

Rotierende Ring-Scheiben-Elektrode (RRDE) in der elektrochemischen Forschung

September 2026

■ ABSTRACT

Die rotierende Ring-Scheiben-Elektrode (RRDE) ist eine etablierte hydrodynamische Messtechnik zur Untersuchung von Elektrodenreaktionen unter kontrolliertem, reproduzierbarem Stofftransport. Durch die Rotation der Scheibenelektrode entsteht eine definierte, stationäre Diffusionsgrenzschicht, wodurch Reaktionsmechanismen, Zwischenprodukte und Elektrodenkinetik quantitativ zugänglich werden. Der konzentrisch angeordnete Ring detektiert an der Scheibe gebildete Spezies in Echtzeit und erlaubt so Rückschlüsse auf Reaktionswege, etwa bei der Sauerstoffreduktion (2- vs. 4-Elektronen-Pfad) oder bei Korrosionsprozessen. Diese Application Note stellt die theoretischen Grundlagen, den Versuchsaufbau mit dem IPS-RRDE-System sowie zwei mit IPS-Equipment durchgeführte, publizierte Forschungsanwendungen vor.

■ HINTERGRUND

An einer rotierenden Scheibenelektrode (RDE) erzeugt die Rotation eine kontrollierte, laminare Strömung und damit eine dünne, stationäre Nernst-Diffusionsschicht an der Elektrodenoberfläche. Innerhalb dieser Schicht erfolgt der Stofftransport ausschließlich durch Diffusion; ihre Dicke δ hängt direkt von der Rotationsgeschwindigkeit ab:

$$\delta = 1,61 \cdot D^{1/3} \cdot \omega^{-1/2} \cdot \nu^{1/6}$$

mit D = Diffusionskoeffizient, ω = Winkelgeschwindigkeit der Rotation (rad/s) und ν = kinematische Viskosität. Der resultierende Grenzstrom folgt der Levich-Gleichung und wächst proportional zur Wurzel der Rotationsgeschwindigkeit:

$$i_L = 0,620 \cdot n \cdot F \cdot A \cdot D^{2/3} \cdot \nu^{-1/6} \cdot \omega^{1/2} \cdot c$$

Ist die Reaktion nicht rein transportlimitiert, trennt die Koutecký-Levich-Auftragung von $1/i$ gegen $\omega^{-1/2}$ den kinetischen vom diffusionskontrollierten Anteil: $1/i = 1/i_k + 1/i_L$. Der Achsenabschnitt liefert den kinetischen Strom i_k , die Steigung den Transportterm. Ergänzend lässt sich die Nernst-Diffusionsschicht impedanzspektroskopisch erfassen; das passende Ersatzschaltbildelement ist die endliche, transmissive Warburg-Impedanz, je nach Software als Porous-Bounded-Warburg, als finite-length Warburg (transmissiv) oder als Nernst-Impedanz bezeichnet. Ihre Zeitkonstante nimmt mit steigender Drehzahl ab.

Die Ring-Scheiben-Variante (RRDE) ergänzt die Scheibe um einen konzentrischen, elektrisch getrennten Ring, der über einen Bipotentiostaten unabhängig auf ein eigenes Potenzial geregelt wird. An der Scheibe gebildete Spezies werden durch die radiale Strömung zum Ring transportiert und dort bei geeignetem Potenzial detektiert. Welcher Bruchteil den Ring erreicht, beschreibt die Kollektionseffizienz N . Sie ist nach Alberty und Bruckenstein eine reine Geometriegröße und hängt ausschließlich vom Scheibenradius sowie vom Ring-Innen- und -Außenradius ab, nicht von Drehzahl, Diffusionskoeffizient oder Viskosität. In der Praxis wird N mit einem bekannten, reversiblen Redoxsystem (z. B. $K_3[Fe(CN)_6]$) experimentell bestimmt.

Damit werden Reaktionswege quantifizierbar. Für die Sauerstoffreduktion (ORR) ergeben sich der Peroxid-Anteil $x(H_2O_2)$ und die mittlere übertragene Elektronenzahl n aus Scheibenstrom I_D und Ringstrom I_R :

$$x(\text{H}_2\text{O}_2) = 2 \frac{I_R/N}{|I_D| + I_R/N}$$

$$n = 4 \frac{|I_D|}{|I_D| + I_R/N}$$

Typische Anwendungsfelder sind die Katalysatorcharakterisierung für Brennstoffzellen und Elektrolyseure sowie die elektrochemische H_2O_2 -Erzeugung. In der Korrosionsforschung macht die Rotationstechnik strömungsbedingte Mechanismen von statischen Messungen unterscheidbar; für strömungsinduzierte Korrosion ist dabei die rotierende Zylinderelektrode (RCE) der gebräuchlichere Aufbau, da sie über einen weiten Drehzahlbereich turbulente Bedingungen mit definierter Wandschubspannung erzeugt.

■ VERSUCHSAUFBAU

Ein typischer RRDE-Messplatz mit dem IPS-Rotationssystem besteht aus der Rotationseinheit mit Touch-Steuereinheit, der temperierbaren Doppelwand-Messzelle (300 mL), einer Ring-Scheiben-Elektrode als Arbeitselektrode, einer platinieren Titan-Gegenelektrode (L-Form) sowie einer Ag/AgCl- oder Kalomel-Referenzelektrode, die über eine Luggin-Kapillare dicht an die Scheibe herangeführt wird. Da Scheibe und Ring gleichzeitig auf unabhängige Potenziale geregelt werden müssen, ist ein **Bipotentiostat** erforderlich — in den unten referenzierten Arbeiten der IPS PGU BI-1000. Die Rotationseinheit lässt sich über die analogen Ein- und Ausgänge der Steuereinheit (1 mV = 1 U/min) mit der Messung synchronisieren.

Typischer Ablauf, angelehnt an publizierte Anwendungsfälle mit IPS-Equipment:

1. Elektrodenpolitur vor jeder Messreihe (z. B. Al_2O_3 -Poliersuspension abnehmender Körnung $1,0 \rightarrow 0,3 \rightarrow 0,05 \mu\text{m}$), zwischen den Schritten spülen und im Ultraschallbad in Reinstwasser und Isopropanol reinigen
2. Kollektionseffizienz N mit einem bekannten, reversiblen Redoxpaar (z. B. $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$) bestimmen; die Messung bei mehreren Drehzahlen dient dabei als Kontrolle, denn N muss drehzahlunabhängig sein
3. Elektrolyt je nach Fragestellung mit N_2 oder O_2 sättigen (in der Literatur jeweils 30–60 min), Spülzeit standardisieren und dokumentieren
4. Zyklovoltammetrie (CV) zur Grundcharakterisierung, typische Scanraten 10–200 mV/s
5. Ringpotenzial festlegen: Es muss die Zielspezies transportlimitiert umsetzen, ohne dass am Ring selbst die ORR anläuft oder der Katalysator mitoxidiert wird; dafür vorab das Ring-Potenzialfenster aufnehmen
6. RRDE-Linear-Sweep-Voltammetrie quasistationär (5–20 mV/s) über einen Satz von Drehzahlen, in der Literatur z. B. 100–3600 U/min
7. Auswertung: Grenzstrom und Halbstufenpotenzial $E_{1/2}$, Levich- bzw. Koutecký-Levich-Auftragung, daraus $x(\text{H}_2\text{O}_2)$ bzw. n ; bei homogen gelösten Katalysatoren zusätzlich der Überschussstrom

	Parameter
Rotationsrate	0–4000 U/min (geräteseitig), Messungen typischerweise 100–3600 U/min
Scanrate LSV (quasistationär)	5–20 mV/s
Scanrate CV	10–200 mV/s
Elektrolytvolumen	300 mL (Standardzelle)
Temperatur	5–80 °C mit Ag/AgCl; mit Kalomel nur bis ca. 50 °C
Ringpotenzial (ORR-Anwendung)	konstant im transportlimitierten Bereich der H_2O_2 -Oxidation, pH-abhängig; Literatur: +0,26 V vs. SHE bei pH 13 und +0,64 V vs. SHE bei pH 7, entsprechend jeweils rund 1,03–1,05 V vs. RHE

■ ERGEBNISSE AUS PUBLIZIERTEN ANWENDUNGEN

Das IPS-RRDE-System (PGU BI-1000 Bipotentiostat/Galvanostat, Rotator 2016 mit Touch-Steuereinheit) wurde am Linz Institute for Organic Solar Cells (LIOS) der Johannes Kepler Universität Linz in zwei begutachteten Veröffentlichungen zur Sauerstoffreduktionsreaktion (ORR) eingesetzt. Beide Arbeiten sind Open Access und stehen exemplarisch für den Erkenntnisgewinn, den die RRDE-Technik liefert.

1. Wielend, Neugebauer & Sariciftci (2021), *Electrochemistry Communications* 125, 106988 — CC BY 4.0

An einer Glaskohlenstoff-Platin-RRDE (GC/Pt-RRDE) wurde Anthrachinon-2-sulfonat (AQS) als homogen gelöster ORR-Katalysator untersucht, 1 mM in 0,1 M Phosphatpuffer bei pH 7. Das Kernproblem lag am Ring: Die beiden Reduktionsprodukte, reduziertes AQS und H₂O₂, ließen sich über das Ringpotenzial nicht trennen. Unterhalb von +0,23 V vs. SHE lief am Pt-Ring selbst die ORR an, für die H₂O₂-Oxidation waren mehr als +0,44 V vs. SHE erforderlich. Gemessen wurde daher bei +0,64 V vs. SHE, wo beide Spezies oxidiert werden.

Die Autoren entwickelten dafür eine mathematische Subtraktionsmethode. Der katalytische Überschussstrom ergibt sich als Differenz zwischen dem Gesamtstrom des Systems und der Summe der Einzelsysteme:

$$I_{\text{excess}} = I(\text{AQS}/\text{O}_2) - [I(\text{GC}/\text{O}_2) + I(\text{AQS}/\text{N}_2)]$$

Über 100–3600 U/min zeigte sich ein ausgeprägter Überschussstrom-Peak. Mit steigender Drehzahl verschiebt sich dabei nicht die Peakhöhe, sondern das **Peakpotenzial** um rund 150 mV kathodisch, annähernd linear gegen $\sqrt{\omega}$. Die Autoren ordnen diese Linearität der aus Levich-Auftragungen bekannten Wurzelabhängigkeit zu und erklären den Effekt mit der kürzeren Verweilzeit des Katalysators vor der Scheibe. Die Methode wird von den Autoren ausdrücklich als *semiquantitativ* bezeichnet.

2. Kerschbaumer, Wielend, Leeb et al. (2023), *Catalysis Science & Technology* 13, 834–843 — CC BY 3.0

Aufbauend auf derselben Methodik wurden sechs unterschiedlich substituierte Anthrachinone, 1-Hydroxy-, 2-Hydroxy-, 1,2-Dihydroxy- und 1,4-Dihydroxyanthrachinon, Anthrachinon-2-sulfonat (AQS) sowie Alizarin Red S (ARS) und zusätzlich Riboflavin in 0,1 M NaOH untersucht. Nur AQS und ARS tragen eine Sulfonatgruppe; die Auswahl hydroxysubstituierter Derivate war durch deren ausreichende Löslichkeit im alkalischen Elektrolyten motiviert. Die RRDE-Messungen liefen mit 0,4-mM-Lösungen bei einem Ringpotenzial von 0,26 V vs. SHE.

Die H₂O₂-Ausbeute wurde in einem **getrennten Aufbau** bestimmt, nicht im RRDE-Messplatz: chronoamperometrische Elektrolyse von 0,3-mM-Lösungen über 6 h bei –0,25 V vs. SHE an einer Glaskohlenstoff-Platte, in einer durch eine Nafion-117-Membran geteilten Zweikammerzelle. Quantifiziert wurde photometrisch mit 4-Nitrophenylboronsäure bei 411 nm. Für Zyklovoltammetrie und Chronoamperometrie kamen je nach Messung unterschiedliche Potentiostaten zum Einsatz, darunter die IPS-Modelle PGU 10V-100mA und 1030 PC-T.

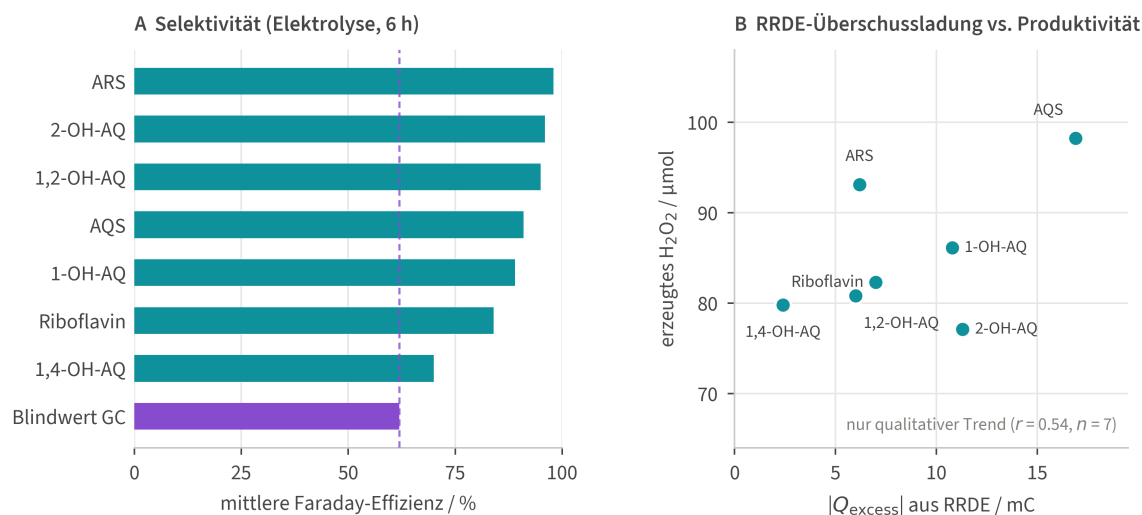


Abb. 1: **A** Mittlere Faraday-Effizienz der Elektrolyse (0,3 mM, 0,1 M NaOH, 6 h, -0,25 V vs. SHE); die gestrichelte Linie markiert den Blindwert der blanken Glaskohlenstoff-Elektrode ohne Katalysator. **B** Aus der RRDE gewonnene Überschussladung gegen die in der Elektrolyse erzeugte H₂O₂-Menge. Eigene Darstellung nach Daten aus Kerschbaumer et al. 2023, Tab. 2 und 3 (CC BY 3.0).

	mittlere Faraday-Effizienz	erzeugtes H ₂ O ₂
Blindwert: blanke GC-Elektrode, ohne Katalysator	62 %	66,0 μmol
1-Hydroxyanthrachinon	89 %	86,1 μmol
2-Hydroxyanthrachinon	96 %	77,1 μmol
1,2-Dihydroxyanthrachinon	95 %	80,8 μmol
1,4-Dihydroxyanthrachinon	70 %	79,8 μmol
Anthrachinon-2-sulfonat (AQS)	91 %	98,2 μmol
Alizarin Red S (ARS)	98 %	93,1 μmol
Riboflavin	84 %	82,3 μmol

Chronoamperometrische Elektrolyse, 0,3 mM in 0,1 M NaOH, 6 h bei -0,25 V vs. SHE. Werte nach Kerschbaumer et al. 2023, Tab. 3.

Bemerkenswert ist die erste Zeile: Schon die blanken Glaskohlenstoff-Elektrode erzeugt **ohne jeden Katalysator** 66,0 μmol H₂O₂ bei 62 % Faraday-Effizienz. Diese Hintergrundaktivität ist der Bezugspunkt, gegen den jeder Katalysator bewertet werden muss. Sie zu übersehen, ist der häufigste Fehler bei der Bewertung von Kohlenstoffelektroden. Alle untersuchten Verbindungen steigern Produktivität und Selektivität darüber hinaus: Die sulfonatgruppentragenden AQS und ARS sind am produktivsten, die 2-Hydroxy-Derivate am selektivsten. 1,4-Dihydroxyanthrachinon fällt ab, was die Autoren auf dessen nachgewiesene Zersetzung unter Lufteinwirkung zurückführen.

Der Vergleich beider Methoden ergibt **keine quantitative Korrelation**, sondern qualitative Trends: Ein weniger negatives Onset-Potenzial des Überschussstroms geht mit höherer Faraday-Effizienz einher, eine größere Überschussladung tendenziell mit höherer H₂O₂-Ausbeute (Abb. 1B). Genau darin liegt der praktische Wert des Verfahrens: Die RRDE-Subtraktionsmethode ordnet Kandidaten schnell vor, bevor aufwendige Elektrolysen mit Produktquantifizierung gefahren werden.

Quellen: Wielend et al. 2021, DOI: 10.1016/j.elecom.2021.106988 · Kerschbaumer et al. 2023, DOI: 10.1039/D2CY01744J

■ DISKUSSION MÖGLICHER FALLSTRICKE

- **Elektrodenpolitur und -ausrichtung:** Kratzer, Restpolitur oder eine nicht plane Scheibenoberfläche stören die laminare Strömung und verfälschen den Grenzstrom. Eine konsequente Politurroutine mit abnehmender Körnung und Sonikation zwischen den Schritten ist Voraussetzung für reproduzierbare Daten.
- **Kollektionseffizienz N richtig interpretieren:** N ist eine Geometriegröße und muss drehzahlunabhängig sein. Die Kalibrierung bei mehreren Drehzahlen dient deshalb nicht dazu, je Drehzahl einen eigenen Wert zu erzeugen, sondern als Prüfgröße: Streut N systematisch mit ω , deutet das auf eine beschädigte oder falsch ausgerichtete Elektrode, auf Nebenreaktionen oder auf einen nicht transportlimitierten Ring hin. Nach Politur, Elektroden- oder Elektrolytwechsel ist neu zu kalibrieren.
- **Überlappende Redoxsignale:** Bei homogen gelösten Katalysatoren überlagern sich die Reduktionssignale des Elektrodenmaterials, insbesondere Glaskohlenstoff, mit denen des Katalysators. Ohne mathematische Trennung wie die Überschussstrom-Methode können elektrokatalytische Effekte fehlinterpretiert werden.
- **Mitoxidation des Katalysators am Ring:** Am Ring wird nicht zwangsläufig nur die Zielspezies umgesetzt. Bei Wielend et al. ließen sich reduziertes AQS und H_2O_2 über das Ringpotenzial überhaupt nicht trennen; bei Kerschbaumer et al. war der Ringstrom für 1,2- und 1,4-Dihydroxyanthrachinon wegen ihrer wenig positiven Oxidationspotenziale nicht auswertbar, sodass nur die Scheibendaten blieben. Das Ring-Potenzialfenster gehört deshalb vor jede Messreihe.
- **Wahl des Ringpotenzials:** Liegt es zu kathodisch, interferiert die ORR am Ring selbst; liegt es zu anodisch, werden Nebenreaktionen oder der Katalysator miterfasst. Das Fenster ist pH-abhängig und muss bei Elektrolytwechsel neu bestimmt werden.
- **Gegenelektrode im selben Zellraum:** An der Gegenelektrode entstehender Sauerstoff verfälscht die N_2 -Grundlinie. Schwerer wiegt die Platinauflösung. Ihr Potenzial wird im Dreielektrodenaufbau nicht geregelt: Für die Sauerstoffentwicklung läuft sie auf über 1,5 V und damit über die Auflösungsschwelle von Platin. Den Hauptbeitrag liefert nicht der anodische Halt, sondern die transiente Auflösung beim Reduzieren der Oxidschicht und jeder Sweep an der Scheibe ist ein solcher Zyklus an der Gegenelektrode. Die Scheibe wirkt dabei als Falle: Bei ORR-Potenzialen wird Pt^{2+} mit über 1,5 V Überspannung irreversibel abgeschieden, und die Rotation fördert den Elektrolyten laufend heran. Rund 5 ng Pt genügen auf einer 5-mm-Scheibe für 5 % Bedeckung; genug, um die Selektivität zum 4-Elektronen-Pfad zu verschieben und damit genau das H_2O_2 -Signal zu unterdrücken, das gemessen werden soll. Ein Zwischengefäß senkt den Eintrag deutlich, verhindert ihn aber nicht vollständig; für Benchmark-Messungen an Kohlenstoffelektroden ist eine Graphit-Gegenelektrode die sichere Wahl. Zur Kontrolle: Zeigt ein CV der Scheibe unter N_2 die H-Unterpotenzialabscheidung von Platin zwischen etwa 0,05 und 0,4 V vs. RHE, ist sie kontaminiert und muss neu poliert werden.
- **Referenzelektrode und iR-Abfall:** Eine Luggin-Kapillare dicht an der Scheibe hält den unkompenzierten Widerstand klein. Sitzt sie zu nah, schirmt sie die Strömung ab; sitzt sie zu weit entfernt, verzerrt der iR-Abfall die Potenzialachse, besonders bei den hohen Strömen großer Scheiben.
- **Gassättigung:** Unvollständige oder inkonsistente N_2 -/ O_2 -Sättigung zwischen Messreihen führt zu schlecht reproduzierbaren Grundlinien; die Spülzeit sollte standardisiert und dokumentiert werden.
- **Drehzahlgrenzen, nicht Turbulenz:** Bis 4000 U/min bleibt die Strömung an einer Scheibe üblicher Größe laminar. Die Reynolds-Zahl $\text{Re} = \omega r^2 / \nu$ liegt bei $r = 6 \text{ mm}$ und 4000 U/min bei etwa $1,5 \cdot 10^4$, während der Übergang zur Turbulenz erst oberhalb von rund $2 \cdot 10^5$ einsetzt. Die praktischen Grenzen liegen anderswo: nach oben bei Rundlauffehlern, Exzentrizität und Wirbelbildung mit Luft eintrag, nach unten, unterhalb von etwa 100 U/min, bei natürlicher Konvektion und einer im Verhältnis zum Scheibenradius zu dicken Diffusionsschicht. Der nutzbare Bereich lässt sich über die Linearität der Levich- bzw. Koutecký-Levich-Auftragung prüfen.
- **Blasenbildung und Vibration:** Insbesondere bei O_2 -Sättigung können sich Gasblasen an der Elektrode absetzen; mechanische Vibrationen der Rotationseinheit äußern sich als Rauschen im Ringstrom und sollten durch stabile Montage minimiert werden.
- **Kleine Differenzströme in Subtraktionsverfahren:** Subtraktion verstärkt Rauschen. Wielend et al. weisen darauf hin, dass die berechnete Überschusseffizienz bei stark kathodischen Potenzialen Werte über 100 % annimmt, weil dort sehr kleine Differenzströme im Nenner stehen. Solche Bereiche sind rechnerische Artefakte, keine Messergebnisse.

Quelle zur Platinauflösung an der Gegenelektrode: Topalov et al. 2012, DOI: 10.1002/anie.201207256 · Mufundirwa et al., Johnson Matthey Technol. Rev. 71, DOI: 10.1595/205651327X17708941599793

■ FAZIT

Die RRDE-Technik verbindet kontrollierten, theoretisch fundierten Stofftransport mit der Möglichkeit, an der Scheibe erzeugte Spezies am Ring direkt zu detektieren. Das macht sie zu einem der aussagekräftigsten Werkzeuge, von der Katalysatorentwicklung für Sauerstoffreduktion und H_2O_2 -Erzeugung bis zur strömungsabhängigen Korrosionsforschung, zur Aufklärung von Reaktionsmechanismen.

Wie die beiden vorgestellten Publikationen zeigen, liegt die Stärke im Zusammenspiel der Methoden: Die RRDE liefert schnell und mit geringem Aufwand eine semiquantitative Rangfolge von Katalysatorkandidaten, die anschließende Elektrolyse mit Produktquantifizierung die belastbaren absoluten Kennzahlen. Beide Arbeiten betonen ausdrücklich, dass zwischen beiden Verfahren qualitative Trends, aber keine quantitative Korrelation bestehen. Wer RRDE-Kennzahlen als Absolutwerte liest, überinterpretiert sie.

Das IPS-RRDE-System deckt mit einem Rotationsbereich von 0–4000 U/min und einer breiten Auswahl an Elektrodenmaterialien sowohl Grundlagenforschung als auch anwendungsnahe Fragestellungen ab.

■ GERÄTELISTE

IPS Rotierende Ring-Scheiben-Elektrode (RRDE) — Technische Daten

Komponente	Spezifikation
Rotationseinheit	0–4000 U/min, stufenlos regelbar, Quecksilberkontakt (geringes Rauschen), Auflösung 1 U/min
Abmessungen Rotationseinheit	250 × 250 × 480 mm, 4,5 kg
SpeedControl Touch	7" Touch-Display, Ethernet + RS232, analoger Eingang/Ausgang je 1 mV = 1 U/min
Messzelle	300 mL, doppelwandiges Glas, temperierbar 5–80 °C (obere Grenze abhängig von der Referenzelektrode)
Referenzelektrode	Ag/AgCl oder Kalomel; Anschluss über Luggin-Kapillare empfohlen
Gegenelektrode	platinisiertes Titan, L-Form
Scheibenelektroden	mit Metallkern (hohe Robustheit) oder PVDF-Kern (leicht, stabil)
Ring-Scheiben-Elektroden	Platin-Ring, chemisch stabiler PVDF-/PCTFE-Körper; Scheibendurchmesser, Ring-Innen- und -Außendurchmesser sowie die daraus folgende theoretische Kollektionseffizienz N je nach Ausführung. Angaben im Datenblatt
Zylinderelektroden	nach Kundenspezifikation aus frei wählbarem Material; für strömungsinduzierte Korrosion unter turbulenten Bedingungen
Verfügbare Elektrodenmaterialien	Platin, Glaskohlenstoff, Gold, Reinkupfer, Reinzink, Aluminium, Stahl, Edelstahl, Titan
Zubehör	Zellgläser, Referenz-/Gegenelektroden, Zwischengefäße, Isolierkörper, Polierkit
Ansteuerung	IPS-Potentiostaten/Galvanostaten; für den RRDE-Betrieb ist ein Bipotentiostat erforderlich (z. B. PGU BI-1000)

Custom-Elektroden und Sonderanfertigungen sind auf Anfrage erhältlich.

■ KONTAKT

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

ibschrems@ips-jaissle.de