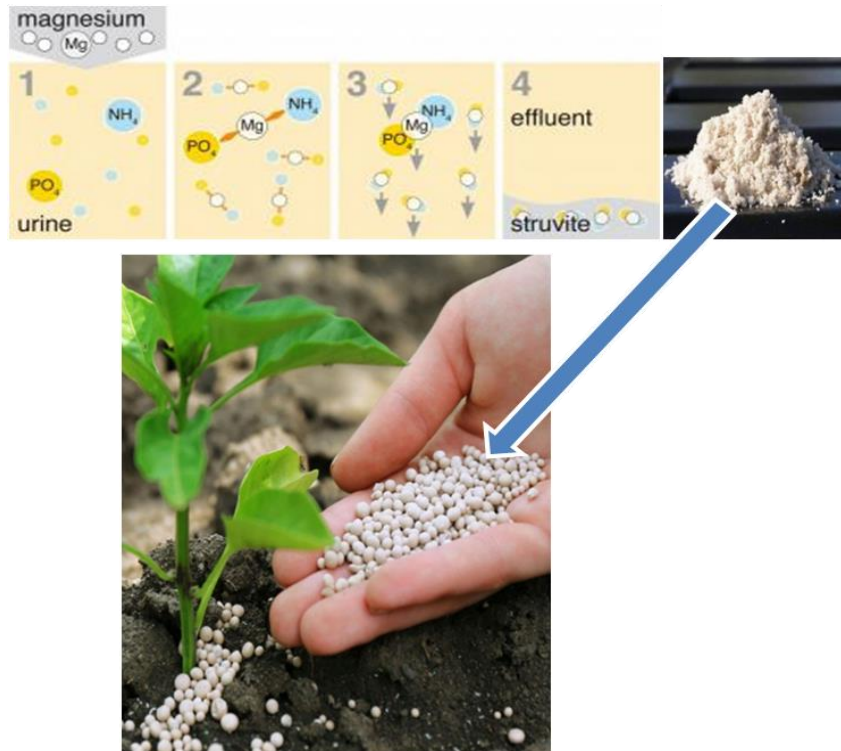


## Lehrerskript

# Phosphorrückgewinnung aus Abwässern



## Inhaltsverzeichnis

Einleitung .....	2
Hintergrundinformationen .....	3
Lernziele .....	7
Key Competence European Framework .....	8
Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen .....	9
Grundlagen – Theoretischen Prinzipien.....	10
Versuchsbeschreibung .....	10
Lernpfad .....	11
Evaluierung .....	12
Literaturverzeichnis .....	13

# Lehrerskript

## Einleitung

---

Der Urin, ein Produkt der menschlichen Ausscheidung, ist Bestandteil des städtischen Abwassers. Der Urin ist eine der reichsten und zugänglichsten Quellen von **Phosphor** und **Stickstoff** für die **Struvitherstellung**. Das Mineral kann in der Gegenwart von **Magnesium** durch eine Fällungsreaktion bei alkalischem pH-Wert gewonnen werden.

Die Versuche dieses Toolkits richten sich an Schüler:innen im Alter von **15 bis 19 Jahren**. Die Labortätigkeit ist in eine **theoretische** Lernphase, unter Anleitung der Lehrkraft, und zwei **praktische** Phasen gegliedert. Ziel ist es, **P** mit gängigen Materialien als **Struvit** aus synthetisiertem Abwasser. Die Labortätigkeit setzt sich aus zwei Modulen zusammen:

**Modul 1:** Darstellung von Struvit aus synthetischem Abwasser, unter Berücksichtigung des pH-Werts und den Konzentrationen der verwendeten Reagenzien.

**Modul 2:** Bau eines einfachen Prototyp-Reaktors zur Extraktion von Struvit aus synthetischem Abwasser und Erfassung seiner Funktionsweise. Die verwendeten Materialien sollten in im Baumarkt oder Bastelgeschäft erhältlich sein. Ziel ist die **Rückgewinnung von P als Struvit** aus Abwasser mithilfe gängiger Materialien. Das Experiment ruft den Schüler:innen P-Recycling aus Abwasser als Beitrag zur Ressourcenschonung ins Bewusstsein.

Durch diesen Versuch erwerben die Schüler Kenntnisse über die **Rückgewinnung von P** aus Abwässern, um die Ausbeutung der natürlichen Ressourcen zu reduzieren. Die Schüler werden durch den Versuch auch dazu angeregt, zu lernen, inwieweit Abwässer eine wichtige Nährstoffquelle für die Landwirtschaft und den Umweltschutz sind. Die Schüler:innen sollen durch die Versuche die nötigen Fähigkeiten entwickeln, um wissenschaftliche Geräte korrekt und sicher zu benutzen, Messungen durchzuführen und genau definierte wissenschaftliche Verfahren anzuwenden. Darüber hinaus fördert die Laborerfahrung die Fähigkeit des Schüler:innen, Projekte im Team durchzuführen, zu unterschiedlichen Zeiten unterschiedliche Rollen zu übernehmen, Ideen beizutragen und zu verschiedene Ansätze zu diskutieren.

Weblink: <https://ec.europa.eu/easme/en/horizon-2020-societal-challenge-climate-action-environment-resource-efficiency-and-raw-materials>

### Schlüsselwörter:

*Nachhaltigkeit; Recycling; Landwirtschaft; Abwasser; Kreislaufwirtschaft*

## Lehrerskript

### Hintegrundinformationen

---

**Phosphor (P)** und **Phosphatgestein** sind sogenannte **Kritische Rohstoffe**, also Rohstoffe, die für die europäische Wirtschaft wirtschaftlich und strategisch wichtig sind, und für deren Versorgung ein hohes Risiko besteht.

**Phosphor (P)** ist ein wesentlicher Makronährstoff für das Wachstum aller lebenden Organismen. Die fortschreitende Erschöpfung der natürlichen Ressourcen ist die Folge einer kontinuierlichen, Ausbeutung dieser Ressourcen für den anthropogenen Gebrauch. Die größten **Phosphorvorkommen** befinden sich in China, Marokko, den USA und Russland (U.S. Geological Survey, 2017). **Phosphorite**, aus denen P gewonnen wird, liegen als Sedimentgestein (80-90 % der weltweiten Produktion) bzw. magmatisches Gestein (10-20 % der weltweiten Produktion) vor.

Der **Abbau von Phosphatgestein** nimmt stetig zu. Im Jahr 2017 wurden weltweit 35,7 kg Phosphatgestein pro Person gewonnen. P-Extrakt wird angesichts der weltweit steigenden Nachfrage nach Lebensmitteln vor allem für die Herstellung von Düngemitteln verwendet (Stewart et al., 2005). Die derzeitige landwirtschaftliche Produktion ist auf Phosphor aus **Phosphatgestein**, eine nicht-erneuerbare Ressource, angewiesen. Nur 17% der Phosphate kommen aus erneuerbaren Quellen wie Dung und Gülle, Lebensmittelresten, oder Abwasser. Die derzeitigen weltweiten Reserven an P werden in 50-100 Jahren erschöpft sein, und die P-nachfrage wird voraussichtlich stark steigen. Der weltweite Höhepunkt der Phosphorproduktion wird für etwa 2030 erwartet. Diese Entwicklungen werden zu höheren Düngemittelkosten und zur Erschöpfung von Phosphatgesteins führen (Cordell et al., 2009). Ohne phosphatbasierte Düngemittel wird die Ackerbauproduktion pro Fläche drastisch zurückgehen. 1,2 Millionen Tonnen Phosphorgestein fließen als elementarer Phosphor ( $P_4$ -Struktur) fließen in die Chemie- und Waffenindustrie.

**Phosphor** kann auch aus sogenannten "sekundären" Ressourcen zurückgewonnen werden, d.h. aus Abfallstoffen, die nach dem Produktionsprozess anfallen. Die Phosphorrückgewinnung ist eine praktischer Recyclingprozess, der dabei hilft, Eutrophierung zu verhindern (Gemeinsame Forschungsstelle JRC, 2018).

Ein Übergang hin zu einer nachhaltigeren Nutzung von Phosphor erfordert die Umsetzung einer Reihe von Maßnahmen in den anthropogenen Prozessen. Ein substanzieller Teil des Rückgewinnungspotenzials von P stammt aus Nutzung von Endprodukten aus Klärprozessen. Die Europäische Gemeinschaft bewertet die Wiederverwendung von Abwasserbehandlungsrückständen als "*best practice*" für die Rückgewinnung von Phosphaten für die Landwirtschaft.

## Lehrerskript

Kläranlagen und Tierhaltungsanlagen sind die beiden wichtigsten (Sekundär-)Phosphorquellen. Die Freisetzung von unbehandeltem Abwasser in die Umwelt führt durch die hohen Mengen an P und N zu einer Verschmutzung (Eutrophierung) des Ablaufes. Kläranlagen spielen daher sowohl in der Wasseraufbereitung als auch in der Rückgewinnung von Nährstoffen (Ammoniak und P) eine wichtige Rolle. Phosphor kann aus dem Abwasser in kristalliner Form als Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP), auch **Struvit** genannt, zurückgewonnen werden, das auch als umweltfreundlicher Düngemittel gilt.

**Gesetzgebung:** Das EU-Düngemittelgesetz erkennt nur Phosphatprodukte aus der Primärproduktion als Düngemittel an, während aus Abwasserbehandlungsrückständen zurückgewonnene Phosphatverbindungen noch nicht als Düngemittel gekennzeichnet werden können (Europäische Union, 2003). Die Gesetzgebung wird derzeit überarbeitet, um auch Verbindungen aus sekundären Phosphorquellen, wie z.B. **Magnesiumammoniumphosphat (MAP)**, auch **Struvit** genannt, als Düngemittel anzuerkennen (Europäische Kommission, 2016).

**Landwirtschaft:** Die Bioverfügbarkeit von aus Struvit gewonnenem P ist in Kulturpflanzen sehr hoch (ca. 94%) und kann daher direkt als Langzeitdünger verwendet werden.

**Umwelt:** Struvit ist umweltfreundlich, weil Eutrophierung und Treibhausgasemissionen von mineralischen P-Düngern reduziert werden.

### Phosphor in der Landwirtschaft

P ist ein wichtiges Element für die Pflanzen- und Tierwelt. Es ist ein Grundbaustein von ATP, DNS, RNS und Phospholipiden (wichtig in Zellwänden).

Außerdem spielt P eine wichtige Rolle in den folgenden Prozessen:

- Photosynthese
- Stickstofffixierung
- Blüten-, Frucht- und Samenproduktion
- Reifung und Qualität des Ernteguts

Nur ein Teil des gesamten P im Boden ist für die Pflanzen bioverfügbar, daher spielt P eine kritische Rolle in der Landwirtschaft. Der Gesamtgehalt von P im Boden liegt bei 0,1 - 0,2%: anorganischer Phosphor (≈50%) und organischer Phosphor (15-80%). Die P-Löslichkeit ist mit etwa 0,03 mg P/kg sehr niedrig.

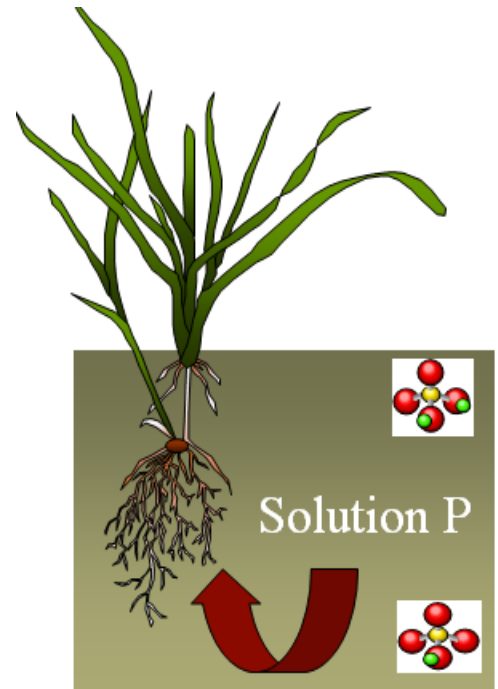
Sowohl im Boden als auch in Wasser liegt P löslich in Form von Orthophosphaten,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  und  $\text{PO}_4^{3-}$ , vor.

## Lehrerskript

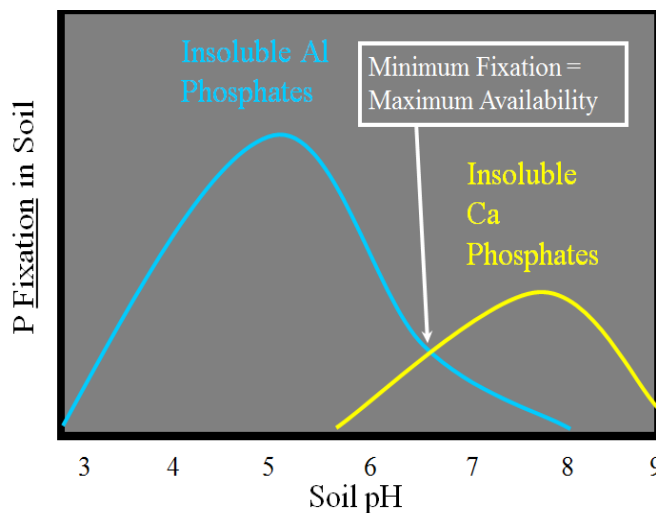
Im **sauren Milieu** ( $\text{pH} < 7$ ), liegt vorwiegend das primäre Orthophosphat  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  vor. In diesem Molekül sind zwei Wasserstoffatome (grün dargestellt) an je ein Sauerstoffatom gebunden. Mehrere Wasserstoffatome deuten auf eine saure Umgebung hin.

Im **basischen Milieu** ( $\text{pH} > 7$ ), liegt vorwiegend das sekundäre Orthophosphat  $\text{HPO}_4^{2-}$  vor. In diesem Molekül ist nur ein Wasserstoffatom an ein Sauerstoffatom gebunden, was auf eine alkalische Umgebung hindeutet. Im leicht basischen Milieu ( $\text{pH} = 7,2$ ), liegen beide Spezies zu gleichen Teilen vor.

Viele Bodeneigenschaften wie eine Reichhaltigkeit von Ca, Al und Fe, organischen Substanzen, sowie dem pH-Wert beeinflussen die Löslichkeit und somit die Bioverfügbarkeit von P. Der pH-Wert ist der kritischste dieser Faktoren.



Reaktionen, die P-Verfügbarkeit reduzieren, treten in allen pH-Bereichen auf, sind aber in alkalischen ( $\text{pH} > 7$ ) und sauren Böden ( $\text{pH} < 5,5$ ) am ausgeprägtesten (s. Abbildung 1). Die höchste P-Verfügbarkeit wird in einem pH-Bereich zwischen 6,0 und 7,0 erreicht (Abbildung 1).



Soil pH is  
a critical  
factor

**Abbildung 1.** Verhalten von P bei verschiedenen pH-Werten des Bodens. P ist nur bei neutralem pH bioverfügbar.



## Lehrerskript

### Phosphorquellen für Kulturpflanzen

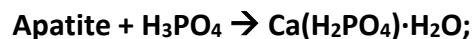
Heutzutage wird P größtenteils aus dem **Abbau von Phosphatgestein** gewonnen. Dieses Phosphatgestein bildete sich entweder in mariner Umgebung auf **Kontinentalschelf** oder als **vulkanische Ablagerungen**, vor allem in Schildgebieten und Riftzonen.

Phosphatgestein wird zunächst in Phosphorsäure umgewandelt. Der Großteil von P-Düngern wird durch eine Reaktion von Phosphatgestein mit einer Säure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ ) hergestellt (Abbildung 6).

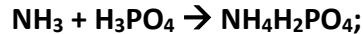


Die Hauptquellen von P-Dünger sind:

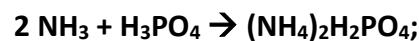
- **Apatite**  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ , das auch Bestandteil von Zähnen und Knochen ist, wird in Säure gelöst, um löslichen P-Dünger herzustellen:



- **Ammoniumphosphat** entsteht, wenn gleiche Mengen Ammoniak und Phosphorsäure reagieren.



- **Diammonium phosphate** (DAP) wird hergestellt, wenn 2 mol Ammoniak mit 1 mol Phosphorsäure reagiert:



P aus dem Abbau von Phosphatgestein ist begrenzt und der Rohstoff ist nicht erneuerbar. Aus diesem Grund werden P-Dünger zukünftig nur begrenzt verfügbar sein.

### Gibt es alternative Phosphorquellen?

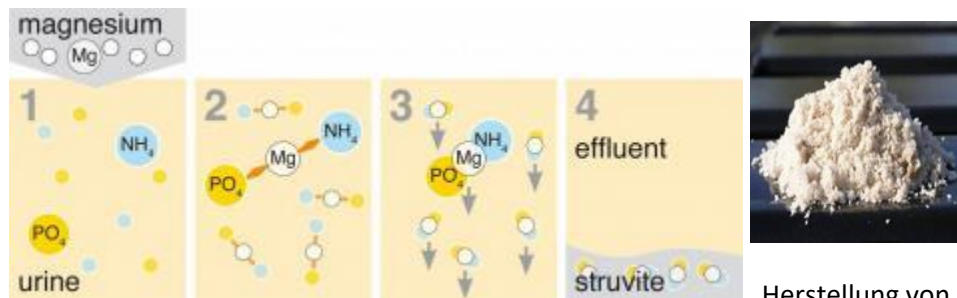
Kläranlagen und Viehzuchtbetriebe sind die beiden wichtigsten (Sekundär-)Phosphorquellen. Die Freisetzung von unbehandeltem Abwasser in die Umwelt führt durch die hohen Mengen an P und N zu einer Verschmutzung (Eutrophierung) des Ablaufes. Kläranlagen spielen daher sowohl in der Wasseraufbereitung als auch in der Rückgewinnung von Nährstoffen (Ammoniak und P) eine wichtige Rolle.

Phosphor kann aus dem Abwasser in kristalliner Form als **Magnesium-Ammonium-Phosphat** (MAP), auch **Struvit** genannt, oder als Phosphatverbindung in Pellet-Form zurückgewonnen werden. Struvit gilt als umweltfreundlicher Dünger.

## Lehrerskript

### Struvit

Struvit ( $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) ist ein Mineral, das durch eine alkalische Fällungsreaktion von ammonium, Phosphat- und Magnesiumionen als weißes Pulver dargestellt wird (Abbildung 7).



**Abbildung 7:**  
kommunalen Abwässern.

Herstellung von Struvit aus

**Struvit** hat folgende Vorteile für den Ackerbau:

- **Bioverfügbarkeit:** N, P und Mg können in Struvit-Form von Pflanzen leicht aufgenommen werden.
- **langsame Freisetzung von Nährstoffen:** Durch seine geringe Löslichkeit kann eine langsame und gleichmäßige Nährstoffversorgung garantiert werden.
- **hohe Reinheit:** andere Inhaltstoffe des Abwasser, wie z.b. Pharmazeutika, fallen bei der Struvitfällung nicht aus.

Alle zusätzlichen Hintergrundinformationen zum Toolkit sind als Material für Lehrer in **Anhang A** zu finden.

## Lernziele

Am Ende dieser Lerneinheit sollten die Schüler:innen:

- ein Bewusstsein für die Bedeutung von Phosphor und seinen Anwendungen entwickelt haben;
- ein Bewusstsein für P-Recycling aus Abwasser zur Schonung von natürlichen Ressourcen entwickelt haben;
- den Wirkung des pH-Werts auf die Löslichkeit, sowie die Form von P in Lösung kennen;
- die wichtigsten Phosphorquellen kennen.

## Lehrerskript

### Key Competence European Framework

<b>Lese- und Schreibkompetenzen</b>
S1. Fähigkeit, Konzepte, Gefühle, Tatsachen und Meinungen sowohl mündlich als auch schriftlich zu verstehen und zu interpretieren.
S2. Fähigkeit, Konzepte, Gefühle, Tatsachen und Meinungen sowohl mündlich als auch schriftlich auszudrücken.
S4. Fähigkeit, auf angemessene und kreative Weise mit anderen Menschen wirksam zu kommunizieren und in Beziehung zu treten.
<b>Mehrsprachenkompetenz</b>
S1. Fähigkeit, Konzepte, Gefühle, Tatsachen und Meinungen sowohl mündlich als auch schriftlich zu verstehen und zu interpretieren.
S2. Fähigkeit, Konzepte, Gefühle, Tatsachen und Meinungen sowohl mündlich als auch schriftlich auszudrücken.
S4. Fähigkeit, auf angemessene und kreative Weise mit anderen Menschen wirksam zu kommunizieren und in Beziehung zu treten.
S5. Wortschatz- und Grammatikkenntnisse in verschiedenen Sprachen.
S7. Fähigkeit, die Fachsprache dem Arbeitsgebiet angemessen zu verwenden.
<b>Mathematische, wissenschaftliche und technische Fähigkeiten</b>
S1. Fähigkeit, konstruiertes Denken zu verwenden, um ein Problem in jeder Situation zu lösen.
S4. Bereitschaft, neue Probleme aus neuen Richtungen anzugehen.
S5. Fähigkeit, quantitativ zu denken.
S6. Fähigkeit, qualitative Informationen aus quantitativen Daten zu extrahieren.
S8. Fähigkeit, experimentelle und Beobachtungsstudien zu entwerfen und daraus abgeleitete Daten zu analysieren.
S9. Fähigkeit, komplexe Optimierungs- und Entscheidungsprobleme zu formulieren und Lösungen im ursprünglichen Problemkontexten zu interpretieren.
<b>Digitale und technologiebasierte Kompetenzen</b>
S1. Kritische Nutzung von Informationstechnologie für die Arbeit.
S2. Grundlagen der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT).
S3. Verständnis für die Bedeutung, die Möglichkeiten und Risiken der IKT im Alltag.
S4. Fähigkeit, technische Werkzeuge und Maschinen zu verwenden und zu handhaben.
<b>Soziale Kompetenz und Fähigkeit, neue Kompetenzen zu erwerben</b>
S1. Fähigkeit, verschiedene Arten des Lernens zu verfolgen und darin zu bestehen.
S2. Fähigkeit, vorhandene Möglichkeiten zu identifizieren.
S3. Fähigkeit, neue Kenntnisse, Fähigkeiten und Qualifikationen zu erwerben, zu verarbeiten und zu verarbeiten, die für berufliche Ziele erforderlich sind.
<b>Aktive Bürgerschaft</b>
S1. Fähigkeit, funktionell mit anderen Menschen zu interagieren.
S2. Fähigkeit, sich an eine sich verändernde Situation anzupassen, flexibel zu sein und unter Druck zu arbeiten.
S3. Fähigkeit, effektiv zu arbeiten und mit anderen Teammitgliedern zusammenzuarbeiten.
<b>Unternehmerische Kompetenz</b>




















## Lehrerskript

S1. Bewusstsein für lokale, nationale und europäisches Kulturerbe und deren Stellenwert in der Welt.
S2. Grundkenntnisse der zeitgenössischen Kultur.
S3. Kulturelle Vielfalt verstehen.
<b>Kulturbewusstsein und kulturelle Ausdrucksfähigkeit</b>
S1. Fähigkeit, Ideen in die Tat umzusetzen.
S2. Kreativität/Innovation.
S3. Fähigkeit, Aufgaben zu entwickeln und zu verwalten.
S4. Unabhängigkeit, Motivation und Entschlossenheit.

## Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen

Die Ziele für nachhaltige Entwicklung sind die Blaupause für eine bessere und nachhaltigere Zukunft für alle. Sie adressieren globale Herausforderungen, mit denen wir konfrontiert sind. Dazu zählen auch solche, die mit Armut, Ungleichheit, Klimawandel, Umweltzerstörung, Frieden und Gerechtigkeit zusammenhängen. UN-Nachhaltigkeitsziele, die diese Module adressieren, sind:

		Enable access to basic services		Equal access to global expertise
		Safe medical devices		Sustainable urbanization
		Access to education		Responsible consumption and production
		Less hardship, more opportunities		Strengthen resilience, reduce disaster impact
		Safe and affordable water		Reduce marine pollution
		Energy – the golden thread		Sustainable use of terrestrial ecosystems
		Safety of workers and economic growth		Promote peaceful and inclusive societies
		Resilient infrastructure and sustainable industrialization		Better access to technology and innovation

## Lehrerskript

### Grundlagen – Theoretischen Prinzipien

---

Urin ist ein Bestandteil von kommunalen Abwässern mit einem hohen Gehalt an **Phosphor** (P) und **Stickstoff** (N) in ionischer Form ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  und  $\text{NH}_4^+$ ). Diese Ionen werden bei der Zersetzung biologischer Makromoleküle (Proteine, Nukleinsäuren, Phospholipide) unterschiedlicher Herkunft gebildet. Unter geeigneten chemischen und physikalischen Bedingungen reagieren P und N zu einem Mineral namens **Struvit**. Struvit bildet sich bei alkalischem pH und in der Gegenwart von Magnesium (Mg, siehe Reaktion unten):



pH-Wert auf 8,0 eingestellt

Struvit wird gebildet, wenn  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  in **äquimolaren Mengen** (d.h. Stoffmengenverhältnis 1:1:1) vorhanden sind.

### Anhang 1 – Phosphor in der Landwirtschaft

### Versuchsbeschreibung

---

#### Modul 1 – Struvitextraktion

Ziel des Versuchs ist die **Rückgewinnung von P in Form von Struvit** aus synthetischem Abwasser. Drei Reagenzien werden benötigt, um die Struvitfällung im alkalischen Milieu zu begünstigen: Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) und Phosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). Struvit fällt nach etwa drei Stunden als weißer Feststoff aus. Mit dem erhaltenen Struvit kann man z.B. den Garten oder Hauspflanzen düngen. Dieses Experiment schafft bei den Teilnehmern ein Bewusstsein dafür, dass Recycling von Abwässern zur Schonung natürlicher Ressourcen und somit zum Umweltschutz beiträgt.

#### Modul 2 – Reaktor

Ziel des Versuchs ist der Bau eines einfachen Reaktorprototyps zur Extraktion von Struvit aus synthetischen Abwässern sowie das Verständnis seiner Funktionsweise. Alle verwendeten Materialien sollten im Baumarkt oder im Bastelgeschäft erhältlich sein. Die detaillierte Versuchsbeschreibung, das benötigte Material, und die Sicherheitshinweise finden Sie im Lehrerskript zu Modul 2.

# Lehrerskript

## Lernpfad

---

**Schritt 1 (30 Minuten):** Die Lehrkraft stellt das Thema und den Laborversuch von Modul 1 vor. Dazu kann eine PowerPoint-Präsentation oder das erarbeitete Video genutzt werden.

**Schritt 2 (60 Minuten):** Die Schüler:innen werden in Gruppen aus jeweils 3-4 Schüler:innen eingeteilt. Jede Gruppe ist selbst dafür verantwortlich, die ihr zugeteilte Aufgabe zu erfüllen und das Gruppenziel zu erreichen.

**Schritt 3 (15 Minuten):** Jede Gruppe stellt den anderen Teilnehmer:innen die im Versuch erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse vor. Dazu können Videos oder Laborberichte genutzt werden.

**Schritt 4 (15 Minuten):** Die Lehrkraft stellt die Bauschemen der einzelnen Bauteile des Reaktors von Modul 2 kurz im Rahmen einer PowerPoint-Präsentation vor.

**Schritt 5 (60 Minuten):** Die Schüler:innen werden in Gruppen aus idealerweise 3-4 Schüler:innen eingeteilt. Jede Gruppe baut eine Komponente des Reaktors aus Modul 2.

# Lehrerskript

## Evaluierung



### 1. In welchen Formen liegt P in Lösung vor?

**A:** P liegt in Lösung als  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  und  $\text{PO}_4^{3-}$  vor.

### 2. Welche Ionen sind an der Bildung von Struvit beteiligt?

**A:** Magnesium- ( $\text{Mg}^{2+}$ ), Ammonium- ( $\text{NH}_4^+$ ) und Phosphat- ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  und  $\text{PO}_4^{3-}$ ) Ionen.

### 3. Warum entsteht bei der Abwasseraufbereitung Struvit?

**A:** Abwasser enthält große Mengen an Ammonium- ( $\text{NH}_4^+$ ), Phosphat- ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  und  $\text{PO}_4^{3-}$ ) und Magnesium- ( $\text{Mg}^{2+}$ ) Ionen. Diese sind Abbauprodukte von Mikroorganismen, Makromolekülen, Reinigungsmitteln und Chemikalien, die interagieren und zu dem Mineral Struvit reagieren.

### 4. Was ist der Unterschied zwischen organischem und mineralischem Phosphor?

**A:** Organischer Phosphor stammt aus tierischen und pflanzlichen Rückständen wie Inositolphosphaten, Nukleinsäuren und Phospholipiden. Es wird durch Mikroorganismen mineralisiert in mineralische Verbindungen wie Orthophosphate umgewandelt. Mineralischer Phosphor wird aus Sediment- oder Vulkangestein gewonnen.

### 5. Wie wirkt sich der pH-Werts auf die Löslichkeit von P aus?

**A:** P kann zwar in allen pH-Bereichen ausgefällt werden, die günstigsten Bedingungen zur Fällung liegen aber im basischen ( $\text{pH} > 7,3$ ) und im saure ( $\text{pH} < 5,5$ ) Milieu. Dabei spielt auch die Präsenz bestimmter Kationen (z.B.  $\text{Mg}^{2+}$ ) eine Rolle.

### 6. Welche Rolle spielt das verwendete Natriumhydroxid?

**A:** Natriumhydroxid wird verwendet, um den pH-Wert der Lösung anzupassen. Der ideale pH-Wert zur Struvitfällung soll eingestellt werden.

### 7. Wie sieht der Niederschlag (Struvit) nach dem Trocknen aus?

**A:** Struvit liegt als weißer Feststoff vor.

### 8. Warum wird ein Ventil verwendet, das den direkten Durchfluss der Lösung durch den Filter verhindert?

**A:** Die Ausfällung von Struvit dauert mehrere Stunden. Die die Lösung muss im Reaktor verbleiben, bis die chemische Fällungsreaktion abgeschlossen ist.

### 9. Welchen Vorteil bringt der Bau eines solchen Reaktors für die Gewinnung von Struvit?

**A:** Ziel des Experiments war es, einen einfachen Lehrreaktor aus leicht verfügbaren Materialien zu bauen, um die Rückgewinnung von P aus Abwasser zu demonstrieren.

## Lehrerskript

### Literaturverzeichnis

---

- European Commission, 2016. Circular Economy Package: Proposal for a Regulation of the European Parliament of the Council Laying Down Rules on the Making Available on the Market of CE Marked Fertilizing Products and Amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009.
- European Union, 2003. Regulation (EC) No 2003/2003 of the European parliament and of the Council of 13 October 2003 relating to fertilizers. Off. J. Eur. Union L304, 1e194Cordell D. et al. (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. Global Environmental Change 19, 292-305
- Melia P.M. et al. (2017). Trends in the recovery of phosphorus in bioavailable forms from wastewater. Chemosphere 186, 381-395.
- Stewart W.M., et al. (2005). The Contribution of Commercial Fertilizer Nutrients to Food Production. Agronomy Journal, 97, 1-6.
- AIAM ([www.aiamitalia.it](http://www.aiamitalia.it))
- Weschool (library.weschool.com)
- Science Learn ([www.sciencelearn.org](http://www.sciencelearn.org))
- Treccani ([www.treccani.it](http://www.treccani.it))
- Khan Academy ([www.khanacademy.org](http://www.khanacademy.org))
- U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January (2017) [https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate\\_rock/mcs-2017-phosp.pdf](https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/mcs-2017-phosp.pdf).
- Joint Research Centre (European Commission), (2018). Critical raw materials and the circular economy. Background report – Study. <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d0c609d2-f4ef-11e7-be11-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-search>
- Handbook of Environmental Materials Management Ed. Chaudery MustansarHussain, Springer, Cham, January 2018, DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58538-3>
- Website: [https://nutriman.net/farmer-platform/technology/id\\_252](https://nutriman.net/farmer-platform/technology/id_252)