

Gemeinsame Aufgabenpools der Länder

Pool für das Jahr 2026

Aufgaben für das Fach Chemie

Kurzbeschreibung

Aufgabentitel	Schwefelsäureunfall im Hamburger Hafen
Anforderungsniveau	erhöht
Inhaltsbereiche	♦ Chemische Reaktionen ♦ Protonenübergänge ♦ Säure-Base-Konzept nach Brönsted ♦ pH-Wert-Berechnungen ♦ Puffersysteme ♦ Elektronenübergänge ♦ Redoxreaktionen als Elektronenübergang ♦ elektrochemische Spannungsreihe ♦ Lebenswelt und Gesellschaft
Materialien	♦ M 1 Schwefelsäureunfall im Hamburger Hafen ♦ M 2 Eigenschaften der Schwefelsäure ♦ M 3 Pufferwirkung im Wasser des Hamburger Hafens
Quellenangaben	♦ M 1 ♦ Janine Kühl (2014, 28. Juni). <i>2004: Säure-Alarm im Hamburger Hafen</i>. NDR. https://www.ndr.de/geschichte/chronologie/28-Juni-2004-Saeure-Alarm-Tankerunglueck-im-Hamburger-Hafen,saeuretankerunglueck100.html (Zugriff am: 15.05.2024) ♦ Roman Heflik (2004, 29. Juni). <i>Havarie im Hamburger Hafen: Tanker hat noch 960 Tonnen Schwefelsäure an Bord</i>. Spiegel Panorama. https://www.spiegel.de/panorama/havarie-im-hamburger-hafen-tanker-hat-noch-960-tonnen-schwefelsaeure-an-bord-a-306330.html (Zugriff am: 15.05.2024) ♦ <i>Hamburger Säuretanker Mehr als Hälfte der Ladung ausgelaufen</i> (2024, 01. Juli). Spiegel Panorama. https://www.spiegel.de/panorama/hamburger-saeuretanker-mehr-als-haelfte-der-ladung-ausgelaufen-a-306696.html (Zugriff am 16.01.2026) ♦ M 2 ♦ <i>Schwefelsäure</i> (2024, 07. Mai). Wikipedia. https://de.wikipedia.org/wiki/Schwefelsäure (Zugriff am: 15.05.2024)

	♦ <i>Oleum richtig transportieren</i> (2014, 04. Dezember). Verband der Chemischen Industrie e.V. https://www.vci.de/vci/downloads-vci/2014-12-04-oleum-richtig-transportieren.pdf (Zugriff am: 15.05.2024) ♦ M 3 ♦ Janine Kühl (2014, 28. Juni). <i>2004: Säure-Alarm im Hamburger Hafen</i>. NDR. https://www.ndr.de/geschichte/chronologie/28-Juni-2004-Saeure-Alarm-Tankerunglueck-im-Hamburger-Hafen,saeuretankerunglueck100.html (Zugriff am: 15.05.2024) ♦ <i>Gütemessstellen im Elbegebiet: Seemannshöft, Elbe</i> (2024). Informationsplattform Undine. https://undine.bafg.de/elbe/gue-temessstellen/elbe_mst_seemannshoeft.html (Zugriff am: 15.05.2024) ♦ <i>Chemie-Tanker: Viel Säure ausgelaufen</i>. (2004, 01. Juli). Merkur.de. https://www.merkur.de/welt/chemietanker-viel-saeure-ausgelaufen-162377.html (Zugriff am: 06.12.2024) ♦ Diehl, A. (2004, 01. Juli). Keine nennenswerte Reaktion. taz.de. https://taz.de/Keine-nennenswerte-Reaktion/!733252/ (Zugriff am: 06.12.2024)
Hilfsmittel	♦ digitales Hilfsmittel, das mindestens die Funktionalität eines WTR hat ♦ mathematisch-naturwissenschaftliche Formelsammlung
fachpraktischer Anteil	♦ ja ☐ nein ☒ Zeitzuschlag: —

1 Aufgabe

Schwefelsäureunfall im Hamburger Hafen [1]

Schwefelsäure ist eine der wichtigsten industriell hergestellten Chemikalien. In Deutschland wird Schwefelsäure u. a. in Hamburg hergestellt und von dort über den Schienen- oder Wasserweg zur Weiterverarbeitung in andere Industriestandorte transportiert. Dabei kam es 2004 im Hamburger Hafen zu einer Havarie.

	BE
1 Erläutern Sie unter Verwendung einer Reaktionsgleichung für die Reaktion von Schwefelsäure mit Wasser das Säure-Base-Konzept nach Brönsted (M 2). Erklären Sie auch unter Einbeziehung der Standardpotenziale $E^\circ(\text{H}_3\text{O}^+ \text{H}_2)$ und $E^\circ(\text{Fe}^{2+} \text{Fe})$, wie es im Verlauf des Unfalls zur Bildung von Wasserstoff in den Stahl-tanks kommen konnte (M 1, M 2).	9
2 Berechnen Sie den theoretisch erreichbaren pH-Wert im Wasser des Hamburger Hafens, wenn aus dem Schiff 260.000 Liter der konzentrierten Schwefelsäure freige-setzt werden würden (M 1, M 2). <i>Hinweis: Betrachten Sie vereinfacht nur die 1. Protolysestufe der Schwefelsäure-Mo-leküle.</i> Nennen Sie drei mögliche Gründe dafür, dass der theoretisch berechnete pH-Wert unter realen Bedingungen nicht erreicht wird (M 1).	9
3 Beurteilen Sie die Äußerungen des Feuerwehrsprechers zu den eingeleiteten Maß-nahmen hinsichtlich fachlicher und fachsprachlicher Korrektheit (M 1, M 2).	5
4 Erklären Sie unter Angabe einer Reaktionsgleichung die Wirkungsweise eines Dihydrogen-Hydrogenphosphat-Puffers bei Zugabe einer sauren Lösung (M 3). Berechnen Sie die pH-Wert-Änderung des im Modellexperiment verwendeten Dihy-drogen-Hydrogenphosphat-Puffers nach Zugabe der Schwefelsäure-Lösung (M 3). <i>Hinweis: Betrachten Sie vereinfacht nur die 1. Protolysestufe der Schwefelsäure-Mo-leküle.</i>	12
5 Diskutieren Sie anhand von je zwei Argumenten, ob das Modellexperiment zur Ver-anschaulichung einer Pufferwirkung beim Säureunfall im Hamburger Hafen geeignet ist (M 1, M 2, M 3). <i>Hinweis: Sollten Sie in Teilaufgabe 4 keine pH-Wert-Änderung berechnet haben, ge-hen Sie von einem Ersatzwert $\Delta\text{pH} = -0,5$ aus.</i>	5

Quellen (ggf. verändert):

- [1] Janine Kühl (2014, 28. Juni). 2004: Säure-Alarm im Hamburger Hafen. NDR. <https://www.ndr.de/geschichte/chronologie/28-Juni-2004-Saeure-Alarm-Tankerunglueck-im-Hamburger-Hafen,sauretankerunglueck100.html> (Zugriff am: 15.05.2024)
- [2] Roman Heflik (2004, 29. Juni). Havarie im Hamburger Hafen: Tanker hat noch 960 Tonnen Schwefelsäure an Bord. Spiegel Panorama. <https://www.spiegel.de/panorama/havarie-im-hamburger-hafen-tanker-hat-noch-960-tonnen-schwefelsaeure-an-bord-a-306330.html> (Zugriff am: 15.05.2024)
- [3] Hamburger Säuretanker Mehr als Hälfte der Ladung ausgelaufen (2024, 01. Juli). Spiegel Panorama. <https://www.spiegel.de/panorama/hamburger-saeuretanker-mehr-als-haelfte-der-ladung-ausgelaufen-a-306696.html> (Zugriff am: 16.01.2026)
- [4] Schwefelsäure (2024, 07. Mai). Wikipedia. <https://de.wikipedia.org/wiki/Schwefelsäure> (Zugriff am: 15.05.2024)
- [5] Oleum richtig transportieren (2014, 04. Dezember). Verband der Chemischen Industrie e.V. <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/2014-12-04-oleum-richtig-transportieren.pdf> (Zugriff am: 15.05.2024)
- [6] Gütemessstellen im Elbegebiet: Seemannshöft, Elbe (2024). Informationsplattform Undine. https://undine.bafg.de/elbe/gue-temessstellen/elbe_mst_seemannshoeft.html (Zugriff am: 15.05.2024)

[7] Chemie-Tanker: Viel Säure ausgelaufen. (01. Juli 2004). <https://www.merkur.de/welt/chemietanker-viel-saeure-ausgelaufen-162377.html> (Zugriff am: 06.12.2024)

[8] Diehl, A. (01. Juli 2004). Keine nennenswerte Reaktion. [taz.de. https://taz.de/Keine-nennenswerte-Reaktion/!733252/](https://taz.de/Keine-nennenswerte-Reaktion/!733252/) (Zugriff am: 06.12.2024)

2 Material

Material 1: Schwefelsäureunfall im Hamburger Hafen [1] – [3]

2004 kam es im Hamburger Hafen, der von der Elbe durchströmt wird, zur Kollision zweier Frachtschiffe. Eines der Frachtschiffe hatte Tanks mit konzentrierter Schwefelsäure geladen. Die Feuerwehr richtete Messstellen um die Unglücksstelle ein, um vor über die Lüftungsschächte des Schiffs austretenden Gasen warnen zu können. Das ständige Besprühen des Frachtschiffs mit Wasser sollte diese Dämpfe binden.

Ein Feuerwehrsprecher äußerte sich zu den eingeleiteten Maßnahmen wie folgt: Zwar sei die Schwefelsäure schwerer als Wasser und sinke daher eher an den Hafengrund. Gerade die Säure jedoch an die Oberfläche, bestehe das Risiko, dass sich explosives Knallgas bilde.

Nach einiger Zeit kippte das Frachtschiff aufgrund seiner Beschädigungen durch die Kollision um (Abb. 1). So geriet die Öffnung der Tanks unter Wasser. In der Folge entstand Wasserstoff. Um eine Gasexplosion zu vermeiden, wurde das Gas von Tauchern aus den Schiffstanks abgelassen.

Allerdings ist etwa die Hälfte der geladenen 960 Tonnen (rund 520.000 Liter) konzentrierte Schwefelsäure in den Hamburger Hafen (geschätzte Wassermenge ca. $4 \cdot 10^{10}$ L) geflossen.



Abb. 1: gekentertes Frachtschiff [2]

Material 2: Eigenschaften der Schwefelsäure [4], [5]

Konzentrierte Schwefelsäure (H_2SO_4 ; $c \approx 18 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$) wirkt oxidierend und ist in der Lage, beim Erhitzen auch mit edleren Metallen wie Kupfer, Quecksilber oder Silber zu reagieren. Hingegen wird das unedle Eisen von konzentrierter Schwefelsäure nicht angegriffen. Das Eisen wird bei Kontakt mit der konzentrierten Säure mit einer schützenden Oxidschicht überzogen (Passivierung). Aus diesem Grund sind zum Beispiel Stahltanks (Stahl: eine Legierung des Eisens) für den Transport von konzentrierter Schwefelsäure mit Schiffen geeignet. Die Passivierung wird allerdings durch verdünnte Säuren zerstört.

Schwefelsäure-Moleküle protolysieren in wässriger Lösung hauptsächlich zu Hydrogensulfat-Ionen. Daher liegen in einer verdünnten Schwefelsäure zum größten Teil Hydrogensulfat-Ionen und Oxonium-Ionen vor. Unedle Metalle werden deshalb von verdünnter Schwefelsäure unter Bildung von Wasserstoff oxidiert.

Material 3: Pufferwirkung im Wasser des Hamburger Hafens [1], [6] – [8]

Das Wasser im Hamburger Hafen hat im Jahresdurchschnitt einen pH-Wert, der um 7,6 schwankt. Der Wasserdurchfluss der Elbe beträgt einschließlich der Gezeitenströmung mehrere tausend Kubikmeter pro Sekunde. Eine Umweltkatastrophe drohte nach Angaben von Experten wegen der starken Verdünnung in der Elbe daher nicht. Durch die starke Strömung

und die enormen Wassermengen konnte bereits in einigen Kilometern Entfernung keine signifikante pH-Wert-Veränderung mehr festgestellt werden. Später konnte man nachweisen, dass die hohe Verschmutzung der Elbe eine Pufferwirkung hat.

In einem Modellexperiment wird die Pufferwirkung eines Dihydrogen-Hydrogenphosphat-Puffers gegenüber Schwefelsäure untersucht:

500 mL Puffer-Lösung enthalten Dinatriumhydrogenphosphat (Na_2HPO_4) und Natriumdihydrogenphosphat (NaH_2PO_4) gleicher Stoffmengenkonzentration ($c = 0,1 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$). Zu dieser Puffer-Lösung wird 1 mL konzentrierte Schwefelsäure ($c = 18 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$) zugegeben.

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>Erläuterung des Säure-Base-Konzepts:</u> ♦ $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HSO}_4^- + \text{H}_3\text{O}^+$ ♦ Das Schwefelsäure-Molekül ist die Säure und gibt ein Proton ab (Protonendonator). Es entsteht das Hydrogensulfat-Ion als konjugierte Base. ♦ Das Wasser-Molekül ist die Base und nimmt ein Proton auf (Protonenakzeptor). Es entsteht das Oxonium-Ion als konjugierte Säure. ♦ Es erfolgt ein Übergang des Protons vom Schwefelsäure-Molekül auf das Wasser-Molekül.	2	2	
	<u>Erklärung der Bildung von Wasserstoff:</u> ♦ Wasser dringt beim Umkippen des Schiffs in den Tank und die konzentrierte Schwefelsäure reagiert mit dem Wasser und es entsteht verdünnte Schwefelsäure. ♦ Die Passivierung des Stahltanks wird zerstört, d. h. Eisen reagiert mit verdünnter Säure. ♦ $E^\circ(\text{Fe}^{2+} \text{Fe}) = -0,45 \text{ V}$, $E^\circ(\text{H}_3\text{O}^+ \text{H}_2) = 0,00 \text{ V}$ bei $\text{pH} = 0$ ♦ $E^\circ(\text{Fe}^{2+} \text{Fe}) < E^\circ(\text{H}_3\text{O}^+ \text{H}_2)$ ♦ An den Oxonium-Ionen wird je ein Wasserstoff-Atom reduziert, d. h. Wasserstoff wird gebildet.	2	3	
2	<u>Berechnung des pH-Wertes im Hafenwasser:</u> ♦ Berechnung der Stoffmenge der Schwefelsäure $n_0 = c_0(\text{H}_2\text{SO}_4) \cdot V_0(\text{H}_2\text{SO}_4)$ $n_0 = 18 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \cdot 260.000 \text{ L}$ $n_0 = 4,7 \cdot 10^6 \text{ mol}$ ♦ Berechnung der Stoffmengenkonzentration an Schwefelsäure im Hafenwasser unter Vernachlässigung des Volumens der Schwefelsäure $c(\text{H}_2\text{SO}_4) = \frac{n_0(\text{H}_2\text{SO}_4)}{V(\text{ges})}$ $c(\text{H}_2\text{SO}_4) = \frac{4,7 \cdot 10^6 \text{ mol}}{4 \cdot 10^{10} \text{ L}}$ $c(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1,2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{L}}$ ♦ Berechnung des pH-Werts $\text{pH} \approx -\lg\{c(\text{H}_2\text{SO}_4)\}$ $\text{pH} \approx -\lg(1,2 \cdot 10^{-4})$ $\text{pH} \approx 3,9$		2 2 2	

	<u>Nennung von drei Gründen für die pH-Wert Abweichung:</u> ◆ Schwefelsäure wird nicht schlagartig austreten, d. h. die Stoffmenge der Schwefelsäure entspricht nicht der Stoffmenge der Oxonium-Ionen. ◆ Die Strömungsgeschwindigkeit wird nicht beachtet, d. h. eine weitere Verdünnung mit dem Flusswasser erfolgt. ◆ Es werden mögliche Reaktionen der Schwefelsäure mit Stoffen im Hafenwasser vernachlässigt, d. h. die Stoffmenge der Oxonium-Ionen würde ebenfalls sinken.			3
3	<u>Beurteilung der Aussagen des Feuerwehrsprechers auf:</u> ◆ Fachliche Korrektheit: ◆ Knallgas ist ein Gemisch von Wasserstoff und Sauerstoff. Sobald der an der Schiffsoberfläche (am Stahltank des Frachtschiffs) gebildete Wasserstoff entweichen kann, verteilt sich das Gas großflächig, so dass die Bildung eines zündfähigen Gemischs unwahrscheinlich ist. ◆ Die Schwefelsäure sinkt trotz ihrer hohen Dichte nicht auf den Hafengrund, da sie mit dem Wasser reagiert. ◆ Fachsprachliche Korrektheit: ◆ Begriff „Säure“ beim Aufsteigen nicht korrekt, weil bereits Verdünnung der Schwefelsäure erfolgt. ◆ Schwefelsäure ist schwerer: Die Dichte der Schwefelsäure ist größer als die Dichte von Wasser. ◆ Verwendung des Begriffs Knallgas ist zutreffend, da er davon ausgeht, dass sich Wasserstoff an der Oberfläche bildet. ◆ Sachurteil			2
				2
				1
4	<u>Erklärung der Wirkungsweise eines Dihydrogen-Hydrogenphosphat-Puffers:</u> ◆ Gleichung für das Puffergleichgewicht: $\text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HPO}_4^{2-} + \text{H}_3\text{O}^+$ ◆ Saure Lösungen enthalten Oxonium-Ionen, die das Puffergleichgewicht stören. ◆ Hydrogenphosphat-Ionen reagieren mit zusätzlichen Oxonium-Ionen zu Dihydrogenphosphat-Ionen und das Gleichgewicht stellt sich wieder ein. ◆ nahezu konstanter pH-Wert der Puffer-Lösung bei Zugabe geringer Mengen saurer Lösung <u>Berechnung der pH-Wert-Änderung im Modellexperiment:</u> ◆ Berechnung des pH-Wertes des Puffers $\text{pH} = \text{p}K_{\text{S}}(\text{H}_2\text{PO}_4^-) + \lg \frac{c(\text{HPO}_4^{2-})}{c(\text{H}_2\text{PO}_4^-)}$ $\text{pH} = 7,21 + \lg \frac{0,1 \frac{\text{mol}}{\text{L}}}{0,1 \frac{\text{mol}}{\text{L}}}$ $\text{pH} = 7,21$	2	2	
		1	1	

	♦ Berechnung des pH-Werts nach Zugabe der Schwefelsäure-Lösung ♦ Berechnung der Stoffmengenkonzentration an Oxonium-Ionen $c(\text{H}_3\text{O}^+) = \frac{n(\text{H}_3\text{O}^+)}{V(\text{Pufferlsg.})}$ $c(\text{H}_3\text{O}^+) = \frac{n_0(\text{H}_2\text{SO}_4)}{V(\text{Pufferlsg.})}$ $c(\text{H}_3\text{O}^+) = \frac{c_0(\text{H}_2\text{SO}_4) \cdot V_0(\text{H}_2\text{SO}_4)}{V(\text{Pufferlsg.})}$ $c(\text{H}_3\text{O}^+) = \frac{18 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \cdot 0,001\text{L}}{0,5\text{L}}$ $c(\text{H}_3\text{O}^+) = 0,036 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$ ♦ pH-Wert nach Zugabe Schwefelsäure-Lösung $\text{pH} = \text{p}K_{\text{S}}(\text{H}_2\text{PO}_4^-) + \lg \frac{c(\text{HPO}_4^{2-}) - c(\text{H}_3\text{O}^+)}{c(\text{H}_2\text{PO}_4^-) + c(\text{H}_3\text{O}^+)}$ $\text{pH} = 7,21 + \lg \frac{(0,1 \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 0,036 \frac{\text{mol}}{\text{L}})}{(0,1 \frac{\text{mol}}{\text{L}} + 0,036 \frac{\text{mol}}{\text{L}})}$ $\text{pH} = 6,88$ ♦ $\Delta\text{pH} = -0,33$	1	2	
5	<u>Diskussion der Eignung des Modellexperiments:</u> ♦ Pro-Argumente: ♦ pH-Wert ändert sich nur im geringen Maße bei Zugabe der sauren Lösung (zeichnet einen Puffer aus). ♦ Stoffmengenkonzentration der Schwefelsäure stimmt mit der bei der Havarie ausgelaufenen Schwefelsäure überein. ♦ $\text{p}K_{\text{S}}$-Wert des Dihydrogenphosphat-Ions (7,21) ist ähnlich zum pH-Wert des Hafenwassers (7,6). ♦ Contra-Argumente: ♦ Weitere Puffer bleiben unberücksichtigt. ♦ Volumenverhältnisse sind nicht passend; sehr große Unterschiede. ♦ Fazit	1	1	
		1	1	1
	Summe¹	11	20	9

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	6, 7, 16	1		
2	17			7
3			6, 9	1, 8
4	7, 16, 17			
5		9	5	

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 im Fach Chemie für die Allgemeine Hochschulreife genannt, 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.