Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen

Entwicklung der Bildungsstandards für die Allgemeine Hochschulreife in den Naturwissenschaften

Lernaufgabe für das Fach Chemie

Kurzbeschreibung

Was treibt Raketen an?

Diese Aufgabe wurde von Fachexpertinnen und Fachexperten der Länder, überwiegend Lehrkräften, entwickelt. Die Aufgabenentwicklergruppe wurde von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der Fachdidaktik der Chemie beraten. Das Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen hat den Prozess koordiniert.

Anforderungsniveau	grundlegend ☐	erhöht ☒
Kompetenzbereiche und relevante Standards	**Sachkompetenz** Die Lernenden … S 2 leiten Voraussagen über die Eigenschaften der Stoffe auf Basis chemischer Strukturen und Gesetzmäßigkeiten begründet ab; **S 3 interpretieren Phänomene der Stoff- und Energieumwandlung bei chemischen Reaktionen;** S 8 beschreiben Einflussfaktoren auf chemische Reaktionen und Möglichkeiten der Steuerung durch Variation von Reaktionsbedingungen sowie durch den Einsatz von Katalysatoren; **S 16 entwickeln Reaktionsgleichungen;** **S 17 wenden bekannte mathematische Verfahren auf chemische Sachverhalte an.** **Erkenntnisgewinnungskompetenz** Die Lernenden … E 3 stellen theoriegeleitet Hypothesen zur Bearbeitung von Fragestellungen auf; E 10 reflektieren die eigenen Ergebnisse und den eigenen Prozess der Erkenntnisgewinnung;	

	Kommunikationskompetenz Die Lernenden … K 1 recherchieren zu chemischen Sachverhalten zielgerichtet in analogen und digitalen Medien und wählen für ihre Zwecke passende Quellen aus; **K 2 wählen relevante und aussagekräftige Informationen und Daten zu chemischen Sachverhalten und anwendungsbezogenen Fragestellungen aus und erschließen Informationen aus Quellen mit verschiedenen, auch komplexen Darstellungsformen;** K 7 nutzen geeignete Darstellungsformen für chemische Sachverhalte und überführen diese ineinander; K 8 strukturieren und interpretieren ausgewählte Informationen und leiten Schlussfolgerungen ab. K 13 tauschen sich mit anderen konstruktiv über chemische Sachverhalte aus, vertreten, reflektieren und korrigieren gegebenenfalls den eigenen Standpunkt. **Bewertungskompetenz** Die Lernenden … B 6 beurteilen Chancen und Risiken ausgewählter Technologien, Produkte und Verhaltensweisen fachlich und bewerten diese; B 10 bewerten die gesellschaftliche Relevanz und ökologische Bedeutung der angewandten Chemie; B 14 reflektieren Kriterien und Strategien für Entscheidungen aus chemischer Perspektive.
Basiskonzepte	♦ Energiekonzept ♦ Konzept der chemischen Reaktion
Inhaltsbereich	♦ Chemische Reaktionen
konkrete Inhalte	♦ Entropie ♦ freie Enthalpie ♦ Gibbs-Helmholtz-Gleichung
Materialien	M1 Die Ariane 5 Rakete M2 Raketenschub und spezifischer Impuls ISP M3 Die Entropie und die Gibbs-Helmholtz-Gleichung M4 Kenndaten von Raketentreibstoffgemischen M5 Molare Standardgrößen (bei 298 K und 1013 hPa) M6 Temperaturabhängigkeit der freien Enthalpie Hilfe 1-5
Bearbeitungszeit	180 Minuten

Hilfsmittel	♦ Taschenrechner ♦ digitales Endgerät mit Internetzugang (evtl. QR-Code-App) ♦ Formelsammlung
Differenzierungsmöglich-keit	♦ 1.2: Hilfe 1 und Hilfe 2 ♦ 2.1: Hilfe 3 ♦ 3.2: Hilfe 4 ♦ 4.: Differenzierung: Herleitung von Kenndaten aus dem Diagramm zur Abhängigkeit der freien Enthalpie von der Temperatur; Hilfe 5
experimenteller Anteil	ja ☐ nein ☒
Lernvoraussetzungen	♦ Energieformen ♦ Energiediagramm ♦ Enthalpie ♦ 1. Hauptsatz der Thermodynamik ♦ Satz von Hess

1 Hinweise zur Durchführung

Ziel der Lernaufgabe

Generell sind die Teilaufgaben 1-4 unabhängig voneinander bearbeitbar. Allerdings sind dann die abweichenden Lernvoraussetzungen zu beachten.

Aufbauend auf dem Vorwissen zur Reaktionsenthalpie und dem Satz von Hess sollen die Begriffe Entropie und freie Enthalpie sowie ihr Bezug zueinander in der Gibbs-Helmholtz-Gleichung erarbeitet werden.

Die Entropie wird dabei vereinfacht als „Maß der Unordnung“ betrachtetet. Es erfolgt keine statistische Betrachtung als Anzahl der Mikrozustände.

Als motivierender Alltagsbezug für die Auseinandersetzung mit den drei thermodynamischen Größen wird das Thema Raketenstart gewählt. In diesem Zusammenhang sind einige Vereinfachungen notwendig. So kann z. B. auf unterschiedliche Ariane-Versionen nicht eingegangen werden. Die Helium-Drucktanks, die neben den Brennstofftriebwerken an der Oberstufe für Steuerungsvorgänge im All verwendet werden, werden ebenso wie die vielen verschiedenen Reaktionen in den Feststoffboostern bewusst weggelassen. Hier bietet sich damit allerdings auch eine Anknüpfungsmöglichkeit für leistungsstarke bzw. überdurchschnittlich interessierte Lernende. Heute wird in den Ariane-5-Raketen Methylhydrazin aufgrund der höheren Dichte häufiger als Raketentreibstoff verwendet als Hydrazin. Das Aufstellen der Reaktionsgleichung (und die folgende Berechnung) für Methylhydrazin ist aber ungleich schwieriger ($4\ CH_5N_2 + 5\ N_2O_4 \rightarrow 4\ CO_2 + 13\ H_2O + 9\ N_2$). Hier muss dementsprechend eine didaktische Reduktion erfolgen. In den wichtigen Faktoren „Giftigkeit“, „Lagerfähigkeit“ und „Hypergolität“ bestehen zwischen Hydrazin und Methylhydrazin nur geringe Unterschiede.

Für die Berechnungen werden die Standardentropien und Standardenthalpien der Reaktionsteilnehmer für die Gasphase verwendet, da dies der Situation im Raketentriebwerk entspricht. An diesem Beispiel kann man evtl. darauf eingehen, dass die tatsächlichen Bedingungen beim Raketenstart deutlich komplexer sind, da z. B. das Ausströmen der verflüssigten Gase aus den Tanks und die im Vergleich zu Standardbedingungen deutlich höheren Temperaturen Einfluss auf den Impuls haben. Eine starke Vereinfachung ist für die mathematische Auseinandersetzung mit dem Problem aber notwendig.

Die Reihung der Materialien mag auf den ersten Blick verwirren, da Teilaufgabe 1 mit Material 3 beginnt. Dies ist ein Kompromiss, der dadurch zustande kommt, dass allen Lernenden – unabhängig von den zu bearbeitenden Aufgaben – das Material 1 als motivierender Einstieg dienen soll.

Teilaufgabe 1

Die Bedeutungen und Zusammenhänge der Größen Entropie, Reaktionsenthalpie und freier Enthalpie werden Schritt für Schritt in einem Arbeitsblatt erarbeitet. Dazu werden die vielen Informationen aus einem Simple Club-YouTube-Film in den Feldern einer vorgegebenen Tabelle übersichtlich zusammengefasst. (Alternativ ist auch die Verwendung des Schulbuchs als Quelle oder eine Internetrecherche denkbar.) Die bereits bekannten Begriffe endotherm und exotherm und die neuen Begrifflichkeiten Entropiezunahme und Entropieabnahme bilden die Zeilen und Spalten der Tabelle. Die Begriffe endergonisch und exergonisch müssen den verbleibenden Tabellenfeldern zur freien Enthalpie zugeordnet werden. Dies ist nicht einfach, da hier die Temperaturabhängigkeit der freien Enthalpie berücksichtigt werden muss. Es ist empfehlenswert diese Aufgabe in Partnerarbeit oder in der Kleingruppe zu bearbeiten. Eine

Vereinfachung wurde bezüglich der Reaktionsenthalpie vorgenommen. Die Stichpunkte „Energie wird aufgenommen/freigesetzt“ müssten korrekt „Energie in Form von Licht und/oder Wärme wird aufgenommen/freigesetzt“ lauten. Dies wird aber im Lernvideo nicht thematisiert und könnte verwirrend wirken. Es empfiehlt sich bei der Besprechung der Ergebnisse auf dieses Problem einzugehen.

Die erarbeitete Matrix wird anschließend auf vier verschiedene Reaktionen mit unterschiedlichen thermischen und entropischen Eigenschaften angewandt. Die Reaktionen und die Benennungen (z. B. Boudouard-Gleichgewicht) sind bewusst so gewählt, dass alle vier Fälle abgedeckt sind und zudem eine Verknüpfung zu anderen Bereichen der Chemie und Biologie möglich ist. Haben Lernende Probleme, das „Maß der Unordnung“ auf der Teilchenebene zu interpretieren, können ihnen Darstellungen der vier Reaktionen auf der Teilchenebene angeboten werden (Hilfen 1 und 2).

Teilaufgabe 2

In der Teilaufgabe 2 werden an zwei Beispielen die Größen ΔH, ΔS und ΔG berechnet und verglichen. Um eine Wiederholung immer gleicher Rechenwege zu vermeiden, kann man die Aufgabe als arbeitsteilige Partnerarbeit organisieren. Die Ergebnisse der Kleingruppen werden verglichen, um mögliche Berechnungsfehler aufzudecken.

Die berechnete freie Enthalpie ist bei der Knallgasreaktion kleiner als bei der Reaktion von Hydrazin mit Distickstofftetraoxid, während es sich beim spezifischen Impuls genau andersherum verhält (Material 4). Dies sorgt bei einem Vergleich erst einmal für Verwirrung, da man aus Material 2 herleiten kann, dass für beide Größen eine gemeinsame Basis vorhanden ist.

Hier könnte man weiterführend/differenzierend die Bezugsgrößen Kilogramm beim spezifischen Impuls und Mol bei der freien Enthalpie thematisieren. Berechnet man die freie Enthalpie der beiden Reaktionen für die Teilchenzahlen in einem Kilogramm Brennstoff, so kommt man auf Werte, die den Zahlenverhältnissen beim spezifischen Impuls eher entsprechen. Die Zahlenwerte für spezifischen Impuls und freie Enthalpie divergieren natürlich auch aus anderen Gründen, jedoch kann ein solcher, vereinfachter Vergleich für das Verständnis von naturwissenschaftlichen Zusammenhängen sicher sinnvoll sein.

Zur Differenzierung könnten das Aufstellen der Reaktionsgleichung und die Berechnungen mit Methylhydrazin (siehe oben) als Aufgabe auf höherem Niveau angeboten werden. Kenndaten von Methylhydrazin sind z. B. unter https://webbook.nist.gov zu finden.

Die Teilaufgabe eignet sich sehr gut für eine arbeitsteilige Partnerarbeit. Ein Vergleich der Ergebnisse zwischen den einzelnen Arbeitsgruppen ermöglicht die Klärung von evtl. auftretenden Berechnungsfehlern (Vorzeichen- und Einheitenfehler, J und kJ).

Teilaufgabe 3

Die Teilaufgabe 3 erweitert den Blick der Lernenden von der fachlichen Ebene auf gesellschaftliche Aspekte. Das heißt, es werden die ökologischen und ökonomischen Kriterien zum Einsatz eines Raketentreibstoffes erörtert und eine mögliche Alternative diskutiert.

Recherche und Diskussion ermöglichen eine Auseinandersetzung mit alternativen Raketentreibstoffen. Die freie Internetrecherche kann in Anlehnung an die Angaben in der Tabelle (Material 4) erfolgen. So sind passende Suchparameter vorgegeben und eine erfolgversprechende Recherche passender Fakten möglich. Die Diskussion kann unter verschiedensten Aspekten erfolgen. Einige Anregungen sind in der Hilfe 4 angegeben.

Teilaufgabe 4

Die Teilaufgabe ermöglicht eine andere, abstraktere Sicht auf die Gibbs-Helmholtz-Gleichung und eine Anwendung der mathematischen Formelsprache. Im Diagramm wird den Lernenden der Vorzeichenwechsel der Größe ΔG bei einer bestimmten Temperatur verdeutlicht. Außerdem können sie ihre Kenntnisse aus dem Mathematikunterricht anwenden. Sie ermitteln aus der Steigung m und dem y-Achsenabschnitt n die Größen ΔS und ΔH. Hilfe 5 bringt die Lernenden bei Schwierigkeiten auf den richtigen Weg. Diese Teilaufgabe eignet sich auch sehr gut als Differenzierungsmöglichkeit für stärkere / schnellere Lernende.

2 Aufgabenstellung

Teilaufgabe 1 Die freie Reaktionsenthalpie ΔG (Material 3)

1.1 Ordnen Sie – auf Basis des Lernvideos – die vorgegebenen Stichpunkte den passenden Zellen der untenstehenden Tabelle zu. (Material 3)

Freiwillig	Exotherm	Bei niedrigen Temperaturen ΔG<0	Unfreiwillig
Unordnung nimmt zu	Energie wird aufgenommen	Immer ΔG<0	Unordnung nimmt ab
Endotherm	Energie wird freigesetzt	Unfreiwillig	Exergonisch
Bei niedrigen Temperaturen ΔG>0	Exergonisch	Endergonisch	Entropieabnahme
Freiwillig	Immer ΔG>0	Bei hohen Temperaturen ΔG>0	Endergonisch
Entropiezunahme	Bei hohen Temperaturen ΔG<0		

	ΔS<0		ΔS>0	
ΔH<0	ΔG	ΔG	ΔG	
	Beispielreaktion		Beispielreaktion	
ΔH>0	ΔG		ΔG	ΔG
	Beispielreaktion		Beispielreaktion	

Tab. Zusammenhang zwischen ΔH, ΔS und ΔG

1.2 Ermitteln Sie für folgende Prozesse die jeweilige qualitative Entropie- (ΔS) und Enthalpieänderung (ΔH).
Ordnen Sie die Reaktionen anschließend korrekt in die obige Tabelle ein. (Material 3, Hilfe 1 und Hilfe 2)

Boudouard Gleichgewicht (Hin-Reaktion)	**Verbrennung im Bunsenbrenner**	**Fotosynthese**	**Knallgasreaktion**
Umsetzung von Kohlenstoffdioxid mit glühender Kohle zu Kohlenstoffmonooxid	Reaktion von z. B. Propan mit Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid und Wasser	Bildung von Glucose und Sauerstoff aus Wasser und Kohlenstoffdioxid in Pflanzen mit Hilfe des Sonnenlichts	Explosionsartige Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser

Teilaufgabe 2: Reaktionen in den Triebwerken (Material 1, 2, 4 und 5)

2.1 Formulieren Sie die Reaktionsgleichungen für die im Haupt – und Oberstufentriebwerk ablaufenden Reaktionen.
Berechnen Sie jeweils die Standardreaktionsenthalpie ($\Delta_R H°$) und Standardreaktionsentropie ($\Delta_R S°$) pro Mol Brennstoff. (Material 1, 4, 5, Hilfe 3)

2.1 Berechnen Sie mit Hilfe der Gibbs-Helmholtz-Gleichung jeweils die freie Standardreaktionsenthalpie $\Delta_R G°$ pro Mol Brennstoff auf Basis der Ergebnisse von Aufgabe 2.1.

2.3 Vergleichen Sie Rechenwege, Ergebnisse und mögliche Fehlerquellen der Aufgaben 2.1 und 2.2 im Plenum.

2.4 Begründen Sie den Zusammenhang zwischen dem spezifischen Impuls der jeweiligen Treibstoffgemische und der freien Enthalpie $\Delta_R G°$ der ablaufenden Reaktionen. (Material 2)

Teilaufgabe 3: Eigenschaften der Treibstoffgemische (Material 1 und 4)

3.1. Für die Hauptstufe und Oberstufe der Ariane 5-Trägerrakete werden unterschiedliche Brennstoffgemische verwendet. Stellen Sie jeweils eine Hypothese zum Grund der Verwendung unterschiedlicher Brennstoffgemische in Haupt- und Oberstufe auf. (M1, M4)

3.2. Für die Ariane 6, eine neue europäische Trägerrakete, wurde neben Wasserstoff und Hydrazin auch Methan als Raketentreibstoff diskutiert. Letztendlich entschied man sich aber sowohl bei der Haupt- als auch bei der Oberstufe für Wasserstoff.
Recherchieren Sie relevante Informationen zum Einsatz von Methan als Raketentreibstoff und ergänzen Sie die Tabelle (Material 4).
Diskutieren sie die Vor- und Nachteile von Methan gegenüber Wasserstoff oder Hydrazin. (Hilfe 4)

Teilaufgabe 4: Grafische Ermittlung der thermodynamischen Größen (Material 6)

4.1. Ermitteln Sie anhand des Diagramms den Temperaturbereich für den die Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff freiwillig abläuft. (Material 6)

4.2. Ermitteln Sie nachvollziehbar aus dem Diagramm die Werte für $\Delta_R S°$ und $\Delta_R H°$. (Material 6, Hilfe 5)

3 Material für Lernende

Material 1

Die Ariane 5 Rakete

Der Start einer Ariane 5 Rakete vom Weltraumbahnhof in Kouru ist immer ein aufsehenerregendes Ereignis. Fast 800 Tonnen Startgewicht werden durch den Schub gewaltiger Raketentriebwerke bis auf eine Maximalgeschwindigkeit von 28.000 km/h beschleunigt.

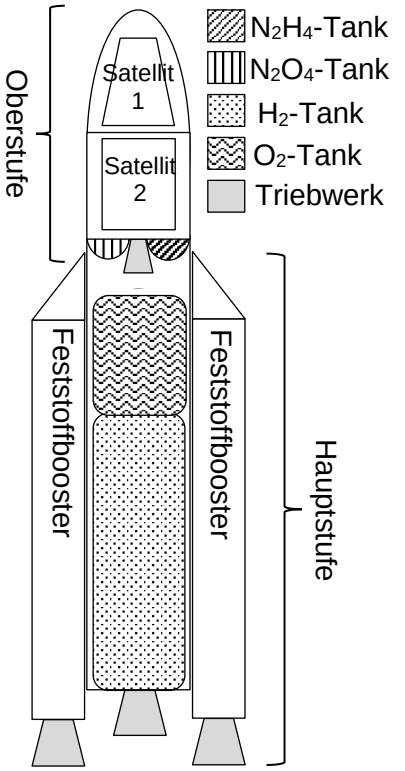


Abbildung 1: vereinfachte Zeichnung einer Ariane 5 Rakete, IQB, 2019.

European Space Agency. (2018). BepiColombo liftoff [Video]. Kourou, Französisch-Guyana: ESA, CNES, Arianespace.

Zum Abheben und Erreichen des Alls ist eine enorme Beschleunigung notwendig. Die Ariane 5 besitzt drei Antriebselemente mit unterschiedlichen Brennstoffen.

Mit Ende des Start-Countdowns zündet zunächst das Haupttriebwerk, in dem Wasserstoff mit Sauerstoff zur Reaktion gebracht wird. Sieben Sekunden danach folgt die Zündung der Feststoff-Booster. Die Rakete hebt ab, beschleunigt und erreicht nach ca. 10 min das Weltall. Booster und Hauptstufe werden jeweils nach dem Ausbrennen abgesprengt und fallen zur Erde zurück.

Das Treibwerk der Oberstufe ermöglicht im All z. B. die Ansteuerung von geostationären Umlaufbahnen, in denen die transportierten Satelliten ausgesetzt werden. In diesem Treibwerk wird ein hypergoles[1] Gemisch aus Hydrazin und Distickstofftetraoxid zur Reaktion gebracht.

Material 2

Raketenschub und spezifischer Impuls ISP

Entscheidend für die Leistungsfähigkeit einer Antriebsstufe ist vor allem der **Spezifische Impuls I_{SP}** des Treibstoffgemisches. Dieser ist definiert als der Schub, der pro Zeiteinheit und pro Kilogramm verbrauchten Treibstoff erzeugt wird. Als Einheiten sind nebeneinander [$m \cdot s^{-1}$] und [$Ns \cdot kg^{-1}$] in Verwendung, wobei sich die Zahlenwerte entsprechen.

Vereinfacht handelt es sich beim Spezifischen Impuls um die Geschwindigkeit, mit der die Gase aus der Düse strömen. Dabei gilt: Je mehr Energie bei der chemischen Reaktion im Raketentriebwerk freigesetzt wird und je mehr Teilchen dabei entstehen, desto größer ist die Ausströmgeschwindigkeit und damit auch der spezifische Impuls.

[1] Als Hypergole bezeichnet man Raketentreibstoffgemische, die sofort beim Kontakt reagieren (ohne äußere Energiezufuhr)

Material 3

Die Entropie und die Gibbs-Helmholtz-Gleichung

Quelle: simpleclub (2015). Gibbs-Helmholtz-Gleichung und Entropie [Film]. Verfügbar unter https://www.youtube.com/watch?v=xPF2hn6DPNg (Zugriff am 11. Mai 2020)

Material 4

Kenndaten von Raketentreibstoffgemischen

Wegen der vielen unterschiedlichen Eigenschaften sind in der Weltraumtechnik verschiedenste Treibstoffgemische im Einsatz.

Tabelle 1: Kenndaten von Raketentreibstoffgemischen

Brennstoff	**Wasserstoff** H_2	**Hydrazin** N_2H_4	**Methan**
Eigenschaften	Sdp. -252 °C farblos, geruchlos	Sdp. 113,5 °C farblos, giftig stechend riechend, krebsauslösend	
Lagerung	verflüssigt (in Drucktanks bei -80 °C)	bei Raumtemperatur	
Oxidator	Sauerstoff O_2	Distickstofftetraoxid N_2O_4	Sauerstoff O_2
Eigenschaften	Sdp. -183 °C farblos, geruchlos	Sdp: 21 °C; ätzend, giftig	
Lagerung	verflüssigt (in Drucktanks bei -80 °C)	bei Raumtemperatur	
Hypergolität	Nein	Ja	
Reaktionsprodukte	Wasser	Stickstoff, Wasser	
spezifischer Impuls I_{SP} [Ns·kg^{-1}] bzw. [m·s^{-1}]	3830	2862	

Quelle: IQB, 2019.

Material 5

Molare Standardgrößen (bei 298 K und 1013 hPa)

Molare Standardbildungsenthalpie ($\Delta_f H°_m$): Energie, die bei der Bildung von einem Mol des Stoffes aus den Elementen frei wird oder aufgenommen werden muss
Molare Standardentropie ($S°_m$): Grad der Unordnung von einem Mol des Stoffes unter Standardbedingungen

Tabelle 2: Molare Standardgrößen

Name	Formel	Aggregatszustand	$\Delta_f H°_m$ in $kJ \cdot mol^{-1}$	$S°_m$ in $J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
Distickstofftetraoxid	N_2O_4	g	9,6	304,2
Distickstofftetraoxid	N_2O_4	l	-19,6	209,2
Hydrazin	N_2H_4	g	95,4	238,7
Hydrazin	N_2H_4	l	50,6	121,2
Kohlenstoffdioxid	CO_2	g	-393,3	213,8
Methan	CH_4	g	74,6	186,2
Sauerstoff	O_2	g	0	205
Stickstoff	N_2	g	0	191,6
Wasser	H_2O	g	-241,8	188,8
Wasser	H_2O	l	-285,8	69,9
Wasserstoff	H_2	g	0	130,7

Quelle: IQB, 2019.

Material 6

Temperaturabhängigkeit der freien Enthalpie

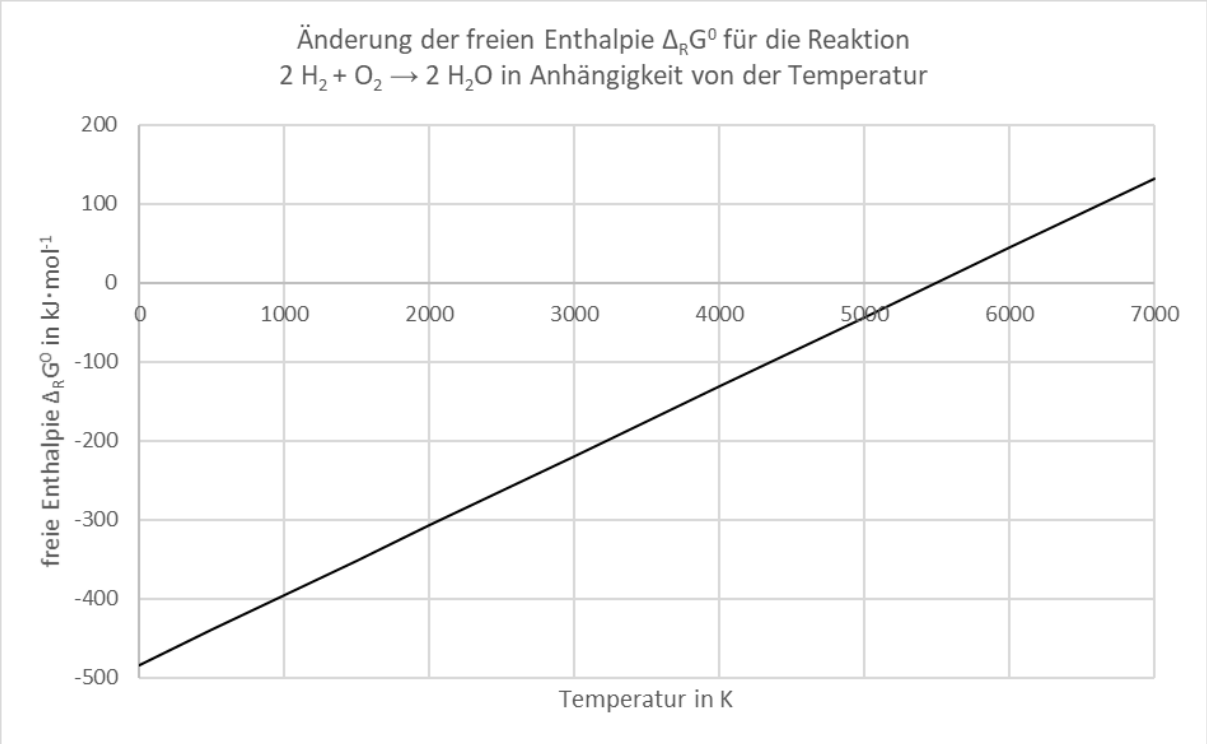


Abbildung 2: Temperaturabhängigkeit der freien Enthalpie, IQB, 2019.

4 Weiterführendes Material

Hilfe 1

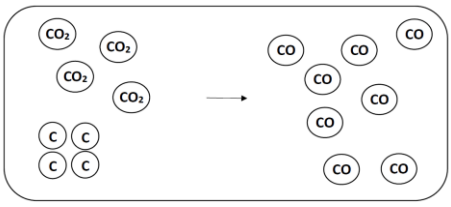
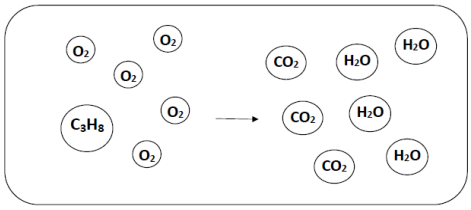
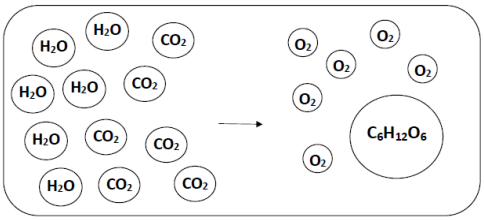
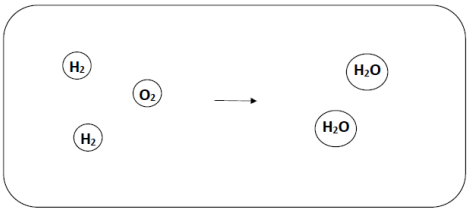
Stellen Sie jeweils die Reaktionsgleichung auf.

Für die Entropieänderung sind Stoffmengen und Aggregatzustände der Edukte und Produkte entscheidend!

Hilfe 2

Betrachten Sie die Reaktionen im Teilchenmodell.

Die Moleküle sind hier vereinfacht dargestellt

<table>
<tr>
<td>Boudouard Gleichgewicht (Hin-Reaktion)
C + CO_2 → 2 CO
 
</td>
<td>Verbrennung von Propan
C_3H_8 + 5 O_2 → 3 CO_2 + 4 H_2O
 
</td>
</tr>
<tr>
<td>Fotosynthese
6 H_2O + 6 CO_2 → $C_6H_{12}O_6$ + 6 O_2
 
</td>
<td>Knallgasreaktion
2 H_2 + O_2 →2 H_2O
 
</td>
</tr>
</table>

Hilfe 3

Nach dem Satz von Hess gilt

$\Delta_R H° = \Sigma \Delta_f H°_{m\ (Produkte)} - \Sigma \Delta_f H°_{m\ (Edukte)}$.

Entsprechend kann man auch die Entropieänderung berechnen

$\Delta S_R° = \Sigma S°_{m\ (Produkte)} - \Sigma S°_{m\ (Edukte)}$.

Beachten Sie bei der Berechnung die Stoffmengenverhältnisse.

Hilfe 4

Beachten Sie **ökonomische Aspekte** wie z. B. die Kosten für die Beschaffung und Lagerung der Brennstoffe und Oxidatoren

Beachten Sie **technische Aspekte** wie z. B. die Höhe des spezifischen Impulses und die Hypergolität

Beachten Sie **ökologische Aspekte** wie z. B. Giftigkeit und Umweltverträglichkeit der Edukte

Hilfe 5

Allgemeine Geradengleichung:

$$y = m \cdot x + n$$

Ordnen Sie die Größen der Gibbs-Helmholz-Gleichung den entsprechenden Variablen der allgemeinen Geradengleichung zu.

Bestimmen Sie im Diagramm die Steigung und den Schnittpunkt mit der y-Achse.

5 Lösungshinweise und Bezug zu den Standards

Es werden folgende Abkürzungen verwandt:

- S 1 – 17 Standards der Sachkompetenz (erste Spalte)
- E 1 – 13 Standards der Erkenntnisgewinnungskompetenz (zweite Spalte),
- K 1 – 13 Standards der Kommunikationskompetenz (dritte Spalte),
- B 1 – 14 Standards der Bewertungskompetenz (vierte Spalte).

1.1	Ordnen Sie – auf Basis des Lernvideos – die vorgegebenen Stichpunkte den passenden Zellen der untenstehenden Tabelle zu. (Material 3)	S 3 17	E	K	B

1.2	Ermitteln Sie für folgende Prozesse die jeweilige qualitative Entropie- (ΔS) und Enthalpieänderung (ΔH). Ordnen Sie die Reaktionen anschließend korrekt in die untenstehende Tabelle ein. (Material 3, Hilfe 2 und Hilfe 3)	S 2 3 8 16	E 3	K	B

Lösungen 1.1-1.2

<table>
<tr><td></td><td colspan="2">ΔS<0
Unordnung nimmt ab
Entropieabnahme</td><td colspan="2">ΔS>0
Unordnung nimmt zu
Entropiezunahme</td></tr>
<tr><td rowspan="2">ΔH<0
Energie wird frei
exotherm</td><td>bei niedrigen Temperaturen ΔG<0
exergonisch
freiwillig</td><td>bei hohen Temperaturen ΔG>0
endergonisch
unfreiwillig</td><td colspan="2">immer ΔG<0
exergonisch
freiwillig</td></tr>
<tr><td colspan="2">Knallgasreaktion
$2\ H_2 + O_2 \rightarrow 2\ H_20$</td><td colspan="2">Verbrennung im Bunsenbrenner
$C_3H_8 + 5\ O_2 \rightarrow 3\ CO_2 + 4\ H_20$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">ΔH>0
Energie wird aufgenommen
endotherm</td><td colspan="2">immer ΔG>0
endergonisch
unfreiwillig</td><td>bei niedrigen Temperaturen ΔG>0
endergonisch
unfreiwillig</td><td>bei hohen Temperaturen ΔG<0
exergonisch
freiwillig</td></tr>
<tr><td colspan="2">Fotosynthese
$6\ H_20 + 6\ CO_2 \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2$</td><td colspan="2">Boudouard Gleichgewicht
$C + CO_2 \rightarrow 2\ CO$</td></tr>
</table>

2.1	Formulieren Sie die Reaktionsgleichungen für die im Haupt – und Oberstufentriebwerk ablaufenden Reaktionen und berechnen Sie jeweils die Standardreaktionsenthalpie ($\Delta_R H°$) und Standardreaktionsentropie ($\Delta_R S°$) pro Mol Brennstoff. (Material1, 2 und 5, Hilfe 3)	S 16 17	E	K	B

Haupttriebwerk

$2\ H_2 + 1\ O_2 \rightarrow 2\ H_2O$

$\Delta_R H° = 2 \cdot (-241{,}8\ kJ \cdot mol^{-1}) - 2 \cdot 0\ kJ \cdot mol^{-1} - 1 \cdot 0\ kJ \cdot mol^{-1}$

$= -483{,}6\ kJ\ mol^{-1}$ (pro Formelumsatz)

pro Mol Wasserstoff $\Delta_R H° = -241{,}8\ kJ \cdot mol^{-1}$

$\Delta_R S°$ = 2 · 188,8 $J \cdot K^{-1} mol^{-1}$ - 2 · 130,7 $J \cdot K^{-1} mol^{-1}$ - 1 · 205 $JK^{-1} mol^{-1}$

= -88,8 $J \cdot K^{-1} mol^{-1}$ (pro Formelumsatz)

pro Mol Wasserstoff $\Delta_R S°$ = -44,4 $J \cdot K^{-1} mol^{-1}$·

Oberstufentriebwerk

2 N_2H_4 + 1 N_2O_4 → 3 N_2 + 4 H_2O

$\Delta_R H°$ = 3 · 0 $kJ \cdot mol^{-1}$ + 4 · (-241,8 $kJ \cdot mol^{-1}$) - 2 · 95,4 $kJ \cdot mol^{-1}$ - 1 · 9,6 $kJ \cdot mol^{-1}$

= -1167,6 $kJ \cdot mol^{-1}$ (pro Formelumsatz)

pro Mol Hydrazin $\Delta_R H°$ = -583,8 $kJ \cdot mol^{-1}$

$\Delta_R S°$ = 3 · 191,6 $J \cdot K^{-1} mol^{-1}$ + 4 · 188,8 $J \cdot K^{-1} mol^{-1}$ - 2 · 238,7 $J \cdot K^{-1} mol^{-1}$ - 1 · 304,2 $J \cdot K^{-1} mol^{-1}$

= 548,4 $J \cdot K^{-1} mol^{-1}$ (pro Formelumsatz)

pro Mol Hydrazin $\Delta_R S°$ = 274,2 $J \cdot K^{-1} mol^{-1}$

2.2	Berechnen Sie mit Hilfe der Gibbs-Helmholtz-Gleichung jeweils die freie Standardreaktionsenthalpie $\Delta_R G°$ pro Mol Brennstoff auf Basis der Ergebnisse von Aufgabe 2.1.	S 17	E	K	B

$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$

Wasserstoff

$\Delta_R G°$ = -241,8 $kJ \cdot mol^{-1}$ - 298 K · (-0,044 $kJ \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$) = -228,7 $kJ \cdot mol^{-1}$

Hydrazin

$\Delta_R G°$ = -583,8 $kJ \cdot mol^{-1}$ - 298 K · (0,2742 $kJ \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$) = -665,5 $kJ \cdot mol^{-1}$

2.3	Vergleichen Sie Rechenwege, Ergebnisse und mögliche Fehlerquellen der Aufgaben 2.1-2.2 im Plenum.	S	E 10	K 13	B

Mögliche Fehlerquellen sind z. B. Folgefehler aus fehlerhaft aufgestellten Reaktionsgleichungen, die Nichtbeachtung der Teilchenverhältnisse, das Vergessen des Einheitenabgleichs zwischen Entropie und Enthalpie und die Vertauschung von Vorzeichen.

2.4	Begründen Sie den Zusammenhang zwischen dem spezifischen Impuls der jeweiligen Treibstoffgemische und der freien Enthalpie $\Delta_R G°$ der ablaufenden Reaktionen. (Material 2)	S	E	K 2 8	B

Höhe des spezifischen Impulses abhängig von

- freigesetzter Energie Δ entspricht der Reaktionsenthalpie bei Gibbs Helmholtz
- Anzahl der Teilchen, die Triebwerk verlassen → die bei der Reaktion entstehende Teilchenzahl ist ein Aspekt der Entropie bei Gibbs Helmholtz

→ stark exergonische Reaktion ermöglicht einen hohen spezifischen Impuls

(Wegen der divergierenden Zahlenwerte in den Hinweisen zur Durchführung informieren)

3.1	Für die Hauptstufe und Oberstufe der Ariane 5-Trägerrakete werden unterschiedliche Brennstoffgemische verwendet. Stellen Sie jeweils eine Hypothese zum Grund der Verwendung unterschiedlicher Brennstoffgemische in Haupt- und Oberstufe auf. (Material 1 und 4)	S	E 3	K	B 14

Hypothesenbildung: unter vielen Gesichtspunkten möglich; entscheidend für die Verwendung von Wasserstoff ist sicher der hohe spezifische Impuls;

Entscheidend für die Verwendung von Hydrazin ist die Hypergolität. Im All müssen häufige Korrekturen der Flugbahn erfolgen, ohne dass immer wieder eine Zündung über ein (evtl. fehleranfälliges) Zündsystem erfolgt.

3.2	Für die Ariane 6, eine neue europäische Trägerrakete, wurde neben Wasserstoff und Hydrazin auch Methan als Raketentreibstoff diskutiert. Letztendlich entschied man sich für sowohl bei Haupt- als auch bei Oberstufe für Wasserstoff. Recherchieren Sie relevante Informationen zum Einsatz von Methan als Raketentreibstoff und ergänzen Sie die Tabelle (Material 4). Diskutieren sie die Vor- und Nachteile von Methan gegenüber Wasserstoff oder Hydrazin. (Hilfe 4)	S	E	K 1 2	B 6 10 14

Ergänzung der Tabelle mit relevanten Informationen

- Eigenschaften: farblos, geruchlos, Sdp. -161,5 °C,
- Lagerung: unter Druck; bei Raumtemperatur
- Hypergolität: nein
- Spezifischer Impuls: 3034 Ns · kg^{-1}
- Reaktionsprodukte: CO_2 und H_2O

Diskussion z. B.: Methan hat im Vergleich zu Wasserstoff einen deutlich geringeren spezifischen Impuls; außerdem bildet sich bei der Verbrennung Kohlenstoffdioxid, das zumindest als Treibhausgas eine Rolle spielt. Ein Vorteil wäre der deutlich geringere Preis von Methan und die bessere Lagerfähigkeit. Ein Einsatz als Alternative zum giftigen Hydrazin / Distickstofftetraoxid-Gemisch wäre wünschenswert. Allerdings müsste man dann für den Einsatz im All die Rakete mit Zündsystemen ausstatten, auf die man wegen der Hypergolität beim Einsatz von Hydrazin verzichten kann.

4.1	Ermitteln Sie anhand des Diagramms in welchen Temperaturbereich die Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff freiwillig abläuft. (Material 6)	S	E	K 7	B

freiwilliger (exergonischer) Verlauf im Bereich $\Delta_R G° < 0$;

Gilt für T ≤ ca. 5500 K

4.2	Ermitteln Sie nachvollziehbar aus dem Diagramm die Werte für $\Delta_R S°$ und $\Delta_R H°$. (Material 6, Hilfe 5)	S 17	E	K	B

$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$ Geradengleichung mit y = ΔG und x = T

Grafische Bestimmung von $\Delta_R H°$ bei T= 0 K;

hier gilt $\Delta_R G° = \Delta_R H° = -483{,}6\ kJ \cdot mol^{-1}$

Grafische Bestimmung von $\Delta_R S°$ über Steigung; $\Delta_R S° = -88{,}8\ J \cdot K^{-1} mol^{-1}$

6 Quellenangaben

- Material 1, Text:
  In Anlehnung an bremen.online. (2018). *Wissenswertes zu Raketen*. Verfügbar unter https://www.bremen.de/wissenschaft/fragen-experten-antworten-februar-raketen (Zugriff am 18. November 2019).
- Material 1, Abbildung 1:
  In Anlehnung an Wikipedia-Autoren. (2003). *Ariane 5*. Verfügbar unter https://de.wikipedia.org/wiki/Ariane_5#Versionen (Zugriff am 18. November 2019).
- Material 2, Text:
  In Anlehnung an Wikipedia-Autoren. (2005). *Spezifischer Impuls*. Verfügbar unter https://de.wikipedia.org/wiki/Spezifischer_Impuls (Zugriff am 18. November 2019).

  Material 4, Tabelle:
  In Anlehnung an Wikipedia-Autoren. (2005). *Spezifischer Impuls*. Verfügbar unter https://de.wikipedia.org/wiki/Spezifischer_Impuls (Zugriff am 18. November 2019).

  Wikipedia-Autoren. (2004). *Raketentreibstoff*. Verfügbar unter https://de.wikipedia.org/wiki/Raketentreibstoff (Zugriff am 18. November 2019).
- Material 5, Tabelle:
  Messdaten entnommen von National Institute of Standards and Technology. (Jahr unbekannt). *NEST Chemistry WebBook*. Verfügbar unter https://webbook.nist.gov/chemistry/ (Zugriff am 18. November 2019).
- Alle weiteren Materialien und Abbildungen wurden im Auftrag des IQB erstellt.