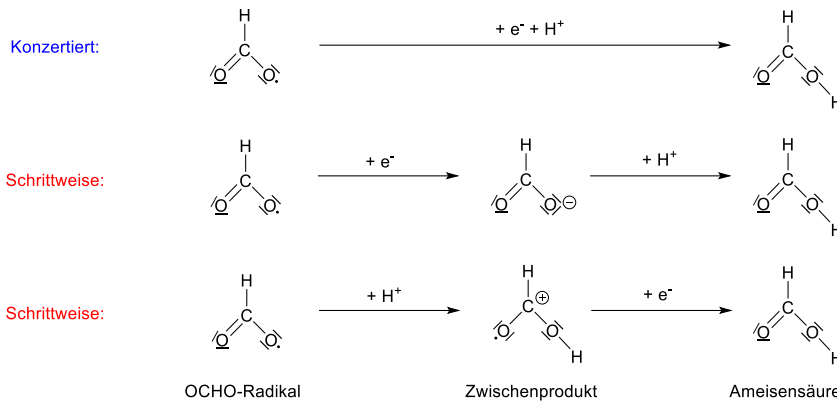


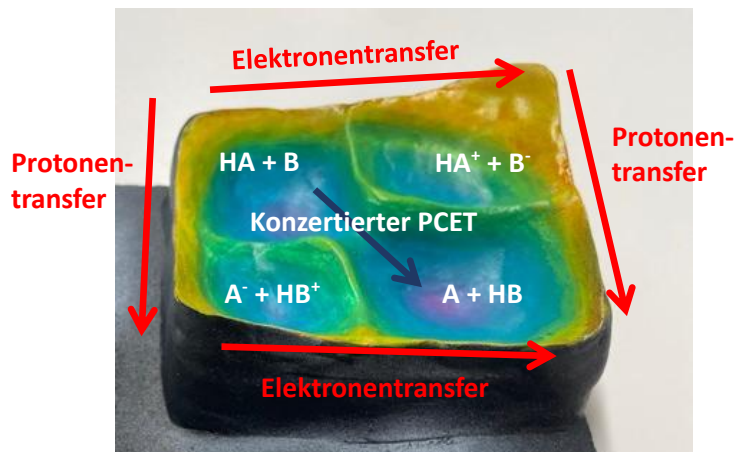
Musterlösungen Arbeitsblätter CO₂-Reduktion

AB1:

Aufgabe 1:



Aufgabe 2:



Die Farben des Modells zeigen wie bei Landkarten die Höhe des Energieprofils an der jeweiligen Stelle. Niedrige Bereiche des Modells sind blauer, höhere Bereiche gelber eingefärbt. Die vier Täler im 3D-Modell stehen für stabile Zustände während der Reaktion, also die Edukte HA + B und die Produkte A + HB, aber auch für die Zwischenprodukte HA⁺ + B⁻ sowie A⁻ + HB⁺. Diese geladenen Zwischenprodukte sind energetisch weniger vorteilhaft als die Edukte und Produkte, weshalb die Täler im Modell höher liegen als die der Edukte und Produkte.

Um von einem Tal zu einem anderen zu gelangen, müssen erst die Energieberge überquert werden, es muss also Energie zugeführt werden. Die Berge zwischen den Tälern stehen damit für die Aktivierungsenergien der Reaktion.

Möchte man die hohen Energieberge umgehen, die bei einer schrittweisen Reaktion nötig sind, kann alternativ der diagonale Weg direkt von den Edukten zu den Produkten gewählt werden. Auch für diesen Weg muss der Hügel in der Mitte des Modells überwunden werden, der jedoch deutlich niedriger als die Berge zu den Zwischenprodukten ist. Dieser günstigste Weg ist der konzertierte Reaktionsweg.

AB3:

Beobachtung:

Sobald die Schwefelsäure auf das Calciumcarbonat trifft, schäumt das Gemisch stark auf. Aus dem mit dem Kolben verbundenen Glasrohr in der Elektrolytlösung steigen Gasblasen auf, die die Zinn-Elektrode umspülen.

Nachdem der Strom an die Elektrolysevorrichtung angelegt wurde, können auch an der Graphitelektrode Gasblasen beobachtet werden. Die Elektrolytlösung verändert sich optisch nicht.

AB4:

Beobachtung:

Die Lösung in BG 1 verfärbt sich bereits nach kurzer Zeit erst gelb und anschließend tiefrot. Auch die elektrolysierte Lösung in BG 2 färbt sich nach kurzer Zeit entsprechend, wenn auch weniger intensiv.

Die Lösung in BG 3 verfärbt sich gelblich, jedoch ist auch nach über 15 Minuten keine Rotfärbung zu erkennen.

AB 5:

Die Frage „**Welche Chancen und Risiken bestehen für eine industrielle Etablierung dieses Verfahrens?**“ findet sich in allen Gruppen. Sie kann etwa wie folgt beantwortet werden:

Der Erfolg der elektrochemischen CO₂-Reduktion ist von vielen Faktoren abhängig, vor allem aber von den Kosten und der Effizienz der Methode. Dass die Reduktion prinzipiell möglich ist, zeigt der Schulversuch, der schon mit wenigen und günstigen Materialien auskommt und in kurzer Zeit eine gut nachweisbare Menge an Ameisensäure bildet. **Zinn als Elektrodenmaterial** ist jedoch recht teuer und wird teilweise unter umweltschädigenden Bedingungen abgebaut. Um alternative, möglichst noch effizientere Elektrodenmaterialien zu finden, ist weitere Forschung nötig. Vor allem die **PCET-Forschung** trägt dazu bei, besser zu verstehen, welche Faktoren die Reduktion von Kohlenstoffdioxid begünstigen. Besonders interessant ist dabei, die Überspannung der CO₂-Reduktion an der Elektrode weiter zu senken, um weniger Strom bei der Reaktion zu benötigen. Generell muss die genutzte **Elektrizität CO₂-neutral** hergestellt worden sein, um die positiven nachhaltigen Effekte des Prozesses nicht zunichte zu machen. Denkbar wäre auch, die Reaktion zur **Stromspeicherung** zu nutzen, also um überschüssige Energie (z.B. durch hohe Sonneneinstrahlung am Tag) als chemische Energie (Ameisensäure) zu speichern und zu anderer Zeit mithilfe einer Brennstoffzelle wieder freizusetzen.

Aufgrund der geringen Menge an Kohlenstoffdioxid in der Atemluft ist das vorgestellte Verfahren als „Reinigung“ der Luft bzw. „Gewinnung von Chemikalien aus Luft“ eher nicht realistisch. Viel sinnvoller wäre es, **Kraftwerksabgase** mit einer hohen CO₂-Konzentration als Edukt der Reaktion zu nutzen.

Die elektrochemische Reduktion von Kohlenstoffdioxid allein kann nicht die Lösung zur Emissionsreduktion sein. Es müssen auch andere Maßnahmen getroffen werden, um die Entstehung von Kohlenstoffdioxid zu vermeiden. Sie kann jedoch dazu beitragen, nur schwierig vermeidbare Emissionen zu senken bzw. zu verhindern und gleichzeitig Chemikalien zu produzieren, die sonst aus fossilen Rohstoffen hergestellt werden müssten. Wenn diese Rohstoffe direkt vor Ort weiter genutzt werden könnten, würden zudem **Transportwege** und damit auch Kosten gespart werden können.

Fossile Rohstoffe bilden zurzeit immer noch die grundlegende Kohlenstoffquelle für die Chemie und Pharmazie, weshalb in Zukunft auch neue Wege erforscht und genutzt werden müssen, um diese Abhängigkeit abzubauen. Die Verwendung von CO_2 als Kohlenstoff-Baustein zur Synthese wäre eine vielversprechende Möglichkeit dafür.

Gruppe 1 Abfallvermeidung:

Frage 1:

Die elektrochemische Reduktion von Kohlenstoffdioxid zu Ameisensäure lässt lediglich sehr geringe Mengen an Nebenprodukten entstehen, weshalb die Reaktion nach diesem Kriterium durchaus als grün bezeichnet werden kann. Wasserstoff als Produkt der Konkurrenzreaktion ist kein direktes Treibhausgas (da es keine Infrarotstrahlung absorbiert), kann in der Erdatmosphäre jedoch mit Radikalen reagieren, die sonst andere Treibhausgase abbauen würden.

Kohlenstoffmonoxid entsteht bei der Verwendung einer Zinnelektrode praktisch gar nicht, wäre jedoch giftig und trägt zur Zerstörung der Ozonschicht bei. Die Menge und Art an Nebenprodukten können durch Optimierung der verwendeten Kathode weiter reguliert und reduziert werden, was sich positiv auf dieses Kriterium auswirken würde.

Wenn lediglich der Aspekt der Abfallvermeidung betrachtet wird, ist also nur der ungefährliche Sauerstoff negativ zu bewerten, der an der Anode entsteht. Dieser sollte wenn möglich weiter genutzt werden.

Gruppe 2 Atomökonomie:

Frage 1:

Die Atome des Kohlenstoffdioxid-Moleküls finden sich alle im entstandenen Ameisensäure-Molekül wieder, ebenso die Wasserstoffatome des Wasseratoms. Die Sauerstoffatome der Wassermoleküle finden sich jedoch im Nebenprodukt Sauerstoff wieder, also nicht im erwünschten Produkt.

Von den 6 Atomen der beiden Edukte CO_2 und H_2O finden sich also 5 im Produkt HCOOH wieder.

Frage 2:

Die vorliegende Reaktion weist zwar keine perfekte, aber immer noch sehr gute Atomökonomie auf und kann deshalb für dieses Kriterium als grün bezeichnet werden.

Zur Abtrennung von Kohlenstoffdioxid aus Abgasen oder Luft sind jedoch oft weitere Chemikalien (z.B. das im Unterrichtsgang verwendete Calciumhydroxid) nötig. Auch die im Experiment durchgeführte Freisetzung des Kohlenstoffdioxids aus Calciumcarbonat und Schwefelsäure fügt weitere Chemikalien auf der Eduktseite hinzu. Diese vorgeschalteten Prozesse verschlechtern die Atomökonomie deutlich.

Gruppe 3 Verwendung von Katalysatoren:

Frage 1:

Aus dem Unterricht ist bereits bekannt, dass Katalysatoren an der Reaktion teilnehmen, ihre Aktivierungsenergie senken, die Reaktionsgeschwindigkeit beschleunigen und schlussendlich unverändert aus der Reaktion wieder hervorgehen.

Neu bei der Elektrokatalyse ist, dass die Aktivierungsenergie nicht in Form von Wärme, sondern als elektrische Energie zugeführt werden muss. Auch hier sorgt der passende Elektrokatalysator dafür, dass die gewünschte Reaktion eine möglichst niedrige Überspannung an der Elektrodenoberfläche besitzt, also möglichst schon ab der mathematisch aus den Standardpotentialen errechneten Spannung abläuft.

Analog zu „klassischen“ Katalysatoren, die durch Senken der Aktivierungsenergie manche Reaktionen bei einer bestimmten Temperatur überhaupt erst ermöglichen, ermöglichen Elektrokatalysatoren manche Reaktionen durch das Senken der Überspannung bei unveränderter angelegter Spannung.

Neu ist jedoch, dass Elektrokatalysatoren auch durch das Erhöhen von Überspannungen der Konkurrenzreaktionen die gewünschte Reaktion positiv beeinflussen. Meist steht bei elektrochemischen Vorgängen die Wasserelektrolyse in Konflikt mit dem gewünschten Prozess, der erst bei deutlich höheren Spannungen abläuft. Ein vergleichbarer Faktor bei thermischen Katalysevorgängen ist normalerweise nicht relevant.

Frage 2:

Dieses Kriterium der grünen Chemie ist für die vorgestellte Reaktion eindeutig erfüllt, da eine Zinnelektrode als Elektrokatalysator genutzt wurde. Würde die Reaktion an anderen Elektroden durchgeführt, würde sie oft weniger selektiv, schwächer oder gar nicht stattfinden bzw. stattdessen nur eine Wasserelektrolyse ablaufen.

Die recht kleine Menge an gebildeter Ameisensäure und die Bildung von Wasserstoff als Nebenprodukt zeigt jedoch auch, dass weitere Experimente mit anderen Elektrodenmaterialien nötig sind, um noch besser geeignete Katalysatoren zu finden.

Gruppe 4 Energienutzung:

Frage 1:

Ameisensäure als Reduktionsprodukt ist recht ungefährlich und kann deshalb recht unproblematisch gelagert und transportiert werden. Aufgrund der Flüchtigkeit und Brennbarkeit von Ameisensäure sollte jedoch auf eine ausreichende Distanz zu Zündquellen geachtet werden.

Der große Vorteil von Ameisensäure im Vergleich zu anderen Reduktionsprodukten wie Kohlenstoffmonoxid ist sein flüssiger Aggregatzustand bei Raumtemperatur. So kann bestehende Infrastruktur wie Rohrleitungen oder Tanks direkt genutzt werden.

Da Kohlenstoffdioxid als Gas deutlich aufwändigere Transportmaßnahmen erfordern würde, wäre eine Durchführung der Reduktion direkt an der Entstehungsquelle des Gases günstig.

Frage 2:

Die Reduktion von Kohlenstoffdioxid benötigt neben Wasser und Kohlenstoffdioxid lediglich elektrischen Strom, der nachhaltig hergestellt werden kann. Hohe Temperaturen oder Drücke sind nicht nötig. Im Gegensatz zu thermischen Prozessen, bei denen oft viel Energie durch Abwärme verloren geht, sind elektrochemische Reaktionen deutlich effizienter. Jedoch geht auch hier Energie durch Überspannungen an der Elektrode, also kinetische Hemmungen der Reaktion, verloren. Diese können durch die Forschung an modernen Elektrodenmaterialien jedoch immer weiter reduziert werden. Die elektrochemische CO₂-Reduktion kann deshalb als recht energieeffizient und grün angesehen werden.