

Gemeinsame Aufgabenpools der Länder

Pool für das Jahr 2025

Aufgaben für das Fach Chemie

Kurzbeschreibung

Aufgabentitel	Beton – Ein Werkstoff für die Ewigkeit?
Anforderungsniveau	grundlegend
Inhaltsbereiche	♦ Chemische Reaktionen ♦ Protonenübergänge ♦ Säure-Base-Konzept nach Brönsted ♦ Gleichgewichtsreaktionen ♦ chemisches Gleichgewicht ♦ Prinzip von Le Chatelier
Materialien	♦ M 1 Das Aushärten von Beton ♦ M 2 Stahlbeton ♦ M 3 Carbonatisierung von Beton ♦ M 4 Schnelltest zur Überprüfung des Fortschrittes der Carbonatisierung ♦ M 5 Schäden durch „Sulfattreiben“ in Abwasserkanälen ♦ M 6 Analyse einer Betonprobe
Quellenangaben	♦ M 1 ♦ Prof. Blumes Medienangebot: Chemie im und ums Haus (o. D.). Chemieunterricht. https://www.chemieunterricht.de/dc2/haus/v141.htm (Zugriff am: 02.01.2023) ♦ Johannes. (2018, 13. Dezember). <i>Betoninstandsetzung erklärt: Was heißt „Carbonatisierung“?</i> Betoninstandsetzer. https://www.betoninstandsetzer.de/blog/was-heisst-carbonatisierung/ (Zugriff am: 02.01.2023) ♦ M 2 ♦ Grimm, R. (2024, 23. Februar). <i>Betonschäden (Teil 1): Carbonatisierung und Lochfraß</i>. Baustoffwissen. https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/grundstoffe-des-bauens/betonschaeden-teil-1-carbonatisierung-und-lochfrass/ (Zugriff am: 31.03.2024) ♦ in Anlehnung an [User_id: 652234] (2018). Pixabay. Verfügbar unter: https://pixabay.com/de/photos/bau-moniereisen-konstruktion-3734380 (Zugriff am: 23.06.2023)

	♦ M 3 siehe M 2 (https://www.baustoffwissen.de/) ♦ M 4 siehe M 1 (https://www.betoninstandsetzer.de/) ♦ M 5 ♦ Grimm, R. (2023, 31. Oktober). <i>Betonschäden (Teil 2): Sulfattreiben und Alkalireaktion</i>. Baustoffwissen. https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoff-knowhow/grundstoffe-des-bauens/betonschaeden-teil-2-sulfattreiben-und-alkalireaktion/ (Zugriff am: 31.03.2024) ♦ Rauch, P. (2021, 30. Januar). <i>Calciumsulfat (Gips, Ettringit) Sulfattreiben</i>, Ing-Büro Rauch. Bauratgeber24. https://www.ib-rauch.de/bautens/bauchemie2/ca_sulfat.html (Zugriff am: 02.01.2023) ♦ in Anlehnung an <i>Angriffsarten</i> (o. D.). Beton.wiki. https://www.beton.wiki/images/thumb/6/60/Angriffsarten.jpg/600px-Angriffsarten.jpg (Zugriff am: 10.04.2023) ♦ M 6 ♦ Wiens, U. & Breit, W. (1994, 31. Mai). <i>Reduzierung des Alkalitätsdepots durch Puzzolane</i>. Irbnet. https://www.irbnet.de/daten/rswb/95009500107.pdf (Zugriff am: 24.10.2023)
Hilfsmittel	♦ digitales Hilfsmittel, das mindestens die Funktionalität eines WTR hat ♦ mathematisch-naturwissenschaftliche Formelsammlung
fachpraktischer Anteil	nein

1 Aufgabe

Beton – Ein Werkstoff für die Ewigkeit? [1]

Jedes Jahr werden weltweit zwölf Kubikkilometer Beton produziert, genug, um eine 30 Zentimeter dicke und über tausend Meter hohe Mauer einmal um den Äquator herum zu bauen. Jedoch scheint dieser Superwerkstoff nicht ewig haltbar und stabil zu sein, sondern kommt im Laufe der Jahre an seine Grenzen.

	BE
1 Begründen Sie das basische Milieu von ausgehärtetem Beton (M 1). Erklären Sie die Funktionsweise des Schnelltests zur Feststellung des Fortschritts der Carbonatisierung (M 1 bis M 4).	6
2 Formulieren Sie die Reaktionsgleichung für die Carbonatisierung von Beton (M 3). Nennen Sie das Prinzip von Le Chatelier und begründen Sie auf dieser Grundlage den sinkenden pH-Wert bei zunehmender Carbonatisierung des Betons (M 3).	5
3 Skizzieren Sie ein Übersichtsschema (z. B. ein Fließdiagramm) zu den chemischen Vorgängen, die zum „Sulfattreiben“ führen (M 5). Erläutern Sie am Beispiel der Reaktion von Schwefelwasserstoff mit Wasser das Säure-Base-Konzept nach Brönsted unter Angabe einer Reaktionsgleichung (M 5).	10
4 Berechnen Sie die Massenkonzentration an Calciumhydroxid im Filtrat der Aufschlämmung der Betonprobe und beurteilen Sie darüber den Qualitätszustand des Betonteils (M 6).	9

Quellen (ggf. verändert):

- [1] Prof. Blumes Medienangebot: *Chemie im und ums Haus* (o. D.). <https://www.chemieunterricht.de/dc2/haus/v141.htm> (Zugriff am: 02.01.2023)
- [2] Johannes. (2018, 13. Dezember). *Betoninstandsetzung erklärt: Was heißt „Carbonatisierung“?* Betoninstandsetzer. <https://www.betoninstandsetzer.de/blog/was-heisst-carbonatisierung/> (Zugriff am: 02.01.2023)
- [3] Grimm, R. (2024, 23. Februar). *Betonschäden (Teil 1): Carbonatisierung und Lochfraß*. Baustoffwissen. <https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/grundstoffe-des-bauens/betonschaeden-teil-1-carbonatisierung-und-lochfrass/> (Zugriff am: 31.03.2024)
- [4] [User_id: 652234] (2018). Pixabay. Verfügbar unter: <https://pixabay.com/de/photos/bau-moniereisen-konstruktion-3734380> (Zugriff am: 23.06.2023)
- [5] Grimm, R. (2023, 31. Oktober). *Betonschäden (Teil 2): Sulfattreiben und Alkalireaktion*. Baustoffwissen. <https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/grundstoffe-des-bauens/betonschaeden-teil-2-sulfattreiben-und-alkalireaktion/> (Zugriff am: 31.03.2024)
- [6] Rauch, P. (2021, 30. Januar). *Calciumsulfat (Gips, Ettringit) Sulfattreiben*, Ing-Büro Rauch. Bauratgeber24. https://www.ib-rauch.de/bautens/bauchemie2/ca_sulfat.html (Zugriff am: 02.01.2023)
- [7] *Angriffsarten* (o. D.). Beton.wiki. <https://www.beton.wiki/images/thumb/6/60/Angriffsarten.jpg/600px-Angriffsarten.jpg> (Zugriff am: 10.04.2023)
- [8] Wiens, U. & Breit, W. (1994, 31. Mai). *Reduzierung des Alkalitätsdepots durch Puzzolane*. Irbnet. <https://www.irbnet.de/daten/rswb/95009500107.pdf> (Zugriff am: 24.10.2023)

2 Material

Material 1: Das Aushärten von Beton [1], [2]

Für Beton werden Kies, Sand und das Bindemittel Zement vermengt und anschließend mit Wasser versetzt. Dabei dient das Wasser nicht allein dazu, eine gut verarbeitbare Masse an Beton zu erhalten, sondern ist notwendig für dessen Aushärteprozess durch die sogenannte Hydratation des Zements. Hierbei kommt es zur Bildung von Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), das neben anderen Bestandteilen in dem noch frischen Beton für relativ hohe pH-Werte zwischen 12,5 und 13,5 sorgt.

Material 2: Stahlbeton [3]

Die Zugfestigkeit von Betonbauteilen lässt sich entscheidend verbessern, wenn in die Betonmasse Stahlstäbe oder Stahlgitter (sogenannte Stahlbewehrungen) einbetoniert werden. Dabei wird der Stahl durch das stark basische Milieu der ihn umgebenden Betonmasse vor Korrosion geschützt, indem sich eine Schutzschicht auf dem Stahl ausbildet.



Abb. 1: Bewehrungsstahl vor dem Einbau [4]

Material 3: Carbonatisierung von Beton [3]



Abb. 2: Betonabplatzung durch oxidierte Stahlstäbe

Unter Carbonatisierung versteht man die Gleichgewichtsreaktion von gelöstem Calciumhydroxid mit Kohlenstoffdioxid aus der Umgebungsluft zu schwerlöslichem Calciumcarbonat (Kalkstein, CaCO_3) und Wasser. Durch die Kalksteinbildung erhöht sich zwar die Festigkeit des Betons, jedoch ist das stark basische Milieu des Betons nicht mehr gegeben. Der pH-Wert des angefeuchteten Betons sinkt von 12,5 auf unter 9. Ab einem pH-Wert deutlich unter 9 beginnt der im Beton verbaute Stahl bei eindringender Feuchtigkeit zu rosten. Die Folge davon ist möglicherweise ein Stabilitätsverlust der Konstruktion sowie das Abplatzen von Betonteilen an der Oberfläche.

Material 4: Schnelltest zur Überprüfung des Fortschrittes der Carbonatisierung [2]

An frischen Betonbruchstellen wird der Fortschritt der Carbonatisierung in der Regel durch Besprühen mit einer Lösung des Säure-Base-Indikators Phenolphthalein sichtbar gemacht. Hierüber lässt sich eine Aussage zum noch vorhandenen Schutz des Baustahles vor Korrosion treffen.

Material 5: Schäden durch „Sulfattreiben“ in Abwasserkanälen [5], [6]

Beim Durchfließen von relativ warmem Haushaltsabwasser durch erdverlegte, kühle Abwasserrohre aus Beton kommt es zur Kondensation von Wasser im oberen Teil der inneren Rohrfläche. Abwasserrohre führen Schwefelwasserstoff-Gas (H_2S) mit, das bei der biologischen Zersetzung von Eiweißen im Haushaltswasser anfällt. Dieses Gas bildet in Gegenwart bestimmter Schwefelbakterien, dem Kondenswasser und dem Sauerstoff aus der Luft das Reaktionsprodukt Schwefelsäure. Aus dem im Beton enthaltenen Calciumhydroxid wird durch die

Reaktion mit Schwefelsäure festes Calciumsulfat (CaSO_4) gebildet. Dadurch kommt es zu einer Volumenvergrößerung gegenüber dem Calciumhydroxid, wodurch der Beton aufquillt und hiernach Risse und Abplatzungen bekommt (siehe Abbildung 3). Dies ist in der Fachwelt als sogenanntes „Sulfattreiben“ bekannt.

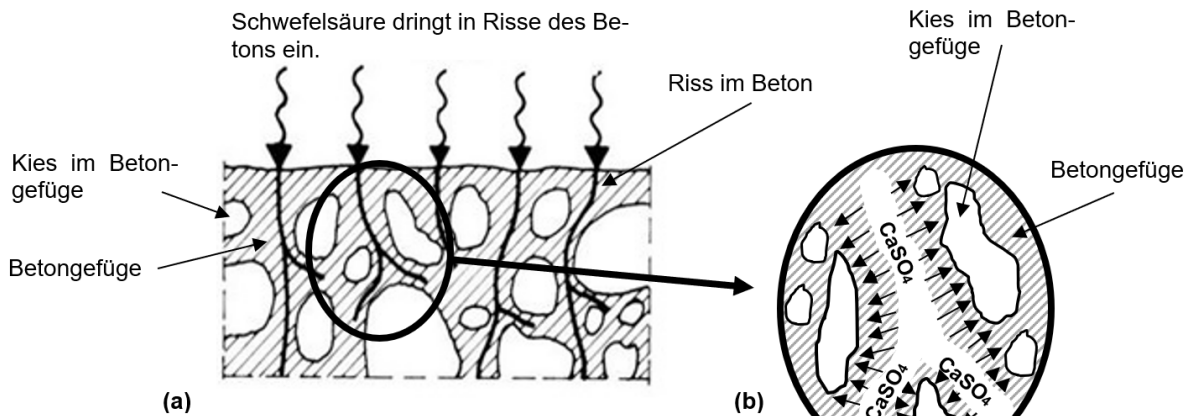


Abb 3: (a) schematische Abbildung zum Sulfattreiben [7]
(b) vergrößerter Ausschnitt [7]

Material 6: Analyse einer Betonprobe [8]

Bei Kenntnis des Massenanteils an Calciumhydroxid einer Betonprobe kann auf den Zustand des Betons geschlossen werden. Ist der Calciumhydroxidanteil infolge der Carbonatisierung zu niedrig, fehlt der Korrosionsschutz für den Baustahl. Dadurch ist die Tragfähigkeit eines Stahlbetonteils nicht mehr dauerhaft gewährleistet. In dem nachfolgenden Diagramm ist eine Referenzgerade abgebildet, die die zum Erhalt des Korrosionsschutzes notwendigen Mindestanteile an Calciumhydroxid im Beton bezogen auf dessen Alter ausweist.



Abb. 4: zeitabhängige Entwicklung des Mindestanteils an Calciumhydroxid in Beton nach der Aushärtezeit

Untersuchung einer Betonprobe:

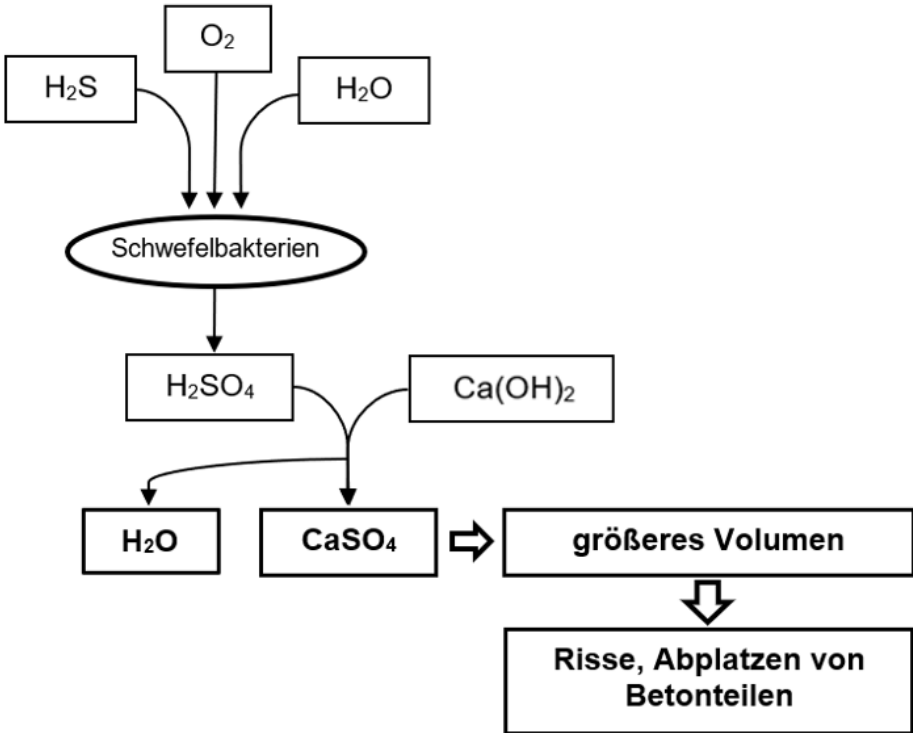
Von einer 27 Jahre (ca. 10.000 Tage) alten Brücke wurde eine Bohrkernprobe genommen und pulverisiert. Davon wurden 100 g Betonpulver in 1,0 L Wasser aufgeschlämmt.

Diese Aufschlämmung wurde so lange stehen gelassen, bis das gesamte Calciumhydroxid der Probe gelöst war, und anschließend filtriert. Der pH-Wert des Filtrates betrug 12,36.

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>Begründung des basischen Milieus von Beton:</u> ♦ Das sich beim Abbindeprozess bildende Calciumhydroxid dissoziiert in dem im Beton enthaltenen Wasser unter Abspaltung von Hydroxid-Ionen, die das basische Milieu bewirken.	1	1	
	<u>Erklärung der Funktionsweise des Schnelltests:</u> ♦ Ohne Farbumschlag wäre der pH-Wert mit höchstens 8,2 zu niedrig. Der Stahl im Beton ist nicht mehr vor Korrosion geschützt. ♦ Ist eine deutliche Purpurfärbung zu sehen, liegt der pH-Wert mindestens bei 10, was bedeutet, dass der Stahl vor Korrosion geschützt ist.	1	1 1	1
2	<u>Formulierung der Reaktionsgleichung zur Carbonatisierung:</u> ♦ $\text{Ca}^{2+} + 2 \text{OH}^- + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	1	2	
	<u>Nennung des Prinzips von Le Chatelier:</u> ♦ Nach dem Prinzip von Le Chatelier weicht ein im Gleichgewicht befindliches System einem äußeren Zwang so aus, dass der Zwang minimiert wird. <u>Begründung des sinkenden pH-Werts:</u> ♦ Durch die Bildung von schwerlöslichem Calciumcarbonat werden Calcium- und Hydroxid-Ionen aus dem chemischen Gleichgewicht entfernt. ♦ Dadurch und durch die Zufuhr von CO_2 läuft die Hydroxid-Ionen verbrauchende Reaktion bevorzugt ab, d. h. deren Konzentration wird verringert. Daher nimmt der pH-Wert ab.		1	1

3	<u>Skizze eines Übersichtsschemas zu den chemischen Vorgängen, die zum „Sulfattreiben“ führen:</u>  <u>Erläuterung des Säure-Base-Konzept nach Brönsted:</u> ♦ Das Schwefelwasserstoff-Molekül ist eine Brönsted-Säure, weil es Protonen abgibt (Protonendonator). ♦ Das Wasser-Molekül ist eine Brönsted-Base, weil es Protonen aufnimmt (Protonenakzeptor). ♦ Insgesamt handelt es sich um eine Protonenübertragungsreaktion. <u>Angabe einer Reaktionsgleichung:</u> ♦ $\text{H}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HS}^- + \text{H}_3\text{O}^+$	5		
		2	1	
			2	

4	<u>Berechnung der Massenkonzentration an Calciumhydroxid:</u> ♦ Berechnung der Hydroxid-Ionen-Konzentration: $pK_W = pH + pOH$ $pOH = 14 - pH$ $pOH = 1,64$ $c(OH^-) = 10^{-pOH}$ $c(OH^-) = 0,023 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$ ♦ Berechnung der Stoffmengenkonzentration: $\frac{c(\text{Ca}(\text{OH})_2)}{c(OH^-)} = \frac{1}{2}$ $c(\text{Ca}(\text{OH})_2) = \frac{1}{2} \cdot c(OH^-)$ $= 0,0115 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$ ♦ Berechnung der Massenkonzentration: $\beta(\text{Ca}(\text{OH})_2) = c(\text{Ca}(\text{OH})_2) \cdot M(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ $\beta(\text{Ca}(\text{OH})_2) = 0,0115 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \cdot 74,1 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ $= 0,85 \frac{\text{g}}{\text{L}}$ In einem Liter Filtrat sind 0,85 g Calciumhydroxid enthalten, was dem Calciumhydroxid-Gehalt von 100 g des Bohrkerns entspricht. Das entspricht einem prozentualen Anteil von 0,85 %. <u>Beurteilung des Qualitätszustandes des Betonteils:</u> ♦ Laut Diagramm müsste eine 27 Jahre (10.000 Tage) alte Betonprobe einen Calciumhydroxidgehalt von mindestens 0,4 % aufweisen. ♦ Die Mindestanforderung ist damit noch erfüllt.	2	1	2
	Summe¹	12	13	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	8	8	9, 10	1
2	16		9, 10	
3	7, 16		2, 9, 10	
4	17		9	2

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.