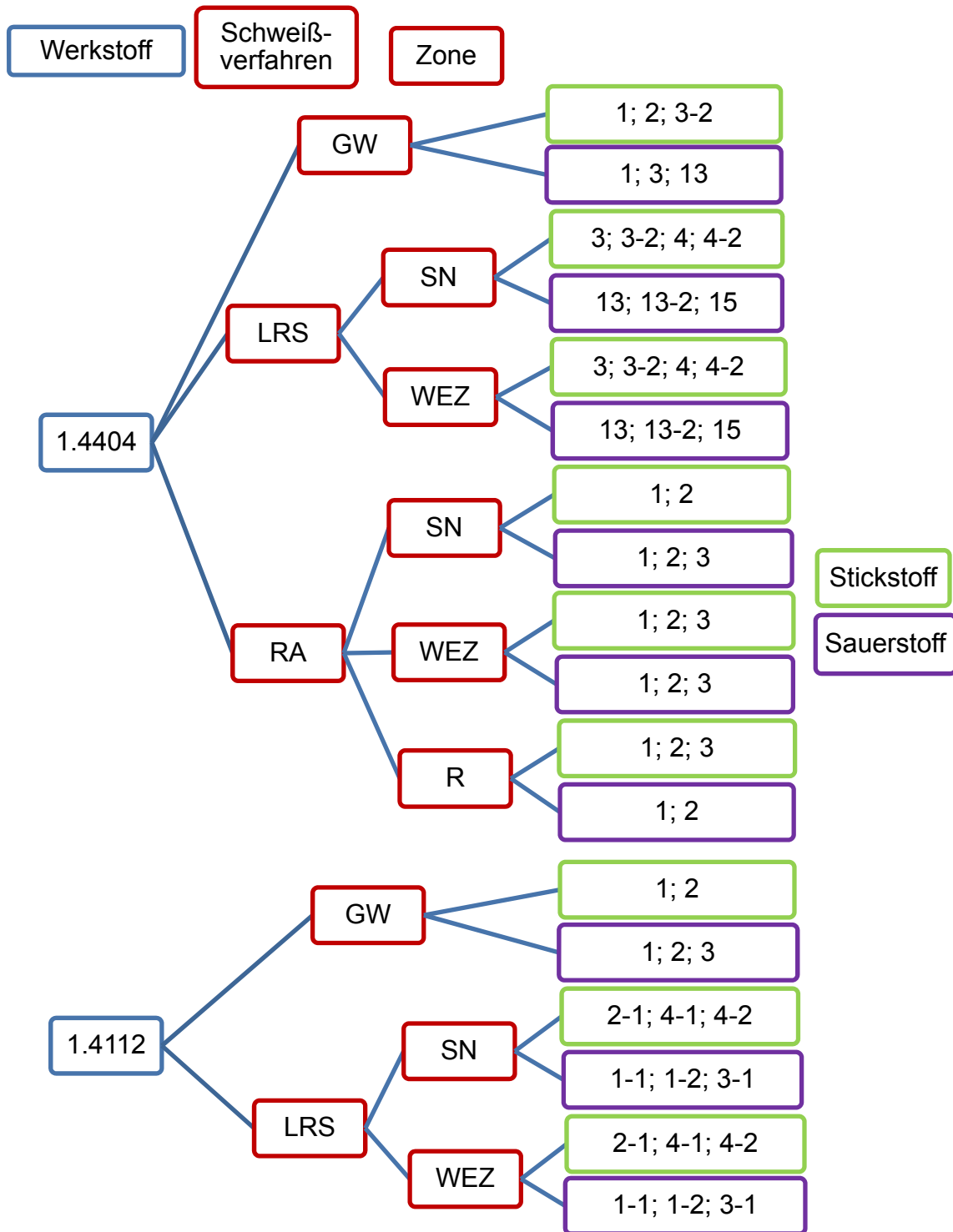


Abbildung 37 Probenübersicht der durchgeführten elektrochemischen LK-Tests

### 3.3.2 VERSUCHSAUFBAU

Auch hier wird wieder der Potentiostat/Galvanostat/PGSTAT128N verwendet, sowie die selbe Referenzelektrode und der pH-Meter. Letzterer wird nun auf einen Bereich zwischen pH 7 und pH 12 kalibriert, da der pH-Wert der Elektrolytlösung in diesem Bereich liegen soll. Verwendet wird bei diesem Versuch eine 1l Elektrolysezelle, deren Aufbau in Abbildung 38 zu sehen ist. Die Gegenelektrode ist in diesem Falle eine zylindrische Stabelektrode mit einem Durchmesser von 2mm aus 316L rostbeständigem Stahl. Die Gaseinleitung erfolgte über eine Gasfritte, um das Gas fein durch den Elektrolyten perlen zu lassen.

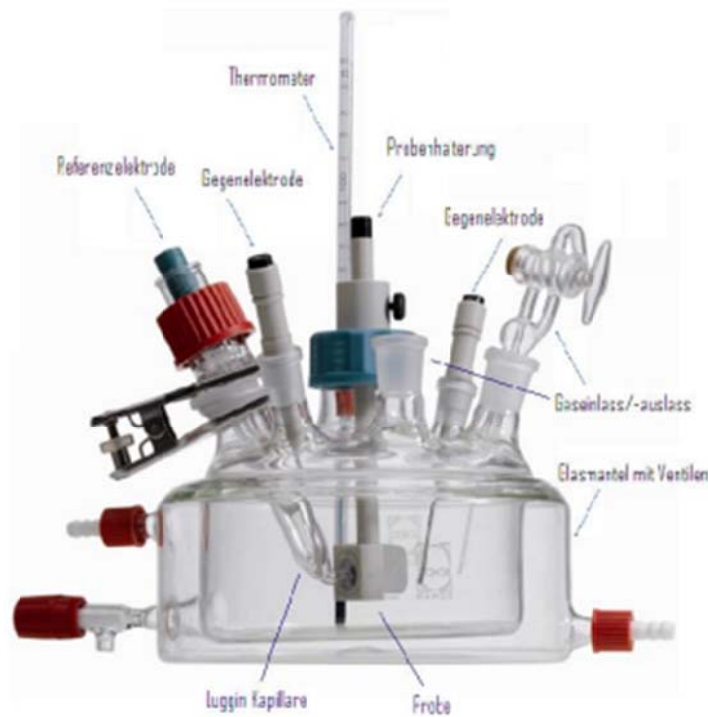


Abbildung 38 Überblick über die Aufbaumöglichkeiten der 1l-Zelle [4]

### 3.3.3 PROBELÖSUNG

Bei der Probelösung handelt es sich um 1M NaCl Lösung. Es wurden 58,5g NaCl in 1l deionisiertem Wasser gelöst. Die Probelösung wurde entweder mit Sauerstoff belüftet oder mit Stickstoff der Sauerstoff ausgetrieben. Um die Gase einzuleiten wurde eine Gasfritte verwendet.

Die Dauer der Gasspülung wurde in [53] auf 20min festgelegt. Nach Rücksprache mit Prof. Gollas ICTM TU Graz wurde die Dauer der Gasspülung verdoppelt, da dieses große Volumen ungefähr erst nach 30min Gaseinleitung mit rund 2,5bar annähernd gesättigt wird.

### 3.3.4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Für diesen Versuch wird zuerst die Probelösung hergestellt, da für jeden Versuch eine neue Lösung verwendet werden soll. 1l der Elektrolytlösung wurde in die Zelle gefüllt und für 40min mit Sauerstoff oder Stickstoff durchströmt. Danach wurde der Potentiostat in Betrieb genommen und die Bedienungssoftware Nova 1.8<sup>®</sup> gestartet. Der pH-Wert und die Temperatur der Elektrolytlösung wurden nun aufgezeichnet. Die Probe wurde aus dem Exsikkator entnommen und gereinigt, bevor sie im Probenhalter befestigt wurde. Die Referenzelektrode wird nun in die Zelle eingeführt. Sie befindet sich in einer sogenannten Lugginkapillare, die das abnehmen der Elektronen genauer ermöglichen soll. Auch die

Gegenelektrode wird nun mit der Probe eingeführt und alle drei Elektroden mit dem Potentiostat verbunden. Jetzt erst wird die Zelle in Betrieb genommen und aktiviert. Im Bedienungsprogramm Nova 1.8 kann nun das Programm "I gegen E mit OCP" gestartet werden, wobei als OCP das freie Korrosionspotential der Zelle ermittelt wird und für die Messung als Startwert um noch einmal 50mV erniedrigt wird. Danach erfolgt die Messung des Stromes bei steigendem Potential bis der Strom einen Grenzwert von  $0,05\text{A}/\text{cm}^2$  übersteigt. Für die GW-Proben mit einem Durchmesser von 14mm und somit einer größeren Probenoberfläche wird die Messung bei  $0,75\text{A}/\text{cm}^2$  abgebrochen. Nach der Messung wird die Zelle deaktiviert und wieder der pH-Wert und die Temperatur gemessen. Die Probe wird aus dem System entfernt und mit Wasser und Ethanol gereinigt. Anschließend wird die Probe im Exsikkator bis zu weiteren Untersuchungen gelagert.

### 3.3.5 AUSWERTUNG

Die Daten werden aus dem Programm Nova 1.8 exportiert und in OriginPro 9.0 importiert, um das Lochkorrosionspotential zu ermitteln. Die Potentiale und auch die dazugehörige Stromdichte werden untereinander verglichen, betreffend Werkstoff, Schweißzone und des eingeströmten Gasen in den Elektrolyten. Zum Vergleich dienen auch die Ergebnisse der Bakkarbeit [53].

Das freie Korrosionspotential gibt schon den ersten Aufschluss über die Korrosionsbeständigkeit der Probe in dieser Prüflösung. Je edler das Potential, desto Korrosionsbeständiger ist die Probe. Ein weiteres Kriterium ist die Ermittlung der Differenz zwischen dem freien Korrosionspotential und dem Lochkorrosionspotential

Auch die Form der Kurve lässt eine Aussage über die Korrosionsart [54] zu. Wenn der Kurvenverlauf nach dem Korrosionspotential steil ist, kann Lochkorrosion vermutet werden, bei abgeflachten Kurven wird Spaltkorrosion vermutet. Um die Korrosionsart zu überprüfen wurden die Proben zuerst makroskopisch untersucht und danach Querschliffe der Probe angefertigt und mikroskopisch untersucht. Die Proben werden dafür auf einen Oberflächenrauhigkeitswert  $R_a$  von  $1\mu\text{m}$  gebracht und wenn nötig geätzt. Proben aus 1.4112 werden mit Nital 3% geätzt und Proben aus 1.4404 mit dem Ätzmittel V2R.



### 3.4 STREICHER-TEST

Nach der Norm ASTM 262\_13 [55] werden nur austenitische Werkstoffe auf ihre Sensibilisierung durch interkristalline Korrosion untersucht, da diese Untersuchungsmethode nicht auf martensitische Werkstoffe anwendbar ist. Laut Norm werden die Proben, die eine definierte Oberfläche besitzen, 120 Stunden in wässriger Schwefelsäurelösung gekocht, um die Probe zu sensibilisieren. In der Projektarbeit [4] wurde der Versuch bereits durchgeführt, jedoch wurden die Proben nur für 24 Stunden in die Prüflösung eingelegt. Die Ergebnisse dieser Versuche fließen in die Auswertung mit ein.

#### 3.4.1 PROBEN UND PROBENVORBEREITUNG

Die Anzahl und die Geometrie der Proben wurden im Rahmen von [4] festgelegt und von mir übernommen. Jeweils zwei Proben wurden dem Werkstoff 1.4404 aus Grundwerkstoff (GW) und aus den Fügezonen des Abbrennstumpfgeschweißten (RA) und des linear reibgeschweißten (LRS) Kettengliedes entnommen. Die Geometrie der Proben entspricht ungefähr einem Würfel mit 1cm<sup>2</sup> Seitenlänge und somit einer ungefähren Oberfläche von 6cm<sup>2</sup>.

In Anhang A – Allgemeines (Seite 95ff) sind Proben für den Streicher Test und chemischen Lochkorrosionstest Methode A abgebildet. Weitere Proben wurden durch Drahterosion von Stübinger GmbH angefertigt. Auch wird die Probenentnahme und Probengeometrie aus den RA-Kettengliedern dargestellt.

Nach der Probenfertigung wurden die einzelnen Proben auf die tatsächlichen Maße überprüft. Aus der folgenden Tabelle 3 sind die Bezeichnungen und die Maße der einzelnen Proben und die daraus berechnete Oberfläche zu entnehmen.

**Tabelle 3 Abmaße der Proben für den Streicher Test und die daraus berechnete Oberfläche**

Probenbezeichnung	GW		LRS		RA	
	A	B	A	B	A	B
l [cm]	1,00	1,00	1,01	1,00	1,00	1,00
b [cm]	1,01	1,00	1,00	1,00	1,04	1,00
h [cm]	1,00	1,01	1,00	1,00	1,09	0,99
Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	6,04	6,04	6,04	6,00	6,53	5,96

Um den Versuch normgerecht durchführen zu können, wurde die Oberfläche auf einen mittleren Rauigkeitswert R<sub>a</sub> von 100µm Oberflächenrauigkeit gebracht. Dazu werden die würfelförmigen Proben mit einem 120er Schleifpapier (Siebmaschen je Zoll) bearbeitet. Um eventuelle Verunreinigungen zu vermeiden werden die Proben im Ultraschallbad gereinigt, getrocknet und im Exsikkator bis zur Versuchsdurchführung aufbewahrt. Vor Versuchsbeginn wurden die Proben gewogen und das Gewicht notiert, Tabelle 4.

**Tabelle 4 Masse der Proben vor dem Streicher Test**

Probenbezeichnung	GW		LRS		RA	
	A	B	A	B	A	B
Masse [g]	8,028	7,933	7,980	7,977	9,051	7,848

Laut Norm ist es zulässig bis zu drei Proben in einem Erlenmeyerkolben gleichzeitig zu testen. Es stehen drei 1l Erlenmeyerkolben zur Verfügung, somit werden je zwei Proben in einem Kolben getestet.

### 3.4.2 VERSUCHSAUFBAU

Auf einen 1l Erlenmeyer Kolben wird ein Kugelkühler aufgesetzt. Die Kühlung erfolgt mit Hilfe einer Umwälzpumpe. Um einen Siedeverzug zu vermeiden, werden Siedesteinchen zugegeben. In die Prüflösung werden Borsilikatschiffchen (Abbildung 39) gelegt, in denen sich die Probe befindet. Die Größe der Schiffchen ist unterschiedlich, wodurch man die Proben unterscheiden kann. Der gesamte Aufbau der Glasapparatur befindet sich auf einer Heizplatte, um die Prüflösung zum Sieden zu bringen.



Abbildung 39 Borsilikatschiffchen als Probenhalter

### 3.4.3 PROBELÖSUNG

Hier wird die Herstellung der Probenlösung laut Norm [55] für einen Kolben beschrieben. Für die Lösung wurden 500ml an deionisierten Wasser im 1l Erlenmeyerkolben vorgelegt, danach 236ml 95-98%ige Schwefelsäure langsam unter Rühren zugegeben. Anschließend werden 25g 98%iges Eisensulfat zur Lösung zugegeben. Die leicht gelbliche Lösung ist trüb, wie in Abbildung 40 zu sehen ist. Nach dem Aufkochen und dem Auflösen des Eisensulfats wird die Lösung klar (Abbildung 41).



Abbildung 40 Streicher Test - Erlenmeyerkolben mit trüber Prüflösung (Eisensulfat noch nicht gelöst)

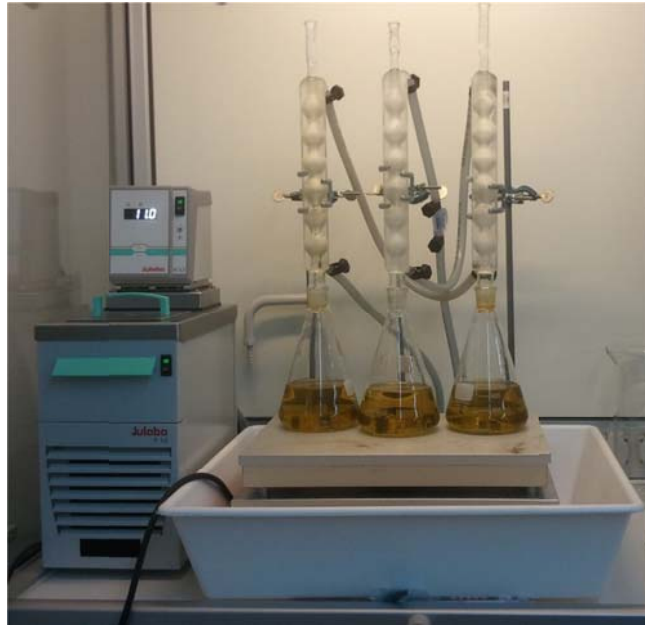


Abbildung 41 Streicher Test - Versuchsaufbau (Heizplatte, Erlenmeyerkolben, Kugelkühler, Umwälzpumpe)

#### 3.4.4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Zur Probelösung im Erlenmeyerkolben wurden Siedesteinchen zugegeben. Nach dem Aufsetzen und Aktivieren des Kühlers wird die Probelösung zum Sieden gebracht, bis sich das gesamte Eisensulfat aufgelöst hat. Danach kommt der Probenhalter mit der Probe in die Lösung. Der Flüssigkeitslevel wird markiert, um den eventuellen Verlust durch Verdampfung und somit die Verfälschung des Korrosionsergebnisses zu dokumentieren. Da das Korrosionsmedium verdampfen und aus dem System entfliehen würde, wäre die Konzentration der Korrosionsflüssigkeit nicht mehr eindeutig bestimmbar.

Sollte sich die Lösung während des Versuchs grünlich verfärben, muss mehr Eisensulfat zugegeben werden. Bei einer sehr starken Reaktion verfärbt sich die Probelösung dunkelgrün und ist stark wallend und erwärmt sich.

Sobald die Probe in der Flüssigkeit ist, wird sie für 120h darin belassen. Die Zwischenwägungen in Zeiträumen von 24h werden zur Kontrolle des Gewichtsverlaufes durchgeführt. Nachdem die Proben nach 120h wieder aus der Probelösung entfernt worden sind, wurden sie mit Wasser, Ethanol und im Ultraschallbad gereinigt.

#### 3.4.5 AUSWERTUNG

Nach der Reinigung wurden die Proben gewogen, sowie makro- und mikroskopisch untersucht. Aus dem Massenverlust kann die Korrosionsrate bestimmt werden, die Aufschluss zur Beurteilung der Sensibilisierung auf IK gibt.

### 3.5 CHEMISCHER TEST AUF LOCH- UND SPALTKORROSION (METHODE A UND B)

Bei dieser Untersuchungsmethode werden die Werkstoffe 1.4404 und 1.4112 auf Loch und Spaltkorrosion an den Fügezonen und dem Grundwerkstoff untersucht. Wieder werden Kettenglieder, die mit LRS und RA gefügt wurden, verwendet.

In der Norm G48 [56] werden mehrere Methoden vorgeschlagen, um die Loch- und Spaltkorrosion bei rostbeständigen Stählen zu untersuchen. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden die Methoden A und B verwendet, um den Loch- bzw. Spaltkorrosionsangriff mit Hilfe einer oxidierenden Chloridlösung zu untersuchen, wie es in [4] vorgeschlagen wurde.

Die Proben wurden bei Raumtemperatur für 72h in die Prüflösung eingelegt und laut Norm ist eine Temperaturschwankung um 22°C von ±2°C bei Methode A und B erlaubt.

#### 3.5.1 METHODE A: EISENCHLORID LOCHKORROSIONSTEST

Methode A - wie auch Methode B - wurden entwickelt, um die Anfälligkeit für Lochkorrosion an Stählen vom Typ AISI 304 bei Raumtemperatur zu untersuchen. Man kann diese Methoden jedoch auch für andere Stähle verwenden.

Bei dieser Methode werden die Proben - wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben - auch von Borsilikatschiffchen gehalten und somit die einzelnen Proben unterschieden. Ausgewertet werden die Anzahl der Löcher, die Lochdichte, die Lochtiefe und die Durchmesser.

#### 3.5.2 METHODE B: EISENCHLORID SPALTKORROSIONSTEST

Die Proben unterscheiden sich in ihrer Geometrie zu den Proben in Methode A. Bei Methode B werden Kunststoffnoppen mit Gummiringen auf der Probenmitte befestigt, um Spaltkorrosion zu provozieren. Es wird je eine Kunststoffnoppe auf einer Seite der Probe befestigt. Die Auswertung erfolgt hinsichtlich Überprüfung, ob Spaltkorrosion und ob auch Lochkorrosion auf den Flächen auftreten.

#### 3.5.3 PROBEN UND PROBENVORBEREITUNG

##### 3.5.3.1 Methode A: Eisenchlorid Lochkorrosionstest

Bei der Probengeometrie handelt es sich um dieselbe wie beim Streicher Test. Wir haben somit würfelige Proben mit einer Seitenlänge von ungefähr 1cm, d.h. ca. 6 cm<sup>2</sup> Oberfläche. Die Proben wurden zusammen mit den Streicher Test Proben gefertigt. Für jeden Werkstoff werden jeweils drei Proben den Schweißzonen und den Grundwerkstoffen gefertigt. Somit werden in diesem Versuch 15 Proben untersucht, die in Abbildung 42 mit ihrem Anfangsgewicht aufgelistet sind.

Die Probenbezeichnungen entsprechen wiederum den ursprünglichen Bezeichnungen der Kettenglieder.

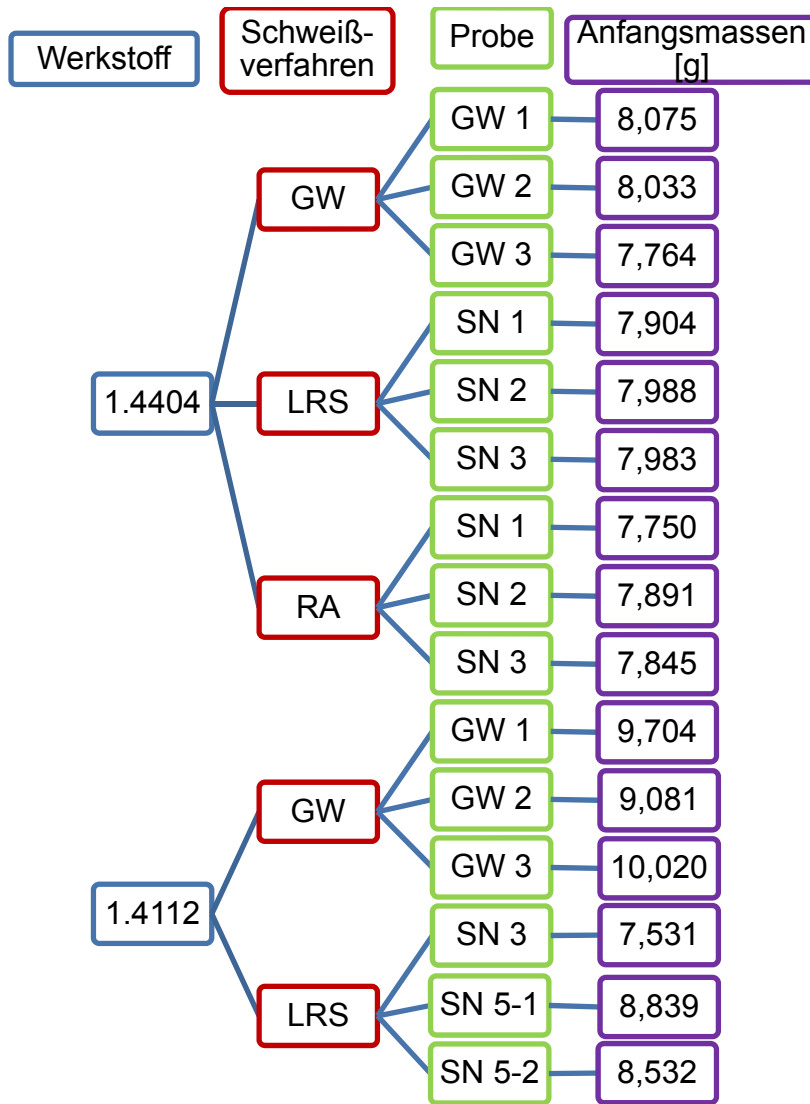


Abbildung 42 Probenübersicht und Anfangsgewicht für chemischen LK-Test Methode A

Die Proben mit Schweißnähten wurden so gefertigt, dass diese sich in der Mitte befinden und sich über vier der sechs Seitenflächen erstrecken.

Nach der Probenfertigung wurden diese auf eine Körnung von mindestens 120 (Siebmaschen je Zoll), laut Norm [55], geschliffen. Nach Abschluss der Probenvorbereitung wurden die Proben noch mit Wasser und Ethanol gereinigt.

### 3.5.3.2 Methode B: Eisenchlorid Spaltkorrosionstest

Die Probengeometrie unterscheidet sich zu Methode A dahingehend, dass es sich um rechteckige Proben mit den Maßen 40x14x4mm<sup>3</sup> handelt. Bilder zur Probenentnahme sind aus Anhang A – Allgemeines (Seite 95) zu entnehmen. Eine Probe mit markierter Schweißnaht ist in Abbildung 43 dargestellt.

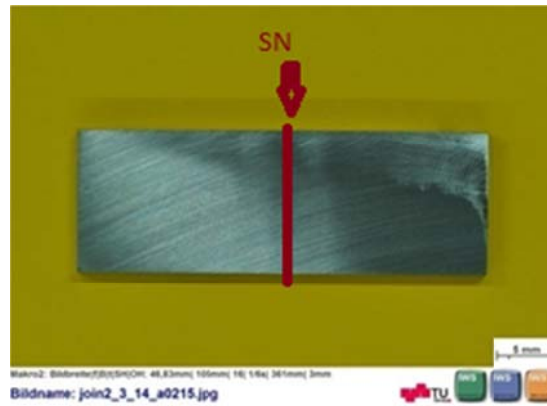


Abbildung 43 Probengeometrie chemische Lochkorrosion Methode B

Die Probenbezeichnungen, sowie die Anfangsmassen, sind in Abbildung 44 beschrieben. Auch hier werden die Probenflächen wieder mit Schleifpapier der Körnung von mindestens 120 vorbereitet, sowie mit Wasser und Ethanol gereinigt.

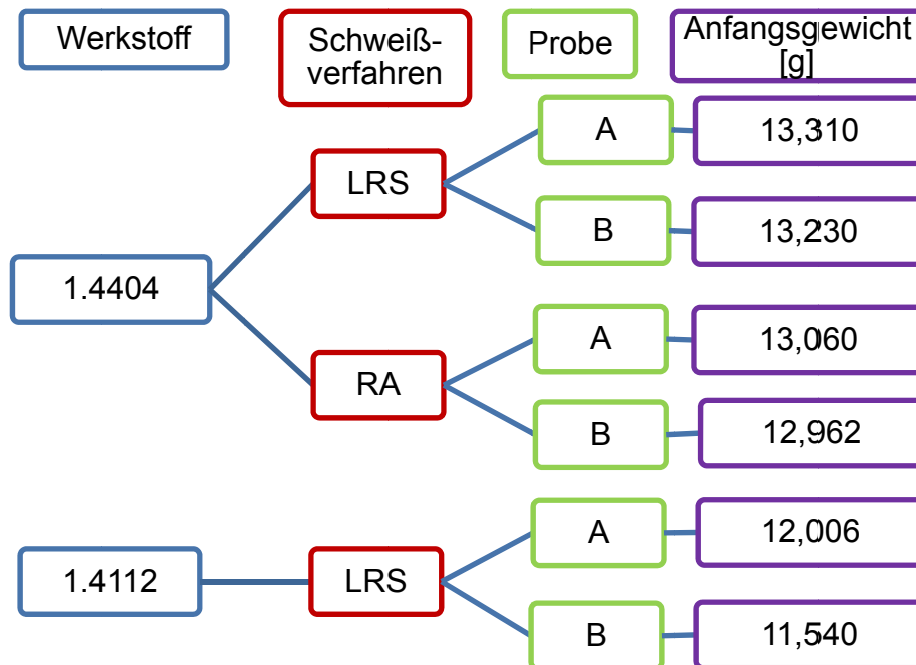
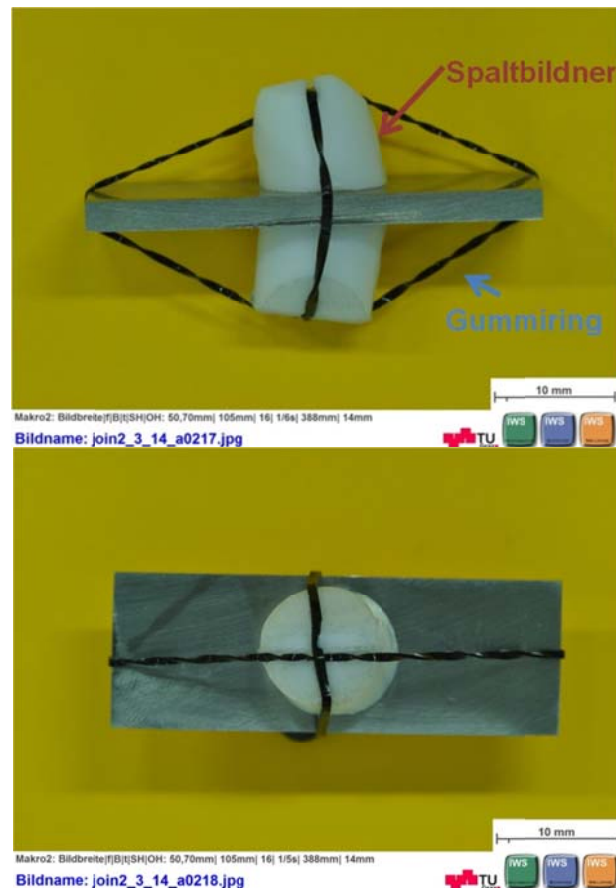


Abbildung 44 Probenbezeichnungen und Anfangsmassen für chemische-LK Methode B

Laut Norm müssen jetzt noch so genannte Spaltbildner mit Gummibändern auf der Probe befestigt werden, siehe Abbildung 45. Die Spaltbildner müssen laut Norm zylindrisch und aus TFE-Kunststoff gefertigt sein. Der Durchmesser des TFE-Zylinders beträgt ungefähr 12,7 mm und auch die Höhe 12,7mm. Diese Spaltbildner wurden aus TFE-Stopfen gefertigt, indem der zylindrische Schaft des Stopfens zerschnitten wurde. Die Maße laut Norm wurden eingehalten. Auch wurde die obere Seite des Zylinders abgeschrägt und ein Kreuz eingraviert, damit die Gummiringe, die zur Befestigung auf der Probe dienen, nicht abrutschen können.



**Abbildung 45 Probenaufbau chemischer Lochkorrosionstest Methode B;  
 oben: Seitenansicht; unten: Draufsicht**

### 3.5.4 VERSUCHSAUFBAU

Der Versuchsaufbau für diesen chemischen Test ist sehr einfach. Die Proben werden in einem Becherglas für 72h bei Raumtemperatur der Prüflösung ausgesetzt.

#### 3.5.4.1 Methode A: Eisenchlorid Lochkorrosionstest

Die würfelförmigen Proben werden, wie oben beschrieben, in unterschiedlich große Borsilikatschiffchen gelegt. Jeweils drei Proben werden in ein Becherglas gegeben. Um eine einheitliche Prüfung für jede Zone zu gewährleisten, werden die drei Proben einer Zone in ein Becherglas gelegt.

#### 3.5.4.2 Methode B: Eisenchlorid Spaltkorrosionstest

Da es hier nur sechs Proben gibt, werden drei Bechergläser für diesen Versuch verwendet, d.h. jeweils zwei Proben der gleichen Zone werden in einem Becherglas geprüft. Die Proben mit der Bezeichnung A werden durch zwei Gummiringe auf der Längsseite von Probe B unterschieden, Abbildung 46.



**Abbildung 46 Versuchsaufbau chemischer Lochkorrosionstest - Methode B in Becherglas bei Raumtemperatur (Beispielbild)**

### 3.5.5 PRÜFLÖSUNG

Die Prüflösung ist für Methode A und B dieselbe. Laut Norm sollen 100g  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (schwarzes hygroscopisches Pulver) in 900ml  $\text{H}_2\text{O}$  gelöst werden. Dies würde ungefähr 1l einer 6%igen  $\text{FeCl}_3$ -Lösung ergeben. Es war jedoch nur  $\text{FeCl}_3$  ohne Kristallwasser vorhanden, somit mussten die Einsatzmengen umgerechnet werden. Es wurden 60g an  $\text{FeCl}_3$  in 940ml deionisiertem Wasser aufgelöst.

Wir verwenden insgesamt acht Bechergläser, die mit 600ml der 6%igen  $\text{FeCl}_3$ -Lösung gefüllt werden. In diese 600ml an Prüflösung können mehrere Proben eingelegt werden, da laut Norm nur gewährleistet sein muss, dass mindestens 5ml pro  $\text{cm}^2$  an Probenoberfläche an Prüflösung vorhanden sind. Die Lösung ist mittelbraun und während des Auflösungsprozesses entsteht Reaktionswärme.

### 3.5.6 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die jeweiligen Proben von Methode A und B werden noch einmal mit Wasser und Ethanol gereinigt, die Anfangsmasse der Proben sowie die Temperatur der Lösung überprüft. Die Proben werden anschließend in die jeweiligen Behälter gelegt. Alle 24h wird die Temperatur der Proben überprüft. Nachdem die Prüfdauer von 72h eingehalten wurde, werden die Proben vom Korrosionsprodukt befreit, mit Wasser und Ethanol gereinigt und anschließend ein letztes Mal gewogen.

### 3.5.7 AUSWERTUNG

Laut Norm [55] soll der Massenverlust berechnet werden, der ein Maß für den Angriff des Werkstoffes ist. Auch soll die maximale und mittlere Lochtiefe sowie die Lochdichte für die Methode A und die Spalttiefe für Methode B ermittelt werden. Als Hilfe zur Auswertung wird die Norm ASTM G 46 herangezogen.



### 3.6 MAKROSKOPISCHE UND MIKROSKOPISCHE UNTERSUCHUNGEN

Um die makroskopischen Untersuchungen durchzuführen, wurde das Makro-Stativ in der IWS Lehrmetallographie verwendet. Auch das Stereomikroskop wurde zur Auswertung der chemischen LK-Tests verwendet.

Für die mikroskopische Untersuchung wurden Querschliffe der Proben angefertigt. Die Proben wurden im Dura-Fast Einbettmittel eingebettet und mit SiC-Schleifpapier mit Körnungen von 320 bis 4000 geschliffen und anschließend mit Diamantpaste auf 3µm und 1µm poliert. Zum Schleifen wurde für den Werkstoff 1.4404 eine Kraft von 30N verwendet und die Dauer zwischen drei und fünf Minuten variiert. Für den Werkstoff 1.4112, wurde die Kraft auf 40N erhöht, die Dauer jedoch gleich belassen. Für die Polierschritte wurden für 1.4404 eine Kraft von 60N bzw. 80N verwendet und 10min poliert. Der Werkstoff wurde zwischen 100N und 120N bei gleicher Dauer poliert. Zwischen den Schleif- und Polierschritten wurden die Proben immer mit Wasser gespült und mit Ethanol gereinigt. Die Proben wurden anschließend im Lichtmikroskop Zeiss Observer Z1m untersucht, Bilder mit Zeiss AxioCam MRc5 angefertigt und mit Hilfe des Programmes AXIO VISION 4.8.2 64Bit abgespeichert.

Zur Untersuchung der Mikrostruktur wurden zwei unterschiedliche Poliermittel verwendet. Für den Werkstoff 1.4404 wurde das Poliermittel V2A verwendet und für den Werkstoff 1.4112 3%iges Nital. Beide Ätzmittel zählen zu den Mikroätzmitteln und sind für hochlegierte Stähle geeignet. In der folgenden Tabelle 5 sind die Grundzusammensetzungen der Poliermittel verzeichnet. Die Proben wurden im frischpolierten Zustand für 15s in das Ätzmittel getaucht, anschließend mit Wasser gespült und mit Ethanol gereinigt. Wenn die Ätzung noch nicht vollständig war, wurden diese Schritte ab dem Eintauchen wiederholt.

**Tabelle 5 Zusammensetzung Poliermittel**

Ätzmittel	Zusammensetzung
Nital 3%	100ml Ethanol 3ml Salpetersäure 65%ig
V2A	200ml dest. Wasser 200ml Salzsäure 32%ig 20ml Salpetersäure 65%ig 0,6ml Vogel'sche Sparbeize
Adler	25ml dest. Wasser 50ml Salzsäure 32%ig 15g Eisen(III)-Chlorid 3g Diammoniumtetrachlorocuprat(II)

Um die SN auf Proben der chemischen Testmethoden zu lokalisieren, wurde Adler-Beize (Tabelle 5) verwendet. Sie ist geeignet für Makro- und Mikroätzungen. Die Ätzung wurde als Wischätzung durchgeführt und solange wiederholt, bis das gewünschte Ergebnis sichtbar war.

## 4 ERGEBNISSE

### 4.1 DL-EPR TEST

#### 4.1.1 GÜLTIGE PROBEN

Es wurden die Messungen an 24 Proben durchgeführt, jedoch hat die Messung nicht an allen Proben Ergebnisse hervorgebracht. Viele Messungen mussten nach erneutem Schleifen und Polieren wiederholt werden. Als Beispiel für eine Fehlmessung an einer Probe aus dem Werkstoff 1.4112 ist in Abbildung 47 zu sehen. Die Stromdichte-Potential-Kurve ist ein direkter Ausschnitt aus dem Auswertungsprogramm Nova 1.8®.

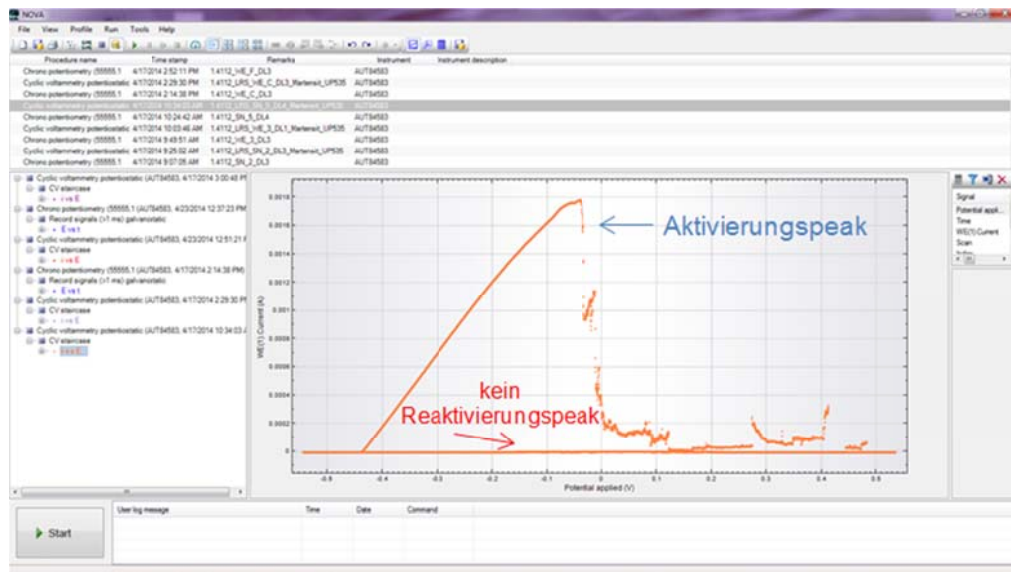


Abbildung 47 DL-EPR Test 1.4112 SN- Fehlmessung in Nova 1.8® angezeigt (Screenshot)

Abbildung 47 zeigt eine un stetige Passivierungskurve und keine Reaktivierung. Einige Proben zeigten auch nach mehrmaligem Schleifen und Polieren keine gültigen Messergebnisse und mussten verworfen werden.

Die Proben aus 1.4404 zeigten bei den unterschiedlichen Parametern fast immer gleiche Kurven mit einer klar erkennbaren Passivierungskurve, jedoch keinen direkt erkennbaren Reaktivierungspik. Bei einer logarithmischen Darstellung der Kurven, konnte bei den meisten Proben eine Reaktivierung festgestellt werden (Abbildung 48).

Auch bei diesem Werkstoff konnten nicht alle Proben in die Wertung miteinbezogen werden, da hier die Proben auch nach mehrmaligem Schleifen und Polieren keine auswertbaren Kurven zeigten, oder auch die Probenstücke aus dem Einbettmittel ausbrach und somit die Messungen verfälschten.

Somit sind für die Werkstoffe 1.4112 und 1.4404 folgende Proben zulässig und auszuwerten (Abbildung 49). Die RA-Proben wurden bereits in [4] vermessen und hier werden nur die Ergebnisse in der Auswertung miteinbezogen.

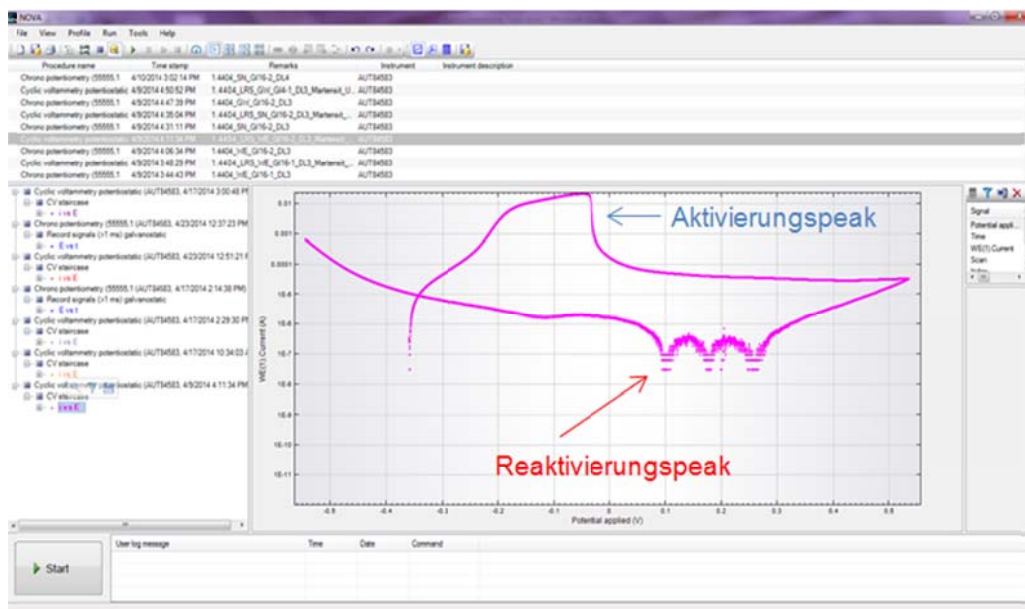


Abbildung 48 DL-EPR Test 1.4404 WEZ 16-2 - Reaktivierungspeak in logarithmischer Darstellung erkennbar (Nova 1.8® screenshot)

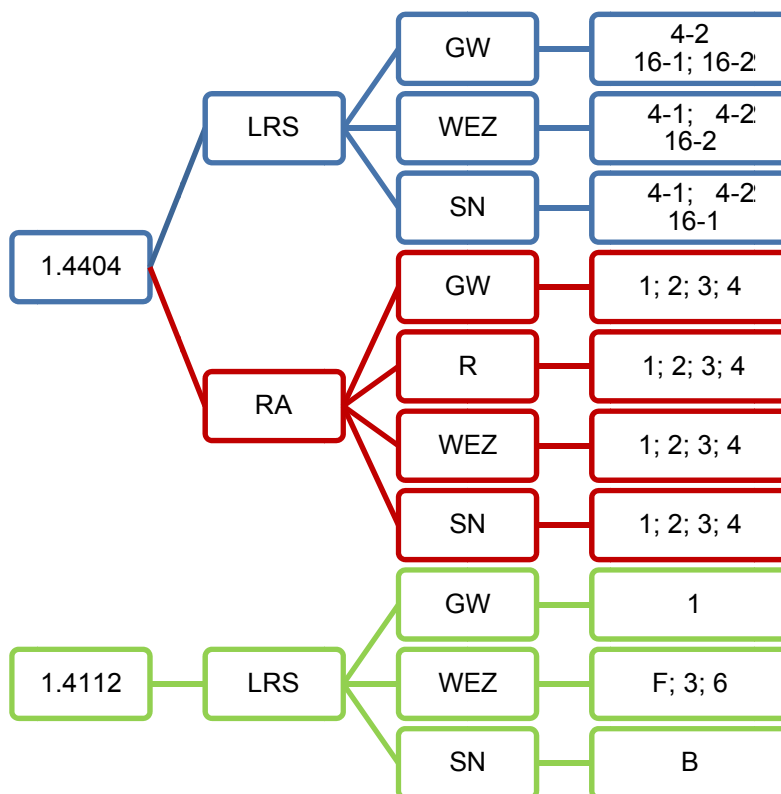


Abbildung 49 DL-EPR Test Probenübersicht der auswertbaren Proben

Nach dem Beenden der Messungen wurden von uns Proben für 1.4112 nachgefertigt, um auf eine vergleichbare Probenanzahl wie bei Werkstoff 1.4404 zu haben. Auch diese Probenmessungen haben nicht funktioniert, da die Gegenelektrode nach längerer Lagerzeit durch Spaltkorrosion befallen war und in zwei Teile zerbrochen ist. Reparaturversuche haben nicht funktioniert und die Beschaffung einer neuen Gegenelektrode hat zu Verzögerungen geführt.

#### 4.1.2 FREIES KORROSIONSPOTENTIAL, PH-WERT UND TEMPERATUR

Vor und nach den Messungen wurden der pH-Wert und die Temperatur aufgezeichnet, sowie auch das freie Korrosionspotential. Der stetige Verlauf des freien Korrosionspotentials wurde gleichzeitig mit dem Programm "ChronoPotentiometry" aufgezeichnet und konnte für jede Probe bestätigt werden.

Das **pH-Meter** wurde auf einen Bereich zwischen pH 0,01 und pH 7 kalibriert. Die Lösung lag jedoch meist im negativen pH Bereich, was darauf hindeutet, dass die Lösung sehr stark sauer ist und viele Protonen in der Lösung dissoziiert sind. Der Durchschnittliche pH-Wert vor der Messung hängt zum einen von der Herstellung der Prüflösung ab und zum anderen auch davon, wie lange die Lösung gelagert wurde. Denn je länger die Lagerung, desto weniger reaktiv wird die Lösung. Der durchschnittliche pH-Wert vor der Prüfung liegt bei  $-0,02 \pm 0,11$  und nach der Prüfung bei  $0,05 \pm 0,12$ . Der pH-Wert erhöht sich also durchschnittlich etwas. Dies deutet darauf hin, dass die Protonen während der Reaktion verbraucht wurden und somit der pH-Wert ansteigt.

Die **Temperatur** bleibt relativ konstant bei Raumtemperatur und schwankt nur leicht. Vor den Messungen beträgt die durchschnittliche Temperatur  $20,07 \pm 0,62^\circ\text{C}$  und danach  $20,14 \pm 0,53^\circ\text{C}$ .

Das **freie Korrosionspotential** wurde aufgezeichnet und bietet einen ersten Hinweis darauf, wie korrosionsbeständig das Material in dieser Prüflösung ist. Hier gilt: Je negativer das Potential, desto unbeständiger das Material.

In

Tabelle 6 und Abbildung 50 sind die Mittelwerte für jede untersuchte Zone der freien Korrosionspotentiale, die auf die Standardwasserstoffelektrode bezogen wurden, für LRS-Proben eingetragen.

Tabelle 6 Freies Korrosionspotential DL-EPR Test

Werkstoff	Zone	Freies Korrosionspotential NHE [V]
1.4112	GW	$-0,233 \pm 0,000$
	SN	$-0,237 \pm 0,000$
	WEZ	$-0,241 \pm 0,005$
1.4404	GW	$-0,151 \pm 0,003$
	WEZ	$-0,153 \pm 0,001$
	SN	$-0,151 \pm 0,001$

Die Standardabweichung beim Grundwerkstoff und der Schweißnaht für 1.4112 ist gleich Null, da nur ein Wert für diese Zonen verwendet werden konnte. Die freien Korrosionspotentiale für die einzelnen Werkstoffe variieren in den Zonen (GW, WEZ, SN) nur wenig. Das Potential der Proben aus 1.4404 ist positiver, was darauf hinweist, dass dieser Werkstoff in dieser Schwefelsäurehaltigen Prüflösung beständiger ist.

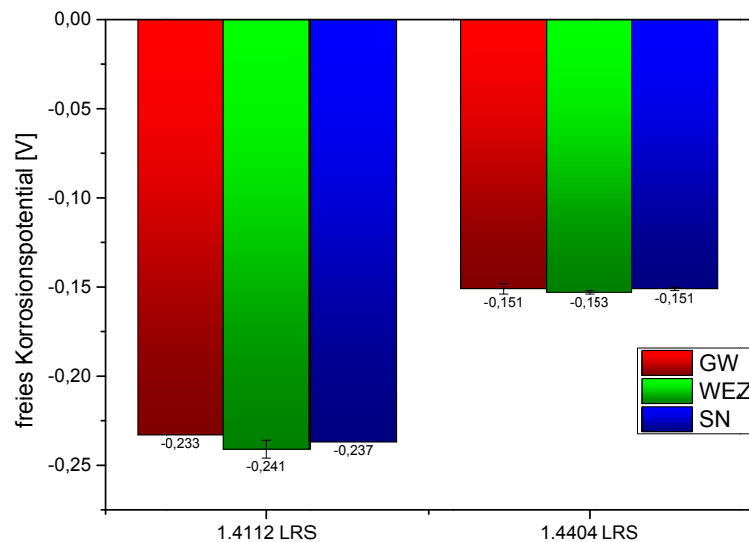


Abbildung 50 DL-EPR Test / Freie Korrosionspotentiale der LRS-Proben in den Zonen GW, WEZ und SN

#### 4.1.3 KURVENVERLAUF UND KURVENFORM

Die Stromdichte-Potential-Kurven wurden zur Auswertung in Origin 9.0 neu gezeichnet, soweit dies möglich war.

##### 4.1.3.1 Martensitischer rostbeständiger Stahl 1.4112

Aus dem Grundwerkstoff und der Schweißnaht des Werkstoffes 1.4112 lässt sich sofort erkennen, dass sich das Potential für den Reaktivierungspeak etwas negativer ist als jenes des Passivierungspeaks. Letztere zeigt hier aber eine höhere Stromdichte als die Reaktivierung. Beim Grundwerkstoff fällt ein zweiter, kleinerer Peak auf, der auf eine weitere Phase hindeuten kann, die in der Matrix vorhanden ist [48], da diese Phase ihr Maximum in Stromdichten bei Potentialen aufweist, die deutlich unterscheidbar sind, zum ersten Maximum.

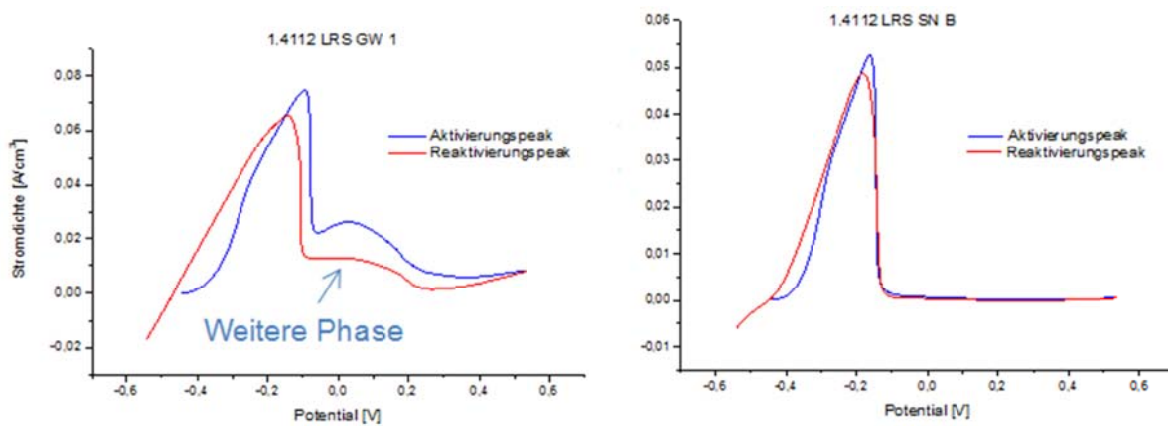


Abbildung 51 DL-EPR Test Stromdichte-Potential-Kurven; links: 1.4112 GW1; rechts: 1.4112 SNB – vgl. Probenübersicht Abb. 49

Die Wärmeeinflusszone ist die empfindlichste Zone in der linearreibgeschweißten Schweißverbindung [57], die auch die geringste Korrosionsresistenz aufweist. Auch hier zeigen die Kurven einen zweiten kurzen Anstieg, der auf eine oder mehrere Phasen hindeuten kann. Die Reaktivierungskurven zeigen eine höhere Reaktivierungsstromdichte als Passivierung (Abbildung 52 und Abbildung 53). Auch erkennt man, dass die Maximalwerte der Stromdichten bei unterschiedlichen Potentialen zu finden sind.

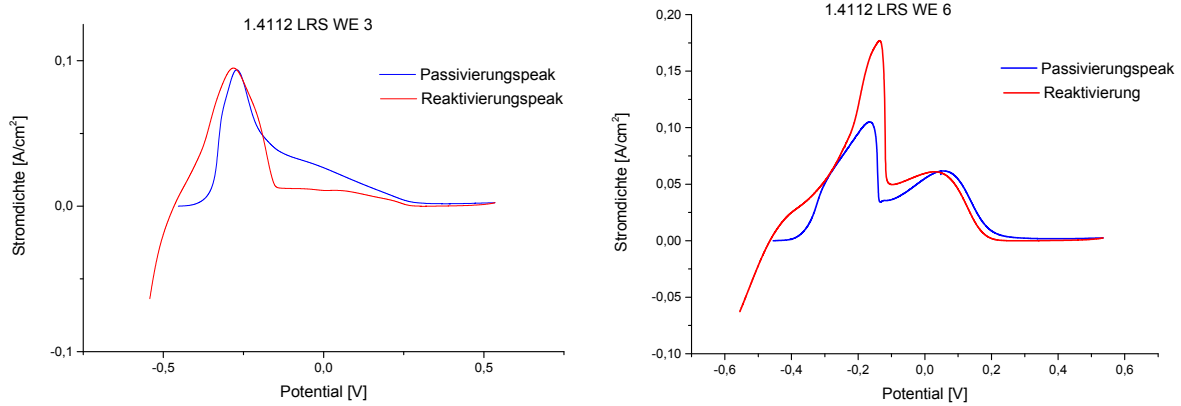


Abbildung 52 DL-EPR Test Stromdichte-Potential-Kurve von 1.4112 LRS; links: WEZ 3; rechts: WEZ 6 - vgl. Probenübersicht Abb. 49

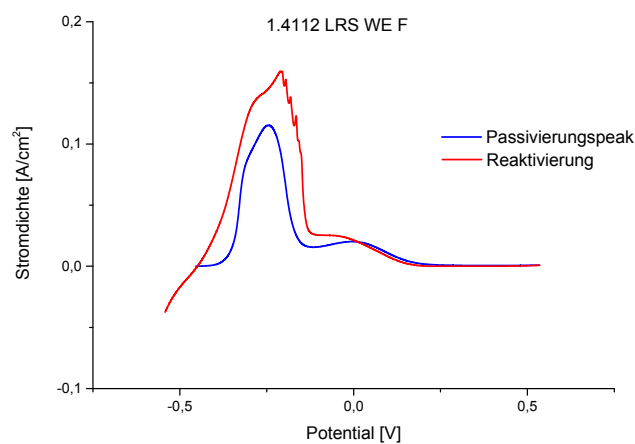


Abbildung 53 DL-EPR Test Stromdichte-Potential-Kurve von 1.4112 LRS WEZ F - vgl. Probenübersicht Abb. 49

#### 4.1.3.2 Austenitischer rostbeständiger Stahl 1.4404

Alle Stromdichte-Potential Kurven des Werkstoffes 1.4404 zeigten in den Vorversuchen keine Reaktivierung, auch nicht mit den Parametern die in [4] für diesen Werkstoff verwendet wurden. Erst als dieselben Parameter wie für den Werkstoff 1.4112 verwendet wurden (Kapitel 3.2.4, Seite 32), konnte ein kleiner Reaktivierungspeak beobachtet werden, der jedoch nur in der logarithmischen Ansicht zu sehen war. In Abbildung 54 und Abbildung 55 sind ausgewählte Kurven für die jeweiligen Zonen in linearer Darstellung aus Origin 9.0 zu sehen. Die übereinander gelegten Stromdichte-Potential Kurven aus Nova 1.8<sup>®</sup> in linearer und logarithmischer Darstellung sind Anhang B – Stromdichte-Potential-Kurven 1.4404 (Seite 98ff) für alle Zonen zu entnehmen.

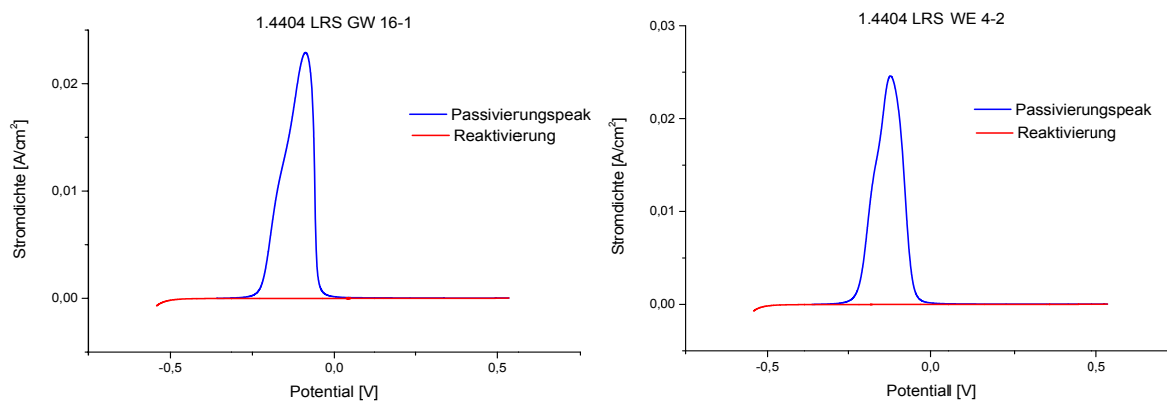


Abbildung 54 DL-EPR-Test 1.4404 LRS; links: GW 16-1; rechts: WE 4-2, vgl. Probenübersicht Abb. 49

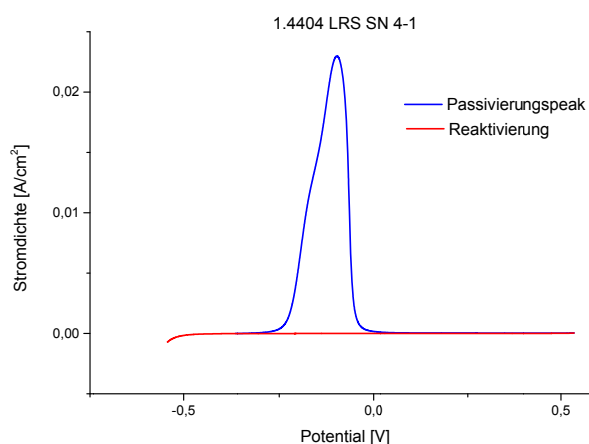


Abbildung 55 DL-EPR-Test 1.4404 LRS SN 4-1, vgl. Probenübersicht Abb. 49

#### 4.1.4 IDENTIFIZIERUNG DES KORROSIONSANGRIFFES

Von den DL-EPR getesteten Proben wurden Querschliffe angefertigt, um den Korrosionsangriff zu bestimmen.

##### 4.1.4.1 Martensitischer rostbeständiger Stahl 1.4112

Die fünf Proben des Werkstoffes 1.4112, zeigen alle interkristalline Korrosion auf der ganzen Fläche. In Abbildung 56 ist Probe GW1 dargestellt. Auf der linken Seite befinden sich immer die Bilder der Probe im ungeätzten und rechts im geätzten Zustand.

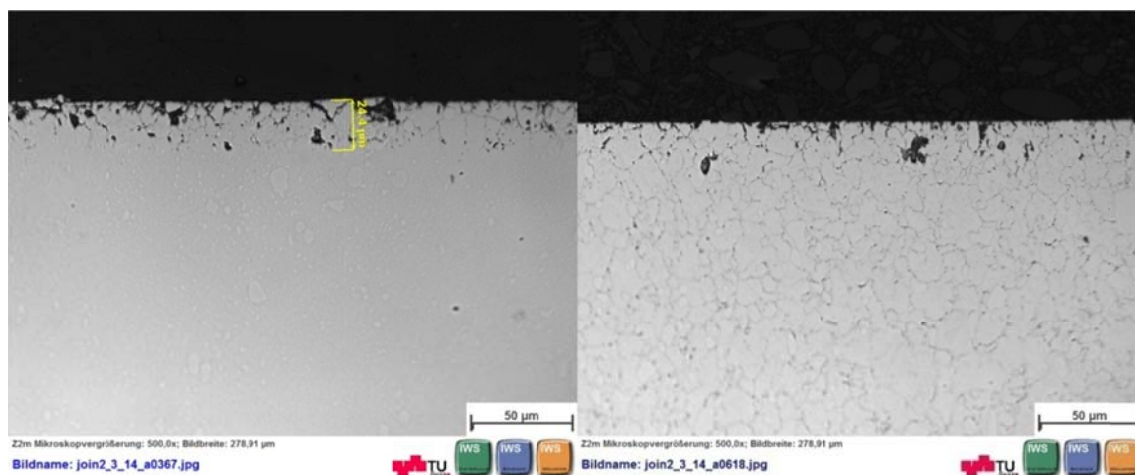


Abbildung 56 DL-EPR Test 1.4112 GW 1; links: ungeätzt; rechts: geätzt

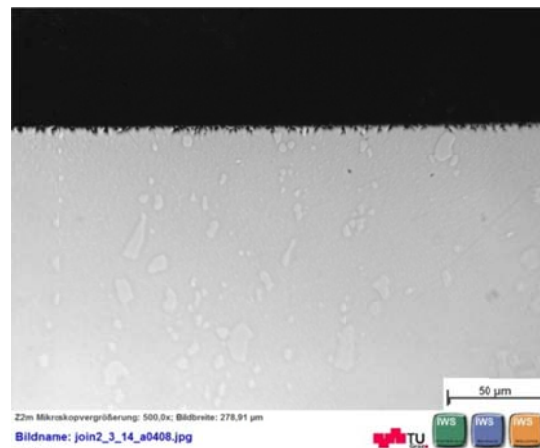


Abbildung 57 DL-EPR Test 1.4112 SN B ungeätzt

Es konnte keine Ätzung bei der Probe SN B für 1.4112 (Abbildung 57) erfolgreich durchgeführt werden, da keines der verwendeten Ätzmittel einen Angriff zeigte. Man erkennt aber auch auf dem ungeätzten Bild, dass der Interkristalline Korrosionsangriff schwächer ist, als bei den Proben aus Grundwerkstoff.

Als Beispiel für den Angriff in der Wärmeeinflusszone wurden hier Bilder der Probe WEZ 3 angeführt (Abbildung 58).

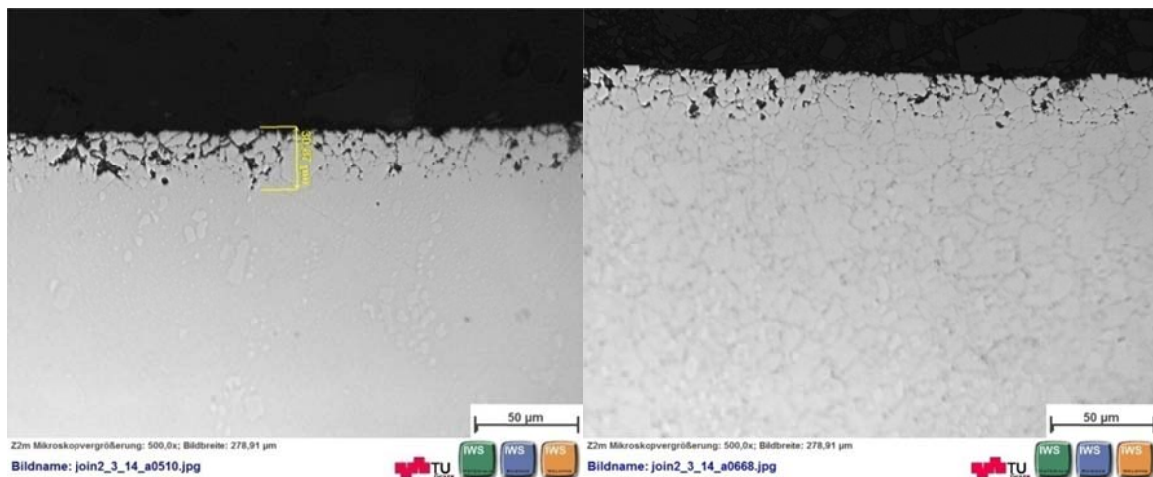


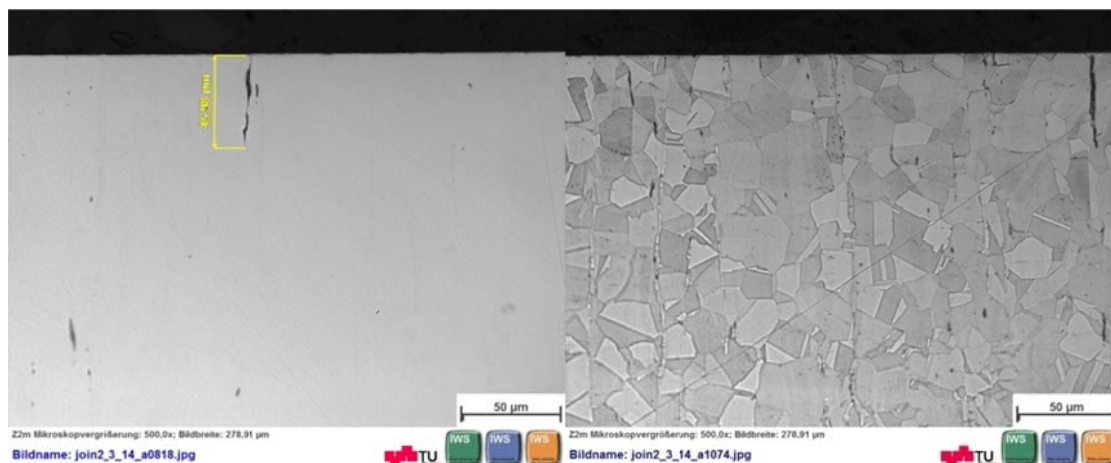
Abbildung 58 DL-EPR Test 1.4112 WEZ 3; links: ungeätzt ; rechts: geätzt

Man erkennt einen stärkeren Angriff bei den Proben aus GW und WEZ. Wobei die Tiefe des IK Angriffs bei der WEZ etwas größer ist. Beim GW beträgt der Angriff ungefähr 24 µm und in der WEZ 31µm. Somit wird die WEZ am stärksten angegriffen.

#### 4.1.4.2 Austenitischer rostbeständiger Stahl 1.4404

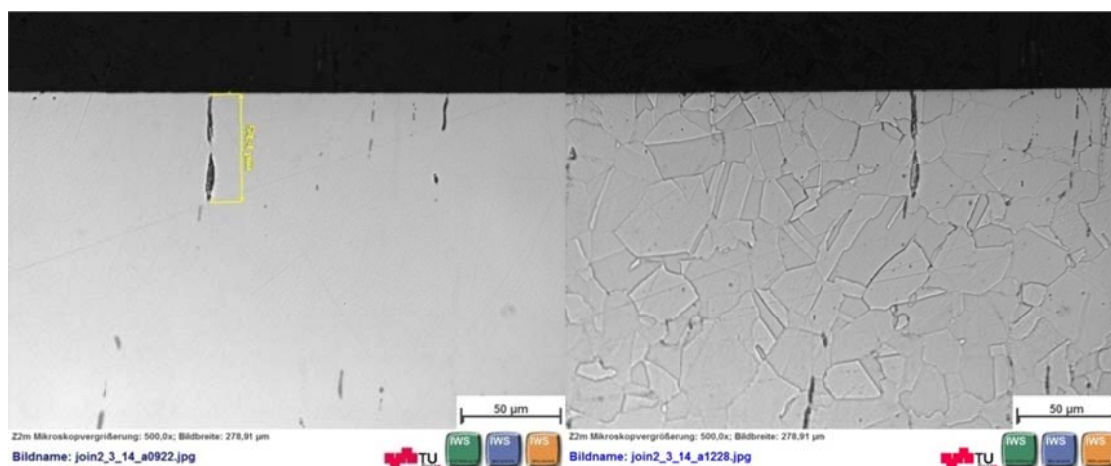
Wie bei den Bildern für den Werkstoff 1.4112 befinden sich die geätzten Bilder auf der rechten und die ungeätzten Bilder auf der linken Seite. Es wurden die Bilder für je eine der drei Proben pro Zone (GW, WEZ und SN) ausgewählt. Alle Proben zeigen Lochkorrosion und *keinen* interkristallinen Angriff.





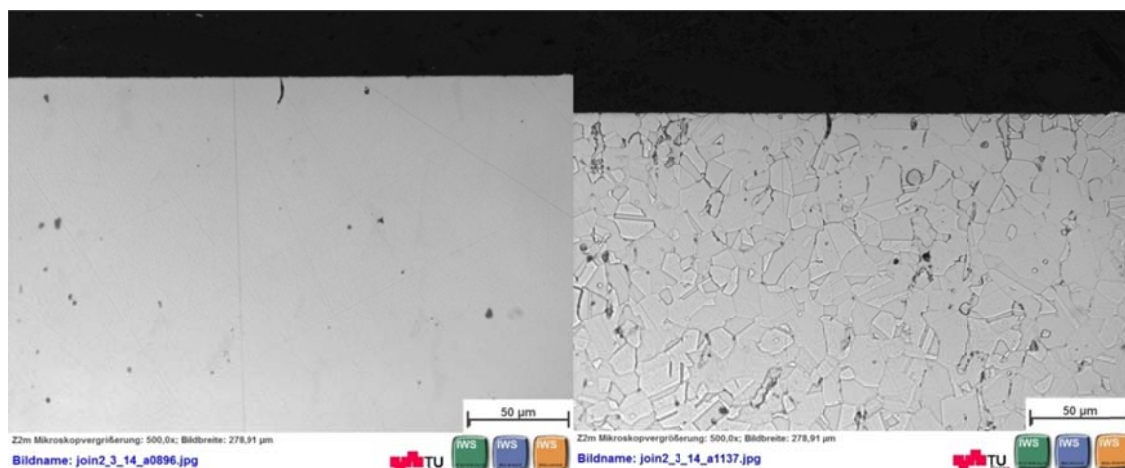
**Abbildung 59 DL-EPR 1.4404 GW 16-2; links: ungeätzt; rechts: geätzt**

Man erkennt gut die entstandenen Löcher (Abbildung 59), die nur vereinzelt im GW und den anderen Zonen über die Fläche verteilt auftreten. Die GW Korngröße ist gegenüber der in WEZ und SN etwas größer und die Löcher tiefer (ca. 45µm). Die Lochtiefen bei den WEZ-Proben ist ebenso hoch (ca. 55µm).



**Abbildung 60 DL-EPR 1.4404 WEZ 4-2; links: ungeätzt; rechts: geätzt**

Auch bei SN-Proben (Abbildung 61) ist ein Lochkorrosionsangriff zu erkennen. Die Tiefe der Löcher ist gegenüber GW viel geringer (ca. 10µm).



**Abbildung 61 DL-EPR 1.4404 SN 4-2; links: ungeätzt; rechts: geätzt**

Das heißt der Korrosionsangriff in der WEZ ist am stärksten. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass der DL-EPR Test auf Sensibilisierung gegenüber IK ausgelegt ist. Das Auftreten von Lochkorrosion deutet darauf hin, dass der Werkstoff 1.4404 sehr beständig gegenüber interkristalline Korrosion ist.

#### 4.1.5 KORNGRÖßENBESTIMMUNG

Mit dem Programm Zeiss AXIO VISION 4.8.2 64Bit konnte nun aus den geätzten Bildern die Korngröße nach NORM 643 [51] bestimmt werden und aus mehreren Bildern für eine Probe der Mittelwert für die Probe ermittelt werden. In Tabelle 7 sind die Mittelwerte der Korngrößen für die jeweilige Probe aufgelistet.

**Tabelle 7 DL-EPR-Test Mittelwerte der Korngrößenbestimmung - vgl. Probenübersicht Abb. 49**

Werkstoff	Probe		Korngrößenzahl G
1.4112	GW	1	9,75
	SN	B	10
	WEZ	3	10
		6	9,81
		F	10
1.4404	GW	4-2	8,64
		16-1	9
		16-2	8,44
	SN	4-1	9,5
		4-2	9,38
		16-1	8,67
	WEZ	4-1	9,38
		4-2	8,81
		16-2	8,93

Die Körner sind bei beiden Werkstoffen sehr fein, wobei der Werkstoff 1.4112 feinere Körner aufweist. Für SN B wurde der Wert 10 angenommen, da dies den feinsten Wert darstellt und kein Ätzangriff aufgrund des feinen Gefüges erfolgt ist.

#### 4.1.6 PASSIVIERUNGS- UND REAKTIVIERUNGSSTROM

Da die Proben aus 1.4404 keine interkristalline Korrosion zeigen, kann der Sensibilisierungsgrad auf Interkristalline Korrosion nicht ermittelt werden, sondern es wird die Sensibilisierung auf Lochkorrosion für 1.4404 ermittelt, ohne dass die Verhältnisse auf die Korngröße normiert werden.

Die Peak-Ströme wurden mit Hilfe des Programmes Origin 9.0 ermittelt und sind in Tabelle 8 aufgelistet. Der Peak-Strom  $I_p$  beschreibt den maximalen Strom bei Passivierung und  $I_r$  den maximalen Strom bei Reaktivierung, jeweils in Milliampere.

Tabelle 8 DL-EPR Passivierungs- und Reaktivierungsstrom; vgl. Probenübersicht Abb. 49

Werkstoff	Probe		$I_p$ [mA]	$I_r$ [mA]
1.4112	GW	1	74,7	65,8
	SN	B	52,6	48,7
	WEZ	3	93,7	94,9
		6	105,1	176,9
		F	115,4	159,4
1.4404	GW	4-2	23,5	2,1E-04
		6-1	22,9	1,2E-04
		6-2	23,8	5,1E-04
	SN	4-1	23,0	7,0E-04
		4-2	24,3	1,2E-04
		6-1	28,6	8,5E-04
	WEZ	4-1	25,7	4,8E-04
		4-2	24,6	2,7E-04
		16-2	21,3	4,8E-04

Der Strom bei den Proben 1.4112 erreicht deutlich höhere Werte, als bei den Proben 1.4404. Vor allem die Reaktivierungsströme der Proben 1.4404 sind sehr gering.

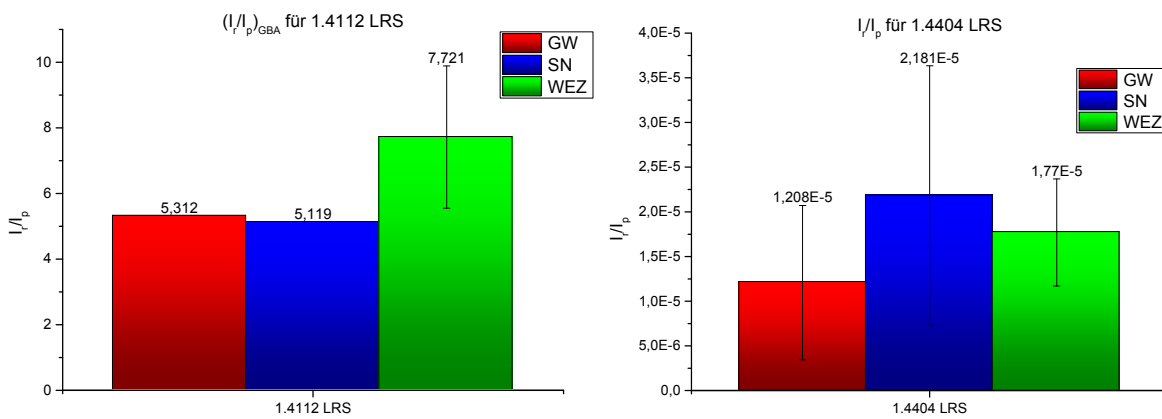
Um die Sensibilisierung berechnen zu können, wird die Formel in Kapitel 3.2.6 (Seite 34) verwendet, um das Verhältnis auf die Korngröße zu normieren. Die Normierung wird jedoch nur für Proben des Werkstoffes 1.4112 durchgeführt.

Tabelle 9 DL-EPR Test: Sensibilisierungsgrade für interkristalline Korrosion basierend auf dem Verhältnis der Peakströme  $I_R/I_P$ 

Werkstoff	Probe		$\left(\frac{I_R}{I_P}\right)$
1.4112	GW	1	5,312
	SN	B	5,119
	WEZ	3	5,600
		6	9,932
		F	7,630
1.4404	GW	4-2	9,11E-06
		6-1	5,33E-06
		6-2	2,18E-05
	SN	4-1	3,05E-05
		4-2	5,02E-06
		6-1	2,99E-05
	WEZ	4-1	1,90E-05
		4-2	1,12E-05
		16-2	2,29E-05

Die Mittelwerte der einzelnen Zonen GW, WEZ und SN sind Abbildung 62 zu entnehmen.

Es ist deutlich zu sehen, dass der Werkstoff 1.4112 Sensibilisierungsgrade für IK-Korrosion weit über dem Grenzwert  $I_R/I_P$  von 0,019 aufweist, wobei für den Werkstoff 1.4404 der Sensibilisierungsgrad weiter unter diesem Wert liegt (max.  $2,18 \cdot 10^{-5}$ ). Dies stimmt auch mit den Schlibbildern überein, da bei 1.4404 nur Lochkorrosion festgestellt wurde (Abbildung 59 bis Abbildung 60).



**Abbildung 62 DL-EPR Test - Verhältnis der Peakströme  $I_R/I_P$  der Zonen GW, SN und WEZ; links: 1.4112; rechts: 1.4404 / Sensibilisierungsgrade für IK-Korrosion**

Zu bemerken ist auch noch, dass die Streuung der Werte für die SN in 1.4404 sehr hoch sind. Auch während der Messungen war zu beobachten, dass die SN die unbeständigsten Proben während der Messung waren und die hohe Streuung durch mögliche Ausreißer zustande kommt. Die Schweißnaht selbst hat nur eine geringe Breite, könnte bei den Probenentnahmen nicht immer genau entnommen worden sein und WEZ beinhalten, was diese Streuung erklären könnte.

#### 4.1.7 PASSIVIERUNGS- UND REAKTIVIERUNGSLADUNG

Dasselbe gilt auch für die Verhältnisse der Passivierungs- und Reaktivierungsladung  $Q_r/Q_p$ . Die Ladungen wurden durch Integration der Stromkurve nach der Zeit im Programm Origin 9.0 ermittelt und in Coulomb in Tabelle 10 aufgelistet.

**Tabelle 10 DL-EPR Test / Passivierungs- und Reaktivierungsladung**

Werkstoff	Probe		Q <sub>p</sub> [C]	Q <sub>r</sub> [C]
1.4112	GW	1	4,81	4,21
	SN	B	1,72	1,90
	WEZ	3	5,04	4,87
		6	7,20	9,30
		F	4,82	8,13
1.4404	GW	4-2	0,571	1,65E-08
		6-1	0,561	9,34E-09
		6-2	0,574	3,86E-06
	SN	4-1	0,566	7,08E-06
		4-2	0,591	9,89E-09
		6-1	0,692	9,20E-06
	WEZ	4-1	0,597	3,68E-06
		4-2	0,590	1,05E-07
		16-2	0,556	3,33E-06

Auch hier ergibt sich ein großer Unterschied zwischen den Werkstoffen. Es ist auch wieder die Reaktivierungsladung sehr klein im Verhältnis zur Passivierung bei Werkstoff 1.4404. Die Verhältnisse sind in Tabelle 11 aufgelistet, wobei wieder zu bemerken ist, dass die Verhältnisse für 1.4404 nicht auf die Korngröße normiert wurden, da keine IK Korrosion zu erkennen war.

Tabelle 11 DL-EPR Test / Sensibilisierungsgrade für IK Korrosion basierend auf Ladungsverhältnis  $Q_R/Q_P$ 

Werkstoff	Probe		$\left(\frac{Q_R}{Q_P}\right)$
1.4112	GW	1	113,922
	SN	B	141,703
	WEZ	3	120,408
		6	127,450
		F	184,684
1.4404	GW	4-2	2,89E-08
		6-1	1,66E-08
		6-2	6,72E-06
	SN	4-1	1,25E-05
		4-2	1,67E-08
		6-1	1,33E-05
	WEZ	4-1	6,17E-06
		4-2	1,78E-07
		16-2	5,99E-06

Die folgende Abbildung 63 zeigt wieder die Mittelwerte der Verhältnisse für die Passivierungs- und Reaktivierungsladung.

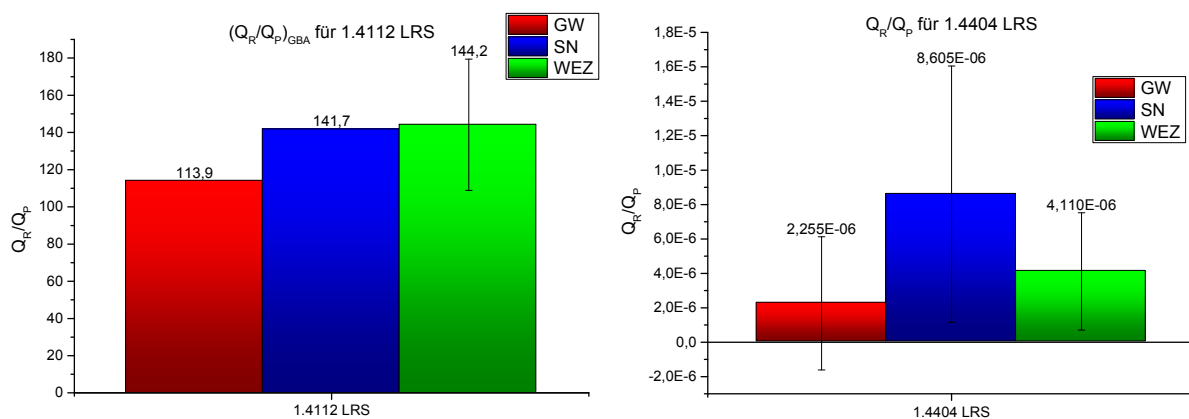


Abbildung 63 DL-EPR Test - Verhältnis der Passivierungs-/Reaktivierungsladung  $Q_R/Q_P$  der Zonen GW, SN und WEZ; links: 1.4112; rechts: 1.4404

Auch hier sind wieder die großen Streuungen zu beobachten, die teilweise um ein Vielfaches größer sind, als der Mittelwert selbst.

Die Werte für 1.4112 übersteigen wieder um ein Vielfaches den Grenzwert für die Sensibilisierung von 0,11 wobei 1.4404 diesen weit unterschreitet.

#### 4.1.8 ZUSAMMENFASSUNG

##### 4.1.8.1 Freies Korrosionspotential

Das freie Korrosionspotential des Werkstoffes 1.4404 ist im Vergleich zu 1.4112 edler, d.h. ersterer ist korrosionsbeständiger. Im Vergleich zu den Versuchen an den RA-Kettengliedern aus 1.4404 in [4] (Abbildung 64), findet man eine Übereinstimmung der Mittelwerte des freien Korrosionspotentials. Die Streuung ist höher, da mehr Versuche bei unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt wurden und auch die Temperaturen der Prüflösungen stärkere Schwankungen zeigten.

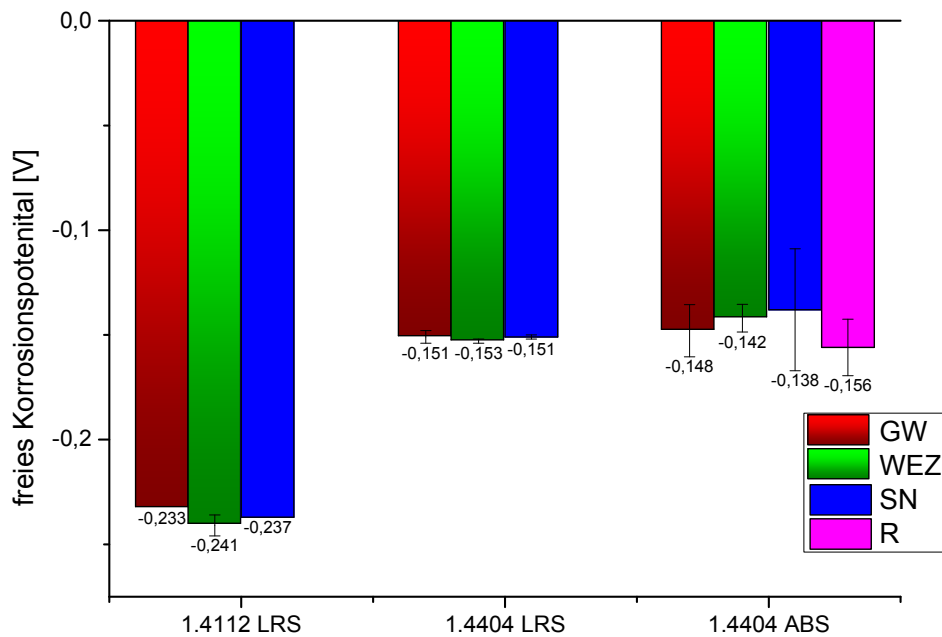


Abbildung 64 DL-EPR Test freies Korrosionspotential von 1.4404 RA und LRS und 1.4112 LRS

#### 4.1.8.2 Kurvenverlauf und Kurvenform

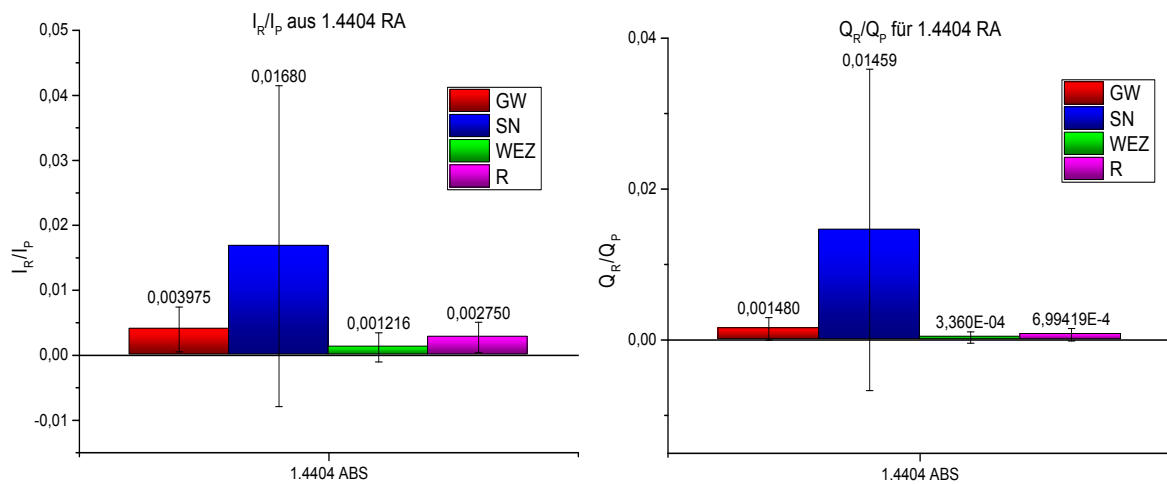
Die Kurven des Werkstoffes 1.4112 zeigen ausgeprägte Passivierungs- und Reaktivierungskurven, wobei die WEZ sogar höhere Reaktivierung als Passivierung zeigt. Diese Zone ist besonders anfällig für Interkristalline Korrosion. Dies steht im Gegensatz zum Werkstoff 1.4404, der in der linearen Darstellung keine Reaktivierung zeigt; erst in der logarithmischen Darstellung ist eine schwache Reaktivierung zu finden.

#### 4.1.8.3 Korrosionsangriff

Der Werkstoff 1.4404 zeigt nur Lochkorrosion, was mit den Ergebnissen aus [4] übereinstimmt, da auch bei diesen Versuchen nur Lochkorrosion bei den RA-Kettengliedern bzw. – Proben aus 1.4404 festgestellt wurde. Beim Werkstoff 1.4112 zeigte sich jedoch starke interkristalline Korrosion. Bei den LRS-Kettengliedern bzw. -Proben wird die WEZ am stärksten angegriffen.

#### 4.1.8.4 Sensibilisierungsgrad

Für den Werkstoff 1.4404 liegen die erhaltenen Werte weit unter dem Grenzwert und die metallographischen Querschliffe zeigen daher auch nur Lochkorrosion. Die Grenzwerte sind aber um ein Vielfaches höher, da bei den RA-Kettengliedern eine höhere Reaktivierung zu sehen war. Die Mittelwerte für RA-Kettenglieder (-Proben) sind in Abbildung 65 dargestellt.



**Abbildung 65 DL-EPR Test Mittelwerte für 1.4404 RA; links: I<sub>r</sub>/I<sub>p</sub> ; rechts: Q<sub>r</sub>/Q<sub>p</sub>**

Im Vergleich der beiden Schweißverfahren für den Werkstoff 1.4404 erkennt man, dass auch hier die Schweißnaht zwar den größten Mittelwert, jedoch auch die größte Streuung aufweist, was vermutlich damit zu tun hat, dass es bei der Probenahme schwierig ist, die Schweißnaht zu treffen, da diese sehr dünn ist.

Die Sensibilisierungsgrade für 1.4112 liegen für die Ladungs- und Stromverhältnisse je weit über dem festgelegten Grenzwerten. Was auch mit dem Auftreten von interkristalliner Korrosion in den Bildern der Querschliffe bewiesen wird. Die größte Sensibilisierung auf interkristalline Korrosion zeigt die WEZ des 1.4112.

## 4.2 ELEKTROCHEMISCHER LOCHKORROSIONSTEST

### 4.2.1 FREIES KORROSIONSPOTENTIAL, TEMPERATUR UND PH-WERT

Die Temperatur und der pH-Wert wurden vor und nach jedem einzelnen Test dokumentiert. Die **Temperaturen** bei allen Messungen schwanken um  $\pm 1^\circ\text{C}$ , somit ist die Wärmeentwicklung während des elektrochemischen Korrosionsversuches vernachlässigbar. Die durchschnittliche Temperatur vor den Messungen beträgt im sauerstoffarmen Elektrolyten  $19^\circ\text{C}$  und danach durchschnittlich  $20^\circ\text{C}$ . Beim sauerstoffreichen Elektrolyten beträgt die mittlere Temperatur vor der Messung  $19,5^\circ\text{C}$  und danach  $20,5^\circ\text{C}$ . Da der Temperaturanstieg also nur ca.  $1^\circ\text{C}$  beträgt, wurde dieser nicht weiter in die Interpretation der Ergebnisse miteinbezogen.

Der durchschnittliche **pH-Wert** vor der Messung im sauerstoffarmen Elektrolyten beträgt durchschnittlich  $6,81 \pm 0,5$  der pH-Wert nach der Messung durchschnittlich  $9,27 \pm 0,66$ . Die pH-Werte des sauerstoffreichen Elektrolyten betragen vor der Messung durchschnittlich  $7,29 \pm 0,56$ , und danach  $8,69 \pm 0,63$ . Dadurch, dass sich die  $\text{H}^+$ -Ionen in den Löchern ansammeln und den Elektrolyten in diesen Bereichen ansäuern, erhöht sich die Korrosionsgeschwindigkeiten an den Pits und der pH-Wert des gesamten Elektrolyten wird erhöht.

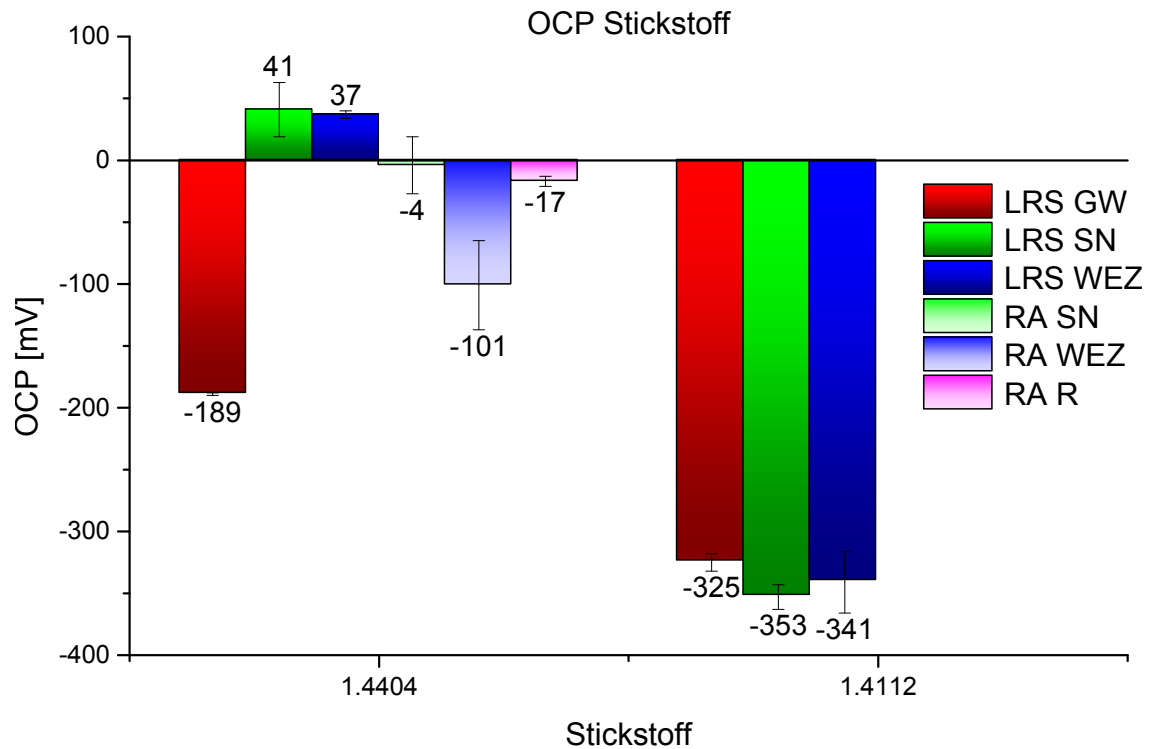
Um einen ersten Eindruck auf die Korrosionsanfälligkeit der Proben in diesem Medium zu erhalten, werden die **freien Korrosionspotentiale** (OCP) miteinander verglichen. Diese wurden mit einer Ag/AgCl Referenzelektrode gemessen und müssen auf das Potential der Normal-Wasserstoff-Elektrode (NHE) umgerechnet werden. Dazu wird bei  $20^\circ\text{C}$  Durchschnittstemperatur ein Wert von  $+210\text{mV}$  zu den jeweiligen freien Korrosionspotentialen dazu gerechnet. Die tatsächlichen Werte jeder Probe für das freie Korrosionspotential sind aus Anhang C – Ermittlung des Durchbruchpotentials (Seite 101ff) zu entnehmen. OCP-Werte, die sich von den übrigen stark unterscheiden (vermutlich Oberflächenfehler), wurden rot markiert und als „Ausreißer“ behandelt. In Tabelle 12 sind die mittleren OCP-Werte der jeweiligen Werkstoffe und Schweißzonen im sauerstoffarmen ( $\text{N}_2$ ) oder sauerstoffreichen Elektrolyten ( $\text{O}_2$ ) aufgelistet.

**Tabelle 12 Mittlere freie Korrosionspotential (OCP) mit Standardabweichung**

Werkstoff	Schweißverfahren	Zone	OCP [mV]	
			$\text{N}_2$	$\text{O}_2$
1.4112	LRS	GW	$-325 \pm 7$	$-163 \pm 2$
		SN	$-353 \pm 10$	$-143 \pm 38$
		WEZ	$-341 \pm 25$	$-138 \pm 28$
1.4404	LRS	GW	$-189 \pm 1$	$116 \pm 18$
		SN	$41 \pm 22$	$153 \pm 37$
		WEZ	$37 \pm 3$	$148 \pm 1$
	RA	SN	$-4 \pm 23$	$89 \pm 57$
		WEZ	$-101 \pm 36$	$31 \pm 21$
		Rand	$-17 \pm 4$	$-4 \pm 18$

Die OCP-Werte der Proben, die im stickstoffgespülten Elektrolyten (sauerstoffarm) gemessen wurden, sind negativer als jene, die in sauerstoffreichen Elektrolyten gemessen wurden. Die größten Standardabweichungen zeigen die Schweißnähte (SN) und die Ränder (R) der RA-Proben des Werkstoffes 1.4404. Das OCP des Werkstoffes 1.4112 ist auch hier negativer bzw. unedler als jenes von 1.4404. Die Schweißnaht (SN) von 1.4112 ist am negativsten und somit am stärksten gefährdet. Bei 1.4404 hat der Grundwerkstoff (GW) das negativste und die LRS-Schweißnaht das positivste OCP-Potential, siehe Abbildung 66.

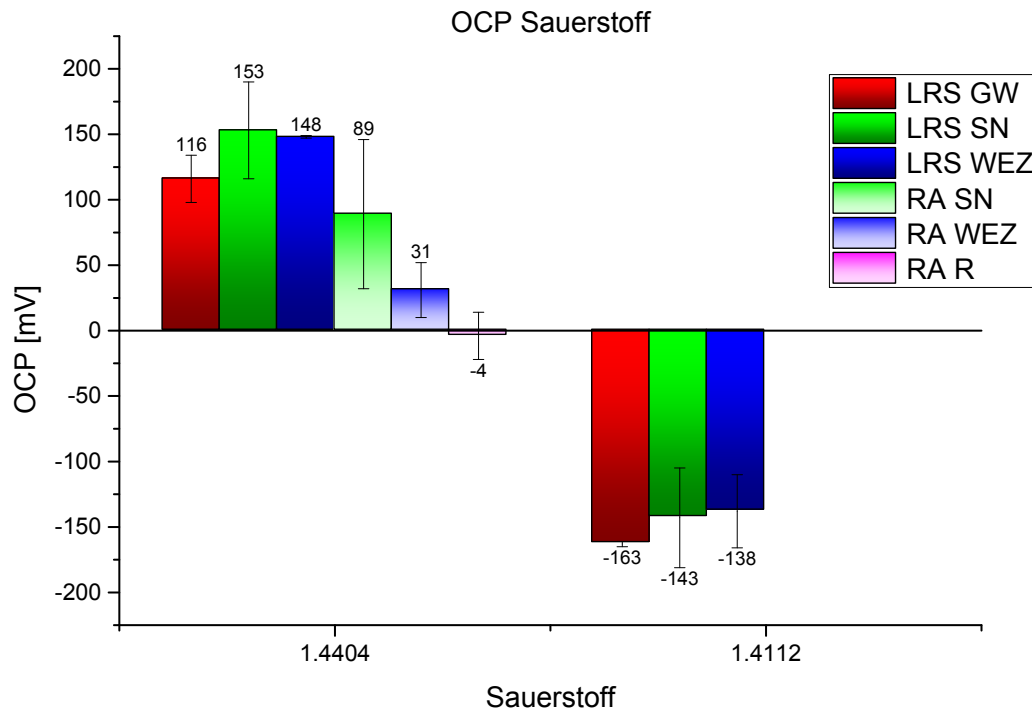




**Abbildung 66 Freies Korrosionspotential OCP der unterschiedlichen Gefügezonen im sauerstoffarmen Elektrolyten**

Beim sauerstoffreichen Elektrolyten stechen die deutlich negativeren OCP-Potentiale des 1.4112 heraus, d.h. geringere Korrosionsbeständigkeit (Abbildung 67). Die Standardabweichung in Grundwerkstoff GW und SN der RA-Proben 1.4404 sind größer als bei den anderen Probengruppen. Das kann auf die unterschiedlichen Kettenglieder, die in den Probengruppen verwendet wurden, zurückzuführen sein, da sie aus unterschiedlichen Chargen stammen

Das OCP von 1.4112 ist im GW am geringsten und in der WEZ am höchsten. Das OCP der Schweißnaht (SN) liegt zwischen den oben genannten. Das heißt, dass der stärkste Korrosionsangriff in der WEZ zu erwarten ist. Bei 1.4404 hat der GW einen geringeren OCP-Wert als die SN-Proben, jedoch ein höheres OCP als die RA-Proben. Die Schweißnaht (SN) der LRS-Proben hat das höchste OCP. Demnach ist diese die korrosionsbeständigste Zone des 1.4404 hingegen ist der Rand (R) der RA-Proben am korrosionsanfälligsten. Generell ist zu vermerken, dass die Streuungen bei den SN-Proben am größten sind.



**Abbildung 67** Freies Korrosionspotential OCP der unterschiedlichen Gefügezonen im sauerstoffreichen Elektrolyten

#### 4.2.2 DURCHBRUCHSPOTENTIAL (DBP)

Die Daten aus Nova 1.8 werden exportiert und in OriginPro 9.0 importiert. Die GW-Proben haben einen größeren Durchmesser als die restlichen Proben der Zonen. Um die Normierung genau durchzuführen wurden alle Probendurchmesser vermessen und die Stromdichte anhand der erhaltenen Flächen für die jeweilige Probe berechnet.

Als nächsten Schritt wurden die Stromdichte-Potential-Kurven aufgezeichnet und das DBP aus den Kurven abgelesen. Diese ermittelten Potentiale werden nun auch auf Normal-Wasserstoff-Elektrode (NHE) umgerechnet. Mittelwerte und Standardabweichung der erhaltenen DBP sind Tabelle 13 zu entnehmen.

**Tabelle 13** Mittelwerte der Durchbruchpotentiale DBP

Werkstoff	Schweißart	Zone	DBP [mV]	
			N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
1.4112	LRS	GW	53±20	52± 1
		SN	20± 8	166±14
		WEZ	-24± 8	-6±31
1.4404	LRS	GW	526± 5	461±26
		SN	456±12	437±15
		WEZ	425±41	417±40
	RA	SN	414±15	469±37
		WEZ	469± 7	460±63
		R	464±37	393±21

Erst mit der Differenz zwischen OCP und DBP (Durchbruchpotential) kann eine Aussage über die Korrosionsbeständigkeit der jeweiligen Probengruppe gemacht werden. Je größer die Differenz, desto besser ist die Korrosionsbeständigkeit des Materials.

Tabelle 14 Differenz zwischen Durchbruchpotential DBP und freiem Korrosionspotential OCP

Werkstoff	Schweißart	Zone	DBP-OCP [mV]	
			N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
1.4112	LRS	GW	378± 9	215± 3
		SN	373±15	309±48
		WEZ	317±16	132± 9
1.4404	LRS	GW	714± 6	345±44
		SN	415±10	284±41
		WEZ	388±39	269±20
	RA	SN	417±38	381±94
		WEZ	569±43	429±55
		R	481±41	396± 3

Im sauerstoffreichen Elektrolyten ergeben sich geringere DBP-OCP-Werte als im sauerstoffarmen Elektrolyten. Das heißt, die Letzteren eine höhere Korrosionsbeständigkeit aufweisen als die Ersteren, da verstärkte Sauerstoffkorrosion stattfindet.

Auch zeigen die SN-Proben aus dem Werkstoff 1.4112 die höchste und die WEZ-Proben die geringste Korrosionsbeständigkeit. Beim Werkstoff 1.4404 kann eine grobe Unterscheidung in die Schweißverfahren und den Grundwerkstoffen (GW) getroffen werden. GW-Proben im sauerstoffarmen Elektrolyten sind besser korrosionsbeständig als SN- und WEZ-Proben und die Proben im sauerstoffreichen Elektrolyten. Die SN-Probe des RA-Schweißverfahrens weist die geringste Korrosionsbeständigkeit auf. Bei den LRS-Proben im sauerstoffreichen Elektrolyten ist hingegen die SN-Probe am korrosionsbeständigsten, wobei die größte höchste Standardabweichung auftritt. Diese Zusammenhänge sind graphisch in Abbildung 68 dargestellt.

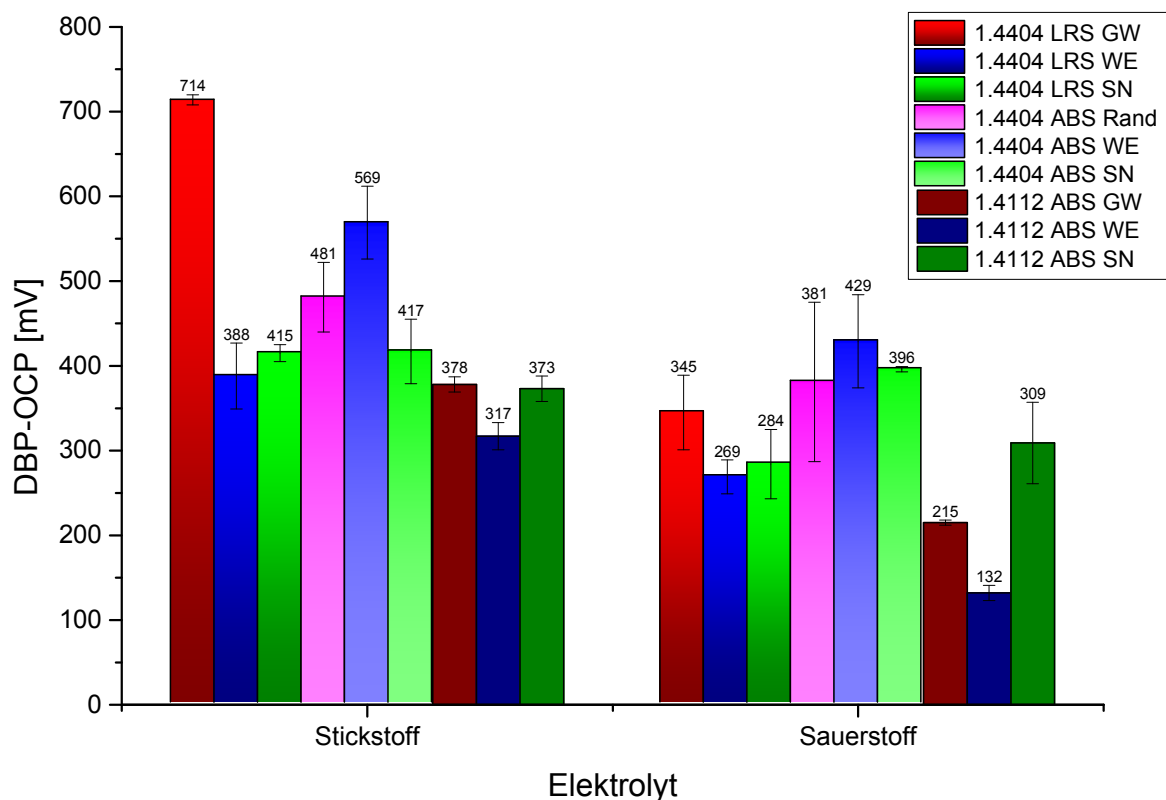


Abbildung 68 Differenz zwischen Durchbruchpotential DBP und freiem Korrosionspotential OCP der unterschiedlichen Gefügezonen im sauerstoffarmen und -reichen Elektrolyten

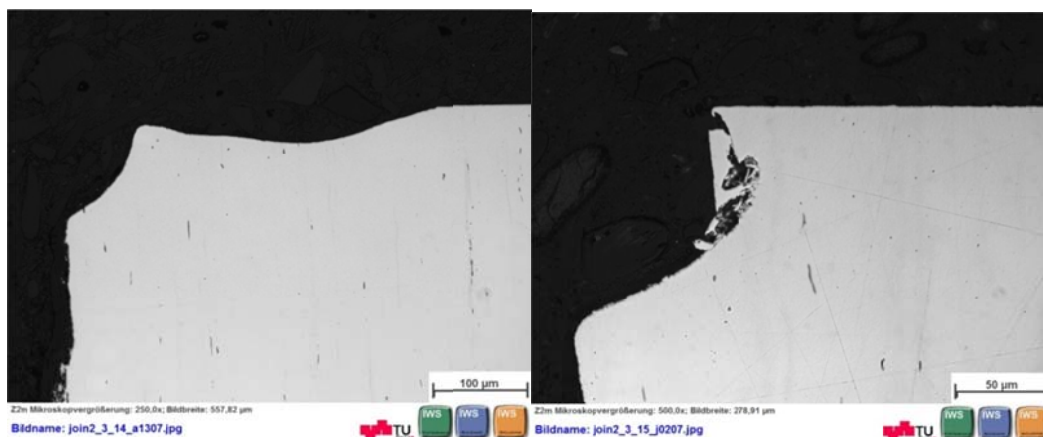
### 4.2.3 FORM UND LAGE DER KURVEN

Der Einfluss von sauerstoffreichen und sauerstoffarmen Elektrolyten auf beide Werkstoffe zeigen Diagramme in Anhang C – Ermittlung des Durchbruchspotentials (Seite 101ff).

Das Durchbruchspotential (DBP) ist im sauerstoffarmen Elektrolyten geringer. Jedoch ist das freie Korrosionspotential (OCP) auch deutlich negativer. Die Differenz DBP-OCP ist jedoch größer, als jene bei den sauerstoffreichen Proben. Die WEZ-Proben zeigen wenig Einfluss auf die Korrosionsbeständigkeit durch die sauerstoffreiche Lösung. Möglicherweise war der Elektrolyt noch nicht sauerstoffreich, obwohl wie vorgesehen für 40min und mit 2,5bar Sauerstoff eingeblasen wurde. Wenn man die Kurvenverläufe des Werkstoffes 1.4112 vergleicht sind unterschiedlich starke Steigungen ersichtlich. Ein steiler Verlauf deutet auf Lochkorrosion hin, ein flacherer auf Spaltkorrosion. [58]

Bei den Proben aus 1.4404 zeigt sich, dass das Einblasen von Sauerstoff oder Stickstoff wenig Einfluss hat. Die Proben zeigen ähnliche Potentiale, jedoch streuen die Kurven stärker als beim Werkstoff 1.4112. Das generelle Abflachen der Kurve bei Stickstoff kann zum einen mit Spaltkorrosion und zum anderen mit geringerem O-Gehalt im Elektrolyten zusammenhängen, der eine vollständige Ausbildung der passiven Oxidschicht nicht zulässt und somit eher angegriffen wird. Auch ist zu vermerken, dass die Passivschicht beim O-reichen Elektrolyten besser ausgebildet wird und es somit eher nicht zu einer Abflachung der Kurve und auch nicht zu ersichtlicher Spaltkorrosion kommt.

Spaltkorrosion ist daran ersichtlich, dass die Probenränder angegriffen werden. Der Übergang zwischen der Probe und dem Nagellack, der vor einem Angriff schützen soll, kann zur Spaltbildung und somit zur Korrosion führen. In Abbildung 69 werden Ränder der GW-Proben 1.4404 aus einem O-reichen und eines O-armen Elektrolyten verglichen. Die Spaltkorrosion wird nicht mit näher einbezogen. Durch das Auftreten der Spaltkorrosion ist jedoch die Streuung der Kurven erklärbar, da nicht nur Lochkorrosion sondern auch Spaltkorrosion auftritt und sich die Potentiale verändern. Beide Werkstoffe zeigen Spaltkorrosion, wobei beim O-armen Elektrolyten eher Spaltkorrosion aufgetreten ist, als beim O-reichen Elektrolyten.



**Abbildung 69 GW-Probe 1.4404 / Angriff des Randes nach Auftreten des Durchbruchspotentials DBP;  
links: O-frei; rechts: O-reich**

Zur Identifikation des Korrosionsangriffes werden makroskopische und mikroskopische Bilder (Querschliffe) miteinbezogen. Von je einer Probe der jeweiligen Zone wurde ein Querschnitt angefertigt und lichtmikroskopisch untersucht. Die Stromdichte-Potential-Kurven der einzelnen Proben und die Schliffbilder der Zonen sind in Anhang C – Ermittlung des Durchbruchspotentials (Seite 101) dargestellt.

#### **4.2.3.1 LRS des martensitischen rostbeständigen Stahles 1.4112**

Der Grundwerkstoff von 1.4112 zeigt in den Querschliffen eindeutig interkristalline Korrosion. Die Schweißnaht wird nur partiell und nicht durchgehend angegriffen. Die Steigungen der Stromdichte-Potential-Kurven für den O-freien Elektrolyten sind steiler, als jene des O-reichen, was eigentlich auf Lochkorrosion hindeuten würde. Die ungefähr berechnete CPT liegt weit unter Raumtemperatur (Kapitel 2.2.4.2, Seite 21), deshalb ist das Auftreten von IK nicht verwunderlich. Die Korrosionsbeständigkeit hervorgehend aus der Differenz zwischen DBP und OCP und die Stärke des Angriffes in den Bildern stimmen überein.

Der Kurvenverläufe der WEZ-Proben sind am steilsten und mit einem Knick versehen, der auf eine Änderung des Korrosionsmechanismus hindeuten kann. Somit kann gleich zu Beginn mit Lochkorrosion, die in interkristalline Korrosion übergeht, gerechnet werden. Die SN-Kurven sind flacher und der Angriff ist geringer bzw. nur partiell. Die GW-Proben zeigen wieder eine steilere Kurve und einen stärkeren interkristallinen Angriff. Im O-reichen Elektrolyten liegen die Kurven auch sehr gut übereinander (Anhang C – Ermittlung des Durchbruchpotentials, Seite 101ff). Die WEZ-Proben zeigen sehr starken interkristallinen Angriff, die SN-Proben hingegen den geringsten. Wiederum verzeichnen die Stromdichte-Potential-Kurven der SN- und der GW-Proben einen Knick. Die SN-Probe zeigte auch interkristallinen Angriff, jedoch nicht so stark, wie die Proben aus anderen Zonen. Vergleicht man die mikroskopischen Bilder der Querschliffe aus dem O-freien Elektrolyten, so ist ein stärkerer Angriff zu sehen, als beim O-reichen Elektrolyten. Die I-U-Kurven der WEZ-Proben liegen perfekt übereinander, d.h. die Versuche zeigen eine gute Reproduzierbarkeit.

Beim O-reichen Elektrolyten ist zwar der Angriff bei den GW-Proben tiefer, jedoch bei den WEZ-Proben deutlich stärker.

#### **4.2.3.2 LRS des austenitischen rostbeständigen Stahles 1.4404**

Die SN sollte beim O-armen Elektrolyten mittleren Angriff zeigen, zeigt aber in den mikroskopischen Bildern der Querschliffe kaum Spuren von Lochkorrosion. Dies kann damit zusammen hängen, dass nur vereinzelt Angriffe auf der Oberfläche waren und nicht durch den Querschliff mikroskopisch zu sehen waren. Die Streuungen der i-U-Kurven sind größer als bei 1.4112. Man erkennt hier keine interkristalline Korrosion, sondern Lochkorrosion. An der SN-Probe ist der geringste Angriff zu erkennen. Die Angriffe der Proben stimmen nicht vollständig mit den Korrosionsdaten bzw. I-U-Kurven überein, vor allem beim O-reichen Elektrolyten, dies kann aber auch daran liegen, dass nur ein Querschliff angefertigt wurde und teilweise nur wenig Angriff erkennbar war. Die GW-Probe zeigt zwei I-U-Kurven, die sehr gut übereinstimmen - mit einem Ausreißer, der eine flachere Steigung zeigt. Die I-U-Kurven der SN-Proben passen sehr gut übereinander wohingegen die WEZ-Proben etwas streuen. Die I-U-Kurven liegen aber näher beieinander, als beim O-freien Elektrolyten.

#### **4.2.3.3 RA des austenitischen rostbeständigen Stahles 1.4404**

Von den RA-Schweißungen wurden SN-, WEZ- und R-Proben (aus dem aufgehärteten Rand der WEZ) untersucht. Die I-U-Kurven zeigen keine große Streuung und liegen gut beieinander, d.h. sind gut reproduzierbar. Die Steigung derselben ist bei der GW-Probe am geringsten und bei der R-Probe am größten. Alle drei Proben zeigen eindeutig Lochkorrosion. Der Rand, der die höchste Härte aufweist, ist am stärksten durch lokale Korrosion angegriffen. Beim O-reichen Elektrolyten liegen die Kurven weiter auseinander und bei den SN-Proben tritt starke Streuung auf.

---

#### 4.2.4 ZUSAMMENFASSUNG

##### 4.2.4.1 Freies Korrosionspotential OCP

Vergleicht man diese Werte nun mit den bereits durchgeführten Messungen aus [53] für die Grundwerkstoffe, verhalten sich diese durch den Einfluss der Gase anders. Die Potentiale für den Martensit erniedrigen sich durch den Einfluss des Sauerstoffs, was mit den Ergebnissen in dieser Arbeit übereinstimmt, jedoch ist die Erniedrigung um ein Vielfaches größer. Für den austenitischen Werkstoff 1.4404 erniedrigt sich das Potential, was so nicht mit den Ergebnissen dieser Arbeit [51] übereinstimmt, da die Werte durch den Sauerstoff erhöht werden. Das freie Korrosionspotential der Zonen des Werkstoffes 1.4112 ist immer negativer als die Potentiale von 1.4404. Auch ist der Einfluss des höheren O-Gehaltes im Elektrolyten zu erkennen, da die Potentiale zu höheren und somit edleren Potentialen verschoben werden.

Im O-freien Elektrolyten ist das Potential beim LRS Werkstoff 1.4404 im Grundwerkstoff am negativsten und bei RA die WEZ am anfälligsten. Beim Werkstoff 1.4112 ist der OCP-Mittelwert der SN-Probe am höchsten, jedoch darf man die Streuung in der WEZ nicht unterschätzen, die somit fast gleichauf liegt.

Im O-reichen Elektrolyten sind bei beiden Schweißverfahren am Werkstoff 1.4404 die Schweißnähte laut OCP am gefährdetsten und bei 1.4112 zeigt die GW-Probe das negativste Potential. Somit ist ein direkter Zusammenhang des OCP mit dem O-Gehalt im Elektrolyten erkennbar.

##### 4.2.4.2 Durchbruchpotential DBP

Zusammenfassend kann man sagen, dass im O-reichen Elektrolyten die Korrosionsbeständigkeit bei beiden Stählen sinkt. Beim Werkstoff 1.4404 ist die GW-Probe am beständigsten, wobei LRS jeweils die SN beständiger als die WEZ aufweist, was bei RA umgekehrt zu beobachten war. Bei RA liegen die R-Proben (Rand) mit seiner Beständigkeit zwischen der WEZ und der SN. Die Differenz zwischen DBP und OCP war bei 1.4112 beim O-freien Elektrolyten für GW am höchsten und für die WEZ am niedrigsten. Beim O-reichen Elektrolyten ist die Differenz für SN höher als für den GW, wobei WEZ wieder am niedrigsten ist. Im Vergleich mit [53] sind die Differenzen DBP-OCP deutlich größer. Die GW-Probe 1.4112 ist in Sauerstoff beständiger, was in den Ergebnissen dieser Arbeit nicht bestätigt werden konnte. Der Grundwerkstoff 1.4404 zeigt jedoch den gleichen Zusammenhang mit den beiden Elektrolyten, so dass die Beständigkeit im O-freien größer ist (geringere Aggressivität).

##### 4.2.4.3 Korrosionsangriff

Die 1.4112 Proben zeigen in O-freien und O-reichen Elektrolyten interkristalline Korrosion. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die kritische Lochfraßtemperatur unter der Prüftemperatur liegt und die Proben somit bereits auf Lochkorrosion sensibilisiert sind. Zudem neigt dieser Werkstoff generell eher zur interkristallinen Korrosion. 1.4404 Proben zeigen generell Lochfraß, jedoch tritt beim O-armen Elektrolyten auch Spaltkorrosion auf. Somit kann man zwischen den beiden Elektrolyten eine Unterscheidung in der Korrosionsart treffen. Der Korrosionsangriff stimmt im Großen und Ganzen mit den Ergebnissen aus dem elektrochemischen Test überein. Es wurden jedoch zu wenige Querschliffe angefertigt, um eine genaue Aussage über die Stärke des Angriffes zu machen, jedoch konnte eindeutig zwischen Loch- und interkristalliner Korrosion unterschieden werden. Die Spaltkorrosion tritt nur bei 1.4404 auf und ist im O-freien und O-reichen Elektrolyten vorherrschend. Jedoch bei 1.4404 und Stickstoff zeigt es sich die Spaltkorrosion auch in der Streuung der Kurven.

## 4.3 STREICHER-TEST

### 4.3.1 MASSENVERLUST UND KORROSIONSRATE

Der chemische Test der Sensibilisierung auf interkristalline Korrosion wird nur bei Proben des Werkstoffes 1.4404 durchgeführt.

Die Proben wurden für 120h in der Prüflösung aus 50%iger Schwefelsäure mit Eisensulfat bei RT belassen. Um den Fortschritt des Korrosionsangriffes zu überprüfen, wurden Zwischenwägungen durchgeführt. Dazu wurden die Proben alle 24h aus der Prüflösung entnommen, mit Wasser gespült, mit Ethanol und einer Bürste gereinigt und anschließend getrocknet. Nach diesen Reinigungsschritten, die auch in der Norm G48 [56] beschrieben sind, wurden die Proben gewogen. Die Ergebnisse dieser Zwischen- und der Endwägungen sind der folgenden Tabelle 15 zu entnehmen.

**Tabelle 15 Streicher Test 1.4404 / Probenmassen nach Zwischen- und Endwägungen**

Masse [g]	GW		LRS		RA	
	A	B	A	B	A	B
0	8,028	7,933	7,980	7,977	9,051	7,848
24	8,024	7,928	7,974	7,971	9,038	7,834
48	8,014	7,920	7,963	7,961	9,020	7,813
72	8,005	7,908	7,950	7,948	8,987	7,781
96	7,990	7,893	7,935	7,931	8,948	7,737
120	7,970	7,876	7,910	7,907	8,883	7,670

In Abbildung 70 ist der Massenverlust während des Testverlaufs graphisch dargestellt. Die Grundwerkstoffe A und B verlieren ähnlich viel Gewicht, wie die linearreibgeschweißten Proben (LRS). Die abbrennstumpfgeschweißten Proben (RA), verlieren während der Testdauer deutlich mehr Masse, siehe Tabelle 16.

**Tabelle 16 Streicher Test 1.4404 / Massenverluste über Prüfdauer**

Masse [g]	GW		LRS		RA	
	A	B	A	B	A	B
24	0,004	0,005	0,006	0,006	0,013	0,014
48	0,01	0,008	0,011	0,01	0,018	0,021
72	0,009	0,012	0,013	0,013	0,033	0,032
96	0,015	0,015	0,015	0,017	0,039	0,044
120	0,02	0,017	0,025	0,024	0,065	0,067

Gemäß der Norm G48 [56], kann aus diesem Massenverlust die Korrosionsrate in mm pro Monat bestimmt werden kann.

$$\text{Korrosionsrate} = \frac{7290 * W}{A * t * d} \text{ (mm/Monat)}$$

**Formel 5 Berechnung der Korrosionsrate für Streicher-Test**

t...Versuchsdauer [h]

A...Versuchsfläche [cm<sup>2</sup>]

W...Gewichtsverlust [g]

d...Dichte [g/cm<sup>2</sup>]

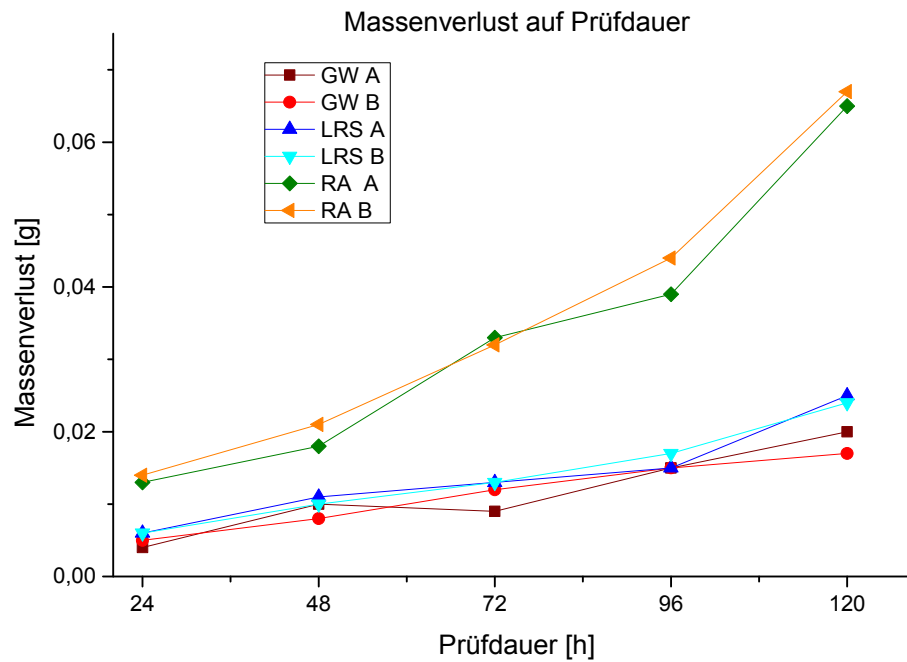


Abbildung 70 Streicher Test 1.4404 / Massenverlust nach 24, 48, 72, 96 und 120 Stunden

Die Dichte ist in der Norm [55] für Chrom-Nickel-Stähle mit  $9,5 \text{ [g/cm}^2\text{]}$  gegeben. Die Korrosionsraten wurden hier aber mit der Dichte für den Stahl 1.4404 berechnet, die aus dem Projektbericht [4] mit  $9,95 \text{ [g/cm}^2\text{]}$  entnommen wurde.

Mit den Massen aus Tabelle 15 und den tatsächlichen Oberflächen aus Tabelle 3 kann nun die Korrosionsrate in Millimeter pro Monat berechnet werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 17 aufgelistet. Die graphische Darstellung folgt in der Abbildung 71.

Tabelle 17 Streicher Test 1.4404 / Korrosionsraten in Millimeter pro Monat

mm/Monat	GW		LRS		RA	
Prüfdauer [h]	A	B	A	B	A	B
24	0,03	0,03	0,04	0,04	0,08	0,09
48	0,04	0,04	0,05	0,05	0,09	0,11
72	0,05	0,05	0,06	0,06	0,12	0,14
96	0,06	0,07	0,07	0,08	0,16	0,19
120	0,07	0,07	0,09	0,09	0,20	0,23

Es ist deutlich zu erkennen, dass die RA Kettenglieder doppelt so große Korrosionsraten zeigen, wie der Grundwerkstoff, der aus LRS-Kettengliedern entnommen wurde, oder die LRS-Proben.



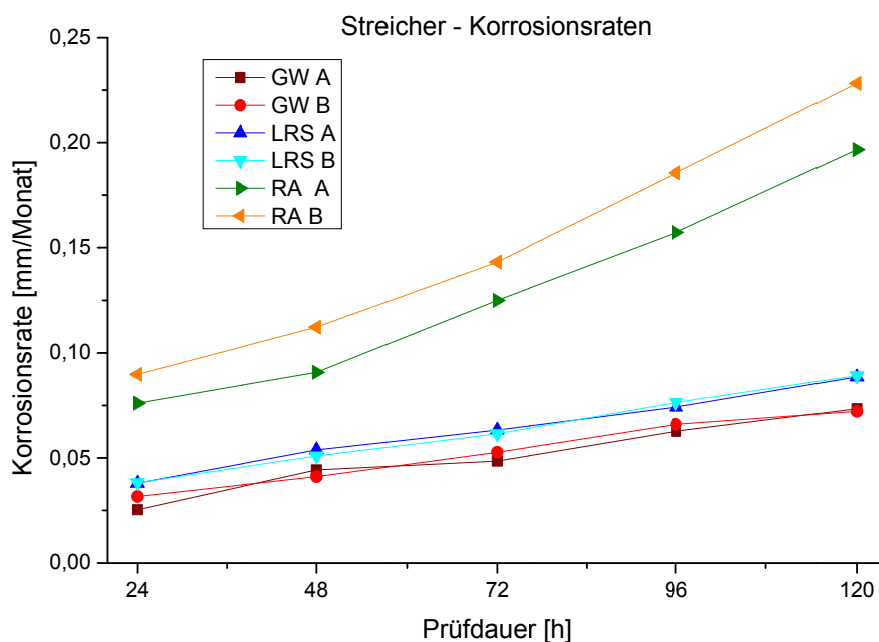


Abbildung 71 Streicher Test 1.4404 / Korrosionsraten in Millimeter pro Monat

#### 4.3.2 IDENTIFIZIERUNG DES KORROSIONSANGRIFFES

Wie auch bei den vorhergehenden Prüfmethoden muss der Korrosionsangriff überprüft werden, d.h. ob eine Sensibilisierung auf interkristalline Korrosion stattgefunden hat.

##### 4.3.2.1 Grundwerkstoff 1.4404

Probe A des Grundwerkstoffes zeigte im Querschliff unter dem Stereomikroskop lokale längsgerichtete Angriffe, wobei Probe B keinen Angriff zeigt.

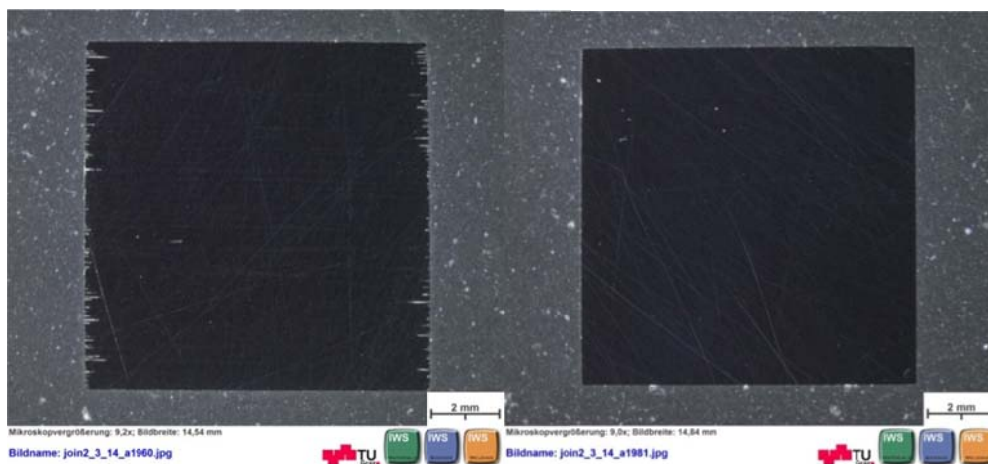


Abbildung 72 Querschliff im Stereomikroskop nach 120h Streicher-Test an 1.4404 GW aus LRS  
links: Probe A; rechts: Probe B

Weitere Untersuchungen im Lichtmikroskop (Abbildung 73) ergaben, wie schon in Abbildung 72 zu sehen, Lochkorrosion. GW B zeigt auch Lochkorrosion, jedoch in weniger starkem Ausmaß. Ein flächiger Angriff ist bei beiden Proben zu erkennen.

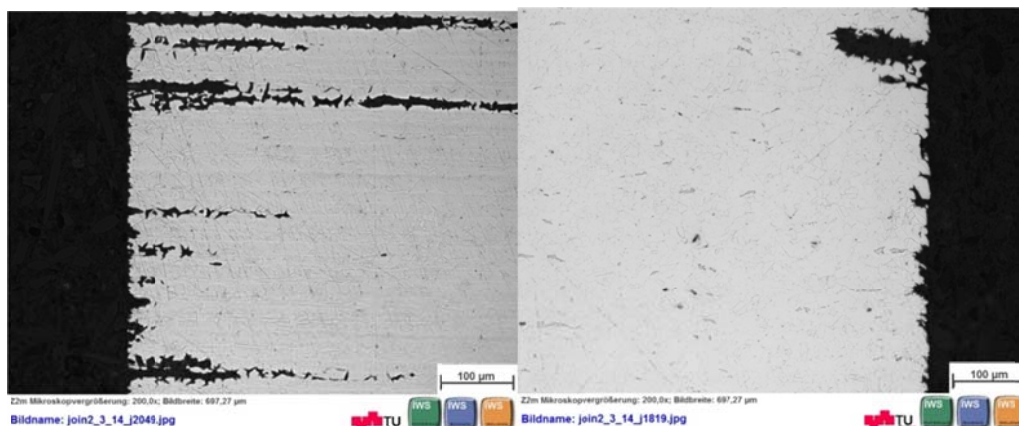


Abbildung 73 Querschliff im Lichtmikroskop nach 120h Streicher-Test an 1.4404 GW aus LRS  
links: Probe A; rechts: Probe B

#### 4.3.2.2 LRS 1.4404

Die linearreibgeschweißten Proben (LRS), die sowohl die Schweißnaht (SN) als auch die WEZ bis zum GW beinhalten, zeigen einen schwächeren Angriff im Stereomikroskop, als die GW-Proben.

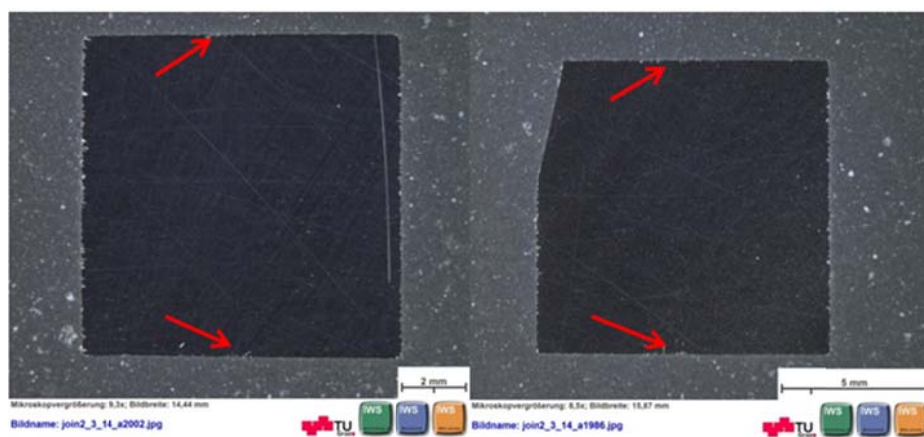


Abbildung 74 Querschliff im Stereomikroskop nach 120h Streicher-Test an 1.4404 LRS  
links: Probe A; rechts: Probe B

Die Schweißnaht zeigt etwas mehr Angriff in der Mitte der Ober- und Unterseite des Würfels, jedoch ist der Angriff von den Seiten, also dem Grundwerkstoff aus größer (

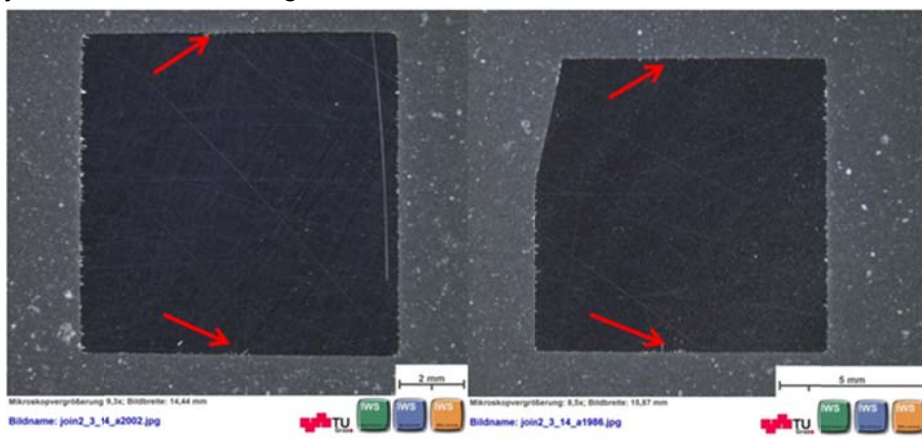
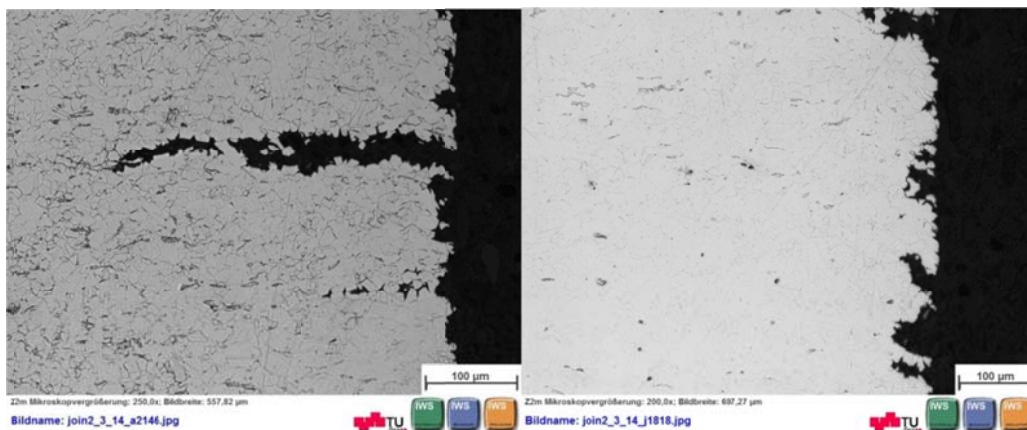


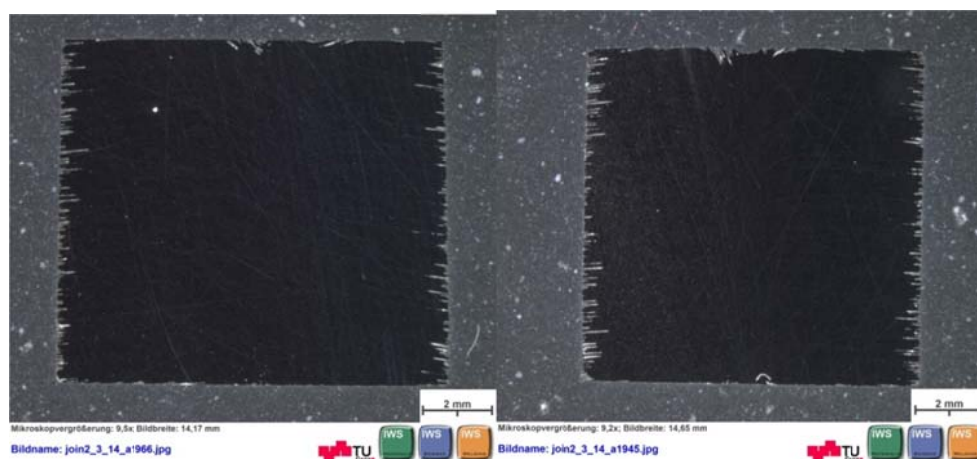
Abbildung 74 ). Der Angriff bei Probe 1 ist entlang der Schmiedestructuren zu erkennen. Bei Probe B herrscht auch eindeutig Lochkorrosion vor, jedoch gleichmäßiger verteilt, wobei die Fläche stärker abgetragen wurde. (Abbildung 75).



**Abbildung 75 Querschliff im Lichtmikroskop nach 120h Streicher-Test an 1.4404 LRS  
links: Probe A; rechts: Probe B**

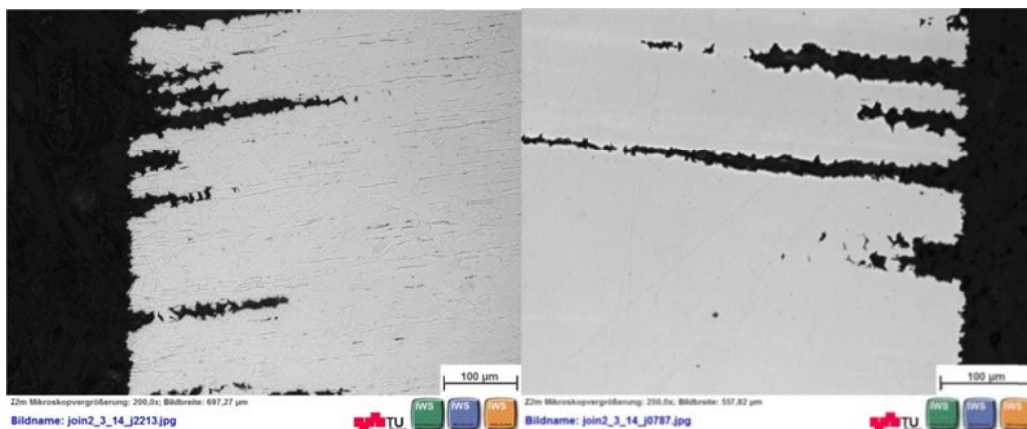
#### 4.3.2.3 RA 1.4404

Die RA-Proben (Abbildung 76) sind, wenn man die Bilder des Stereomikroskops vergleicht, am stärksten angegriffen, wobei wiederum Lochkorrosion vorliegt.



**Abbildung 76 Querschliff im Stereomikroskop nach 120h Streicher-Test an 1.4404 RA  
links: Probe A; rechts: Probe B**

Der Korrosionsangriff erfolgt entlang der längsgerichteten Strukturen (vom Drahtziehen stammend), siehe Abbildung 77.



**Abbildung 77 Querschliff im Lichtmikroskop nach 120h Streicher-Test an 1.4404 RA  
links: Probe A; rechts: Probe B**

---

### 4.3.3 ZUSAMMENFASSUNG

Aus den Werten für den Massenverlust und den lichtmikroskopischen Bildern geht hervor, dass für den Werkstoff 1.4404 die abbrennstumpfgeschweißten Kettenglieder (RA) im Bereich der Schweißzone entlang der längsgerichteten Gefügestrukturen stark angegriffen werden. Es handelt sich aber nicht um interkristalline Korrosion, sondern hauptsächlich um Lochkorrosion, d.h. der Werkstoff 1.4404 wurde *nicht* auf interkristalline Korrosion (für die der Streicher-Test vorgesehen ist), sondern auf Lochkorrosion hin sensibilisiert.

Im Vergleich der selben Proben mit den Ergebnissen aus [4] - worin der Streicher Test nur über eine Testdauer von 24h durchgeführt wurde - ergab ähnliche Gewichtsverluste, wie für die Proben in dieser Arbeit. Jedoch lag der Massenverlust des 1.4404 GW höher als in der vorliegenden Untersuchung. Dies hängt damit zusammenhängen, dass die GW für die Tests in [4] aus RA-Kettengliedern und in der vorliegenden Arbeit aus LRS-Kettengliedern entnommen wurden. In den mikroskopischen Bildern ist Lochfraß zu erkennen, jedoch nur in geringem Maße.

## 4.4 CHEMISCHER TEST AUF LOCH- UND SPALTKORROSION (METHODE A UND B)

### 4.4.1 TEMPERATURVERLAUF

Bei chemischen Reaktionen kann entweder Wärme entstehen (exotherm) oder verbraucht werden (endotherm). Deshalb wurde auch der Temperaturverlauf der 6%igen Eisenchlorid Probelösung dokumentiert. Aufgezeichnet wurde die Anfangstemperatur, die Temperaturen nach 24h und 48h, sowie die Endtemperatur nach 72h Prüfdauer. In Tabelle 18 sind der Werkstoff, die Zone und der Temperaturverlauf während der Testdauer aufgelistet.

Tabelle 18 Chem. Lochkorrosionstest / Temperaturverlauf über 72h

Methode	Werkstoff	Zone	Temperatur [°C]			
			0h	24h	48h	72h
A	1.4404	GW	24	22	22	22
		LRS	24	22	22	22
		RA	24	22	22	21
	1.4112	GW	24	21	21	21
		LRS	24	21	21	21
B	1.4404	LRS	22	21	21	21
		RA	22	20	21	21
	1.4112	LRS	22	20	21	21
			23	21	21	21

Für 1.4112 LRS wurden je zwei Temperaturverläufe notiert, da die Prüfung auf Spaltkorrosion in zwei unterschiedlichen Behältern durchgeführt wurde.

Nur am Anfang ist eine um +2°C erhöhte Temperatur bei beiden Methoden zu erkennen. Dies zeigt, dass noch etwas Restwärme von der Herstellung der Prüflösung vorhanden war. Die Temperaturen befanden sich aber eindeutig im von der Norm [56] vorgegebenen Fenster. Es wurde auch keine deutliche exotherme oder endotherme Reaktion unterschieden.

### 4.4.2 MASSENVERLUST

#### 4.4.2.1 Methode A

Die Proben wurden nach dem chemischen Test gereinigt und gewogen. Die Massen vor und nach dem Test sind Anhang D – chemischer Test auf Spalt und Lochkorrosion (Seite 112) zu entnehmen.

Aus den Massenverlusten ist ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Werkstoffen zu erkennen. Der Mittelwert der einzelnen Zonen zeigt einen besseren Überblick, der es ermöglicht zwischen den einzelnen Schweißverfahren zu unterscheiden. Die Mittelwerte der einzelnen Zonen und deren Standardabweichung sind in Tabelle 19 aufgelistet und in Abbildung 78 graphisch dargestellt.

Tabelle 19 Chem. Lochkorrosionstest Methode A / Massenverlust von Proben unterschiedl. Schweißzonen

Werkstoff	Schweißzone	Massenverlust Mittelwert [g]	Massenverlust Standardabweichung[g]	Massenverlust Mittelwert in Prozent [%]
1.4404	GW	0,610	0,128	7,67
	LRS	0,750	0,102	9,42
	RA	0,594	0,041	7,60
1.4112	GW	0,660	0,263	6,78
	LRS	1,657	0,421	18,45

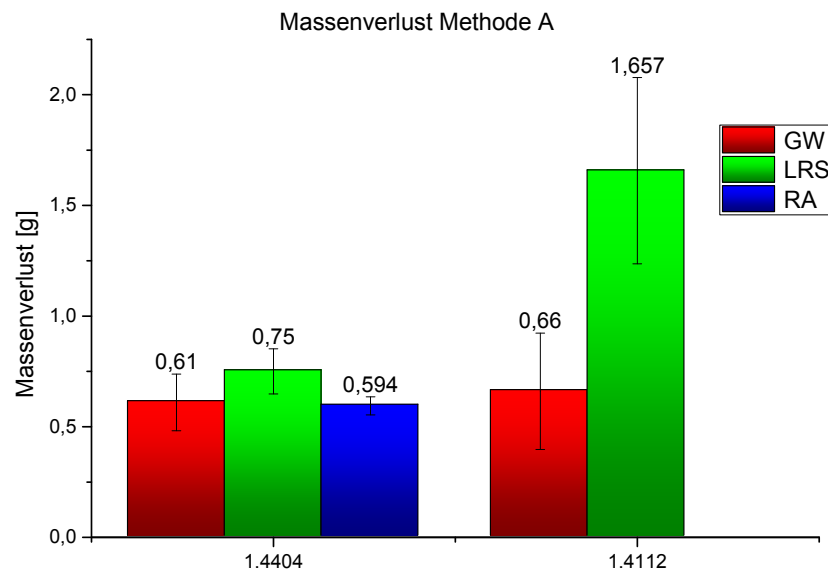


Abbildung 78 Chem. Lochkorrosionstest Methode A / Massenverlust von Proben unterschiedl. Schweißzonen

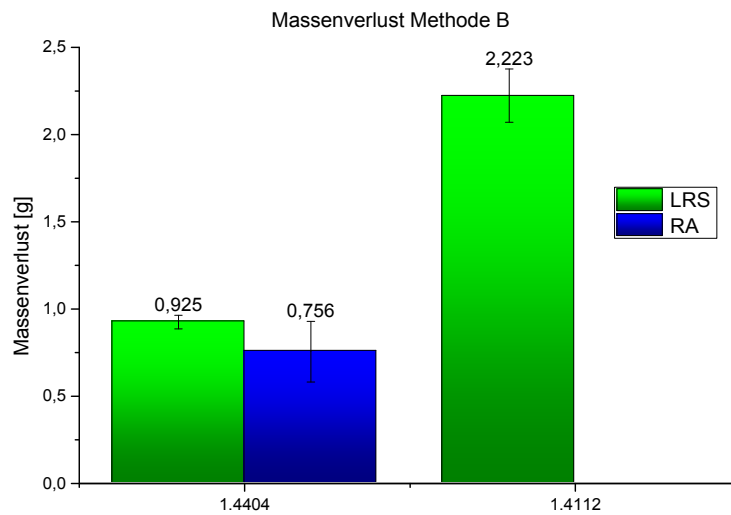
Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen den LRS Proben der beiden Werkstoffe zu erkennen. Die LRS Proben aus 1.4112 weisen einen stärkeren Massenverlust auf. In der makro- und mikroskopischen Untersuchung muss somit der Angriff identifiziert werden, ob es sich auch tatsächlich um Lochkorrosion handelt.

#### 4.4.2.2 Methode B

Die Proben wurden nach dem chemischen Test mit einer Bürste gesäubert und gewogen. In Anhang D – chemischer Test auf Spalt und Lochkorrosion (Seite 112) finden sich die Massen vor und nach dem chemischen Test, sowie der prozentuelle Massenverlust. Auch hier ist wieder ein deutlicher Unterschied zwischen den Werkstoffen zu erkennen. Die Mittelwerte und Standardabweichungen für den Massenverlust bei Methode B sind in Tabelle 20 aufgelistet und in Abbildung 79 dargestellt.

Tabelle 20 Chem. Lochkorrosionstest Methode B / Massenverlust von Proben unterschiedl. Schweißzonen

Werkstoff	Schweißzone	Massenverlust Mittelwert [g]	Massenverlust Standardabweichung [g]	Massenverlust Mittelwert in Prozent [%]
1.4404	LRS	0,925	0,039	7,02
	RA	0,756	0,174	9,61
1.4112	LRS	2,223	0,154	18,91



**Abbildung 79 Chem. Lochkorrosionstest Methode B / Massenverlust von Proben unterschiedl. Schweißzonen**

Die Mittelwerte zeigen eindeutig, dass der Werkstoff 1.4112 einen stärkeren Massenverlust in dieser Prüflösung zeigt. Auch hier muss der Angriff über makro- und mikroskopische Untersuchungen identifiziert werden.

#### 4.4.3 LOCHDICHTE – METHODE A

##### 4.4.3.1 Referenzprobe 1.4404 LRS 1

Die folgende Auswertung wurde mit Hilfe des Programmes AXIO VISION 4.8.2 64Bit erstellt. Es konnte die Anzahl der Löcher und die Größe der Probenfläche aufgrund des Kontrastunterschiedes ermittelt werden. Dies ermöglicht es, die Lochdichte für jede einzelne Seitenfläche zu ermitteln. Die Löcher, die am Rand liegen, werden nicht gewertet, da sie laut Norm nicht miteinbezogen werden dürfen [56].

Im Zuge der Auswertung wurden folgende Schritte durchgeführt:

- Auswählen des Hintergrundes
- Löcher aus der Probenfläche auswählen
- Löcher genau auswählen (händisch oder durch Kontrastoptimierung)
- Export der Daten

Um einen ungefähren Sicherheitsgrad zu erlangen und eine Reproduzierbarkeit der Auswertung zu gewährleisten, wurde eine Seitenfläche der LRS 1 Probe aus dem Werkstoff 1.4404 mehrfach ausgewertet (Tabelle 21). Vier unterschiedliche Stereobilder wurden aufgenommen und mit Hilfe des Programmes ausgewertet. Die Bilder zeigen immer die gleiche Seite.

**Tabelle 21 Lochdichte Methode A / Auswertung Referenzprobe 1.4404 LRS 1**

Bildnummer	Seitenfläche [cm <sup>2</sup> ]	Lochanzahl	Lochdichte [Anzahl/cm <sup>2</sup> ]
2015	0,94	29	31
2023	0,96	28	29
2030	0,96	29	30
2047	0,95	28	29

Die Standardabweichung bei der Lochdichte beträgt  $\pm 1$ . Somit kann man sagen, dass die Dichte mit einer Sicherheit von  $\pm 1$  [Anzahl/cm<sup>2</sup>] bestimmbar ist. In Abbildung 80 sieht man ein Beispiel der Auswertung für LRS 1 aus 1.4404.



Abbildung 80 Lochdichte Methode A / LRS1 Referenzseite (Ursprungsbild und Auswertebild)

Die Proben sind würfelig und nur auf vier der sechs Seitenflächen befindet sich die jeweilige Schweißnaht. Beim Grundwerkstoff hingegen können alle sechs Seiten miteinbezogen werden.

Die Auswertung der Lochdichte, der Seitenfläche und die Lochzahl für jede einzelne Probe ist in Anhang D – chemischer Test auf Spalt und Lochkorrosion (Seite 112) zu finden. Die Ergebnisse der Zonen für die einzelnen Werkstoffe werden in den folgenden Kapiteln zusammengefasst. Für Proben, die eine Schweißnaht enthalten sind in diesen Tabellen zusätzlich die Seitenflächen mit „SN“ gekennzeichnet bzw. mit „GW“.

#### 4.4.3.2 1.4404 Zusammenfassung GW

Die Probe **GW1** hat eine Seitenfläche, die nicht gewertet werden konnte, da sie keinen Angriff zeigt (Abbildung 81). Es muss hier nicht die SN identifiziert werden, und somit können alle sechs Seiten miteinbezogen werden. Der Angriff ist ungleichmäßig auf die Seiten verteilt. Es waren hauptsächlich große Angriffsherde zu erkennen. Einen guten Überblick über den Angriff auf GW1 gibt in Abbildung 81 das rechte Bild.



Abbildung 81 Lochdichte Methode A / 1.4404 GW 1; links: Seite 3; rechts: Seite 6

An **GW2** (Abbildung 82) zeigen zwei der sechs Seiten keinen Angriff. Auch die anderen Seiten sind nur schwach angegriffen, wie die Lochdichte zeigt. Die auftretenden Löcher sind wieder eher klein.





Abbildung 82 Lochdichte Methode A / 1.4404 GW 2; links: Seite 5; rechts: Seite 6

Es zeigt sich bei der Probe **GW3** (Abbildung 83), dass vier der sechs Flächen nicht ausgewertet werden können. Fläche 2,4 und 5 zeigen keinen Angriff. Fläche 1 zeigt einen Angriff, der von der Seitenkante ausgeht und sich über einen Großteil der Fläche hinweg zieht. Dies kann auch nicht ausgewertet werden, da ja laut Norm [56] ein solcher Angriff anderweitig zu interpretieren ist und für Lochkorrosion nicht ausschlaggebend ist. Der Wert für die Lochdichte wird auf 0 gesetzt. Der Angriff wird jedoch dennoch mikroskopisch untersucht, da eindeutig Löcher an der Oberfläche zu erkennen sind.



Abbildung 83 Lochdichte Methode A / 1.4404 GW 3, Seite 1 / Angriff von Seitenkante - nicht auswertbar

Zusammenfassend ist zu bemerken, dass im Grunde nur vereinzelt ein Angriff zu erkennen war. Einige Probenflächen sind gar nicht angegriffen, wieder andere stärker. Da Seitenflächen, die nicht angegriffen wurden und solche die stärkeren Angriff zeigen gegenüber liegen, hängt dieser besondere Angriff wahrscheinlich mit der ursprünglichen Lage im Kettenglied und mit dem Gefüge zusammen, das anscheinend eine bevorzugte Angriffsrichtung zeigt. Die Tabelle 22 zeigt die Mittelwerte der Lochdichte von GW 1 bis 3.

Tabelle 22 Lochdichte Methode A / 1.4404 GW – Mittelwerte der einzelnen Proben und gesamter Mittelwert

Grundwerkstoff	Lochdichte [Anzahl/cm <sup>2</sup> ]
1	34±48
2	7±10
3	11±19
Mittelwert aus allen	<b>17±31</b>

Der gesamte Mittelwert aus allen Seitenflächen der drei Proben beträgt 17 je cm<sup>2</sup>. Nun kann dies als Grundwert für alle 1.4404 verstanden werden. Die Standardabweichungen sind teilweise sehr hoch da hier die Lochanzahl von 0 bis 129 pro cm<sup>2</sup> Maximalzahl gehen kann.

Eine würfelige Probe besteht aus sechs Seitenflächen. Vier dieser Seitenflächen zeigen eine Schweißnaht über die Mitte verlaufend. Ohne mikroskopische Untersuchung kann schwer eine Aussage darüber getroffen werden, wo ein Angriff vorzugsweise stattfindet. Das bedeutet an so einer Seitenfläche mit SN befindet sich auch die Wärmeeinflusszone und ein Teil des GW. Die Seiten mit nur GW werden an in dieser Auswertung nicht miteinbezogen. Bei RA und LRS Proben war die Schweißnaht nicht gut erkennbar. Es musste die Oberfläche mit Adler makroätzt werden, um die Flächen, die eine SN beinhalten zu identifizieren.

#### 4.4.3.3 1.4404 RA - Zusammenfassung

Bei Probe **RA1** tritt auf Seite 4 ein Loch auf, das vom Rand ausgeht. Somit ist die Auswertung für diese Seite nicht durchführbar. Es handelt sich dabei um eine Seite mit SN. Die restlichen Seiten zeigen kleine Angriffsherde. (Abbildung 84) Die Seiten mit GW bleiben um den Mittelwert.

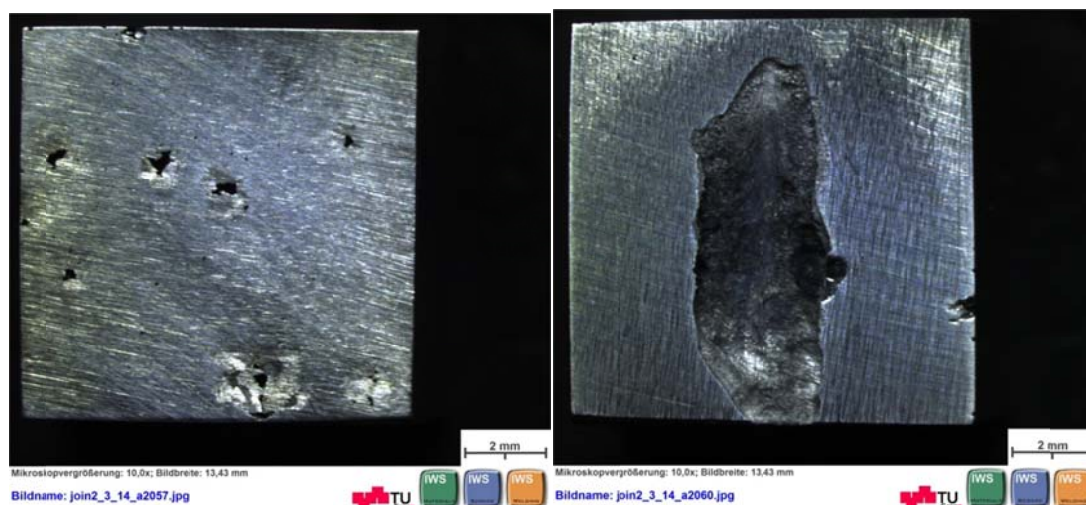


Abbildung 84 Lochdichte Methode A / 1.4404 RA 1 links Seite1; rechts Seite 4

Bei der Probe **RA 2** ist auf Fläche 4 und 6 ist kein Angriff zu erkennen, auf Fläche 1 ist der Angriff von einer Kante ausgehend und somit nicht auswertbar, dabei handelt es sich jedoch um eine Fläche aus Grundwerkstoff und somit ist der Ausfall dieser Werte nicht so gravierend. Dies bedeutet, dass bei dieser Probe im Grunde nur zwei Flächen mit SN auf die Lochdichte Einfluss nehmen. Der Angriff auf die Seitenflächen mit SN ist nur schwach.

Auch bei Probe **RA3** kann eine Seitenfläche nicht ausgewertet werden, da der Angriff von einer Seitenkante ausgeht. Es handelt sich hierbei um Fläche 2, die eine Schweißnaht beinhaltet.

Tabelle 23 Lochdichte Methode A / 1.4404 RA - Mittelwerte der einzelnen Proben und gesamter Mittelwert

RA	Lochdichte [Anzahl/cm <sup>2</sup> ]	Gültige Flächen mit SN
1	11±16	3
2	2± 3	2
3	9±13	3
Mittelwert aus allen	<b>8±11</b>	

Der Mittelwert aus allen gültigen Flächen der RA geschweißten Proben ergibt einen Mittelwert der Lochdichte von 8 [Anzahl/cm<sup>2</sup>], siehe Tabelle 23. Dies entspricht einem geringeren Wert als die Lochdichte der Grundwerkstoffe.

#### 4.4.3.4 1. 1.4404 LRS - Zusammenfassung

Bei Probe **LRS1** Fläche 4 und 6 gehen die Löcher jeweils vom Rand aus. Es handelt sich dabei um Flächen, die die LRS Schweißnaht beinhalten. Diese können somit laut Norm [56] nicht für die Mittelwertberechnung miteinbezogen werden. Es sind nur vereinzelt Angriffe auf den Seitenflächen mit SN zu sehen. Die Löcher von der Seitenkante ausgehend werden nicht gewertet. (Abbildung 85 links)

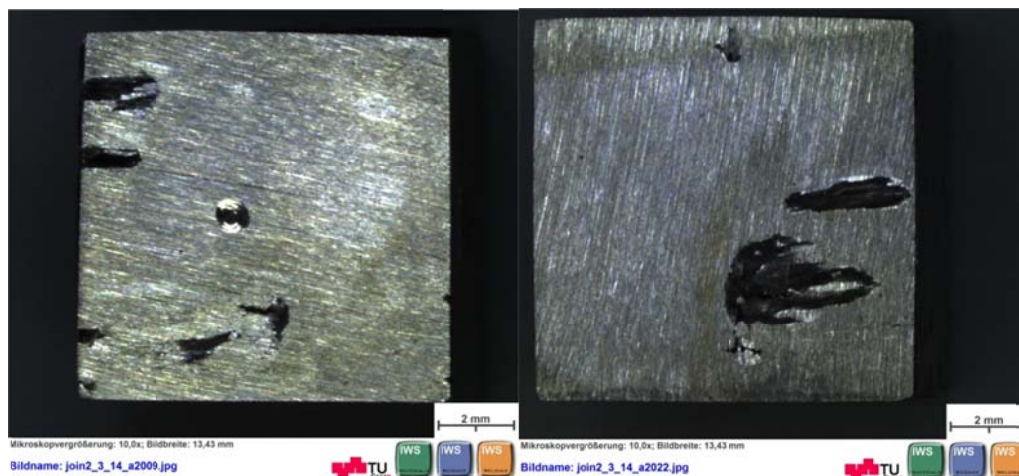


Abbildung 85 Lochdichte Methode A / 1.4404; links: LRS 1 Fläche 2; rechts: LRS 2 Fläche 4

Es können bei Probe **LRS2** die Lochdichten aller 6 Flächen berechnet werden, da keine Löcher vorhanden sind, die flächig sind und vom Rand ausgehend. Die Löcher zeigen große flächige Ausbreitung. (Abbildung 85 rechts)

Fläche 3 und 6 der Probe **LRS 3**, sind von Flächenfraß befallen, der vom Rand ausgeht. Diese beiden werden also nicht ausgewertet. Es handelt sich um eine Fläche aus GW parallel zur Schweißnaht und eine Fläche, die eine Schweißnaht beinhaltet. Die restlichen Seitenflächen mit SN zeigen Angriffe wie die restlichen LRS Proben zuvor.

Tabelle 24 Lochdichte Methode A / 1.4404 LRS - Mittelwerte der einzelnen Proben und gesamter Mittelwert

Abtrennstumpfgeschweiß	Lochdichte [Anzahl/cm <sup>2</sup> ]	Gültige Flächen mit SN
1	2±3	2
2	7±2	4
3	6±8	3
Mittelwert aus allen	<b>5±5</b>	

Der Mittelwert der Lochdichten für LRS Proben, die eine Schweißnaht beinhalten, beträgt 5 je cm<sup>2</sup> und somit geringer als für RA Proben. Die LRS-Proben weisen also geringere Lochdichte als die RA-Proben. Beide Schweißnahtproben zeigen geringere Lochdichte als der GW.

#### 4.4.3.5 1.4112 GW - Zusammenfassung

Bei der Probe GW1 für den Werkstoff 1.4112 können alle sechs Flächen zur Berechnung der Lochdichte miteinbezogen werden. Der Angriff zeigt fein verteilte kleine Löcher und auch größere Angriffsstellen, wie auf Fläche 2 in Abbildung 86 links zu erkennen ist, die den stärksten Angriff auf dieser Probe zeigt oder große Löcher, dargestellt in Abbildung 86 rechts.



Abbildung 86 Lochdichte Methode A / 1.4112 GW 1; links Fläche 2; rechts Fläche 3

Auf Fläche 1 und 6 sind auf Probe **GW 2** (Abbildung 87) jeweils keine Angriffe auf die Probe zu erkennen. Fläche 4 zeigt den auffälligsten Angriff, wobei Fläche 2 den größten Angriff zeigt. Die Lochdichten stimmen mit Probe GW1 des Werkstoffes ungefähr überein.

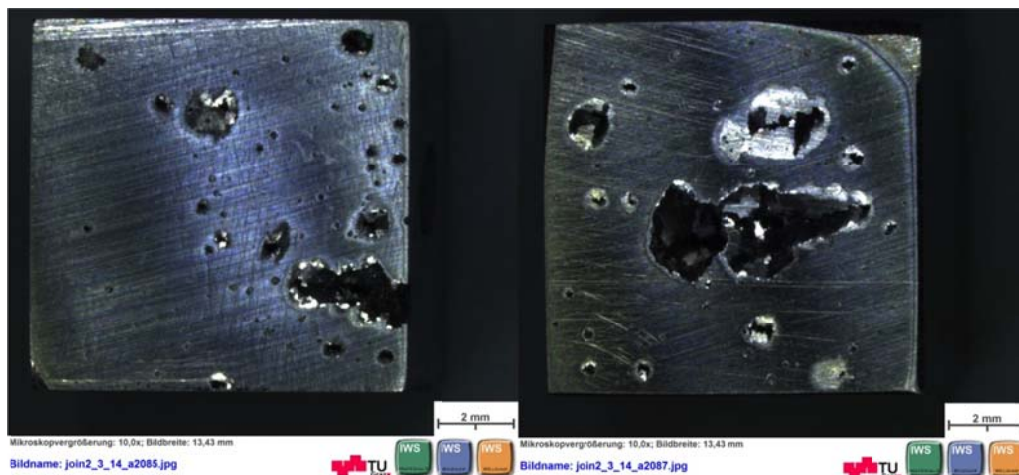


Abbildung 87 Lochdichte Methode A / 1.4112 GW 2; links: Fläche 2; rechts: Fläche 4

Die Probenflächen 3 und 5 von Probe **GW3** zeigen jeweils einen flächigen Angriff, der dazu führt, dass diese Probenflächen nicht ausgewertet werden können, da sich dieser Angriff vom Rand ausgeht.

Tabelle 25 Lochdichte Methode A / 1.4112 GW - Mittelwerte der einzelnen Proben und gesamter Mittelwert

Grundwerkstoff	Lochdichte [Anzahl/cm <sup>2</sup> ]
1	9±12
2	14±17
3	7± 7
Mittelwert aus allen	<b>10±12</b>

Die mittlere Lochdichte für GW aus 1.4112 beträgt 10 je cm<sup>2</sup> was geringer ist, als die mittlere Lochdichte des GW aus 1.4404.

#### 4.4.3.6 1.4112 LRS 1-3

Die Proben aus 1.4112, die linear reibgeschweißt wurden, zeigen einen großen flächigen Abtrag am Grundwerkstoff und teils zur Schweißnaht hin. Letztere ragt aus der Probe heraus, was darauf hindeutet, dass die SN und WEZ Korrosionsbeständiger sind als GW, der auch starke Flächenkorrosion zeigt. Alle drei Proben zeigen das gleiche Phänomen auf den vier Flächen, an denen eine SN vorliegt. Auf den GW Seitenflächen, parallel zur Schweißnaht, sind nur die schwarze Farbe vom anhaftenden bzw. schwer zu entfernenden Korrosionsprodukt und teilweise Angriffe zu erkennen.

Eine Auswertung über den Kontrast mit Hilfe des Programmes AXIO VISION 4.8.2 64Bit ist demnach in diesem Falle nicht möglich. Es handelt sich beim Angriff um eine Korrosionsart, die stark flächenabtragend wirkt. Es wird interkristalline Korrosion vermutet, die aber erst durch mikroskopische Untersuchungen in den Querschliffe im folgenden Kapitel Identifizierung des Korrosionsanriffes bestätigt wird.

#### 4.4.4 IDENTIFIZIERUNG DES KORROSIONSANGRIFFES

Querschliffe zur Identifikation des Korrosionsanriffes wurden angefertigt. Ein Querschnitt relativ zur SN wurde durchgeführt, die in Abbildung 88 links als brauner Strich durch die Mitte der Probe zu erkennen ist. Um die Flächen auch unter dem Mikroskop eindeutig zuordnen zu können, wurde eine Legende für jede Probe angefertigt. (Abbildung 88 rechts)

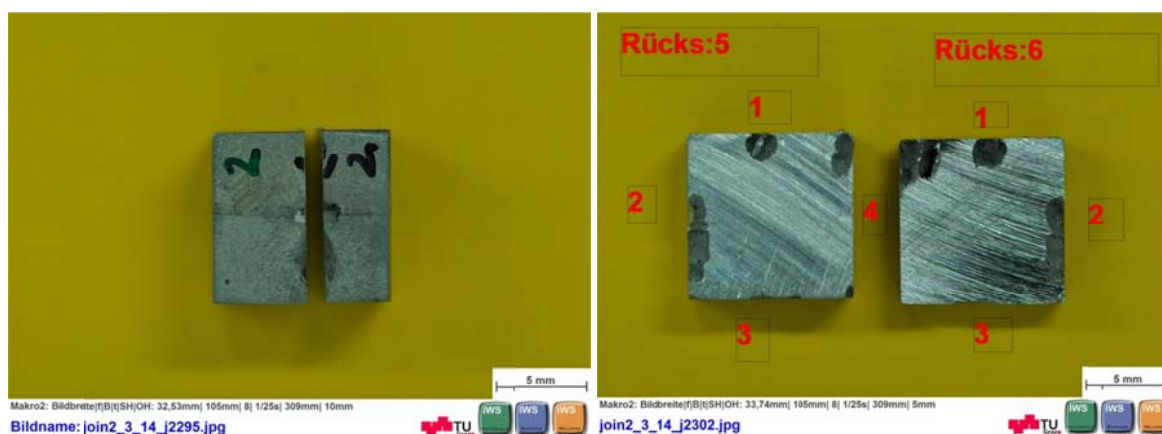
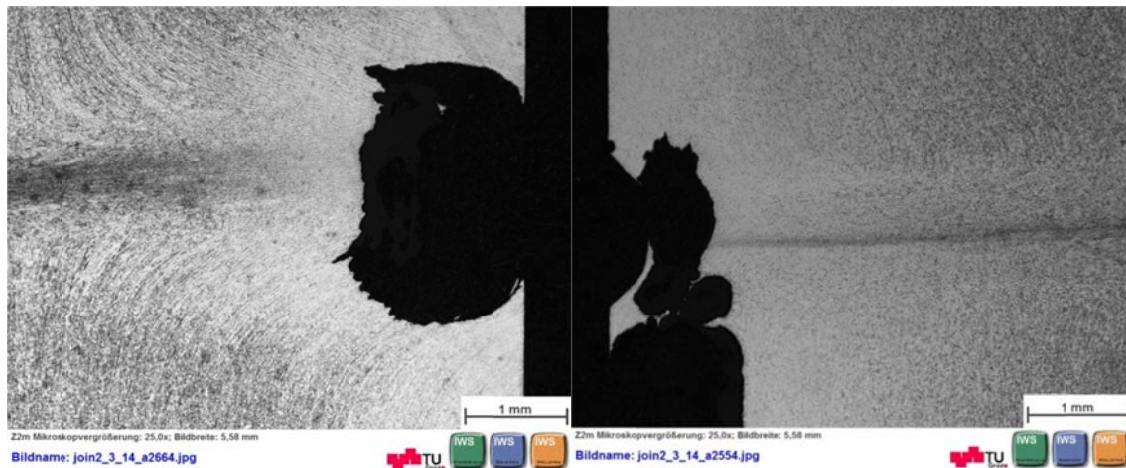


Abbildung 88 Chem. Lochkorrosionstest Methode A / links: Schnittlage durch 1.4404 LRS 1; rechts: Querschnitte LRS 1 aus links

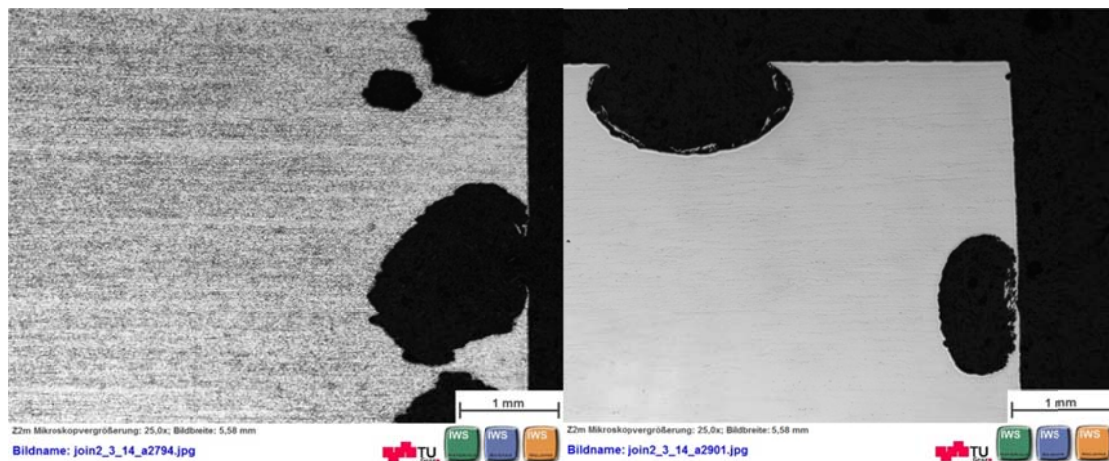
Im Grundwerkstoff des 1.4404 (Abbildung 90 links), sowie auch an den Schweißzonen konnte eindeutig Lochkorrosion identifiziert werden, wobei der Angriff unterschiedlich stark auftritt.

Bei RA-Proben wurde hauptsächlich die SN angegriffen, wobei die restlichen zwei Flächen nur kleine Löcher aufweist. Bei LRS-Proben waren die SN selbst weniger oft angegriffen,

jedoch die WEZ, die dann ein Fortpflanzen des Lochangriffes in die SN ermöglichte. Oft war jedoch die SN und die WEZ nur schwach angegriffen. (Abbildung 89)



**Abbildung 89 Chem. Lochkorrosionstest Methode A/ 1.4404 Querschliffe geätzt mit V2A; links SN von RA 1; rechts SN von LRS 2**



**Abbildung 90 Chem. Lochkorrosionstest Methode A / Querschliffe links 1.4404 GW1; rechts 1.4112 GW 1**

Der GW aus 1.4112 zeigte Lochkorrosion (Abbildung 90 rechts), mit tiefen vereinzelt Löchern auf den Seitenflächen, jedoch auch kleinere Löcher konnten gefunden werden. Die LRS Proben dieses Werkstoffes zeigten jedoch eindeutig interkristalline Korrosion. Starker Flächenabtrag war an der gesamten Probe erkennbar, jedoch war der interkristalline Korrosionsangriff eindeutig an der SN und der WEZ zu finden. (Abbildung 91)

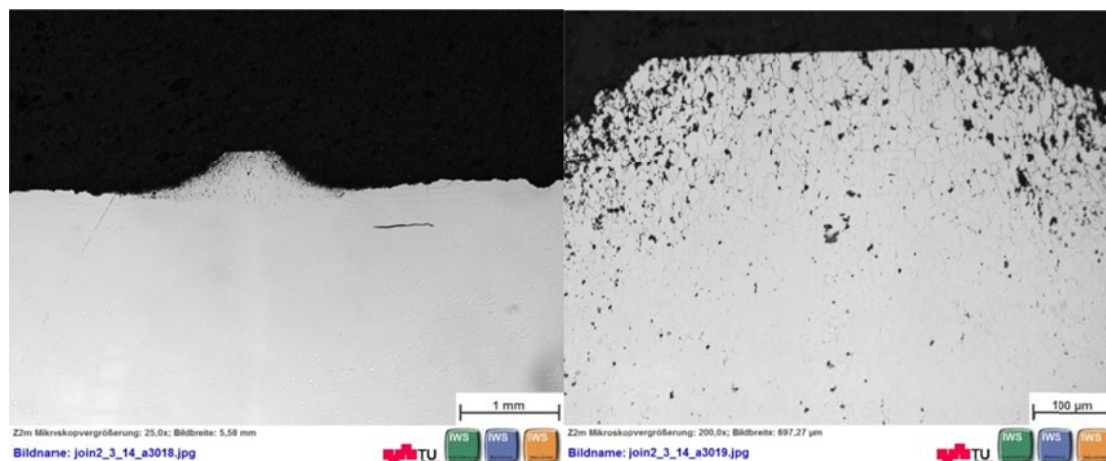


Abbildung 91 Chem. Lochkorrosionstest Methode A / 1.4112 LRS3 IK Korrosion; li.SN und WEZ; re. Detail

#### 4.4.5 MITTLERE UND MAXIMALE LOCHTIEFE – METHODE A

Die mittlere und maximale Lochtiefe für Methode A werden an Hand von Querschliffe im Lichtmikroskop vermessen. Wobei natürlich mit dieser Methode nur Löcher erfasst und vermessen werden können, die in der Schnittebene liegen. Es wurde aber darauf geachtet, die Schnitte so repräsentativ wie möglich zu wählen. Die Messungen wurden mit der programm-internen Bemaßung von AXIO VISION 4.8.2 64Bit durchgeführt.

Die Auswertung erfolgte so, dass die in der mikroskopischen Untersuchung ermittelten Daten in einer Tabelle zusammengefasst und die Mittelwerte berechnet wurden. Für jede einzelne Fläche wurden die Tiefen der Proben miteinbezogen und somit die Mittelwerte berechnet. Der maximale Wert der Lochtiefe kann direkt aus den Bildern entnommen werden und braucht keine weitere mathematische Auswertung. Durch Ätzung der Bilder kann die Lage der Schweißnaht bestimmt werden. Die LRS Proben aus 1.4112 konnten nicht untersucht werden, da sie, wie im vorigen Kapitel festgestellt, interkristalline Korrosion zeigen.

In Anhang D – chemischer Test auf Spalt und Lochkorrosion (Seite 112ff) sind die Proben aufgelistet mit deren mittleren Lochtiefen, der ausgewerteten Lochanzahl sowie die jeweilige maximale Lochtiefe. Aus Tabelle 26 sind die mittleren und maximalen Lochtiefen für die jeweilige Zone aufgelistet.

Tabelle 26 Lochtiefen Methode A / Mittelwerte der mittleren und maximalen Lochtiefen

Werkstoff	Zone	Max. Lochtiefe [mm]	Mittlere Lochtiefe [mm]
1.4404	GW	2,58	1,23
	LRS	2,26	0,74
	RA	2,13	0,97
1.4112	GW	3,23	0,90

Die größten Lochtiefen waren beim GW 1.4112 zu finden. Beim 1.4404 zeigte ebenfalls der GW die größte Tiefe, gefolgt von den LRS-Proben. Die Löcher der RA -Proben von 1.4404 haben die geringster Tiefe. Die größte mittlere Lochtiefe zeigte der GW 1.4404, gefolgt von den RA- und den LRS-Proben. Die Proben von GW 1.4112 zeigten eine mittlere Lochtiefe, die zwischen jenem von GW 1.4404 und den RA 1.4404 liegen

#### 4.4.6 SPALTTIEFE METHODE B

Aus Bildern im Stereomikroskop bei zirka 5x Vergrößerung, wurden die Spalte, die durch die aufgesetzten TFE-Zylinder (vgl. Abbildung 45) verursacht werden, vermessen. Die Besonderheit, die sich gezeigt hat war, dass sich bei den 1.4404 Proben Spalte mehr oder weniger ausgebildet haben (Abbildung 92). Bei den 1.4112 Proben war keine Spaltkorrosion zu beobachten. Das Material wurde außerhalb und innerhalb des Spaltes gleichmäßig abgetragen. Wobei der Angriff in der WEZ besonders stark ist, wie in Abbildung 93 gut zu erkennen ist.

Auf den Proben aus 1.4404 konnte zum einen Spaltkorrosion durch die Gummiringe, als auch durch die Spaltbildner erzeugt werden. Lochkorrosion tritt nur vereinzelt auf und nur in Bereichen nahe den Gummiringen, was darauf zurückzuführen ist, dass an diesen Orten die Konzentration aufgrund des Korrosionsvorganges im Elektrolyten variiert.

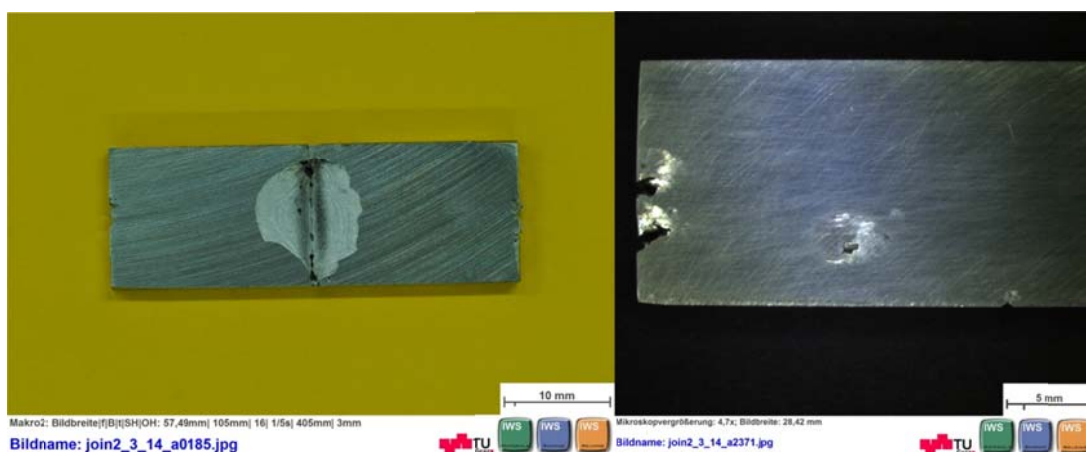


Abbildung 92 Spalttiefe Methode B / 1.4404 LRS A; li. Makrofoto; re. Detail im Stereomikroskop



Abbildung 93 Spalttiefe Methode B / 1.4112 LRS A

In Tabelle 27 findet man die Mittelwerte der ermittelten Spalttiefen.

Man erkennt, dass in Längsrichtung, parallel zur SN, ein deutlich geringerer Angriff im Spalt auftritt. Dies ist auf die längsgerichteten Gefügestrukturen zurück zu führen. Schon in bei den vorhergehenden Proben konnte man eindeutig erkennen, dass in Walzrichtung ein stärkerer Angriff auftritt. Somit erklären sich die höheren Spalttiefen bei 1.4404. Die Werte bei 1.4112 sind stehen heraus und somit zeigt sich, dass bei den Stellen an denen Spaltkorrosion entstehen sollte, das Material geschützt war und um diese Stellen herum ein starker Korrosionsangriff stattfand.



Tabelle 27 Spalttiefen Methode B

Material	Probe	Spalttiefe [mm]	
		Quer	Längs
1.4404	LRS A	1,04	0,25
	LRS B	2,04	0,23
	RA A	0,86	0,32
	RA B	0,87	0,44
1.4112	LRS A	-0,25	0
	LRS B	-0,22	0

#### 4.4.7 ZUSAMMENFASSUNG

##### 4.4.7.1 Methode A

Der Massenverlust gibt einen ersten Aufschluss über die Korrosionsanfälligkeit in dieser 6%igen Eisenchloridlösung. Der martensitische Werkstoff 1.4112 zeigt höheren Massenverlust bzw. Korrosionsangriff als der austenitische Werkstoff 1.4404. Die 1.4112 Proben die Schweißnähte beinhalten, verlieren im Durchschnitt mehr Masse. Beim austenitischen Werkstoff verlieren die Proben, die LRS geschweißt wurden am meisten Masse, gefolgt vom GW und den RA geschweißten Proben.

Nach Identifizierung des Korrosionsangriffes konnte festgestellt werden, dass die Proben aus 1.4404 Lochkorrosion und die Proben aus 1.4404 am GW Lochkorrosion und in der Schweißzone interkristalline Korrosion aufweisen.

Aus der bestimmten Lochdichte je Seitenfläche lässt sich schließen, wie stark der Korrosionsangriff durch Lochfraß ist. Der GW 1.4404 zeigt dabei den stärksten Korrosionsangriff, d.h. viele fein verteilte Löcher. RA geschweißte Proben liegen im Mittelfeld und zeigen meist kleinere Löcher als die bei dieser Methode beständigsten LRS- Proben die eher größere, vereinzelt Löcher zeigen. Die Lochdichte für den GW 1.4112 ist geringer als für 1.4404.

Vergleicht man die Ergebnisse der Lochdichten mit den in Querschliffen ermittelten Lochtiefen, so erhält man ähnliche Ergebnisse.

Beim Werkstoff 1.4404 zeigt sich somit, dass LRS zwar am meisten Masseverlust erleidet, jedoch den geringsten Angriff mit der geringsten Lochtiefe aufweist. Die RA-Proben zeigen den geringsten Massenverlust und mittlere Lochdichte sowie mittlere Lochtiefe. GW Proben zeigen die größte Lochdichte wie auch -tiefe. Bei LRS Proben 1.4112 ist der große Massenverlust durch den großen Flächenabtrag erklärbar. Jedoch ist hierbei keine Lochkorrosion erkennbar, sondern nur interkristalline Korrosion.

##### 4.4.7.2 Methode B

Die Längs- und Querrichtungen der Proben zeigen unterschiedlich starke Spaltkorrosion. In Querrichtung zur SN bzw. an den längsgerichteten Gefügestrukturen ist ein stärkerer Angriff zu erkennen. LRS Proben 1.4404 sind anfälliger auf Spaltkorrosion als RA, wobei erstere auch Lochkorrosion aufweisen. Die LRS Proben aus 1.4112 zeigten nur geringe Sensibilisierung auf Spaltkorrosion und hauptsächlich Flächenabtrag.

---

## 5 ZUSAMMENFASSUNG

### 5.1 VERGLEICHBARKEIT DER METHODEN

Ein wesentliches Ziel dieser Arbeit war es die einzelnen Korrosionsprüfmethoden untereinander zu vergleichen und deren Aussagekraft zu evaluieren.

Mit den durchgeführten elektrochemischen Methoden (DL-EPR Test und Elektrochemischer Lochkorrosionstest) kann die Sensibilisierung und die dabei ablaufenden Reaktionen überprüft werden. Jedoch ist die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse relativ schwierig, wobei viele Informationen erlangt werden können. Bei den chemischen Tests (Streicher-Test und Chemischer Test auf Loch- und Spaltkorrosion) liegt der Vorteil darin, dass die Versuche beim freien Korrosionspotential durchgeführt werden, wobei das Korrosionsmedium meist nicht mit den realen Bedingungen vergleichbar ist.

Die Auswertung der Ergebnisse ist für den chemischen Lochkorrosionstest sehr aufwendig und zeitintensiv. Im Vergleich dazu ist die Auswertung des Streicher-Tests einfach und die dabei ermittelte Korrosionsrate eine praktisch gut verwertbare Größe zur Beurteilung der Korrosionsbeständigkeit.

Somit ist also je nach Anwendungsfall zu entscheiden welche Korrosionsprüfmethode verwendet werden und inwieweit diese die Details der Korrosionsvorgänge analysieren soll.

### 5.2 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

Unabhängig von den Korrosionsprüfmethoden zeigt der rostbeständige austenitische Werkstoff 1.4404 Loch- und Spaltkorrosion und der rostbeständige martensitische Werkstoff 1.4112 bevorzugt interkristalline Korrosion. Nur beim chemischen Test auf Loch- und Spaltkorrosion wurde der Grundwerkstoff auf Lochkorrosion sensibilisiert. Dies ist auf die Eisenchloridlösung und auf die lange Dauer des Tests zurück zu führen.

Beim Vergleich der Ergebnisse zwischen elektrochemischen und chemischen Tests ist zu beachten, dass bei den Letzteren stets die Wärmeeinflusszonen (WEZ) und die Schweißnähte (SN) zusammen geprüft wurden und die Ergebnisse somit die gesamte Schweißzone umfassen, wohingegen bei den elektrochemischen Tests eine Prüfung der jeweiligen Zone durchgeführt werden konnte.

Beim Werkstoff 1.4404 ist zwischen den beiden Schweißverfahren Lineares Reibschweißen (LRS) und Abbrennstumpfschweißen (RA) zu unterscheiden. RA-Proben zeigen bei den Tests auf interkristalline Korrosion zwar auch Lochkorrosion, jedoch ist die Sensibilisierung höher. Bei den Untersuchungsmethoden auf Lochkorrosion zeigen die LRS-Proben eine stärkere Sensibilisierung.

Der Werkstoff 1.4112 ist demnach nicht in starken Korrosionsmedien einsetzbar und soll nur in schwach korrosiven Medien bei Raumtemperatur verwendet werden. Der Werkstoff 1.4404 ist hingegen beständig gegen interkristalline Korrosion, wobei die Beständigkeit durch die Schweißverfahren nur wenig beeinflusst wird.

Je nach Medium und Anwendung sollte über den Werkstoff und die Fügemethode entschieden werden.

## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] E. Wendler-Kalsch and H. Gräfen, *Korrosionsschadenkunde*. Springer, 1998.
- [2] K. Mucic, F. Fuchs, and N. Enzinger, "AN INNOVATIVE APPROACH OF JOINING CHAINS USING," in *International Congress New Delhi*, 2014.
- [3] K. Mucic, N. Enzinger, and F. Fuchs, "Linear Friction Welding of High Strength Chains," *Trends Weld. Res. Proc. 9th Int. Conf.*, pp. 752–756, 2013.
- [4] W. Huemer, "Einfluss des linearen Reibschweißens und Abbrennstumpfschweißens auf die Korrosionsbeständigkeit von 1.4404 und 1.4112 Kettenglieder," Projektarbeit, Projekt 2.3, Join4+, 2014.
- [5] H. Briehl, *Chemie der Werkstoffe*. Vieweg+Teubner Verlag, 2007.
- [6] "DIN EN ISO 8044:2015-02 Korrosion von Metallen und Legierungen - Grundbegriffe," 2015.
- [7] W. Weißbach, "Werkstoffkunde," 18th ed., Vieweg + Teubner, 2012, pp. 323–338.
- [8] F. Tödt, *Korrosion und Korrosionsschutz*, 2nd ed. Gruyter, Walter de GmbH, 1961.
- [9] K. Bobzin, "Oberflächentechnik für den Maschinenbau," 2013, pp. 65–130.
- [10] T. Gerthsen, "Chemie für den Maschinenbau," Univ.-Verlag Karlsruhe, 2006, pp. 429–434.
- [11] P. Maaß and P. Peißker, "Handbuch Feuerverzinken," Wiley, 2012, p. 498.
- [12] P. Kurzweil and P. Scheipers, *Chemie - Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente*, 9. Auflage. Vieweg + Teubner, 2012.
- [13] C. H. Hamann and W. Vielstich, *Elektrochemie*, 4th ed. John Wiley & Sons Australia, Limited, 2005.
- [14] G. Neroth and D. Vollenschaar, "Korrosion der Metalle," in *Wendehorst Baustoffkunde*, 2011, pp. 735–749.
- [15] B. Elsener, "Grundlagen der Korrosion der Metalle," *Metall*, pp. 1–25, 2011.
- [16] J. E. O. Mayne, "Die Korrosion der Metalle. Physikalisch-chemische Prinzipien und aktuelle Probleme," *British Corrosion Journal*, vol. 3, no. 2. pp. 101–101, 1968.
- [17] G. Schwedt, "Analytische Chemie: Grundlagen, Methoden und Praxis," 2.Auflage ed., Wiley-VCH Verlag GmbH, 2008, pp. 158–161.
- [18] W. Bechmann and J. Schmidt, *Einstieg in die Physikalische Chemie für Nebenfächler*. Vieweg+Teubner Verlag, 2010.
- [19] G. Kickelbick, "Chemie für Ingenieure," Pearson Studium, 2008, p. 231f.
- [20] E. Macherauch and H. Zoch, "V68 Stromdichte-Potenzial-Kurven," 2011, pp. 421–429.
- [21] ASTM International, "Standard Test Method for Electrochemical Critical Pitting Temperature Testing of," *Astm G 150*, vol. 99, pp. 1–13, 2004.
- [22] T. Spenger, "Untersuchungen an linearreibgeschweißten Kettengliedern aus 1.4404 und 1.4112," Graz University of Technology, 2013.
- [23] J. K. L. Lai, "A review of precipitation behaviour in AISI type 316 stainless steel," *Mater. Sci. Eng.*, vol. 61, no. 2, pp. 101–109, Nov. 1983.
- [24] K. H. Lo, C. H. Shek, and J. K. L. Lai, "Recent developments in stainless steels," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 65, no. 4–6, pp. 39–104, May 2009.
- [25] A. F. Padilha, D. M. Escriba, E. Materna-Morris, M. Rieth, and M. Klimenkov, "Precipitation in AISI 316L(N) during creep tests at 550 and 600°C up to 10 years," *J. Nucl. Mater.*, vol. 362, no. 1, pp. 132–138, May 2007.
- [26] R. L. Plaut, C. Herrera, D. M. Escriba, P. R. Rios, and A. F. Padilha, "A Short review on wrought austenitic stainless steels at high temperatures: processing, microstructure, properties and performance," *Mater. Res.*, vol. 10, no. 4, pp. 453–460, Dec. 2007.
- [27] M. Matula, L. Hyspecka, M. Svoboda, V. Vodarek, C. Dagbert, J. Galland, Z. Stonawska, and L. Tuma, "Intergranular corrosion of AISI 316L steel," *Mater. Charact.*, vol. 46, no. 2–3, pp. 203–210, Feb. 2001.
- [28] G. H. Aydoğdu and M. K. Aydinol, "Determination of susceptibility to intergranular corrosion and electrochemical reactivation behaviour of AISI 316L type stainless steel," *Corros. Sci.*, vol. 48, no. 11, pp. 3565–3583, Nov. 2006.
- [29] H. Shaikh, N. Sivaibharasi, B. Sasi, T. Anita, R. Amirthalingam, B. P. C. Rao, T. Jayakumar, H. S. Khatak, and B. Raj, "Use of eddy current testing method in detection

- and evaluation of sensitisation and intergranular corrosion in austenitic stainless steels," *Corros. Sci.*, vol. 48, no. 6, pp. 1462–1482, Jun. 2006.
- [30] P. E. Klages, Z. Bai, M. Lobban, M. K. Rotermund, and H. H. Rotermund, "Enhancing resistance to pitting corrosion in mechanically polished stainless steel 316 LVM by water treatment," *Electrochem. commun.*, vol. 15, no. 1, pp. 54–58, 2012.
- [31] J. S. Noh, N. J. Laycock, W. Gao, and D. B. Wells, "Effects of nitric acid passivation on the pitting resistance of 316 stainless steel," *Corros. Sci.*, vol. 42, pp. 2069–2084, 2000.
- [32] J. Soltis, "Passivity breakdown, pit initiation and propagation of pits in metallic materials – Review," *Corros. Sci.*, vol. 90, pp. 5–22, Jan. 2015.
- [33] S. Paul, Q. Lu, and P. Woollin, "Electrochemical noise methods for identifying pitting limits of 316L stainless steel welds," *IIW-Doc. IX-H-764-12*, pp. 1–23.
- [34] C. Garcia, F. Martin, P. De Tiedra, Y. Blanco, and M. Lopez, "Pitting corrosion of welded joints of austenitic stainless steels studied by using an electrochemical minicell," vol. 50, pp. 1184–1194, 2008.
- [35] R. . Brigham, "Effect of Cr on the pitting resistance of austenitic stainless steels," *Corrosion Science*, vol. 15, no. 5. pp. 579–580, 1975.
- [36] B. D. Craig, D. S. Anderson, and A. S. M. International, *Handbook of Corrosion Data*. ASM International, 1994.
- [37] I. Bhamji, M. Preuss, P. L. Threadgill, and A. C. Addison, "Solid state joining of metals by linear friction welding: A literature review," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 1, pp. 2–12, 2010.
- [38] V. I. Vill, *Friction welding of metals*, vol. 1. American Welding Society; trade distributor: Reinhold Pub. Co., 1962.
- [39] B. Crossland, "Friction welding," *Contemp. Phys.*, vol. 12, no. 6, pp. 559–574, 1971.
- [40] A. Vairis and M. Frost, "On the extrusion stage of linear friction welding of Ti 6Al 4V," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 271, no. 1, pp. 477–484, 1999.
- [41] B. Awiszus, J. Bast, H. Dürr, and K. J. Matthes, "Abtrennstumpfschweißen (RA-Schweißen)," in *Grundlagen der Fertigungstechnik*, Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2012, pp. 251–254.
- [42] H. J. Fahrenwaldt, J. Twrdek, H. Wittel, and V. Schuler, "Presstumpf- und Abtrennstumpfschweißen (RPS/25 und RA/24)," in *Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Verfahren, Fertigung*, Vieweg+Teubner Verlag, 2013, pp. 88–90.
- [43] E. Vinaricky, A. Keil, and W. A. Merl, "Abtrennstumpfschweißen," in *Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen: Grundlagen, Technologien, Prüfverfahren*, Springer Berlin Heidelberg, 2002, pp. 377–378.
- [44] Y. Ichiyama, "Flash-Butt Welding of High Strength Steels," no. 95, pp. 81–87, 2007.
- [45] "DIN EN ISO 12732:2008 Corrosion of metals and alloys -- Electrochemical potentiokinetic reactivation measurement using the double loop method (based on Cihal's method)," pp. 1–18, 2008.
- [46] V. Číhal, "Potentiodynamic methods of following up intercrystalline corrosion," *Mater. Chem.*, vol. 2, pp. 121–132, 1977.
- [47] V. Číhal, J. Hubáčková, J. Kubelka, and K. Mazanec, "The potential polarization method for the evaluation of martensite-austenite stainless steels," *Mater. Chem. ....*, vol. 1, pp. 279–293, 1984.
- [48] V. Číhal and R. Štefec, "On the development of the electrochemical potentiokinetic method," *Electrochim. Acta*, vol. 46, no. 24–25, pp. 3867–3877, Aug. 2001.
- [49] V. Číhal, S. Lasek, M. Blahetová, E. Kalabisová, and Z. Krhutová, "Trends in the Electrochemical Polarization Potentiodynamic Reactivation Method – EPR," vol. 21, no. 1, pp. 47–54, 2007.
- [50] W. Huemer, "Bestimmung des elektrochemischen Korrosionsverhaltens an Stahl, Al-, Mg-Legierungen mit dem Potentiostat," Bachelorarbeit IWS TU Graz, 2015 (in Arbeit).
- [51] "DIN EN ISO 643:2013-05 Stahl - Mikrophotographische Bestimmung der erkennbaren Korngröße," 2013.
- [52] S. Schultze, "Selektive Korrosion von Duplexstahl," Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1999.

- 
- [53] A. Leitner and B. Wolfgruber, "Planung und Aufbau einer Temperaturregelung und Gasspülung für elektrochemische Korrosionsuntersuchungen," Bachelorarbeit IWS TU Graz, 2014.
- [54] R. Ovarfort, "Critical pitting temperature measurements of stainless steels with an improved electrochemical method," *Corros. Sci.*, vol. 29, no. 8, pp. 987–993, 1989.
- [55] ASTM International, "A262 - 13 Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels." p. 18.
- [56] ASTM International, "G48-11 Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution," pp. 1–11.
- [57] I. Bhamji, M. Preuss, P. L. Threadgill, R. J. Moat, A. C. Addison, and M. J. Peel, "Linear friction welding of AISI 316L stainless steel," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 528, no. 2, pp. 680–690, Dec. 2010.
- [58] R. Qvarfort, "Critical pitting temperature measurements of stainless steels with an improved electrochemical method," *Corros. Sci.*, vol. 29, no. 8, pp. 987–993, 1989.

## FORMELVERZEICHNIS

Formel 1 Verhältnis der maximalen Ströme des Passivierungs- und Reaktivierungsloops normiert auf die Korngrenzenfläche .....	34
Formel 2 Verhältnis der maximalen Ladungen des Passivierungs- und Reaktivierungsloops normiert auf die Korngrenzenfläche .....	34
Formel 3 Verhältnis der maximalen Ströme des Passivierungs- und Reaktivierungsloops normiert auf die Korngrenzenlänge .....	34
Formel 4 Verhältnis der maximalen Ladungen des Passivierungs- und Reaktivierungsloops normiert auf die Korngrenzenlänge .....	34
Formel 5 Berechnung der Korrosionsrate für Streicher-Test .....	71

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1 chemische Zusammensetzung der Stähle 1.4404 und 1.4112 .....	20
Tabelle 2 Zusammenhang zwischen $I_R/I_P$ und Sensibilisierungsgrad [43].....	35
Tabelle 3 Abmaße der Proben für den Streicher Test und die daraus berechnete Oberfläche .....	41
Tabelle 4 Masse der Proben vor dem Streicher Test.....	41
Tabelle 5 Zusammensetzung Poliermittel .....	49
Tabelle 6 Freies Korrosionspotential DL-EPR Test.....	52
Tabelle 7 DL-EPR-Test Mittelwerte der Korngrößenbestimmung - vgl. Probenübersicht Abb. 49 .....	58
Tabelle 8 DL-EPR Passivierungs- und Reaktivierungsstrom; vgl. Probenübersicht Abb. 49.	59
Tabelle 9 DL-EPR Test: Sensibilisierungsgrade für interkristalline Korrosion basierend auf dem Verhältnis der Peakströme $I_R/I_P$ .....	59
Tabelle 10 DL-EPR Test / Passivierungs- und Reaktivierungsladung .....	60
Tabelle 11 DL-EPR Test / Sensibilisierungsgrade für IK Korrosion basierend auf Ladungsverhältnis $Q_R/Q_P$ .....	61
Tabelle 12 Mittlere freie Korrosionspotential (OCP) mit Standardabweichung .....	64
Tabelle 13 Mittelwerte der Durchbruchpotentiale DBP.....	66
Tabelle 14 Differenz zwischen Durchbruchpotential DBP und freiem Korrosionspotential OCP.....	67
Tabelle 15 Streicher Test 1.4404 / Probenmassen nach Zwischen- und Endwägungen .....	71
Tabelle 16 Streicher Test 1.4404 / Massenverluste über Prüfdauer .....	71
Tabelle 17 Streicher Test 1.4404 / Korrosionsraten in Millimeter pro Monat .....	72
Tabelle 18 Chem. Lochkorrosionstest / Temperaturverlauf über 72h .....	77
Tabelle 19 Chem. Lochkorrosionstest Methode A / Massenverlust von Proben unterschiedl.Schweißzonen .....	78
Tabelle 20 Chem. Lochkorrosionstest Methode B / Massenverlust von Proben unterschiedl.Schweißzonen .....	78
Tabelle 21 Lochdichte Methode A / Auswertung Referenzprobe 1.4404 LRS 1 .....	79
Tabelle 22 Lochdichte Methode A / 1.4404 GW – Mittelwerte der einzelnen Proben und gesamter Mittelwert.....	82
Tabelle 23 Lochdichte Methode A / 1.4404 RA - Mittelwerte der einzelnen Proben und gesamter Mittelwert .....	83
Tabelle 24 Lochdichte Methode A / 1.4404 LRS - Mittelwerte der einzelnen Proben und gesamter Mittelwert .....	83
Tabelle 25 Lochdichte Methode A / 1.4112 GW - Mittelwerte der einzelnen Proben und gesamter Mittelwert.....	85
Tabelle 26 Lochtiefen Methode A / Mittelwerte der mittleren und maximalen Lochtiefe .....	87
Tabelle 27 Spalttiefen Methode B .....	89

# ANHANG

## ANHANG A – ALLGEMEINES

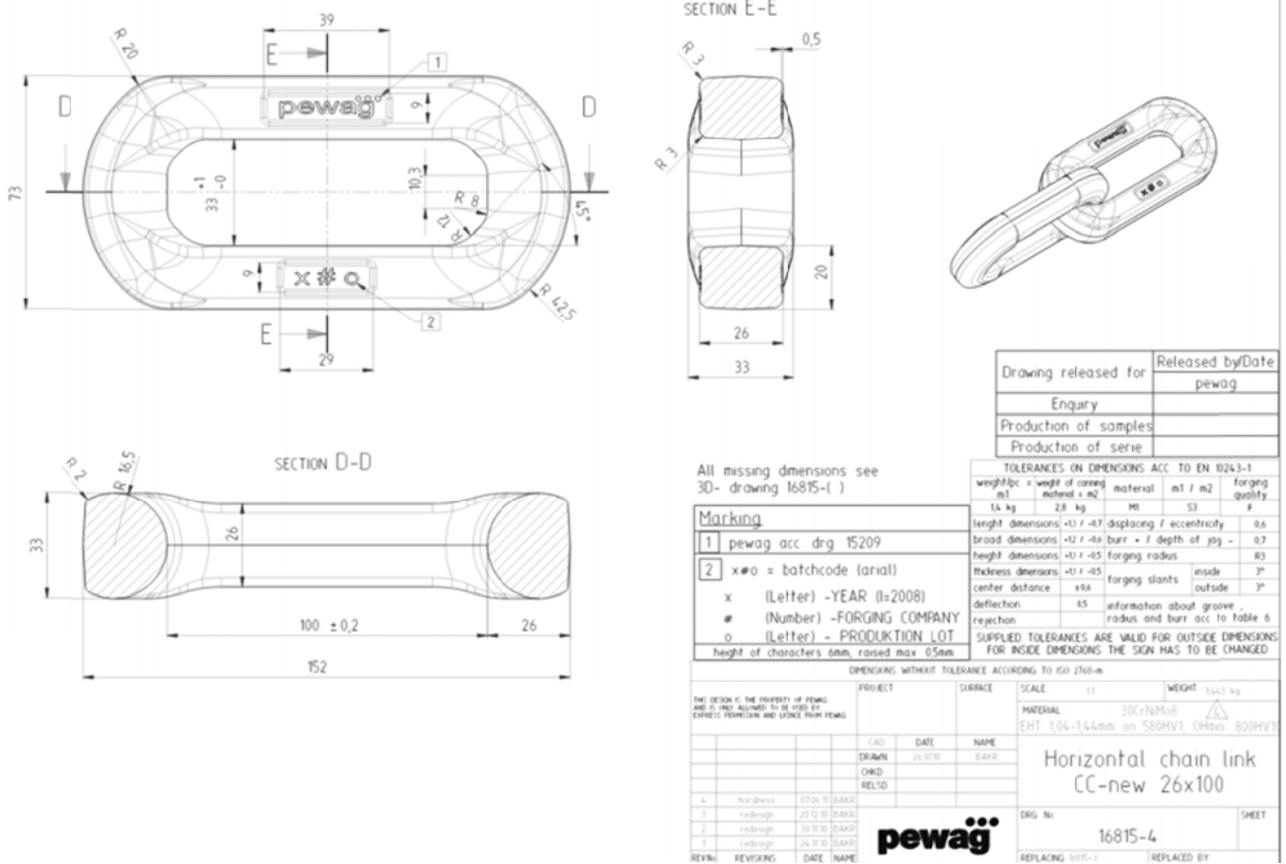


Abbildung A 1 Spezifikationen des Linarreibgeschweißten Kettengliedes

pewag-Type		HEO-G50K (Rundstahlketten)					
Type nach EN 818-1		P					
Nennstärke x Teilung	Tragfähigkeit nach Trieb- werksgruppe ISO 4301-1 (kg)				Fertigungsprüfkraft FP (kN)	Bruchkraft FB (kN)	Kettenlängen (m)
	M1	M2 / M3	M4	M5			
16 x 48	5.150	4.100	3700	3.300	127,0	201,0	50

Abbildung A 2 Spezifikationen des Abbrennstumpfgeschweißten Kettengliedes

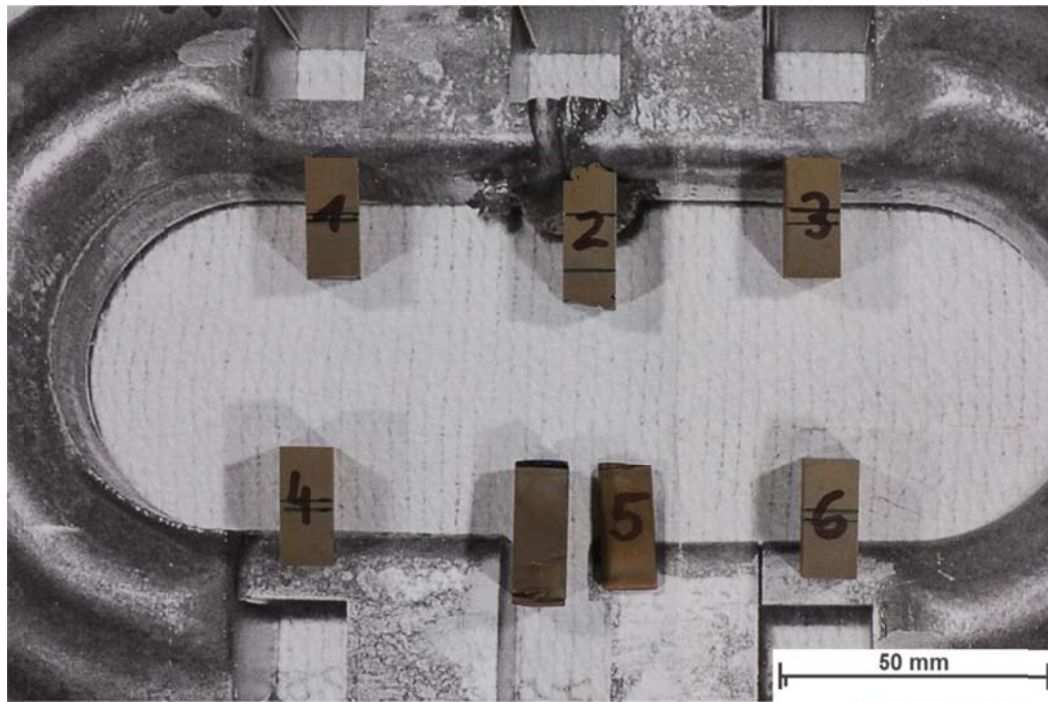


Abbildung A 3 Probeentnahme für elektrochemische Tests aus 1.4112 LRS:  
Kettengleid Nr 26; GW (A,D), WEZ (C,F), SN (B,E) [4]



Abbildung A 4 Probeentnahme für chemische Korrosionstests 1.4404 LRS GW



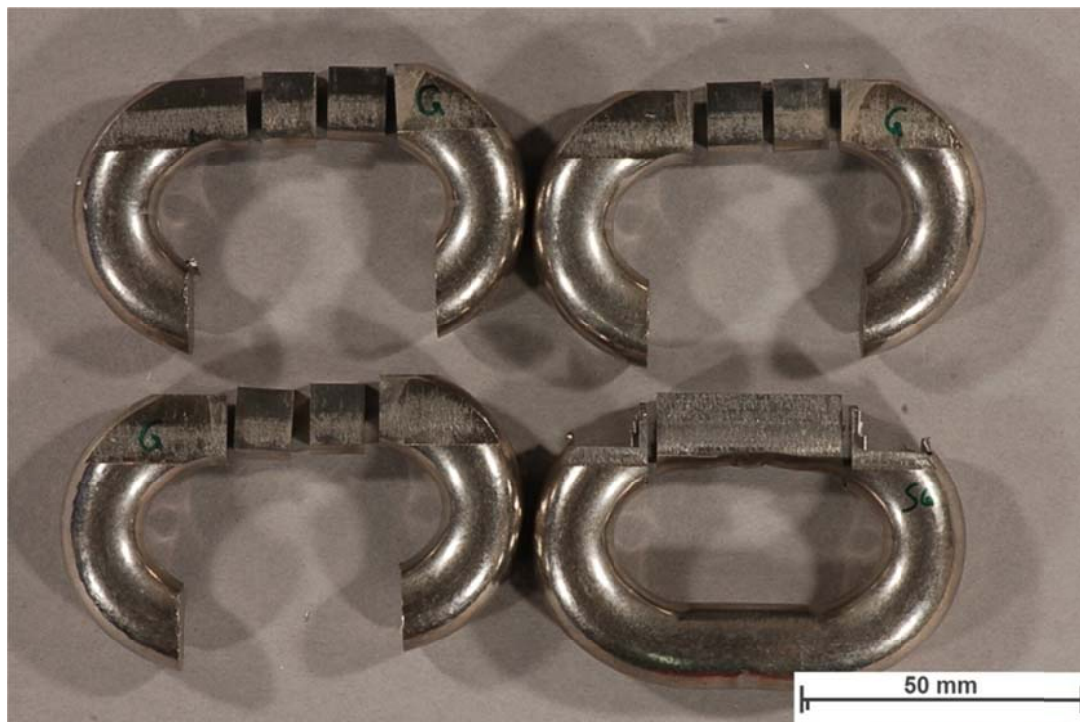


Bildbreite|f|B|t|SH|OH: 195,80mm| 105mm| 18| 1/10s| 765mm| 11mm

Bildname: join2\_3\_14I0003.jpg



Abbildung A 5 Probeentnahme für chemische Korrosionstests 1.4112 LRS: GW(1,3,4,6); SN (2,5)



Bildbreite|f|B|t|SH|OH: 193,90mm| 105mm| 18| 1/6s| 765mm| 20mm

Bildname: join2\_3\_14I0002.jpg



Abbildung A 6 Probeentnahme für chemische Korrosionstests 1.4404 RA:  
oben und unten links: je SN aus Mitte und GW daneben, unten rechts: chem. LK Methode B

## ANHANG B – STROMDICHTE-POTENTIAL-KURVEN 1.4404

## GRUNDWERKSTOFFE LINEAR

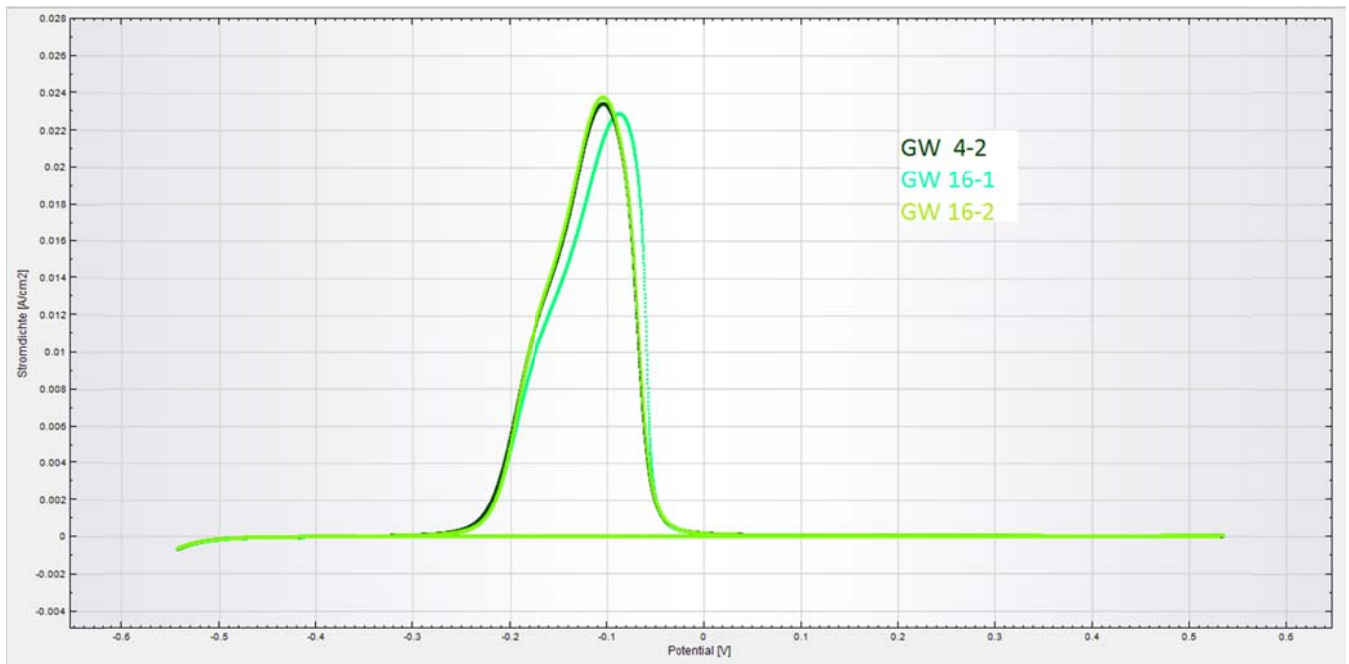


Abbildung B 1 Stromdichte-Potentialkurven 1.4404 GW, lineare Darstellung

## GRUNDWERKSTOFFE LOGARITHMISCH

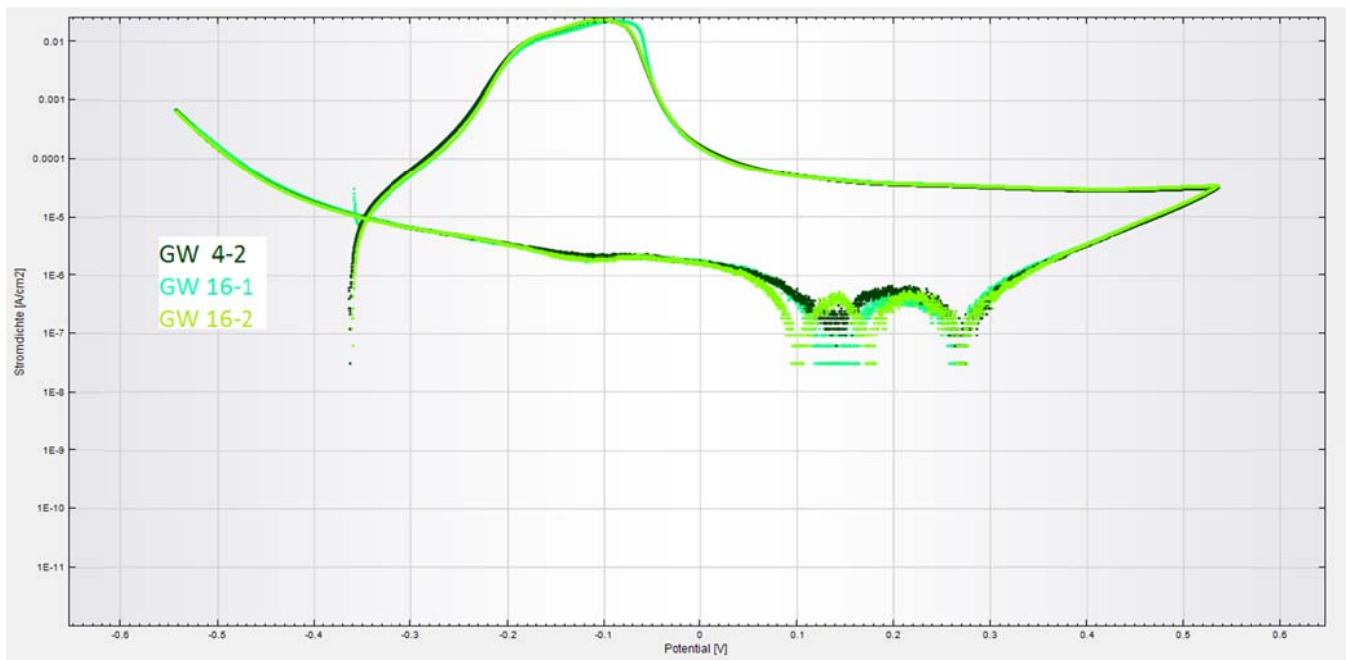
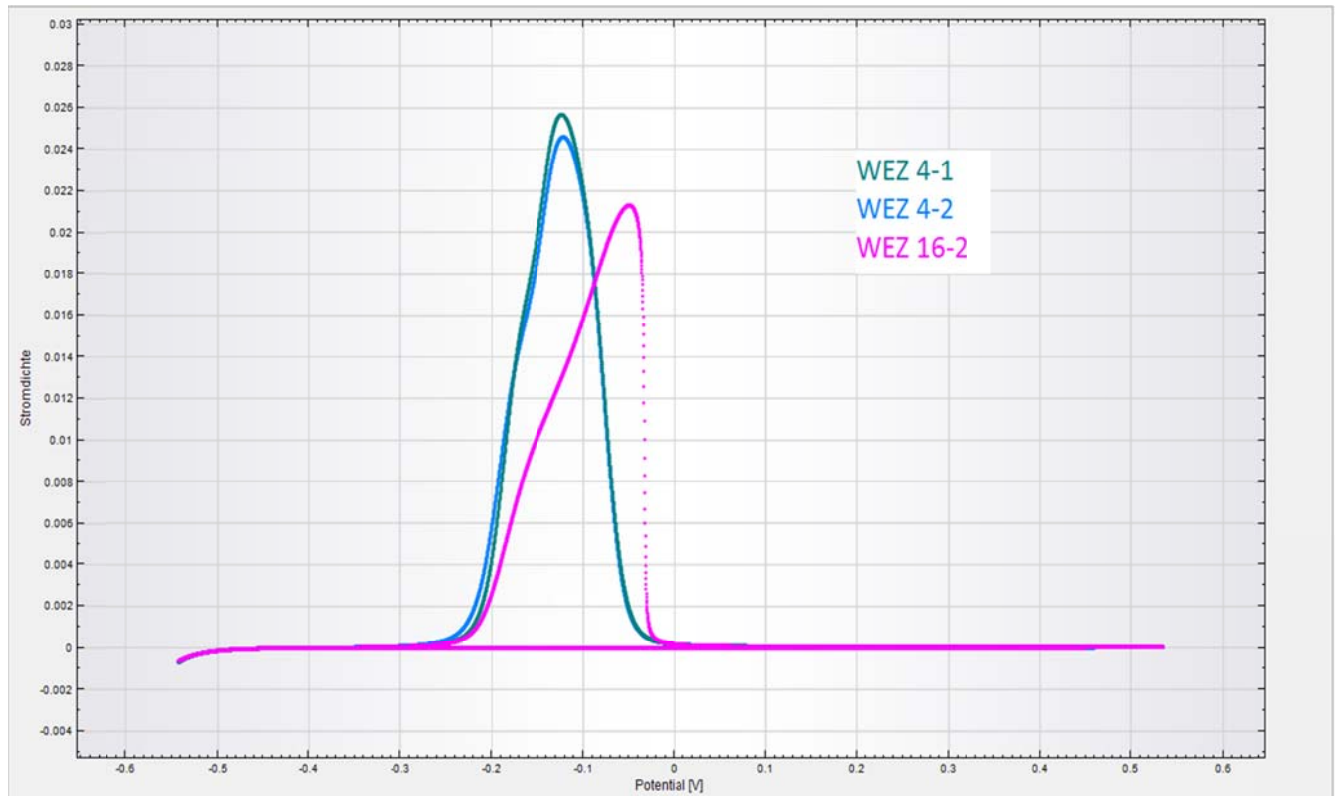
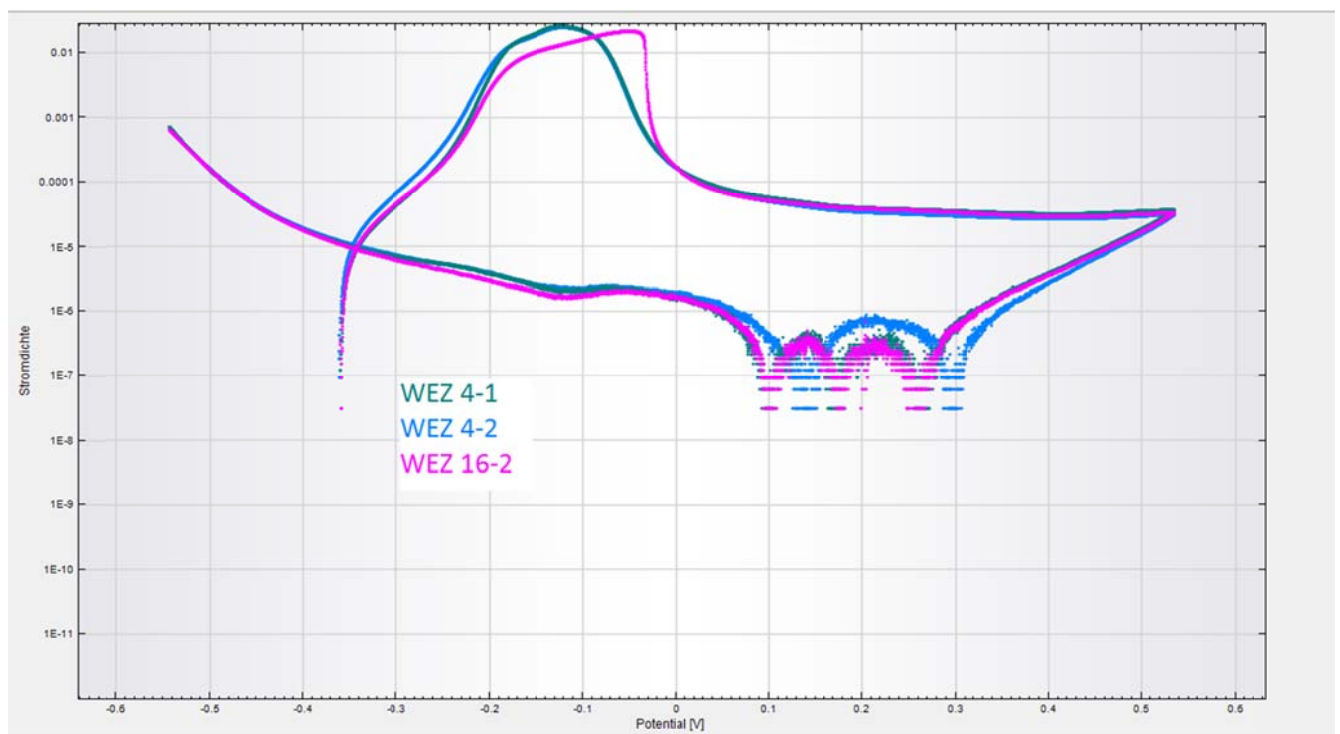


Abbildung B 2 Stromdichte-Potentialkurven 1.4404 GW, logarithmische Darstellung

**WÄRMEEINFLUSSZONE LINEAR****Abbildung B 3 Stromdichte-Potentialkurven 1.4404 WE, lineare Darstellung****WÄRMEEINFLUSSZONE LOGARITHMISCH****Abbildung B 4 Stromdichte-Potentialkurven 1.4404 WE, logarithmische Darstellung**

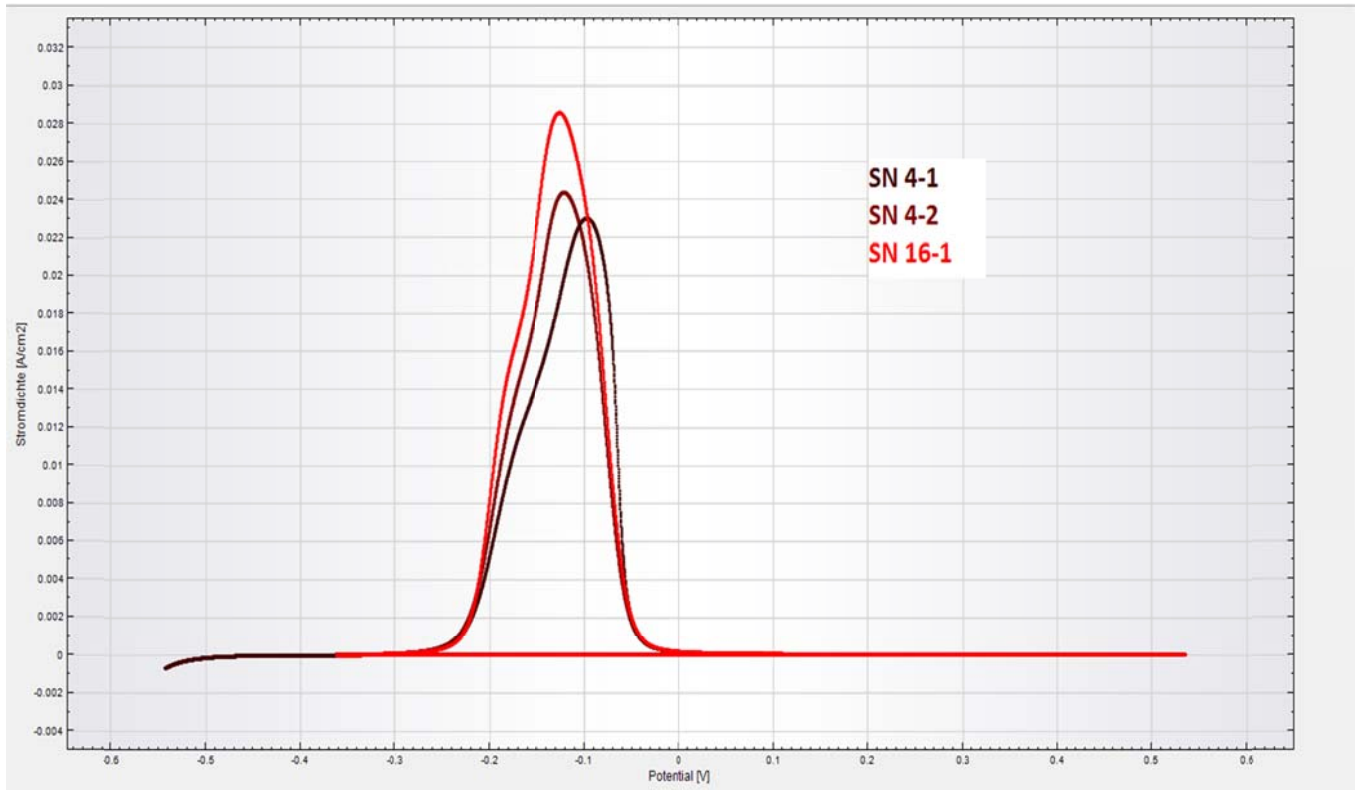
**SCHWEIßNAHT LINEAR**

Abbildung B 5 Stromdichte-Potentialkurven 1.4404 SN, lineare Darstellung

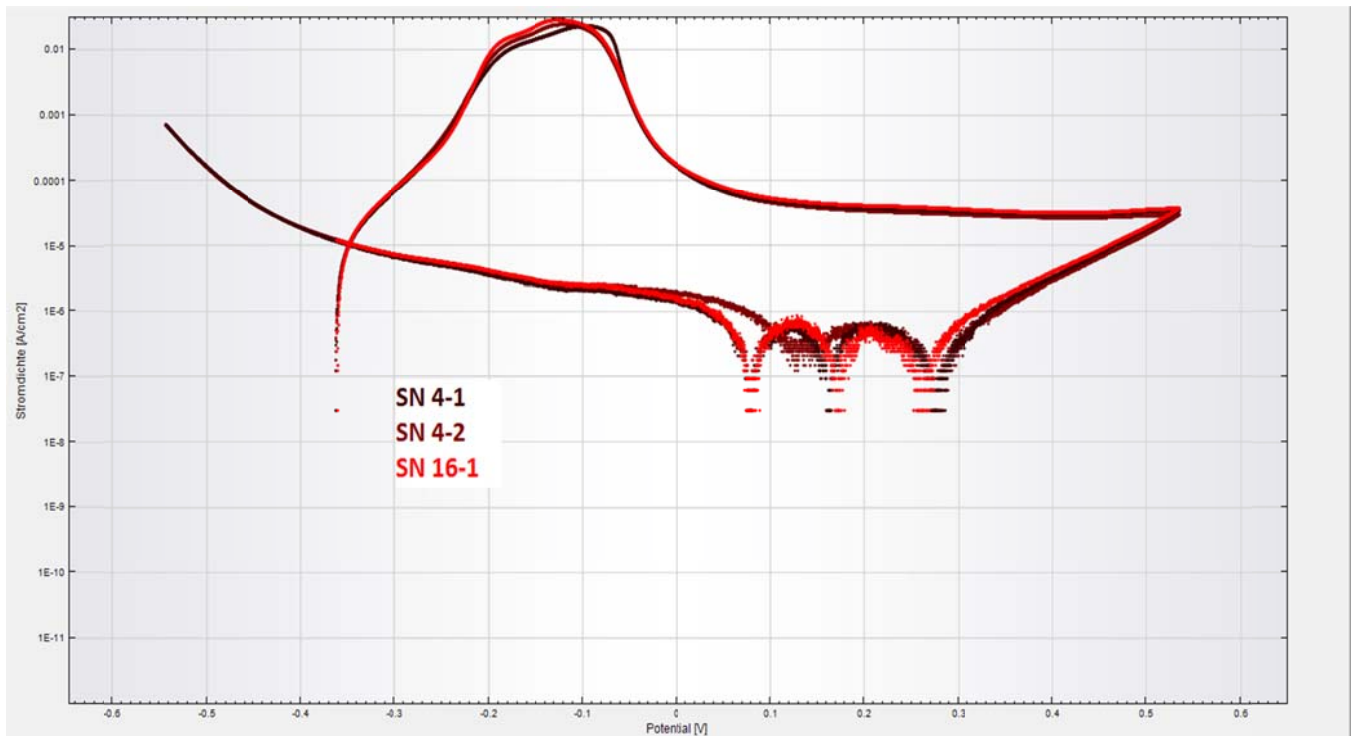
**SCHWEIßNAHT LOGARITHMISCH**

Abbildung B 6 Stromdichte-Potentialkurven 1.4404 SN, logarithmische Darstellung

## ANHANG C – ERMITTLUNG DES DURCHBRUCHSPOTENTIALS

Tabelle C 1 Temperatur und pH-Wert für Sauerstoffarmen und Sauerstoffreichen Elektrolyten

Sauerstoffarmer Elektrolyt							
Werkstoff	Schweißart	Zone	Probe	Temperatur [°C]		pH-Wert	
				Vorher	Nachher	Vorher	Nachher
1.4112	LRS	GW	1	19	20	6,28	9,99
			2	19	20	6,45	9,83
			2-1	20	20	7,17	9,53
		SN	4-1	20	20	6,45	9,44
			4-2	20	20	6,45	9,44
			2-1	20	21	6,38	8,24
		WEZ	4-1	20	20	7,08	8,44
			4-2	20	21	7,39	8,14
1.4404	LRS	GW	2	20	21	6,27	9,02
			3	19	20	7,48	9,90
			3-2	18	19	7,48	9,56
		SN	3	19	20	5,57	9,99
			3-2	19	20	6,20	9,19
			4	19	19	6,24	10,24
			4-2	18	19	7,04	9,17
		WEZ	3	19	21	6,73	8,42
			3-2	20	21	6,67	9,55
			4	18	19	7,52	8,72
			4-2	18	19	7,81	9,92
	RA	SN	1	19	20	6,97	10,16
			2	19	20	6,78	9,96
		WEZ	1	19	20	6,81	9,24
			2	18	19	7,03	8,75
			3	20	21	6,91	8,79
		Rand	1	19	20	6,67	7,95
			2	19	20	6,84	9,61
3			19	20	7,14	9,12	
MITTELWERTE				19,14	20	6,81	9,27
STABW				0,71	0,67	0,50	0,66
Sauerstoffreicher Elektrolyt							
Werkstoff	Schweißart	Zone	Probe	Temperatur [°C]		pH-Wert	
				Vorher	Nachher	Vorher	Nachher
1.4112	LRS	GW	1	19	20	7,65	10,06
			2	19	20	7,55	7,87
			3	19	19	7,5	9,38
		SN	1-1	20	21	7,36	8,02
			1-2	20	21	7,77	9,44
			2-1	20	21	8,02	8,45
		WEZ	1-1	20	21	6,7	8,34
			1-2	20	21	7,94	8,98
			3-1	20	21	7,23	8,67
1.4404	LRS	GW	1	19	20	6,58	9,87
			3	20	21	5,83	8,08
			13	18	19	6,43	8,16
		SN	13	19	20	7,93	9,03
			13-2	20	21	6,48	8,21
			15	19	20	6,74	9,78
		WEZ	13	19	19	7,48	9,21
			13-2	19	21	7,93	9,03
			15	20	21	7,22	9,27
	RA	SN	1	20	21	7,22	9,38
			2	20	21	7,27	8,92
			3	20	21	6,71	8,84
		WEZ	1	20	21	7,54	9,4
			2	20	21	7,3	8,85
			3	20	21	7,56	9,24
		Rand	1	20	21	7,83	8,35
			2	20	21	7,64	10,03
		MITTELWERTE				19,62	20,58
STABW				0,57	0,70	0,56	0,63

**Tabelle C 2 Freies Korrosionspotential und Durchbruchpotential für Sauerstoffarmen- und Sauerstoffreichen Elektrolyt**

Sauerstoffarmer Elektrolyt									
Werkstoff	Schweißart	Zone	Probe	OCP [V]		DBP [V]			
				Ag/AgCl	NHE	Ag/AgCl	NHE		
1.4112	LRS	GW	1	-0,540	-0,330	-0,156	0,054		
			2	-0,530	-0,320	-0,159	0,051		
		SN	2-1	-0,552	-0,342	-0,195	0,015		
			4-1	-0,569	-0,359	-0,196	0,014		
			4-2	-0,569	-0,359	-0,181	0,029		
		WEZ	2-1	-0,525	-0,315	-0,225	-0,015		
			4-1	-0,574	-0,364	-0,241	-0,031		
			4-2	-0,554	-0,344	-0,235	-0,025		
1.4404	LRS	GW	2	-0,329	-0,119	0,309	0,519		
			3	-0,399	-0,189	0,320	0,530		
			3-2	-0,398	-0,188	0,312	0,522		
		SN	3	-0,154	0,056	0,254	0,464		
			3-2	-0,281	-0,071	0,217	0,427		
			4	-0,185	0,025	0,237	0,447		
			4-2	-0,329	-0,119	0,246	0,456		
		WEZ	3	-0,176	0,034	0,169	0,379		
			3-2	-0,172	0,038	0,248	0,458		
			4	-0,171	0,039	0,227	0,437		
	RA	SN	1	-0,230	-0,020	0,214	0,424		
			2	-0,197	0,013	0,193	0,403		
		WEZ	1	-0,285	-0,075	0,254	0,464		
			2	-0,336	-0,126	0,264	0,474		
			3	-0,227	-0,017	0,252	0,462		
		Rand	1	-0,23	-0,02	0,280	0,490		
			2	-0,429	-0,219	0,174	0,384		
			3	-0,224	-0,014	0,228	0,438		
		Sauerstoffreicher Elektrolyt							
		Werkstoff	Schweißart	Zone	Probe	OCP [V]		DBP [V]	
Ag/AgCl	NHE					Ag/AgCl	NHE		
1.4112	LRS	GW	1	-0,372	-0,162	-0,159	0,051		
			2	-0,372	-0,162	-0,157	0,053		
			3	-0,376	-0,166	-0,158	0,052		
		SN	1-1	-0,364	-0,154	-0,030	0,180		
			1-2	-0,385	-0,175	-0,046	0,164		
			2-1	-0,311	-0,101	-0,057	0,153		
		WEZ	1-1	-0,355	-0,145	-0,233	-0,023		
			1-2	-0,372	-0,162	-0,235	-0,025		
3-1	-0,318	-0,108	-0,180	0,030					
1.4404	LRS	GW	1	-0,274	-0,064	0,114	0,324		
			3	-0,107	0,103	0,269	0,479		
			13	-0,081	0,129	0,233	0,443		
		SN	13	-0,063	0,147	0,210	0,420		
			13-2	-0,091	0,119	0,239	0,449		
			15	-0,017	0,193	0,232	0,442		
		WEZ	13	-0,062	0,148	0,193	0,403		
			13-2	-0,063	0,147	0,221	0,431		
			15	-0,126	0,084	0,272	0,482		
	RA	SN	1	-0,081	0,129	0,233	0,443		
			2	-0,162	0,048	0,285	0,495		
			3	-0,372	-0,162	0,195	0,405		
		WEZ	1	-0,166	0,044	0,218	0,428		
			2	-0,203	0,007	0,210	0,420		
			3	-0,167	0,043	0,323	0,533		
Rand	1	-0,201	0,009	0,198	0,408				
	2	-0,226	-0,016	0,168	0,378				

Tabelle C 3 Differenz zwischen freiem Korrosionspotential und Durchbruchpotential für Sauerstoffarmen und Sauerstoffreichen Elektrolyten

Sauerstoffarmer Elektrolyt					
Werkstoff	Schweißart	Zone	Probe	DBP-OCP [V]	
1.4112	LRS	GW	1	0,384	
			2	0,371	
		SN	2-1	0,357	
			4-1	0,373	
			4-2	0,388	
			2-1	0,300	
		WEZ	4-1	0,333	
			4-2	0,319	
			2	0,638	
1.4404	LRS	GW	3	0,719	
			3-2	0,710	
			3	0,408	
		SN	3-2	0,498	
			4	0,422	
			4-2	0,575	
			3	0,345	
		WEZ	3-2	0,420	
			4	0,398	
	4-2		0,537		
	RA		SN	1	0,444
				2	0,390
		WEZ	1	0,539	
			2	0,600	
		Rand	3	0,479	
			1	0,510	
	2	0,603			
	3	0,452			
Sauerstoffreicher Elektrolyt					
Werkstoff	Schweißart	Zone	Probe	DBP-OCP [V]	
1.4112	LRS	GW	1	0,213	
			2	0,215	
			3	0,218	
		SN	1-1	0,334	
			1-2	0,339	
			2-1	0,254	
		WEZ	1-1	0,122	
			1-2	0,137	
			3-1	0,138	
1.4404	LRS	GW	1	0,388	
			3	0,376	
			13	0,314	
		SN	13	0,273	
			13-2	0,330	
			15	0,249	
			13	0,255	
		WEZ	13-2	0,284	
			15	0,398	
	RA	SN	1	0,314	
			2	0,447	
			3	0,567	
		WEZ	1	0,384	
			2	0,413	
			3	0,490	
Rand	1	0,399			
	2	0,394			

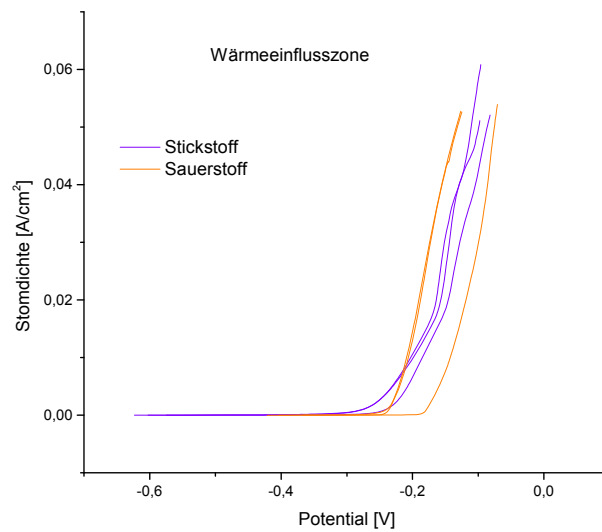
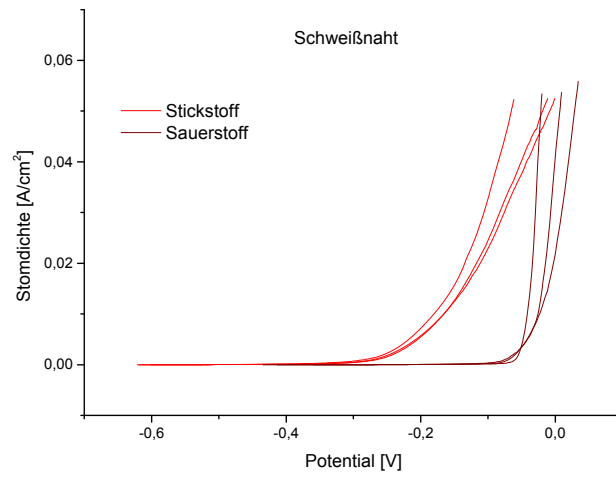
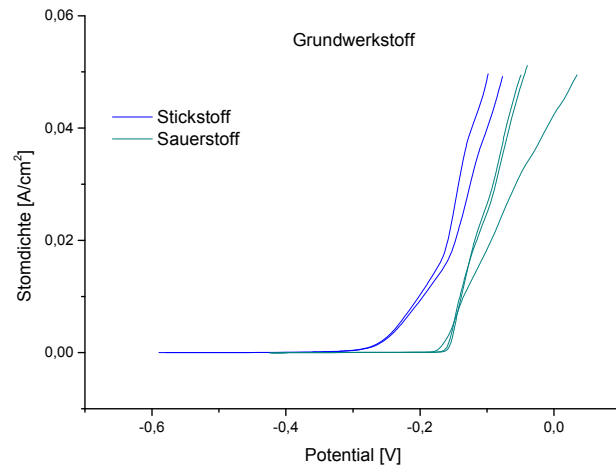


Abbildung C 1 Vergleich des Einflusses von Sauerstoffarmen- und Sauerstoffreichen Elektrolyten auf das Durchbruchpotential von 1.4112



## 1.4404 - Vergleich des Einflusses von Sauerstoff und Stickstoff

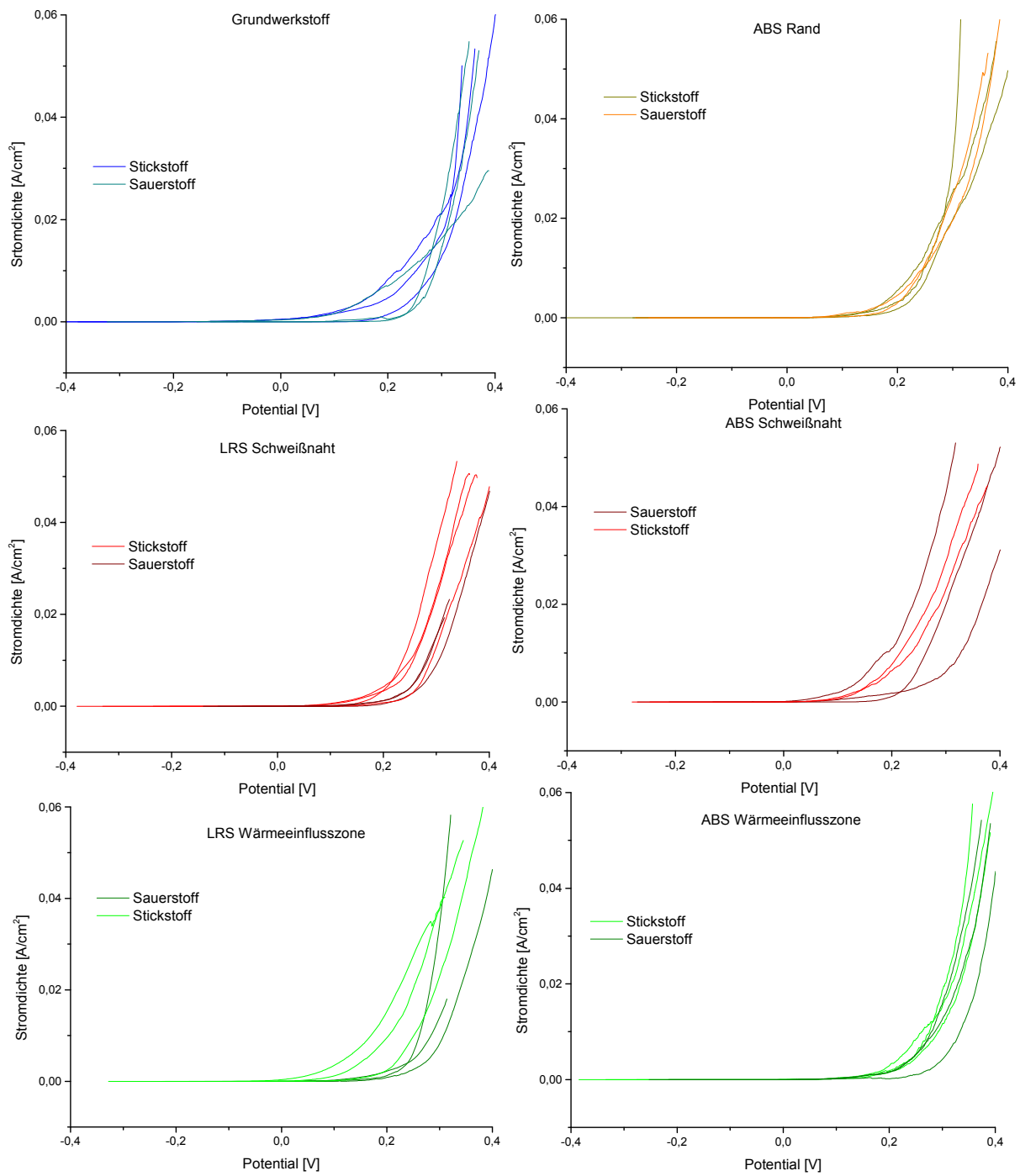


Abbildung C 2 Vergleich des Einflusses von Sauerstoffarmen- und Sauerstoffreichen Elektrolyten auf das Durchbruchpotential von 1.4404

## KURVEN UND BILDER

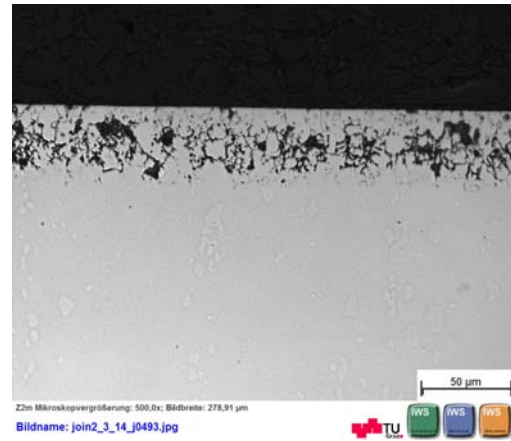
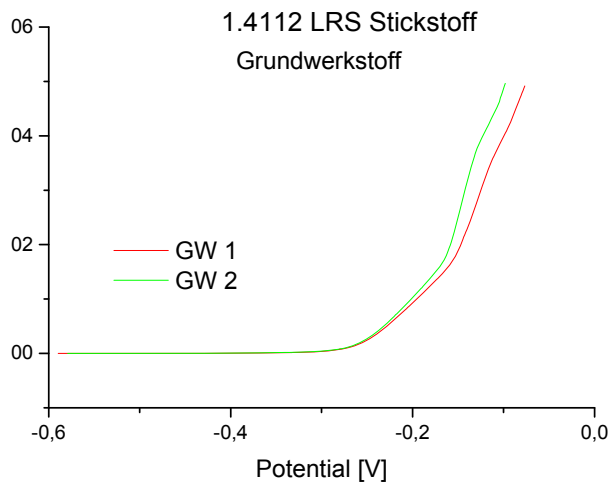


Abbildung C 3 Kurven und Bilder - 1.4112 LRS GW Stickstoff

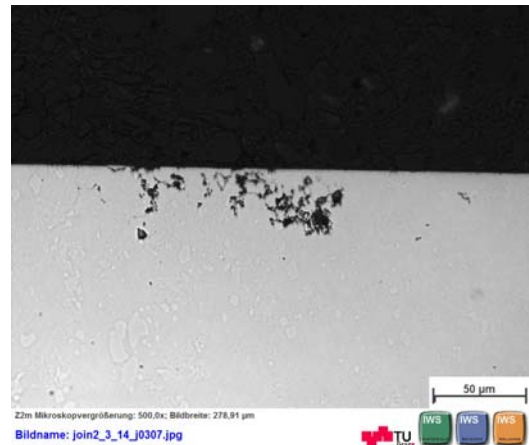
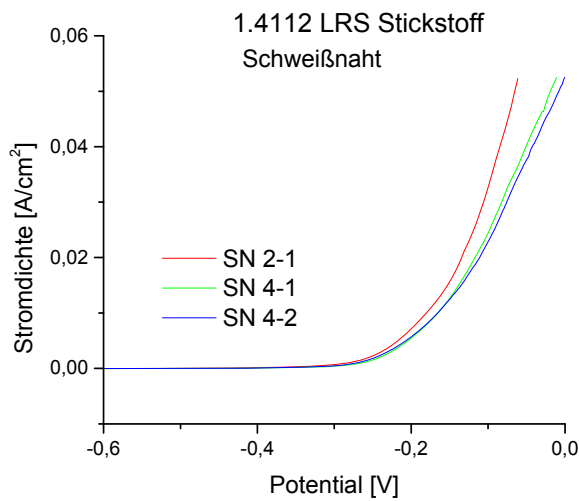


Abbildung C 4 Kurven und Bilder - 1.4112 LRS SN Stickstoff

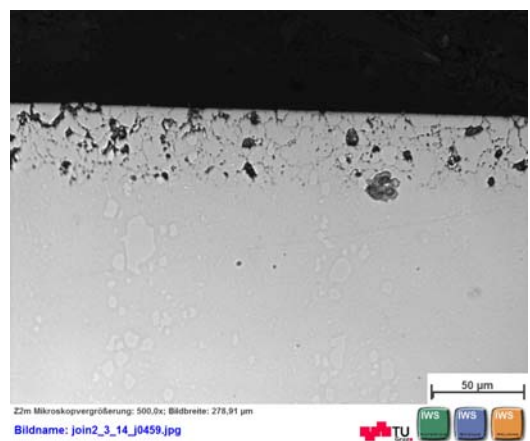
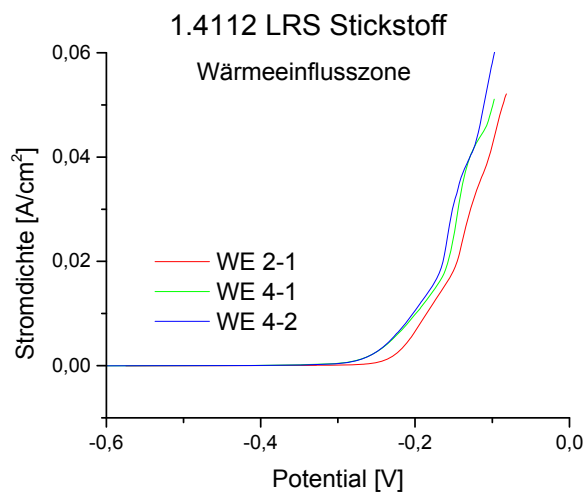


Abbildung C 5 Kurven und Bilder - 1.4112 LRS WEZ Stickstoff

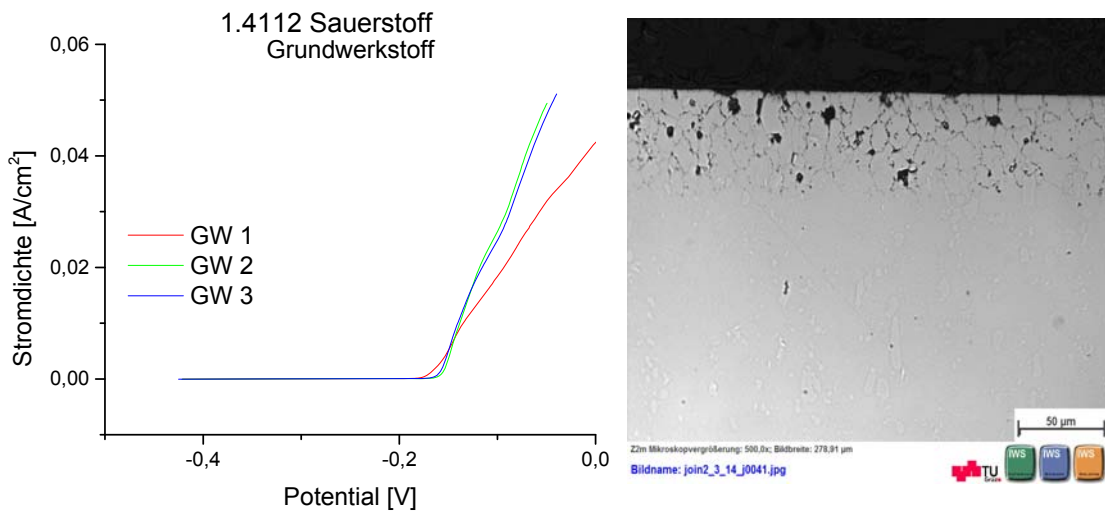


Abbildung C 6 Kurven und Bilder - 1.4112 LRS GW Sauerstoff

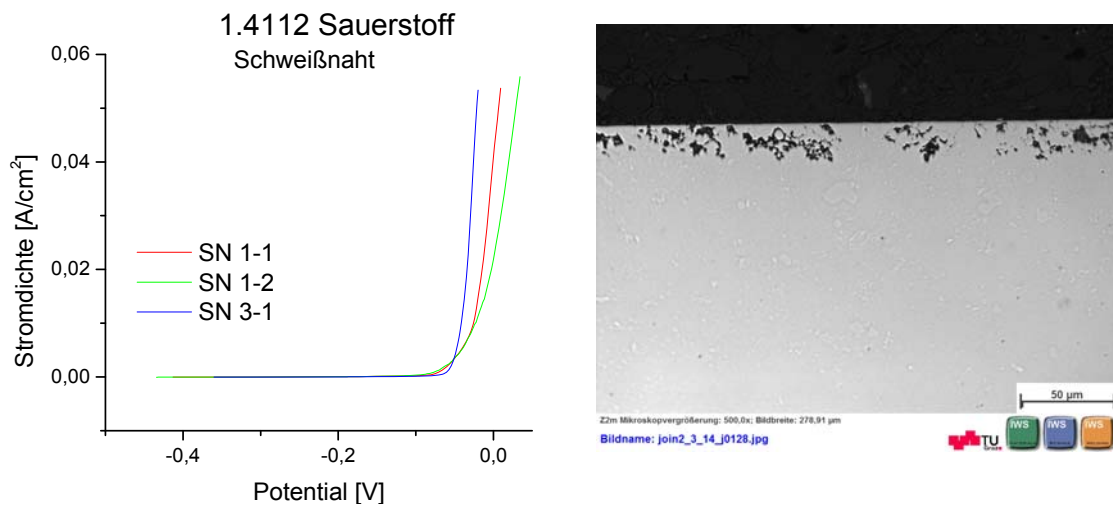


Abbildung C 7 Kurven und Bilder - 1.4112 LRS SN Sauerstoff

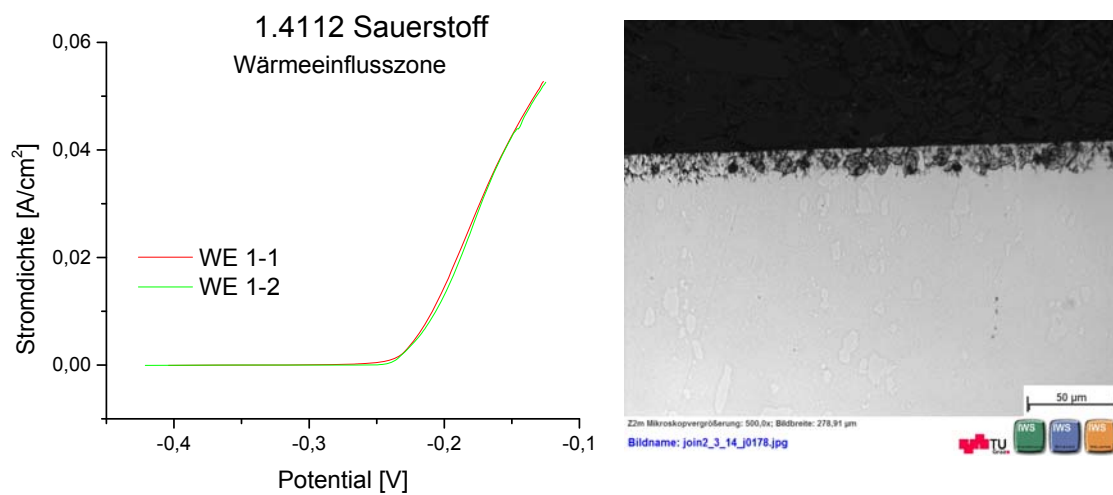


Abbildung C 8 Kurven und Bilder - 1.4112 LRS WE Sauerstoff

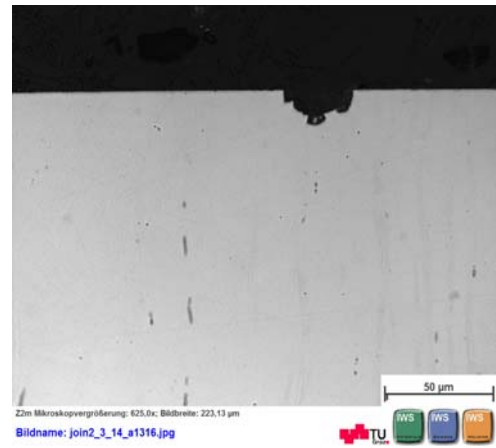
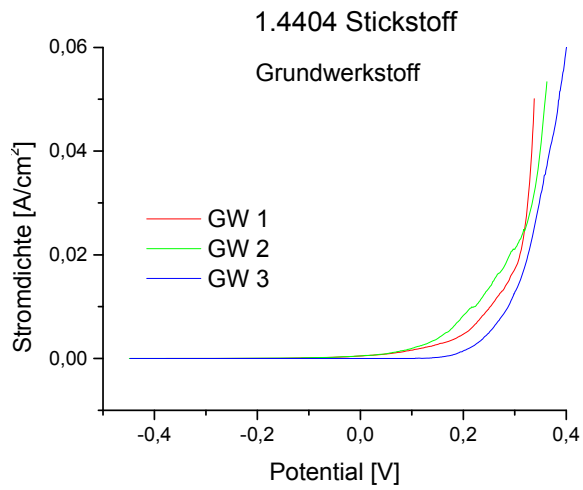


Abbildung C 9 Kurven und Bilder - 1.4404 LRS GW Stickstoff

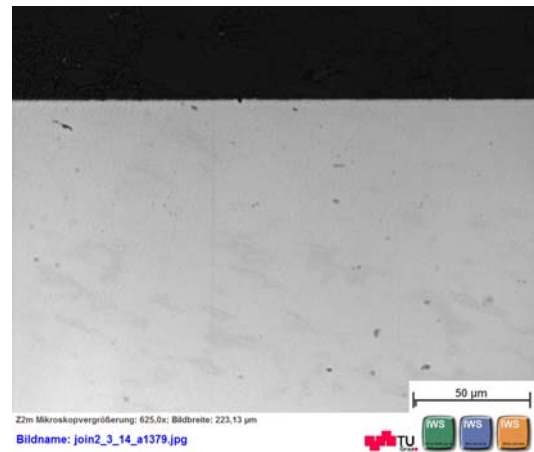
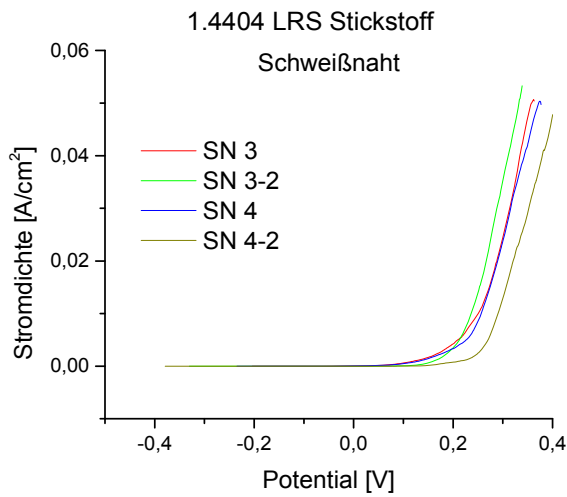


Abbildung C 10 Kurven und Bilder - 1.4404 LRS SN Stickstoff

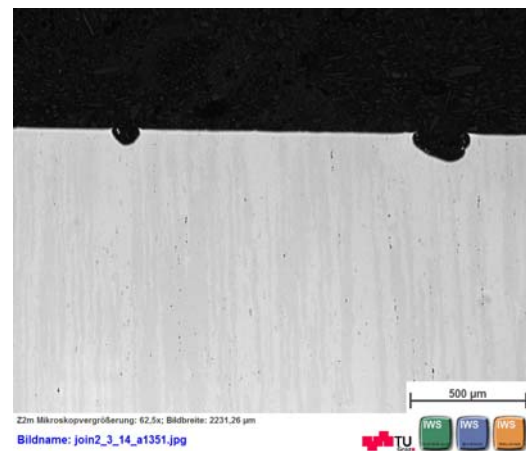
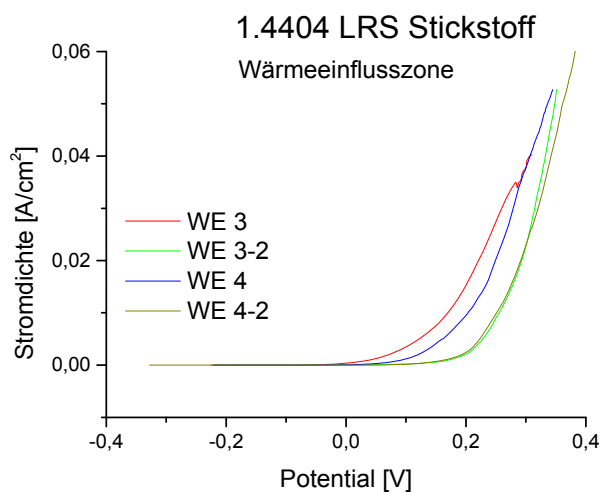


Abbildung C 11 Kurven und Bilder - 1.4404 LRS WEZ Stickstoff

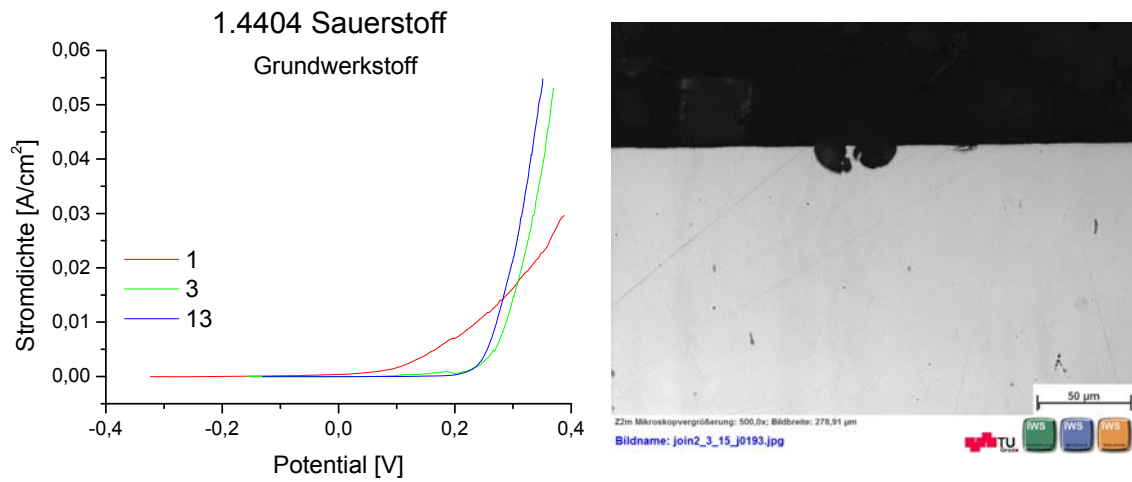


Abbildung C 12 Kurven und Bilder - 1.4404 LRS GW Sauerstoff

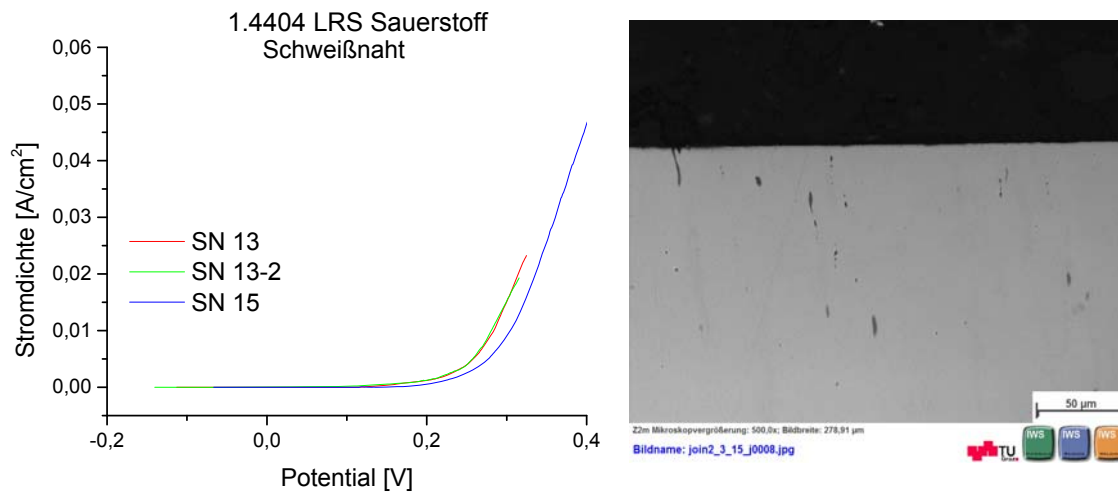


Abbildung C 13 Kurven und Bilder - 1.4404 LRS SN Sauerstoff

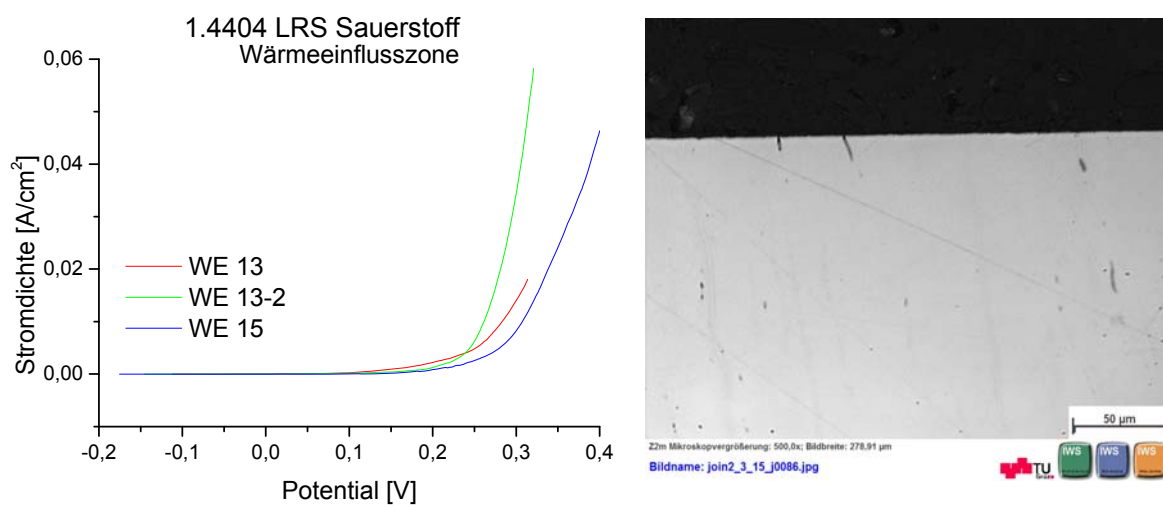


Abbildung C 14 Kurven und Bilder - 1.4404 LRS WEZ Sauerstoff

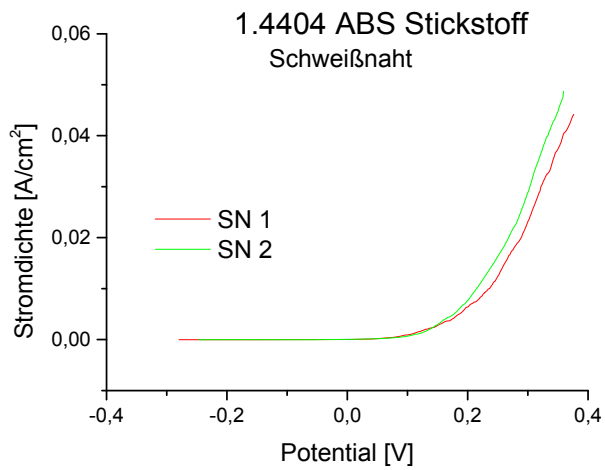


Abbildung C 15 Kurven und Bilder - 1.4404 RA SN Stickstoff

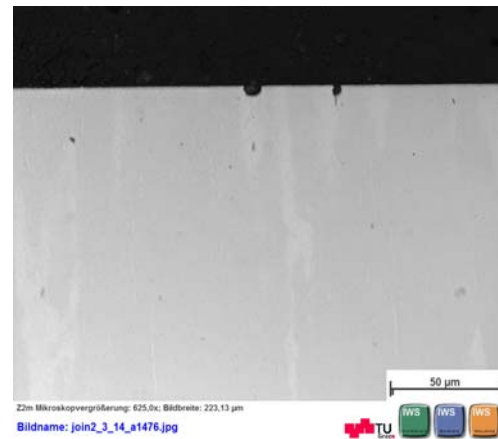
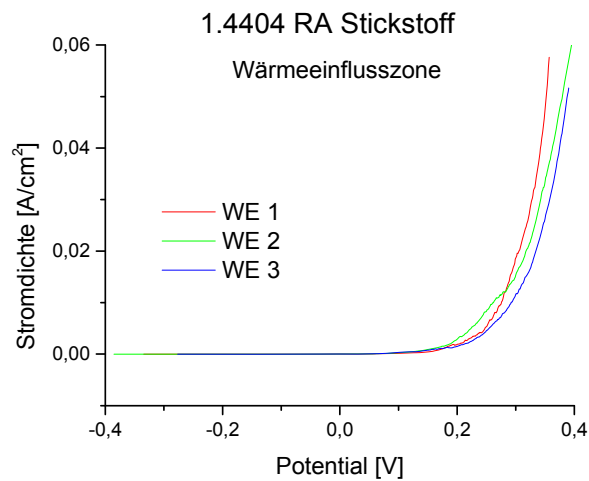


Abbildung C 16 Kurven und Bilder - 1.4404 RA WEZ Stickstoff

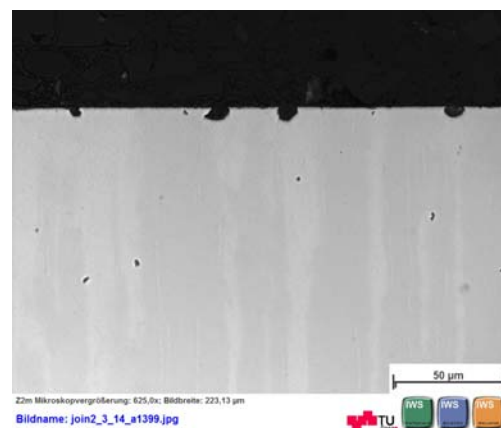
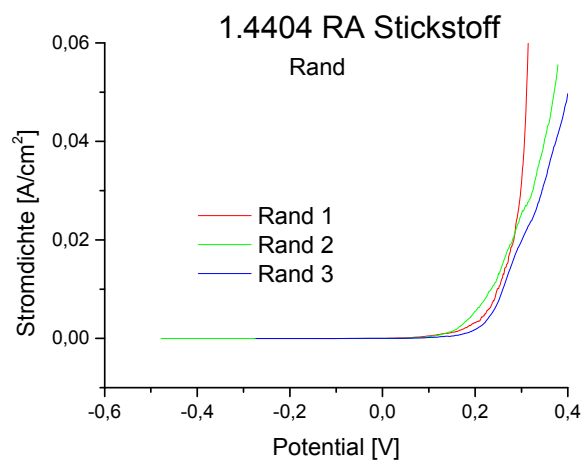


Abbildung C 17 Kurven und Bilder - 1.4404 RA Rand Stickstoff

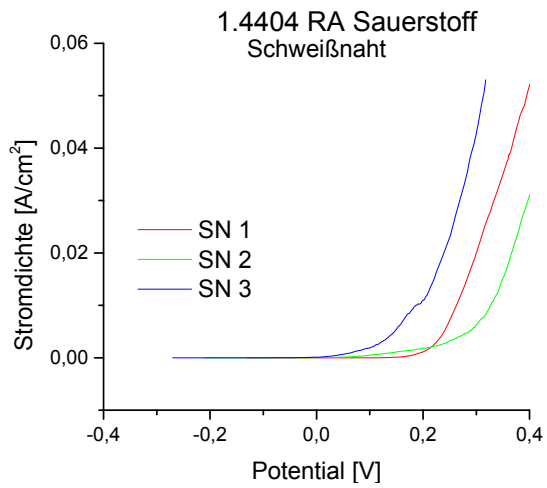


Abbildung C 18 Kurven und Bilder - 1.4404 RA SN Sauerstoff

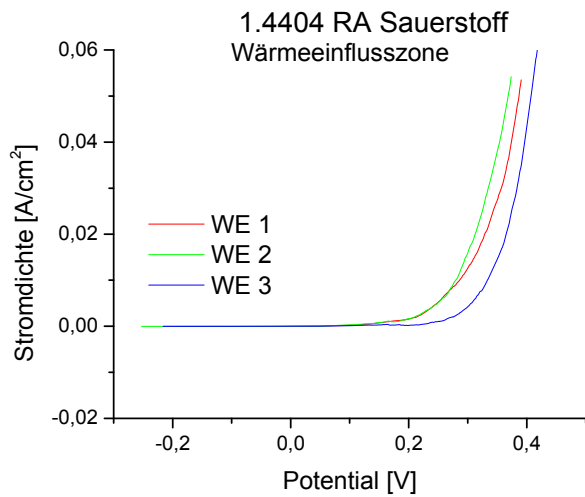


Abbildung C 19 Kurven und Bilder - 1.4404 RA WEZ Sauerstoff

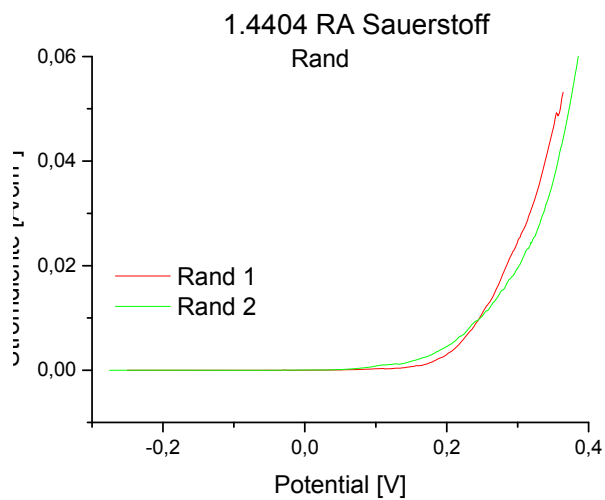


Abbildung C 20 Kurven und Bilder - 1.4404 RA Rand Sauerstoff

## ANHANG D – CHEMISCHER TEST AUF SPALT UND LOCHKORROSION

Tabelle D 1 Auswertung Massenverlust  $\Delta m$  chem. Lochkorrosionstest - Methode A

Werkstoff	Schweißverfahren	Probe	Anfangsgewicht [g]	Endgewicht [g]	$\Delta m$ [g]	Prozent an Massenverlust [g]
1.4404	GW	1	8,075	7,373	0,702	8,69
		2	8,033	7,605	0,428	5,33
		3	7,764	7,065	0,699	9,00
	LRS	1	7,904	7,295	0,609	7,70
		2	7,988	7,140	0,848	10,62
		3	7,983	7,189	0,794	9,95
	RA	1	7,750	7,099	0,651	8,40
		2	7,891	7,335	0,556	7,05
		3	7,845	7,269	0,576	7,34
1.4112	GW	1	9,704	9,115	0,589	6,07
		2	9,081	8,702	0,379	4,17
		3	10,020	9,008	1,012	10,10
	LRS	3	9,531	7,891	1,640	17,21
		5-1	8,839	6,659	2,180	24,66
		5-2	8,532	7,382	1,150	13,48

Tabelle D 2 Auswertung Massenverlust  $\Delta m$  chem. Lochkorrosionstest - Methode B

Werkstoff	Schweißverfahren	Probe	Anfangsgewicht [g]	Endgewicht [g]	$\Delta m$ [g]	Prozent an Massenverlust [g]
1.4404	LRS	A	13,310	12,346	0,964	7,24
		B	13,230	12,344	0,886	6,70
	RA	A	13,060	12,130	0,930	7,12
		B	12,962	12,380	0,582	4,49
1.4112	LRS	A	12,006	9,937	2,069	17,23
		B	11,540	9,164	2,376	20,59



---

**AUSWERTUNG DER LOCHDICHTE METHODE A**
**Tabelle D 3 Auswertung der Lochdichte Methode A – 1.4404 GW 1**

Fläche	Seitenfläche [cm <sup>2</sup> ]	Lochanzahl	Lochdichte [Anzahl/cm <sup>2</sup> ]
1	1,02	129	126
2	1,03	4	4
3	1,00	0	0
4	1,00	3	3
5	1,00	43	43
6	0,96	26	27

**Tabelle D 4 Auswertung der Lochdichte Methode A - 1.4404 GW 2**

Fläche	Seitenfläche [cm <sup>2</sup> ]	Lochanzahl	Lochdichte [Anzahl/cm <sup>2</sup> ]
1	0,99	1	1
2	0,99	0	0
3	0,99	2	2
4	1,00	0	0
5	0,98	23	23
6	1,00	14	14

**Tabelle D 5 Auswertung der Lochdichte Methode A - 1.4404 GW 3**

Fläche	Seitenfläche [cm <sup>2</sup> ]	Lochanzahl	Lochdichte [Anzahl/cm <sup>2</sup> ]
1	0,96	0	0
2	0,95	0	0
3	0,99	19	19
4	0,96	0	0
5	0,96	0	0
6	0,96	44	46

**Tabelle D 6 Auswertung der Lochdichte Methode A - 1.4404 RA 1**

Fläche	Zone	Seitenfläche [cm <sup>2</sup> ]	Lochanzahl	Lochdichte [Anzahl/cm <sup>2</sup> ]
1	GW	0,96	16	17
2	SN	0,97	7	7
3	GW	0,94	11	12
4	SN	0,99	0	0
5	SN	0,96	2	2
6	SN	0,97	33	34

**Tabelle D 7 Auswertung der Lochdichte Methode A - 1.4404 RA 2**

Fläche	Zone	Seitenfläche [cm <sup>2</sup> ]	Lochanzahl	Lochdichte [Anzahl/cm <sup>2</sup> ]
1	GW	0,98	0	0
2	SN	0,97	4	4
3	GW	0,95	18	19
4	SN	0,96	0	0
5	SN	0,97	5	5
6	SN	0,98	0	0

**Tabelle D 8 Auswertung der Lochdichte Methode A - 1.4404 RA 3**

Fläche	Zone	Seitenfläche [cm <sup>2</sup> ]	Lochanzahl	Lochdichte [Anzahl/cm <sup>2</sup> ]
1	SN	0,99	5	5
2	SN	0,98	0	0
3	GW	0,95	8	8
4	SN	0,98	28	29
5	GW	0,97	11	11
6	SN	0,99	4	4

Tabelle D 9 Auswertung der Lochdichte Methode A - 1.4404 LRS 1

Fläche	Zone	Seitenfläche [cm <sup>2</sup> ]	Lochanzahl	Lochdichte [Anzahl/cm <sup>2</sup> ]
1	GW	0,93	22	24
2	SN	0,95	6	6
3	GW	0,97	8	8
4	SN	0,98	0	0
5	SN	0,98	2	2
6	SN	0,97	0	0

Tabelle D 10 Auswertung der Lochdichte Methode A - 1.4404 LRS 2

Fläche	Zone	Seitenfläche [cm <sup>2</sup> ]	Lochanzahl	Lochdichte [Anzahl/cm <sup>2</sup> ]
1	GW	0,96	39	41
2	SN	0,95	6	6
3	GW	0,99	23	23
4	SN	0,97	9	9
5	SN	0,98	4	4
6	SN	1,01	9	9

Tabelle D 11 Auswertung der Lochdichte Methode A - 1.4404 LRS 3

Fläche	Zone	Seitenfläche [cm <sup>2</sup> ]	Lochanzahl	Lochdichte [Anzahl/cm <sup>2</sup> ]
1	GW	0,98	46	47
2	SN	0,98	16	16
3	SN	0,97	0	0
4	SN	0,99	7	7
5	SN	0,99	1	1
6	GW	0,99	0	0

Tabelle D 12 Auswertung der Lochdichte Methode A - 1.4112 GW 1

Fläche	Seitenfläche [cm <sup>2</sup> ]	Lochanzahl	Lochdichte [Anzahl/cm <sup>2</sup> ]
1	1,12	5	4
2	1,02	31	30
3	1,13	3	3
4	1,02	16	6
5	1,20	1	1
6	1,17	1	1

Tabelle D 13 Auswertung der Lochdichte Methode A - 1.4112 GW 2

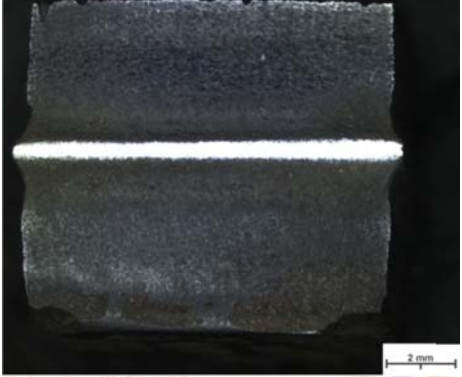
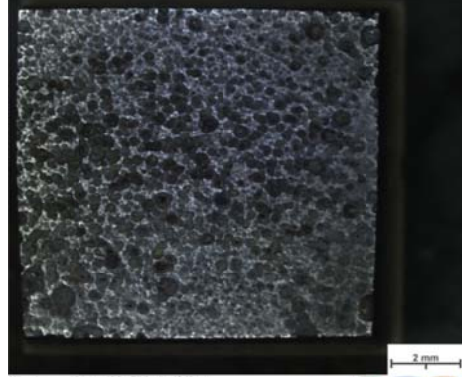
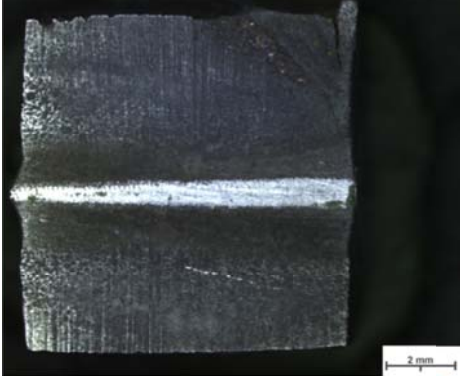
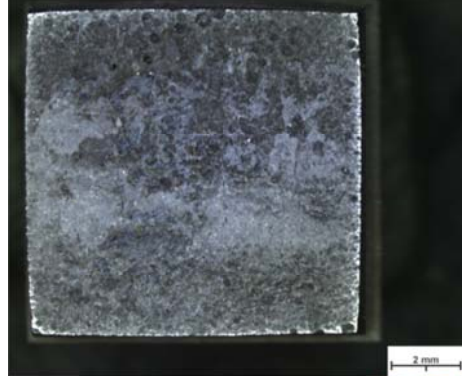
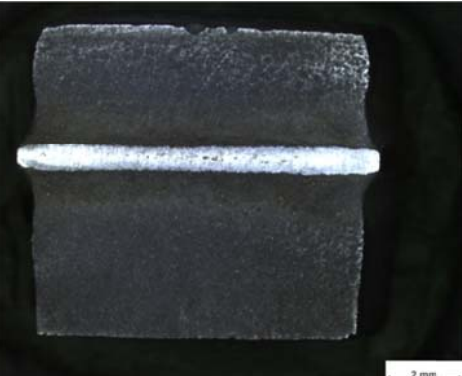
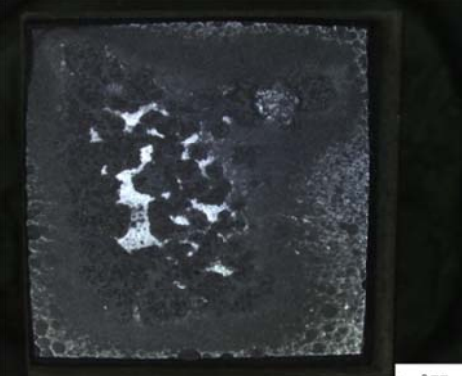
Fläche	Seitenfläche [cm <sup>2</sup> ]	Lochanzahl	Lochdichte [Anzahl/cm <sup>2</sup> ]
1	1,17	0	0
2	0,98	40	41
3	1,11	9	8
4	0,94	28	30
5	1,12	8	7
6	1,16	0	0

Tabelle D 14 Auswertung der Lochdichte Methode A - 1.4112 GW 3

Fläche	Seitenfläche [cm <sup>2</sup> ]	Lochanzahl	Lochdichte [Anzahl/cm <sup>2</sup> ]
1	1,14	9	8
2	1,07	15	14
3	1,17	0	0
4	1,09	17	16
5	1,19	0	0
6	1,20	4	3

## BEISPIELBILDER FÜR CHEM. LK METHODE A - 1.4112 LRS

Tabelle D 15 Beispielbilder für chem. LK Methode A - 1.4112 LRS  
Proben 1-3 für SN und GW

LRS	SN	GW
1	 <p>Mikroskopvergrößerung: 10,0x; Bildbreite: 13,43 mm Bildname: join2_3_14_a2098.jpg</p>	 <p>Mikroskopvergrößerung: 10,0x; Bildbreite: 13,43 mm Bildname: join2_3_14_a2096.jpg</p>
2	 <p>Mikroskopvergrößerung: 10,0x; Bildbreite: 13,43 mm Bildname: join2_3_14_a2106.jpg</p>	 <p>Mikroskopvergrößerung: 10,0x; Bildbreite: 13,43 mm Bildname: join2_3_14_a2103.jpg</p>
3	 <p>Mikroskopvergrößerung: 10,0x; Bildbreite: 13,43 mm Bildname: join2_3_14_a2110.jpg</p>	 <p>Mikroskopvergrößerung: 10,0x; Bildbreite: 13,43 mm Bildname: join2_3_14_a2109.jpg</p>

---

**MITTLERE- UND MAXIMALE LOCHTIEFE FÜR METHODE A**
**Tabelle D 16 Mittlere und maximale Lochtiefe für Methode B - 1.4404 GW 1-3**

Grundwerkstoff	Max. Lochtiefe [mm]	Mittlere Lochtiefe [mm]	Anzahl d. Löcher
1	1,35	1,74	9
2	2,58	1,42	14
3	2,03	0,95	11
Mittelwert		1,23	

**Tabelle D 17 Mittlere und maximale Lochtiefe für Methode B - 1.4404 LRS 1-3**

LRS	Max. Lochtiefe [mm]	Mittlere Lochtiefe [mm]	Anzahl d. Löcher
1	2,08	0,95	10
2	2,26	1,23	10
3	0,07	0,02	15
Mittelwert		0,74	

**Tabelle D 18 Mittlere und maximale Lochtiefe für Methode B - 1.4404 RA 1-3**

RA	Max. Lochtiefe [mm]	Mittlere Lochtiefe [mm]	Anzahl d. Löcher
1	1,94	0,94	11
2	2,13	1,61	5
3	1,27	0,36	8
Mittelwert		0,97	

**Tabelle D 19 Mittlere und maximale Lochtiefe für Methode B - 1.4112 GW 1-3**

Grundwerkstoff	Max. Lochtiefe [mm]	Mittlere Lochtiefe [mm]	Anzahl d. Löcher
1	3,23	1,05	18
2	2,25	0,69	18
3	2,18	0,96	14
Mittelwert		0,90	