

Kathodische Unterwanderung von Beschichtungen (CD-Test)

September 2026

■ ABSTRACT

Der Cathodic-Disbondment-Test (CD-Test) prüft die Beständigkeit organischer Beschichtungen auf Stahl gegen kathodische Unterwanderung an einer definierten Fehlstelle. Dies ist ein Szenario, wie es an Leckstellen unter kathodischem Korrosionsschutz in Meerwasserumgebungen auftritt. Diese Application Note beschreibt das Prinzip und den Normhintergrund der Methode (ASTM G-8, ASTM G-42, DIN 30 670, DIN EN ISO 15711, ISO 21809-1 Anhang H), den Aufbau der Messzelle, die Durchführung mit dem IPS-Potentiostaten PG-M100 sowie die Auswertung nach abgeschlossener Prüfung.

■ HINTERGRUND

Kathodischer Korrosionsschutz schützt Bauteile, deren Beschichtung mechanisch beschädigt wurde, durch Anlegen eines kathodischen Schutzpotentials, realisiert über eine Opferanode oder eine externe Stromquelle. An der beschädigten Stelle kann dieser Schutzstrom jedoch zur sogenannten kathodischen Unterwanderung (cathodic disbondment) führen: Die Beschichtung löst sich ausgehend vom Defekt großflächig vom Untergrund ab, entweder durch die kathodischen Schutzströme selbst oder durch begleitende Wasserstoffbildung an der freiliegenden Stahloberfläche. Der CD-Test simuliert dieses Szenario gezielt und liefert damit auch eine Aussage über die Qualität von Oberflächenvorbereitung und Beschichtungsauftrag, da beide die kathodische Infiltration beeinflussen.

Da in der Elektrochemie das Wasserstoffpotential (NHE) als Referenzpotential mit dem Wert 0 V dient, in der Praxis aber Elektroden zweiter Ordnung (Kalomel, Ag/AgCl) verwendet werden, muss der am Gerät einzustellende Sollwert um das Bezugspotential der verwendeten Referenzelektrode korrigiert werden:

- Kalomel-Elektrode: +242 mV gegenüber NHE
- Ag/AgCl-Elektrode in 3 molarem KCl: +207 mV gegenüber NHE
- Ag/AgCl-Elektrode in 1 molarem KCl: +203 mV gegenüber NHE

Beispiel: Für einen normgerechten Prüfwert von -1260 mV gegenüber NHE ergibt sich mit einer Ag/AgCl-Elektrode in 3-molarer KCl-Lösung ein am Gerät einzustellender Sollwert von $-1260 \text{ mV} - 207 \text{ mV} = -1467 \text{ mV}$.

■ VERSUCHSAUFBAU

- **Probe:** Stahlplatte, beschichtet, mit definiertem Defekt in Plattenmitte (typischerweise mit 6-mm-Bohrer erzeugt) sowie einem zweiten Kontaktdefekt am Rand oder einem 4-mm-Loch für die elektrische Kontaktierung (Bananenstecker oder Krokodilklemme).
- **Messzelle:** Glaszylinder oder Kunststoffrohr mit einem Durchmesser von 75 mm und einer Höhe von 100 mm mit Deckel, Gegenelektrode (platinbeschichteter Titanstab), Referenzelektrode, Zwischengefäß für die Referenzelektrode, Silikon (mit Spritze) zur Fixierung des Glaszylinders auf der Probe, 3-molare NaCl-Pufferlösung im Zwischengefäß.
- **Elektrolyt (Meerwasser-Ersatzlösung nach Norm):** 23,0 g Natriumchlorid, 9,8 g Magnesiumchlorid-Hexahydrat, 8,9 g Natriumsulfat-Decahydrat, 1,2 g Calciumchlorid je 1 L destilliertes Wasser.
- **Pufferlösung Zwischengefäß:** gesättigte, mindestens 3-molare NaCl-Lösung ($3 \times 58,5$ g NaCl je Liter destilliertes Wasser).
- **Prüfpotential (Beispielwert):** -1260 mV gegenüber NHE, umgerechnet auf die verwendete Referenzelektrode.

Referenzelektrode	Am Gerät einzustellender Sollwert
Ag/AgCl (1 mol/L KCl)	-1463 mV
Ag/AgCl (3 mol/L KCl)	-1467 mV
Kalomel	-1500 mV

- **Prüfdauer:** 30 Tage bei 23 ± 2 °C.
- **Gerät:** PG-M100, Potentiostat/Galvanostat mit bis zu 4 Modulen für 4 parallele Experimente. Strombereich am Gerät auf 100 mA stellen.

Parameter	Wert
Polarisationsbereich	± 2 V
Aussteuerspannung	± 11 V
Maximaler Strom	± 100 mA (kurzzeitig bis 150–200 mA möglich, nicht dauerhaft)
Anstiegszeit	± 100 μ s/V
Strombereich	± 20 mA und ± 100 mA
Zulässige Umgebungstemperatur (Betrieb)	$+10$ °C bis $+40$ °C
Zulässige Luftfeuchtigkeit	bis 80 %

■ DURCHFÜHRUNG / BEDIENUNG PG-M100

Eine dünne Schicht Silikon wird auf den Boden des Glaszylinders aufgetragen; der Zylinder wird anschließend mittig über der Lackbeschädigung auf der Probe positioniert. Nach Aushärtung des Silikons wird die Zelle mit dem Elektrolyten befüllt. Gegenelektrode und Zwischengefäß werden in den Zelldeckel eingesetzt, das Zwischengefäß etwa zur Hälfte mit der Pufferlösung gefüllt, anschließend die Referenzelektrode eingeführt.

Anschluss am PG-M100: Probe (Stahlplatte, schwarze/rechte Arbeitselektroden-Buchse) direkt in das 4-mm-Loch oder per Krokodilklemme, Referenzelektrode an die blaue Buchse, Gegenelektrode an die rote Buchse. Der Kippschalter „Cell off/Cell on“ muss dabei zunächst auf „Cell off“ stehen, sodass kein Strom fließen kann.

Nach dem Anschließen zeigt das Display das Ruhepotential (OCP) zwischen Arbeits- und Referenzelektrode an. Dieses darf zu Beginn leicht driften (Sekunden bis Stunden), bevor es einen stabilen Wert

erreicht. Ein Abwarten bis zur vollständigen Stabilisierung ist für den Test nicht erforderlich. Springt der Wert dagegen sprunghaft, deutet das auf einen Fehler hin (schlechter Kontakt zur Probe, nicht eingetauchte Referenzelektrode, falscher Anschluss).

Zur Einstellung des Sollwerts wird der Polaritätsumschalter auf negativ gestellt, der Strombereich auf 100 mA gesetzt und am Potentiometer der korrigierte Sollwert eingestellt (Skalierung: 1 volle Umdrehung = 0,2 V, unterteilt in 10er- und 100er-Skala; Beispiel: -14,67 mV entspricht 7,33 Umdrehungen, ablesbar als „7“ auf der inneren und „33“ auf der äußeren Skala). Erst danach wird der Kippschalter auf „Cell on“ gestellt. Das Sollpotential liegt jetzt an der Probe an. Sobald der Zielwert erreicht ist, ist eine Gasblasenbildung im Elektrolyten sichtbar (Wasserstoffentwicklung), was ein Indiz für die einsetzende kathodische Polarisation ist. Der resultierende Schutzstrom liegt typischerweise im Bereich einiger mA bis 40–50 mA und muss nicht konstant bleiben.

Nach Ablauf der 30-tägigen Prüfzeit wird der Kippschalter auf „Cell off“ zurückgestellt und der Aufbau eine Stunde ruhen gelassen. Anschließend wird das Silikon mit einer Klinge durchtrennt und der Glaszylinder entfernt, um die Probe für die Auswertung freizulegen.

■ ERGEBNISSE

Anders als bei elektrochemischen Verfahren mit kontinuierlicher Stromkurve (z. B. der Permeationsmessung) liefert der CD-Test kein Messdiagramm im eigentlichen Sinn, sondern ein mechanisch ermitteltes Prüfergebnis: den Unterwanderungsradius um die Defektstelle.

Auswertung: Von der freigelegten Defektstelle ausgehend werden sechs radiale Schnitte bis zur unbeschädigten Beschichtung angebracht. Mit einer Klinge wird die Beschichtung ab dem jeweiligen Schnitt angehoben, bis Widerstand spürbar ist (= Ende der Unterwanderung, Übergang zur intakten Haftung). Der mittlere Abstand vom Rand des ursprünglichen Defekts bis zu diesem Übergangspunkt über alle sechs Schnitte ergibt die durchschnittliche Unterwanderungstiefe.

Bewertungskriterium:

Temperatur	Prüfdauer	Zulässige Unterwanderungstiefe
23 ± 2 °C	30 Tage	≤ 10 mm

Eine Beschichtung gilt demnach als bestanden, wenn die im Sechs-Schnitt-Verfahren ermittelte mittlere Unterwanderungstiefe 10 mm nicht überschreitet.

■ DISKUSSION MÖGLICHER FALLSTRICKE

- **Schlechter Kontakt zur Probe:** Kontamination an der Kontaktstelle führt zu einem instabilen oder springenden Ruhepotential. Kontaktstelle vor dem Anschließen reinigen.
- **Referenzelektrode nicht eingetaucht:** Bei zu wenig Pufferlösung im Zwischengefäß liegt die Referenzelektrode nicht im Elektrolytkontakt. Füllstand vor jedem Test prüfen.
- **Falscher Anschluss der Elektroden:** Führt zu unplausiblen oder springenden Potentialwerten. Zuordnung (Arbeitselektrode, blau = Referenz, rot = Gegenelektrode) vor dem Einschalten kontrollieren.
- **Referenzelektroden-Position:** Die Salzbrücke muss möglichst nah an, aber ohne direkten Kontakt zur Probenoberfläche positioniert werden. Bei Berührung kann das Messsignal verfälscht werden und bei zu großem Abstand steigt der IR-Drop-Fehler.
- **Gasbildung ohne Druckausgleich:** Bei der kathodischen Polarisation entsteht Wasserstoffgas an der Probenoberfläche. Der Zellaufbau muss über eine Öffnung verfügen, da sich sonst Überdruck aufbauen und die Silikonabdichtung lösen kann.
- **Störsignale durch hochohmigen Elektrolyten:** Die Regelkreise des PG-M100 sind ungedämpft und arbeiten ohne Filter; bei hohem elektrischem Widerstand des Elektrolyten kann die Messverbindung über den hochohmigen Referenzelektroden-Eingang als Antenne wirken und Rauschen bzw. Instabilität verursachen. Abhilfe: Messzelle möglichst in einem Faradaykäfig betreiben, bevor auf Filter zurückgegriffen wird (Filter im Laborbetrieb können wichtige Informationen zur Systembewertung verdecken).

- **Virtuelle Erdung der Arbeitselektrode:** Die Arbeitselektrode liegt virtuell auf Erde und darf nicht zusätzlich real geerdet werden, sonst funktioniert der Potentiostat nicht korrekt.
- **Strombegrenzung:** Der spezifizierte Maximalstrom beträgt 100 mA; höhere Werte (150–200 mA) sind kurzzeitig möglich, aber durch interne elektronische Sicherungen nicht dauerhaft haltbar.
- **Entsorgung von Kalomel-Referenzelektroden:** Enthalten Quecksilber und müssen fachgerecht entsorgt werden.
- **Klimatische Bedingungen:** Bei Kondenswasserbildung im Gerät (z. B. nach Transport bei Kälte) vor dem Einschalten akklimatisieren lassen (ggf. bis zu zwei Stunden), um Schäden zu vermeiden.

■ FAZIT

Der CD-Test mit dem PG-M100 bietet eine normgerechte, praxisnahe Methode zur Bewertung der Beständigkeit von Beschichtungen gegen kathodische Unterwanderung – ein für Bauteile in Meerwasserumgebungen zentrales Qualitätskriterium, wie es u. a. im Rahmen der GSK-Zertifizierung gefordert wird. Die Möglichkeit, bis zu vier Proben parallel über vier unabhängige, sauber galvanisch getrennte Module zu prüfen, macht das System auch für Vergleichs- und Serienuntersuchungen über die geforderte 30-tägige Prüfdauer geeignet. Der rein analoge, manuelle Aufbau ohne interne Störsignale sorgt für eine hohe Regelgüte, verlangt im Gegenzug aber sorgfältige Abschirmung der Messzelle sowie eine korrekte, auf die verwendete Referenzelektrode umgerechnete Sollwerteinstellung. Die abschließende mechanische Auswertung über das Sechs-Schnitt-Verfahren liefert mit der Unterwanderungstiefe eine normgerecht vergleichbare, quantitative Kenngröße (Grenzwert ≤ 10 mm).

■ GERÄTELISTE

PG-M100 Potentiostat/Galvanostat mit CD-Zelle



Komponente	Spezifikation
PG-M100 Potentiostat/ Galvanostat	• Bis zu 4 unabhängige Module für 4 parallele Experimente • Polarisationsbereich $\pm 2\text{ V}$, Aussteuerspannung $\pm 11\text{ V}$ • Maximaler Strom $\pm 100\text{ mA}$ (kurzzeitig bis $150\text{--}200\text{ mA}$) • Anstiegszeit $\pm 100\text{ }\mu\text{s/V}$, Strombereich $\pm 20\text{ mA}$ / $\pm 100\text{ mA}$ • Rein analoger Aufbau, keine internen Störsignale, keine Laufzeitverzögerung durch digitale Regel-/Filterfunktionen • Rein manueller Betrieb (kein Software-/EcmWin-Anschluss beim PG-M100 selbst)
CD-Messzelle	Kunststoff- oder Glaszylinder mit Deckel, $\varnothing 75\text{ mm}$, Höhe 100 mm
Referenzelektrode	Kalomel oder Ag/AgCl mit Zwischengefäß
Kabel	Messleitung schwarz, Messleitung rot, Referenzelektrodenkabel, Abgreifklemme
Pufferlösung	3-molare NaCl-Lösung

■ KONTAKT

IPS Elektroniklabor GmbH & Co. KG
Am Eppertshäuser Pfad 2
64839 Münster (Hessen)

ibschrems@ips-jaissle.de