

Gemeinsame Aufgabenpools der Länder

Pool für das Jahr 2025

Aufgaben für das Fach Chemie

Kurzbeschreibung

Aufgabentitel	Power-to-X-Technologien
Anforderungsniveau	grundlegend
Inhaltsbereiche	♦ Chemische Reaktionen ♦ Energetische und kinetische Aspekte chemischer Reaktionen ♦ 1. Hauptsatz der Thermodynamik ♦ Katalyse ♦ Enthalpie ♦ Satz von Hess ♦ Gleichgewichtsreaktionen ♦ chemisches Gleichgewicht ♦ Lebenswelt und Gesellschaft ♦ Ökonomische und ökologische Aspekte der Chemie
Materialien	♦ M 1 Methan aus Power-to-Gas ♦ M 2 Gleichgewichtskonstante K für die reverse Wassergas-Shift-Reaktion (rWGS) ♦ M 3 Fischer-Tropsch-Synthese ♦ M 4 Energiequellen für den Strom in Deutschland 2023 ♦ M 5 Kopernikus-Projekt P2X
Quellenangaben	♦ M 1 ♦ Ausfelder, F. & Dura, H. (2019, 31. August). <i>OPTIONEN FÜR EIN NACHHALTIGES ENERGIE-SYSTEM MIT POWER-TO-X-TECHNOLOGIEN</i>. DECHEMA. https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/2019_DEC_P2X_Kopernikus_RZ_Webversion02-p-20005425.pdf (Zugriff am: 02.04.2024) ♦ Botes, F. G., Ciobica, I. M., C Ferreira, A. & Loosdrecht, J. (2013, August). <i>Fischer-Tropsch-Synthese: Catalysts and Chemistry</i>. https://www.researchgate.net/publication/258685985_Fischer-Tropsch_Synthesis_Catalysts_and_Chemistry (Zugriff am: 10.07.2022) ♦ <i>Windpark in der Ostsee</i> (2024). EnBW. https://www.enbw.com/erneuerbare-energien/windenergie/unsere-windparks-auf-see/baltic-2/ (Zugriff am: 28.03.2023)

	♦ M 2 berechnet auf Grundlage thermodynamischer Zustandsgleichungen aus Murthy, L., Muruganandam, L., Shantha S. & Smith, B. (2010, Januar). <i>A Review of the water Gas Shift Reaction Kinetics</i>. https://www.researchgate.net/publication/228506095_A_Review_of_the_Water_Gas_Shift_Reaction_Kinetics (Zugriff am: 10.07.2022) ♦ M 3 ♦ Botes, F. G., Ciobica, I. M., C Ferreira, A. & Loosdrecht, J. (2013, August). <i>Fischer-Tropsch-Synthese: Catalysts and Chemistry</i>. https://www.researchgate.net/publication/258685985_Fischer-Tropsch_Synthesis_Catalysts_and_Chemistry (Zugriff am: 10.07.2022) ♦ Haynes, W., Lide, D. R. & Bruno, T. J. (2014). <i>CRC Handbook of Chemistry and Physics</i> (95. Aufl.). Taylor & Francis. ♦ M 4 ♦ Ausfelder, F. & Dura, H. (2019, 31. August). <i>OPTIONEN FÜR EIN NACHHALTIGES ENERGIE-SYSTEM MIT POWER-TO-X-TECHNOLOGIEN</i>. DECHEMA. https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/2019_DEC_P2X_Kopernikus_RZ_Webversion02-p-20005425.pdf (Zugriff am: 02.04.2024) ♦ <i>STROMMIX: AKTUELLE STROMERZEUGUNG DEUTSCHLAND</i> (2024, 1. Januar). Strom-Report. https://strom-report.com/strom/ (Zugriff am: 03.04.2024) ♦ M 5 <i>Häufig gestellte Fragen zu Power-to-X</i> (o. D.). Bundesministerium für Bildung und Forschung. https://www.kopernikus-projekte.de/faqs/ptx_faq (Zugriff am: 03.04.2024)
Hilfsmittel	♦ digitales Hilfsmittel, das mindestens die Funktionalität eines WTR hat ♦ mathematisch-naturwissenschaftliche Formelsammlung
fachpraktischer Anteil	nein

1 Aufgabe

Power-to-X-Technologien

Power-to-X-Technologien (P2X) bieten die Möglichkeit, fossile Energieträger (z. B. Erdgas) und Erdölprodukte (z. B. Benzin oder Diesel) durch klimafreundliche synthetische Energieträger zu ersetzen.

	BE
1 Entwickeln Sie eine schematische Darstellung für die Prozessabläufe der einzelnen Reaktionsschritte der Synthese von Methan (M 1).	5
2 Berechnen Sie anhand der Änderung der Enthalpie für den ersten Schritt der Methan-Synthese die durchschnittliche Masse an Wasserstoff, die mit der Energie des Offshore-Windparks „Baltic 2“ theoretisch täglich produziert werden könnte (M 1).	5
3 Leiten Sie aus den in Tabelle 1 gegebenen Gleichgewichtskonstanten eine Aussage zum Einfluss der Temperatur auf die Lage des Gleichgewichts bei der reversen Wassergas-Shift-Reaktion (rWGS) her (M 1, M 2). Überprüfen Sie Ihre Aussage durch eine Berechnung der Änderung der Enthalpie (M 3).	7
4 Skizzieren Sie ein beschriftetes Energieverlaufs-Diagramm für die Reaktion von Kohlenstoffmonooxid und Wasserstoff und ergänzen Sie Ihr Diagramm für die katalysierte Reaktion (Fischer-Tropsch-Synthese) (M 1, M 3). Erklären Sie die Auswirkung niedriger Prozesstemperaturen auf die Reaktionsgeschwindigkeit der Fischer-Tropsch-Synthese. Begründen Sie den daraus resultierenden notwendigen Einsatz eines Katalysators bei Temperaturen von unter 400 °C (M 1, M 3).	8
5 Beurteilen Sie anhand von vier Aspekten den Beitrag aktueller P2X-Technologien zum Klimaschutz durch Verringerung der Kohlenstoffdioxid-Emissionen (M 4, M 5).	5

Quellen (ggf. verändert):

- [1] Ausfelder, F. & Dura, H. (2019, 31. August). *OPTIONEN FÜR EIN NACHHALTIGES ENERGIE-SYSTEM MIT POWER-TO-X-TECHNOLOGIEN. DECHEMA*. https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/2019_DEC_P2X_Kopernikus_RZ_Webversion02-p-20005425.pdf (Zugriff am: 02.04.2024)
- [2] Botes, F. G., Ciobica, I. M., C Ferreira & A., Loosdrecht, J. (2013, August). *Fischer-Tropsch-Synthese: Catalysts and Chemistry*: https://www.researchgate.net/publication/258685985_Fischer-Tropsch_Synthesis_Catalysts_and_Chemistry (Zugriff am: 10.07.2022)
- [3] Windpark in der Ostsee (2024). EnBW. <https://www.enbw.com/erneuerbare-energien/windenergie/unsere-windparks-auf-see/baltic-2/> (Zugriff am: 28.03.2023)
- [4] Murthy, L., Muruganandam, L., Shantha S., Smith, B. (2010, Januar). *A Review of the water Gas Shift Reaction Kinetics*: https://www.researchgate.net/publication/228506095_A_Review_of_the_Water_Gas_Shift_Reaction_Kinetics (Zugriff am: 10.07.2022)
- [5] Haynes, W., Lide, D. R. & Bruno, T. J. (2014). *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (95. Aufl.). Taylor & Francis.
- [6] STROMMIX: AKTUELLE STROMERZEUGUNG DEUTSCH-LAND (2024, 1. Januar). Strom-Report. <https://strom-report.com/strom/> (Zugriff am: 03.04.2024)
- [7] *Häufig gestellte Fragen zu Power-to-X* (o. D.). Bundesministerium für Bildung und Forschung. https://www.kopernikus-projekte.de/faqs/ptx_faq (Zugriff am: 03.04.2024)

2 Material

Material 1: Methan aus Power-to-Gas [1] – [3]

Die Entwicklung von Power-to-X-Technologien (P2X) verfolgt das Ziel, elektrische Energie aus erneuerbaren Energien zur Produktion von synthetischen Kraftstoffen zu nutzen. Fossile Kraftstoffe sollen dann durch die synthetisch hergestellten ausgetauscht werden.

In einem Power-to-Gas-Prozess (P2G) wird beispielsweise Methan schrittweise synthetisiert. Erdgas, dessen Hauptbestandteil Methan ist, kann so ersetzt werden.

Schritt 1: Es erfolgt die Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser, bei der die Änderung der Enthalpie bezogen auf ein Mol Wasser +285,83 kJ beträgt. Klimafreundlich wird dieser Schritt durch das Nutzen von elektrischer Energie aus erneuerbaren Energien.

Beispielsweise werden durch den Offshore-Windpark „Baltic 2“ in der Nähe der Insel Rügen mit seinen 80 Windkraftanlagen durchschnittlich 1,2 Milliarden Kilowattstunden elektrische Energie pro Jahr (entspricht ca. 8.200.000 kJ pro Minute) eingespeist.

Schritt 2: Bei der „reversen Wassergas-Shift-Reaktion“ (rWGS) werden Kohlenstoffdioxid und der zuvor synthetisierte Wasserstoff in einer Gleichgewichtsreaktion zu Kohlenstoffmonooxid und Wasserdampf umgesetzt.

Schritt 3: Kohlenstoffmonooxid und Wasserstoff werden in einer exothermen Gleichgewichtsreaktion zu Methan und Wasserdampf umgesetzt. Die Synthese wird bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen von unter 400 °C unter Einsatz von Katalysatoren auf Eisenbasis durchgeführt (Fischer-Tropsch-Synthese).

Material 2: Gleichgewichtskonstante K für die reverse Wassergas-Shift-Reaktion rWGS [4]

Tab. 1: Gleichgewichtskonstante K der rWGS in Abhängigkeit von der Temperatur

ϑ in °C	400	800	1200
K	0,0845	1,0663	3,396

Material 3: Fischer-Tropsch-Synthese [2]

Bei der Reaktion von Kohlenstoffmonooxid und Wasserstoff gibt es auf Teilchenebene genau einen Übergangszustand, bei dem ein Kohlenstoffmonooxid-Molekül und zwei Wasserstoff-Moleküle aufeinandertreffen und Methan- und Wasser-Moleküle bilden. Durch Katalysatoren auf Basis von Eisen wird der Reaktionsprozess der Fischer-Tropsch-Synthese in zwei Teilprozesse untergliedert. Dabei wird im ersten Schritt das Kohlenstoffmonooxid-Molekül an der Eisen-Oberfläche des Katalysators adsorbiert. Im zweiten Schritt wird das Sauerstoff-Atom des Kohlenstoffmonooxid-Moleküls durch Wasserstoff-Atome ersetzt und Methan-Moleküle werden gebildet.

Tab. 2: Ausgewählte Standardbildungsenthalpien (für $T = 298,15$ K und $p = 101,325$ kPa) [5]

Verbindung	CO(g)	CO ₂ (g)	H ₂ O(l)	H ₂ O(g)	CH ₄ (g)
$\Delta_f H^\circ$ in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$	-110,53	-393,51	-285,83	-241,83	-74,6

Material 4: Energiequellen für den Strom in Deutschland 2023 [1], [6]

Die in der Erforschungs- und Optimierungsphase befindlichen P2X-Prozesse nutzen aktuell noch überwiegend den in Deutschland üblichen Strommix für die Wasser-Elektrolyse sowie für Kühl- und Regelungsprozesse.

Neben den Energiequellen sind auch die Kohlenstoffdioxid-Quellen für die rWGS ein Faktor für die Klimafreundlichkeit der P2X-Technologien.

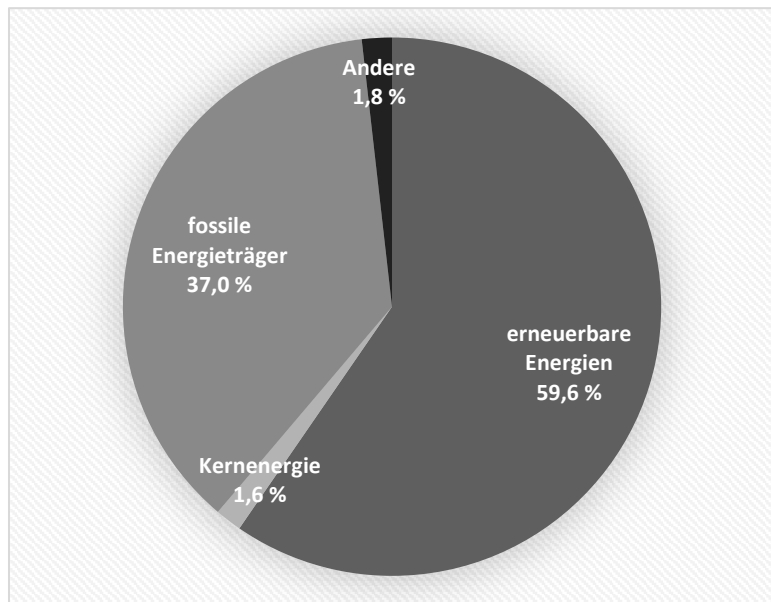


Abb. 1: Strommix Deutschland 2023 [6]

Material 5: Kopernikus-Projekt P2X [7]

Kopernikus-Projekte sind eine Initiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, die Technologien und Lösungen zur Erreichung der deutschen Klimaschutzziele entwickeln und gleichzeitig eine sichere, klimafreundliche und bezahlbare Energieversorgung für Deutschland ermöglichen sollen.

Die häufig zum Projekt gestellte Frage „Warum Power-to-X?“ wird wie folgt beantwortet:

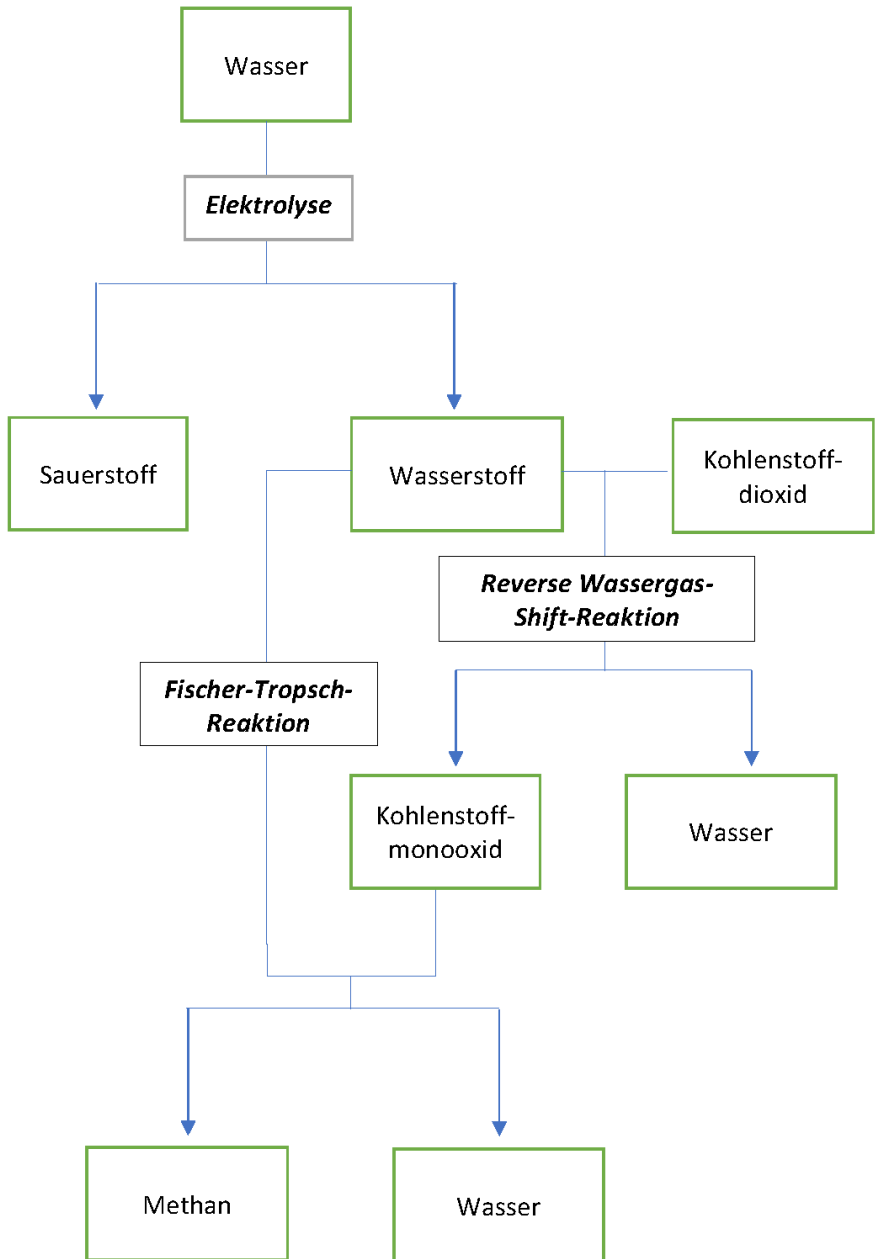
„Unser Energiesystem beruht auf stofflichen Energieträgern, die fast ausschließlich fossiler Natur sind, wie Öl, Kohle und Erdgas [...].“

Mit Power-to-X können diese Ressourcen nachhaltig ersetzt werden. Aus erneuerbarem Strom („Power“) werden dabei stoffliche Energieträger („X“) wie Wasserstoff, Chemieprodukte oder synthetische Treibstoffe hergestellt. So können entlang von Wertschöpfungsketten aus Abgasen (CO₂) wieder neue Energieträger entstehen. Die Dekarbonisierung des Energiesektors ermöglicht somit die Defossilisierung der anderen Sektoren. [...]

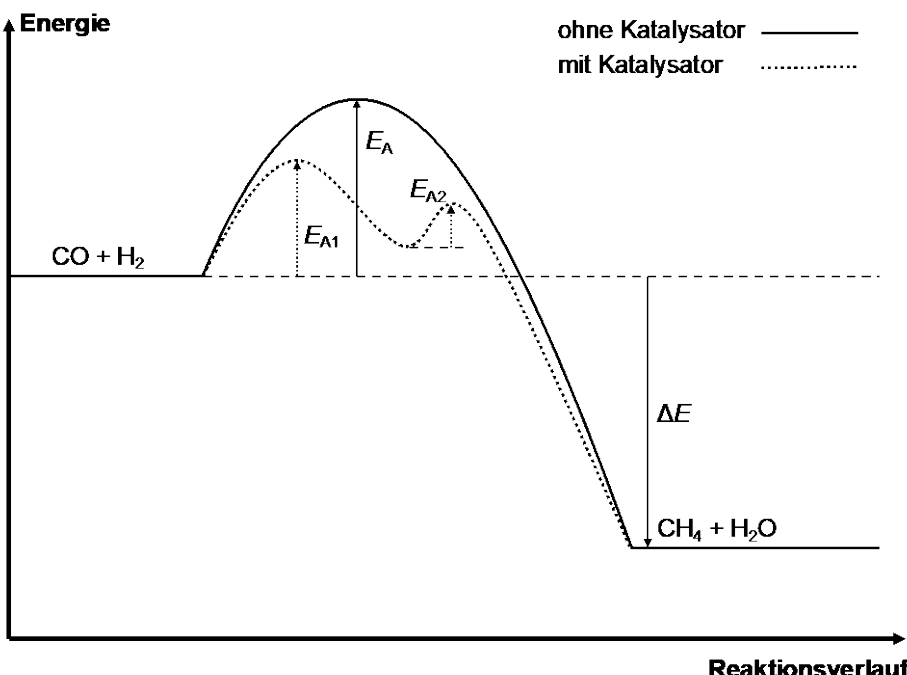
Eine Wertschöpfungskette beschreibt die chemische Aufwertung der nachhaltigen Ausgangsstoffe Kohlenstoffdioxid und Wasser. Hierbei wird Elektrizität aus erneuerbaren Quellen eingesetzt, um die Moleküle in höherwertige Verbindungen umzuwandeln. Diese können als Grundstoffe in der chemischen Industrie, als Kraftstoffe oder als stoffliche Energieträger eingesetzt werden.“

3 Erwartungshorizont

Der Erwartungshorizont stellt für jede Teilaufgabe eine mögliche Lösung dar. Nicht dargestellte korrekte Lösungen sind als gleichwertig zu akzeptieren.

		BE/AFB		
		I	II	III
1	<u>Entwicklung einer schematischen Darstellung für die Prozessabläufe:</u>  <pre> graph TD Wasser[Wasser] --> Elektrolyse[Elektrolyse] Elektrolyse --> Sauerstoff[Sauerstoff] Elektrolyse --> Wasserstoff[Wasserstoff] Wasserstoff --> FischerTropsch[Fischer-Tropsch-Reaktion] Wasserstoff --> ReverseShift[Reverse Wassergas-Shift-Reaktion] ReverseShift --> Kohlenstoffmonooxid[Kohlenstoff-monooxid] ReverseShift --> Wasser2[Wasser] FischerTropsch --> Methan[Methan] FischerTropsch --> Wasser3[Wasser] Kohlenstoffdioxid[Kohlenstoff-dioxid] --> ReverseShift </pre>	2	3	
2	<u>Berechnung der Masse an Wasserstoff:</u> ♦ $2 \text{H}_2\text{O(l)} \rightarrow 2 \text{H}_2\text{(g)} + \text{O}_2\text{(g)}$ ♦ Berechnung der elektrischen Energie für einen Tag:		1 1	

	$8.200.000 \text{ kJ} \cdot 60 \cdot 24 = 1,1808 \cdot 10^{10} \text{ kJ}$ ♦ Berechnung der Stoffmenge und Masse an Wasserstoff: $n(\text{H}_2) = \frac{1,1808 \cdot 10^{10} \text{ kJ}}{285,83 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}}$ $= 4,1311 \cdot 10^7 \text{ mol}$ $m(\text{H}_2) = M(\text{H}_2) \cdot n(\text{H}_2)$ $= 2,0 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 4,1311 \cdot 10^7 \text{ mol}$ $= 8,26 \cdot 10^7 \text{ g} = 82,6 \text{ t}$		2	1
3	<u>Herleitung einer Aussage zum Einfluss der Temperatur auf die Lage des Gleichgewichts:</u> ♦ $K(400^\circ\text{C}) < K(1200^\circ\text{C})$, d. h. K wird größer mit zunehmender Temperatur. ♦ Die Gleichgewichtskonstante ergibt sich für diese Reaktion aus dem Quotienten des Produktes der Stoffmengen der Reaktionsprodukte und dem Produkt der Stoffmengen der Edukte. ♦ Die Gleichgewichtskonstante wird größer, wenn der Zähler im Quotienten größer wird, d. h. die Lage des Gleichgewichts hat sich in Richtung der Produkte verschoben und das hat zur Folge, dass die Stoffmengenkonzentrationen der Produkte steigen. <u>Überprüfung durch Berechnung der Änderung der Enthalpie:</u> ♦ $\text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g}) \rightleftharpoons \text{CO}(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$ $\Delta H = 1 \text{ mol} \cdot (\Delta_f H^\circ(\text{H}_2\text{O}(\text{g}))) + 1 \text{ mol} \cdot \Delta_f H^\circ(\text{CO}(\text{g}))$ $- 1 \text{ mol} \cdot \Delta_f H^\circ(\text{CO}_2(\text{g}))$ $= +41,15 \text{ kJ}$ ♦ $\Delta H > 0$, d. h. es handelt sich um eine endotherme Reaktion, die durch hohe Temperaturen begünstigt wird.	2	1	2

4	<u>Skizze eines Energieverlaufs-Diagramms:</u>  <u>Auswirkungen niedrigerer Prozesstemperaturen:</u> ♦ Je niedriger die Temperatur, desto geringer ist die Reaktionsgeschwindigkeit einer chemischen Reaktion, weil weniger Teilchen mit notwendiger Mindestenergie (Stoßtheorie) vorliegen (weniger wirksame Zusammenstöße). ♦ Entsprechend verläuft die Fischer-Tropsch-Synthese bei geringen Temperaturen langsamer. <u>Begründung des Einsatzes eines Katalysators:</u> ♦ Diesen Nachteil können Katalysatoren ausgleichen, da sie chemische Reaktionen durch Absenkung der Aktivierungsenergie beschleunigen. ♦ Durch die Beschleunigung der Reaktion erhöht sich die produzierte Menge Methan pro Zeit.	2	2	
5	<u>Beurteilung aktueller P2X-Technologien zum Klimaschutz:</u> ♦ Für die Herstellung der synthetischen Energieträger wird aktuell Strom aus fossilen Energieträgern genutzt. ♦ Bei deren Umwandlung in Strom oder Wärme kann zusätzliches Kohlenstoffdioxid entstehen. ♦ Um die Klimafreundlichkeit zu gewährleisten, müssen sowohl Strom als auch Wärme ausschließlich aus erneuerbaren Energien stammen. ♦ Das benötigte Kohlenstoffdioxid müsste ausschließlich entweder aus den Abfallprodukten z. B. von Biogas- oder Bioethanol-Anlagen oder direkt aus der Luft entnommen werden. ♦ Sachurteil	1	1	3

	Summe¹	10	15	5
--	--------------------------	-----------	-----------	----------

¹ Bei jeder Aufgabe liegen die Anzahlen der Bewertungseinheiten – abhängig vom Anforderungsniveau – in den Bereichen, die der folgenden Tabelle zu entnehmen sind:

Anforderungsniveau	erhöht			grundlegend		
Anforderungsbereich	I	II	III	I	II	III
Anzahl der BE	11 - 13	17 - 21	8 - 10	10 - 12	13 - 16	4 - 6

4 Standardbezug²

Teilaufgabe	Kompetenzbereich			
	S	E	K	B
1	5		2, 7	
2	16, 17			
3	16, 17	8	2, 8	
4	8	8	7, 9, 10	
5				6, 10

5 Bewertungshinweise

Die Bewertung der erbrachten Prüfungsleistungen hat sich für jede Teilaufgabe nach der am rechten Rand der Aufgabenstellung angegebenen Anzahl maximal erreichbarer Bewertungseinheiten (BE) zu richten.

Für die Bewertung der Gesamtleistung eines Prüflings ist ein Bewertungsraster³ vorgesehen, das angibt, wie die in den drei Prüfungsteilen insgesamt erreichten Bewertungseinheiten in Notenpunkte umgesetzt werden.

² Zu jeder Teilaufgabe sind zu jedem Kompetenzbereich die Nummern der Standards gemäß den Bildungsstandards für das Fach Chemie für die Allgemeine Hochschulreife zu nennen, die zur Bearbeitung der Aufgabe erforderlich sind.

³ Das Bewertungsraster ist Teil des Dokuments „Beschreibung der Struktur“, das auf den Internetseiten des IQB zum Download bereitsteht.