

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



**Kurzbeschreibung:** Bei der CO<sub>2</sub>-Elektrolyse wird CO<sub>2</sub> mithilfe von elektrischer Energie in chemische Produkte umgewandelt. Ein wichtiges Produkt ist **Synthesegas**, ein Gemisch aus Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H<sub>2</sub>), das als Ausgangsstoff für synthetische Kraftstoffe und Basischemikalien dient. 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

Die CO<sub>2</sub>-Elektrolyse ist ein elektrochemischer Prozess, bei dem CO<sub>2</sub> unter Einsatz elektrischer Energie an der Kathode reduziert wird, während an der Anode eine Oxidationsreaktion stattfindet. Je nach Katalysator und Betriebsbedingungen können unterschiedliche Produkte entstehen [1,2].

### CO<sub>2</sub>-Elektrolyse zur Herstellung von Synthesegas

Da im Elektrolyseur Wasser in Form von Dampf oder Flüssigkeit (abhängig von Reaktionsbedingungen und Elektrolyseurtyp) vorliegt, wird ein Teil des für die CO<sub>2</sub>-Elektrolyse eingesetzten elektrischen Stroms zur Bildung von H<sub>2</sub> anstelle von CO genutzt. Dies führt zwar zu einer Verringerung der Faraday-Effizienz (FE) der CO-Bildung, ermöglicht jedoch die einstufige Erzeugung von Synthesegas (CO/H<sub>2</sub>-Gemisch). Je nach Prozessführung und Elektrolyseurkonzept kann das H<sub>2</sub>:CO-Verhältnis gezielt eingestellt werden [1]. Die Zusammensetzung des Synthesegases wird durch Zellspannung, Stromdichte, Katalysatormaterial und Elektrolyt beeinflusst [3,4]. Als geeignete Katalysatoren für die selektive Reduktion von CO<sub>2</sub> zu CO (als Bestandteil von Synthesegas) werden unter anderem Ag, Au und Zn, verschiedene bimetallische Katalysatoren, sowie metall- und stickstoffdotierte Kohlenstoffmaterialien eingesetzt [1].

### Technologische Ansätze der CO<sub>2</sub>-Elektrolyse

Für die elektrochemische Herstellung von Synthesegas aus CO<sub>2</sub> existieren verschiedene technologische Ansätze. Zu den zentralen zählen die Niedertemperatur- (LT) und die Hochtemperatur-Elektrolyse (HT) [2].

#### 1. Niedertemperatur-CO<sub>2</sub>-Elektrolyse (LT)

Bei der Niedertemperatur-CO<sub>2</sub>-Elektrolyse werden häufig Membrane-Electrode-Assembly-(MEA)-Zellen mit Gasdiffusions-elektroden (GDE) und einer Anionenaustauschmembran (AEM) eingesetzt [2,4,5], wobei sowohl CO als auch Synthesegas hergestellt werden kann [1]. Die Einstellung des gewünschten H<sub>2</sub>:CO-Verhältnisses (z. B. 2:1) kann entweder durch Kombination eines CO<sub>2</sub>-Elektrolyseurs mit einem PEM-Wasserelektrolyseur oder über die Betriebsparameter des CO<sub>2</sub>-Elektrolyseurs (z. B. Zellspannung, CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Zufuhr) erfolgen [1].

In Abbildung 1 sind Optionen zur Erzeugung von Synthesegas mit einem H<sub>2</sub>:CO-Verhältnis von 2:1 dargestellt [1].

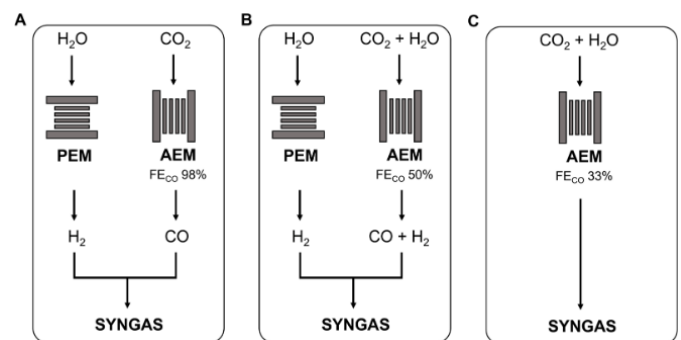


Abb. 1: Optionen für die Produktion von Synthesegas durch Niedrigtemperatur-CO<sub>2</sub>-Elektrolyse [1].

#### 2. Hochtemperatur-CO<sub>2</sub>-Elektrolyse (HT, SOE)

Die HT-CO<sub>2</sub>-Elektrolyse basiert auf der Festoxid-Elektrolyseur-Technologie (SOE) und arbeitet bei Temperaturen von etwa 600–800 °C. In diesem Temperaturbereich erfolgt eine Co-Elektrolyse von CO<sub>2</sub> und Wasserdampf, bei der CO und H<sub>2</sub> gleichzeitig gebildet werden. Dadurch kann Synthesegas mit gezielt einstellbarer Zusammensetzung in einem einzigen elektrochemischen Prozessschritt erzeugt werden [2].

#### Gesamtreaktion (HT, Co-Elektrolyse):

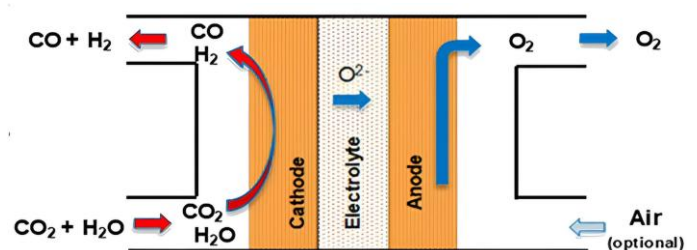
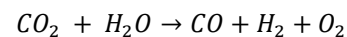


Abb. 2: Schematische Darstellung einer SOE-Zelle zur HT Co-Elektrolyse von CO<sub>2</sub> zur Erzeugung von Synthesegas [2].

**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 [3,5,6], wobei dies insbesondere für Niedertemperatur-CO<sub>2</sub>-Elektrolyse gilt, während Hochtemperatursysteme aufgrund notwendiger Betriebstemperaturen nur eingeschränkt dynamisch betrieben werden können.

**Herausforderungen:** Hohe Investitions- und Betriebskosten durch komplexe Anlagen und Katalysatoren; hoher Energiebedarf, insbesondere bei niedriger Faraday- und Energieeffizienz; Langzeitstabilität von Katalysatoren und Membranen [1,2,6], sowie bislang begrenzte Betriebserfahrungen mit CO<sub>2</sub> aus industriellen Abgasströmen; niedrige CO<sub>2</sub>-Umwandlungsraten, sodass CO<sub>2</sub> häufig im Kathodenprodukt verbleibt und eine Abtrennung bzw. Rückführung erforderlich ist.

### 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. Im Fall von Synthesegas hängen die Kosten der Trenntechnik für CO/CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> stark vom vorgesehenen Endverwendungszweck des Produkts ab, wobei der Energiebedarf der Trennung geringer ist als der der Elektrolyse. Für die Trenntechnik fallen jedoch zusätzliche

Investitionskosten (CAPEX) an. Die CO<sub>2</sub>-Elektrolyse ermöglicht 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 [2,6,7].

**Anwendung:** Synthesegas ist ein vielseitiger chemischer Grundstoff, dessen H<sub>2</sub>:CO-Verhältnis je nach Prozess angepasst wird (z. B. 1:1 für Hydroformylierung, 2:1 für Fischer-Tropsch-Synthese). Es dient als Ausgangsstoff für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe, Methanol und weiterer Chemikalien und kann als zukünftige Kohlenstoffquelle für die Chemieindustrie genutzt werden [1,2,5].

### ZEUS: Pilotanlage

- Umwandlung von bis zu bis zu 46 kg/h CO<sub>2</sub> in Synthesegas (CO/H<sub>2</sub>) → Nutzung in der Stahlindustrie (z. B. Reduktionsgas)
- Entwicklung von selektiven Katalysatoren
- Verbesserung der Langzeitstabilität & Umwandlungseffizienz
- Systemintegration: Beitrag zu einem geschlossenen Kohlenstoffkreislauf



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

Parameter	Niedertemperatur (Typischer Bereich)	Hochtemperatur (Typischer Bereich)	Quellen
Technologiestatus	TRL 5-6	TRL 6-8	[2,8]
Faradaischer Wirkungsgrad (FE)	~ 90 % CO-FE	~ 100 % CO-FE (kommerziell demonstriert)	[8,9]
Stromdichte	~ 0,30 A/cm <sup>2</sup>	0,45 A/cm <sup>2</sup> (kommerziell demonstriert); > 1,0 A/cm <sup>2</sup> in skalierten Systemen	[8–10]
Zellspannung	~ 3 V	-	[8,10]
Energieeffizienz	Typisch: ~ 60 %	~ 80 % elektrische Effizienz	[8,10]
Stabilität	~ 2500 h (Ziel > 5000 h)	2000 h (kommerziell demonstriert)	[8–10]
H <sub>2</sub> /CO-Verhältnis	katalysator- & spannungsabhängig, gezielt einstellbar		[2]

### Quellen:

- [1] 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/acsenergylett.3c02446>.
- [2] 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>.
- [3] 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>.
- [4] 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>.
- [5] 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>.
- [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] 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>.
- [8] 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>.
- [9] 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/acsenergylett.4c00955>.
- [10] 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>.