

Rezension

Jüngste Fortschritte in der angewandten Elektrochemie: Ein Überblick

Paolo Yammine ^{1,*}, Hanna El-Nakat ¹, Rima Kassab ¹, Agapy Mansour ¹, Bilal El Khoury ¹, Diala Koumeir ¹, Zeinab Matar ¹ und Ayman Chmayssem ^{1,2,*} 

¹ Universität Balamand, Fakultät für Geistes- und Naturwissenschaften, Abteilung Chemie, Tripoli Postfach 100, Libanon

² Electrochemistry Consulting & Services (E2CS), Gründer, Tripoli PO Box 100, Libanon

* Korrespondenz: paolo.yammine@balamand.edu.lb (PY); ayman.chmayssem@fty.balamand.edu.lb (AC);
Tel.: +00961-6-931 952 (Durchwahl 3841) (PY)

Zusammenfassung: Die angewandte Elektrochemie (AE) spielt heute eine wichtige Rolle in vielen Bereichen, darunter Energieumwandlung und -speicherung, Prozesse, Umwelt, (bio)analytische Chemie und viele. Die elektrochemische Synthese hat sich inzwischen als vielversprechender Weg erwiesen, um alle Nachteile zu vermeiden in Bezug auf hohen Energieverbrauch und hohe Umweltverschmutzung, während elektrochemische Modellierung wird eine Leistungsstarkes Werkzeug zum Verständnis komplexer Systeme und zur Vorhersage und Optimierung elektrochemischer Geräte unter verschiedenen Bedingungen, was die Studienzeit und -kosten reduziert. Die entscheidende Rolle der Elektrochemie wird in den kommenden Jahren stark berücksichtigt werden, mit dem Ziel, den CO₂-Fußabdruck zu reduzieren und die Übergang zu einem grünen und nachhaltigeren Energierahmen. Dieser Übersichtsartikel fasst die jüngsten Fortschritte in der angewandten Elektrochemie. Es zeigt, wie dieses Feld zu einem unverzichtbaren Instrument für Innovation, Fortschritt, Problemlösung in der modernen Welt und die Bewältigung gesellschaftlicher Herausforderungen in unterschiedlichsten Bereichen.

Schlüsselwörter: Elektrochemie; Dekarbonisierung; Energieumwandlung und -speicherung; Umwelt Nachhaltigkeit; Herstellung



Zitat: Yammine, P.; El-Nakat, H.; Kassab, R.; Mansour, A.; El Khoury, B.; Koumeir, D.; Matar, Z.; Chmayssem, A. Jüngste Fortschritte in der angewandten Elektrochemie: Ein Überblick. *Chemistry* **2024**, *6*, 407–434. <https://doi.org/10.3390/chemistry6030024>

Wissenschaftlicher Herausgeber: Michael Lyons

Empfangen: 29. April 2024

Überarbeitet: 16. Mai 2024

Akzeptiert: 17. Mai 2024

Veröffentlicht: 23. Mai 2024



Copyright: © 2024 bei den Autoren.

Lizenznehmer MDPI, Basel, Schweiz.

Dieser Artikel ist ein Open Access-Artikel vertrieben unter den Bedingungen und Bedingungen der Creative Commons

Namensnennung (CC BY)-Lizenz (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Einleitung

Die angewandte Elektrochemie (AE) ist eine führende moderne Wissenschaft, die sich mit gesellschaftlichen Herausforderungen in verschiedenen Bereichen befasst, darunter Energieumwandlung und -speicherung, Prozesse, Umwelt, (bio)analytische Chemie und viele andere [1–3]. Im Energiesektor ist die elektrochemische Prozesse werden zur Energieumwandlung und -speicherung eingesetzt. Dies ermöglicht die Entwicklung produktive und nachhaltige Technologien wie Batterien [4,5], Brennstoffzellen [6,7] und Elektrolyseure [8,9]. Daher helfen diese Fortschritte bei der Integration erneuerbarer Energien Quellen und unterstützen den Übergang zu grünen und nachhaltigeren Energiequellen.

Im Umweltbereich bietet die Elektrochemie neuartige Lösungen für die Schadstoffbekämpfung und Wasseraufbereitung. Elektrochemische Verfahren wie direkte und indirekte elektrochemische Oxidationsprozesse und fortgeschrittene Oxidationsprozesse werden zum Abbau von von organischen Schadstoffen [10], Entfernung von Schwermetallen [11–13] und Verbesserung der Abwässer biologische Abbaubarkeit [14,15]. Diese Technologien bieten effiziente und kostengünstige Ansätze zur Umweltprobleme angehen, Ökosysteme schützen und die Wasserqualität verbessern.

Im verarbeitenden Gewerbe spielt die Elektrochemie eine wichtige Rolle bei der Elektrosynthese, Werkstoffherstellung und Oberflächenmodifizierung. Elektrochemische Techniken wie Galvanik [16], Galvanoformung [17] und elektrochemische Bearbeitung [18] werden verwendet, um Herstellung funktionaler und schützender Beschichtungen und Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Materialien und Komponenten. Diese Prozesse ermöglichen die Herstellung hochwertiger Produkte mit verbesserten Materialeigenschaften und hoher Haltbarkeit. Beispielsweise die elektrochemische Die Behandlung von Materialoberflächen in der metallurgischen Industrie zielt zunächst auf die Schaffung poröser Materialien mit einer größeren geometrischen Oberfläche und zweitens die Schaffung eines dicke Schicht aus Metalloxid, die die Nanostruktur des Metalls schützt und stabilisiert oder die Halbleiter [19,20].

Abbildung 1. Hauptanwendung der Elektrochemie.

2.1. Energieumwandlung und -speicherung

Energie umgibt uns ständig und treibt unsere Aktivitäten Tag und Nacht an. Wir betrachten den Komfort des Zugangs zu Energie für den Betrieb unserer Geräte, Haushaltsgeräte als selbstverständlich, Maschinen und Fahrzeuge. Es ist jedoch wichtig, darüber nachzudenken, wie wir diese Energie speichern für [55]. Im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen, die in ihrer natürlichen Form leicht gelagert und transportiert werden können.

Staat, erneuerbare Energiequellen wie Sonnenlicht und Wind erfordern aufgrund ihrer intermittierenden Natur eine Zwischenspeichermethode. Daher gelten Batterien als die einzige Lösung zur Speicherung dieser Energie, damit sie bei Bedarf genutzt werden kann und eine entscheidende Brücke zwischen Energieerzeugung und -verbrauch bildet [56,57].

Es gibt zwei Arten von Batterien: solche, die Energie für einen einmaligen Gebrauch speichern, wie nicht wiederaufladbare Batterien, und solche für mehrere Verwendungszwecke, wie zum Beispiel wiederaufladbare Batterien. Unser Schwerpunkt liegt auf Batterien, die für ihre Fähigkeit bekannt sind, Energie wiederholt zu speichern und freizugeben, was zu Kosteneffizienz und Umweltfreundlichkeit in verschiedenen Anwendungen führt [58]. Die Anwendungsgebiete der Batterien lassen sich in drei Hauptkategorien einteilen: Transport und Automobil, einschließlich Elektrofahrzeuge (EVs); tragbare Elektronik; und stationäre Energiespeicherung, wobei jeder Typ einzigartige Spezifikationen erfordert. Tabelle 1 fasst die verschiedenen Arten von kommerziellen Batterien zusammen, die zur Energiespeicherung verwendet werden, sowie ihre wichtigsten Anwendungsgebiete, Vorteile und Nachteile.

Tatsächlich hängt der Fortschritt bei Elektrofahrzeugen stark von der Verbesserung der Batterietechnologie ab, die auf verschiedene Hindernisse stößt, wie unterentwickelte Batterien und Herausforderungen bei der praktischen Anwendung [59]. Bleibatterien (Pb-A) haben den Markt für wiederaufladbare Batterien in der Vergangenheit dominiert, insbesondere im Automobilsektor, aufgrund ihres erheblichen Marktanteils in Bezug auf Verkaufswert und Energieproduktion. Pb-A-Batterien sind jedoch mit inhärenten Einschränkungen verbunden, darunter eine relativ kurze Lebensdauer, eine geringe Energiedichte, Anfälligkeit für Säureschichtung und Auslaufen bei Beschädigung sowie Herausforderungen bei der Verkleinerung aufgrund von Bedenken im Zusammenhang mit der Bleiproduktion. Darüber hinaus sind die mit Bleibatterien verbundenen Umweltauswirkungen gut dokumentiert [60,61], was umfangreiche Recyclingbemühungen erforderlich macht, um ihre negativen Auswirkungen zu mildern. Infolgedessen haben sich Lithium-Ionen-Batterien (LIBs) als vielversprechende Alternative herausgestellt, die aufgrund ihrer zahlreichen Vorteile an Zugkraft gewinnen, darunter die hohe Speichereffizienz von nahezu 100 % und die Möglichkeit einer vielfältigen chemischen Zusammensetzung, wodurch sie für verschiedene nachhaltige Anwendungen geeignet sind [62]. In den gängigsten Bauformen von LIBs bestehen die Zellen aus einer negativen Elektrode, Anode genannt, und einer positiven Elektrode, Kathode genannt, die durch einen isolierenden Separator getrennt und von einem Elektrolyten umgeben sind. Beim Entladen werden Lithiumionen von der Anode durch den Separator zur Kathode transportiert und dort an das aktive Material gebunden. Gleichzeitig werden Elektronen freigesetzt und über einen externen Stromkreis von der Anode zur Kathode geleitet. Beim Laden der LIB werden die Bewegungen der Lithiumionen und Elektronen durch eine angeschlossene Stromversorgung umgekehrt [63].

In den letzten Jahren lag der Schwerpunkt auf der Weiterentwicklung von Kathetersystemen. odes nachhaltiger und sicherer zu sein. Diese Bemühungen führten zur Kommerzialisierung verschiedener Kathodenmaterialien auf dem Markt für Elektrofahrzeuge, darunter $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Al}_{0.1}\text{O}_2$ (NCA), LiMn_2O_4 (LMO), $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ (LNMO) [64], LiFePO_4 (LFP) und $\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ (NMC)-basierte Batterien. Jedes dieser Materialien bietet seine eigenen Vorteile gegenüber den anderen [65]. NCA-, LFP- und NMC-basierte Batterien werden hauptsächlich in Elektrofahrzeugen von Unternehmen wie BMW, Chevrolet, Nissan, Tesla usw. verwendet [66]. Obwohl Li-Luft- und Li-S-Batterien hergestellt wurden, sind sie noch nicht für den Einsatz in Autos bereit. Natrium-Ionen-Batterien kristallisieren sich jedoch als potenzielle Alternative zu Lithium-Ionen-Batterien heraus.

Andererseits sind persönliche Geräte wie Smartphones, Laptops, Tablets, Kameras und tragbare Technologien stark auf Energiespeicher angewiesen, um in kompakten Designs effektiv zu funktionieren. Batterien dienen als primäre Energiequelle für diese Geräte und erfordern relativ kleine Speicherkapazitäten in begrenzten Mengen und leichten Formaten. Unter den Batterietypen sind LIBs, insbesondere solche mit LMO und LiCoO_2 , besonders gut für kleine Elektronik geeignet. Sie dienen als primäre Stromkathode in einer Vielzahl von Geräten, von Smartphones und Computern bis hin zu Elektrowerkzeugen. Darüber hinaus geht der Nutzen von LIBs über die Stromversorgung tragbarer Elektronik und Transportmittel hinaus. Sie spielen heute eine wichtige Rolle bei der Unterstützung des Stromnetzes. Diese Erweiterung ermöglicht die Integration variabler erneuerbarer Energiequellen und verbessert letztlich die Effizienz in Übertragungs- und Verteilungssystemen [67].

Tabelle 1. Zusammenfassung der Energiespeicher (Batterien) mit ihren Anwendungen, Vorteilen und Nachteilen.

Batterietyp	Chemie der Batterie	Hauptsächlich Anwendung	Spezifisch Energie (Wh/Kg)	Vorteile	Nachteile
Blei-Säure [58]	Pb-A	Automobilindustrie (EV) und industrielle Nutzung	30–50	- Niedrige Kosten - Bewährte Herstellungsverfahren und weithin verfügbar - Hohe Leistung unter verschiedenen Bedingungen	- Begrenzte Energiedichte - Kurze Lebensdauer (500–1000 Zyklen) - Wartungsanforderungen im Zusammenhang mit Problemen wie Säureschichtung und Leckagen - Umweltbedenken im Zusammenhang mit der Verwendung von Blei (Schwermetall) - Eingeschränkter Einsatz bei Anwendungen, bei denen das Gewicht eine Sorge
	Lithium-Mangan-Oxid (LMO)	Tragbare elektronische Geräte (z. B. Smartphones, Laptops) – Elektrowerkzeuge	100–150	- Niedrigere Kosten - Verbesserte Umweltfreundlichkeit - Bessere thermische Stabilität und Sicherheit im Vergleich zu LCO, daher für einige Elektrofahrzeuge geeignet	- Geringere Energiedichte - Reduzierte Zyklenlebensdauer (300–700 Zyklen)
	Lithium-Kobaltoxid (LCO)		150–250	- Höhere Energiedichte. - Längere Lebensdauer (500–1000 Zyklen)	- Höhere Kosten - Umweltbedenken aufgrund des Kobaltabbaus
	Lithiumeisenphosphat (LFP)	Elektrowerkzeuge und Elektrofahrzeuge	90–120	- Am sichersten - Bessere thermische Stabilität	- Niedrigste Energiedichte unter den drei Kathoden
	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (NCA)	Netzspeicherung und Elektrofahrzeuge	155–260	- Höchste Energiedichte	- Geringere thermische Stabilität - Batterie-Thermomanagementsysteme (BTMS) Anforderungen
Polymerbasierte Batterien, [68,69]	Lithium Nickel Mangan Kobalt Oxid (NMC)	Elektrowerkzeuge, EV	150–200	- Mäßige Energiedichte und Sicherheit	- BTMS-Anforderungen
	Redoxaktive Polymere entweder für die Kathode, die Anode oder beide Elektroden.	Medizin- und Logistikbereiche	50–200	- Herstellung dünner und flexibler Batterien - Hohe Geschwindigkeit - Metallfrei und Recyclingfähigkeit	- Einschränkungen bei Entladekapazitäten und Spannungsabgaben - Eingeschränkte Anwendbarkeit auf Systeme mit geringem Stromverbrauch
	Enzymatische Brennstoffzellen	Ideal für Wearables und Implantate: - Kompakt - Integrierbar - Biosicher	20–300	- Preiswert - Leicht - Flexibel	- Geringe Energiedichte
Biokraftstoff [70–74]	Mikrobielle Brennstoffzellen	Fokussiert auf die Erzeugung von Strom aus der Umgebung im großen Maßstab - Passend für Anwendungen mit minimalem Stromverbrauch (z. B. Abwasserbehandlung)		- Umweltfreundlich - Biologisch abbaubar - Kann aus verschiedenen Arten von organischen Stoffen Elektrizität erzeugen	- Kurzzeitstabilität (mit der Zeit abnehmende Leistungsabgabe)

Eine alternative Strategie, die neben der Kathodenentwicklung kurz vor der Kommerzialisierung steht, besteht in der Umstellung von Graphitanoden auf Siliziumanoden. Silizium, ein reichlich vorhandenes, ungiftiges und kostengünstiges Material, bietet eine deutlich höhere Speicherkapazität. Erste Versuche, Anoden ausschließlich aus reinem Silizium herzustellen, waren erfolglos. Ein vielversprechenderer Ansatz, der inzwischen von der Industrie weiterentwickelt wurde, besteht darin, poröse oder andere Kohlenstoffzusätze in die Anode einzubauen [75]. Derzeit arbeiten verschiedene Hersteller wie Varta, Sila Nanotechnologies, Enovix Corporation, Gotion High-Tech und andere aktiv an Verbundanoden mit unterschiedlichen, aber steigenden Anteilen an Silizium und/oder SiO_x oder TiSi [76]. Der Ersatz konventioneller Elektroden wie Graphit oder Silizium durch Graphen kann die Stabilität und Lebensdauer der Batterie verbessern und gleichzeitig eine höhere Energiedichte zu geringeren Kosten bieten. Die strukturellen Einschränkungen von Graphen begrenzen jedoch die Batteriegröße und beschränken damit die Energiespeicherkapazität in erster Linie auf kleine Geräte, was sie für große Batteriepacks, einschließlich solcher für Elektrofahrzeuge, ungeeignet macht [77,78].

Aktuelle Fortschritte in der Nanotechnologie konzentrieren sich auf die Miniaturisierung elektronischer Geräte, um bei Bedarf Strom bereitzustellen. Die auf Lithiumionen basierenden Mikro-/Nanobatterien sind hierfür hervorragende Kandidaten, da sie sich durch geringe Größe, geringes Gewicht, hohe Kapazität und lange Lebensdauer auszeichnen und zudem Stabilität und Sicherheit bieten, wodurch sie sich für die Energiespeicherung in Mikrogeräten und tragbaren Anwendungen eignen [79]. Neben der Entwicklung von Batterien auf Metallbasis bieten organische Batterien, auch als Batterien auf Polymerbasis bekannt, mehrere Vorteile gegenüber ihren üblichen Gegenstücken auf Metallbasis: Sie enthalten keine giftigen und seltenen Schwermetalle, ihre organischen Rohstoffe können potenziell aus erneuerbaren Ressourcen gewonnen werden und am Ende des Lebenszyklus können sie ohne giftige Rückstände durch Verbrennung entsorgt werden. In den frühen 2000er Jahren wurden verschiedene potenzielle Anwendungen für diese umweltfreundlicheren Batterien untersucht. Dennoch haben diese Systeme bis heute keine kommerzielle Anwendung gefunden, wobei Evonik Industries derzeit führend bei der Bereitstellung von Materialien für druckbare Batterien auf Polymerbasis ist, die in dünnen und flexiblen Geräten verwendet werden können [69,80]. Auch Biobatterien auf Basis von Biobrennstoffzellen bieten sich als Lösung für CO₂-Neutralität an. Diese Biobatterien befinden sich zwar noch in der Entwicklungsphase, bieten jedoch eine saubere, sichere, langlebige und effiziente Energiespeicherung, die mit den zukünftigen Klimazielen im Einklang steht. Sie nutzen Enzyme, Organellen oder Mikroorganismen als umweltfreundliche Biokatalysatoren, um chemische oder biologische Energie in elektrische Energie umzuwandeln. Dies ermöglicht eine nachhaltige Stromerzeugung für tragbare, tragbare, implantierbare oder einnehmbare Geräte und bietet langfristige Lösungen für unbeaufsichtigte Umweltelektronik [70,81].

Das Unternehmen BeFC (Bioenzymatic Fuel Cells) hat die ersten kostengünstigen und effizienten Papier-Biobrennstoffzellen entwickelt. Diese Zellen sind metallfrei, organisch, recycelbar, kompostierbar, sicher und nachhaltig.

Da die Nachfrage nach Batterien bis 2050 voraussichtlich steigen wird, hat das in Frankreich ansässige Unternehmen Verkor eine Gigafabrik für Batterien ins Leben gerufen. Ziel des Unternehmens ist die Herstellung kohlenstoffarmer, leistungsstarker Elektrobatterien, vor allem LIBs, zur Unterstützung nachhaltiger Mobilitätsbemühungen. Ziel dieser Initiative ist es, die Abhängigkeit von chinesischen Batterieherstellern zu verringern und mehr Arbeitsplätze zu schaffen.

Neben dem Einsatz von Batterien mit null Netto-CO₂-Emissionen ist das Batterierecycling von entscheidender Bedeutung [58]. Da die meisten Batteriematerialien recycelbar sind, sind Investitionen in nachhaltige Verfahren unerlässlich, um die Umweltbelastung zu verringern und den wachsenden Energiebedarf zu decken. In Anerkennung dieser Notwendigkeit wurden das schwedische Batterieunternehmen NorthVolt und seine Tochtergesellschaft Revolt, die sich um das Recycling kümmert, gegründet. Diese Anlagen sind nicht nur auf die Herstellung hochwertiger Batterien spezialisiert, sondern implementieren auch umfassende Recyclingstrategien. Von der anfänglichen Auswahl der Komponenten (Batterien ohne Lithium oder Co) bis hin zum Recyclingprozess am Ende der Lebensdauer spielen diese Unternehmen eine entscheidende Rolle bei der Minimierung der Ressourcenschöpfung und der Reduzierung der CO₂-Emissionen, die mit der Herstellung und Entsorgung von Batterien verbunden sind (Abbildung 2).

anes Recycling, hat sich etabliert. Diese Betriebe sind nicht nur darauf spezialisiert, hochwertige Batterien herzustellen, sondern auch umfassende Recyclingstrategien umzusetzen. Von der anfänglichen Auswahl der Komponenten (Batterien ohne Lithium oder Co) bis hin zum Recyclingprozess am Ende der Lebensdauer spielen diese Unternehmen eine entscheidende Rolle bei der Minimierung der Ressourcenerschöpfung und der Reduzierung der CO₂-Emissionen, die mit der Herstellung und Entsorgung von Batterien verbunden sind (Abbildung 2).

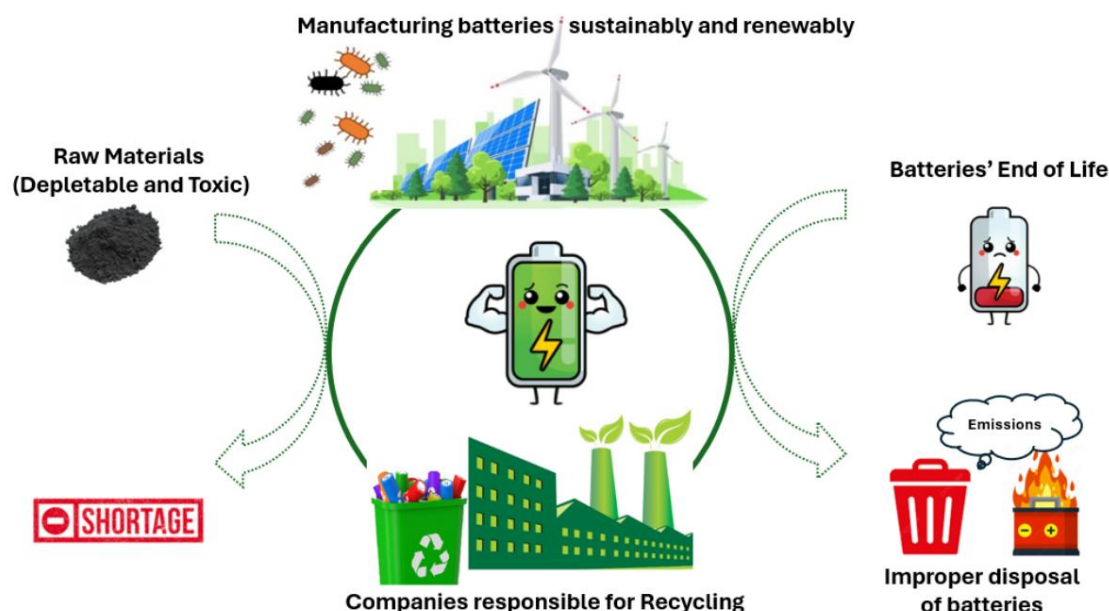


Abbildung 2. Darstellung der Herstellung von Batterien unter Verwendung von Rohstoffen wie Pb, Li und Co. ihre Tendenz zur Verknappung auf lange Sicht (linke Seite), gefolgt von ihrer End-of-Life-Phase nach ihrer Nutzung und unsachgemäße Entsorgung, die Gefahren birgt (rechte Seite). In der Mitte der Trend zwischen einer der wichtigsten Aufgaben aktueller und zukünftiger Unternehmen besteht darin, Batterien zu recyceln und auf nachhaltige Weise neue herzustellen. Hier, die Unternehmen haben Ressourcen wie Sonnenenergie, Windkraft, Bakterien und Enzyme nutzt. Art und Weise unter Verwendung erneuerbarer Ressourcen wie Sonnenenergie, Windkraft, Bakterien und Enzyme.

2.2. Materialcharakterisierung 2.2. Materialcharakterisierung

Die elektrochemische Charakterisierung weist auf eine Reihe von Techniken im Bereich der Elektrochemie, die verwendet werden, um die Eigenschaften und Verhaltensweisen von zu analysieren und zu verstehen Materialien oder Systeme. Diese Techniken umfassen das Anwenden elektrischer Reize und das Messen der daraus resultierenden elektrischen oder elektrochemischen Signale, um Erkenntnisse über verschiedene Eigenschaften zu gewinnen, wie Leitfähigkeit, Oberflächenreaktivität [82], Korrosionsbeständigkeit [83], katalytische Aktivität [84], und Ionentransport [85]. Elektrochemische Charakterisierungstechniken sind wertvolle Werkzeuge für die Analyse beider Spezies im gelösten und festen Zustand.

Für in einer Lösung gelöste Spezies werden gängige Techniken wie zyklische Voltammetrie verwendet. Chronoamperometrie, Potentiometrie und Impedanzspektroskopie werden zur elektrochemischen Charakterisierung. Für feste Materialien sind jedoch Hohlraum-mikroelektroden verwendet. Zur Charakterisierung der elektroaktiven Spezies werden Feststoffe in den Hohlraum von die Mikroelektrode und die elektrochemische Charakterisierung werden durchgeführt. In diesem Teil Die Technik wird kurz beschrieben und es werden Beispiele gegeben.

Die zyklische Voltammetrie (CV) ist eine leistungsstarke und beliebte elektrochemische Methode, die häufig zur Erforschung der Reduktions- und Oxidationsprozesse molekularer Spezies. CV wird auch wertvoll für das Studium chemischer Reaktionen, die durch Elektronentransfer ausgelöst werden, einschließlich Katalyse, Einblicke in katalytische Prozesse und ein besseres Verständnis von Redox Mechanismen in verschiedenen Systemen [27]. Die zyklische Voltammetrie charakterisiert elektrochemische Systeme durch Messen der Stromreaktion (i) als Funktion der angelegten Spannung (E) (i vs. E) liefert Informationen über Redoxreaktionen, Elektronentransferkinetik und Stabilität von elektroaktive Spezies [86]. Bei dieser Technik wird die Spannung bei gleichzeitiger Überwachung der resultierenden Stromreaktion, so dass Spitzenpotentiale, Spitzen und andere elektrochemische Parameter bestimmt werden [87]. In CV wurde der Butler-Volmer-Gleichung (Gleichung (1)) wird häufig verwendet, um die Kinetik des Elektronentransfers an der Elektrodenschnittstelle wie folgt:

$$i = i_0 \left(\exp \frac{\alpha n F y}{RT} - \exp \frac{-\alpha n F y}{RT} \right) \quad (1)$$

Dabei ist i die Stromdichte, i_0 die Austauschstromdichte (in A/m^2), γ der Ladungsübertragungskoeffizient (dimensionslos), n die Anzahl der an der Elektrodenreaktion beteiligten Elektronen, R und F sind jeweils das ideale Gas und die Faraday-Konstanten, T ist die Temperatur und η ist das Überpotential, definiert als die Differenz zwischen dem angelegten Elektrodenpotential und dem Gleichgewichtspotential für die Elektrodenreaktion.

Die Chronoamperometrie hingegen ist eine elektrochemische Technik, die den elektrischen Strom (i) als Funktion der Zeit (i vs. t) misst, wenn ein konstantes elektrisches Potenzial (E) an eine Elektrode angelegt wird. Im Gegensatz zur zyklischen Voltammetrie, bei der ein zyklisch variierendes Potenzial angelegt wird, wird bei der Chronoamperometrie ein konstantes Potenzial aufrechterhalten und der resultierende elektrische Strom im Zeitverlauf gemäß dem Cottrellschen Gesetz (Gleichung (2)) gemessen. Diese Technik wird häufig verwendet, um elektrochemische Reaktionen mit bestimmten Elektrodenmaterialien zu untersuchen und die kinetischen Konstanten elektrochemischer Reaktionen zu bestimmen [88,89].

$$i = \frac{nFA D^{1/2} C}{\gamma^{1/2} t^{1/2}} \quad (2)$$

Dabei ist i der Strom, n die Anzahl der an der elektrochemischen Reaktion beteiligten Elektronen, F die Faraday-Konstante, A die Elektrodenfläche, D der Diffusionskoeffizient der elektroaktiven Spezies, C die Konzentration der elektroaktiven Spezies und t die Zeit (in Sekunden).

Die Steady-State-Amperometrie mit Mikroelektroden und basierend auf Potentialsprungexperimenten gilt allgemein als die Methode mit der höchsten Genauigkeit bei der Überwachung des Ladezustands (SOC) in Elektrolyten von Redox-Flow-Batterien (RFB). Es wurde eine neuartige Analyseverfahren für amperometrische Messungen des Ladezustands (SOC) und des Gesundheitszustands (SOH) in einzelnen Elektrolyten von Redox-Flow-Batterien (RFB) entwickelt, die sich auf transiente Stromsignale konzentriert, die in chronoamperometrischen Potentialsprungexperimenten erhalten wurden [90].

Die potentiometrische Messung hingegen ist eine Methode zur Bestimmung der Ionenkonzentration in einer Lösung durch Messung der elektrischen Potentialdifferenz (ηE) zwischen einer Referenzelektrode (typischerweise $Ag/AgCl$) oder einer Pseudo-Referenzelektrode und einer Arbeitselektrode [91–93] als Funktion der Zeit (ηE vs. t). Diese Methode basiert auf der Nernst-Gleichung (Gleichung (3)), die das gemessene Potential mit der Ionenkonzentration in der Lösung in Beziehung setzt. Sie zeichnet sich durch ihre Einfachheit und Empfindlichkeit aus; die Anwesenheit unterschiedlicher Ionen in der Lösung führt jedoch zur Messung eines gemischten Potentials, das proportional zur Ionenkonzentration ist.

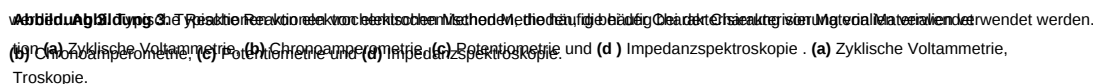
$$E_{Cell} = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[Ochse]}{[Rot]} \quad (3)$$

wobei R und F das ideale Gas bzw. die Faraday-Konstanten sind, n die Anzahl der Elektronen, T die Temperatur und E^0 ist das Standardpotential des Zielanalyten.

Im Batteriebereich dient der Entropiekoeffizient ($dUOC/dT$) als entscheidender Parameter zur Vorhersage der Wärmeentwicklung in Lithium-Ionen-Batterien (LiBs), insbesondere bei niedriger Entladung. Obwohl zur Messung des Entropiekoeffizienten häufig die potentiometrische Methode verwendet wird, geht ihre Genauigkeit auf Kosten der Zeit. Folglich besteht ein dringender Bedarf an einer effizienten und genauen Technik zur Entropiemessung. Die vorgeschlagene schnelle und präzise verbesserte potentiometrische Methode, die als positive Anpassung (PA) bezeichnet wird, reduziert die Relaxationszeit auf 10 Minuten. Zur Validierung der PA-Methode werden handelsübliche 18650-Lithium-Ionen-Zellen verwendet. Ein Vergleich zwischen den mit der PA-Methode und der herkömmlichen potentiometrischen Methode (CPM) erhaltenen Entropieprofilen weist auf eine vergleichbare Genauigkeit mit einem durchschnittlichen Fehler von $\pm 0,01$ mV/K hin. Auch im Vergleich mit neueren Alternativmethoden weist die PA-Methode erhebliche Vorteile bei der Messeffizienz auf [94].

Umgekehrt ist die Impedanzmessung (Z) eine Technik, die verwendet wird, um das elektrische Verhalten eines Systems als Reaktion auf ein elektrisches Wechsignalsignal (für einen festen Frequenzbereich) zu charakterisieren [95]. Die Impedanz ist ein Maß für den Widerstand eines Stromkreises gegenüber Wechselstrom (gemäß dem Ohmschen Gesetz) und kann Komponenten wie Widerstand

Chemistry 2024, 6, ZUR PEER-REVIEW



Hohlraummikroelektroden (CMEs) werden in verschiedenen Bereichen der wissenschaftlichen Forschung [100] eingesetzt, darunter Elektrophysiologie, Neurowissenschaften, Material [101,102] analytische Chemie und sogar Batterien [103]. Sie bestehen im Allgemeinen aus einem leitfähigen Material, oft metallisch, mit einem kleinen Hohlraum am Ende (zehn μm Tiefe und größer). Diese Mikroelektroden werden verwendet, um

Hohlraummikroelektroden (CMEs) werden in verschiedenen Bereichen der wissenschaftlichen Forschung [100] eingesetzt, darunter Elektrophysiologie, Neurowissenschaften, Material [101,102] analytische Chemie und sogar Batterien [103]. Sie bestehen im Allgemeinen aus einem leitfähigen Material, oft metallisch, mit einem kleinen Hohlraum am Ende (zehn μm Tiefe und größer). Diese Mikroelektroden werden verwendet, um elektrische Signale in sehr kleinem Maßstab zu messen. Der Hohlraum am Ende der Elektrode ermöglicht eine bessere elektrische Leitung zwischen der Elektrode und dem Medium in

in die sie eingesetzt wird. Diese Funktion verbessert die Empfindlichkeit elektrophysiologischer oder elektrochemischer Messungen. Bei Batterien werden Hohlraummikroelektroden verwendet, um die elektrochemischen Prozesse zu untersuchen, die im Inneren der Batterie stattfinden. Sie ermöglichen die genaue Messung elektrischer Ströme und elektrochemischer Potenziale auf sehr feinen Skalen und tragen so zum Verständnis der Leistung und Haltbarkeit von Batterien bei. Hohlraummikroelektroden im Bereich der Batterien zeichnen sich durch ihre geringe Größe, hohe Energiedichte, schnelle Reaktion, Stabilität und Haltbarkeit sowie ihre Fähigkeit aus, eine genaue Steuerung elektrochemischer Prozesse zu ermöglichen. Sie bieten das Potenzial für neue Batteriearchitekturen, die zu verbesserter Leistung und besserer Energieeffizienz führen können. Hohlraummikroelektroden (CMEs) bieten eine wertvolle Plattform zur Bewertung der elektrokatalytischen Leistung von Mikro- und Nanopartikelmaterialien. Die technischen Faktoren und physikochemischen Prozesse, die die elektrochemische Reaktion von CMEs beeinflussen, müssen erkannt werden, insbesondere die Zugänglichkeit von Redoxspezies auf der Oberfläche des Elektrokatalysators. Die voltammetrische Reaktion von Hohlraummikroelektroden (CMEs) wird mit einem kombinierten experimentellen und theoretischen Ansatz untersucht. Dies beinhaltet eine vergleichende Untersuchung von Techniken der zyklischen Voltammetrie und der Rechteckwellenvoltammetrie (SWV). Die Ergebnisse zeigen eine kapazitive Reaktionsverzerrung, die mit der Pulveroberfläche zunimmt, jedoch mit einer Faradayschen Reaktion, die der von eingebetteten Mikroscheiben ähnelt, was darauf hindeutet, dass elektrochemische Reaktionen hauptsächlich auf der ersten Schicht des Pulverfüllers stattfinden. Darüber hinaus wird gezeigt, dass die SWV gut geeignet ist, um faradaysche Prozesse an CMEs zu unterscheiden, und es werden präzise mathematische Ausdrücke zur Beschreibung dieser Methode vorgestellt. Diese Ergebnisse liefern Richtlinien für die Gestaltung und Analyse der voltammetrischen Messungen von CMEs [104].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass zyklische Voltammetrie, Impedanzspektroskopie, Potentiometrie und Chronoamperometrie allesamt elektrochemische Techniken sind, die in der Batterieforschung verwendet werden, aber jede von ihnen hat unterschiedliche Prinzipien, Anwendungen, Vorteile und Einschränkungen. Die Wahl der Technik hängt von den spezifischen Aspekten des untersuchten Batterieverhaltens und dem gewünschten Detaillierungsgrad und der Komplexität der Analyse ab.

2.3. Oberflächenmodifizierung

Die Oberflächenmodifizierung durch elektrochemische Methoden erfolgt in verschiedenen Formen durch verschiedene Prozesse, wie z. B. Galvanisieren, galvanische Abscheidung, Anodisieren, Oberflächenätzen und elektrochemische Funktionalisierung. Dieser Abschnitt fasst das Konzept jedes der oben genannten Prozesse kurz zusammen und konzentriert sich auf die wichtigsten Anwendungen, die mit jeder Methode verbunden sind.

Die Begriffe Galvanisierung und galvanische Abscheidung werden manchmal synonym verwendet. In technischen Zusammenhängen beziehen sie sich jedoch auf unterschiedliche Prozesse. Galvanisieren bezeichnet den Prozess des Aufbringens einer dünnen Metallschicht auf eine Substratoberfläche durch eine elektrochemische Reaktion [16,105]. Es wird häufig in der metallurgischen Industrie eingesetzt, beispielsweise in der Automobil-, Elektronik- und Schmuckherstellung (z. B. Nickelbeschichtungen, Platinbeschichtungen [106], Goldbeschichtungen [107], Kupferbeschichtungen [108] usw.), mit dem Ziel, Schutzbeschichtungen herzustellen, um Oberflächen vor aggressiven Bedingungen zu schützen und so die Leistungsfähigkeit von Materialien zu verbessern und die physikalischen Eigenschaften von Komponenten (Helligkeit, Form usw.) zu verbessern. Im Gegensatz dazu bezeichnet galvanische Abscheidung den Prozess des Aufbringens eines beliebigen Materials auf eine Substratoberfläche durch elektrochemische Methoden. Die galvanische Abscheidung ermöglicht die Herstellung hochwertiger Produkte mit verbesserten Materialeigenschaften und hoher Haltbarkeit. Sie ermöglicht die galvanische Abscheidung von Legierungen, Verbundwerkstoffen oder nichtmetallischen Materialien (z. B. Abscheidung von Gläsern [109], Silikon [110] und leitfähigen Polymeren wie Polypyrrolidon [111]).

chngs prsr srss rm ggrssv chngs, r ncrsng Leistung von Materialien und Verbesserung der physikalischen Eigenschaften von Komponenten (Helligkeit, Form usw.). Umgekehrt bezieht sich die galvanische Abscheidung auf den Prozess der Abscheidung von Materialien auf einer Substratoberfläche mithilfe elektrochemischer Methoden. Die galvanische Abscheidung ermöglicht die Herstellung hochwertiger Produkte mit verbesserten Materialeigenschaften und hoher Haltbarkeit. Sie ermöglicht die galvanische Abscheidung von Legierungen, 416 Verbundwerkstoffen oder nichtmetallischen Materialien (z. B. Abscheidung von Gläsern [109], Silikon [110] und leitfähigen Polymeren wie Polypyrrol [111], Polyanilin [112,113], PEDOT [114] usw.). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die galvanische Abscheidung eine Art von Beschichtung ist.

ist eine Art der galvanischen Abscheidung, bei der es um das Aufbringen von

Haftung des Substrats zu verbessern [115]. Bei dieser Technik wird eine Korrosionsbeständige Härte und die Korrosionsbeständigkeit, Härte und Haftung des Substrats zu verbessern [115]. Bei dieser Technik wird ein positives Potential zur Substratoberfläche in einer Elektrolytlösung zur Bildung einer stabilen Oxidschicht zu bilden [116,117]. Es wird hauptsächlich bei Aluminium und seinen Legierungen verwendet, um Verbesserungen der Oberflächeneigenschaften und bietet verschiedene Vorteile (Härte, verbesserte Ästhetik). Da das Erreichen der Oberflächeneigenschaften beeinflusst, ist es notwendig, die für die Produktion von Elektrolytselektrolyt erforderliche Anodisierung zu verbessern, da durch das Anodisieren eine poröse Oberfläche entsteht, die die Haftung von Folien-Beschichtungen beschleunigt [118,119] (Abbildung 4).

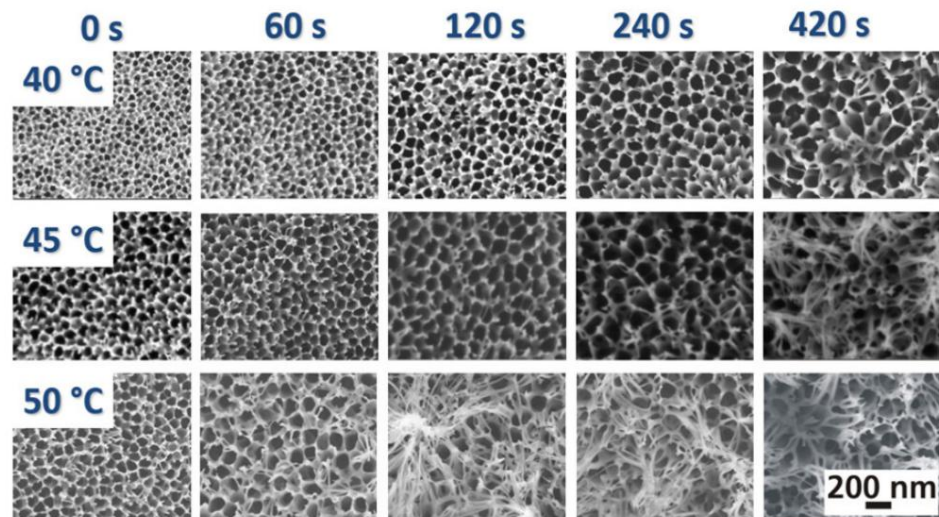


Abbildung 4. SEM-Bilder der Oberflächenmorphologie von Oxidschichten, die bei 50 V in Phosphorsäure anodisiert wurden in Abhängigkeit von der Verweilzeit und der Badtemperatur (mit freundlicher Genehmigung der Herausgeber unter der Lizenznummer 5777000505982) [120].

Elektrochemisches Ätzen oder Nassätzen (auch als elektrochemische Bearbeitung bekannt) ist eine Verfahren, bei dem elektrischer Strom und eine Elektrolytlösung verwendet werden, um gezielt Materialien von einem leitfähigen Substrat (Metall oder Halbleiter) zu entfernen und so ein Ätzen durchzuführen [121,122]. Damit lassen sich Oberflächentexturen, Muster oder Mikrostrukturen für verschiedene Anwendungen erzeugen. Es handelt sich um den reversiblen Prozess der galvanischen Abscheidung, bei dem eine dünne Metallschicht beschichtet ist. Der Prozess besteht in den meisten Fällen darin, das Metall (oder den Halbleiter) einzutauchen in Säurebädern (Elektrolyt) während einer bestimmten Zeit, um zunächst poröse Nanostrukturen auf Substratoberflächen und zum anderen die Bildung einer dünnen Schicht aus Metalloxid (durch Anodisierung), die die Nanostrukturen schützt und stabilisiert [19,20]. Dadurch wird die Oberfläche nimmt zu, wenn die Struktur des Substrats von 2D-Oberflächen in 3D-Oberflächen umgewandelt wird [123]. Konzeptionell beeinflussen viele Parameter den Prozess und sollten kontrolliert werden, z. B. die Konzentration der sauren Lösungen, die Temperatur der Bäder, die Anwesenheit eines Katalysators die eine wesentliche Rolle bei der Einleitung der Materialnukleation spielen (z. B. Kupferionen) und schließlich die Dicke des Substrats. Andererseits kann das Ätzen die mechanische Eigenschaften des geätzten Substrats. Aus diesem Grund werden viele physikalische Eigenschaften überwacht während des Prozesses durch regelmäßige Tests des Substrats (z. B. Berstfestigkeit Tester für Foliensubstrate usw.). Um den besten Kompromiss zwischen der Oberflächenätzung unter Beibehaltung guter und akzeptabler physikalischer Eigenschaften, die Kontaktzeit (Verweilzeit des Substrats im Elektrolyten) berücksichtigt werden [124,125]. Die Oberflächenätzung kann je nach Badzusammensetzung verschiedene Formen annehmen. Folglich kann es entstehen Tunnel, die die Materialoberflächen durchqueren [126,127], und es können Nanoporen (auch Die Bildung von Poren auf Substratoberflächen kann zu einer Vergrößerung der Oberfläche führen [128].

Die weitverbreitete Anwendung des elektrochemischen Ätzens ist die Vorbereitung von Rohmaterial Materialien (Anoden- und Kathodenkomponenten), die bei der Herstellung elektrochemischer Kathoden verwendet werden.

pacitors, auch Superkondensatoren genannt [129]. Bei diesem Verfahren werden die Aluminiumfolien (hohe Reinheit $\geq 99\%$) durch elektrochemisches Ätzen behandelt und anschließend geformt. Abhängig von den Kapazitätsmessungen können die Folien klassifiziert und für verschiedene Anwendungen verwendet werden, z. B. Gleichstromkondensator- Hochspannung, Wechselstromkondensator-Motorstart usw. Die höheren Kapazitätswerte können auf bestimmte wünschenswerte Eigenschaften hinweisen, wie z. B. eine größere Oberfläche oder eine verbesserte Elektrodenleistung [130]. Daher sollten sie in Verbindung mit anderen Charakterisierungstechniken und Leistungsmetriken interpretiert werden, um die Gesamtqualität der Folie genau zu beurteilen.

2.4. Elektroanalyse

Die elektrochemische Analyse (oder Elektroanalyse) beruht auf der Verwendung elektrochemischer Methoden zur quantitativen Bestimmung der Konzentration eines Analyten in einer Probe. Typischerweise umfassen diese Methoden Voltammetrie [27], Amperometrie [28], Potentiometrie [29] und Impedanzspektroskopie [131] (das Prinzip dieser Methoden wird in § 2.2 ausführlich beschrieben). Diese Methoden werden eingesetzt, um die antioxidative Aktivität zu messen [21,22] und zu analysieren [24] und verschiedene Verbindungen und Materialien zu charakterisieren [25,26] sowie um Referenzmethoden zu entwickeln [132].

Elektrochemische Sensoren und Biosensoren zählen zu den häufigsten Anwendungen der Elektroanalyse. Sie werden zur Erkennung von Biomolekülen [30,133], Schadstoffen [31] und Analyten in Umweltproben [32,33], Lebensmitteln [134], Arzneimitteln [34,35] sowie in der klinischen und biochemischen Diagnostik [23,36,135] eingesetzt. Diese Geräte ermöglichen schnelle, empfindliche und relativ selektive Messungen und sind daher wertvolle Werkzeuge für Forschung, Qualitätskontrolle und Echtzeit-Prozessüberwachung (Abbildung 5).

In diesem Abschnitt werden zwei Beispiele der Elektroanalyse auf der Grundlage ihrer Bedeutung und weitverbreiteten Anwendung untersucht: die pH-Elektrode und der Glucose-Biosensor. Tatsächlich ist die Überwachung des pH-Werts bei vielen chemischen und biochemischen Prozessen von großem Interesse. Der Begriff pH steht für das Potenzial von Wasserstoff und ermöglicht es, seine Leistung auszudrücken. Die pH-Messungen drücken den Säure- und Alkaligehalt von Lösungen und Dämpfen aus und helfen bei der Steuerung und Optimierung industrieller Prozesse. Die Messung des pH-Werts mithilfe einer Redoxelektrodensonde besteht aus der potentiometrisch ermittelten Konzentration von Wasserstoffionen (H^+) in einer Lösung basierend auf der Nernst-Gleichung [136,137]. In jüngster Zeit wurden in der Literatur viele miniaturisierte pH-Elektroden beschrieben. Diese Geräte sind klein und kompakt konzipiert und von wesentlicher Bedeutung für viele Anwendungen, die kleine Systeme zur Integration erfordern (z. B. Lab-on-a-Chip-Systeme [23,30], Point-of-Care-Diagnostik usw.) oder für tragbare Geräte (zur physiologischen Überwachung oder tragbaren Gesundheitstrackern) [138,139] [vorgesehen sind](#).

Ein Glucose-Biosensor ist ein Gerät, das ein biologisches Erkennungselement als Sensorkomponente enthält (Enzyme, z. B. Glucoseoxidase (GOx) oder Glucosedehydrogenase (GDH) und ihren Kofaktor). Die Nebenprodukte der enzymatischen Reaktion diffundieren durch die Sensormembran und werden dann auf der Elektrodenoberfläche bei einem festen Potential oxidiert oder reduziert, das vom Elektrodenmaterial abhängt [140,141]. Bei enzymatischen Glucose-Biosensoren der ersten Generation führt die enzymatische Oxidation von Glucose durch GOx typischerweise zur Produktion von Wasserstoffperoxid (H_2O_2), das bei einem positiven Potential von +0,7 V gegenüber einer Ag/AgCl-Referenzelektrode oxidiert oder bei negativen Potentialen (zwischen $\approx 0,2$ und 0 V) reduziert wird, wobei Mediatoren zum Einsatz kommen, die die Erkennungspotentiale senken und Interferenzprobleme vermeiden. Glukose-Biosensoren sind Geräte, die üblicherweise zur Überwachung des Blutzuckerspiegels bei Diabetikern eingesetzt werden und eine der weltweit am häufigsten verwendeten Anwendungen zur Glukoseüberwachung darstellen [143].

Produktion von Wasserstoffperoxid (H_2O_2), das bei einem positiven Potential von +0,7 V gegenüber einer Ag/AgCl-Referenzelektrode oxidiert oder bei negativen Potentialen (zwischen -0,2 und 0 V) reduziert wird. Dabei werden Mediatoren eingesetzt, die die Nachweispotentiale senken und Interferenzprobleme verhindern [142]. Glukose-Biosensoren sind Geräte, die häufig zur Überwachung des Blutzuckerspiegels bei diabetischen Patienten eingesetzt werden und stellen eine der weltweit am häufigsten eingesetzten Anwendungen zur Glukoseüberwachung dar [143].

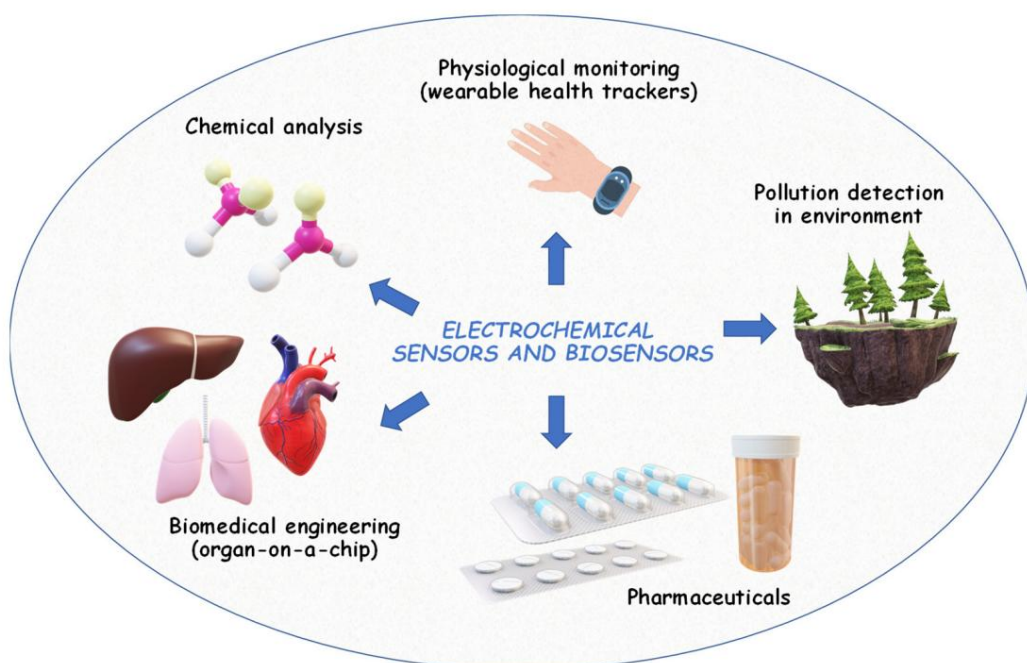


Abbildung 5. Gängige Anwendungen der Elektroanalyse zur Erkennung von Biomolekülen, Schadstoffen, und Analyten in Umweltproben, Pharmazeutika sowie klinischer und biochemischer Diagnostik.

2.5. Elektrochemische Verfahren zur Schadstoffbeseitigung und Wasseraufbereitung

Die Bereitstellung von sauberem Wasser für industrielle oder Trinkwasserzwecke ist eine Herausforderung, weil die globale Bevölkerung regelmäßig die zur Verfügung stehenden und verwertbaren und die Vielzahl an verschiedenen, verunreinigten Wasserströme [144]. Riesige Schadstoffeinträge aus Industrie und Landwirtschaft Prozesse der Welt trägt erheblich zur Qualität des Wassers bei. Es ist allgemein bekannt, dass die Die größten Umweltverschmutzer sind die Hersteller synthetischer organischer Chemikalien (> 400 Millionen Päsindjährlich) und der Einsatz von Düngemitteln (> 200 Millionen Tonnen jährlich) und der Einsatz von (Tennen) [145]. Die Lösungsmittel der Wasserverschmutzung ist heute wichtiger denn je, Süßwassers der Erde für industrielle Prozesse, Energie Produktion und Landwirtschaft.

Viele Möglichkeiten, nachhaltigere Lösungen für Wasseraufbereitungsanwendungen zu finden, sind elektrochemische Verfahren bieten [146,147]. In den meisten Fällen wird Elektrizität als Energiequelle, die die auftretenden elektrochemischen Reaktionen erleichtert und diese leitet Prozesse. Zu den gut entwickelten elektrochemischen Wasseraufbereitungsprozessen wie Elektrokoagulation, Elektroflotation, Elektrodialyse, elektrochemischer Oxidation und Reduktion gehören. Es gibt neue Prozesse, die gute Voraussetzungen für den Einsatz im industriellen Maßstab bieten. Anwendungen. Diese Prozesse erhöhen tendenziell die Schadstoffbeseitigungsrate, beseitigen Nachteile und erweitern die Anwendbarkeit bestehender elektrochlorierter Wasseraufbereitung Techniken zur Verbesserung der Kosteneffizienz. Die folgenden neuen und kombinierten elektrochemischen Prozesse, wie Elektrodeionisation [148], kapazitive Deionisation [149], Elektro-Fenton [150], mikrobielle Brennstoffzellenbehandlung [151], Photo- und Sonoelektrokatalyse, zeigen beeindruckende Ergebnisse bei der Wasserentgiftung, insbesondere im Labormaßstab [152]. Das Hauptanliegen bei der Anwendung dieser Prozesse bleibt die Skalierung auf den industriellen Maßstab. Dies ist ein sehr anspruchsvoller Schritt bei der Anwendung dieser Prozesse.

Die Elektrodeionisierung ist eine Kombination aus zwei Entsalzungsverfahren, der Elektrodialyse und Ionenaustausch, der zu noch tieferen Demineralisierungsraten führt. Kapazitive Deionisierung ermöglicht die gleichzeitige Entsalzung von Wasser und die Rückgewinnung elektrischer Energie in einem Elektro-Fenton ermöglicht die Erzeugung von Katalysatoren in situ und reduziert dadurch Schlammabildung. Neben der Wasseraufbereitung ermöglichen mikrobielle Brennstoffzellen elektrische Energie zurückgewonnen werden kann, wodurch die für diesen Prozess erforderlichen Wartungskosten gesenkt werden. erhöhte Trennung der Ladungsträger und Unterdrückung der Elektron-Loch-Rekombination

in einem elektrischen Feld sorgt die Photoelektrokatalyse für bessere Entfernungseffizienzen als ein einzelner Photokatalysator. Die Sonoelektrokatalyse erhöht die Geschwindigkeit, mit der reaktive Substanzen übertragen werden, hemmt die Polarisierung von Elektroden und spielt eine wichtige Rolle bei der Produktion von Hydroxylradikalen, um die Behandlungseffizienz im Vergleich zur Oxidation mit einem einzelnen Elektrolyten zu verbessern.

Ein Beispiel für die älteste Industrie mit komplexen Prozessen und hohem Chemikalienverbrauch ist der Textilsektor. Aufgrund der ständig steigenden Nachfrage der Weltbevölkerung nach Kleidung und der Veränderungen in der Modebranche nimmt die Vielfalt und Anzahl der Kleidungsstücke weiter zu [153]. Dies kann zum wirtschaftlichen Nutzen der Bevölkerung beitragen, es wird jedoch häufig über negative Auswirkungen auf die Umwelt berichtet, insbesondere aufgrund der Einleitung von Abwässern [154]. Aufgrund der potenziellen Toxizität und der Risiken für die menschliche Gesundheit sind Textilabwässer ein Problem und müssen vor der Einleitung in die Wasserversorgung behandelt werden.

Bei der Behandlung von Textilabfällen werden meist konventionelle Verfahren angewendet, wie die Integration chemischer, biologischer oder physikalischer Methoden. Aluminiumsulfat, Eisensulfat und PAC (Polyaluminiumchlorid) werden im Allgemeinen als Koagulantien bei der Behandlung von Textilabwasser verwendet [155]. Diese Koagulantien agglomerieren leicht mit Schadstoffen und bilden winzige Partikel und Flockungsmittel im Abwasser. Flockungsmittel wiederum verbessern die Größe und Eigenschaften der Flocken, insbesondere ihre Stabilität [156]. Bei Farbstoffabwässern ist die Entfernung des COD (chemischer Sauerstoffbedarf) bei diesem Verfahren jedoch auf 10 % begrenzt, was zur Schlamm Bildung führen kann. Um die Behandlungsleistung zu verbessern, werden nach der Koagulation/Flockung normalerweise Belebtschlamm, bewegte Bioreaktoren (MBR) und Biofilter verwendet. Die Qualität der Abwässer entspricht jedoch oft nicht den erforderlichen Qualitätsstandards. Daher ist ein Veredelungsprozess (Sedimentation) erforderlich. Physikalische Verfahren wie Adsorption werden als mögliche Anwendung als Veredelungsverfahren beschrieben. Es hat jedoch eine relativ kurze Lebensdauer (weniger nachhaltig) und kann verbrauchtes Adsorbent als Nebenprodukt erzeugen. Die Integration chemischer, biologischer und physikalischer Prozesse erfordert im Allgemeinen mehr Platz, längere Verweilzeiten (1–4 Tage), höhere Betriebskosten und erfordert ein Schlammbehandlungs- und -entfernungssystem. Biologische Verfahren werden häufig als eigenständige Technologie oder in Kombination mit aeroben Verfahren eingesetzt. Aufgrund der großen Schlamm m m e n g e n, die bei chemischen Verfahren anfallen, ist ein integriertes System aus anaeroben und aeroben Verfahren eine Option geworden [153]. Die in diesem Verfahren erreichte Effizienz der Farbstoffentfernung ist jedoch relativ gering. Darüber hinaus sind ein hoher Ammoniumgehalt, Farbstoffe und nicht abbaubare CSBs charakteristisch für das Abwasser aus der Textilbedruckung. Als letzten Schritt zur Entfernung persistenter Schadstoffe, einschließlich Farbstoffe, und zur Verbesserung der Leistung biologischer Abwasserbehandlungsanlagen verwenden die meisten Textilindustrien ein Entfärbungsmittel (DCA) [157]. DCA ist ein kationisches organisches Polymer auf Basis von Dicyandiamid-Formaldehyd-Harz mit hoher Adsorptionseffizienz und Absetzbarkeit, der Fähigkeit, die elektrische Ladung der Partikeloberfläche zu neutralisieren, stabileren Flocken und der Fähigkeit, gelöste Farbstoffe wie Direkt-, Reaktiv-, Dispersions- und Säurefarbstoffe zu entfernen. Allerdings ist DCA aufgrund seiner hohen Kosten, seiner geringen Verfügbarkeit und der Notwendigkeit der Schlamm entsorgung oft nicht in jeder Situation die geeignete Lösung. Erwähnenswert ist auch die Tatsache, dass der in diesem Fall als Nebenprodukt entstehende Schlamm erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt haben und ein hohes Risiko für Mensch und Ökosystem darstellen kann.

Im letzten Jahrzehnt wurde intensiv an der Entfernung von Farbstoffen in modernen Oxidationsprozessen geforscht. Farbstoffe können durch Photokatalysatoren [159], Ozonierung, Fenton-Reagenz [160] und elektrokatalytische Prozesse [161] erzeugt werden. Die offensichtlichen Vorteile der photokatalytischen Oxidation sind der niedrige Temperatur- und Druckbedarf, die biologische Inertheit und Löslichkeit in Wasser, das weithin verfügbar, hoch photoaktiv, weniger toxisch und umweltfreundlich ist. Es verbleiben jedoch erhebliche Einschränkungen hinsichtlich des Anwendungspotenzials hinsichtlich der Morphologie und Kristallinität des TiO_2 -Katalysators, der Anforderungen an die Metalldotierung, der hohen Selektivität für den spezifischen Charakter von Schadstoffen und des engen Kontakts mit Lichtquellen.

Bei der elektrokatalytischen Oxidation, allgemein bekannt als EAOP (elektrochemischer fortgeschrittener Oxidationsprozess), wird elektrische Energie zum Abbau von Schadstoffen verwendet. Diese Prozesse basieren auf der Bildung von Hydroxylradikalen ($\text{OH}\cdot$) in situ, die die Schadstoffe bekanntermaßen nicht selektiv angreifen und oxidieren, bis die biologische Abbaubarkeit oder die vollständige Mineralisierung der Schadstoffe erreicht ist.

Abwasser. Seine hohe Leistungsfähigkeit bei der Farb- und CSB-Entfernung wurde bei der Färbung von Textilabwässern und beim Bedrucken von Textilabwässern berichtet [162]. Ein neues hybrides elektrochemisches Fenton-System und ein Reaktor werden als effektive Nachbehandlungsoption für Textilabwässer und viele andere Abwässer vorgeschlagen [10,163]. In Bezug auf die Farb-, CSB- und Ammoniumentfernung ist dieser Prozess hocheffektiv. Da sie billiger als TiPtIr und wirtschaftlicher als GDL- (Gasdiffusionsschicht-)Kohlenstoff [164] sind, wurden TiRuO₂-Netze und Graphit-Kohlenstoffstäbe als Elektroden verwendet.

Für die Anwendung im industriellen Bereich kann ein einzigartiges System mit einem zylindrischen Edelstahlreaktor mit Elektrodenpaaren (Maschenzylinder Ti/RuO₂/Anode und Graphit-Kohlenstoffstab-Kathode) zum Abbau der komplexen Schadstoffe in echtem Textilabwasser vorgeschlagen werden. Das interne Kreislaufsystem bietet erhebliche Vorteile für den Betrieb dieses Systems, z. B. erhöhte Volumenbelastungen von bis zu 400 %. Diese Methode kann eine vielversprechende Alternative für die Nachbehandlung von Textilabwasser sein, da Schadstoffe gleichzeitig durch Elektro-Fenton-Oxidation abgebaut wurden. In kurzer Zeit war die Entfernung von Farbstoffen, COD und Ammonium signifikant. Aufgrund des längeren Kontakts zwischen den erzeugten reaktiven Spezies und den Schadstoffen im Abwasser war das Kreislaufsystem vorteilhafter als das nicht zirkulierende System. Die Entfernungseffizienz von Schadstoffen, Farbstoffen und COD, der Oxidationsindex und die Betriebskosten haben diese Technik bestätigt und unterstützt.

Der Stromverbrauch betrug im Nicht-Umwälzsystem etwa 3 kWh/m³ bzw. 4.200 Rp./m³ und konnte im Umwälzsystem deutlich auf 1,1 kWh/m³ bzw. 1.540 Rp./m³ reduziert werden.

Ein System mit hohem Potential findet sich in der hybriden Fenton-Elektrochemie und es ist möglich, dieses durch einen Scale-up-Reaktor mit direkter Integration in eine bestehende anaerob-aerobe Textileinheit zu untersuchen [165].

Schließlich werden aufgrund der Vielfalt und Komplexität chemischer Wasserschadstoffe verschiedene Behandlungstechniken erforderlich sein, wie etwa biologische Sanierung, physikochemische Behandlung und elektrochemische Techniken wie elektrochemische/elektrokatalytische Reduktion, Oxidation und Elektrokoagulation. Die Anwendung der elektrokatalytischen Behandlung von kontaminiertem Wasser wird aufgrund der sinkenden Kosten für erneuerbare Energiequellen und der wachsenden Notwendigkeit, schädliche Substanzen in harmlose oder nützliche Verbindungen umzuwandeln, immer üblicher. Während die elektrokatalytische Reduktion Ströme mit oxidierten Spezies wie Nitrat und Nitrit behandeln kann, die durch Düngemittelabfluss entstehen, kann die elektrokatalytische Oxidation eine Vielzahl industrieller Abfallströme behandeln, darunter Textil- und Lebensmittelabwässer. Aufgrund dieser Vorteile und ihrer Eignung für kleine Maßstäbe eignen sich elektrokatalytische Prozesse perfekt für die dezentrale Wasseraufbereitung. Die Elektrokatalyse hat das Potenzial, einen nachhaltigen Einfluss auf die Umwandlung schädlicher Wasserschadstoffe in wertvolle oder harmlose Substanzen zu haben, da zunehmend billiger Strom aus erneuerbaren

2.6. Elektrosynthese

Die elektrochemische organische Synthese (oder Elektrosynthese) ist heute ein Instrument zur Synthese neuer Verbindungen mittels grüner Chemie [166]. Sie können bei Raumtemperatur und -druck funktionieren und erfordern im Wesentlichen keine Hilfschemikalien. Typischerweise beruht der Prozess der Elektrosynthese auf der Verwendung eines elektrochemischen Reaktors, der von einer Stromquelle gespeist wird [167].

Um eine hohe Effizienz der Elektrosynthese zu erreichen, sind zwei Parameter entscheidend. Erstens ist das Reaktordesign entscheidend für eine hohe Produktionsausbeute. Zweitens sind die Elektrodeneigenschaften (Material, Anzahl, Größe, Geometrie und Oberfläche) eine wesentliche Überlegung für die Menge der elektrisch erzeugten Verbindungen, da die Elektroden die Orte sind, an denen die elektrochemischen Reaktionen stattfinden [168].

Alternativ bietet die Verwendung von elektrischem Strom durch eine Reaktion zur Aktivierung organischer Moleküle durch Zugabe oder Entfernung von Elektronen mehrere Vorteile, wie die Einfachheit und hohe Selektivität der Reaktionen und die Verfügbarkeit der synthetischen Materialien (niedrige Kosten, einfache Anwendung, keine Nadeln für eine Trennmethode usw.). Darüber hinaus kann die Elektrosynthese modular und skalierbar sein, was Flexibilität bei der Produktionskapazität ermöglicht [169]. Es wurden Elektrooxidations- und Elektrosynthesemethoden für die selektive Funktionalisierung organischer Moleküle entwickelt, darunter CH-Aktivierung, CC-Bindung

Bildung und asymmetrische Synthese. Dieses Feld ist in vielen wichtigen industriellen Prozessen wichtig, wie etwa bei der Chlorerzeugung [170], der Aluminiumherstellung [171], der Produktion von dekarbonisierten stickstoffbasierten Düngemitteln [172], der Arzneimittelsynthese [173] und vielen anderen [174].

Dieser Teil zeigt einige Beispiele, die sich mit der Synthese neuer organischer Moleküle auf elektrochemischem Wege befassen. Das erste Beispiel konzentriert sich auf die Synthese von Stickstoffdüngern (NBFs) durch elektrochemische Methoden. Die Synthese von NBFs wie Ammoniak und Harnstoff wurde erfolgreich unter Verwendung von Abfallverbindungen wie Kohlendioxid und Nitraten durchgeführt [175]. Die Arbeit konzentrierte sich weitgehend auf das Verständnis der katalytisch aktiven Stellen für die Harnstoffelektrosynthese. Tatsächlich wurde eine Selektivität und Aktivitätsabhängigkeit von der relativen Zusammensetzung des Kupfer- und Zinkoxidkatalysators festgestellt und einem synergetischen elektronischen Effekt zugeschrieben. Andererseits wurden amorphe Nanomaterialien als Katalysatoren verwendet, wobei die Reaktion eine elektrochemische Synthese von N-haltigen Verbindungen aus einer Vielzahl reichlich vorhandener N-haltiger kleiner Moleküle (N_2 , NO, NO_3^- usw. . .) beinhaltete. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Materialien die CN-Kopplungsbindung vereinfachen (aufbrechen) können, was zur Synthese von Harnstoff führt [176].

In der Praxis wurde die Herstellung dekarbonisierter stickstoffbasierter Düngemittel (NBFs) von CASFER Technologies durch die Zusammenführung von Nanotechnologie und Elektrochemie entwickelt. Tatsächlich gelang es ihnen, aus Abfallströmen präzise, kommerziell nutzbare NBFs zu entwickeln. Sie verwendeten einen organisch-synthetischen Ansatz (OSA) zur Herstellung von NBFs, deren Inhaltsstoffe vorhersehbar und zuverlässig waren und das Pflanzenwachstum stimulieren sollten [177].

Darüber hinaus ist die Chlor-Alkali-Elektrolyse einer der ältesten und am häufigsten angewandten Prozesse und hat die bedeutendsten Anwendungen der Elektrochemie in der Industrie. Bei diesem Prozess werden Chlor und Natriumhydroxid (NaOH) hergestellt, die in der Industrie als Grundchemikalien benötigt werden. Dabei wurde die Elektrolyse als umweltfreundliche Methode für den Molekültransfer identifiziert. Die Elektronen in diesen elektrochemischen Reaktionen sind abfallfrei, wenn sie durch Sonnenenergie und Wind erzeugt werden.

Die Bedeutung der Elektrosynthese wurde auch für die nachhaltige Funktionalisierung von Molekülen genutzt, wobei der Einsatz toxischer Reagenzien und Nebenprodukte minimiert wurde. Dies wird durch Alkylfunktionalisierung, stereoselektive heterozyklische Synthese und Carboxylierungsreaktion erreicht [178].

Darüber hinaus wurde in einer aktuellen Studie von Talebi und Mitarbeitern die elektrochemische Synthese von Sulfonamid-Derivaten beschrieben, die zu den weltweit am häufigsten verwendeten Antibiotika zählen [179]. Die Bedingungen und Reaktionswege der Elektrosynthese wurden untersucht. Die optimalen Werte der Betriebsparameter (pH-Wert, Lösungsmittel, Elektroden usw.) wurden ermittelt. Durch Optimierung der Bedingungen war die kinetische und thermodynamische Kontrolle der Reaktion mithilfe des Elektrodenpotentials vielversprechend (Abbildung 6). Tatsächlich konnte mit dieser Methode die Selektivität zur Oxidation oder Reduktion einer bestimmten Verbindung nachgewiesen werden, wodurch die Oxidation /Reduktion von Zwischenprodukten verhindert wurde. Diese elektrochemische Methode zur Synthese von Sulfonamiden hat gegenüber klassischen Methoden viele Vorteile: –

Sie ermöglicht die Verwendung umweltfreundlicher Oxidationsmittel, wodurch die Verwendung toxischer Verbindungen/Lösungsmittel reduziert und

Umweltrisiken vermieden werden; – Sie nutzt Elektrifizierung als Energiequelle, wodurch die Menge und die Kosten der verbrauchten

Energie gesenkt werden; – Sie vermeidet die Verwendung

zusätzlicher Katalysatoren; – Sie nutzt einen weniger komplizierten Aufbau aufgrund der Einfachheit des technischen Verfah

Wasserstoffperoxid (H_2O_2) kann auch elektrochemisch synthetisiert werden. Tatsächlich wird die Elektrosynthese von H_2O_2 durch die kathodische Zweielektronen- Sauerstoffreduktionsreaktion (ORR) durchgeführt. Diese Reaktion läuft typischerweise unter alkalischen Bedingungen ab und erfordert einen geeigneten Katalysator, um die Effizienz des Prozesses zu steigern. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Katalysatoren untersucht, darunter Metallkomplexe und Metalloxide. Einige Studien zeigen die Bedeutung eines Elektrokatalysators auf Basis eines freien Fe-Motivs für die Wasserstoffperoxidsynthese [180]. Diese Verwendung von isoliertem Fe führte zu hoher Aktivität, Selektivität und Stabilität aufgrund der hohen Bindungsenergie mit den Zwischenprodukten beim Aufbrechen der Peroxylbindung zu H_2O [181].

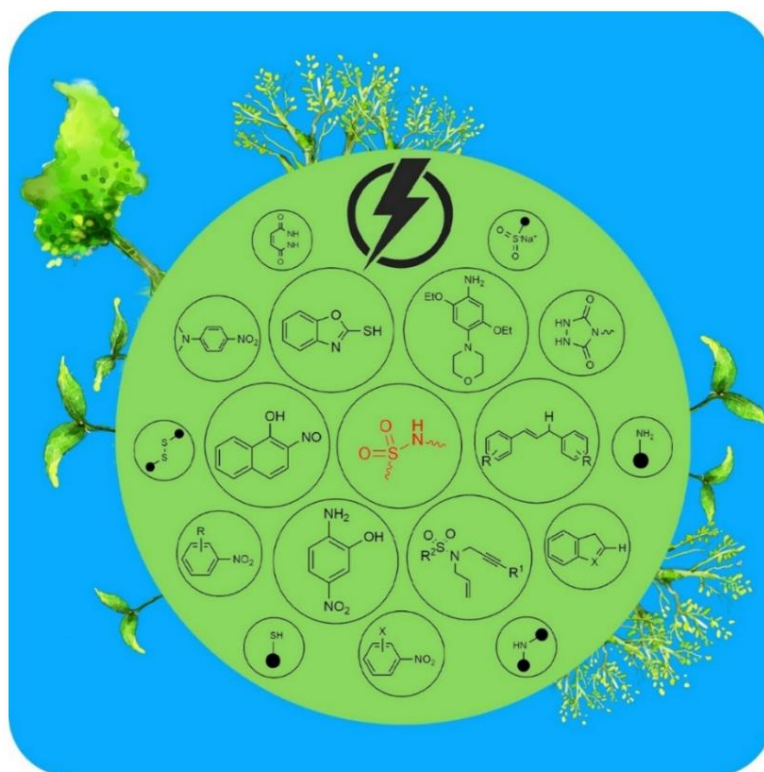


Abbildung 6. Elektrochemische Synthese von Sulfonamid-Derivaten durch elektrochemischen Weg (Creative Commons CC by-Lizenz) [179].

Wasserstoffperoxid (H_2O_2) kann auch elektrochemisch synthetisiert werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die elektrochemische Synthese nur ein vielversprechender Weg ist, um die katalytische Zwei-Elektronen ($2e^-$) Sauerstoffproduktionsreaktion (ORR) für die Elektrosynthese durch. Vermeiden Sie die Nachteile in Bezug auf den hohen Energieverbrauch und die große Menge an Thesen von H_2O_2 . Diese Reaktion findet typischerweise unter alkalischen Bedingungen statt und erfordert eine geeignete Verschmutzung, die durch die klassische Methode der chemischen Synthese entsteht.

geeigneter Katalysator, um die Effizienz des Prozesses zu erhöhen. Verschiedene Katalysatoren, einschließlich Metallkomplexe und Metalloxide wurden zu diesem Zweck untersucht. Einige Studien zeigen die Bedeutung eines freien Fe-

2.7. Elektrochemischer Schutz

Motiv, basierend auf Elektrolytstruktur für die Wasserstoffperoxidsynthese. Metallstrukturen, die aggressiven Umgebungen (feucht, korrosive, Meeresumwelt usw.) ausgesetzt sind, erfordern eine kontinuierliche vorbeugende Wartung, um eine langfristige und sichere Nutzung zu gewährleisten.

Korrosion wird durch Zwischenprodukte und die Peroxidbindung in H_2O_2 aufzuheben [181]. Betrieb [182].

Untersee. In diesem Teil werden wir den elektrochemischen Korrosionsschutz von Metallen besprechen, um zu verhindern Korrosion an Offshore-Gasplattformen und Unterwasser-Metallrohrleitungen [183,184].

Der elektrochemische Korrosionsschutz von Metallen ist die am besten geeignete Methode und umfasst anodischen und kathodischen Schutz. Beide Methoden basieren auf der Manipulation der elektrochemischen Reaktionen an der Metalloberfläche, um Korrosion zu verhindern und die Lebensdauer zu verlängern von Stahlkonstruktionen in rauen Meeresumgebungen [185].

Das anodische Schutzsystem (AP) hält die Oberfläche in einem aktiv oxidierenden Zustand. Bei dieser Methode wird ein äußerer elektrischer Strom an das Metall angelegt, wodurch es ist die Anode in einer elektrochemischen Zelle, die die Oberfläche zu einem positiveren polarisiert und somit Korrosionsreaktionen hemmen und verhindern [186,187]. Ein anderer Weg Diese Methode wird durch die Anbringung von Opferanoden aus reaktiveren Metallen angewendet. mit höheren elektrischen Potentials, wie etwa Zink oder Magnesium, an die Metallstruktur an. Die Opferanoden korrodieren bevorzugt und schützen die Struktur vor Korrosion durch sich selbst zu opfern. In einigen Systemen können beide Wege zur Maximierung des Schutzniveaus genutzt werden zusammen verwendet [188].

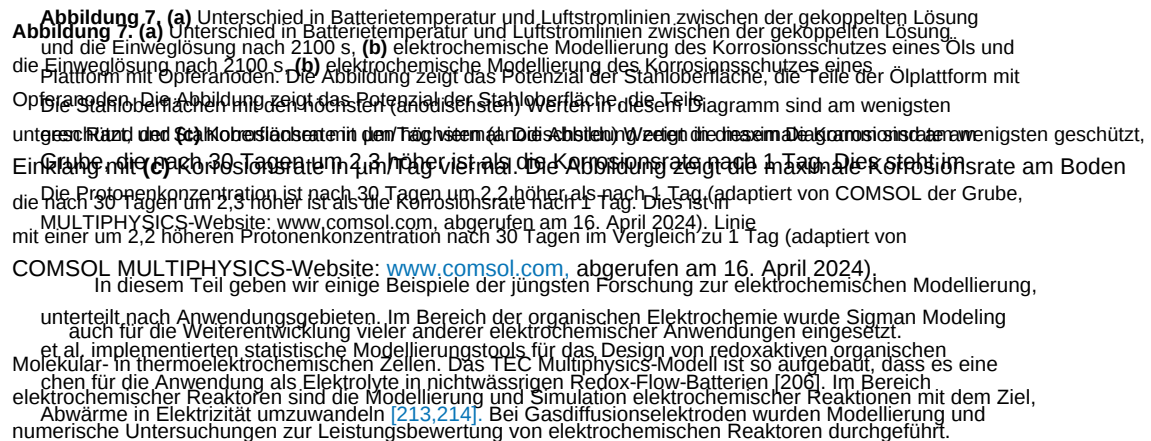
Die kathodischen Schutzsysteme (CP) sind eine weitere wichtige Methode zur Reduzierung oder Verhinderung die Korrosion von Metallstrukturen durch Absenkung des Metallpotentials mittels kathodischem Strom von einem anodischen System geliefert [189,190]. Zwei Haupttypen von CP-Systemen sind weit verbreitet: Opferanoden-Kathodenschutz (SACP) und Fremdstrom-Kathodenschutz (ICCP). Der Opferanoden-Kathodenschutz (SACP) wird vor allem bei kleineren Offshore-Anlagen eingesetzt.

Strukturen oder Standorte mit geringer bis mäßiger Korrosionsrate. Bei SACP-Systemen wird die zu schützende Struktur zur Kathode einer elektrochemischen Zelle, während Opferanoden aus reaktiveren Metallen wie Zink oder Aluminium an den Stahlmonopiles angebracht sind [191]. Diese Opferanoden korrodieren bevorzugt und opfern sich praktisch selbst, um die Stahlstruktur zu schützen, indem sie eine Elektronenquelle darstellen, die die Oxidation des Stahls unterdrückt. Daher müssen die Opferanoden regelmäßig ausgetauscht werden, da sie im Laufe der Zeit verbraucht sind. ICCP-Systeme werden jedoch in größeren Offshore-Strukturen oder in Gebieten mit hoher Korrosionsrate eingesetzt. Dabei werden inerte Anoden aus gemischten Metalloxiden oder platinisiertem Titan an eine externe Stromquelle angeschlossen [192]. Diese Stromquelle legt einen kontrollierten elektrischen Strom an die Stahlstruktur an und erzeugt so ein schützendes kathodisches Potenzial, das Korrosion unterdrückt [193]. ICCP-Systeme bieten eine präzise Kontrolle über den kathodischen Schutzprozess.

2.8. Werkzeuge für die elektrochemische

Modellierung Der Bereich der elektrochemischen Modellierung hat durch Verbesserungen bei Rechentechiken, Softwarewerkzeugen und Methoden kontinuierliche Fortschritte erfahren. Beispiele hierfür sind COMSOL MULTIPHYSICS [194], MATLAB mit Simulink [195], Battery Design Studio [196], Canton, DigiElch [197,198], Python [199] und andere. Diese Fortschritte sind entscheidend für die Entwicklung von Batterien, Sensoren und Biosensoren, Brennstoffzellen und vielen anderen elektrochemischen Anwendungen [200]. In den letzten Jahren hat die elektrochemische Modellierung eine zunehmende Nachfrage gezeigt und ist zu einem leistungsstarken Werkzeug für Forscher und Wissenschaftler geworden. Tatsächlich ermöglicht es ein Verständnis komplexer Systeme und hilft bei der Vorhersage und Optimierung elektrochemischer Geräte unter verschiedenen Bedingungen, wodurch die Studienzeit und die Kosten reduziert werden (Abbildung 7). Darüber hinaus ermöglicht die elektrochemische Modellierung das virtuelle Prototyping von Geräten und Systemen, sodass Ingenieure die Leistung simulieren, potenzielle Probleme beheben und Designs vor der physischen Herstellung iterieren können [201,202]. Um Tierversuche zu reduzieren, ist es seit kurzem verpflichtend, (bio)medizinische Geräte (einschließlich bioelektrochemischer Geräte) zu modellieren, um die Zulassung der Food and Drug Administration (FDA) zu erhalten, was noch einmal die Bedeutung der elektrochemischen Modellierung unterstreicht [203–205].

In diesem Teil geben wir einige Beispiele aus der jüngsten Forschung zur elektrochemischen Modellierung, unterteilt nach Anwendungsgebieten. Im Bereich der organischen Elektrochemie implementierten Sigman et al. statistische Modellierungstools für das Design redoxaktiver organischer Moleküle zur Anwendung als Elektrolyte in nichtwässrigen Redox-Flow-Batterien [206]. Im Bereich der elektrochemischen Reaktoren waren Modellierung und Simulation elektrochemischer Reaktoren (ECRs) mit Techniken der numerischen Strömungsdynamik (CFD) aufgrund ihrer wichtigsten Anwendungsgebiete von entscheidender Bedeutung: Elektrosynthese von Chemikalien und Medikamenten, elektrolytische Gewinnung von Metallen, Chlor-Alkali, Redox-Flow-Batterien, Wasseraufbereitung und Brennstoffzellen [207]. Im Bereich der Nanoeinschließung untersuchten Long et al. drei nanoelektrochemische Techniken mit Modellierung zur Untersuchung der Mehrphasenchemie unter Nanoeinschließung: stochastische Kollisionselektrochemie, Elektrochemie einzelner Nanotröpfchen und Nanoporen-Elektrochemie [208]. Im Bereich der Wasserstoffproduktion mit einem Protonenaustauschmembran-Elektrolyseur (PEM) wurde ein Modellierungstool verwendet, das auf der Software für numerische Strömungsmechanik (CFD) ANSYS/Fluent basiert [209]. Im Bereich der Brennstoffzellen, die eine vielversprechende Quelle sauberer Energie darstellen, wurde COMSOL Multiphysics verwendet, um eine Reihe physikalischer Phänomene zu integrieren und so die Leistung von Festoxidbrennstoffzellen (SOFCs) zu simulieren [210]. In einer anderen Studie wurde eine numerische Simulation eines dreidimensionalen Modells mit einem einzigen Strömungskanal erstellt. Sie liefert eine wissenschaftliche Grundlage für die Steuerungsstrategie und das strukturelle Design von SOFCs [211]. Im Bereich der Batterien zeigt eine Studie, wie die aktuelle Implementierung des Doyle-Modells in COMSOL in Elektroden von Lithium-Ionen-Batterien die elektrochemische Dynamik dieser Batterien verbessern kann [212].



Bedeutung aufgrund ihrer Hauptanwendungen: Elektrosynthese von Chemikalien und Medikamenten
elektrochemische Reduktion von Kohlendioxid zu Methanol. Ein Modell wurde erstellt, um die Rolle von Cu₂O- /
ZnO-basierten Gasdiffusionselektroden bei der Verbesserung der Reduktion zu untersuchen.

[207]. Auf dem Gebiet der Nanokonfinierung untersuchten Long et al. drei nanoelektrochemische Technologien, die die Umwandlung von Kohlendioxid in Methanol in einer elektrochemischen Zelle ermöglichen. Das Modell wurde simuliert. Die Ergebnisse wurden mit der Software COMSOL Multiphysics entwickelt und anhand der experimentellen Ergebnisse validiert. [215].

Ergebnisse validiert [215].
 Chronastische Kollisionselektrochemie, Einzelnanotöpfchenelektrochemie und Nanoporen In der elektrochemischen Bearbeitung (ECM) wird die COMSOL Multiphysics-Software verwendet, um Elektrochemie [208]. Im Bereich der Wasserstoffproduktion mittels Protonenaustausch gibt es viele Parameter [216].

Die Bedeutung der Elektrochemie in verschiedenen wissenschaftlichen und technologischen Bereichen hat dazu geführt, **ihre Aufnahme in Lehrpläne. Die Einbeziehung der Elektrochemie in die Ausbildung** hat sich weiterentwickelt und ist interdisziplinärer geworden und an aktuelle wissenschaftliche und technologische Fortschritte angepasst. Hier sind zwei Beispiele aus den Bereichen Elektrochemie und Bildung.

Potentiostaten sind für die Forschung und Entwicklung in der Elektrochemie von entscheidender Bedeutung, aber ihre Kosten sind der Hauptnachteil ihres massiven Einsatzes. Mit dem Ziel, eine erschwingliche Alternative zu bieten,

Um für ressourcenbeschränkte Gemeinschaften attraktiv zu sein, wurde eine kostengünstige, tragbare elektrochemische Workstation, die einen Open-Source-Potentiostat auf Arduino-Basis und eine Smartphone-Anwendung integriert, in die Lehre und Forschung für Graduierte übernommen. Sie kann die am häufigsten verwendeten elektrochemischen Techniken der zyklischen und linearen Voltammetrie und Chronoamperometrie durchführen.

Andererseits ist Elektrochemie aufgrund ihrer abstrakten Konzepte, die makroskopische, mikroskopische und symbolische Darstellungsebenen umfassen, schwer zu erlernen. Studien haben gezeigt, dass Studenten ihr Verständnis der Chemie durch interaktive Computeranimation und Simulation visualisieren und verbessern können. Diese Studie berichtet über die Wirkung des interaktiven Computeranimations- und Simulationsmoduls „Interactive Electrolysis of Aqueous Solution“ (IEAS), das entwickelt wurde, um Studenten das Erlernen der Elektrolyse zu erleichtern [218]. Daher kann der Schluss gezogen werden, dass IEAS das Verständnis der Studenten für das Elektrolysekonzept verbessert und die Studenten motivierter sind, Elektrochemie zu lernen.

Schließlich ist das praktische Experimentieren mit elektrochemischen Zellen, Elektroden, Elektrolyten und Messgeräten nach wie vor die beste Wahl, um Schülern praktische Erfahrung zu vermitteln und theoretische Konzepte zu festigen. Heutzutage gibt es viele Hersteller, die akademische Einrichtungen mit „Lehrpaketen“ beliefern. Diese enthalten Elektroden, Elektrolyte und Unterrichtsmaterialien, sodass Lehrer die Elektrochemie leichter in ihren Lehrplan integrieren können (Informationen zu den Unternehmen, die diese Pakete liefern, finden Sie im Unterabschnitt). Diese Pakete enthalten häufig Experimente mit klaren Verfahren, die die Integration des angewandten Elektrochemieunterrichts in das Bildungssystem erleichtern. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass es in der MENA-Region trotz des vielfältigen akademischen Angebots an Einrichtungen mangelt, die Hochschulprogramme in Elektrochemie anbieten. Dieses Defizit ist besonders besorgniserregend, da in zahlreichen Sektoren des Arbeitsmarktes die Nachfrage nach Fachkräften mit elektrochemischem Wissen steigt. Da die Industrie die Bedeutung der Elektrochemie in verschiedenen Anwendungen zunehmend erkennt, unterstreicht das Fehlen relevanter Ausbildungsmöglichkeiten eine kritische Lücke, die geschlossen werden muss. In den kommenden Jahren wird die Integration elektrochemischer Fachkenntnisse in die Lehrpläne der gesamten Region unabdingbar sein, um den sich entwickelnden Anforderungen des Arbeitsmarktes gerecht zu werden und Innovation und Wachstum in Schlüsselsektoren zu fördern.

2.10. Elektrochemische Unternehmen

Weltweit gibt es zahlreiche Unternehmen der Elektrochemie. Wir stellen einige von ihnen nach Standorten vor.

Europas elektrochemische Industrie zeichnet sich durch ihren Fokus auf Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft aus und investiert erheblich in saubere Energie, Batterietechnologie und Recyclingprozesse. Zu den wichtigsten Akteuren und Initiativen zählen Northvolt (Stockholm, Schweden), Umicore (Brüssel, Belgien), BASF (Ludwigshafen, Deutschland), ITM Power (Sheffield, Vereinigtes Königreich), SOLVAY (Brüssel, Belgien) usw. Der elektrochemische Sektor in den USA ist vielfältig und legt großen Wert auf Innovation und Technologieentwicklung, insbesondere in den Bereichen Batterien und Speicherlösungen für erneuerbare Energien. Einige wichtige Akteure und Schwerpunktbereiche sind Tesla Inc. (Texas, USA), 3M (Maplewood, USA), Dow Chemical Company (Michigan, USA), General Electric (Boston, USA), Albemarle Corporation (North Carolina, USA) usw. Die Beteiligung der MENA-Region am elektrochemischen Sektor wächst, insbesondere bei erneuerbaren Energien und verwandten Technologien wie der Produktion von grünem Wasserstoff. Einige wichtige Akteure sind ACWA Power (Riad, Saudi-Arabien), MASDAR (Abu Dhabi, Vereinigte Arabische Emirate), SABIC (Riad, Saudi-Arabien), OQ (Maskat, Oman) usw.

Auf der anderen Seite gibt es mehrere Unternehmen, die Instrumente und Zubehör für elektrochemische Experimente anbieten, wie Mini- und Standard-Potentiostaten (Ein- oder Mehrkanalgeräte und tragbare Geräte), Elektroden (klassische, rotierende Scheibenelektroden, Siebdruck ...), elektrochemische Zellen, Lehrkits usw. Die wichtigsten Akteure sind Metrohm (Herisau, Schweiz), Bio-Logic Sciences Instruments (Seyssinet-Pariset, Frankreich), PalmSens (Houten, Niederlande), Solartron (Bognor Regis, Großbritannien), Hanna Instruments (Smithfield, VA, USA), Gamry Instruments (Warminster, PA, USA), Sciospec

(Bennewitz, Deutschland), Princeton Applied Research (Bognor Regis, Großbritannien), PINE RESEARCH (Durham, NC, USA), Texas Instruments (Dallas, TX, USA), Kanoplytech (Uttar Pradesh, Indien), Ivium Technologies (Eindhoven, Niederlande), Correst Instruments (Wuhan, China), Xiamen Tob New Energy Technology (Xiamen City, China), Phadke Instruments (Mumbai, Indien) usw. (Abbildung 8). Diese Liste ist nicht vollständig und spiegelt eine Momentaufnahme einer sich schnell entwickelnden Fortschrittsbereich (die Webseiten der Anbieter sind in Tabelle 2 aufgeführt).

Tabelle 2. Websites von Anbietern elektrochemischer Instrumente und Zubehör.

Anbieterliste für elektrochemische Instrumente und Zubehör	Website des Anbieters
Metrohm	www.metrohm.com , abgerufen am 16. Mai 2024
Instrumente von Bio-Logic Sciences	www.biologic.net , abgerufen am 16. Mai 2024
PalmSens	www.palmsens.com , abgerufen am 16. Mai 2024
Solartron	www.solartronmetrology.com , abgerufen am 16. Mai 2024
Hanna Instruments	www.hannainst.com , abgerufen am 16. Mai 2024
Gamry-Instrumente	www.gamry.com , abgerufen am 16. Mai 2024
Sciospec	www.sciospec.com , abgerufen am 16. Mai 2024
Princeton Angewandte Forschung	www.ameteki.com , abgerufen am 16. Mai 2024
Kiefernforschung	www.pineresearch.com , abgerufen am 16. Mai 2024
Texas Instruments	www.ti.com , abgerufen am 16. Mai 2024
Kanoplytech	www.kanoplytech.com , abgerufen am 16. Mai 2024
Ivium Technologies	www.ivium.com , abgerufen am 16. Mai 2024
Korrekte Instrumente	www.correst.com.cn , abgerufen am 16. Mai 2024
Ivium Technologies	www.ivium.com , abgerufen am 16. Mai 2024
Xiamen Tob New Energy Technology	www.tobmachine.com , abgerufen am 16. Mai 2024
Korrekte Instrumente	www.phadkeinstruments.com , abgerufen am 16. Mai 2024
Xiamen Tob Neue Energiemaschinen	www.tobmachine.com , abgerufen am 16. Mai 2024
Phadke-Instrumente	www.phadkeinstruments.com , abgerufen am 16. Mai 2024

Vor kurzem Electrochemistry Consulting and Services (E2CS) (Tripolis, Libanon) als neues und aufstrebendes Unternehmen in der MENA-Region gegründet, das Beratung anbietet und technische Unterstützung für eine breite Palette von Kunden im Bereich der angewandten Elektrochemie, darunter auch in der Bereich der erneuerbaren Energie, Umwelt und Fertigung. Schließliche Elektrochemische Industrie ein rasantes Wachstum, angetrieben durch wie Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft, Energiespeicherung, Elektrifizierung des Verkehrs und Innovation in der Materialwissenschaft. Die Zukunft der elektrochemischen Unternehmen Innovationen abhängen von der Fähigkeit, sich an die sich verändernde Marktdynamik anpassen und aufkommende Herausforderungen effektiv angehen.



Abbildung 8. Hauptlieferanten von elektrochemischen Instrumenten und Zubehör weltweit.

3. Schlussfolgerungen

Die angewandte Elektrochemie spielt eine wichtige Rolle bei der Weiterentwicklung der Technologie, der Förderung der Nachhaltigkeit und der Bewältigung gesellschaftlicher Herausforderungen in verschiedenen Bereichen. Ihre vielseitigen Effizienz und Zuverlässigkeit machen es zu einem unverzichtbaren Werkzeug für Innovation, Fortschritt und Problemlösung in der modernen Welt. In den nächsten Jahren wird erwartet, dass El

3. Schlussfolgerungen

Angewandte Elektrochemie spielt eine wichtige Rolle bei der Weiterentwicklung der Technologie, der Förderung der Nachhaltigkeit und der Bewältigung gesellschaftlicher Herausforderungen in verschiedenen Bereichen. Ihre Vielseitigkeit, Effizienz und Zuverlässigkeit machen sie zu einem unverzichtbaren Werkzeug für Innovation, Fortschritt und Problemlösung in der modernen Welt. Es wird erwartet, dass die Elektrochemie in den nächsten Jahren in vielen Sektoren eine feste Position einnehmen und für viele Forscher zu einer Referenzwissenschaft werden wird. Dies erfordert besondere Aufmerksamkeit bei der Integration elektrochemischer Fachkenntnisse in Lehrpläne weltweit, um den sich entwickelnden Anforderungen des Arbeitsmarktes gerecht zu werden und Innovation und Wachstum in Schlüsselsektoren zu fördern. Andererseits sieht die Zukunft der Elektrochemieunternehmen vielversprechend aus; Unternehmen sollten sich jedoch an die Marktveränderungen anpassen und aufkommende Herausforderungen effektiv angehen, um die Entwicklung der elektrochemischen Technologie zu verfolgen.

Finanzierung: Diese Forschung erhielt keine externe Finanzierung.

Interessenkonflikte: Autor Ayman Chmayssem ist Gründer des Unternehmens Electrochemistry Consulting & Services (E2CS). Die übrigen Autoren erklären, dass die Forschung ohne kommerzielle oder finanzielle Beziehungen durchgeführt wurde, die als potenzieller Interessenkonflikt ausgelegt werden könnten.

Verweise

- Singh, V.G. Angewandte Elektrochemie; Nova Science Publisher Inc.: New York, NY, USA, 2010. [\[CrossRef\]](#)
- Wragg, A.A. Journal of Applied Electrochemistry; Springer Nature: Berlin, Deutschland, 2009; Band 39, S. 467. [\[CrossRef\]](#)
- Bevan, K.H.; Foong, Y.W.; Shirani, J.; Yuan, S.; Abi Farraj, S. Angewandte Physik in der Elektrochemie: Tunnelreaktionen. J. Appl. 2021, 129, 090901. [\[CrossRef\]](#)
- Duan, J.; Tang, X.; Dai, H.; Yang, Y.; Wu, W.; Wei, X.; Huang, Y. Bau sicherer Lithium-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge: Ein Überblick. Elektrochem. Energy Rev. 2020, 3, 1–42. [\[CrossRef\]](#)
- Brinkert, K.; Mandin, P. Grundlagen und zukünftige Anwendungen der elektrochemischen Energieumwandlung im Weltraum. npj Microgravity 2022, 8, 52. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Santoro, C.; Arbizzani, C.; Erable, B.; Ieropoulos, I. Mikrobielle Brennstoffzellen: Von den Grundlagen zu Anwendungen. Eine Übersicht. J. Power Quellen 2017, 356, 225–244. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Sazali, N.; Salleh, W.N.W.; Jamaludin, A.S.; Razali, M.N.M. Neue Perspektiven der Brennstoffzellentechnologie: Ein kurzer Überblick. Membranes 2020, 10, 99. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Esposito, D.V. Membranlose Elektrolyseure für die kostengünstige Wasserstoffproduktion in einer Zukunft mit erneuerbaren Energien. Joule 2017, 1, 651–658. [\[CrossRef\]](#)
- Abbasi, R.; Setzler, B.P.; Lin, S.; Wang, J.; Zhao, Y.; Xu, H.; Pivovarov, B.; Tian, B.; Chen, X.; Wu, G.; et al. Ein Fahrplan für kostengünstigen Wasserstoff mit Hydroxid-Austauschmembran-Elektrolyseuren. Adv. Mater. 2019, 31, e1805876. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Chmayssem, A.; Taha, S.; Hauchard, D. Hochskalierter elektrochemischer Reaktor mit einer dreidimensionalen Festbett Kathode für das Elektro-Fenton-Verfahren: Anwendung zur Behandlung von Bisphenol A. Electrochim. Acta 2017, 225, 435–442. [\[CrossRef\]](#)
- Yu, Y.; Zhong, Y.; Sun, W.; Xie, J.; Wang, M.; Guo, Z. Ein neuartiger Elektrokoagulationsprozess mit Zentrifugalelektroden zur Abwasserbehandlung: Elektrochemisches Verhalten der Anode und Kinetik der Schwermetallentfernung. Chemosphere 2023, 310, 136862. [\[Querverweis\]](#)
- Tran, T.K.; Chiu, K.F.; Lin, C.Y.; Leu, H.J. Elektrochemische Abwasserbehandlung: Selektivität der Schwermetallentfernung Prozess. Int. J. Hydrogen Energy 2017, 42, 27741–27748. [\[CrossRef\]](#)
- Shrestha, R.; Ban, S.; Devkota, S.; Sharma, S.; Joshi, R.; Tiwari, A.P.; Kim, H.Y.; Joshi, M.K. Technologische Trends bei Schwermetallen Entfernung aus Industrieabwasser: Eine Übersicht. J. Environ. Chem. Eng. 2021, 9, 105688. [\[CrossRef\]](#)
- Yue, H.; Xue, L.; Chen, F. Effiziente elektrochemische Entfernung von Nitritverunreinigungen mit stabilen RuO₂-TiO₂/Ti-Elektroden. Appl. Catal. B 2017, 206, 683–691. [\[CrossRef\]](#)
- Dao, K.C.; Yang, C.C.; Chen, K.F.; Tsai, Y.P. Aktuelle Trends bei der Entfernung von Arzneimitteln und Körperpflegeprodukten durch Elektrochemische Oxidation und kombinierte Systeme. Water 2020, 12, 1043. [\[CrossRef\]](#)
- Bhat, R.S.; Shetty, S.M.; Kumar, N.A. Galvanisierung einer Zn-Ni-Legierungsbeschichtung auf Weichstahl und ihre elektrochemischen Untersuchungen. J. Mater. Eng. Perform. 2021, 30, 8188–8195. [\[CrossRef\]](#)
- Zhang, H.; Zhang, N.; Gilchrist, M.; Fang, F. Fortschritte in der Präzisions-Mikro-/Nano-Elektroformung: Ein Überblick über den neuesten Stand der Technik. J. Mikromech. Mikroeng. 2020, 30, 103002. [\[CrossRef\]](#)
- Xu, Z.; Wang, Y. Elektrochemische Bearbeitung komplexer Komponenten von Flugzeugtriebwerken: Entwicklungen, Trends und technologische Fortschritte. Chin. J. Aeronaut. 2019, 34, 28–53. [\[CrossRef\]](#)
- Zhang, Y.; Lan, J.; Xu, Y.; Yan, Y.; Liu, W.; Liu, X.; Gu, S.; Zhou, J.; Wang, M. Ultrafeine PtCo-Legierung durch Pyrolyse-Ätzen-Eingeschränkt Pyrolyse zur verstärkten Wasserstoffentwicklung. J. Colloid. Interface Sci. 2024, 660, 997–1009. [\[CrossRef\]](#)

20. Zhan, Y.; Zhang, G.; Shen, J.; Zhou, B.; Zhao, C.; Guo, J.; Wen, M.; Tan, Z.; Zheng, L.; Lu, J.; et al. Einfache elektrochemische Oberflächenlegierung und Ätzung von Au-Drähten zur Ermöglichung von Hochleistungssubstraten für oberflächenverstärkte Raman-Streuung. *Nano Mater. Sci.* **2023**. [\[CrossRef\]](#)
21. René, A.; Abasq, ML; Hauchard, D.; Hapiot, P. Wie reagieren Phenolverbindungen auf Superoxidionen? Eine einfache elektrochemische Methode zur Bewertung der antioxidativen Kapazität. *Anal. Chem.* **2010**, *82*, 8703–8710. [\[CrossRef\]](#)
22. Keyrouz, R.; Abasq, ML; Le Bourvellec, C.; Blanc, N.; Audibert, L.; Argall, E.; Hauchard, D. Gesamtphenolgehalt, Radikalfänger und zyklische Voltammetrie von Meeresalgen aus der Bretagne. *Food Chem.* **2011**, *126*, 831–836. [\[CrossRef\]](#)
23. Chmayssem, A.; Verplanck, N.; Boizot, F.; Alessio, M.; Santos, L.; Mourier, V.; Vignoud, S.; Navarro, F.; Mailley, P. Mikrofluidische Plattform elektrochemischer Biosensoren für Organ-on-Chip-Anwendungen. In Proceedings of the MicroTAS 2021—25. Internationale Konferenz über miniaturisierte Systeme für Chemie und Biowissenschaften, Palm Springs, CA, USA, 10.–14. Oktober 2021.
24. Chmayssem, A.; Hauchard, D. Neue Nachweismethode für Alkylphenolsuren in Wasser basierend auf einem integrierten elektrochemischen Zellsensor. *Rev. Sci. l'Eau* **2015**, *28*, 35–40. [\[CrossRef\]](#)
25. Hauchard, D.; Cassir, M.; Chivot, J.; Baudry, D.; Ephritikhine, M. Elektrochemische Untersuchung von Uran(IV)- und (III)-organometallischen Verbindungen in Tetrahydrofuran mittels konventioneller Mikroelektroden und Ultramikroelektroden. Teil II. Anwendung auf Borhydridverbindungen – Untersuchung der Stabilität von CP2U(BH4)2. *J. Electroanal. Chem.* **1993**, *347*, 399–407. [\[CrossRef\]](#)
26. Terbouche, A.; Lameche, S.; Ait-Ramdane-Terbouche, C.; Guerniche, D.; Lerari, D.; Bachari, K.; Hauchard, D. Ein neuer elektrochemischer Sensor basierend auf einem Kohlenstoffpastenelektroden/Ru(III)-Komplex zur Bestimmung von Nitrit: Elektrochemische Impedanz- und zyklische Voltammetriemessungen. *Measurement* **2016**, *92*, 524–533. [\[CrossRef\]](#)
27. Shin, KY; Oum, W.; Yu, DJ; Kang, S.; Kim, EB; Kim, HW Grundlagen der zyklischen Voltammetrie. *J. Sens. Sci. Technol.* **2021**, *30*, 384–387. [\[CrossRef\]](#)
28. Inzelt, G. Chronoamperometrie, Chronocoulometrie und Chronopotentiometrie. In Encyclopedia of Applied Electrochemistry; Springer Nature: Berlin/Heidelberg, Deutschland, 2014. [\[CrossRef\]](#)
29. Bakker, E.; Pretsch, E. Moderne Potentiometrie. *Angew. Chem.—Int. Ed.* **2007**, *46*, 5660–5668. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
30. Chmayssem, A.; Verplanck, N.; Tanase, CE; Costa, G.; Monsalve-Grijalba, K.; Amigues, S.; Alias, M.; Gougis, M.; Mourier, V.; Vignoud, S.; et al. Entwicklung einer multiparametrischen (Bio)Sensorplattform zur kontinuierlichen Überwachung von Stressmetaboliten. *Talanta* **2021**, *229*, 122275. [\[CrossRef\]](#)
31. Chmayssem, A.; Hauchard, D. Direkte Ultraspurenerkennung von Alkylphenolen in Wasser mithilfe eines Hohlraum-Kohlepasten-Mikroelektrodensensors. *Desalination Water Treat.* **2017**, *83*, 321–326. [\[CrossRef\]](#)
32. Liu, Y.; Xue, Q.; Chang, C.; Wang, R.; Liu, Z.; He, L. Jüngste Fortschritte bei elektrochemischen Sensoren zur Erkennung typischer Schadstoffe in Wasserumgebungen. *Anal. Sci.* **2022**, *38*, 55–70. [\[CrossRef\]](#)
33. Karthik, V.; Selvakumar, P.; Senthil Kumar, P.; Satheeskumar, V.; Godwin Vijaysunder, M.; Hariharan, S.; Antony, K. Jüngste Fortschritte bei der Entwicklung elektrochemischer Sensoren zur Erkennung neu auftretender Schadstoffe in der Wasserumwelt. *Chemosphere* **2022**, *304*, 135331. [\[CrossRef\]](#)
34. Boumya, W.; Taoufik, N.; Achak, M.; Bessbousse, H.; Elhalil, A.; Barka, N. Elektrochemische Sensoren und Biosensoren zur Bestimmung von Diclofenac in pharmazeutischen, biologischen und Wasserproben. *Talanta Open* **2020**, *3*, 100026. [\[CrossRef\]](#)
35. Sohrabi, H.; Dezhakam, E.; Khataee, A.; Nozohouri, E.; Majidi, MR; Mohseni, N.; Trofimov, E.; Yoon, Y. Aktuelle Trends bei elektrochemischen und optischen (Bio-)Sensoren auf Basis geschichteter Doppelhydroxide für das Screening neuer pharmazeutischer Verbindungen. *Environ. Res.* **2022**, *211*, 113068. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
36. Malzahn, K.; Windmiller, JR; Valdés-Ramírez, G.; Schöning, MJ; Wang, J. Tragbare elektrochemische Sensoren für In-situ-Analyse in Marine Environments. *Analyst* **2011**, *136*, 2912–2917. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
37. Europäische Kommission. Eine EU-Strategie zur Nutzung des Potenzials erneuerbarer Offshore-Energie für eine klimaneutrale Zukunft; Europäische Kommission: Brüssel, Belgien, 2020.
38. Dong, J.; Zeng, J.; Yang, Y.; Wang, H. Eine Überprüfung der Gesetze und Richtlinien zur Dekarbonisierung der Schifffahrt. *Energy* **2022**, *254*, 107635. [\[CrossRef\]](#)
39. Madurai Elavarasan, R.; Pugazhendhi, R.; Irfan, M.; Mihet-Popa, L.; Khan, IA; Campana, PE Moderne nachhaltige Ansätze für eine tiefere Dekarbonisierung in Europa – eine Ergänzung zur klimaneutralen Vision. Erneuern. Aufrechterhalten. *Energy Rev.* **2022**, *159*, 112204. [\[CrossRef\]](#)
40. Beccarello, M.; Di Foggia, G. Überprüfung und Perspektiven der wichtigsten Dekarbonisierungstreiber bis 2030. *Energies* **2023**, *16*, 1345. [\[CrossRef\]](#)
41. Nesterenko, N.; Medeiros-Costa, IC; Clatworthy, EB; Cruchade, H.; Konnov, SV; Dath, JP; Gilson, JP; Mintova, S. Methan-zu-Chemikalien: Ein Weg zur Dekarbonisierung. *Natl. Sci. Rev.* **2023**, *10*, nwad116. [\[CrossRef\]](#)
42. Papadis, E.; Tsatsaronis, G. Herausforderungen bei der Dekarbonisierung des Energiesektors. *Energy* **2020**, *205*, 118025. [\[CrossRef\]](#)
43. Tautorat, P.; Lalin, B.; Schmidt, TS; Steffen, B. Innovationsrichtungen zur Dekarbonisierung der Zement- und Stahlproduktion—Eine auf Themenmodellierung basierende Analyse. *J. Clean. Prod.* **2023**, *407*, 137055. [\[CrossRef\]](#)
44. Zier, M.; Stenzel, P.; Kotzur, L.; Stolten, D. Eine Überprüfung der Dekarbonisierungsoptionen für die Glasindustrie. *Energy Convers. Manag. X* **2021**, *10*, 100083. [\[CrossRef\]](#)
45. Ghisolfi, V.; Tavasszy, LA; Correia, GHdA; Chaves, GdLD; Ribeiro, GM Dekarbonisierung des Güterverkehrs: Eine systematische Literaturübersicht zu Systemdynamikmodellen. *Sustainability* **2022**, *14*, 3625. [\[CrossRef\]](#)
46. Raza, MY; Zhongpan, Q.; Pengju, W. Landwirtschaftsbezogener Energieverbrauch, Lebensmittelpolitik und CO2-Emissionsreduzierung: Neue Erkenntnisse aus Pakistan. *Front. Environ. Sci.* **2023**, *10*, 1099813. [\[CrossRef\]](#)

47. Palou-Rivera, I.; Grieco, W. Die Rolle elektrochemischer Prozesse im Streben nach industrieller Dekarbonisierung. *ECS Meet. Abstr.* **2022**, MA2022-01, 2338. [\[CrossRef\]](#)
48. Griffiths, S.; Sovacool, BK; Kim, J.; Bazilian, M.; Uratani, JM Industrielle Dekarbonisierung mittels Wasserstoff: Eine kritische und systematische Überprüfung von Entwicklungen, soziotechnischen Systemen und politischen Optionen. *Energy Res. Soc. Sci.* **2021**, *80*, 102208. [\[CrossRef\]](#)
49. Schiffer, ZJ; Manthiram, K. Elektrifizierung und Dekarbonisierung der chemischen Industrie. *Joule* **2017**, *1*, 10–14. [\[CrossRef\]](#)
50. Mallapragada, DS; Dvorkin, Y.; Modestino, MA; Esposito, DV; Smith, WA; Hodge, BM; Harold, MP; Donnelly, VM; Nuz, A.; Bloomquist, C.; et al. Dekarbonisierung der chemischen Industrie durch Elektrifizierung: Hindernisse und Chancen. *Joule* **2023**, *7*, 23–41. [\[CrossRef\]](#)
51. Brannstrom, C. Die aufkommende(n) Energiezukunft(en) erneuerbarer Energie und Elektrochemie: Förderung oder Untergrabung der Energiedemokratie ? In *Energy Democracies for Sustainable Futures*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2022. [\[CrossRef\]](#)
52. Xia, R.; Overa, S.; Jiao, F. Neue elektrochemische Prozesse zur Dekarbonisierung der chemischen Industrie. *JACS Au* **2022**, *2*, 1054–1070. [\[Querverweis\]](#) [\[PubMed\]](#)
53. Brimley, P.; Almajed, H.; Alsunni, Y.; Alherz, AW; Bare, ZJL; Smith, WA; Musgrave, CB Elektrochemische CO₂-Reduktion an Metall-/Stickstoff-dotierten Graphen-Einzelatomkatalysatoren, modelliert mit der großkanonischen Dichtefunktionaltheorie. *ACS Catal.* **2022**, *12*, 10161–10171. [\[CrossRef\]](#)
54. Lvov, SN; Beck, JR; LaBarbera, MS Elektrochemische Reduktion von CO₂ zu Kraftstoffen. In *CO₂-neutrale Kraftstoffe und Energieträger*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2020. [\[CrossRef\]](#)
55. Pomerantseva, E.; Bonaccorso, F.; Feng, X.; Cui, Y.; Gogotsi, Y. Energiespeicherung: Die Zukunft ermöglicht durch Nanomaterialien. *Wissenschaft* **2019**, *366*, eaan8285. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
56. Kang, H.; Jung, S.; Lee, M.; Hong, T. Wie kann Energie besser geteilt werden, um eine CO₂-neutrale Stadt zu schaffen? Ein Überblick über Anwendungsstrategien von Batterie-Energiespeichersystemen in der Stadt. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2022**, *157*, 112113. [\[CrossRef\]](#)
57. Sufyan, M.; Rahim, NA; Aman, MM; Tan, CK; Raihan, SRS Dimensionierung und Anwendung von Batterie-Energiespeichertechnologien in Smart Grid System: Eine Überprüfung. *J. Renew. Sustain. Energy* **2019**, *11*, 014105. [\[CrossRef\]](#)
58. Dehghani-Sani, AR; Tharumalingam, E.; Dusseault, MB; Fraser, R. Studie zu Energiespeichersystemen und Umweltproblemen von Batterien. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2019**, *104*, 192–208. [\[CrossRef\]](#)
59. Li, Y.; Yang, J.; Song, J. Design-Strukturmodell und erneuerbare Energietechnologie für wiederaufladbare Batterien für umweltfreundlichere und Nachhaltigere Elektrofahrzeuge. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *74*, 19–25. [\[CrossRef\]](#)
60. Rydh, CJ Umweltverträglichkeitsprüfung von Vanadium-Redox- und Blei-Säure-Batterien zur stationären Energiespeicherung. *J. Power Sources* **1999**, *80*, 21–29. [\[CrossRef\]](#)
61. Wang, Z.; Yang, J.; Qu, R.; Xiao, G. Umweltverträglichkeitsprüfung der demontierten Batterie: Fallstudie eines Kraftwerks Blei-Säure-Batteriefabrik in China. *Prozesse* **2023**, *11*, 2119. [\[CrossRef\]](#)
62. Divya, KC; Østergaard, J. Batterie-Energiespeichertechnologie für Stromversorgungssysteme – Ein Überblick. *Electr. Power Syst. Res.* **2009**, *79*, 511–520. [\[CrossRef\]](#)
63. Abraham, KM Perspektiven und Grenzen der Energiespeicherung in Batterien. *J. Phys. Chem. Lett.* **2015**, *6*, 830–844. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
64. Huang, Y.; Dong, Y.; Li, S.; Lee, J.; Wang, C.; Zhu, Z.; Xue, W.; Li, Y.; Li, J. Lithium-Mangan-Spinell-Kathoden für Lithium-Ionen- Batterien. *Adv. Energy Mater.* **2020**, *11*, 2000997. [\[CrossRef\]](#)
65. Widyantara, RD; Zulaikah, S.; Juangsa, FB; Budiman, BA; Aziz, M. Rezension zu Designstrategien für Batteriepackungen für Superior Wärmemanagement in Elektrofahrzeugen. *Batteries* **2022**, *8*, 287. [\[CrossRef\]](#)
66. Schöberl, J.; Ank, M.; Schreiber, M.; Wassiliadis, N.; Lienkamp, M. Thermal Runaway Propagation in Automotive Lithium-Ion Batteries with NMC-811 and LFP Cathodes: Safety Requirements and Impact on System Integration. *eTransportation* **2024**, *19*, 100305.
67. Trahey, L.; Brushett, FR; Balsara, NP; Ceder, G.; Cheng, L.; Chiang, YM; Hahn, NT; Ingram, BJ; Minter, SD; Moore, JS; et al. Energiespeicherung im Aufwind: Eine Perspektive des Joint Center for Energy Storage Research. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2020**, *117*, 12550–12557. [\[CrossRef\]](#)
68. Barbosa, JC; Fidalgo-Marijuan, A.; Dias, JC; Gonçalves, R.; Salado, M.; Costa, CM; Lanceros-Méndez, S. Molekulares Design von Funktionale Polymere für organische Radikalbatterien. *Energy Storage Mater.* **2023**, *60*, 102841. [\[CrossRef\]](#)
69. Hager, MD; Esser, B.; Feng, X.; Schuhmann, W.; Theato, P.; Schubert, US Polymer-Based Batteries—Flexible and Thin Energy Speichersysteme. *Adv. Mater.* **2020**, *32*, e2000587. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
70. Choi, S. Biobrennstoffzellen und Biobatterien: Missverständnisse, Chancen und Herausforderungen. *Batteries* **2023**, *9*, 119. [\[CrossRef\]](#)
71. Patra, S.; Verma, J.; Mishra, YK; Kurinec, S.; Wang, Q.; Syväjärvi, M.; Tiwari, A. Die Positionierung von Biobatterien auf Basis von Biobrennstoffzellen für eine Netto-Null-Energiezukunft. *J. Energy Storage* **2023**, *72*, 107919. [\[CrossRef\]](#)
72. Nguyen, TH; Fraiwan, A.; Choi, S. Papierbasierte Batterien: Ein Überblick. *Biosens. Bioelectron.* **2014**, *54*, 640–649. [\[CrossRef\]](#)
73. Yazdi, AA; Preite, R.; Milton, RD; Hickey, DP; Minter, SD; Xu, J. Wiederaufladbare membranlose Glucose-Biobattery: Auf dem Weg Festkörperlithienkathoden für implantierbare enzymatische Geräte. *J. Power Sources* **2017**, *343*, 103–108. [\[CrossRef\]](#)
74. Garland, NT; Kaveti, R.; Bandodkar, AJ Biofluid-aktivierte Biobrennstoffzellen, Batterien und Superkondensatoren: Eine umfassende Rezension. *Adv. Mater.* **2023**, *35*, e2303197. [\[CrossRef\]](#)
75. Li, P.; Kim, H.; Myung, ST; Sun, YK Die Erforschung von Siliziumanoden in die Praxis umsetzen: Eine Übersicht über Silizium-Graphit-Verbundwerkstoffe für Lithium-Ionen-Batterien. *Energy Storage Mater.* **2020**, *35*, 550–576. [\[CrossRef\]](#)
76. Fichtner, M. Aktuelle Forschung und Fortschritte bei Batterien für Elektrofahrzeuge. *Batter. Supercaps* **2022**, *5*, e20210022. [\[CrossRef\]](#)

77. Li, Y.; Yang, J.; Song, J. Nano-Energiesystemmodell und Nanoskaleneffekt der Graphenbatterie in der Elektrizität mit erneuerbarer Energie Fahrzeug. Erneuern. Erhalten. *Energy Rev.* **2016**, *69*, 652–663. [\[CrossRef\]](#)
78. Raccichini, R.; Varzi, A.; Passerini, S.; Scrosati, B. Die Rolle von Graphen für die elektrochemische Energiespeicherung. *Nat. Mater.* **2015**, *14*, 271–279. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
79. Hu, B.; Wang, X. Fortschritte bei Mikro-Lithium-Ionen-Batterien für On-Chip- und tragbare Anwendungen. *J. Micromech. Microeng.* **2021**, *31*, 114002. [\[CrossRef\]](#)
80. Muench, S.; Burges, R.; Lex-Balducci, A.; Brendel, J.C.; Jäger, M.; Friebe, C.; Wild, A.; Schubert, U.S. Anpassung von Elektroden und druckbaren Gelpolymerelektrolyten für optimierte vollständig organische Batterien. *J. Polym. Sci.* **2021**, *59*, 494–501. [\[CrossRef\]](#)
81. Winter, M.; Brodd, R.J. Was sind Batterien, Brennstoffzellen und Superkondensatoren? *Chem. Rev.* **2004**, *104*, 4245–4270. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
82. Isa, N.N.C.; Mohd, Y.; Zaki, M.H.M.; Mohamad, S.A.S. Charakterisierung der galvanisch abgeschiedenen Kupferbeschichtung auf Edelstahl Substrat. *Int. J. Electrochem. Sci.* **2017**, *12*, 6010–6021. [\[CrossRef\]](#)
83. Trentin, A.; Pakseresht, A.; Duran, A.; Castro, Y.; Galusek, D. Elektrochemische Charakterisierung von Polymerbeschichtungen zum Korrosionsschutz: Ein Überblick über Fortschritte und Perspektiven. *Polymers* **2022**, *14*, 2306. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
84. Molina, J.; Esteves, M.F.; Fernández, J.; Bonastre, J.; Cases, F. Polyanilinbeschichtete leitfähige Stoffe. Chemische und elektrochemische Characterization. *Eur. Polym. J.* **2011**, *47*, 2003–2015. [\[CrossRef\]](#)
85. Stangl, A.; Muñoz-Rojas, D.; Burriel, M. In-situ- und Operando-Charakterisierungstechniken für Festoxid-Elektrochemiezellen: Jüngste Fortschritte. *J. Phys. Energy* **2021**, *3*, 012001. [\[CrossRef\]](#)
86. Rafiee, M.; Abrams, D.J.; Cardinale, L.; Goss, Z.; Romero-Arenas, A.; Stahl, S.S. Zyklische Voltammetrie und Chronoamperometrie: Mechanistische Werkzeuge für die organische Elektrosynthese. *Chem. Soc. Rev.* **2024**, *53*, 566–585. [\[CrossRef\]](#)
87. Elgrishi, N.; Rountree, K.J.; McCarthy, B.D.; Rountree, E.S.; Eisenhart, T.T.; Dempsey, J.L. Ein praktischer Leitfaden für Anfänger zur zyklischen Voltammetrie. *J. Chem. Educ.* **2018**, *95*, 197–206. [\[CrossRef\]](#)
88. Guziejewski, D.; Stojanov, L.; Zwierzak, Z.; Compton, R.G.; Mirceski, V. Elektrodenkinetik aus einem Einzelexperiment: Multiamplitudenanalyse in der Rechteckwellen-Chronoamperometrie. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2022**, *24*, 24419–24428. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
89. Lee, G.Y.; Park, J.H.; Chang, Y.W.; Cho, S.; Kang, M.J.; Pyun, J.C. Chronoamperometrie-basierte Redox-Zyklen für die Anwendung in Immunoassays. *ACS Sens.* **2018**, *3*, 106–112. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
90. Volodin, I.A.; Stolze, C.; Casas Mesa, C.; Haagen, U.; Terechin, C.; Hager, M.D.; Schubert, U.S. Jenseits stationärer Bedingungen: Chronoamperometrische Ladezustands- und Gesundheitszustandsmessungen in Elektrolyten von Durchflussbatterien. *Sens. Actuators B Chem.* **2024**, *403*, 135101. [\[CrossRef\]](#)
91. Parrilla, M.; Cuartero, M.; Crespo, G.A. Tragbare potentiometrische Ionensensoren. *TrAC—Trends Anal. Chem.* **2019**, *110*, 303–320. [\[Querverweis\]](#)
92. Düzgün, A.; Zelada-Guillén, G.A.; Crespo, G.A.; Macho, S.; Riu, J.; Rius, F.X. Nanostrukturierte Materialien in der Potentiometrie. *Anal. Bioanal. Chem.* **2011**, *399*, 171–181. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
93. Ding, J.; Qin, W. Jüngste Fortschritte bei potentiometrischen Biosensoren. *TrAC—Trends Anal. Chem.* **2020**, *124*, 115803. [\[CrossRef\]](#)
94. Lin, Z.; Wu, D.; Du, C.; Ren, Z. Eine verbesserte potentiometrische Methode zur Messung des Entropiekoeffizienten von Lithium-Ionen Batterie basierend auf positiver Anpassung. *Energy Rep.* **2022**, *8*, 54–63. [\[CrossRef\]](#)
95. Chmaysssem, A.; Tanase, C.E.; Verplanck, N.; Gougis, M.; Mourier, V.; Zebda, A.; Ghaemmaghami, A.M.; Mailley, P. Neues mikrofluidisches System zur elektrochemischen Impedanzspektroskopie zur Bewertung der Zellkulturleistung: Design und Entwicklung eines neuen Elektrodenmaterials. *Biosensors* **2022**, *12*, 452. [\[CrossRef\]](#)
96. Zhang, M.; Liu, Y.; Li, D.; Cui, X.; Wang, L.; Li, L.; Wang, K. Elektrochemische Impedanzspektroskopie: Ein neues Kapitel in der schnellen und genauen Beurteilung des Gesundheitszustands von Lithium-Ionen-Batterien. *Energies* **2023**, *16*, 1599. [\[CrossRef\]](#)
97. Choi, W.; Shin, H.C.; Kim, J.M.; Choi, J.Y.; Yoon, W.S. Modellierung und Anwendungen der elektrochemischen Impedanzspektroskopie (EIS) für Lithium-Ionen-Batterien. *J. Electrochem. Sci. Technol.* **2020**, *11*, 1–13. [\[CrossRef\]](#)
98. Brett, C.M.A. Elektrochemische Impedanzspektroskopie in der Charakterisierung und Anwendung von modifizierten Elektroden für Elektrochemische Sensoren und Biosensoren. *Molecules* **2022**, *27*, 1497. [\[CrossRef\]](#)
99. Magar, H.S.; Hassan, R.Y.A.; Mulchandani, A. Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS): Prinzipien, Aufbau und Biosensor-Anwendungen. *Sensors* **2021**, *21*, 6578. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
100. Cachet-Vivier, C.; Keddah, M.; Vivier, V.; Yu, L.T. Entwicklung von Hohlraum-Mikroelektroden und ihre Verwendung in verschiedenen Forschungsfelder. *J. Electroanal. Chem.* **2013**, *688*, 12–19. [\[CrossRef\]](#)
101. Tremblay, M.L.; Martin, M.H.; Lebovici, C.; Lasia, A.; Guay, D. Bestimmung der realen Oberfläche von pulverförmigen Materialien in Hohlraummikroelektroden durch elektrochemische Impedanzspektroskopie. *Electrochim. Acta* **2010**, *55*, 6283–6291. [\[CrossRef\]](#)
102. Cachet-Vivier, C.; Vivier, V.; Cha, C.S.; Nedelec, J.Y.; Yu, L.T. Elektrochemie von Pulvermaterial untersucht mittels der Hohlraummikroelektrode (CME). *Electrochim. Acta* **2001**, *47*, 181–189. [\[CrossRef\]](#)
103. Vivier, V.; Cachet-Vivier, C.; Cha, C.S.; Nedelec, J.Y.; Yu, L.T. Hohlraum-Mikroelektrode zur Untersuchung von Batteriematerialien: Anwendung auf Polyanilinpulver. *Electrochem. Commun.* **2000**, *2*, 180–185. [\[CrossRef\]](#)
104. Hasegawa, N.; Shoji, K. Mikrokavitätsvolumenkontrolle an einer Spitze von Ag/AgCl-Elektroden für stabile Kanalstrommessungen von biologischen Nanoporen. *Analyst* **2022**, *147*, 1191–1198. [\[CrossRef\]](#)
105. Huang, X.; Shi, X.; Zeng, H. Wie weit reicht die Kupfer/Nickel-Rückgewinnung von der praktischen Anwendung in der Galvanik Abwasser? Ressourcen. Erhaltung. *Recycl. Adv.* **2023**, *19*, 200170. [\[CrossRef\]](#)

106. Mohajeri, R.; Alipour, Z.; Hajhosseini, S.; Mirzaei, SI; Fardmanesh, M. Charakterisierung von platinbeschichteten Elektroden, eingekapselt in mikrofluidischen Kanälen für Impedanzmetrieenanwendungen. In Proceedings der 28. Nationalen und 6. Internationalen Iranischen Konferenz für Biomedizintechnik (ICBME 2021), Teheran, Iran, 25.–26. November 2021. [\[CrossRef\]](#)
107. Solonin, MD; Asnis, NA; Grigoryan, NS; Vagramyan, TA Reinigung von feinem Wolframdraht vor der galvanischen Vergoldung. *Tsvetnye Met.* **2023**, *2023*, 58–63. [\[CrossRef\]](#)
108. Menk, LA; Baca, ED; Hollowell, AE Kupfergalvanisierung in blinden mesoskaligen Through-Silicon-Vias. *ECS Meet. Abstr.* **2018**, MA2018-02, 823. [\[CrossRef\]](#)
109. Mochizuki, C.; Senga, T.; Shibata, M. Elektrodeposition von Pd-Ni-P-Metallglasfilmen. *Electrochemistry* **2011**, *79*, 249–251. [\[Querverweis\]](#)
110. Krywko-Cendrowska, A.; Strawski, M.; Szklarczyk, M. Niedertemperatur-Elektroabscheidung von SiO_x-Filmen, die in Wasserlösung photoaktiv sind. *Electrochim. Acta* **2013**, *108*, 112–117. [\[CrossRef\]](#)
111. Liu, AS; Oliveira, MAS Galvanische Abscheidung von Polypyrrolfilmen auf Aluminium aus einer wässrigen Tartratlösung. *J. Braz. Chem. Soc.* **2007**, *18*, 143–152. [\[CrossRef\]](#)
112. Sayah, A.; Habelhames, F.; Bahloul, A.; Boudjadi, A. Die Wirkung des bei der galvanischen Abscheidung angelegten Potentials auf die elektrochemische Leistung von Polyanilinfilmen. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* **2021**, *32*, 10692–10701. [\[CrossRef\]](#)
113. Lata, S.; Batra, B.; Kumar, P.; Pundir, CS Konstruktion eines amperometrischen D-Aminosäure-Biosensors basierend auf D-Aminosäureoxidase /carboxylierten mehrwandigen Kohlenstoffnanoröhren/Kupfernanopartikeln/polyalininmodifizierter Goldelektrode. *Anal. Biochem.* **2013**, *437*, 1–9. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
114. Ji, J.; Zhu, X.; Han, D.; Li, M.; Zhang, Q.; Shu, Y.; Cheng, Z.; Zhang, W.; Hua, E.; Sang, S. AC-Elektroabscheidung von PEDOT-Filmen in protischen ionischen Flüssigkeiten für langzeitstabile organische elektrochemische Transistoren. *Molecules* **2019**, *24*, 4105. [\[CrossRef\]](#)
115. Martínez-Viademonte, MP; Abrahami, ST; Hack, T.; Burchardt, M.; Terryn, H. Ein Überblick über das Anodisieren von Aluminium für die Luft- und Raumfahrt Legierungen für den Korrosionsschutz. *Coatings* **2020**, *10*, 1106. [\[CrossRef\]](#)
116. Iwasaki, M. Titananodisierung. *J. Surf. Finish. Soc. Jpn.* **2022**, *73*, 28–32. [\[CrossRef\]](#)
117. de Sousa Araujo, JV; da Silva, RMP; Klumpp, RE; Costa, I. Der Anodisierungsprozess von Aluminium und seinen Legierungen: Eine historische und elektrochemische Ansatz. *Quim. Nova* **2021**, *44*, 999–1011. [\[CrossRef\]](#)
118. Schneider, M.; Fürbeth, W. Eloxieren – Die Pore macht den Unterschied. *Mater. Corros.* **2022**, *73*, 1752–1765. [\[CrossRef\]](#)
119. Tsangarakis-Kaplanoglou, I.; Theohari, S.; Dimogerontakis, T.; Wang, YM; Kuo, HH; Kia, S. Einfluss der Legierungsarten auf die Anodisierungsprozess von Aluminium. *Surf. Coat. Technol.* **2006**, *200*, 2634–2641. [\[CrossRef\]](#)
120. Schneider, M.; Kremmer, K.; Weidmann, SK; Fürbeth, W. Wechselwirkung zwischen Parametervariation und Oxidstruktur einer Modifizierter PAA-Prozess. *Surf. Interface Anal.* **2013**, *45*, 1503–1509. [\[CrossRef\]](#)
121. Kuntty, O.; Zozulya, G.; Shepida, M. Poröse Siliziumbildung durch elektrochemisches Ätzen. *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2022**, *2022*, 1482877. [\[CrossRef\]](#)
122. Zhang, L.; Lu, D.; Deng, H. Untersuchung von Materialabtragungsmechanismen beim elektrochemischen Ätzen und Polieren von GaN. *J. Manuf. Process* **2022**, *73*, 903–913. [\[CrossRef\]](#)
123. Fiuczek, N.; Sawicka, M.; Feduniewicz-Zmuda, A.; Siekacz, M.; Zak, M.; Nowakowski; Szkudlarek, K.; Muzioy, G.; Wolny, P.; Kelly, JJ; Skierbiszewski, C. Elektrochemisches Ätzen von P-Typ-GaN unter Verwendung eines Tunnelübergangs für eine effiziente Lochinjektion. *Acta Mater.* **2022**, *234*, 118018. [\[CrossRef\]](#)
124. Sun, W.; Shah, SA; Chen, Y.; Tan, Z.; Gao, H.; Habib, T.; Radovic, M.; Green, MJ Elektrochemisches Ätzen von Ti₂AlC zu Ti₂CT:X (MXene) in einer niedrig konzentrierten Salzsäurelösung. *J. Mater. Chem. A Mater.* **2017**, *5*, 21663–21668. [\[CrossRef\]](#)
125. Jiang, Y.; Wang, L.; Meunier, M.; Mirsaidov, U. Bildungswege von porösen Legierungsnanopartikeln durch selektive chemische und elektrochemisches Ätzen. *Small* **2021**, *17*, 2006953. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
126. Peng, N.; He, Y.; Yang, H. Auswirkungen des H₂SO₄- Gehalts auf die elektrochemische Aktivierung geätzter Tunnel auf Aluminiumfolie. *Corrosion* **2018**, *74*, 75–82. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
127. Peng, N.; Wen, Y.; He, Y. Verbesserte Verteilung geätzter Tunnel auf Aluminiumfolie durch Silanbehandlung. *Prog. Org. Coat.* **2019**, *127*, 151–156. [\[CrossRef\]](#)
128. Kaya, D.; Keçeci, K. Review – Spurgeätzte nanoporöse Polymere Membranen als Sensoren: Ein Review. *Anal. Bioanal. Chem.* **2017**, *367*, 037543. [\[CrossRef\]](#)
129. Chen, Y.; Yu, P.; Zhong, Y.; Dong, S.; Hou, M.; Liu, H.; Chen, X.; Gao, J.; Wong, C.-P. Review – Fortschritte beim elektrochemischen Ätzen von Halbleitern der dritten Generation. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* **2023**, *12*, 045004. [\[CrossRef\]](#)
130. Lin, JC; Liu, YC; Lu, SH; Yen, HN; Settu, K. Verbesserung der spezifischen Kapazität eines porösen Silizium-basierten Kondensators durch Einbettung von Graphen in Kombination mit dreidimensionalem elektrochemischem Ätzen. *Electrochem. Commun.* **2023**, *154*, 107555. [\[Querverweis\]](#)
131. Lazanas, AC; Prodromidis, MI Elektrochemische Impedanzspektroskopie – Ein Tutorial. *ACS Meas. Sci. Au* **2023**, *3*, 162–193. [\[Querverweis\]](#) [\[PubMed\]](#)
132. Chmaysssem, A.; Monsalve-Grijalba, K.; Alias, M.; Mourier, V.; Vignoud, S.; Scmazzone, L.; Muller, C.; Barthes, J.; Vrana, NE; Mailley, P. Referenzmethode für die Offline-Analyse von Stickoxiden in Zellkulturmedien durch einen ozonbasierten Chemilumineszenzdetektor. *Anal. Bioanal. Chem.* **2021**, *413*, 1383–1393. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
133. Chmaysssem, A.; Petit, L.; Verplanck, N.; Mourier, V.; Vignoud, S.; Vrana, NE; Mailley, P. Charakterisierung des Einflusses klassischer Zellkulturmedien auf die Reaktion elektrochemischer Sensoren. *Electroanalysis* **2022**, *34*, 1201–1211. [\[CrossRef\]](#)

134. Escarpa, A. Lebensmittelelektroanalyse: Sinn und Einfachheit. *Chem. Rec.* **2012**, *12*, 72–91. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
135. Bussoo, A.; Tubbs, E.; Revol-Cavalier, F.; Chmaysem, A.; Alessio, M.; Cosnier, M.-L.; Verplanck, N. Echtzeitüberwachung des Sauerstoffgehalts in thermoplastischen Organ-on-Chip-Geräten. *SSRN Electron. J.* **2022**, *11*, 4090175. [\[CrossRef\]](#)
136. Bühlmann, P.; Pretsch, E.; Bakker, E. Trägerbasierte ionenselektive Elektroden und Bulk-Optoden. 2. Ionophore für potentiometrische und optische Sensoren. *Chem. Rev.* **1998**, *98*, 1593–1688. [\[CrossRef\]](#)
137. Lonsdale, W. Entwicklung, Herstellung und Anwendung eines Festkörper-PH-Sensors unter Verwendung von Rutheniumoxid; Edith Cowan University: Joondalup, WA, Australien, 2018.
138. Liu, Y.; Pharr, M.; Salvatore, GA Lab-on-Skin: Ein Überblick über flexible und dehnbare Elektronik für tragbare Gesundheitsüberwachung. *ACS Nano* **2017**, *11*, 9614–9635. [\[CrossRef\]](#)
139. Gao, W.; Emaminejad, S.; Nyein, HYY; Challa, S.; Chen, K.; Peck, A.; Fahad, HM; Ota, H.; Shiraki, H.; Kiriya, D.; et al. Vollständig integrierte tragbare Sensor-Arrays für die Multiplex-In-Situ-Schweißanalyse. *Nature* **2016**, *529*, 509–514. [\[CrossRef\]](#)
140. Soranzo, T.; Ben Tahar, A.; Chmaysem, A.; Zelsmann, M.; Vadgama, P.; Lenormand, JL; Cinquin, P.; Martin, DK; Zebda, A. Elektrochemische Biosensorik von Glucose basierend auf der enzymatischen Reduktion von Glucose. *Sensors* **2022**, *22*, 7105. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
141. Chmaysem, A.; Shalayel, I.; Marinesco, S.; Zebda, A. Untersuchung der GOx-Stabilität in einer Chitosanmatrix: Anwendungen für Enzymatische Elektroden. *Sensoren* **2023**, *23*, 465. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
142. Chmaysem, A.; Nadolska, M.; Tubbs, E.; Sadowska, K.; Vadgma, P.; Shitanda, I.; Tsujimura, S.; Lattach, Y.; Peacock, M.; Tingry, S.; et al. Einblicke in die kontinuierliche Glukoseüberwachung: Von medizinischen Grundlagen zu kommerzialisierten Geräten. *Microchim. Acta* **2023**, *190*, 177. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
143. Yoo, EH; Lee, SY Glucose-Biosensoren: Ein Überblick über die Anwendung in der klinischen Praxis. *Sensors* **2010**, *10*, 4558–4576. [\[CrossRef\]](#)
144. Singh, N.; Goldsmith, BR Rolle der Elektrokatalyse bei der Sanierung von Wasserschadstoffen. *ACS Catal.* **2020**, *10*, 3365–3371. [\[Querverweis\]](#)
145. Naidu, R.; Biswas, B.; Willett, IR; Cribb, J.; Kumar Singh, B.; Paul Nathanail, C.; Coulon, F.; Semple, KT; Jones, KC; Barclay, A.; et al. Chemische Verschmutzung: Eine wachsende Gefahr und ein potenzielles katastrophales Risiko für die Menschheit. *Environ. Int.* **2021**, *156*, 106616. [\[Querverweis\]](#)
146. Isarain-Chávez, E.; De La Rosa, C.; Godínez, LA; Brillas, E.; Peralta-Hernández, JM Vergleichende Studie zu elektrochemischen Wasseraufbereitungsprozessen für das Abwasser einer Gerberei. *J. Elektroanal. Chem.* **2014**, *713*, 62–69. [\[CrossRef\]](#)
147. Feng, A.; Feng, J.; Xing, W.; Jiang, K.; Tang, W. Vielseitige Anwendungen elektrochemischer Durchflusssysteme in Wasseraufbereitungsprozessen. *Chem. Eng. J.* **2023**, *473*, 145400. [\[CrossRef\]](#)
148. Alvarado, L.; Chen, A. Elektrodeionisierung: Prinzipien, Strategien und Anwendungen. *Electrochim. Acta* **2014**, *132*, 583–597. [\[Querverweis\]](#)
149. Salari, K.; Zarafshan, P.; Khashehchi, M.; Chegini, G.; Etezadi, H.; Karami, H.; Szulzyk-Cieplak, J.; ğag ód, G. Wissen und Technologie zur kapazitiven Deionisierung von Wasser. *Membranes* **2022**, *12*, 459. [\[CrossRef\]](#)
150. Wang, K.; Li, H.; Yang, Y.; Wang, P.; Zheng, Y.; Song, L. Effizientere Kathodenverbundstoffe für Elektro-Fenton und Bio-Elektro-Fenton-Systeme: Ein Überblick. *Sep. Purif. Technol.* **2022**, *304*, 122302. [\[CrossRef\]](#)
151. He, L.; Du, P.; Chen, Y.; Lu, H.; Cheng, X.; Chang, B.; Wang, Z. Fortschritte bei mikrobiellen Brennstoffzellen zur Abwasserbehandlung. *Erneuern. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *71*, 388–403. [\[CrossRef\]](#)
152. Sillanpää, M.; Shestakova, M. Neue und kombinierte elektrochemische Methoden. In *Elektrochemische Wasseraufbereitungsmethoden: Grundlagen, Methoden und Anwendungen im großen Maßstab*; Elsevier Inc.: Amsterdam, Niederlande, 2017; Kapitel 3, S. 131–225. [\[Querverweis\]](#)
153. Azanaw, A.; Birlie, B.; Teshome, B.; Jemberie, M. Textilabwasserbehandlungsmethoden und umweltfreundliche Lösung von Textil Abwasser. Fallstudie. *Chem. Environ. Eng.* **2022**, *6*, 100230. [\[CrossRef\]](#)
154. Vineta, S.; Silvana, Z.; Sanja, R.; Golomeova, S. Methoden zur Abwasserbehandlung in der Textilindustrie. In *Proceedings of the Internationale wissenschaftliche Konferenz „UNITECH 2014“*, Gabrovo, Bulgarien, 21.–22. November 2014.
155. Behera, M.; Nayak, J.; Banerjee, S.; Chakraborty, S.; Tripathy, SK Eine Überprüfung der Behandlung von Abwässern der Textilindustrie im Hinblick auf die Entwicklung einer effizienten Minderungsstrategie: Ein integrierter Systemdesignansatz. *J. Environ. Chem. Eng.* **2021**, *9*, 105277. [\[CrossRef\]](#)
156. Samsami, S.; Mohamadi, M.; Sarrafzadeh, MH; Rene, ER; Firoozbahr, M. Jüngste Fortschritte bei der Behandlung von farbstoffhaltigem Abwasser aus der Textilindustrie: Überblick und Perspektiven. *Process Saf. Environ. Prot.* **2020**, *143*, 138–163. [\[CrossRef\]](#)
157. Labidi, A.; Salaberria, AM; Fernandes, SCM; Labidi, J.; Abderrabba, M. Funktionelles Chitosanderivat und Chitin als Entfärbungsmaterialien für Methylenblau und Methylorange aus wässriger Lösung. *Materials* **2019**, *12*, 361. [\[CrossRef\]](#)
158. Meng, XL; Nie, Y.; Sun, J.; Cheng, WG; Wang, JQ; He, HY; Zhang, SJ Funktionalisierte Dicyandiamid-Formaldehyd-Polymere als effiziente heterogene Katalysatoren für die Umwandlung von CO₂ in organische Carbonate. *Green. Chem.* **2014**, *16*, 2771–2778. [\[CrossRef\]](#)
159. Alinsafi, A.; Evenou, F.; Abdulkarim, EM; Pons, MN; Zahraa, O.; Benhammou, A.; Yaacoubi, A.; Nejmeddine, A. Behandlung von Textilindustrie-Abwasser durch unterstützte Photokatalyse. *Dyes Pigments* **2007**, *74*, 439–445. [\[CrossRef\]](#)
160. İlhan, F.; Ulucan-Altuntas, K.; Dogan, C.; Kurt, U. Behandelbarkeit von Roh Textilabwasser mittels Fenton-Verfahren und Vergleich mit chemischer Koagulation. *Entsalzungswasserbehandlung.* **2019**, *162*, 142–148. [\[CrossRef\]](#)
161. Kaur, P.; Kushwaha, JP; Sangal, VK Elektrokatalytische oxidative Behandlung von echtem Textilabwasser in einem kontinuierlichen Reaktor: Abbauweg und Entsorgungsstudie. *J. Hazard. Mater.* **2018**, *346*, 242–252. [\[CrossRef\]](#)

162. Mukimin, A.; Wijaya, K.; Kuncaka, A. Oxidation von Remazol Brilliant Blue r (RB.19) mit in situ elektrogeneriertem Aktiv Chlor mit Ti/PbO₂-Elektrode. *Sep. Purif. Technol.* **2012**, *95*, 1–9. [\[CrossRef\]](#)
163. Chmayssem, A.; AlChoubassi, G.; Taha, S.; Hauchard, D. Elektro-Fenton-Prozess im Semi-Pilotmaßstab. Eine Studie zur Skalierung des Reaktors für industrielle Anwendungen. *Res. Sq.* **2023**. [\[CrossRef\]](#)
164. Park, S.; Lee, JW; Popov, BN Eine Übersicht über die Gasdiffusionsschicht in PEM-Brennstoffzellen: Materialien und Designs. *Int. J. Hydrogen Energy* **2012**, *37*, 5850–5865. [\[CrossRef\]](#)
165. Mukimin, A.; Vistanty, H.; Hariastuti, N.; Setianingsih, NI; Djayanti, S.; Nilawati; Astuti, Y. Hybrider Fenton-elektrochemischer Reaktor und System zur Nachbehandlung von Textilabwasser. *J. Water Process Eng.* **2024**, *59*, 105028. [\[CrossRef\]](#)
166. Zhu, C.; Ang, NWJ; Meyer, TH; Qiu, Y.; Ackermann, L. Organische Elektrochemie: Molekulare Synthesen mit Potenzial. *ACS Cent. Sci.* **2021**, *7*, 415–431. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
167. Leech, MC; Lam, K. Ein praktischer Leitfaden zur Elektrosynthese. *Nat. Rev. Chem.* **2022**, *6*, 275–286. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
168. Botte, GG Elektrochemische Fertigung in der chemischen Industrie. *Electrochem. Soc. Interface* **2014**, *23*, 49–55. [\[CrossRef\]](#)
169. Wang, F.; Li, W.; Wang, R.; Guo, T.; Sheng, H.; Fu, HC; Stahl, SS; Jin, S. Modulare elektrochemische Synthese mit einem Redox Reservoir gepaart mit unabhängigen Halbreaktionen. *Joule* **2020**, *5*, 149–165. [\[CrossRef\]](#)
170. Cui, B.; Shi, Y.; Li, G.; Chen, Y.; Chen, W.; Deng, Y.; Hu, W. Herausforderungen und Chancen für die Meerwasserelektrolyse: Ein Mini-Review über fortschrittliche Materialien in der Chlor-Elektrochemie. *Wuli Huaxue Xuebao/Acta Phys.—Chim. Sin.* **2022**, *38*, 2106010. [\[Querverweis\]](#)
171. Li, Q.; Jensen, JO; Bjerrum, NJ Chemie, Elektrochemie und elektrochemische Anwendungen|Aluminium. In *Encyclopedia of Elektrochemische Energiequellen*; Elsevier Inc.: Amsterdam, Niederlande, 2009. [\[CrossRef\]](#)
172. Comer, BM; Fuentes, P.; Dimkpa, CO; Liu, YH; Fernandez, CA; Arora, P.; Realf, M.; Singh, U.; Hatzell, MC; Medford, AJ Perspektiven und Herausforderungen für Solardünger. *Joule* **2019**, *3*, 1578–1605. [\[CrossRef\]](#)
173. Fu, N.; Sauer, GS; Lin, S. Ein allgemeiner elektrokatalytischer Ansatz zur Synthese von vicinalen Diaminen. *Nat. Protoc.* **2018**, *13*, 1725–1743. [\[CrossRef\]](#)
174. Zheng, S.; Yan, J.; Wang, K. Technischer Forschungsfortschritt der elektrochemischen Mikoreaktionstechnologie – Eine neuartige Methode für Elektrosynthese organischer Chemikalien. *Engineering* **2021**, *7*, 22–32. [\[CrossRef\]](#)
175. Anastasiadou, D. Cu-basierte Elektroden für die Ammoniak- und Harnstoffelektrosynthese. Dissertation, Technische Universität Eindhoven, Eindhoven, Niederlande, 2023.
176. Chen, X.; Lv, S.; Su, Z.; Yang, X.; Cui, H.; Yang, Z.; Xu, Z.; Teobaldi, G.; Kang, J.; Liu, L.-M.; et al. Jüngste Fortschritte bei amorphen Nanomaterialien für die elektrochemische Synthese von N-haltigen Verbindungen. *Chem. Catal.* **2024**, 100871. [\[CrossRef\]](#)
177. Botte, GG Überführung elektrochemischer Technologien in die Landwirtschaft durch die Ingenieurforschung der National Science Foundation Center-Modell. *Electrochem. Soc. Interface* **2023**, *32*, 69–73. [\[CrossRef\]](#)
178. Meyer, TH; Choi, I.; Tian, C.; Ackermann, L. Powering the Future: Wie kann Elektrochemie einen Unterschied in der organischen Synthese? *Chem* **2020**, *6*, 2484–2496. [\[CrossRef\]](#)
179. Talebi, MR; Nematollahi, D. Elektrochemische Synthese von Sulfonamid-Derivaten: Elektrosynthesebedingungen und Reaktionswege. *ChemElectroChem* **2024**, *11*, e202300728. [\[CrossRef\]](#)
180. Zuo, S.; Xue, W.; Zhang, Y.; Chen, J.; Lin, Z. Titelbild: Atomar dispergierte Fe-Motiv-basierte Elektrokatalysatoren für Wasserstoff Peroxidsynthese (ChemNanoMat 2/2024). *ChemNanoMat* **2024**, *10*, 202400093. [\[CrossRef\]](#)
181. Zuo, S.; Xue, W.; Zhang, Y.; Chen, J.; Lin, Z. Atomar dispergierte Fe-Motiv-basierte Elektrokatalysatoren für die Wasserstoffperoxidsynthese. *ChemNanoMat* **2024**, *10*, 202300476. [\[CrossRef\]](#)
182. Schremp, FW Korrosionsschutz für Offshore-Plattformen. *JPT J. Pet. Technol.* **1984**, *36*, 605–612. [\[CrossRef\]](#)
183. Chen, Y.; He, M.; Zong, Y.; Dong, S.; Yan, Y.; Zhang, Y.; Liu, H.; Cao, J. Forschungsfortschritt bei Versagensarten von ungebundenen flexiblen Rohre und ihre Kontrollmaßnahmen. *Nat. Gas. Ind.* **2021**, *41*, 122–131. [\[CrossRef\]](#)
184. Mahajanam, SPV; Joosten, MW Richtlinien für die Auswahl von Füllmaterialien zur Minimierung bevorzugter Schweißkorrosion in Rohrleitungsstählen. *SPE Proj. Facil. Constr.* **2011**, *6*, 5–12. [\[CrossRef\]](#)
185. Erdogan, C.; Swain, G. Konzeptionelles Design von Opferanoden zum kathodischen Schutz von Offshore-Windkraftanlagen. *Ocean Eng.* **2021**, *235*, 109339. [\[CrossRef\]](#)
186. Popov, BN Korrosionstechnik: Prinzipien und gelöste Probleme; Elsevier: Amsterdam, Niederlande, 2015. [\[CrossRef\]](#)
187. Ahmad, Z. Prinzipien der Korrosionstechnik und Korrosionskontrolle; Elsevier: Burlington, MA, USA, 2006. [\[CrossRef\]](#)
188. Cicek, V. Korrosionstechnik; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2014; ISBN 9781118720899. [\[CrossRef\]](#)
189. Pyun, S.-I. Strategien zum Korrosionsschutz von Metallen. *ChemTexts* **2020**, *7*, 2. [\[CrossRef\]](#)
190. Ducasse-Lapeyresse, J.; Bouteiller, V.; Marie-Victoire, E.; Bouichou, M.; Damien, G.; Martinet, V.; Annede-Villeau, C.; Lesieutre, O. Bewertung des Fremdstrom-Kathodenschutzsystems nach 4-jähriger Betriebszeit: Fallstudie des Saint-Cloud-Viadukts (Frankreich). *Case Stud. Constr. Mater.* **2023**, *18*, e02023. [\[CrossRef\]](#)
191. Xu, J.; Yang, M.; Li, S.; Kainuma, S.; Ji, B.; Murayama, S. Anwendung der kathodischen Schutzmethode auf Stahlkonstruktionen unter Verwendung einer Opferanode und eines Natriumpolyacrylat-Natriumcarboxymethylcellulose-Hydrogelelektrolyten (PANA–CMC). Fallstudie. *Constr. Mater.* **2024**, *20*, e02742. [\[CrossRef\]](#)
192. Ramanavas, R.; Vijayakumar, K.; Fernandez, SG Integriertes Nanogrid für das Fremdstrom-Kathodenschutzsystem in Entsalzungsanlagen. *Sustainability* **2023**, *15*, 7088. [\[CrossRef\]](#)

193. Yao, G.; He, X.; Liu, J.; Guo, Z.; Chen, P. Teststudie des Korrosionsschutzmechanismus für Brückenkabel basierend auf eingepägtem Aktueller kathodischer Schutz. *Schmierstoffe* **2023**, *11*, 30. [\[CrossRef\]](#)
194. Dickinson, E.J.F.; Ekström, H.; Fontes, E. COMSOL Multiphysics®: Finite-Elemente-Software für elektrochemische Analysen. Kurz-Rezension. *Electrochem. Commun.* **2014**, *40*, 71–74. [\[CrossRef\]](#)
195. Jalalvand, A.R.; Roushani, M.; Goicoechea, H.C.; Rutledge, D.N.; Gu, H.W. MATLAB in der Elektrochemie: Ein Überblick. *Talanta* **2018**, *194*, 205–225. [\[CrossRef\]](#)
196. Weddle, P.; Vincent, T.; Kee, R.J. Identifizieren und Anwenden von Zustandsraummodellen, die aus hochpräzisen physikalischen Modellen von Lithium-Ionen-Batterien abgeleitet wurden. *ECS Meet. Abstr.* **2017**, MA2017-01. [\[CrossRef\]](#)
197. Bennett, B.; Chang, J.; Bard, A.J. Mechanismus der Br₂/Br⁻-Redoxreaktion an Platin- und Glaskohlenstoffelektroden in Nitrobenzol mittels zyklischer Voltammetrie. *Electrochim. Acta* **2016**, *219*, 1–9. [\[CrossRef\]](#)
198. Habekost, A. Simulation und Anpassung von zyklischen Voltammetrie- und Chronoamperometrie-Kurven elektrochemischer Reaktionen mit unterschiedlichen Mechanismen – eine didaktische Perspektive. *World J. Chem. Educ.* **2019**, *7*, 53–64. [\[CrossRef\]](#)
199. Wang, X.; Wang, Z. Animierte elektrochemische Simulationsmodule. *J. Chem. Educ.* **2022**, *99*, 752–758. [\[CrossRef\]](#)
200. Jaugstetter, M.; Blanc, N.; Kratz, M.; Tschulik, K. Elektrochemie unter Einschluss. *Chem. Soc. Rev.* **2022**, *51*, 2491–2543. [\[Querverweis\]](#)
201. Weiß, L.J.K.; Lubins, G.; Music, E.; Rinklin, P.; Banzet, M.; Peng, H.; Terkan, K.; Mayer, D.; Wolfrum, B. Single-Impact Electro-chemistry in Paper-Based Microfluidics. *ACS Sens.* **2022**, *7*, 884–892. [\[CrossRef\]](#)
202. Zhou, Y.; Qi, J.; Engelberg, D.L. Über die Anwendung der bipolaren Elektrochemie zur Simulation des galvanischen Korrosionsverhaltens von Ungleichartige rostfreie Stähle. *Electrochem. Commun.* **2021**, *126*, 107023. [\[CrossRef\]](#)
203. Tettey, F.; Parupelli, S.K.; Desai, S. Eine Übersicht über biomedizinische Geräte: Klassifizierung, regulatorische Richtlinien, menschliche Faktoren, Software als Medizinprodukt und Cybersicherheit. *Biomed. Mater. Devices* **2023**, *2*, 316–341. [\[CrossRef\]](#)
204. Marcus, H.J.; Payne, C.J.; Hughes-Hallett, A.; Marcus, A.P.; Yang, G.Z.; Darzi, A.; Nandi, D. Zulassung neuer medizinischer Geräte: Querschnittsstudie. *BMJ* **2016**, *353*, i2587. [\[CrossRef\]](#)
205. Wagner, M.V.; Schanze, T. Vergleich der Zulassungsverfahren für Medizinprodukte in Europa und den USA. *Curr. Dir. Biomed. Ing.* **2019**, *5*, 605–608. [\[CrossRef\]](#)
206. Robinson, S.G.; Sigman, M.S. Integration elektrochemischer und statistischer Analysetools für molekulares Design und mechanistisches Verständnis. *Acc. Chem. Res.* **2020**, *53*, 289–299. [\[CrossRef\]](#)
207. Rivera, F.F.; Pérez, T.; Castañeda, L.F.; Nava, J.L. Mathematische Modellierung und Simulation elektrochemischer Reaktoren: Eine kritische Übersicht. *Chem. Eng. Sci.* **2021**, *239*, 116622. [\[CrossRef\]](#)
208. Lu, S.-M.; Vannoy, K.J.; Dick, J.E.; Long, Y.-T. Mehrphasenchemie unter Nanoeinschluss: Eine elektrochemische Perspektive. *J. Am. Chem. Soc.* **2023**, *145*, 25043–25055. [\[CrossRef\]](#)
209. Ma, Z.; Witteman, L.; Wrubel, J.A.; Bender, G. Eine umfassende Modellierungsmethode für Protonenaustauschmembran-Elektrolyseure Entwicklung. *Int. J. Hydrogen Energy* **2021**, *46*, 17627–17643. [\[CrossRef\]](#)
210. Iliev, I.K.; Gizzatullin, A.R.; Filimonova, A.A.; Chichirova, N.D.; Beloev, I.H. Numerische Simulation von Prozessen in einer elektrochemischen Zelle mit COMSOL Multiphysics. *Energies* **2023**, *16*, 7265. [\[CrossRef\]](#)
211. Yaoxuan, Q.; Cheng, F.; Kening, S. Multiphysik-Simulation einer Festoxidbrennstoffzelle basierend auf der Comsol-Methode. Im E3S Web of Konferenzen; EDP Sciences: Paris, Frankreich, 2021; Band 245. [\[CrossRef\]](#)
212. Goel, V.; Thornton, K. Ermöglichung der elektrochemischen Simulation von Li-Ionen-Batterieelektroden mit anisotroper Tortuosität in COMSOL Multiphysics®. *MethodsX* **2021**, *8*, 101425. [\[CrossRef\]](#)
213. Salazar, P.F.; Kumar, S.; Cola, B.A. Design und Optimierung thermoelektrochemischer Zellen. *J. Appl. Electrochem.* **2013**, *44*, 325–336. [\[CrossRef\]](#)
214. Yang, W.; Sun, L.; Bao, J.; Mo, Z.; Du, M.; Xu, Y.; Zhang, J. Multiphysikalische Modellierung von Masse- und Wärmeübertragung in einem Thermo-Elektrochemische Zelle. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2023**, *62*, 12345–12355. [\[CrossRef\]](#)
215. El-Shafie, O.A.; El-Maghraby, R.M.; Albo, J.; Fateen, S.E.K.; Abdelghany, A. Modellierung und numerische Untersuchung der Leistung von Gasdiffusionselektroden für die elektrochemische Reduktion von Kohlendioxid zu Methanol. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2020**, *59*, 20929–20942. [\[CrossRef\]](#)
216. Yang, F.; Zhang, J.; Guo, C.; Zhao, S. Untersuchung der elektrochemischen Bearbeitung für allmähliche Veränderung speziell geformter tiefer Spiralen Loch basierend auf COMSOL. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2020**, *108*, 2717–2725. [\[CrossRef\]](#)
217. Cordova-Huaman, A.V.; Jauja-Ccana, V.R.; La Rosa-Toro, A. Kostengünstiger Smartphone-gesteuerter Potentiostat auf Arduino-Basis für die Vermittlung von Grundlagen und Anwendungen der Elektrochemie. *Heliyon* **2021**, *7*, e06259. [\[CrossRef\]](#)
218. Ahmad, N.J.; Yakob, N.; Bunyamin, M.A.H.; Winarno, N.; Akmal, W.H. Der Einfluss interaktiver Computeranimation und Simulation auf die Leistung und Motivation von Schülern beim Erlernen von Elektrochemie. *J. Pendidik. IPA Indones.* **2021**, *10*, 311–324. [\[Querverweis\]](#)

Haftungsausschluss/Anmerkung des Herausgebers: Die in allen Veröffentlichungen enthaltenen Aussagen, Meinungen und Daten sind ausschließlich die der einzelnen Autoren und Mitwirkenden und nicht die von MDPI und/oder den Herausgebern. MDPI und/oder die Herausgeber lehnen jegliche Verantwortung für Personen- oder Sachschäden ab, die aus den im Inhalt erwähnten Ideen, Methoden, Anweisungen oder Produkten resultieren.