

## CO<sub>2</sub>-Elektrolyse Herstellung von Ameisensäure

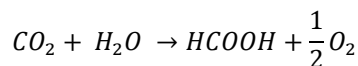
**Kurzbeschreibung:** Die CO<sub>2</sub>-Elektrolyse ist eine elektrochemische Technologie, bei der CO<sub>2</sub> in chemische Produkte umwandelt werden kann. Ein zentrales Produkt ist **Ameisensäure (HCOOH)**, ein vielseitig einsetzbarer Grundstoff für die chemische Industrie. Die Reaktion kann mit Strom aus erneuerbaren Quellen betrieben werden, wodurch CO<sub>2</sub> als Rohstoff genutzt und überschüssige erneuerbare Energie chemisch gespeichert werden kann.

### Grundprinzip CO<sub>2</sub>-Elektrolyse

Bei der CO<sub>2</sub>-Elektrolyse wird elektrische Energie genutzt, um CO<sub>2</sub> elektrochemisch umzuwandeln. An der Kathode wird CO<sub>2</sub> durch Aufnahme von Elektronen reduziert, während an der Anode eine Oxidationsreaktion abläuft. Je nach Katalysator und Betriebsbedingungen können unterschiedliche Produkte entstehen, darunter Gase wie Kohlenmonoxid, Methan oder Ethylen, aber auch flüssige Produkte wie Ameisensäure. Für eine effiziente CO<sub>2</sub>-Elektrolyse sind aktive, stabile und selektive Katalysatoren mit schneller Reaktionskinetik und guten Massentransporteigenschaften wichtig [1,2].

### CO<sub>2</sub>-Elektrolyse zu Ameisensäure

**Gesamtreaktion:** [3]



An der Kathode wird CO<sub>2</sub> adsorbiert, durch Elektronenübertragungen und Protonierungen zu Formiat und schließlich zu Ameisensäure reduziert. Im alkalischen Milieu wird Formiat und im sauren Milieu direkt Ameisensäure gebildet. Nebenreaktionen wie die Bildung von CO oder Wasserstoff müssen durch geeignete Katalysatoren und angepasste Zellbedingungen unterdrückt werden. Für die selektive Bildung von Formiat/Ameisensäure eignen sich Sn-, Bi-, Pb-, In- und Cd-basierte Katalysatoren sowie deren Oxide (z. B. SnO<sub>2</sub>, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [4,5].

### Aufbau Elektrolysezelle

Die Elektrolysezelle besteht typischerweise aus einer Kathode, einer Anode, einer Kationen- oder Anionenaustauschmembran und einem Produktbereich zur Sammlung der Ameisensäure [4]. Moderne Systeme nutzen Gasdiffusionselektroden (GDE), die einen effizienten Stofftransport von gasförmigem CO<sub>2</sub> zur Katalysatorschicht ermöglichen [6].

Die Elektrolyse von CO<sub>2</sub> zu Ameisensäure kann unter anderem in speziell entwickelten Drei-Kammern-Zellen erfolgen. Diese Zelle besteht aus drei Kammern, die durch eine Anionen-Austauschmembran (AEM) und eine Kationen-Austauschmembran (CEM) voneinander getrennt sind. An der Kathode wird CO<sub>2</sub> zu Formiat (HCOO<sup>-</sup>) reduziert. Die gebildeten Anionen wandern über die AEM in die zentrale Kammer, die ein saures

Ionenaustauschharz enthält. Dort reagieren die Formiat-Ionen mit Protonen aus der Anode zu Ameisensäure und Wasser [3,4].

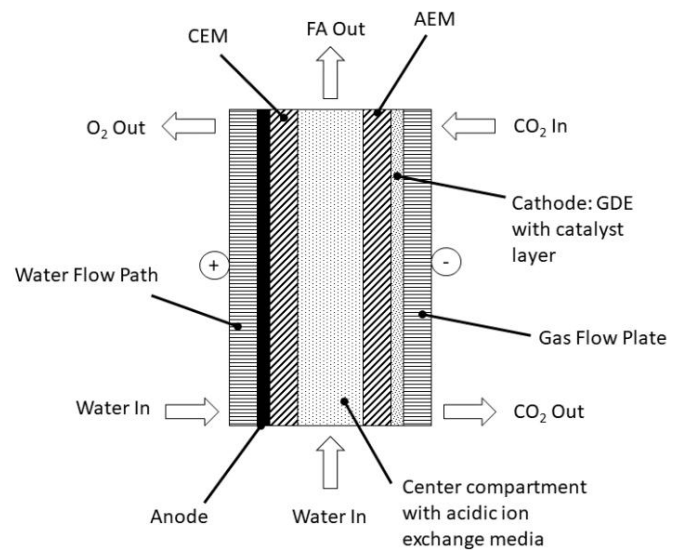


Abb. 1: Schematische Darstellung eines CO<sub>2</sub>-Elektrolyseurs zur Herstellung von Ameisensäure [4].

Bei der CO<sub>2</sub>-Elektrolyse zu Ameisensäure umfasst der Prozess neben der elektrochemischen Umwandlung auch die Behandlung von Nebenprodukten sowie die Aufkonzentrierung des verdünnten Ameisensäurestroms auf industriell relevante Konzentrationen (>85 wt%) [3].

**Vorteile:** präzise Steuerung von Reaktionsraten und Selektivitäten; Skalierbarkeit durch modulare Elektrolyseur- und Stack-Konzepte; Betrieb bei Raumtemperatur und Umgebungsdruck möglich; Kopplung an fluktuierende erneuerbare Energiequellen aufgrund der schnellen Reaktionszeiten elektrochemischer Systeme [1,6,7].

**Herausforderungen:** Hohe Investitions- und Betriebskosten durch komplexe Anlagen und Katalysatoren; hoher Energiebedarf, insbesondere bei niedriger Faraday- und Energieeffizienz; Langzeitstabilität von Katalysatoren und Membranen [3,6,8], sowie bislang begrenzte Betriebserfahrungen mit CO<sub>2</sub> aus industriellen Abgasströmen; niedrige CO<sub>2</sub>-Umwandlungsraten, Gewinnung von Ameisensäure in verwertbarer Konzentration/Reinheit

## Wirtschaftliche und ökologische Aspekte

Der Betrieb von CO<sub>2</sub>-Elektrolyseuren ist energieintensiv, wobei Stromkosten eine bedeutende Rolle spielen. Trotz hoher Anfangsinvestitionen können Skaleneffekte und technologische Fortschritte die Kosten langfristig senken. Gleichzeitig ermöglicht die CO<sub>2</sub>-Elektrolyse die Nutzung von CO<sub>2</sub> als Rohstoff und leistet so einen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft. In Kombination mit erneuerbaren Energien kann die CO<sub>2</sub>-Elektrolyse zur Reduktion von Treibhausgasemissionen beitragen [3,6,9]. Bei der Herstellung flüssiger Produkte können zusätzliche energieintensive Aufarbeitungsschritte (z. B. Destillation zur Erreichung industriell relevanter Konzentrationen) erforderlich sein.



**Anwendung:** Ameisensäure ist ein vielseitig einsetzbarer Grundstoff für viele Industrien. Sie wird als Ausgangsstoff für die Herstellung von Chemikalien und Kraftstoffen genutzt und findet Anwendung in der chemischen und pharmazeutischen Produktion, in der Landwirtschaft und in der Textil- und Lederverarbeitung. Darüber hinaus gewinnt sie zunehmend an Bedeutung als flüssiger Wasserstoffträger [6,10].

### ZEUS: Pilotanlage

- Umwandlung von CO<sub>2</sub> in **Ameisensäure (COOH)** → Einsatz in der chemischen Industrie
- Entwicklung von selektiven Katalysatoren
- Prozessoptimierung und REACH Zertifizierung
- Systemintegration: Beitrag zu einem geschlossenen Kohlenstoffkreislauf

## Charakteristische Daten CO<sub>2</sub>-Elektrolyse zur Herstellung von Ameisensäure (Richtwerte für eine noch nicht voll kommerziell etablierte Technologie)

Parameter	Typischer Wert	Anmerkung	Quellen
Technologiestatus	TRL 3-5	Niedertemperatur-C1-Elektrolyse: TRL = 6	[3,11]
Faradayscher Wirkungsgrad (FE)	80–95 %	abhängig von Katalysator und Bedingungen	[12,13]
Stromdichte	~ 0,2 A/cm <sup>2</sup>	allgemeiner Niedertemperatur-CO <sub>2</sub> eR-Benchmark	[11–13]
Zellspannung	~ 2,3 V	-	[12]
Energieeffizienz	~ 60 %	allgemeiner Niedertemperatur-CO <sub>2</sub> eR-Benchmark	[12]
Stabilität	< 1000 h (Ziel > 5000 h)	abhängig von Stromdichte, FE, Zellspannung, Zellkonfiguration	[12,13]

### Quellen:

- [1] Jouny M, Luc W, Jiao F. General Techno-Economic Analysis of CO<sub>2</sub> Electrolysis Systems. *Ind Eng Chem Res* 2018;57:2165–77. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b03514>.
- [2] Mason KG, Ynzunza JM, Velázquez JM. Electrolyzers in focus: advances in CO<sub>2</sub> electrolyzer designs. *Trends in Chemistry* 2025;7:474–86. <https://doi.org/10.1016/j.trechm.2025.06.002>.
- [3] Detz RJ, Ferchaud CJ, Kalkman AJ, Kemper J, Sánchez-Martínez C, Saric M, et al. Electrochemical CO<sub>2</sub> conversion technologies: state-of-the-art and future perspectives. *Sustainable Energy Fuels* 2023;7:5445–72. <https://doi.org/10.1039/D3SE00775H>.
- [4] Daniel Lust. Renewable District Energy Systems with Formic Acid based Hydrogen Storage. Dissertation. Universität Stuttgart, 2022.
- [5] Bagger A, Ju W, Varela AS, Strasser P, Rossmeisl J. Electrochemical CO<sub>2</sub> Reduction: A Classification Problem. *ChemPhysChem* 2017;18:3266–73. <https://doi.org/10.1002/cphc.201700736>.
- [6] Lu X, Leung DY, Wang H, Leung MKH, Xuan J. Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide to Formic Acid. *ChemElectroChem* 2014;1:836–49. <https://doi.org/10.1002/celec.201300206>.
- [7] Vos J, Ramírez A, Pérez-Fortes M. Learning from the past: Limitations of techno-economic assessments for low-temperature CO<sub>2</sub> electrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2025;213:115454. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115454>.
- [8] Raya-Imbernón A, Samu AA, Barwe S, Cusati G, Földi T, Hepp BM, et al. Renewable Syngas Generation via Low-Temperature Electrolysis: Opportunities and Challenges. *ACS Energy Lett* 2024;9:288–97. <https://doi.org/10.1021/acscenergylett.3c02446>.
- [9] De Luna P, Hahn C, Higgins D, Jaffer SA, Jaramillo TF, Sargent EH. What would it take for renewably powered electrosynthesis to displace petrochemical processes? *Science* 2019;364:eaav3506. <https://doi.org/10.1126/science.aav3506>.
- [10] Fernández-Caso K, Díaz-Sainz G, Alvarez-Guerra M, Irabien A. Electroreduction of CO<sub>2</sub>: Advances in the Continuous Production of Formic Acid and Formate. *ACS Energy Lett* 2023;8:1992–2024. <https://doi.org/10.1021/acscenergylett.3c00489>.
- [11] Pachamuthu S, Gao J, Ozden A, Legrand U, Favaro M, Isaacs M, et al. Scaling Low Temperature CO<sub>2</sub>-to-Syngas Electroreduction: Insights into Engineering Bottlenecks and Mitigation Strategies 2025. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2025-pw37p>.
- [12] Lee H, Kwon S, Park N, Cha SG, Lee E, Kong T-H, et al. Scalable Low-Temperature CO<sub>2</sub> Electrolysis: Current Status and Outlook. *JACS Au* 2024;4:3383–99. <https://doi.org/10.1021/jacsau.4c00583>.
- [13] Belsa B, Xia L, García De Arquer FP. CO<sub>2</sub> Electrolysis Technologies: Bridging the Gap toward Scale-up and Commercialization. *ACS Energy Lett* 2024;9:4293–305. <https://doi.org/10.1021/acscenergylett.4c00955>.