

Gemeinsame Aufgabenpools der Länder

Pool für das Jahr 2025

Aufgaben für das Fach Chemie

Kurzbeschreibung

Aufgabentitel	Phosphorsäure und Phosphate – vielfach verwendete Lebensmittelzusatzstoffe
Anforderungsniveau	erhöht
Inhaltsbereiche	♦ Chemische Reaktionen ♦ Protonenübergänge ♦ Säure-Base-Konzept nach Brönsted ♦ Säure-Base-Konstanten ♦ pH-Wert-Berechnungen wässriger Lösungen von Säuren und Basen (bei nicht vollständiger Protolyse) ♦ Arbeitsweisen ♦ Quantitative und instrumentelle Analyse ♦ Säure-Base-Titration (mit Titrationskurve)
Materialien	♦ M 1 Phosphorsäure ♦ M 2 Bestimmung des Gehaltes an Phosphorsäure in der Cola ♦ M 3 Phosphorsäure, Phosphate und unsere Gesundheit
Quellenangaben	♦ M 1 Holleman, A. F., Wiberg, E., Wiberg, N. (2007). Phosphorsäure. In N. Wiberg (Hrsg.), <i>Anorganische Chemie</i> (102. Aufl., S. 795–804). De Gruyter. ♦ M 2 <i>Bestimmung des Gehalts von Phosphorsäure in einem Cola-Getränk</i> (o. D.). Leybold. https://www.ld-didactic.de/documents/en-US/EXP/C/C3/C3642_d.pdf (Zugriff am: 28.03.2024) ♦ M 3 ♦ Ritz, E., Hahn, K., Ketteler, M., Kuhlmann, M. & Mann, J. (2012, 27. Januar). <i>Gesundheitsrisiko durch Phosphatzusätze in Nahrungsmitteln</i>. Deutsches Ärzteblatt. https://www.aerzteblatt.de/archiv/119315/Gesundheitsrisiko-durch-Phosphatzusaeetze-in-Nahrungsmitteln (Zugriff am: 28.03.2024) ♦ <i>EFSA veröffentlicht neue Empfehlungen zu Phosphaten</i> (2019, 12. Juni). Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit. https://www.efsa.europa.eu/de/press/news/190612 (Zugriff am: 21.11.2023)

Hilfsmittel	♦ digitales Hilfsmittel, das mindestens die Funktionalität eines WTR hat ♦ mathematisch-naturwissenschaftliche Formelsammlung
fachpraktischer Anteil	nein

1 Aufgabe

Phosphorsäure und Phosphate – vielfach verwendete Lebensmittel-zusatzstoffe

Phosphorsäure wird in einigen Nahrungsmitteln als Zusatzstoff mit der Nummer E 338 verwendet. Sie ist z. B. für den typischen Geschmack von Cola mitverantwortlich und ist in einigen Lebensmitteln als Säuerungs- und Konservierungsmittel enthalten. Doch seit einigen Jahren kommen Zweifel hinsichtlich der Unbedenklichkeit des ungebremsten Konsums an Phosphorsäure und ihren Salzen auf.

	BE
1 Formulieren Sie eine Reaktionsgleichung für die zweite Stufe der Protolyse von Phosphorsäure-Molekülen in wässriger Lösung. Erläutern Sie anhand dieser Reaktionsgleichung das Säure-Base-Konzept nach Brönsted und am Beispiel des Dihydrogenphosphat-Ions den Begriff Ampholyt (M 1). Begründen Sie, dass für den pH-Wert einer wässrigen Phosphorsäure-Lösung hauptsächlich die erste Protolysestufe ausschlaggebend ist (M 1).	11
2 Begründen Sie die Notwendigkeit die Cola-Probe vorzubereiten (M 2). Beurteilen Sie die genannten Möglichkeiten der Probenvorbereitung anhand von zwei Aspekten (M 2).	7
3 Beschreiben Sie das Prinzip einer Säure-Base-Titration (M 2). Erläutern Sie die pH-Werte in den beiden markierten Punkten A und B in der aufgenommenen Titrationskurve (M 2). Begründen Sie, weshalb sich zur Bestimmung der Phosphorsäure-Konzentration in Cola eine Titration mit Indikator nicht eignet.	9
4 Ermitteln Sie die Stoffmengenkonzentration der Phosphorsäure in der untersuchten Cola unter der Annahme, dass keine weiteren Säuren in der Probe enthalten sind (M 2). Überprüfen Sie die Herstellerangabe bezüglich der Masse an zugesetzter Phosphorsäure (M 2).	9
5 Beurteilen Sie gesundheitliche Gefahren durch Aufnahme von Phosphor in Verbindungen, sollte ein Jugendlicher mit einem Körpergewicht von 70 kg täglich einen Liter der in Aufgabe 4 untersuchten Cola zu sich nehmen (M 2, M 3). <i>Hinweis: Sollte die Berechnung in Aufgabe 4 keine Ergebnisse liefern, gehen Sie von 0,17 g Phosphorsäure in einem Liter Cola aus.</i>	4

Quellen (ggf. verändert):

- [1] Holleman, A. F., Wiberg, E., Wiberg, N. (2007). Phosphorsäure. In N. Wiberg (Hrsg.), *Anorganische Chemie* (102. Aufl., S. 795–804). De Gruyter.
- [2] *Bestimmung des Gehalts von Phosphorsäure in einem Cola-Getränk* (o. D.). Leybold. https://www.ld-didactic.de/documents/en-US/EXP/C3/C3642_d.pdf (Zugriff am: 28.03.2024)
- [3] Ritz, E., Hahn, K., Ketteler, M., Kuhlmann, M. & Mann, J. (2012, 27. Januar). *Gesundheitsrisiko durch Phosphatzusätze in Nahrungsmitteln*. Deutsches Ärzteblatt. <https://www.aerzteblatt.de/archiv/119315/Gesundheitsrisiko-durch-Phosphatzusaeetze-in-Nahrungsmitteln> (Zugriff am: 28.03.2024)
- [4] *EFSA veröffentlicht neue Empfehlungen zu Phosphaten* (2019, 12. Juni). Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit. <https://www.efsa.europa.eu/de/press/news/190612> (Zugriff am: 21.11.2023)

2 Material

Material 1: Phosphorsäure [1]

Phosphorsäure (H_3PO_4) ist in einigen Nahrungsmitteln als Lebensmittelzusatzstoff enthalten. Phosphorsäure-Moleküle können stufenweise bis zu drei Protonen in Säure-Base-Reaktionen abgeben. Bei den einzelnen Deprotonierungsstufen bilden sich ausgehend vom Phosphorsäure-Molekül nacheinander das Dihydrogenphosphat-Ion, das Hydrogenphosphat-Ion und das Phosphat-Ion.

Material 2: Bestimmung des Gehaltes an Phosphorsäure in Cola [2]

Cola ist ein kohlenensäure- und phosphorsäurehaltiges Erfrischungsgetränk. In Cola sind bis zu 700 mg Phosphorsäure pro Liter zulässig. Ein Hersteller gibt an, dass einem Liter Cola bei der Herstellung 170 mg Phosphorsäure zugesetzt werde und der pH-Wert 2,5 betrage. Im Labor soll die Cola dieses Herstellers auf ihren Phosphorsäure-Gehalt überprüft werden.

Zur Vorbehandlung der Cola werden zwei verschiedene Möglichkeiten vorgeschlagen:

- eine Probe von 50 mL Cola in einem großen Gefäß über Nacht stehen lassen,
- Cola längere Zeit am Sieden halten, abkühlen lassen und danach eine Probe von 50 mL entnehmen.

Eine Cola-Probe wird vorbehandelt und danach mit einer Natronlauge-Maßlösung der Stoffmengenkonzentration $c(\text{NaOH}) = 0,025 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$ titriert. Dabei erhält man folgende Titrationskurve (Abb. 1):

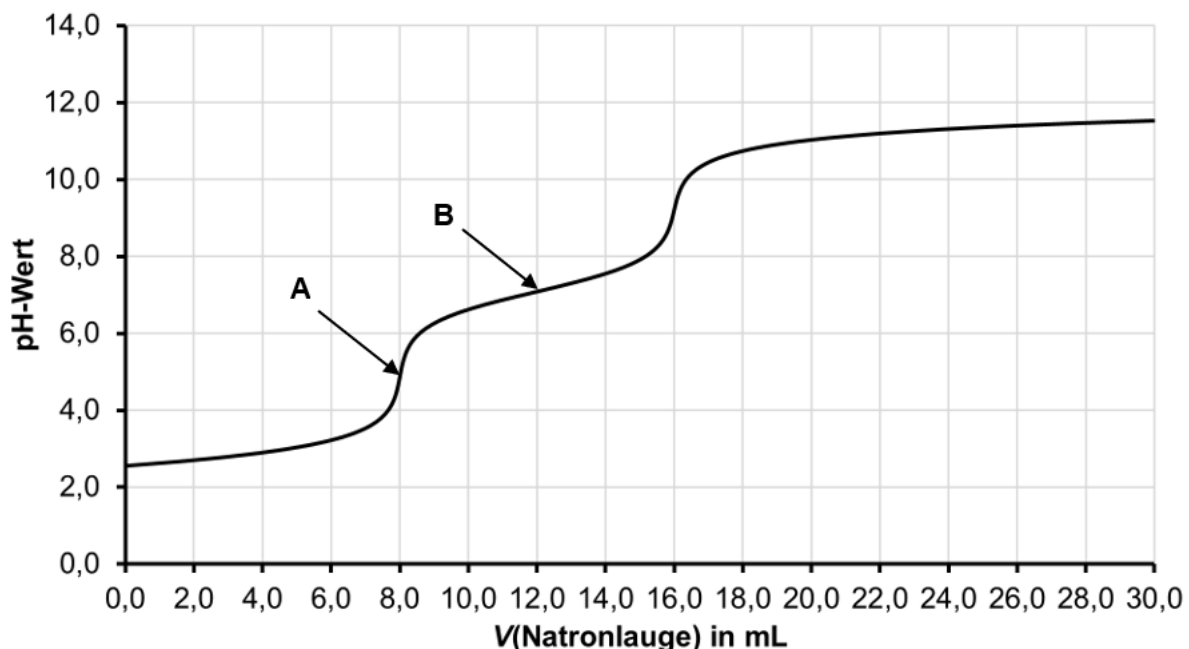


Abb. 1: Titrationskurve der Phosphorsäure (Cola-Probe)

Material 3: Phosphorsäure, Phosphate und unsere Gesundheit [3], [4]

Ein vermeidbares Gesundheitsproblem verbirgt sich hinter der verbreiteten Verwendung von Phosphorsäure und deren Salzen als Zusatzstoffe in Nahrungsmitteln. Dieses „freie“ Phosphat wird sehr effektiv vom Körper aufgenommen. Neben der Verwendung der Phosphorsäure in Cola werden in fast allen verarbeiteten Fleischprodukten (wie z. B. Brühwürste und Kochschinken), aber auch in Schmelzkäse und anderen Käsezubereitungen sowie in vielen Fertiggerichten Phosphate eingesetzt, um Wasser zu binden.

Im Jahr 2019 wurde deshalb ein ADI-Wert, bezogen auf die Aufnahme von Phosphor in Verbindungen (z. B. Phosphorsäure, Phosphate, Polyphosphate oder ähnliches), festgelegt. Der ADI-Wert (**a**ccceptable **d**aily **i**ntake) ist die geschätzte Menge eines Stoffes in Lebensmitteln pro Kilogramm Körpergewicht, die täglich im Laufe eines Lebens konsumiert werden kann, ohne dass sie ein merkliches Risiko für die Gesundheit birgt. Der ADI-Wert für Phosphor in Verbindungen beträgt 40 mg pro kg Körpergewicht.

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>Formulierung der Reaktionsgleichung für die zweite Protolysestufe:</u> ♦ $\text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HPO}_4^{2-} + \text{H}_3\text{O}^+$ <u>Erläuterung des Säure-Base-Konzepts nach Brönsted:</u> ♦ Das Dihydrogenphosphat-Ion ist eine Brönsted-Säure, weil es ein Proton abgibt (Protonendonator). ♦ Das Wasser-Molekül ist eine Brönsted-Base, weil es ein Proton aufnimmt (Protonenakzeptor). ♦ Insgesamt handelt es sich um eine Protonenübertragungsreaktion. <u>Erläuterung des Begriffs „Ampholyt“:</u> ♦ Das Dihydrogenphosphat-Ion (H_2PO_4^-) kann je nach Reaktionspartner sowohl ein Proton abgeben und dabei zum Hydrogenphosphat-Ion (HPO_4^{2-}) reagieren oder es kann ein Proton aufnehmen und zum Phosphorsäure-Molekül (H_3PO_4) reagieren. ♦ Teilchen, die je nach Reaktionspartner sowohl als Protonendonatoren als auch als Protonenakzeptoren wirken können, sind Ampholyte. Daher ist das Dihydrogenphosphat-Ion ein Ampholyt. <u>Begründung für den Zusammenhang zwischen pH-Wert und Protolysestufen:</u> ♦ Der pK_S-Wert der Phosphorsäure ist um ca. 5 kleiner als der pK_S-Wert des Dihydrogenphosphats. ♦ Bei der ersten Protolysestufe wird im Vergleich zu den folgenden Protolysestufen ein Vielfaches an Oxonium-Ionen gebildet. ♦ Die bei der zweiten und dritten Protolysestufe gebildeten Oxonium-Ionen ändern den pH-Wert daher kaum.	1	1	
		2	1	
			2	
		1		
			1	2

2	<u>Begründung der Notwendigkeit der Vorbereitung:</u> ◆ Kohlensäure würde als zusätzliche Säure das Titrationsergebnis verfälschen. ◆ Die Kohlensäure muss daher vollständig aus der Probe entfernt werden. <u>Beurteilung der Möglichkeiten der Probenvorbereitung:</u> ◆ In a) wird die Probe über Nacht stehen gelassen. Da schon zu Beginn das Volumen bestimmt wurde, spielt eventuelles Verdunsten von Wasser keine Rolle. Es könnte noch Kohlensäure in der Probe vorhanden sein, sie sollte länger stehen gelassen werden. ◆ In b) wird die Probe längere Zeit am Sieden gehalten. Es muss sichergestellt werden, dass Wasser nicht verdampft, weil andernfalls die Konzentration der Phosphorsäure erhöht werden würde. Durch das Erhitzen wird Kohlensäure nahezu vollständig aus der Probe entfernt. ◆ Gesamturteil: Wenn dafür gesorgt wird, dass kein Wasser verdampft, ist Variante b) vorzuziehen.		2	
3	<u>Beschreibung des Prinzips einer Säure-Base-Titration:</u> ◆ Bei einer Säure-Base-Titration wird die Stoffmengenkonzentration einer Säure in einer Probelösung durch Zugabe einer Lauge bekannter Stoffmengenkonzentration (Maßlösung) bestimmt. ◆ Der Titration zugrunde liegt die Neutralisationsreaktion. Im Äquivalenzpunkt haben Säure und Base entsprechend der Reaktionsgleichung im stöchiometrischen Verhältnis reagiert. ◆ Der Äquivalenzpunkt wird zum Beispiel durch den Farbumschlag eines geeigneten pH-Indikators bestimmt. <u>Erläuterung der pH-Werte an den beiden markierten Punkten:</u> ◆ Punkt A: Zugabe von 8,0 mL Natronlauge, pH-Wert bei ca. 5 Die aus der ersten Protolysestufe gebildeten Oxonium-Ionen sind neutralisiert, es liegen hauptsächlich Dihydrogenphosphat-Ionen vor. Das Dihydrogenphosphat-Ion ist eine schwache Säure ($pK_S = 7,21$), die entsprechende Lösung ist sauer. ◆ Punkt B: Zugabe von 12,0 mL Natronlauge, pH-Wert bei ca. 7 Die Hälfte der Dihydrogenphosphat-Ionen hat zu Hydrogenphosphat-Ionen reagiert. Dihydrogenphosphat-Ionen und Hydrogenphosphat-Ionen liegen im Verhältnis 1 : 1 vor, der pH-Wert entspricht dem pK_S-Wert von Dihydrogenphosphat. <u>Begründung der Nichteignung eines Indikators:</u> ◆ Cola hat eine dunkle Eigenfarbe, sodass ein Farbumschlag bei der Verwendung eines Säure-Base-Indikators nicht gut zu erkennen ist. Daher bietet sich die Verwendung eines pH-Meters bei der Titration an.	3		
4	<u>Ermittlung der Stoffmengenkonzentration:</u> ◆ Verbrauch an Natronlauge (abgelesen am 1. Äquivalenzpunkt): $V(\text{NaOH}) = 8,0 \text{ mL}$	1		

	♦ Für den ersten Äquivalenzpunkt gilt: $n(\text{H}_3\text{PO}_4) = n(\text{NaOH})$ $n(\text{NaOH}) = c(\text{NaOH}) \cdot V(\text{NaOH})$ $= 0,025 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \cdot 0,0080 \text{ L}$ $= 0,00020 \text{ mol} = n(\text{H}_3\text{PO}_4)$ $c(\text{H}_3\text{PO}_4) = \frac{n(\text{H}_3\text{PO}_4)}{V(\text{H}_3\text{PO}_4)}$ $= \frac{0,00020 \text{ mol}}{0,050 \text{ L}}$ $= 0,0040 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$ <u>Überprüfung der Herstellerangabe:</u> ♦ $M(\text{H}_3\text{PO}_4) = 98,0 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ $m(\text{H}_3\text{PO}_4) = n(\text{H}_3\text{PO}_4) \cdot M(\text{H}_3\text{PO}_4)$ $= 0,004 \text{ mol} \cdot 98,0 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ $= 0,39 \text{ g}$ ♦ In einem Liter der untersuchten Cola sind 0,39 g Phosphorsäure. Es wurde mehr Phosphorsäure zugesetzt als angegeben. Die Menge liegt aber unter dem erlaubten Grenzwert.		1	
			2	
			2	
		1		
		1		
			1	
5	<u>Beurteilung der gesundheitlichen Gefahren durch Trinken von Cola:</u> ♦ Berechnung der Masse des Phosphors: $c(\text{H}_3\text{PO}_4) = 0,0040 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$ $M(\text{P}) = 31,0 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ $m(\text{P}) = 0,0040 \text{ mol} \cdot 31,0 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ $= 0,12 \text{ g}$ ♦ Ein Jugendlicher mit einem Körpergewicht von 70 kg kann laut ADI-Wert täglich 2800 mg Phosphor aufnehmen. Mit 120 mg pro Liter Cola liegt man bei einem Konsum von einem Liter pro Tag darunter und hat damit nicht mit gesundheitlichen Gefahren aufgrund der Aufnahme von Phosphor durch Cola zu rechnen.	1		
			1	
			2	
	Summe¹	11	21	8

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	7, 16			
2	3			1
3	7	7, 8	10	1
4	17	5	8	3
5	17			7

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 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.