

Ansätze zur Bewertung und Quantifizierung von Korrosionserscheinungen an Abgasanlagen

EMCON Technologies und P-A-M Röntgenfilmdigitalisierung

Dr. Helmut Wieser, Burkhard Meyer

Agenda

- Korrosionsarten und –formen an Abgassystemen
- Problematik der Bewertung und Quantifizierung
- Vor- und Nachteile von gängigen Bewertungsmethoden
- Einsatz röntgenographischer Methoden
- Beispiele und Ausblick

Korrosionsarten in Abgassystemen

Korrosionsarten die in DIN 50900 definiert sind:

- Gleichförmige Korrosion
- Lochkorrosion
- Kontaktkorrosion (galvanische Korrosion)
- Spannungsrisskorrosion
- Schwingungsrisskorrosion
- Spaltkorrosion
- Interkristalline Korrosion (Kornzerfall)
- Erosionskorrosion
- Hochtemperaturkorrosion



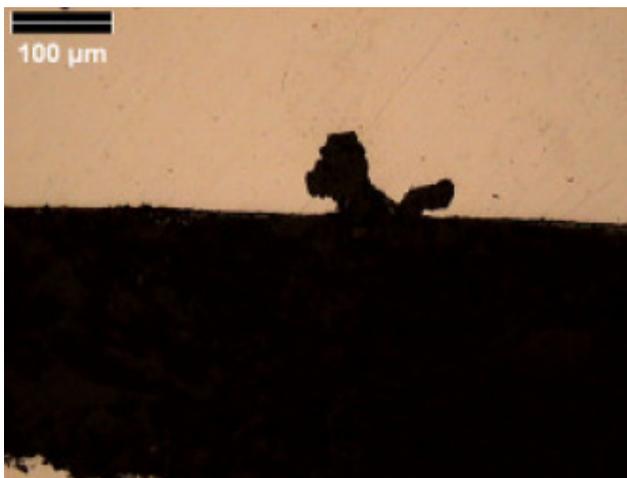
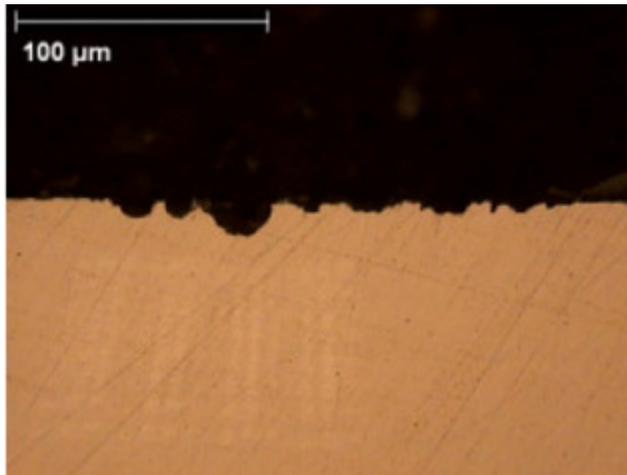
Treten im Abgasanlagen auf

Gleichförmige Korrosion



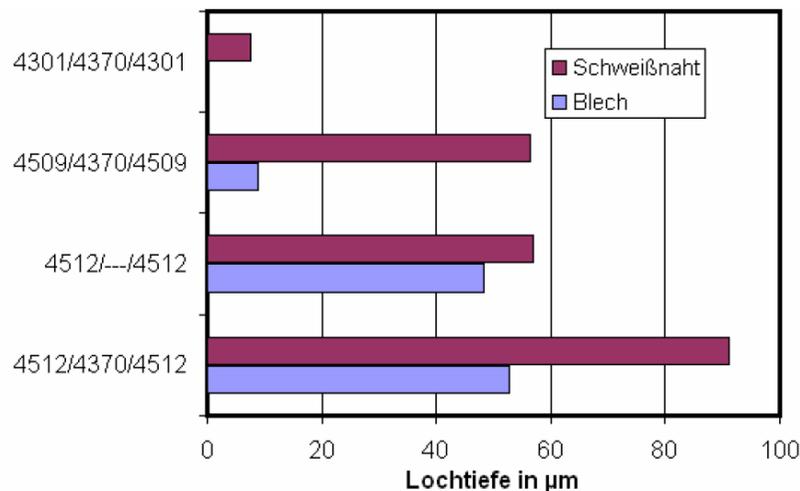
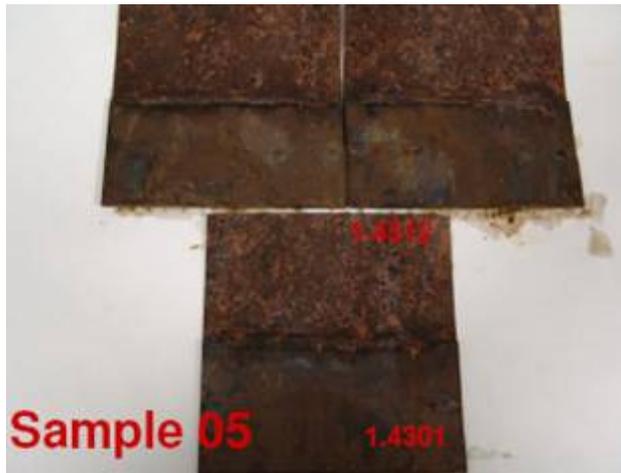
- Tritt vor allem an un- oder niedriglegierten Stählen auf – Bei Abgassystemen an aluminierem unlegiertem Stahl
- Bei rostfreien Stählen tritt diese Korrosionsform in Verbindung mit extrem sauren Kondensaten auf. Besonders bei den etwas niedriger legierten ferritischen Güten (1.4512), die den passiven Zustand im sauren Medium nicht mehr erreichen.
- Die Schädigung erfolgt durch eine relativ gleichmäßige Materialdickenabnahme.
- Die Korrosionsform verursacht große Rotrostmengen und ist bereits in einem frühen Stadium zu erkennen.
- Die Messung der Korrosionstiefe erfolgt über Dickenmessung bzw. metallographisch im Schliff.
- Die Bestimmung der Lebensdauer ist beherrschbar und erfolgt über die Ermittlung von Abtragsraten in mm/a.

Lochkorrosion (Lochfraß)



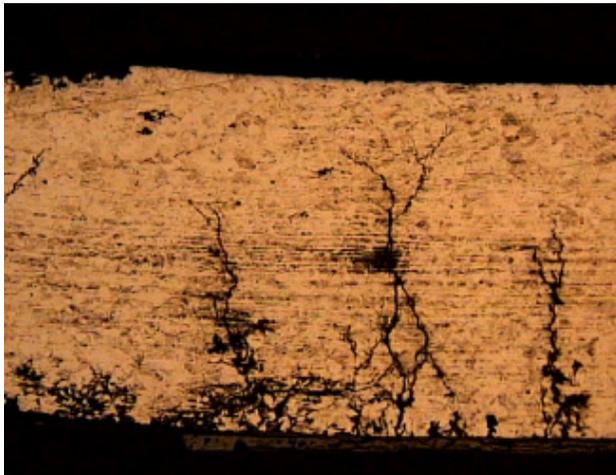
- Lochkorrosion – oder bei Abgassystemen vorwiegend Muldenkorrosion – tritt an passivierbaren Werkstoffen (nichtrostenden Stählen) durch einen örtlichen Durchbruch der Passivschicht auf. Verantwortlich dafür sind vor allem Halogenidionen – also Chloride.
- Lochkorrosion tritt lokal begrenzt in kleinen Bereichen auf und entwickelt zum Teil sehr hohe Abtragsraten.
- Lochkorrosion ist im Anfangsstadium nur schwer erkennbar. Später sind die Rotrostablagerungen im kathodischen Bereich erkennbar.
- Die Quantifizierung erfolgt durch Angabe von Lochtiefe und/oder Lochdichte. Beide unterliegen starken statistischen Schwankungen.
- Eine Lebensdauerabschätzung durch die Schädigung durch Lochkorrosion ist schwierig.

Kontaktkorrosion



- Kontaktkorrosion tritt auf durch die Kombination unterschiedlicher Werkstoffe (Bleche oder Schweißzusatzwerkstoffe). Die Korrosion des unedleren Werkstoffs wird aufgrund von Polarisierung durch den edleren Werkstoff verstärkt.
- Eine Verstärkung des Korrosionsangriffs infolge Polarisierung (Potentialdifferenz) kann auch durch unterschiedliche Zustände an ein und demselben Werkstoff auftreten (Wärmeeinflusszone im Schweißnahtbereich, verformte Bereiche, ...).
- Kontaktkorrosion führt zu einem verstärkten Abtrag im Kontaktbereich.
- Da der Ort des Auftretens durch die Kontaktstelle der unterschiedlichen Werkstoffe definiert ist, lässt er sich in der Regel gut erkennen.
- Die Abschätzbarkeit der Lebensdauer ist in der Regel schwierig.

Spannungsrissskorrosion



- Spannungsrissskorrosion (SRK) tritt in der Abgastechnik vor allem an austenitischen Stählen auf. Insbesondere an Austeniten mit höheren Mengen an Delta-Ferrit. Spannungsrissskorrosion tritt nur in Kombination mit hohen Spannungen (Eigenspannungen oder äußere Spannungen) auf.
- SRK bei austenitischen Werkstoffen wird durch heiße chloridhaltige Medien ausgelöst (Straßensalze).
- Erkennbarkeit von außen erst möglich bei völligem Durchreißen der Proben bzw. der Bauteile.
- Die Schädigung tritt durch Aufreißen der Bleche auf. Gemessen werden die Standzeiten bis zum Bruch als Funktion der Belastung. Standzeiten unterliegen extrem starken statistischen Schwankungen.
- Eine Lebensdauerabschätzung ist kaum möglich bzw. erfordert aufwändige Versuchsreihen.

Schwingungsrisskorrosion (Korrosionsermüdung)



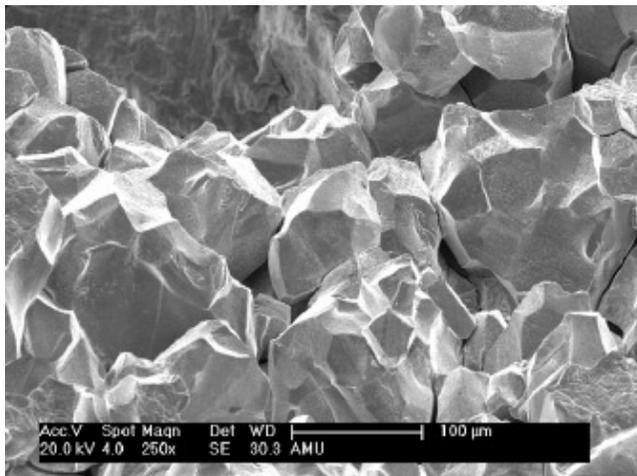
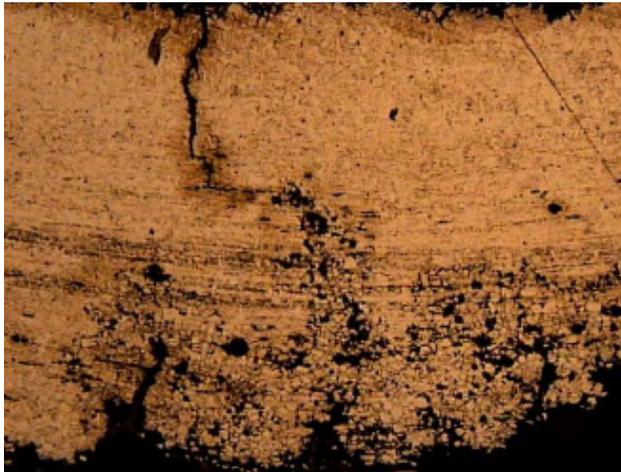
- Betroffen sind alle Werkstoffe, die zugleich mechanisch und korrosiv belastet werden.
- Bei Korrosionsermüdung wird die Rissinitiierung durch die Kerbwirkung örtlicher Korrosionsstellen (z.B. Lochkorrosion) begünstigt. Die Rissausbreitung wird durch die Blockade reversibler Versetzungsbewegungen am Rissgrund infolge Korrosion beschleunigt.
- Die Folge ist das Versagen des Bauteils durch Bildung eines Ermüdungs- bzw. Korrosionsermüdungsrisse.
- Erkennbarkeit ist meist erst bei vollständigem Versagen des Bauteils gegeben.
- Eine quantitative Auswertung ist nur mittels Wöhlerversuchen möglich.
- Eine Abschätzung der Lebensdauer ist wegen des stark schwankenden Einflusses der Korrosion schwer möglich.

Spaltkorrosion



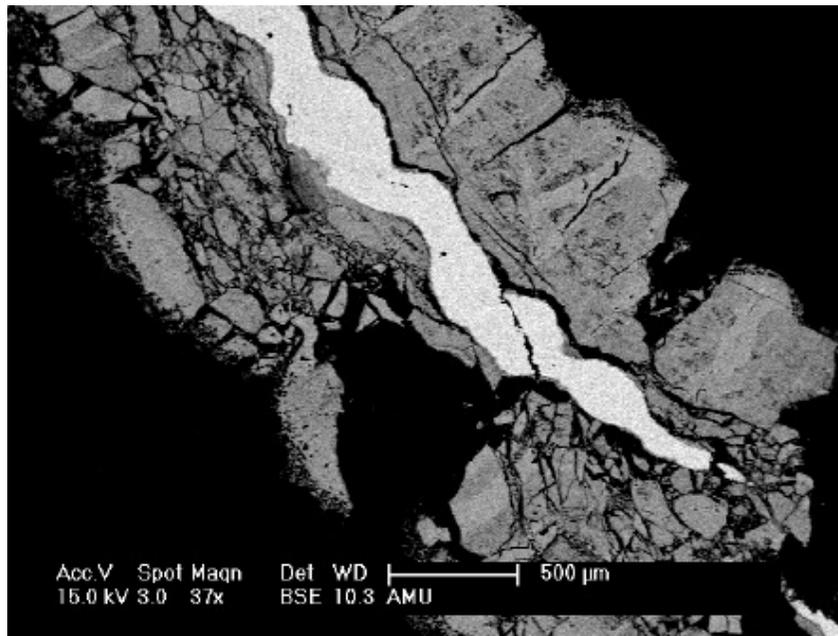
- Betroffen sind alle Stähle und Werkstoffe
- Korrosionsangriff entsteht durch Anreicherung von aggressiven Substanzen im Spaltbereich. Der Austausch mit dem umgebenden Mediums ist meist nicht mehr oder nur sehr eingeschränkt möglich.
- Der Angriff erfolgt lokal im Spalt durch Loch- oder Flächenkorrosion – je nach Art des Werkstoffes.
- Erkennbarkeit ist wegen mangelnder Zugänglichkeit erst gegeben, wenn die Teile durchrosten. Teilweise sind austretende Korrosionsprodukte zu erkennen.
- Quantifizierbarkeit schwierig wegen des hohen Aufwands für die Lochtiefenmessung.
- Lebensdauerabschätzung schwierig, da sich der Vorgang selbst beschleunigt.

Interkristalline Korrosion



- Tritt an nichtrostenden Stählen auf, insbesondere bei hohem C-Gehalt und oder fehlender Stabilisierung des Kohlenstoffs durch Nb und Ti.
- Interkristalline Korrosion (IK) wird durch die Bildung von Cr-Karbiden entlang der Korngrenzen in einem Temperaturbereich zwischen 500 °C und 800 °C verursacht. Besonders empfindlich sind austenitische Güten wie 1.4828 und 1.4301.
- IK kann nur im metallographischen Schliff bzw. durch Biegung des Bauteiles erkannt werden.
- Lebensdauervorhersage ist wegen der schlechten Erkennbarkeit und wegen der vielen, kaum bewertbaren Einflussfaktoren wie C-Gehalt, Betriebstemperaturen, Gehalt an Stabilisierungselementen, etc. schwer möglich.

Hochtemperaturkorrosion



- Betrifft alle Materialien (abhängig von der Einsatztemperatur)
- Hochtemperaturkorrosion (HTC) wird durch die Oxidation des Werkstoffes infolge heißer Gase mit und ohne aggressiven Komponenten wie SO_2 , H_2O etc. verursacht.
- Kritisch sind die Temperaturschwankungen (Thermoschock) wegen des Auf- bzw. Abplatzens der Oxidschichten.
- Beginnende Oxidation lässt sich an den anlauffarben, bzw. An den Oxidfarben erkennen.
- Quantifizierung ist verhältnismäßig einfach durch Dickenmessung oder im Schliff möglich. Die Oxidationsraten werden in mm/a angegeben.
- Eine Lebensdauerabschätzung ist verhältnismäßig gut möglich.

Problematik bei der quantitativen Bewertung von Korrosionserscheinungen

Wie lassen sich Teile aus dem Feld quantitativ Bewerten



Korrosionsproben nach 10 Wochen Prüfung

1.4512



1.4510



1.4509



1.4301



Alle Proben sind nach 10wöchiger Prüfung flächig mit Rostbraunen Ablagerungen belegt. Eine quantitative Abschätzung des Korrosionsangriffs lässt sich kaum durchführen. Es ist im Ansatz zu erkennen, dass die Ablagerungen bei dem Werkstoff 1.4512 etwas dicker sind. Dies lässt auf eine stärkere Korrosion schließen.

Korrosionsproben aus der Prüfung nach dem Entfernen der Korrosionsprodukte

1.4512



1.4510



1.4509



1.4301



Die Proben wurden zur weiteren Begutachtung vom Rotrost befreit. Dazu werden spezielle Beizmittel eingesetzt, die das Metall selbst kaum angreifen. Es ist zu erkennen, dass der Angriff nicht homogen erfolgt.

Detailausschnitt aus der Oberfläche der Probe 1.4510 mit einzelnen Löchern



Ein vergrößerter Ausschnitt der Probe zeigt die Vielzahl der Löcher und die Häufung an manchen Flächen. Eine manuelle Auswertung des Korrosionsangriffs erfordert einen hohen Zeitaufwand.

Detailausschnitt aus der Oberfläche der Probe 1.4512 mit starker Lochkorrosion

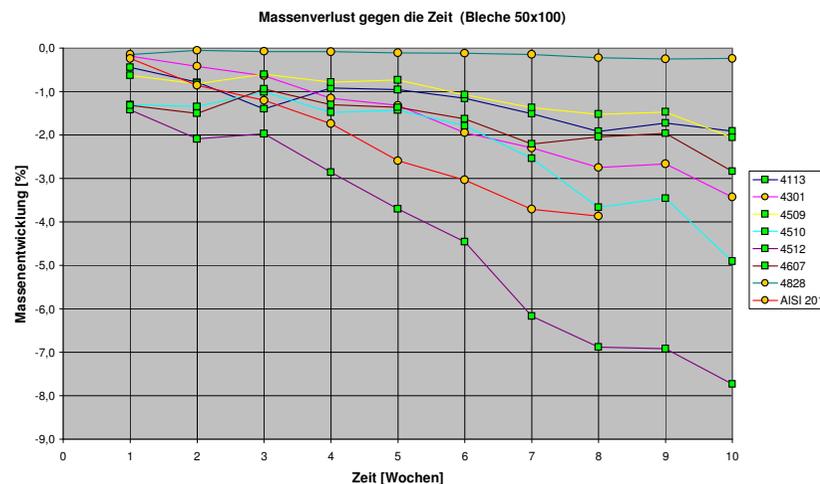


Noch deutlich mehr Löcher sind in dem unedleren Werkstoff 1.4512 zu erkennen. Eine manuelle Auswertung aller Löcher ist hier schier unmöglich.

Möglichkeiten der quantitativen Auswertung

- Gravimetrische Auswertung (wiegen der Proben vor und nach dem Korrosionstest)
- Messung der Lochtiefe im metallographischen Schliff
- Messung der Lochtiefe im Auflichtmikroskop
- Abschätzung der Lochdichte durch Klassifizierung von Probenbereichen.
- Messung der Lochtiefe und Dichte im 3D-Mikroskop
- Messung der Lochtiefe und Dichte über Röntgenographie.

Bestimmung des Massenverlustes über die Zeit



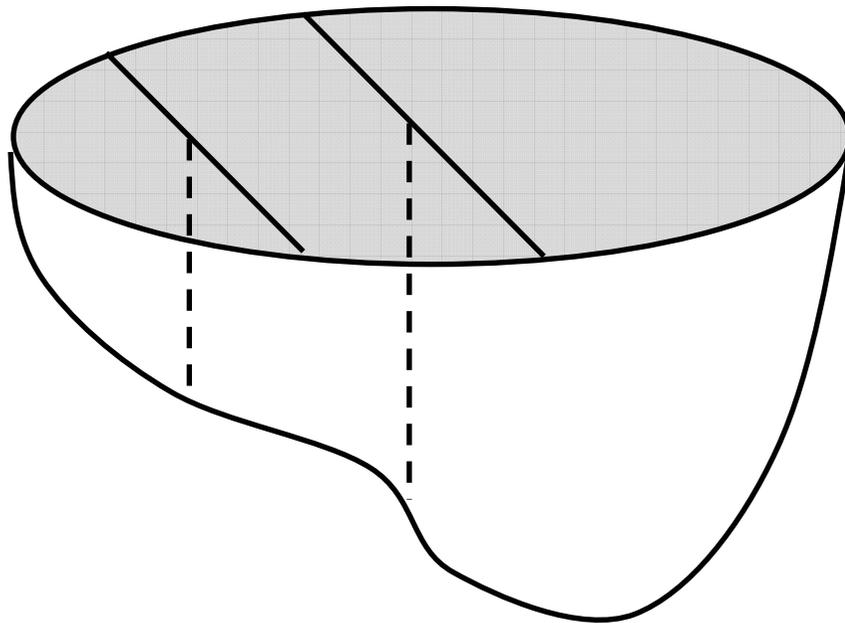
Vorteile

- Verhältnismäßig geringer Versuchsaufwand.
- Investitionskosten sind gering
- Präzise Quantifizierung ist möglich

Nachteile

- Nur an Proben möglich, nicht an Teilen aus dem Feld, da dort das Ausgangsgewicht nicht bekannt ist.
- Massenverlust ist nur ein integraler Wert, der keinerlei Aussagen über Korrosionsformen und -tiefen erlaubt.
- Für lokal auftretende Korrosion ist der Massenverlust nur ein ungenügendes Bewertungskriterium.

Messung der Lochtiefen am metallographischen Schliff



Vorteile

- Anerkannte und genaue Methode zur Bestimmung des Tiefenprofils von Korrosionslöchern
- Lässt sich auch anwenden an ungereinigten Proben → Vermeidung von zusätzlichen Beeinflussungen.

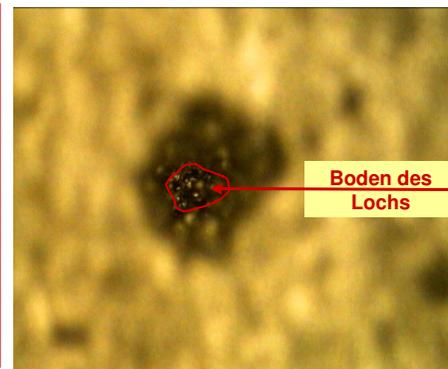
Nachteile

- Aufwändiges Untersuchungsverfahren wegen des vergleichsweise hohen Aufwands zur metallographischen Probenpräparation.
- Stärkere Streuung der gemessenen Lochtiefen, da sich zur Lochtiefenverteilung die Verteilung der "Anschnitttiefe" überlagert.
- Auswertung nur in begrenztem Umfang möglich.

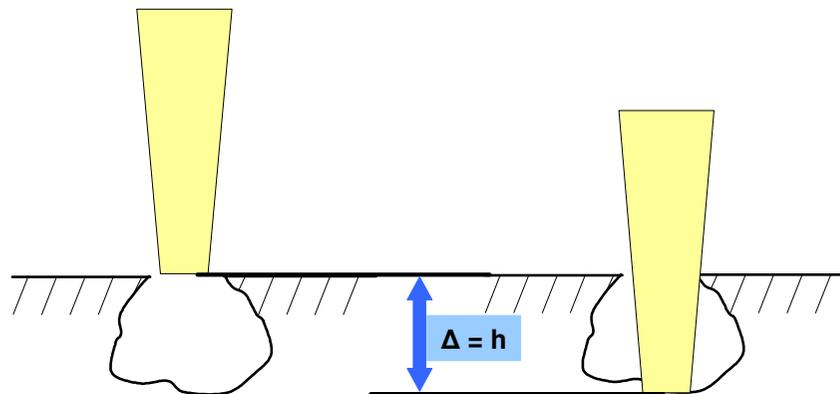
Messung der Lochtiefe im Auflichtmikroskop



200fache Vergrößerung



200fache Vergrößerung



Vorteile

- Verhältnismäßig einfaches und präzises Verfahren zur händischen Vermessung einzelner Korrosionslöcher
- Geringer Präparationsaufwand

Nachteile:

- Kleines Sichtfenster
- Messfehler durch subjektive Bewertung des Ende des Fokusbereichs möglich
- Messung von Hinterschneidungen nicht möglich.
- Bei großer Anzahl von Löchern ist der Aufwand beträchtlich

Abschätzung der Lochdichte durch Klassifizierung der Probenbereiche



- Einteilung in flächengleiche Bereiche
- Abschätzung der korrodierten Fläche an den einzelnen Bereichen
- Mittelwertbildung aus den einzelnen Stufenwertung für die Beurteilung der Gesamtprobe
 - Stufe 0: korrodierte Fläche < 1 %
 - Stufe 1: korrodierte Fläche < 10%
 - Stufe 2: korrodierte Fläche < 25%
 - Stufe 3: korrodierte Fläche < 50%
 - Stufe 4: korrodierte Fläche > 50%

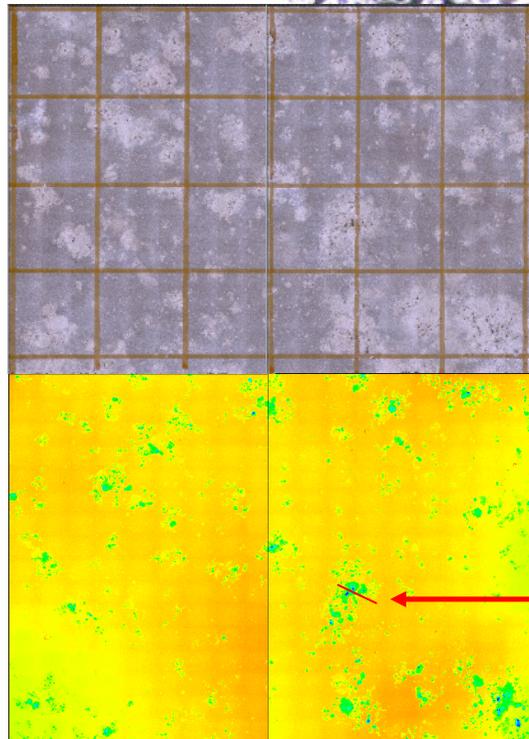
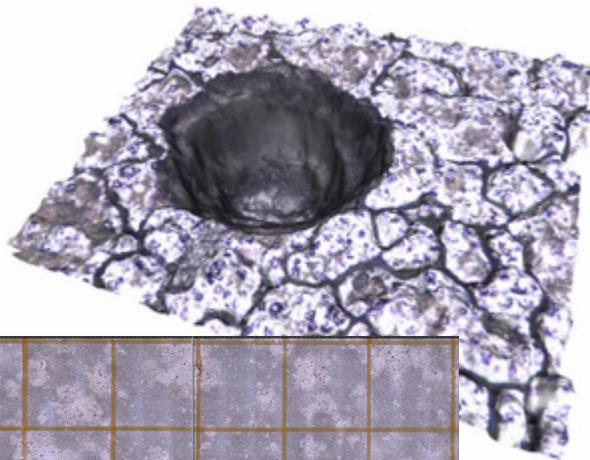
Vorteile

- Einfacher und pragmatischer Ansatz zur Bestimmung der Lochdichte.
- Durch die Einteilung der Gesamtfläche in kleine Teilflächen die jeweils einzeln bewertet werden entsteht eine Art Mittelung des Schätzwertes.
- Keine zusätzliche Investitionen notwendig
- Schnelles Bewertungsverfahren.

Nachteile

- Subjektives Bewertungsverfahren und daher Gefahr systematischer Abweichungen bei Bewertung durch unterschiedliche Personen.
- Ungenaue Klassifikation durch Stufenbewertung

Messung der Lochtiefe und Dichte im 3D-Mikroskop

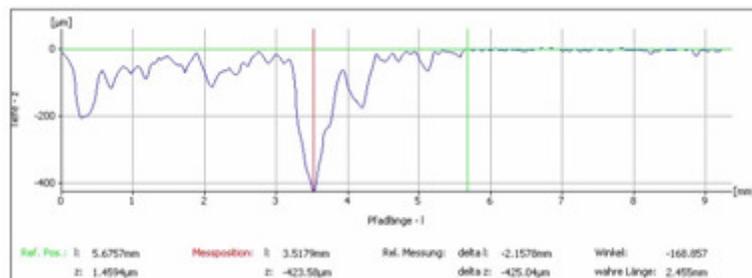


Vorteile

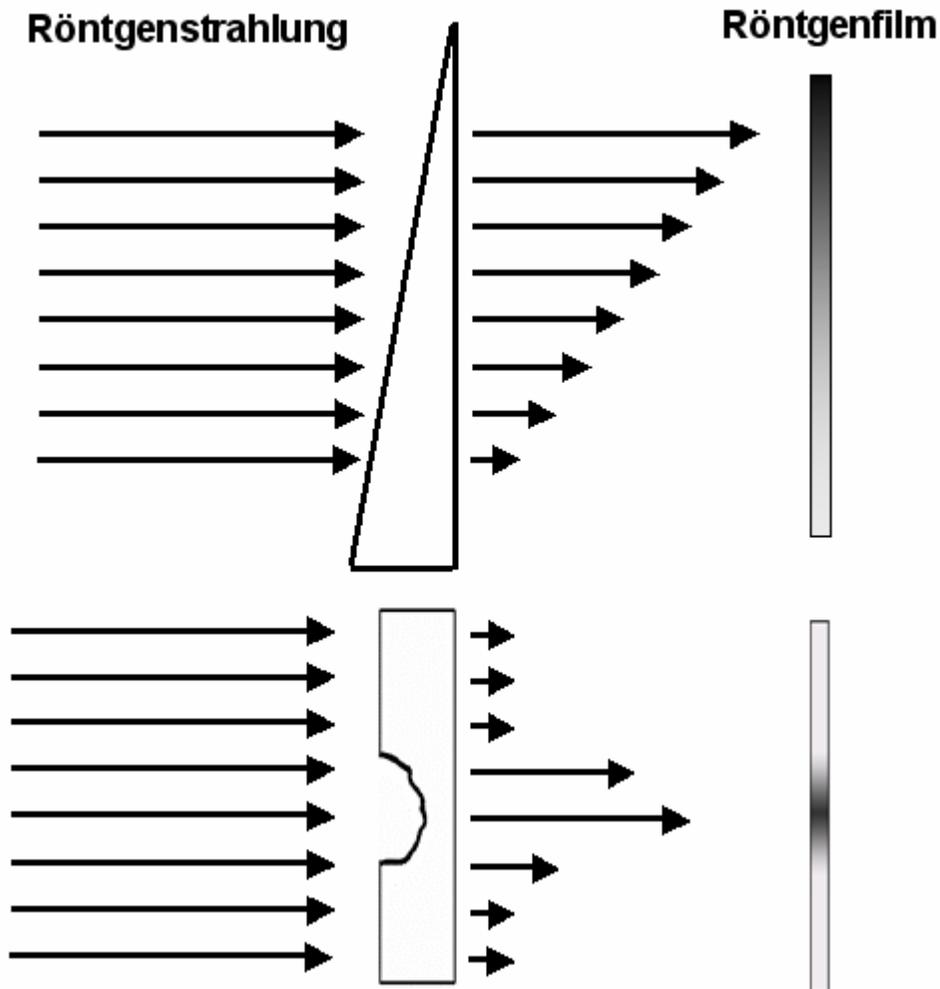
- Vollautomatisierbares Messverfahren,
- 100%-Auswertung der gesamten Fläche möglich
- Profil- und 3D-Darstellung möglich.
- Sehr präzises Messverfahren

Nachteile:

- Gute Ergebnisse nur an glatten Flächen erzielbar.
- Hoher Zeit- und Rechenaufwand wegen Abscannen der gesamten Fläche in x-y und z-Richtung.
- Hoher Investitionsbedarf



Messung der Lochtiefe und Dichte über Durchstrahlungsprüfung

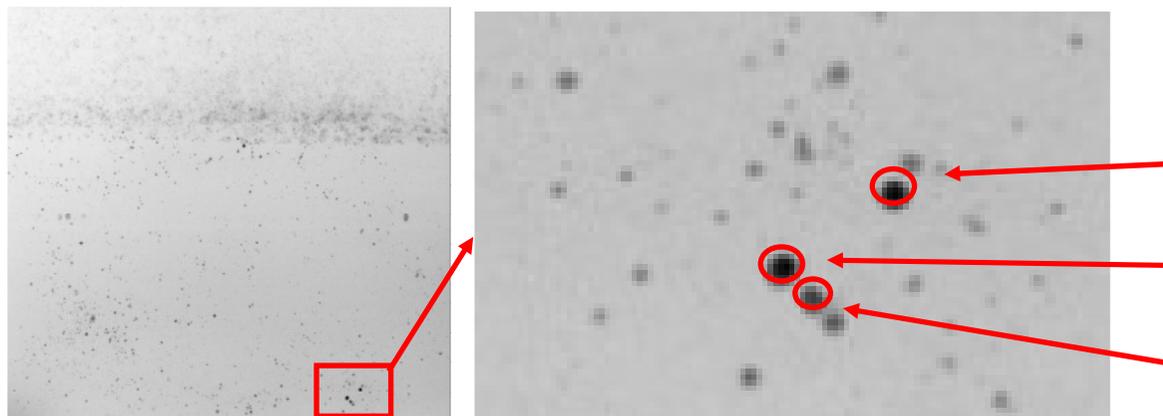


Unter Anwendung dieses Verfahrens werden die Versuchsbleche mit Röntgenstrahlung senkrecht zur Oberfläche durchstrahlt. Die Schwächung der Strahlung ist abhängig von der Dicke des durchdrungenen Materials.

Der Nachweis der Strahlenintensität hinter der Probe erfolgt durch einen Röntgenfilm, dessen örtliche Schwärzung von der Strahlenintensität und somit von der durchdrungenen Materialdicke abhängig ist.

Auswertung mittels Röntgentechnik

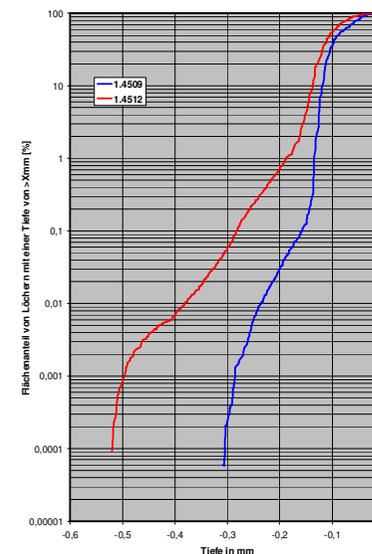
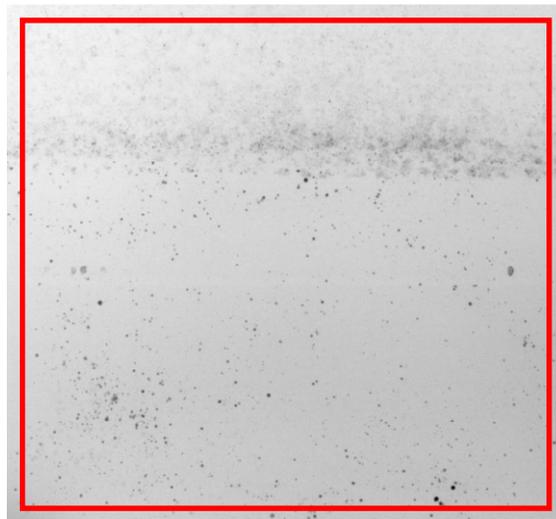
- Prinzip zur Messung von Wandstärkenreduktionen einzelner Korrosionsmerkmale
 - Messung des hellsten Grauwertes in der Nähe eines Fehlers und Umrechnung zur Basiswandstärke
 - Messung der Grauwerte von Korrosionsmerkmalen und Umrechnung dieser Grauwerte in Restwandstärken
 - Zur Bestimmung der Wandstärkenreduktion wird die Restwandstärke von der Basiswandstärke subtrahiert



Fehlernr.:	Fehlertiefe Mikroskop [µm]	Fehlertiefe Röntgen [µm]
1	439	423
2	443	431
3	260	233

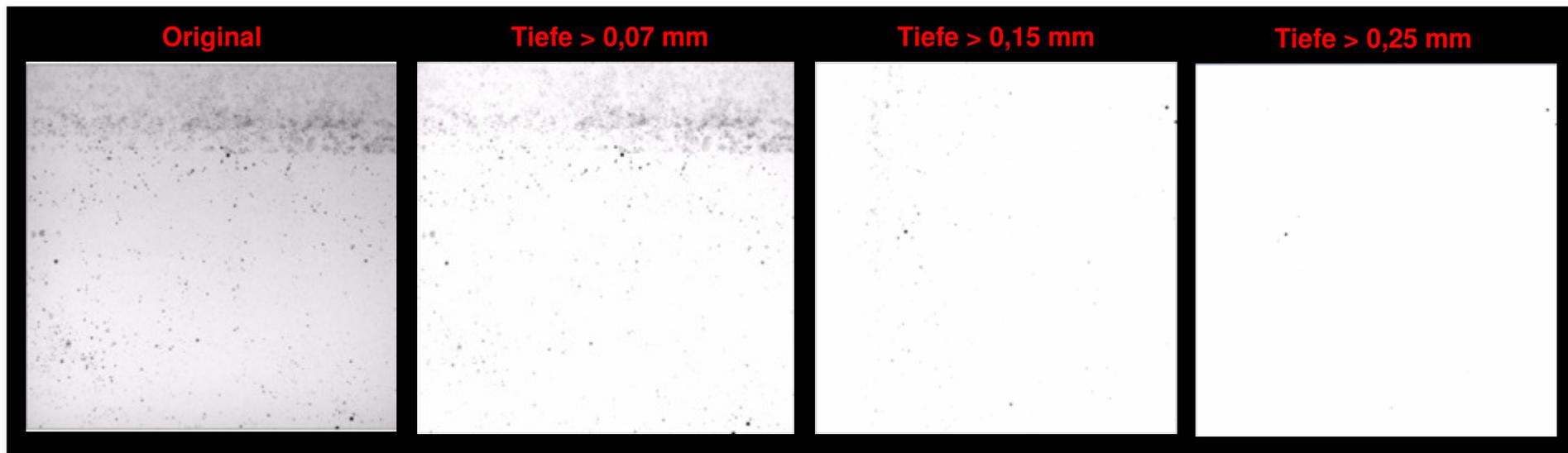
Auswertung mittels Röntgentechnik

- Prinzip zur Messung von Wandstärkenreduktionen über die Fläche
 - Messung der Grauwertverteilung in einem Flächenbereich
 - Umrechnung der Grauwerte in Wandstärken
 - Bestimmung des hellsten Grauwertes im gewählten Bereich als Basiswandstärke
 - Subtraktion aller anderen erzielten Wandstärken (Grauwerte) von der Basiswandstärke
 - Darstellung als flächenmäßiger Anteil jeder Wandstärkenreduktion im gewählten Bereich

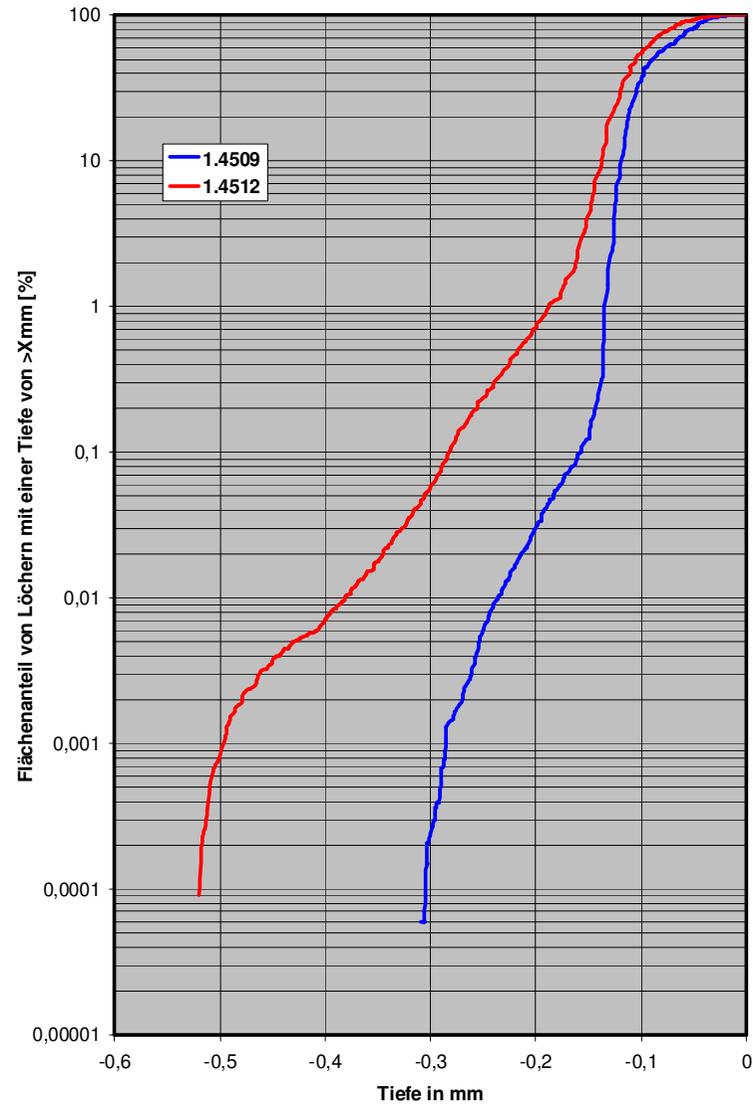


Auswertung mittels Röntgentechnik

- Graphische Darstellungsmöglichkeiten
 - Filterung von Grauwerten d.h. indirekte Fehlertiefenfilterung



Auswertungsbeispiel mittels Röntgentechnik



Besondere Eigenschaften des Verfahren

- Die Fehlerlage kann nicht der Vorder- oder Rückseite zugeordnet werden – die ermittelte Korrosionstiefe ist die Summe beider Seiten - und kann somit einen Querschliff ersetzen
- Unterhöhlende Korrosionen werden detektiert und gehen in die Auswertungen von Fläche und Wanddickenminderung ein, können jedoch nur im direkten Vergleich mit der Probe als unterhöhlend erkannt werden.

Fortschritt seit den ersten Versuchen

- Die Auswertung der Röntgenfilme wurde durch Verwendung optimierter Algorithmen verbessert
- Weitere Steigerung der Genauigkeit des Verfahrens wurden durch verbesserten Referenzkörper erreicht
- Umfassende Auswertungen in Anlehnung an die der EN ISO 11463 Anforderungen können durchgeführt werden
- Die Auswertung von Proben aus Feldversuchen - mit verformter Oberfläche - wurden erfolgreich durchgeführt