**Materialprüfungsanstalt**
**Universität Stuttgart**
Postfach 801140 · D-70511 Stuttgart

**MPA STUTTGART**
**Otto-Graf-Institut**
**Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart**

# Gutachterliche Stellungnahme

Untersuchung der für 2 Jahre in der Spritzwasserzone auf Helgoland ausgelagerten Proben zur Beurteilung des Korrosionsverhaltens - Kurzfassung

| | |
|---|---|
| Auftraggeber: | WHW Walter Hillebrand GmbH & Co. KG<br>Westerhaar 56-58<br>58739 Wickede (Ruhr) |
| Auftrags-Nr. (Kunde): | 4500005301 |
| **Auftrags-Nr. (MPA):** | **902 5296 000 /Bf** |
| **Prüfgegenstand:** | **Gewindebolzen** |
| Prüfspezifikation: | |
| Eingangsdatum des Prüfgegenstandes: | 04.12.2012 |
| Datum der Prüfung: | Februar bis März 2013 |
| Datum des Berichts: | 01.07.2015 |
| Seite 1 von | 9 Textseiten |
| Beilagen: | 13 |
| Anlagen: | 0 |
| Gesamtseitenzahl: | 22 |
| Anzahl der Ausfertigungen: | 1 Original an Auftraggeber<br>1 Kopie an Auftraggeber<br>1 Kopie an MPA zur Ablage |

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Prüfgegenstände.

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

## 1 Aufgabenstellung und Motivation

Für die Lebensdauer von Windenergieanlagen (geplant 20 bis 25 Jahre) muss die Nachhaltigkeit für unterschiedliche Witterungsbedingungen gewährleistet werden. Die Anforderungen an ein funktionelles Korrosionsschutzsystem für Schraubverbindungen sind sehr hoch. Neben der Korrosionsbelastung durch Salze und hohe Feuchtigkeit wirken auf Schraubverbindungen im Offshore-Bereich starke mechanische Belastungen durch Verbau und Transport, hohe Temperaturwechsel und hohe Beanspruchungen durch das Anzugmoment der Schrauben und Schwingungen des Bauwerkes selbst ein. Dabei sollen gleichbleibende Reibwerte bei den Verschraubungen und die Wiederlösbarkeit der Verbindung über die Nutzungsdauer gewährleistet sein.

Das Ziel der vorliegenden Untersuchungen war ein neuartiges Korrosionsschutzsystem zu entwickeln, welches den Anforderungen der Verschraubungssituationen im Maschinenhaus gerecht wird. Weiterhin sollten die Untersuchungen Auskünfte zum Korrosionsverhalten von unterschiedlichen Korrosionsschutzsystemen bei Freibewitterung geben.

Korrosionsversuche im Labor bilden die Realität nicht ab und sind daher ungeeignet für eine Beurteilung der Langzeitbeständigkeit von verschiedenen Korrosionsschutzsystemen. Aussagen zur Lebensdauer können nur durch Auslagerungen unter den realen Bedingungen, wie klimatische Einflüsse, wechselnde Temperatur- und Feuchtegehalte und den Salzgehalt der Luft vorhergesagt werden. Die MPA Universität Stuttgart verfügt über einen Meerwasserversuchsstand auf der Insel Helgoland, der einzigen deutschen Insel mit Hochseeklima (Abb. 1). Er befindet sich an der Westmole und ermöglicht Prüfungen in der Spritzwasser-, Wechseltauch- und Dauertauchzone des Meeres. Die Spritzwasserzone steht für eine sehr starke Korrosionsbelastung entsprechend der Korrosivitätskategorie C5-M bzw. CX nach DIN EN ISO 9223 und entspricht Bereichen in der Brandung oder im Offshore Bereich des Meeres oder der Beanspruchung durch Spritzwasser neben tausalzbehandelten Straßen.

Im Frühjahr 2010 wurde von den Firmen WHW Walter Hillebrand GmbH & Co. KG und August Friedberg GmbH beschlossen, die Korrosionsbeständigkeit verschiedener Überzüge auf vorgespannten Schraubverbindungen für den Einsatz im Offshore-Bereich untersuchen zu lassen.

Dazu wurden im Sommer 2010 jeweils 5 Parallelproben auf der Insel Helgoland in der Spritzwasserzone für etwa 2 Jahre ausgelagert. Am 04.09.2012 wurden die Proben im Beisein der Firmen WHW Walter Hillebrand GmbH & Co. KG und August Friedberg GmbH, des Germanischen Lloyd und der MPA Uni Stuttgart entnommen und der MPA für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt.

Vorher wurden bei der Firma August Friedberg GmbH die Losbrechkräfte bestimmt. Sowohl die Auslagerung, als auch die Entnahme und die Bestimmung der Losbrechkräfte fanden unter Aufsicht des Germanischen Lloyd (GL) statt.

In dieser gutachterlichen Stellungnahme werden die Untersuchungen und die Ergebnisse über 26 Monate Auslagerung zusammengestellt.

## 2 Proben

Als Proben wurden Doppelenden M30 x 200 – 10.9 mit verschiedenen Korrosionsschutzsystemen gewählt (Abb. 2). Sie bestehen aus Vergütungsstahl der Werkstoff Nr. 1.7076. Die konzipierte Probenform durch Doppelende mit Muttern und Schrauben berücksichtigt neben der atmosphärischen Korrosion zusätzliche Einflüsse durch Spaltkorrosionsbedingungen.

Durch das Aufbringen von Korrosionsschutzüberzügen kann die Gefahr des Eindringens von Wasserstoff in den Grundwerkstoff der Proben bestehen und bei hochfesten Werkstoffen unter Zugbeanspruchung zu einer wasserstoffbedingten Spannungrisskorrosion führen. Um auch diesen Einfluss bei der Prüfung mit zu berücksichtigen, wurden die Schrauben unter Vorspannung (0,7 x Rp0,2) in eine Hülse aus beschichtetem Stahl eingebaut. Weiterhin wurde durch eine einseitige 5° Neigung des Verspannbereiches gegen die Hülse eine mehraxiale Belastung der Proben simuliert.

Die so konzipierten Schraubverbindungen/Hülsen wurden mit Hilfe von Isolatoren an die Versuchsrahmen angeschraubt (Abb. 3). Der Einbau erfolgte senkrecht. Die Hülsen sind dabei mit Langlöchern versehen, so dass gewährleistet ist, dass das Korrosionsmedium auch an den verspannten Bereich gelangt (siehe Abb. 4).

Es wurden 3 verschiedene Korrosionsschutzsysteme mit den folgenden Sollschichtdicken aufgebracht (Tabelle 1). (Anm.: Die detaillierten Daten der aufgebrachten Überzüge, Gleitschichten und Beschichtungen liegen der MPA vor, sollen jedoch hier nicht detaillierter angegeben werden.)

*Tab. 1: Schutzsysteme und Sollschichtdicken der zur Verfügung gestellten Proben*

| Nr. | Art | Kurzbezeichnung | Sollschichtdicke Überzug |
|---|---|---|---|
| I | Feuerverzinkung gemäß ISO 10684 | tZn | 50 µm |
| II | nicht elektrolytisch aufgebrachter Überzug | Überzug nach ISO 10683 | 15 µm + 6 µm. |
| III | elektrolytisch aufgebrachter Überzug (transparent passiviert versiegelt + Gleitbeschichtung) | Oxigard | 10-15 µm |

## 3 Durchgeführte Untersuchungen

Nach den Entnahmen nach 2 Jahren Auslagerung wurden die Schraubverbindungen zunächst optisch beurteilt und fotografisch dokumentiert. Die Bestimmung der Losbrechkräfte fand unter Aufsicht des GL bei der Firma August Friedberg GmbH statt, da dort die erforderlichen Geräte zur Durchführung der Versuche vorhanden sind.

Anschließend wurden die Schraubverbindungen an der MPA weiter untersucht. Dazu wurden die Verbindungen zunächst auseinandergeschraubt, um auch die in der Hülse liegenden Teile im Hinblick auf Korrosionserscheinungen zu beurteilen und fotografisch zu dokumentieren.

Der Oberflächenzustand der Proben wurde in Anlehnung an DIN EN ISO 10289 mittels Punkt- bzw. Fleckkarten anhand des prozentualen Anteiles von Korrosion und Korrosionsprodukten auf der Oberfläche in Bewertungsgrade eingeteilt.

Nach der augenscheinlichen Beurteilung wurde jeweils eine der drei Parallelproben für die weiteren metallografischen Untersuchungen ausgewählt. Es wurden Querschliffe aus dem Bolzen am Übergang zum Gewinde und aus den jeweiligen Muttern heraus präpariert. Dadurch konnte die Art und die Tiefe eines korrosiven Angriffes dargestellt werden. Weiterhin konnten so Restschichtdicken der Überzüge und Beschichtungen mikroskopisch vermessen werden.

## 4 Untersuchungsergebnisse

### 4.1 Visuelle Beurteilung

System I - fZn:

Die drei Proben mit dem Korrosionsschutzsystem I – fZn zeigen nach der Auslagerung ein vergleichbares Erscheinungsbild. Die Oberflächen der Bolzen, Schrauben und Muttern haben eine mattgraue Oberfläche und sind mit weißen und beigebraunen Ablagerungen belegt.

Es wird nahezu kein Unterschied in Abhängigkeit von der Einbaulage festgestellt. Weiterhin wird deutlich, dass auch der Bolzen, welcher im Einbauzustand von der Hülse umschlossen war, ein vergleichbares Erscheinungsbild zeigt, wie die der Atmosphäre direkt ausgesetzten Probenteile. Das bedeutet, dass kein Unterschied zwischen bewitterter und nicht direkt bewitterter Oberfläche erkennbar ist.

Die Oberflächen aller 3 beurteilten Proben erhalten den Bewertungsgrad 10 in Anlehnung an ISO 10289. Zur Anschauung ist als Beispiel die Probe I-2 in den Abbildungen 5 bis 8 im Anlieferungszustand und nach dem Auseinanderschrauben dokumentiert.

System II – Überzug nach ISO 10683:

Auch die drei Proben, die durch das Korrosionsschutzsystem II geschützt wurden, zeigen ein vergleichbares Erscheinungsbild. Es wird beispielhaft in den Abbildungen 9 bis 12 anhand der

Probe II-9 dokumentiert. Neben einer grauen unbeeinflussten Oberfläche wird punktuell bis flächig Rotrost festgestellt. Dabei ist die Korrosion bei den oben eingebauten Muttern, Unterlegscheiben und dem im Einbauzustand oberen Teil der Bolzen stärker ausgebildet als bei den unten liegenden Teilen.

Im Einzelnen werden die folgenden Feststellungen gemacht: Die Muttern zeigen auf den Stirnflächen mehr Korrosion als auf den Seitenflächen. Die Innengewinde sind annähernd metallisch blank. Die Ränder der Unterlegscheiben sind flächig von Rotrost bedeckt. Die Bolzen weisen am Übergang Gewinde – glatte Fläche teilweise Blasenbildung mit Abplatzungen des Korrosionsschutzsystems auf (siehe Abb. 10 und 11). Dies wird zum Teil auch an den Stirnflächen der Muttern festgestellt (siehe Abb. 12).

Die Oberflächen der 3 beurteilten Proben erhalten den Bewertungsgrad 1 bzw. 2 in Anlehnung an ISO 10289.

System III - Oxigard:

Das Aussehen der drei Verschraubungen mit dem Korrosionsschutzsystem III nach der Auslagerung ist beispielhaft in den Abbildungen 13 bis 16 an der Probe Nr. III-6 dargestellt. Die Proben erscheinen dunkelgrau. Stellenweise sind weiße Beläge vorhanden. Auf den im Einbau unten liegenden Gewinden der Bolzen sind rotbraune Korrosionsprodukte erkennbar (Abb. 14 und 15).

Die Oberflächen der 3 beurteilten Proben erhalten den Bewertungsgrad 8 bzw. 9 in Anlehnung an ISO 10289.

### 4.2 Metallografische Untersuchungen

Metallografische Schliffe wurden aus dem Übergangsbereich glatte Bolzenfläche – Gewinde und aus den Muttern hergestellt. Für eine vergleichende Beurteilung und einfachere Dokumentation wurden die verschiedenen Seiten bzw. Bereiche der Schliffe mit Buchstaben und die Gewindezähne mit Ziffern bezeichnet. Übersichten sind in den Abbildungen 17 und 18 dargestellt.

#### 4.2.1 Beurteilung der Schutzschichten nach der Auslagerung

System I - fZn:

**Bolzen**: Das Korrosionsschutzsystem I auf dem Bolzen Nr. I-2 nach der Auslagerung ist in den Abbildungen 19 bis 21 fotografisch dokumentiert. Erkennbar wird, dass die Zinkschicht korrosiv angegriffen ist, aber noch eine relativ gleichmäßige Schichtdicke von etwa 75 µm aufweist. Weiterhin ist die Ausbildung von Weißrost ersichtlich. Auf den Gewindezähnen ist die Zinkschicht teilweise nicht mehr vorhanden, teilweise abgehoben und teilweise noch gleichmäßig ausgebildet.

Auch hier ist ein korrosiver Angriff erkennbar. Die Schichtdicke der noch vorhandenen Schicht liegt bei 79 µm. Risse werden nicht festgestellt.

**Mutter**: Bei der Mutter sind Unterschiede im Hinblick auf die Einbaulage feststellbar. Dabei weisen die Schichten auf der Außenseite (Seite A) und auf der einen Stirnseite der Mutter (Seite B) einen korrosiven Angriff, verbunden mit der Bildung von Weißrost auf (Abb. 22 und 23) Die Zinkschichtdicken liegen hier bei 57 bis 95 µm. Die Seite, die im Einbauzustand der Unterlegscheibe zugewandt war (Seite C), zeigt dagegen keine Anzeichen eines korrosiven Angriffes (Abb. 24). Die Zinkschichtdicke beträgt hier 51 bis 76 µm.

Durch die normative Anforderung, dass das Muttergewinde erst nach der Feuerverzinkung geschnitten werden darf, befindet sich im Gewinde der Mutter kein Korrosionsschutz (Abb. 25). Hier übernimmt die Zinkschicht des Bolzens mittels kathodischem Schutz den Korrosionsschutz des blanken Mutterngewindes. Es ist ein korrosiver, muldenförmiger Angriff des Grundwerkstoffs vorhanden. Auch hier wurden keine Risse festgestellt.

<u>System II – Überzug nach ISO 10683</u>:

**Bolzen**: Der metallografische Querschliff des Bolzen Nr. II - 9 nach der Auslagerung ist in den Abbildungen 26 und 27 dargestellt. Die Schutzschicht ist nicht mehr erkennbar. Dafür ist ein lokaler korrosiver Angriff des Grundwerkstoffs verbunden mit Rotrostbildung vorhanden. Die Löcher weisen Tiefen bis zu 108 µm auf (Abb. 26). Auch im Bereich des Gewindes ist keine Schutzschicht mehr erkennbar. Hier hat ein korrosiver Angriff des Grundwerkstoffs begonnen (Abb. 27).

**Mutter**: Die Außenseite der Mutter Nr. II-9 (Seite A) ist in den Abbildungen 28 und 29 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Schutzschicht bereichsweise noch vorhanden ist und Dicken zwischen 21 und 44 µm aufweist (Abb. 29). Es gibt jedoch auch Bereiche, in denen zwar noch Schicht erkennbar ist, diese aber mit Korrosionsprodukten (Rotrost) durchzogen ist (Abb. 28). Auf der der Atmosphäre zugewandten Seite der Mutter (Seite B) ist die Schicht ebenfalls noch vorhanden, aber von Rotrost unterwandert (Abb. 30). Die Seite C der Mutter, die sich unter der Unterlegscheibe befunden hat, weist jedoch eine intakte Schutzschicht ohne Unterwanderung mit einer Dicke von 35 µm auf (Abb. 31). Im Gewinde der Mutter ist die Schicht stellenweise noch vorhanden und stellenweise abgetragen (Abb. 32). Rotrost wird (noch) nicht festgestellt.

Weder der Bolzen noch die Mutter wies Risse im Gefüge auf.

<u>System III - Oxigard</u>:

Die in den Abbildungen 33 bis 39 erkennbaren Schichten der Probe NR. III – 6 zeigen das typische rissige Erscheinungsbild von spröden Schutzschichten. Allerdings ist ein leichter Angriff der Schicht vorhanden, was sich auch durch das Auftreten von Weißrost äußert.

**Bolzen:** Die Schichtdicke auf dem Bolzen beträgt etwa 14 µm. Der Bolzen Nr. III-6 weist jedoch auch in weiten Teilen des Gewindes keinen signifikanten korrosiven Angriff des Grundwerkstoffs auf (Abb. 33 und 34). Daneben wird hier jedoch auch ein Korrosionsangriff unter einer abgehobenen Schicht unter massiver Rotrostbildung erkennbar (Abb. 35). Es werden keine Risse festgestellt.

**Mutter:** Der Querschliff der Mutter ist in den Abbildungen 36 bis 39 dargestellt. Auch bei der Mutter wird stellenweise ein korrosiver Angriff des Grundwerkstoffs unter Fehlstellen in der Schicht auf den Seiten A und B festgestellt (Abb. 36 und 37). Die Schicht an sich weist auf der Seite A noch Dicken von 14 µm auf. Auf der Seite C (Unterlegscheibe) erscheinen die Schicht und der Grundwerkstoff nicht angegriffen (Abb. 38). Es wird eine Schichtdicke von 12 µm gemessen. Im Bereich des Gewindes wird ein leichter korrosiver Angriff mit Weiß- und Rotrostbildung festgestellt (Abb. 39). Dieser tritt vorwiegend an Stellen auf, wo die Schicht nicht mehr vorhanden ist. Risse sind nicht feststellbar.

## 5 Zusammenfassung

Zur Beurteilung des Korrosionsverhaltens von Schraubverbindungen für Windkraftanlagen wurden Proben mit verschiedenen Korrosionsschutzsystemen etwa 2 Jahre lang in der Spritzwasserzone auf Helgoland (Korrosivitätskategorie C 5-M nach DIN EN ISO 12944) ausgelagert.

Bei keinem System wurden Risse durch Spannungsrisskorrosion nachgewiesen. Die Ergebnisse für die einzelnen Systeme können wie folgt zusammengefasst werden:

System I - fZn:

- Die Oberfläche der Proben ist durch die Auslagerung nachgedunkelt, es sind großflächig beigefarbene Ablagerungen vorhanden.
- Auf den Oberflächen ist Weißrost erkennbar.
- Die Zinkschicht weist einen beginnenden flächigen Korrosionsangriff auf.
- Der Abtrag der Zinkschicht auf dem Schaft der Schraube und den Außenflächen der Mutter ist gering. Im Bereich der Gewinde liegt er stellweise bei etwa 70 µm.
- Im Gewinde ist ein beginnender muldenförmiger Angriff des Grundwerkstoffs erkennbar.

System II – Überzug nach ISO 10683:

- Die Oberflächen der 3 Proben zeigen nach der Auslagerung in der Spritzwasserzone eine großflächige Bedeckung mit Rotrost.
- Die Schutzschicht ist bereichsweise abgetragen oder mit Weiß- und Rotrost unterwandert.

- Es hat ein muldenförmiger Korrosionsangriff des Grundwerkstoffs begonnen. Die gemessene Tiefe dieser Korrosionsnarben betrug bis zu 108 µm.

System III - Oxigard:

- Die Oberflächen der Proben zeigen ein dunkelgraues Erscheinungsbild, es sind großflächig beigefarbene Ablagerungen vorhanden.
- Auf dem Schaft der Schraube und den Außenflächen der Mutter ist bereichsweise Weißrost, im Gewinde stellenweise Rotrost erkennbar.
- Die Korrosionsschutzschicht zeigt einen geringen flächigen Korrosionsangriff. Die Restschichtdicke liegt noch im Bereich der Grenzen der Sollschichtdicke.
- Im Bereich des Gewindes ist sie stellenweise vollständig abgetragen.
- Dort wird ein beginnender, lokaler Angriff des Grundwerkstoffs festgestellt.

Zur Anschauung werden die Ergebnisse der Beurteilung nach DIN EN ISO 10289 und die ermittelten Abträge in den folgenden Diagrammen gegenübergestellt:

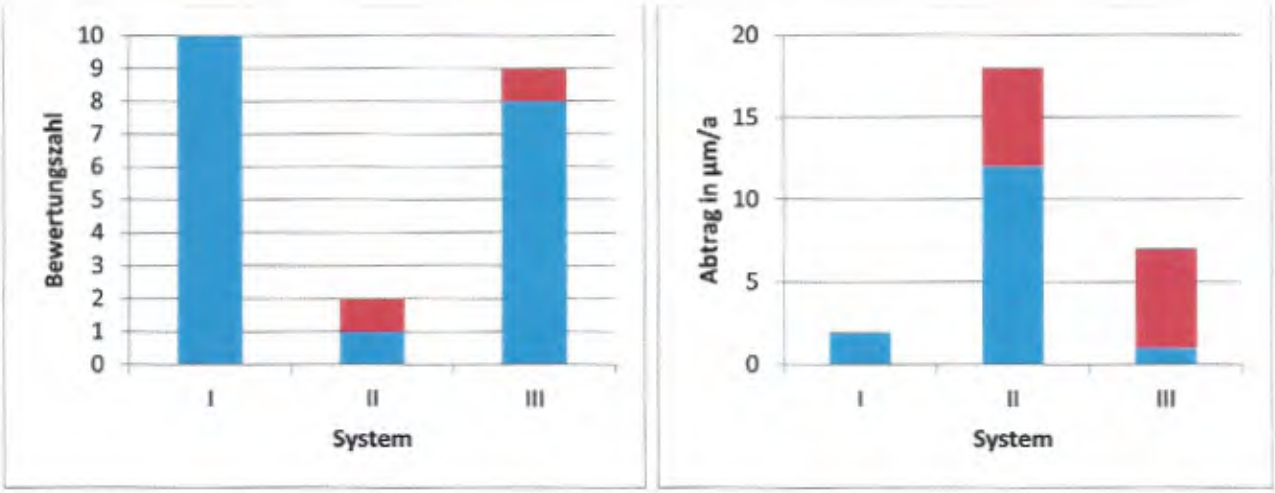



Diagramm 1: Vergleich: Bewertungsgrade und ermittelte Abträge der verschiedenen Systeme nach 2 Jahren Auslagerung in der SWZ

Erkennbar wird, dass eine gute Korrelation zwischen der augenscheinlichen Beurteilung und des tatsächlichen Abtrages der Schutzschichten vorhanden ist. Die Systeme, die einen hohen Bewertungsgrad erhalten haben, zeigen auch nur geringe Abträge.

Für marine Umgebungen sind erfahrungsgemäß Bewertungsgrade größer oder gleich 7 akzeptabel, d.h. dass die Systeme I – fZn und III – Oxigard aus korrosionstechnischer Sicht für den Einsatz im atmosphärischen Offshore-Bereich einsetzbar sind.

## 6 Ergebnisinterpretation und Empfehlungen

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde durch 2 Jahre Auslagerung in praxisnaher Atmosphäre das Korrosionsverhalten von Schraubverbindungen mit verschiedenen Korrosionsschutzsystemen für Offshore-Windenergieanlagen bei der Beanspruchung durch Chloride bewertet.

Die Korrosionsschutzschichten von Schraubverbindungen erleiden naturgemäß beim Verschrauben Beschädigungen bis hin zu großflächigen Abplatzungen. Dies wurde bei den hier durchgeführten Untersuchungen auch an allen Systemen festgestellt. Der festgestellte lokale Angriff des Grundwerkstoffs im Bereich dieser Beschädigung ist jedoch bei allen Systemen als gering zu bezeichnen. Auch wird der Grundwerkstoff durch die gegenseitige Verschraubung weitgehend vor Einflüssen der Atmosphäre bzw. des Seewassers geschützt.

Für die Korrosivitätskategorie C5-M (Spritzwasserzone) rechnet man im ersten Jahr der Auslagerung für verzinkte Oberflächen mit Abträgen bis 8,4 µm. Im Vergleich zu diesen Erfahrungswerten erscheinen die in den Untersuchungen festgestellten Abträge der Zinkschichten (System I - fZn) der in der Spritzwasserzone ausgelagerten Proben als gering bis „normal".

Dagegen weist das System II – Überzug nach ISO 10683 bereits nach 2 Jahren Auslagerung in der Spritzwasserzone eine großflächige Bedeckung mit Rotrost und einen deutlich messbaren lokalen Angriff des Grundwerkstoffs auf. Es ist nicht auszuschließen, dass durch den lokalen Korrosionsangriff die Dauerschwingfestigkeit mit der Zeit sinkt. Dies deckt sich mit anderen von der MPA durchgeführten Auslagerungsversuchen von Proben mit deratigen Überzügen in der Spritzwasserzone auf Helgoland. Auch dabei wurde festgestellt, dass diese Systeme innerhalb weniger Jahre in der Spritzwasserzone komplett versagen, während sie im Labor sehr hohe Standzeiten erzielen.

Das System III - Oxigard zeigt nach der Auslagerung nur vereinzelt einen geringen, lokalen Angriff des Grundwerkstoffs. Großflächig liegt die Schichtdicke des Systems auch nach der Auslagerung noch im Bereich der Sollschichtdicke.

**Dr.-Ing. M. Büteführ**
**Wiss. Mitarbeiterin**

UNIVERSITÄT STUTTGART
MATERIALPRÜFUNGSANSTALT (39)

**Dipl.-Ing. W. Beul**
**Referatsleiter**

Abb. 1: Meerwasserversuchsstand an der Westmole auf Helgoland

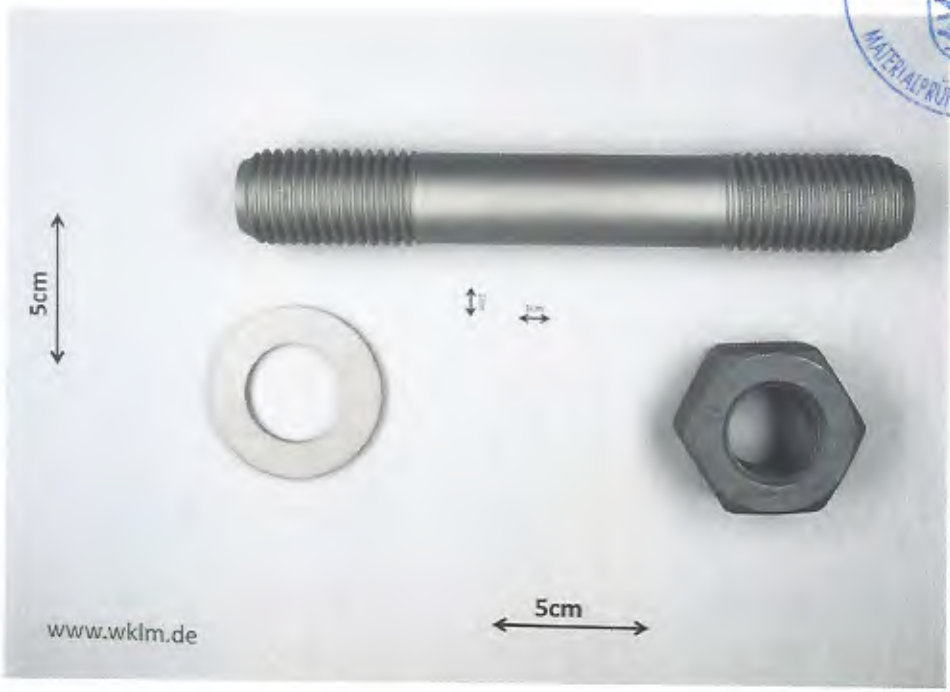



Abb. 2: Gewählte Probenform (Foto des Auftraggebers)

Abb. 3: „Hülse" mit Isolatoren zur Befestigung an den Versuchsrahmen (Foto des Auftraggebers)

Abb. 4: „Hülse" mit Langlöchern zur Sicherstellung des Kontaktes der Proben mit dem korrosivem Medium

UNIVERSITÄT STUTTGART
MATERIALPRÜFUNGSANSTALT (39)

Abb. 5: **Probe Nr. I-2** im Anlieferungszustand

Abb. 6: Probe Nr. I-2 nach Entfernen der Hülse

Abb. 7: Bolzen der Probe Nr. I-2 im Detail

UNIVERSITÄT STUTTGART
MATERIALPRÜFUNGSANSTALT (39)

Abb. 8: Mutter der Probe Nr. I-2 im Detail

UNIVERSITÄT STUTTGART
MATERIALPRÜFUNGSANSTALT (38)

Abb. 9: **Probe Nr. II-9** im Anlieferungszustand

Abb. 10: Probe Nr. II-9 nach Entfernen der Hülse

Abb. 11: Bolzen der Probe Nr. II-9 im Detail

UNIVERSITÄT STUTTGART
MATERIALPRÜFUNGSANSTALT (38)

Abb. 12: Mutter der Probe Nr. II-9 im Detail

UNIVERSITÄT STUTTGART
MATERIALPRÜFUNGSANSTALT (39)

Abb. 13: **Probe Nr. III-6** im Anlieferungszustand

Abb. 14: Probe Nr. III-6 nach Entfernen der Hülse

Abb. 15: Bolzen der Probe Nr. III-6 im Detail

UNIVERSITÄT STUTTGART
MATERIALPRÜFUNGSANSTALT

Abb. 16: Mutter der Probe Nr. III-6 im Detail

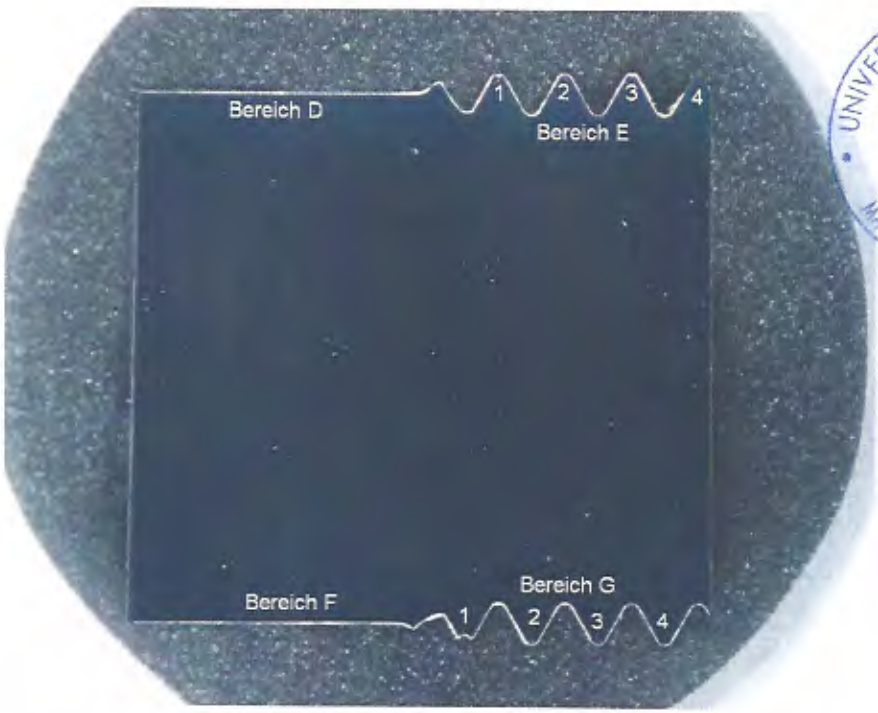



Abb. 17: Übersicht über die Bezeichnung der Schliffe von den Bolzen

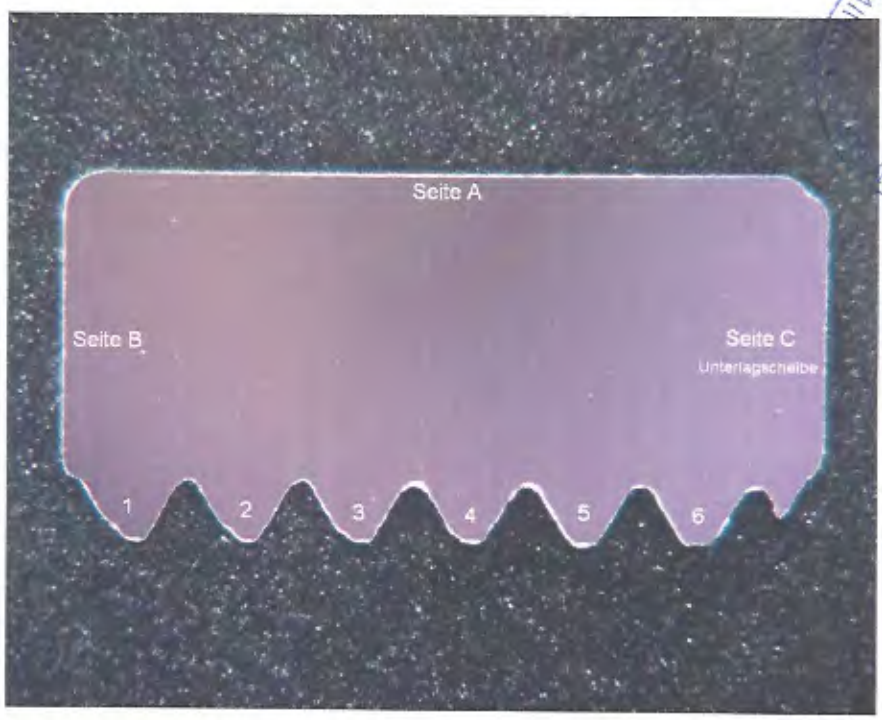



Abb. 18: Übersicht über die Bezeichnung der Schliffe an den Muttern

Abb. 19: Schliffbild **Bolzen Nr. I-2** – Bereich D mit leicht angegriffener Zinkschicht und Weißrost

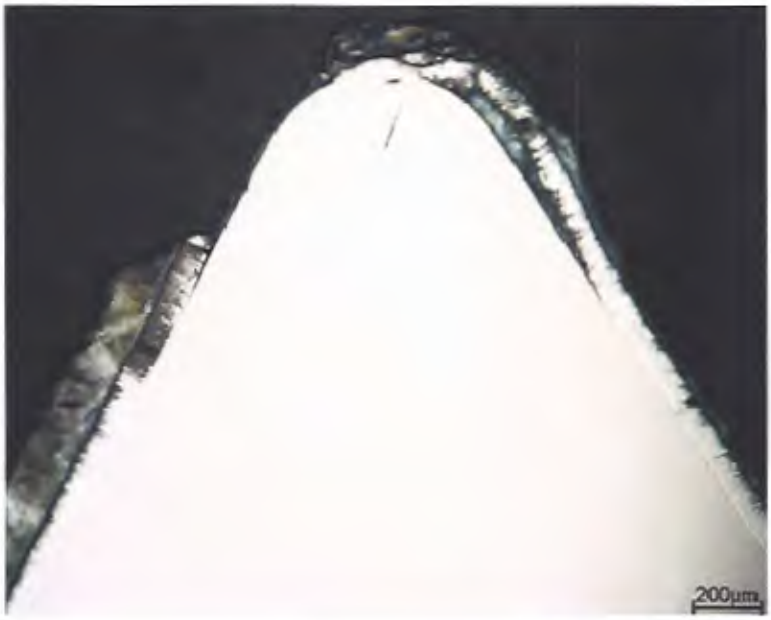



Abb. 20: Schliffbild Bolzen Nr. I-2 – Bereich E mit angegriffener Zinkschicht und Weißrost

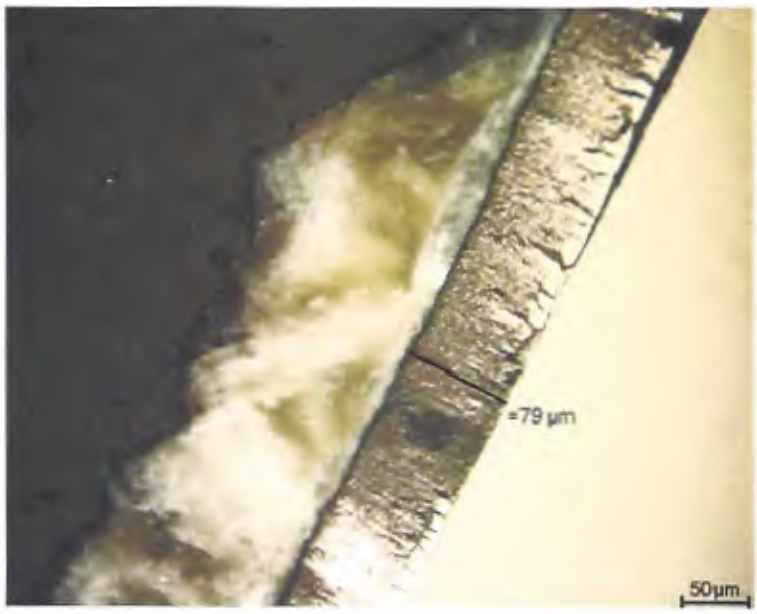
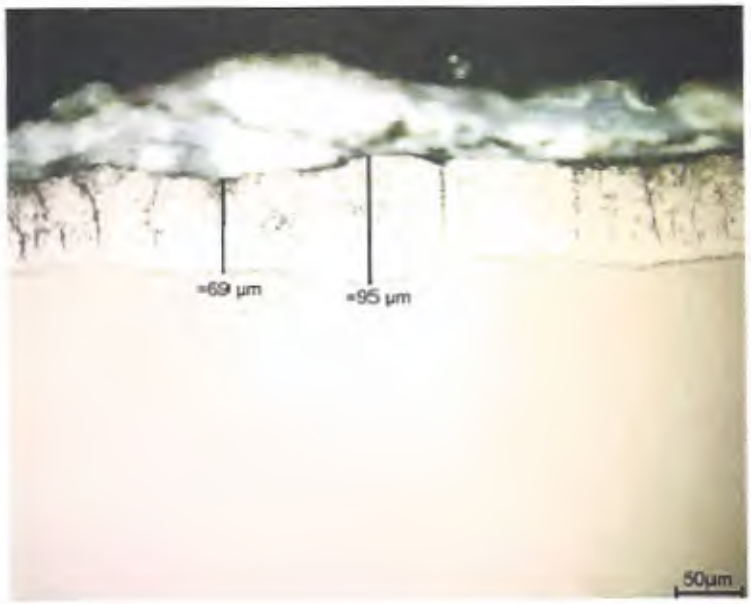


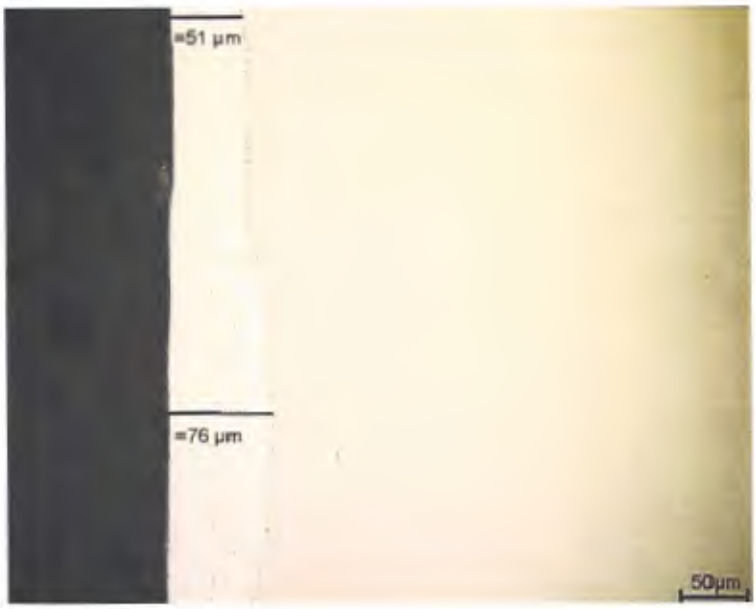

Abb. 21: Detail aus Abb. 10




UNIVERSITÄT STUTTGART
MATERIALPRÜFUNGSANSTALT (MPA)

Abb. 22: Schliffbild **Mutter Nr. I-2 –** Seite A mit angegriffener Zinkschicht und Weißrost

Abb. 23: Schliffbild Mutter Nr. I-2 – Seite B mit angegriffener Zinkschicht und Weißrost




UNIVERSITÄT STUTTGART
MATERIALPRÜFUNGSANSTALT (MPA)

Abb. 24: Schliffbild Mutter Nr. I-2 – Seite C mit Zinkschicht ohne Angriff

UNIVERSITÄT STUTTGART
MATERIALPRÜFUNGSANSTALT

Abb. 25: Schliffbild **Mutter Nr. I-2** – Gewindezahn ohne Zinkschicht mit beginnendem Angriff

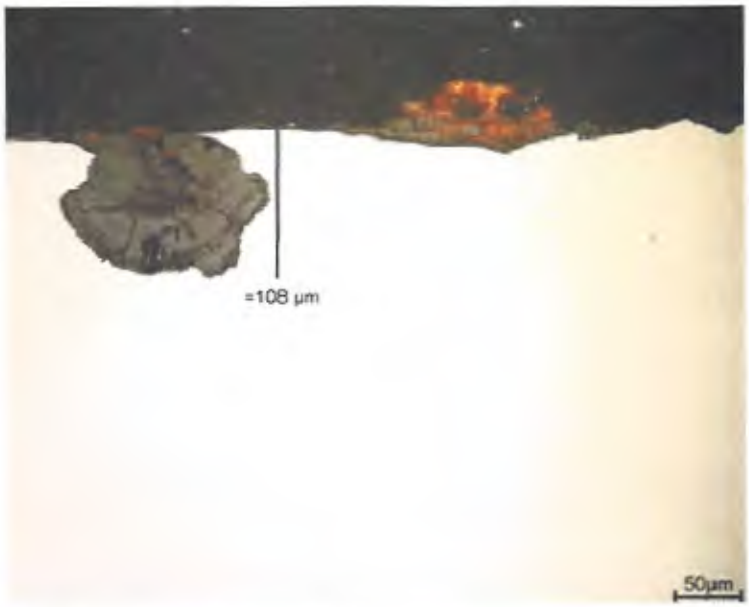



Abb. 26: Schliffbild **Bolzen Nr. II-9** – Bereich F mit abgetragener Schutzschicht und Lochkorrosion

UNIVERSITÄT STUTTGART

Abb. 27: Schliffbild Bolzen Nr. II-9 – Gewindezahn mit abgetragener Schutzschicht und Korrosion (Rotrost)

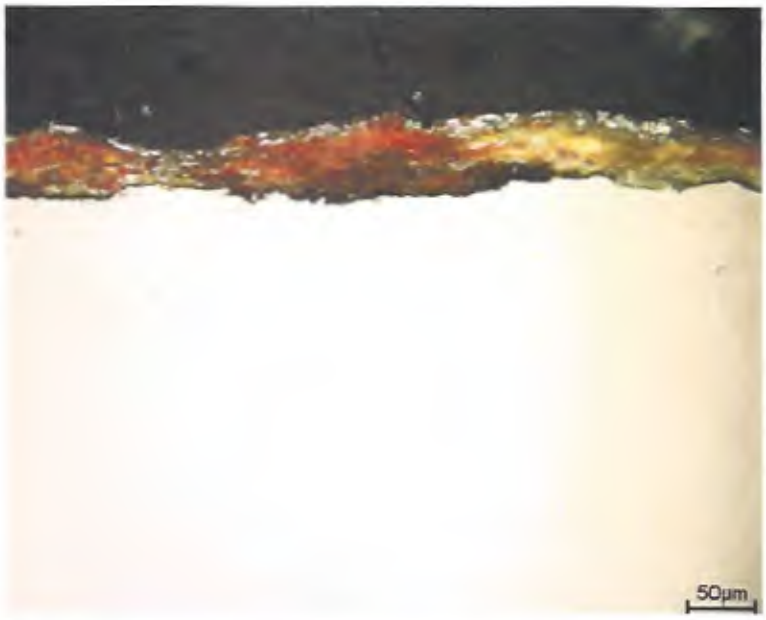



Abb. 28: Schliffbild **Mutter Nr. II-9 –** Seite A stellenweise mit Korrosionsprodukten in der Schicht

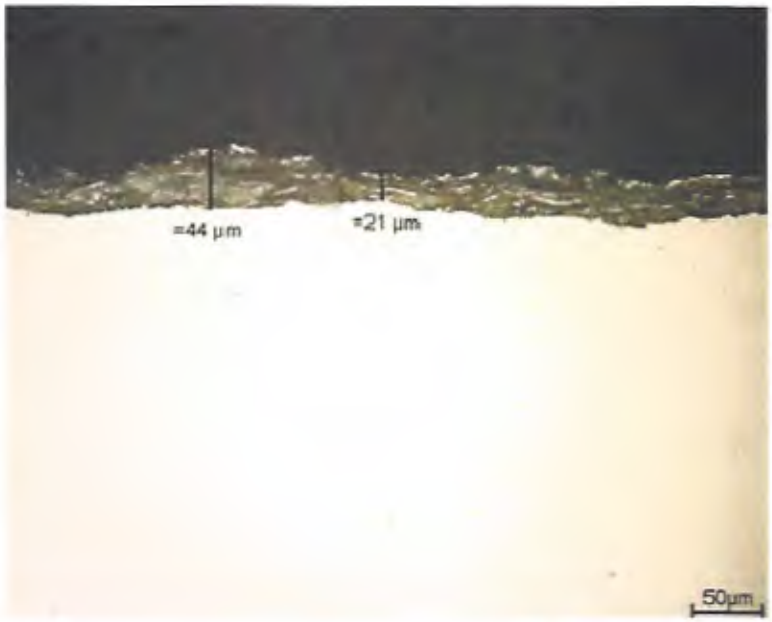



Abb. 29: Schliffbild Mutter Nr. II-9 – Seite A ohne Korrosionsprodukte in der Schicht

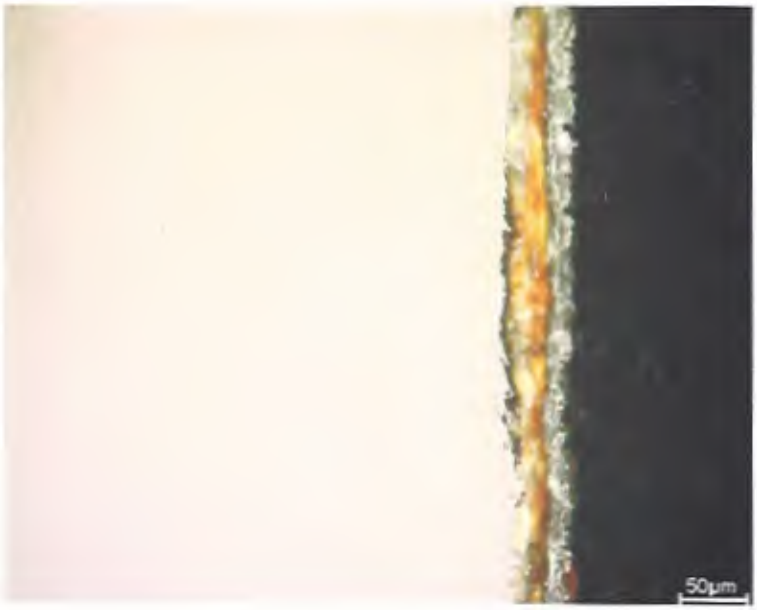



Abb. 30: Schliffbild Mutter Nr. II-9 – Seite B mit Korrosionsprodukten in der Schicht

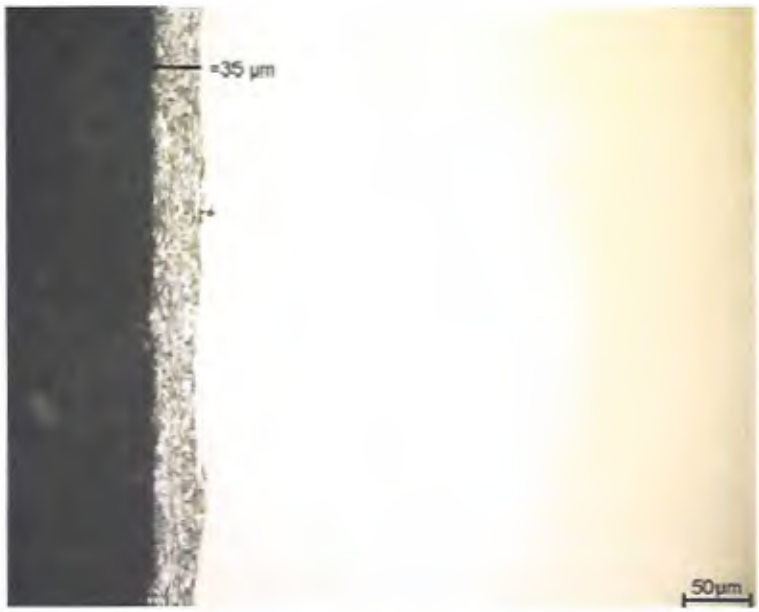



Abb. 31: Schliffbild Mutter Nr. II-9 – Seite C mit nicht angegriffener Schicht

Abb. 32: Schliffbild Mutter Nr. II-9 – Gewindegrund mit Resten der Schicht

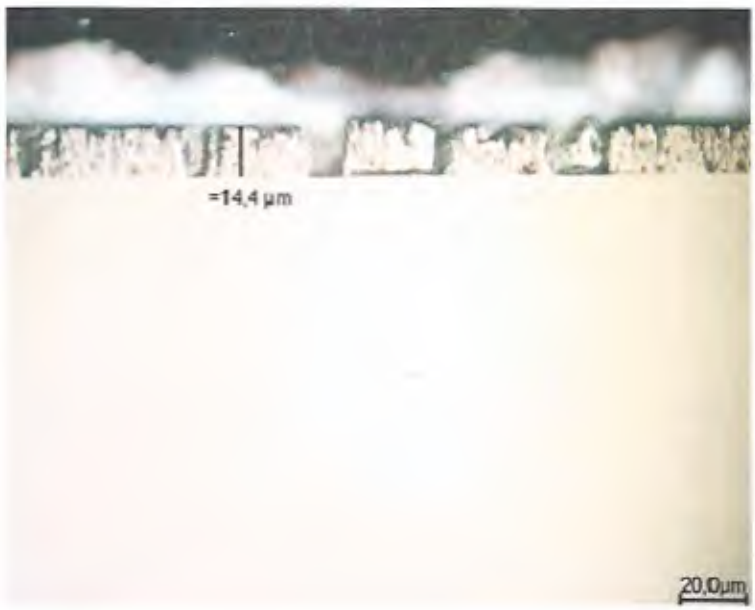



Abb. 33: Schliffbild **Bolzen Nr. III-6 –** Bereich D mit angegriffener Schicht und Weißrost

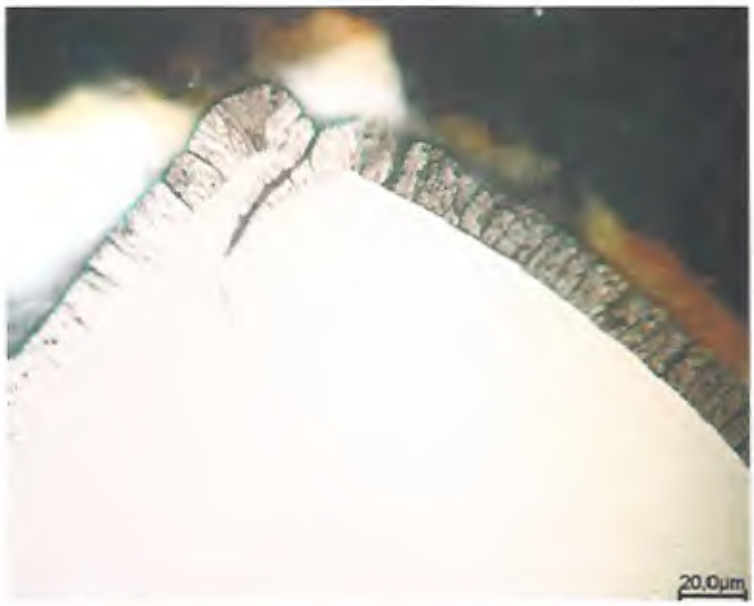



Abb. 34: Schliffbild **Bolzen Nr. III-6 –** Bereich E mit leicht angegriffener Schicht und Weiß- und Rotrost

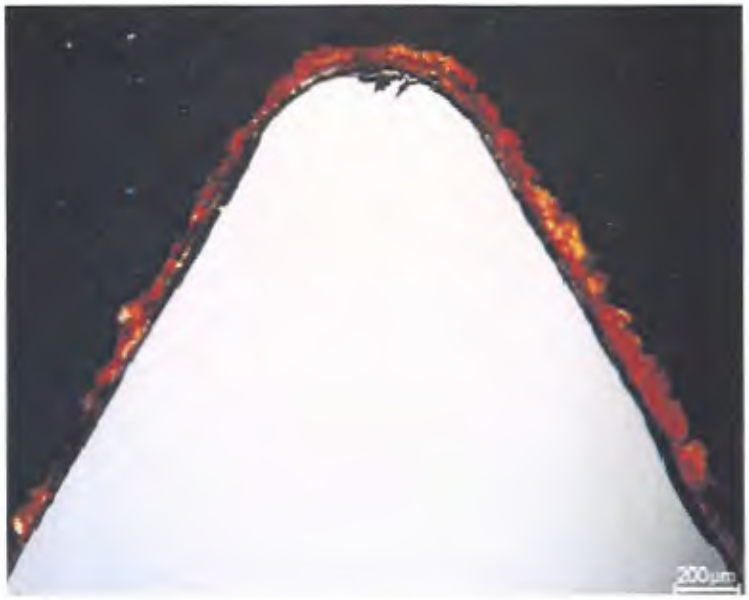



Abb. 35: Schliffbild Bolzen Nr. III-6 – Bereich E mit angegriffener Schicht Rotrost und Angriff

Abb. 36: Schliffbild **Mutter Nr. III-6 –** Seite A mit leicht angegriffener Schicht und Weißrost

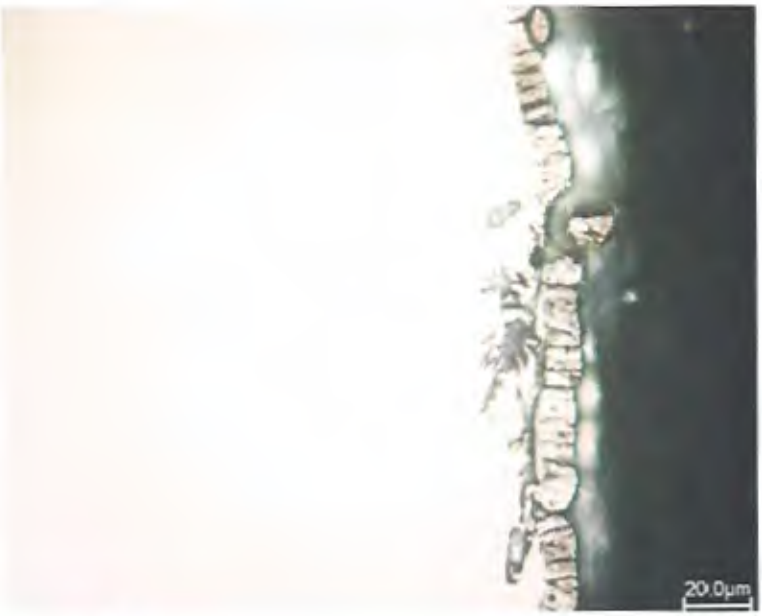



Abb. 37: Schliffbild **Mutter Nr. III-6** – Seite B mit leicht angegriffener Schicht, Korrosionsangriff und Weißrost

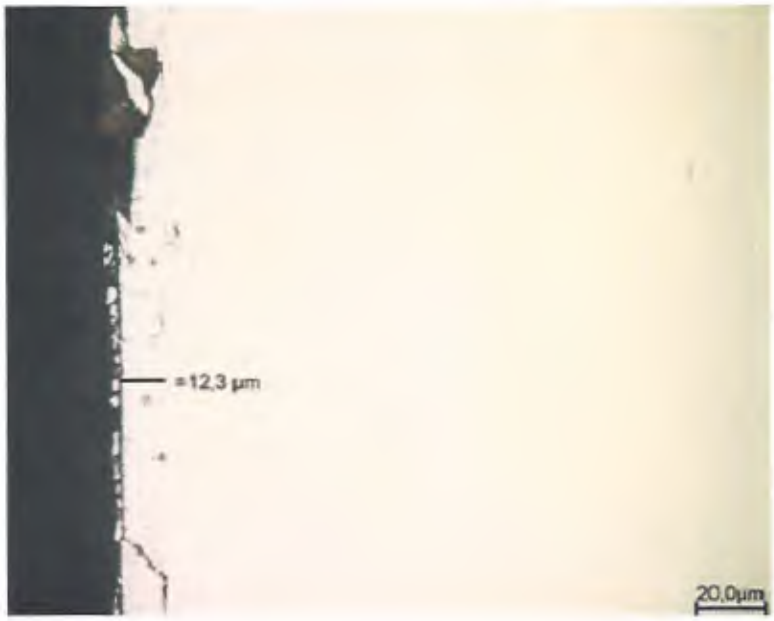



Abb. 38: Schliffbild Mutter Nr.III-6 – Seite C mit nicht angegriffener Schicht

Abb. 39: Schliffbild Mutter Nr. III-6 – Gewindezahn mit Resten der Schicht