



„Phosphor-Rückgewinnung: angewandte Umwelttechnik im Schülerlabor“

Ein Projekt zur Entwicklung und Implementation von Lehr- und Lernmaterialien für ein wichtiges Thema der Nachhaltigkeitsdebatte

Aktenzeichen der DBU: 33729

Abschlussbericht

Förderzeitraum 16. November 2016 – 15. Februar 2019

gefördert durch



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Prof. Dr. I. Eilks, Dr. A. Siol, C. Zowada,
Universität Bremen
Institut für die Didaktik der Naturwissenschaften (IDN)
Leobener Straße 3, NW 2, 28359 Bremen

Prof. R. Hempelmann, Dr. J. Huwer, I. Schmoll
Universität des Saarlandes
Physikalische Chemie
Transferzentrum Nano-Elektrochemie (TNE)
Campus B2 2, 66123 Saarbrücken

Projektbeginn November 2016
Projektlaufzeit 27 Monate

Bremen, im Februar 2019

06/02

**Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	33729	Referat	Fördersumme	124.389,- €
----	--------------	---------	-------------	--------------------

Antragstitel **„Phosphor-Rückgewinnung:
angewandte Umwelttechnik im Schülerlabor“**

Stichworte Bildung für nachhaltige Entwicklung. Chemiedidaktik, Schülerlabore, Berufsausbildung, Chemielaboranten, CTA, Berufsorientierung, technische Verfahren, Klärwerk, Abwasser, Klärschlamm, Fällung, Phosphor, Phosphat, Dünger, Pflanzenverfügbarkeit, Struvit, MAP, Photometrie, pH-Wert, Kristallisation, Life Cycle Assessment (LCA), Lernfirma, Prezi, Multitouch Learning Books, digitale Medien, quantitative Analyse, Ausbildung, chemisch-technische Laborberufe

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
27 Monate	16.11.2016	15.02.2019	4

Abschlussbericht 25. Feb. 2019

Bewilligungsempfänger	Universität Bremen	Tel	0421 218 63280
	Institut für die Didaktik der Naturwissenschaften IDN	Fax	0421 218 63288
	Prof. Dr. I. Eilks	Projektleitung: Prof. Dr. I. Eilks	
	Leobener Str. 3, NW2	Bearbeiter: Prof. Dr. I. Eilks, Dr. A. Siol, C. Zowada	
	28334 Bremen		

Kooperationspartner Universität des Saarlandes, Physikalische Chemie - Transferzentrum Nano-Elektrochemie (TNE), Prof. Dr. Johannes Huwer, Campus B2 2, 66123 Saarbrücken

Unterstützer hanseWasser Bremen, Chemische Werke Budenheim, DPP Deutsche Phosphorplattform, DWA-Nord, Emscher-Genossenschaft

Deutsche Bundesstiftung Umwelt ☐ An der Bornau 2 ☐ 49090 Osnabrück ☐ Tel 0541/9633-0
☐ Fax 0541/9633-190 ☐ <http://www.dbu.de>

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

In diesem Vorhaben werden Bildungsangebote aus der angewandten Umwelttechnik am Beispiel der „Phosphor-Rückgewinnung“ für Schülerlabore entwickelt und implementiert. Die Angebote richten sich sowohl an Lerngruppen der Jahrgänge 9-13 der allgemeinbildenden sowie berufsbildenden Schulen als auch an Auszubildende der chemisch-technischen und besonders der umwelt-technischen (UT) Ausbildungsberufe. Hierzu werden Netzwerke aus Hochschulen, Schülerlaboren, allgemein- und berufsbildenden Schulen in Bremen und Saarbrücken gebildet. Systematisch werden auf diesem Wege schulische Bildung als auch Berufsausbildung, ebenso wie die Lehrerausbildung und Lehrerfortbildung, für die Innovation von naturwissenschaftlichem Unterricht durch Schülerlabore miteinander verknüpft.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im Zusammenspiel von Fachdidaktik, Schülerlabor, Ausbildungszentren und Schulen werden Bildungsangebote aus dem Bereich der angewandten Umwelttechnik für Schülerlabore entwickelt. Neben einem Angebot für die Sekundarstufe I (Jahrg. 9/10) mit einfachen Experimenten zum Nachweis von Phosphat, werden zwei komplexere Angebote für die Sekundarstufe II sowie für Auszubildende der chemisch-technischen und UT-Berufe erstellt, die vier ausgewählte technische Verfahren der P-Rückgewinnung thematisieren. Eingebettet in den didaktischen Kontext einer Lernfirma, erhalten die Kursteilnehmer fiktive Arbeitsaufträge, die sich mit der physikalisch-chemischen Bearbeitung dieser neuartigen Umwelttechnologie befassen. Dabei fließen die im Praktikum erhaltenden Daten in ein finales Life Cycle Assessment ein, um eine abschließende Prozessbewertung zu ermöglichen. Drei digitale Tools (eine Prezi™ zur Einführung in das Thema, ein Multitouch Learning Book (MLB) als digitaler Lernbegleiter und eine Sankey-Applikation) runden das Angebot ab. Die Entwicklung erfolgt zyklisch in Kooperation mit verschiedenen Bremer Schulen und Ausbildungszentren in Anlehnung an das Modell Partizipativer Aktionsforschung. Maßnahmen zur beruflichen Orientierung werden ebenso einbezogen. Die Lernangebote werden in den Schülerlaboren an beiden Standorten implementiert und dauerhaft über den Förderzeitraum hinaus angeboten.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Außendarstellung des Projekts erfolgt über die Websites der beiden Schülerlabore „FreiEx“ (www.uni-bremen.de/freix/) und dem „iChemLab“ (<http://chemie.ph-weingarten.de/forschung/projekte/>) als Nachfolger des Saarbrücker „NanoBioLab“. Ferner fand die Dokumentation der Projekthalte und -ergebnisse in 16 Fachmedien für Fachdidaktik und naturwissenschaftlichen Unterricht statt. Ergebnisse aus dem Projekt werden auch über die Projektlaufzeit hinaus Gegenstand von Ausbilder-/Lehrerfortbildungen an den beteiligten Chemielehrerfortbildungszentren und auf einschlägigen Tagungen für Lehrkräfte der Naturwissenschaften sein. Bisher fanden 17 Lehrerfortbildungen statt. Auf 21 nationalen und internationalen Tagungen konnten die Ergebnisse präsentiert werden. Universitäre Partner aus den USA, Polen, Russland, Brasilien und Australien implementieren die Inhalte dieses Projektes in ihre fachliche Lehre. Durch Kooperationen mit Berufsschulen, UT-Ausbildungsstätten und -betrieben, Städten und Kommunen, Klärwerksbetreibern und Entsorgern, industriellen Partnern aus dem Wasserver- & entsorgungssektor, die die Phosphor-Rückgewinnungsverfahren vermarkten, lernen im Rahmen von überbetrieblichen Fortbildungen die Inhalte des Projekts kennen. Der Verband DWA Nord möchte das Angebot verstetigen und kümmert sich um die Akquise ihrer Verbandsmitglieder. Die BEW in Essen, der EGLV in Duisburg und die UT Ausbildungszentren in Lauingen, Norden und München implementieren die Materialien in das Ausbildungs-Curriculum.

Fazit

Innerhalb dieses Vorhabens konnten 8 Qualifizierungsarbeiten erfolgreich abgeschlossen werden. Die von Herrn C. Zowada konzipierten didaktischen Unterlagen dieses Schülerlaborangebotes sowie die Prezi sind Bestandteil seiner Promotionsarbeit, die er voraussichtlich im Sommer 2019 fertig stellen wird.

INHALT

1. KURZFASSUNG DES BERICHTS	5
2. ANLASS UND ZIELSETZUNG DES PROJEKTS	7
2.1 Hintergrund und Relevanz des Vorhabens	7
2.2 Stand des Wissens und der Technik: Recycling von Phosphor aus dem Abwassersystem	8
2.3 Anwendung im Schülerlabor: Diskussion der Verfahrensauswahl zum Stand der Technik	11
3. DARSTELLUNG DER ARBEITSSCHRITTE UND DER ANGEWANDTEN METHODEN	12
3.1 Kooperation und Arbeitsaufteilung	12
3.2 Zeitplan	13
3.3 Konzeption der Vorhabeninhalte für Schule, Universität und Ausbildung	13
3.3.1 Didaktische Konzeption zur Einbettung des Themas in den Kontext einer Lernfirma	13
3.3.2 Pflanzenwachstumstests zum Nachweis der Bioverfügbarkeit	14
3.3.3 Umsetzung des Schülerlaborpraktikums	15
3.3.4 Digitale Tools	17
3.3.4 Übersicht der entwickelten Materialien zur Phosphor-Rückgewinnung	21
4. IMPLEMENTIERUNG DER VORHABENINHALTE IN SCHULE, UNIVERSITÄT UND AUSBILDUNG	23
4.1 In die schulische Ausbildung	23
4.2 In die universitäre Fachausbildung und Lehramtsausbildung	25
4.3 In die betriebliche Ausbildung	26
4.4 Unterstützer und Kooperationen mit Unternehmen der Ver- bzw. Entsorgungsbranche	29
5. ERGEBNISSE UND ÖFFENTLICHKEITSARBEIT	30
5.1 Lehrerfortbildungen	30
5.2 Veranstaltungen	31
5.3 Publikationen	32
5.4 Abgleich zu den erwarteten Erträgen	33
6. FAZIT	34
7. LITERATUR	35
8. ABBILDUNGEN UND TABELLEN	37
9. ANHANG	38

1. Kurzfassung des Berichts

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung und Implementierung von Schülerinformations- und Schülerexperimentierangeboten zum Thema Phosphor-Rückgewinnung in Kooperation des Instituts für Didaktik der Naturwissenschaften an der Universität Bremen mit dem Schülerlabor Freies Experimentieren „**FreiEx**“ und mit dem Partnerschülerlabor „**NanoBioLab**“ der Universität des Saarlandes. Alleinstellungsmerkmal dieses Angebotes war es, als aktuelle Fragestellung aus der angewandten Umwelttechnik sowohl Schülerinnen und Schülern der Jahrgänge 9 bis 13, Lehramtsstudierenden, Referendaren und Lehrkräften der naturwissenschaftlichen Fächer sowie CTA/Chemielaboranten in Ausbildung aus der Ver- & Entsorgung die Phosphor-Rückgewinnung nahe zu bringen.

Das Vorhaben gliederte sich zeitlich in zwei Phasen: Im ersten Jahr standen die Entwicklung, Implementierung und Erprobung der laborpraktischen Umsetzung der ausgewählten Verfahren, die Konzeption einer didaktischen Methodik zur Einbettung des Themas in die schulische und ausbildungsbezogene Lehre sowie die Entwicklung der digitalen Tools im Fokus unserer Arbeit. Schwerpunkt des zweiten Jahres war die Dissemination der Projektstruktur und dessen Inhalte. Auf 19 nationalen und internationalen Tagungen sowie 16 Veranstaltungen der Lehrerfortbildungszentren bzw. Lehrerkongressen wurden die Projektinhalte vorgestellt. In nationalen und internationalen Fachzeitschriften konnten 16 Veröffentlichungen platziert werden. Alle Publikationen, Tools und Materialien sind über die Websites <http://www.uni-bremen.de/freieux> und <http://chemie.ph-weingarten.de/forschung/projekte/projekte-archiv/> abrufbar. Im Rahmen dieses Vorhabens konnten insgesamt acht Qualifizierungsarbeiten (6 Bachelor, 1 Master, 1 Staatsexamensarbeit) erfolgreich abgeschlossen werden. Die didaktische Aufbereitung der Phosphor-Rückgewinnung und deren Publikation ist integraler Bestandteil der Dissertationsarbeit von Herrn Christian Zowada, die er voraussichtlich im Sommer 2019 abschließen wird.

Es wurden **drei Lernangebote mit zunehmender Komplexität** entwickelt. Jedes umfasst dabei eine Einführung in das Thema Phosphor/Phosphat im Unterricht in der Schule/Ausbildung, ein Laborpraktikum, ein optionales Kontaktangebot zur beruflichen Orientierung, sowie eine Nachbetrachtung in der Schule, Ausbildung oder Universität. Die angewendete didaktische Methode ist die einer Lernfirma. Ferner enthält das Lernangebot drei digitale Tools für die Vor- und Nachbereitung sowie eine Lehrerhandreichung mit Hintergrundinformationen für Lehrkräfte und AusbilderInnen.

Thematisiert wurden **vier aktuelle Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphat** aus dem Abwassersystem - das „**ExtraPhos-Verfahren**“ und das „**Stuttgarter Verfahren**“, der „**PEARL-Prozess**“ sowie das „**LeachPhos/TetraPhos-Verfahren**“. Ausgewählt wurden diese Verfahren, um die drei Phosphor-Speichermedien Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammasche zu erfassen und um eine möglichst große laborpraktische Methodenvielfalt zu erhalten. Gemäß den Abläufen dieser Verfahren können die Teilnehmer einzelne Prozessschritte im Labor bis hin zum Produkt nachvollziehen. Neben klassischen nasschemischen qualitativen und quantitativen Nachweismethoden für Phosphat kommen besonders die verfahrensrelevanten Teilschritte - Probenvorbereitung, Leaching der o.g. Matrices, pH-Wert-Einstellung und Kontrolle, Kristallisationsprozesse und deren Steuerung - zur Anwendung. Zum Nachweis der Pflanzenverfügbarkeit der erhaltenden Phosphate werden zwei standardisierte Wachstumstests - Bohne und Kresse - herangezogen, die eine sinnvolle methodische Ergänzung zur Bestimmung der Abwasserparameter darstellen.

Das Experimentieren im Labor wurde durch ein „**Multitouch Learning Books**“ ergänzt. In diesem digitalen Lernbegleiter erhalten die Schülerinnen und Schüler ihren Forschungsauftrag, die Versuchsanleitung in Form einer E-Mail, Arbeitsaufträge und praktische Hilfen, sowie die Möglichkeit kollaborativ mit den anderen Expertengruppen zu kommunizieren. Gestaffelte Hilfen in Form von aufgenommenen Chatverläufen, die sich auf sprachliche, technische, experimentelle und kognitive Probleme beziehen, fördern die Lernenden individuell. In die Chats wurden Informationen in Text-, Bild-, Video- und Audioform eingebunden.

Abschließend sollten die Teilnehmer eine energetische und stoffliche Bewertung der Prozessteilschritte (Stoff- und Energieeffizienz, Reinheit des Produkts, Abfallart und -menge, Einbindung des Verfahrens in bereits vorhandene technische Anlagen, Risiken für Mensch und Umwelt) vornehmen, um zu einer ökologischen und ökonomischen Gesamtbewertung der vorgestellten Verfahren zu gelangen. Zur Modellierung der Stoffströme wurde hierzu ein auf Sankey-Diagrammen basierendes, prozess-visualisierendes Softwaretool entwickelt.

Eingebettet wurde das experimentelle Angebot zur Phosphor-Rückgewinnung durch Materialien zum Unterrichtseinstieg und zur Nachbesprechung (z.B. P-Kreislauf, Düngemittel, Agrartechnologie sowie die globale Ernährungslage vor dem Hintergrund der aktuellen politischen Situation), in die auch generelle Informationen rund um das Element P einbezogen wurden. Seine Bedeutung in Biochemie (DNA, ATP) und Pflanzenphysiologie, seine Verwendung in der Schädlingsbekämpfung sowie in der Munitionsproduktion mit der immer noch bestehenden Altlastenproblematik wurden thematisiert. Entstanden ist eine **digitale Lernumgebung auf Prezi™-Basis**, die über die „FreiEx“-Website unter <http://www.uni-bremen.de/freix> sowie unter dem Link <http://www.digitale-medien.schule/phosphat%c3%bcckgewinnung.html> abrufbar ist.

Die Angebote wurden schrittweise zunächst am Standort Bremen entwickelt und danach in Saarbrücken adaptiert. Durch die bestehenden Netzwerke konnte eine über den lokalen Rahmen hinausreichende Wirkung auch in das Umland von Bremen und Saarbrücken erzielt werden. Durch die Struktur der modular konzipierten Bildungsangebote ist eine individuelle Zusammenstellung der Lerninhalte möglich, damit sie von weiteren Schülerlaboren und Berufsschulzentren übernommen werden können. Etwa 300 SchülerInnen haben das Angebot wahrgenommen. Dieses Schülerlaborangebot wurde sukzessive auch in die Lehramtsausbildung der naturwissenschaftlichen Fächer an den beteiligten Hochschulen integriert und bisher ca. 220 Studierende nahegebracht. In Lehrer-fortbildungen der beteiligten Chemielehrerfortbildungszentren und auf Tagungen konnte das Thema verbreitet und so 650 Lehrerinnen und Lehrer erreicht werden. Durch die Kooperation mit Prof. Ozcan Gulacar von der University of California in Davis konnten rund 600 Studierende (Grundkurs „Einführung Allgemeine Chemie“ für die Fächer BIO, CHE, AGRAR) die Prezi anwenden.

Die Inhalte und Fertigkeiten dieses Angebotes sollten sich auch zur integrativen Nutzung in der Ausbildung von Chemielaboranten, CTA und umwelttechnischen Lehrberufe eignen. 135 Auszubildende und 76 Ausbilder nutzten unser Angebot bisher. So konnte der Kreis der Adressaten von Schülerlaboren über die schulische Ebene hinaus erweitert werden. Nicht nur die Berufsschulen, Ausbildungsstätten und -betriebe sondern auch Städte und Kommunen, Klärwerksbetreiber und Entsorger, industrielle Partner aus dem Wasserver- und -entsorgungssektor und Firmen, die die Phosphor-Rückgewinnungsverfahren vermarkten, konnten gleichermaßen profitieren, denn die gesetzlichen Vorgaben haben den Wasser-/Abwasserparameter „Phosphat“ seit 2016 in den Fokus

gerückt. Daraus resultiert ein Fortbildungsangebot für Abwassermeister und Klärwerksbetreiber, das gemeinsam mit der DWA und hanseWasser ab Sommer 2019 angeboten wird.

Im vorliegenden Abschlussbericht werden die aktuellen technischen Entwicklungen sowie die vom Projektteam geleisteten Arbeitsschritte und Ergebnisse im Projekt „Phosphor-Rückgewinnung - angewandte Umwelttechnik im Schülerlabor“, DBU Az. 33729, zusammengefasst. Der Bericht bezieht sich auf eine Projektlaufzeit von 27 Monaten vom 16.11.2016 bis 15.02.2019. Alle digitalen Tools, die Lehrerinformation und Auszüge aus dem Laborpraktikum sind über die Websites <http://www.uni-bremen.de/freix> und <http://chemie.ph-weingarten.de/forschung/projekte/projekte-archiv/> abrufbar. Die entwickelten Angebote werden auch über den Förderzeitraum hinaus für mindestens zwei Jahre bestehen bleiben.

2. Anlass und Zielsetzung des Projekts

2.1 Hintergrund und Relevanz des Vorhabens

Die Europäische Kommission [1] hat das Element Phosphor (P) 2014 auf die Liste der 20 kritischen Rohstoffe gesetzt. Phosphordünger ist unverzichtbar für die Gewährleistung dauerhaft hoher landwirtschaftlicher Erträge und zur Sicherung der Ernährung der wachsenden Weltbevölkerung. Die globalen Phosphorvorkommen sind limitiert und konzentrieren sich auf nur wenige Staaten (China, USA, Marokko) [2]. Hinzu kommt, dass der Abbau des mineralischen Phosphorvorkommens mit stetig steigenden Kosten- als auch Energieaufwand und mit zunehmenden Umweltbeeinträchtigungen durchgeführt wird. Darüber hinaus sind die gewonnenen Rohphosphate zunehmend mit Schadstoffen (Uran, Cadmium) belastet [3].

Europa verfügt kaum über nennenswerte mineralische Phosphatgesteinsvorkommen und ist nahezu vollständig von Phosphorimporten abhängig, der durch Phosphorrecycling zukünftig reduziert werden soll. Innerhalb der EU werden aktuell Verfahren entwickelt, um aus Abfällen mit relevanten P-Gehalten das Phosphat zurückzugewinnen. Neben Abwasser kommen als geeignete Reststoffe Bio- und Grünabfälle, Klärschlämme und deren Aschen, aber auch Tiermehle und Urin in Betracht [4,5,6].

Seit der Antragsstellung zu diesem Vorhaben im Sommer 2016 sind die gesetzlichen Vorgaben der EU [lex1,lex2] in Deutschland umgesetzt worden, um für das Phosphorrecycling eine gesetzliche Grundlage zu schaffen [lex3-lex5]. Dazu wurden drei Verordnungen angepasst: Neben der Novellierung der Düngemittelverordnung (DüMV) [lex7] bereits in 2015 und der Düngeverordnung (DüV) [lex8] wurde auch die Klärschlammverordnung (AbfKlärV) [lex9] in 2017 ratifiziert. Die DüMV gibt eine genaue Definition zugelassener Düngemittel auf landwirtschaftlich genutzten Flächen vor. Klärschlamm wird dort explizit nur noch in äußerst geringer Menge zugelassen. Ferner wurde die DüMV hinsichtlich zulässiger Schadstoffhöchstmengen und einem zukünftigen Verbot synthetischer Polymere zur Klärschlamm-entwässerung überarbeitet, was seitdem zu einem Anstieg der thermisch zu entsorgenden Klärschlammfraktionen führte und die Deponielagerkapazitäten bereits seit 2016 überschreiten lässt. Die DüV schreibt die zulässigen Höchsteinträge an P-, K- und N-Dünger pro Hektar Land vor und begrenzt die Zeiträume, in denen eine Düngung erlaubt ist, drastisch. In der Landwirtschaft wird der Hauptlieferant für Stickstoff nach wie vor die Gülle sein. Die darüber ausgetragenen P-Mengen reichen zur ausgewogenen Versorgung der Ackerpflanzen jedoch nicht. Trotzdem ist die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlämmen nicht mehr möglich, da der

darin enthaltende P-Gehalt zwar ausreichend und auch pflanzenverfügbar, aber eben immer mit hohen N-Gehalten vergesellschaftet ist. Dessen zulässige Düngegaben sind bereits durch Ausbringung von Gülle erreicht.

Die Klärschlammverordnung (AbfKlärV, lex9) sieht in der Übergangsphase bis 2025 eine völlige Neuordnung der Klärschlammverwertung vor, sofern der Klärschlamm einen P-Gehalt von mehr als 20 mg P/kg TM enthält [10,11]. In der BRD wurden 2005/2006 rund 138.000 t Phosphor als Düngemittel eingesetzt [7]. Die Phosphorfracht des Abwassers von 79.300 t/a (71% häusliches Abwasser und 29% indirekt einleitende Industriebetriebe) haben großes Phosphorrecyclingpotenzial. Zu ca. 90% wird der im Abwasser enthaltene Phosphor - bedingt durch die betrieblichen Klärprozesse auf den Anlagen - im Klärschlamm gespeichert. 2013 sind bundesweit rund 1,8 Mio. t Klärschlamm-trockenmasse angefallen. Davon wurden ca. 30% auf landwirtschaftliche Flächen aufgebracht und etwa 53% der thermischen Verwertung zugeführt [8,11]. Mit dem Verlust der landwirtschaftlichen Entsorgungsrouten müssen sich die städtischen und kommunalen Betreiber von Kläranlagen um neue Konzepte zur Entsorgung des Klärschlammes bemühen. Zudem schreibt die AbfKlärV die gezielte Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm vor, um so eine nachhaltige Schließung des anthropogenen Phosphorkreislaufs voranzutreiben [9].

Der Vollständigkeit halber sei hier noch die Verschärfungen der Wasserrahmenrichtlinie und des Abwasserabgabengesetzes genannt, wonach je nach Größe der Kläranlage und Art des Vorfluters (kleiner Bach, großer Fluss, Binnensee oder Meer) die Einleiterwerte für P auf 0,5 bis 1,0 mg P/l reduziert werden müssen [lex1]. Diese Umsetzungen stellen aber - in Anbetracht der oben genannten gesetzlichen Änderungen - kein Problem dar.

2.2 Stand des Wissens und der Technik: Recycling von Phosphor aus dem Abwassersystem

Phosphorverbindungen wirken in Gewässern als Düngemittel und sind die Hauptursache für deren Eutrophierung. Deshalb müssen Phosphate aus häuslichen Abwässern in kommunalen Kläranlagen entfernt werden. Die Phosphorfracht im Kläranlagenzulauf beträgt ca. 1,5 - 2 g Phosphor pro Einwohner und Tag bei einer gemittelten täglichen Abwassermenge von 140 L. Das entspricht einer Abwasserkonzentration von 5 - 10 mg P pro Liter. Der Haupteintrag von Phosphor entfällt zu 75% auf Ausscheidungen. Weitere 10% kommen aus Wasch- und Reinigungsmitteln. Die restlichen 15% stammen aus Nahrungsmittelresten. Weitere Quellen sind Prozessabwässer und diffuse Einträge durch die Erosion von Ackerböden [4,9].

Im Kanalnetz findet bereits ein z.T. mikrobieller Umbau des organisch gebundenen Phosphors statt, sodass der Phosphor im Kläranlagenzulauf schon zwei Drittel als gelöstes ortho-Phosphat $[\text{PO}_4]^{3-}\text{-P}$ vorliegt. Das restliche Drittel ist organischer Phosphor, der jeweils zu 50 % gelöst als Phosphonate und in partikulärer Form vorliegt [3,6]. Im Rahmen der kommunalen Abwasserbehandlung stehen zur P-Elimination grundsätzlich chemische und biologische Verfahren sowie deren Kombination zur Verfügung. In der Vorklärung werden vom partikulär vorliegenden organischen Phosphor etwa 10% mit dem Primärschlamm abgeschieden [11]. In der nachfolgenden biologischen Reinigungsstufe (Bio-P) wird der restliche organisch gebundene Phosphor durch Mikroorganismen in ortho-Phosphat überführt [3]. Anschließend wird das gelöste ortho-Phosphat durch Zugabe geeigneter Fällungsmittel chemisch in ungelöste Phosphate umgewandelt und als Feststoff gefällt aus dem Abwasser (separat oder aber gleichzeitig mit anderen Feststoffen) entfernt. Praktisch jede Kläranlage in Deutschland ist heute so ausgerüstet, dass eine chemische Fällung in Abhängigkeit vom gemessenen Phosphor-

Gehalt durchgeführt werden kann. Um Fällungsmittel einzusparen, praktizieren viele Kläranlagen zusätzlich die biologische P-Entfernung. Die möglichst schwebstofffreien Überstandswässer und der angereicherte Klärschlamm liefern die Rohstoffe für alle nachfolgenden Verfahrensbeschreibungen.

Es gibt vier Abfallarten, die sich für ein Recycling von Phosphat eignen: relevant sind das **Zulaufwasser** ausgesuchter Kläranlagen (Großkläranlagen GK 5 => 100.000 Einwohner) als flüssige Komponente sowie die drei Feststoffe **Klärschlamm und Biomasse** bzw. **Faulschlammfraktion** sowie **Klärschlammmasche** (aus der Monoverbrennung). Grundsätzlich wird zwischen zwei Prozessführungen unterschieden: Die **onsite-Verfahren** betreiben die Elimination von Phosphat aus dem Abwasserstrom direkt. Die Produkte sind Struvite oder Calciumphosphat-Mischsalze mit hoher Pflanzenverfügbarkeit und geringem Schwermetallgehalt, die entweder direkt vermarktet oder den Düngemittelherstellern zur Weiterverarbeitung zugeführt werden. Die **offsite-Verfahren** fokussieren die P-Elimination aus den Feststoffen via Klärschlammmasche aus der Monoverbrennung, um den Phosphor in einem anschließenden Leaching-Prozess aus der Asche zurückzugewinnen.

Laut Stellungnahme des BMBF/UBA [3] von 2013 und zweier Gutachten der RWTH Aachen von 2015 und 2016 [4,5] befanden sich in der BRD und der Schweiz 11 von weltweit 29 Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung in der technischen Versuchsphase oder Pilotierung. Nach C. Kabbe [12] und der Deutschen Phosphor Plattform DPP [13] ergibt sich Stand März 2018 folgender aktualisierter Überblick:

Recycling-Verfahren	
Ca. 30 Verfahren in Erforschung - Abwasser, Klärschlamm, KS-Asche	
22 Verfahren arbeiten onsite WWTP , Struvite, Calciumphosphate	7 Verfahren arbeiten downstream WWTP , H ₃ PO ₄ , Dünger
<ul style="list-style-type: none"> - AirPrex, 2009 (DE, NL, CN, USA) - PEARL, 2009 (CAN, USA, UK) - NuReSys, 2008 (BE, NL, DE) - ANPHOS, 2005 (NL, IT) - KURITA, 1997 (JP) - PhosphoGREEN, 2013 (DK, FR) 	<ul style="list-style-type: none"> - TetraPHOS, 2020 (DE) - Fertilizer Industry - EcoPHOS, 2018 (FR)

Abbildung 1: Übersicht der Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung nach Kabbe, 2018

Ihre Ansatzpunkte im Kläranlagenprozess unterscheiden sich bezüglich der Kriterien Volumen- oder Massenstrom, Phosphorkonzentration und -bindungsform sowie Rückgewinnungspotenzial (Tab. 1).

Tabelle 1: Charakterisierung der Einsatzstellen zur Phosphor-Rückgewinnung in kommunalen Kläranlage [9].

Einsatzstelle	Vol.- Strom	P-Konz.	Bindung	P-Rück. Potenzial [%]	P-Rück. Grad [%]
Kläranlagenablauf	200	< 5 mg/l	gelöst	max. 55	50
Schlammwasser	1-10	20-100 mg/l	gelöst	max. 50	50
entwässerter Klärschlamm	0,15	~ 10 g/kg TR	biol./chem gebunden	~90	85
Klärschlammmasche	0,03	64 g/kg	chem. gebunden	~90	90

(L = Liter; E = Einwohner; d = Tag; TR = Trockenrückstand)

Den **onsite-Verfahren** aus der wässrigen Phase liegen fünf Prozess-Schritte zugrunde:

1. LEACHING - **Freisetzung des P** aus der Matrix durch pH-Senkung < 3,5 oder mikrobiologisch
2. Abtrennung vom ungelösten Rückstand
3. KRISTALLISATION - **Fällung des P** durch Zugabe von Fällungsmitteln bzw. pH-Erhöhung > 8
4. Abtrennung vom gelösten Rückstand und
5. Produktaufbereitung

Die **offsite-Verfahren** arbeiten mit P-angereichertem Klärschlamm, der bis zu einem Trockenmassegehalt von 23-25 % entwässert wird. Anschließend wird dieser in einer Monoverbrennungsanlage, zumeist im Wirbelschichtverfahren, zunächst getrocknet und dann verbrannt. Aus der Klärschlammasche wird der Phosphor dann ebenfalls nach den oben beschriebenen fünf Prozess-Schritten zurückgewonnen [14].

In allen Verfahren sind entweder die freie Phosphorsäure H_3PO_4 selbst oder aber kristalline Mischsalze aus Calcium-, Magnesium- und Ammonium-Phosphaten die angestrebten Produkte. Besonders bei gleichzeitigem Vorhandensein von Ammonium - auch im Überschuss - bietet sich die Kristallisation in Form des Mischsalzes Struvit (**MAP** $\rightarrow Mg^{2+} + NH_4^+ + PO_4^{3-} + 6 H_2O \rightarrow MgNH_4PO_4 \cdot 6 H_2O$) aus der wässrigen Phase an. Das stöchiometrische Verhältnis beträgt 1:1:1, so dass vor allem Magnesium zur Kristallisation zu dosiert werden muss. Calciumphosphate entstehen durch Zugabe von Kalkwasser. Ziel ist es, die Produktqualität so zu optimieren, dass die Mischsalze entweder als pflanzenverfügbare Dünger unmittelbar einer landwirtschaftlichen Vermarktung zugeführt werden oder aber die Weiterverwendung in die Düngemittelproduktion erlauben. Verfahrenstechnisch kommen aktuell zumeist Batchverfahren in Rohr- oder Rührreaktoren zum Einsatz, von denen einige nach erfolgreicher Pilotierung auf einen kontinuierlichen Betrieb umgestellt werden können.

Je nach verwendetem Material sind z.T. aufwändige vorbereitende als auch nachgeschaltete Prozess-Schritte notwendig, um eine Anreicherung von P aus dem Abfallmaterial zu erreichen. Im Abbildung 2 sind die P-Stoffströme in den Kläranlagen aufgezeigt. Die **Konzentrierung des P-Gehalts im Abwasser vor der Fällung ist der limitierende Faktor** der Verfahren.

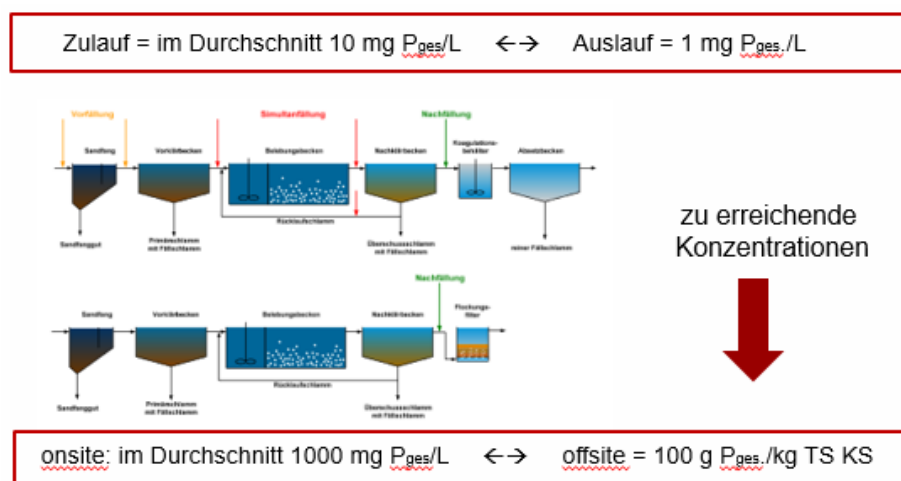


Abbildung 2: Phosphat-Konzentrationen in der Phosphor-Rückgewinnung

Basierend auf den Zulaufwerten von 10 mg PO₄/L, muss es auf den Anlagen im laufenden Betrieb gelingen, die P-Konzentration im Abwasser und im Klärschlamm um mindestens das 10fache, besser sogar um das 100fache zu erhöhen.

Unklar ist bis heute, wie diese P-Konzentrierung im Abwasser zuverlässig gelingt. Daher klappt bei den wässrigen Verfahren die technische Umsetzung vom Batchbetrieb hin zu einem wie auch immer gearteten kontinuierlichen Betriebsmodus mit konstant hoher P-Konzentration noch nicht - weder im Bypass, noch im Vollstrom. Das ist ein maßgeblicher Grund für die Entscheidung vieler Betreiber, die Monoverbrennung als probaten Entsorgungsweg für die konstant anfallenden Klärschlämme und den dadurch permanent wachsenden Entsorgungsdruck zu wählen und die Schaffung ausreichender Verbrennungskapazitäten bundesweit voranzutreiben. Die Rückgewinnungsverfahren aus der Asche gestalten sich auf Grund der guten Lösefähigkeit der Phosphate als beherrschbar. Allerdings tritt dabei die Belastung der Phosphatsalze durch ebenfalls mitgelöste Schwermetalle negativ in den Vordergrund. Dies ist der entscheidende Nachteil zu den via onsite-Verfahren gewonnenen Phosphatdüngern. Es besteht also bei allen Verfahrensarten nach wie vor noch erheblicher Optimierungsbedarf. In der Übergangszeit werden die aktuell anfallenden Klärschlämme in Zwischenlager verbracht und die Aschen auf Sonderflächen der Abfalldeponien deponiert.

2.3 Anwendung im Schülerlabor: Diskussion der Verfahrensauswahl zum Stand der Technik

Die in diesem Vorhaben zu entwickelnden theoretischen, digitalen und praktischen Schülerlaborangebote folgten der übergeordneten Frage, wie die Rückgewinnung von Phosphor aus den drei Abfallstoffströmen - dem Abwasser, dem Klärschlamm und der nach der Verbrennung anfallenden Klärschlammasche - für Schule, Ausbildung und universitäre Lehreraus- und Lehrerweiterbildung umfassend erschlossen werden kann. Neben klassischen chemisch-physikalischen Labormethoden sollten Prozesstechnik, Anlagenbau und -steuerung die praktischen Schwerpunkte dieses Projekts bilden. Schülerinnen und Schüler ab der Jahrgangsstufe 9/10, Auszubildenden der chemisch- wie auch umwelt-technischen Lehrberufe sowie die Lehrkräfte und Ausbilder als Multiplikatoren sollten in die Lage versetzt werden, die einzelnen Prozessparameter hinsichtlich Anwendungsrelevanz, Effizienz und Nachhaltigkeit zu erfassen und zu bewerten. Das Angebot sollte sowohl halb-, ganztägig als auch Projektwochenartig konzipiert sein und einen einführenden wie nachbereitenden didaktischen Rahmen erhalten. Für die Anwendung im Schülerlabor mussten die Verfahren folgende Bedingungen erfüllen:

- eine hohe bis sehr hohe inhaltliche Überschneidungen der Angebote dieses Vorhabens mit den curricularen Anforderungen in Schule und Ausbildung sollte ableitbar sein,
- einen ansprechenden didaktischen Ansatz ermöglichen, der methodisch und konzeptionell den modularen Aufbau des Angebots stützt
- eine große Bandbreite an Labormethoden und Arbeitstechniken nach Stand der Technik haben,
- die gewählten Verfahren sollten kommerziell zukunftsfähig sein,
- und sich für das Stationenlernen eignen.

Zur Antragsstellung standen ca. 30 Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung zur Auswahl, die sich in verschiedenen Stadien ihrer verfahrenstechnischen Entwicklung befanden: Einige waren noch in der Laborerprobung oder gerade ins Technikum transferiert worden. Nur wenige Verfahren befanden sich bereits in der Pilotierung, lediglich drei Verfahren arbeiteten bereits kommerziell. Zur Aufbereitung der Klärschlämme zu Aschen wurde mit verschiedenen thermischen Verfahren und Reaktortypen experimentiert.

Für die Implementierung im Schülerlabor zum Einstieg ab der Jahrgangsstufe 9/10 erschienen die beiden Kristallisationsverfahren geeignet, die im **PEARL-Prozess** von **Ostara** [15,16] und im **Stuttgarter Verfahren** [17] angewendet werden, um Struvit bzw. Calcium-Mischphosphate zu erhalten. Das **Budenheimer Kohlensäure-Verfahren** [18] setzt zum Leaching des Phosphats aus Schlammwasser bzw. Klärschlamm als Alternative zu Säuren Kohlendioxid-Gas (CO_2) ein und ist in der Durchführung komplexer als die beiden erst genannten Verfahren. Die **Bearbeitung und Untersuchung der Klärschlammasche** ist hingegen nur für die Oberstufe und die Laboranten-Auszubildenden sinnvoll und leistbar und basiert maßgeblich auf dem **TetraPhos-Verfahren** von **Remondis** [19,20,21,22].

Die Auswahl geeigneter Verfahren wurde nach Rücksprache mit Dr. Montag von der RWTH Aachen getroffen. Bis auf eine Ausnahme hat sich diese Wahl über den Projektförderzeitraum auch als richtig erwiesen. Das Stuttgarter Verfahren hat keine wirtschaftliche Bedeutung erlangen können. Im Praktikum der Auszubildenden entfällt es daher. Für die Schülerinnen und Schüler ist es jedoch noch in der Bearbeitung. Die drei anderen Verfahren konnten sich im Laufe des Förderzeitraums kommerziell etablieren und stellen potente Verfahren für die Abfallkompartimente Abwasser, Klärschlammwasser bzw. Klärschlammasche dar. Sie spiegeln die wesentlichen technischen Verfahrensweisen der Phosphor-Rückgewinnung und führen zu den drei relevanten Produkten dieses neuen Technologiezweiges, der Phosphorsäure sowie den Salzen Struvit und Calciumphosphat. Deshalb sind sie Bestandteil eines Fortbildungsangebots für umwelttechnische Berufe geworden.

Im Folgenden wird in diesem Abschlussbericht auf die für die verschiedenen Zielgruppen entwickelten Angebote sowie ihre praktische und didaktische Umsetzung eingegangen. In einer Zusammenfassung werden die erreichten Teilnehmergruppen diskutiert und die Maßnahmen zur Verstetigung dieses Angebots erläutert. Abschließend werden die erreichten Erfolge und Publikationen vorgestellt.

3. Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

3.1 Kooperation und Arbeitsaufteilung

Die zentrale Herausforderung bei der Auswahl geeigneter Phosphor-Rückgewinnungsverfahren war es, zum einen an die Bedingungen von Schülerlaboren adaptierbare technische Verfahren mit zukunftsweisendem Potenzial auszuwählen und gleichzeitig damit aktuelle Beiträge zur Nachhaltigkeitsdebatte anwendungsbezogen und verständlich für Schülerinnen, Schüler und Auszubildende zu gestalten. Entwickelt wurden sechs halbtägige Bildungsangebote für die Altersspanne von 14-18 Jahren und älter (Sekundarstufe I der Oberschulen in Bremen, Klasse 9/10 sowie der Sekundarstufe II, alle Ausbildungsjahrgänge). Die Bausteine stehen in einem thematischen Zusammenhang mit in den Landesbildungsplänen niedergeschriebenen Abfolgen der Themen für die Unterrichtsfächer Chemie bzw. Biologie sowie den methodischen Anforderungen chemisch-technischer Ausbildungsberufe.

Alle Schülerlaborangebote wurden an der Universität Bremen entwickelt, mehrfach erprobt und optimiert. Nach Abschluss der Entwicklung wurden die Angebote vom Saarbrücker Projektpartner „**NanoBioLab**“ implementiert. Basierend auf dem didaktischen Konzept des „Lernen an Stationen“,

das an beiden Standorten etabliert ist, wurden die Schülerlaborangebote ohne strenge zeitliche Taktung strukturiert, um Möglichkeiten zum offenen und forschenden Experimentieren zu gewährleisten, soweit dies die technischen Verfahrensschritte zulassen. Durch das umfangreiche Materialangebot sollten Fachlehrkräfte und Ausbilder ein auf die Bedürfnisse ihrer Lerngruppe individuell zugeschnittenes Experimentierangebot auswählen können, um eine direkte Anbindung an den Unterricht in der (Berufs-)Schule sowie in den Ausbildungsbetrieben an beiden Schülerlaborstandorten zu gewährleisten [23].

3.2 Zeitplan

Das Projekt gliederte sich grob in zwei Phasen, die inhaltlich aufeinander aufbauten. Im ersten Projektjahr stand die Konzipierung und Materialentwicklung in Bremen im Vordergrund. Als sehr vorteilhaftes Procedere bewährte sich eine erste Pilotierung der neuen Unterrichtsmaterialien mit Lehramtsstudierenden. Ihre konstruktiven Rückmeldungen waren für die Optimierung äußerst hilfreich. Die weitere Erprobung erfolgte mit Chemielaboranten-Auszubildenden der Universität sowie mit ausgewählten Lerngruppen, um nach jeder Evaluation das Material zu überarbeiten. Ab Spätherbst 2017 stand das optimierte Angebot dem Projektpartner „NanoBioLab“ zur Verfügung. Das Angebot umfasste die drei wässrigen Verfahren sowie die Ergänzungsangebote „P-light“ und „Pflanzen“. Das Verfahren zur P-Rückgewinnung aus der Klärschlammasche stand ab Winter bereit.

Das zweite Jahr diente weiterhin der Optimierung und der Popularisierung der entwickelten Schülerlaborangebote. Begleitend wurden Lehrerfortbildungen angeboten. Ebenfalls Aufgabe im 2. Projektjahr war die Dokumentation und Präsentation der Projektinhalte auf Tagungen und in Publikationen sowie die Akquise beruflicher Ausbildungszentren für umwelttechnische Ausbildungsgänge, um ihnen die Durchführung unseres Angebotes nahe zu bringen.

3.3 Konzeption der Vorhabeninhalte für Schule, Universität und Ausbildung

3.3.1 Didaktische Konzeption zur Einbettung des Themas in den Kontext einer Lernfirma

Die in diesem Projekt zu entwickelnden Versuche folgen der übergeordneten Frage der effektiven Rückgewinnung von Phosphor. Daher soll ein Verlauf geplant werden, der dieser Anforderung genügt. Sinnvoll erscheint es, **eine Lernfirma** zu entwickeln, die dem Vorbild der Max-Sauer-GmbH folgt [24]. Verschiedene Aufträge können dazu dienen, um die Grundlagenversuche und Verfahren zu entwickeln. Ebenso kann ein berufsvorbereitender Aspekt aufgezeigt werden. Die Lernenden kommen - vorbereitet durch das voran gestellte (PREZI-) Begleitmaterial - in die Lernfirma und erhalten den Auftrag, ein Rückgewinnungsverfahren für Phosphor zu entwickeln. Zum **Einstieg in den Labortag** wird den Schülerinnen und Schülern die Wichtigkeit des wachstumslimitierenden Faktors Phosphor in der Vorbesprechung, einer Einführungsmail und einem Video vor Augen geführt. In der **Kontextualisierungsphase** wird die Klasse in eine qualitative und eine quantitative Analytikabteilung aufgeteilt. In maximal Dreiergruppen bearbeiten sie alle Stationen ihrer Abteilung. Durch die Vorversuche rund um das Element Phosphor werden zunächst einige Grundlagen vermittelt und in die qualitative und quantitative Analyse zur Phosphatuntersuchung eingewiesen. Diese erlernten analytischen Methoden sollen die Schülerinnen und Schüler im Anschluss in der **Dekontextualisierungsphase** durch Testung der verschiedenen Verfahren zur Phosphorrückgewinnung anwenden.

In Abbildung 3 ist eine Versuchsvorschrift dargestellt. Sowohl der klassische Auftrag durch den Geschäftsführer als auch die Verwendung moderner Kommunikationsmittel in Form von Chatverläufen ist zu erkennen. Letztere vermitteln Aufträge oder dienen als Hilfen, um ein binnendifferenziertes Lernen zu ermöglichen. Hilfen sind digital in Form von Experimentiervideos und -tips Audiobeiträgen oder Verständniserklärungen bzw. analog als Tippkarten hinterlegt.



Abbildung 3.: Versuchsvorschriften

Die Durchführbarkeit und Effizienz dieser Verfahren sollen die Schülerinnen und Schüler anhand vorgegebener Bewertungskriterien beurteilen. Zur abschließenden Bewertung diskutieren die Expertenteams eines Verfahrens untereinander ihre Ergebnisse. Die Bewertung der einzelnen Verfahren im Plenum präsentiert und diskutiert. Dabei können Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren untereinander abgeschätzt und bewertet werden.

Alle entwickelten Materialien sind als Druckversion erhältlich und werden durch drei digitale Tools ergänzt. Einer einführenden Lernumgebung auf PREZI™-Basis sowie zweier iOS basierten Applikationen: einem „Multitouch Learning Book“ als digitalen Lernbegleiter und einer Sankey-Applikation zur stofflichen Bewertung der Verfahren. In der Übersichtstabelle sind zum Abschluss dieses Kapitels auf **Seite 22** alle Angebote mit ihren sinnvollsten Verknüpfungen und alle Zusatzmaterialien zusammengefasst dargestellt. Diese Auswahlhilfe unter dem Link www.universität-bremen.de/freieux/ und <http://chemie.ph-weingarten.de/forschung/projekte/projekte-archiv/> abrufbar.

3.3.2 Pflanzenwachstumstests zum Nachweis der Bioverfügbarkeit

Um den Einfluss der Phosphordüngung auf das Pflanzenwachstum zu zeigen, sowie zum Nachweis der Pflanzenverfügbarkeit der erhaltenen Verfahrensprodukte kommen normierte Pflanzenwachstumstests für Kresse und Bohne zur Anwendung. Hierzu wurde in einer Bachelorarbeit mit dem Arbeitstitel „Schülerlaborangebot zur Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm und der wässrigen Phase: Testung der Pflanzenverfügbarkeit des recycelten Phosphors“ vergeben. Die Pflanzentests wurden so konzipiert, dass sie ein bis zwei Wochen vor dem Schülerlabortermin von Mitarbeitern der beteiligten Schülerlabore angesetzt bzw. dass eine Gruppe an einem Schülerlabortermin einen Versuch ansetzt, der von der Gruppe in der darauffolgenden oder übernächsten Woche ausgewertet wird. Auf diese Weise sind die Pflanzen zum Schülerlabortermin soweit herangewachsen, dass die Effekte unterschiedlicher Phosphordüngungen eindeutig sichtbar

sind. Auf diese Weise durchläuft jede Gruppe einmal den gesamten Ablauf der Lernstation „Pflanzenverfügbarkeit der erhaltenen Verfahrensprodukte“.

Die Kressesamen werden nicht in Erde ausgesät, sondern direkt auf Papiertüchern in Petrischalen aufgebracht. Die Papiertücher werden direkt mit dem P-haltigen Wasser getränkt, sodass hier die komplexen Aufnahmeprozesse über den Boden entfallen. Die Parameter, die zur Bewertung der Phosphordüngung betrachtet werden, sind das visuelle Wuchsbild (Intensität des Blattgrüns, Verfärbungen der Blätter), die Wuchshöhe, die Anzahl und Größe der ausgebildeten Blätter, die Anzahl gekeimter Samen und die Erträge der Frischmasse. Optional kann die Nährstoffverfügbarkeit von Phosphat im Boden zu Testbeginn und -ende bestimmt werden. Hierzu wird eine Calcium-Acetat-Lactat (CAL)-Extraktion durchgeführt. Die Phosphatkonzentration des Extrakts wird anschließend photometrisch ermittelt [25].

3.3.3 Umsetzung des Schülerlaborpraktikums

Die Versuchsentwicklung zu dem Themenkomplex Phosphor und dessen Rückgewinnung ist der essentielle Bestandteil dieses Projekts. Für die Nutzung im Schülerlabor müssen die Versuche robust und für die Lernenden und Auszubildenden durchführbar sein. Um dies zu erreichen, sind 6 Bachelorarbeiten vergeben worden. Die in den Qualifizierungsarbeiten entwickelten schülerlabor-gerechten Umsetzungen der technischen Verfahren und das Einbetten der PO_4 -Experimente in einen ansprechenden didaktischen Kontext sowie das Erstellen von Versuchsvorschriften und Begleitmaterial war Aufgabe des Doktoranden Christian Zowada.

Das Praktikumsangebot für SuS der Jahrgänge 9/10 der Sek. I aller Schulformen dauert einen Vormittag und umfasst zur Einführung in die Laborarbeiten neben den Grundlagen zum pH-Wert und zur Säure/Base-Theorie drei einfache qualitative und zwei halbquantitative Nachweisreaktionen von Phosphor als Phosphat. Die Anwendung einer halbquantitativen Bestimmung durch die Farbvergleichsmethode der Colorimetrie ist auch von Anfängern leistbar und schnell. Der von Merck / VWR vertriebene MColortest® ist dazu sehr gut geeignet [26]. Die Rückgewinnung der Salze Struvit und Calciumphosphat wird aus vorbereiteten Modell-(Ab-)Wässern mit bekannter P-Konzentration mit oder ohne Feststoffanteil nachvollzogen. Dabei werden einfache labortechnische Methoden (abmessen von Flüssigkeiten, wiegen, filtrieren etc.) vermittelt. Anhand vorab angesetzter Wachstumstests sollen die SuS die Pflanzenverfügbarkeit verschiedener Phosphatsalze bewerten.

Tabelle 2: Das Schülerlaborangebot zur Phosphor-Rückgewinnung umfasst drei Bausteine

Schülerlabor oder mobil vor Ort in den Fach- und Unterrichtsräumen der Schule; Dauer 4-5 h		
PREZI	1 h	ideal als Vorbereitung in Hausarbeit, erreichbar über Link
Praktikum	1 h	Teil 1: Einführung Phosphat in Lebensmitteln, Böden, Pflanzenwachstum
	1 h	Teil 2: Einführung Phosphat-Rückgewinnungsverfahren aus Modellabwasser, Modellklärslamm und Modellklärslammmasche nach PEARL, TetraPhos, Budenheim (opt. Stuttgart); Halbquantitative Bestimmung der Rückgewinnungsquoten mittels MColortest®, Stoffstromanalyse mittels Sankey-Diagrammen und MLBs auf iPads
PREZI	1 h	ideal als Nachbereitung und Diskussion

Auch für SuS der Sek. II sowie für Auszubildende zum Chemielaboranten / CTA liefert das soeben vorgestellte Praktikumsangebot für die Sek. I den idealen Einstieg in das Thema. Darüber hinaus ist das Angebot jedoch zeitlich als auch inhaltlich hinsichtlich untersuchter Probenmatrices, angewandter technischer Verfahren, Durchführung von chemischen Analysen und biologischen Wachstumstests variabel und deutlich anspruchsvoller. Volumetrische Verfahren wie die Säure/Base-Titration zur Bestimmung von Pufferkapazitäten als auch eine photometrische Bestimmung können optional zum Einsatz kommen. Die Anwendung der photometrischen Phosphatbestimmung nach DIN mit ihren physikalischen Hintergründen ist leider nicht expliziter Bestandteil des schulischen Lernplans. Sie ist lediglich optional in den Curricula der Oberstufen neben anderen einfachen Konzentrations-bestimmungsmethoden gelistet. Da viele Schulen auch nicht mit Photometern ausgestattet sind, wurde bei dieser Zielgruppe auf ihren Einsatz verzichtet.

Das Angebot ist modular aufgebaut und kann auf die individuellen Bedürfnisse der Lerngruppen angepasst werden.

EXKURS: Zur Durchführung dieses schulischen Angebots mussten sowohl **sicherheitstechnische als auch hygienische Maßnahmen** berücksichtigt werden. Die verwendeten Chemikalien sind - mit Ausnahme der halbkonzentrierten Schwefelsäure in der Ammoniummolybdat-Reagenz - in an Schulen üblichen Konzentrationen im Einsatz. Wegen der erheblichen ekligen Geruchsbelästigung und der mikrobiellen Beschaffenheit ist der Einsatz von echtem Abwasser und Klärschlamm im Schülerlaborpraktikum und generell an Schulen nicht erlaubt. Es greift die Biostoffverordnung, die diese Abfälle in die Schutzstufe S1 eingruppiert, was definierte sicherheitstechnische Voraussetzungen erfordert. Diese sind mit und durch Schülerinnen und Schülern nicht gewährleistet. Deshalb werden alle Experimente mit **Standardlösungen** bzw. selbst hergestelltem **Modell-„Abwasser“ und Modell-„Schlamm“** und bekannter Phosphatkonzentration durchgeführt.

Die Inhalte und Fertigkeiten dieses Angebotes sollten zur integrativen **Nutzung in der Ausbildung der Chemie- und Biologielaoranten und BTA/CTA** aufbereitet werden, um so den Kreis der Adressaten für Schülerlabore über die schulische Ebene hinaus zu erweitern [27,28,29]. Zur Vorbereitung kann wiederum die Prezi herangezogen werden, die in einer Einführung die Thematik erläutert. Der Schwerpunkt dieses Praktikums wird bei dieser Teilnehmergruppe auf die Bearbeitung der technischen Rückgewinnungsverfahren mit der quantitativen photometrischen Bestimmung der Produkte Struvit und Calciumphosphat gelegt.

Tabelle 3: Phosphor/Phosphat-Rückgewinnung - Konzept für ein umwelttechnisches-Praktikum

Laboranten, CTA-, UT-Ausbildung in den Lehlaboren der Ausbildungszentren; Dauer 5-6 h		
PREZI	1 h	ideal als Vorbereitung, erreichbar über Link
Praktikum	2 h	Teil 1: Einführung Phosphat-Rückgewinnungsverfahren aus regulärem Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammmasche nach PEARL, TetraPhos, Budenheim
	1h	Teil 2: Quantitative Bestimmung der Rückgewinnungsquoten mittels Photometrie nach DIN oder Phosphat-Schnelltest mit Hach-Lange-Photometer, Pflanzenwachstum, Stoffstromanalyse mittels Sankey-Diagrammen auf iPads
PREZI	1 h	ideal als Nachbereitung und Diskussion

Wahlweise kann **Modell-„Abwasser“** und **Modell-„Schlamm“** eingesetzt oder aber, z.B. bei UT-Teilnehmern, mit **echtem Abwasser und Klärschlamm** gearbeitet werden. Das Pflanzenwachstum wird nach den unter 3.3.2 beschriebenen Kriterien beurteilt.

Die Angebote wurden schrittweise zunächst am Standort Bremen entwickelt und danach im NanoBioLab in Saarbrücken adaptiert. Beide Schülerlabore verfügen über bestehende Netzwerke, die auch in das jeweilige Umland hinausreichen. Durch die Struktur und Dokumentation der modular konzipierten Bildungsangebote ist eine individuelle Zusammenstellung der Lernangebote möglich, damit sie von weiteren Schülerlaboren und Berufsschulzentren übernommen werden können. Je nach Adressatengruppe haben sich vier Angebotstypen etabliert, die in Tabelle 4 aufgeführt sind:

Tabelle 4: Adressatengerechte Konzeption der Schülerlaborangebote „Phosphor-Rückgewinnung“

Zielgruppe	Zeit	Inhalte
für Schulen	4-5 h	Vorbereitung Prezi, 2 x 1 h Praktikum (MTB), Modellabwässer, halbquantitativ, Nachbereitung, Sankey
für Studierende	1-2 h	Vor- + Nachbereitung Prezi (opt. MTB), Sankey als Theoriemodell
und LFB	3-4 h	Vorbereitung Prezi, 2 x 1 h Praktikum (MTB), Modellabwässer, halbquantitativ, Nachbereitung, Sankey
für Azubis/Ausbilder	5-6 h	Vorbereitung Prezi, 2 x 2 h Praktikum (MTB), reale Abwässer, quantitativ, Nachbereitung, Sankey

In einer Materialübersicht am Ende dieses Kapitels (unter 3.3.5 auf S.22 und im Anhang zu diesem Abschlussbericht unter Punkt A3) sind alle Informationen, SOPs, Materialien, Links und Einsatzempfehlungen zusammengefasst und über interne Verlinkungen abrufbar.

3.3.4 Digitale Tools

Alle entwickelten Materialien sind als Druckversion erhältlich und werden durch drei digitale Tools ergänzt. Einer einführenden Lernumgebung auf PREZI™-Basis sowie zweier iOS basierten Applikationen: einem „Multitouch Learning Book“ als digitalen Lernbegleiter und einer Sankey-Applikation zur stofflichen Bewertung der Verfahren, die im Folgenden beschrieben werden.

Eine digitale Lernumgebung auf Basis der Software PREZI™ zur Vor- und Nachbereitung

Um die Lernenden auf einen Besuch vorzubereiten und ihnen zu zeigen, dass das Thema Phosphor eine wichtige Rolle einnimmt, wurde eine Lernumgebung mit der **Software Prezi™** entwickelt [30,31]. Der Erfolg solcher Lernumgebung konnte bereits gezeigt werden [32,33]. Die Bedienung ist selbsterklärend und erfolgt intuitiv. Die Lernumgebung soll im Vor- und eventuell im Nachhinein stehen und den Lernenden helfen, den Kontext und die Bedeutung des Phosphors aus verschiedenen Perspektiven aufarbeiten zu können. Hierfür wird eine Sandwich-Struktur (vgl. Abb. 4) vorgeschlagen. Bei dieser finden sich auf der linken Seite chemische Grundlagen zu Phosphor und Dünger, während auf der rechten Seite gesellschaftlich-geographische Themenkomplexe, wie das Fallbeispiel Nauru oder Marokko aufgearbeitet werden. Ebenso wird der Frage einer Ernährungssicherung der Menschheit nachgegangen.

Diese beiden Themenkomplexe rahmen einen Teil der Versuche des Schülerlaborangebots ein, sodass die Versuche auch für Lernende zugänglich sind, die das Schülerlabor nicht besuchen können. Alternativ kann die Lernumgebung durch Lernende genutzt werden, die die Versuche nicht ausführen und sich nur theoretisch im Unterricht mit der Thematik beschäftigen.

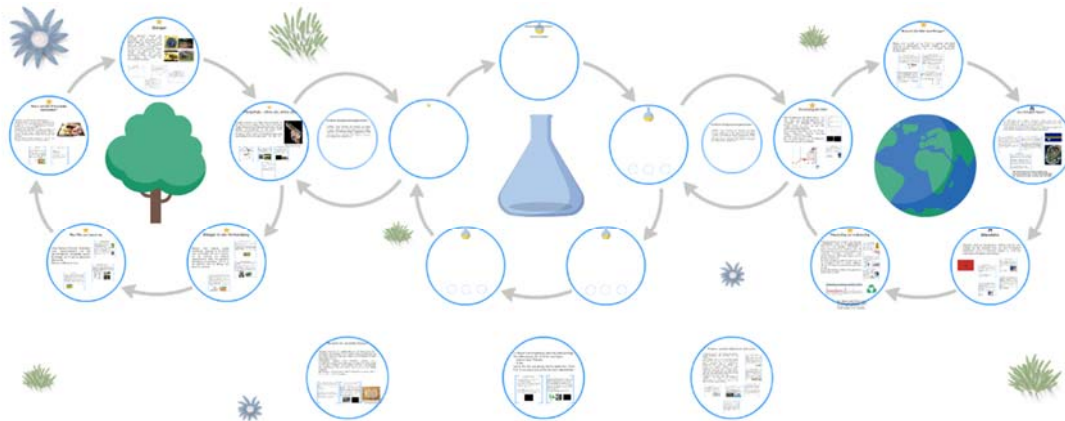


Abbildung 4: Aufbau der Lernumgebung

In der Lernumgebung selbst wird versucht, über Icons zu differenzieren. Diese entsprechen einem informierenden Text, einer Abbildung oder Tabelle, einer Rechercheaufgabe, einem Versuch oder einem Film. Die Differenzierung könnte darüber erfolgen, dass die Lehrkraft angibt, wie viele der verschiedenen Felder besucht werden müssen. Dabei könnten wichtigere Felder auch höherwertig gewertet sein, sodass das Lesen/Anschauen/Recherchieren wichtiger ist, als bei anderen Inhalten. Um dieses Vorgehen in den Kontext der Lernfirma zu rahmen, wird dies als Vorbereitung für ein Bewerbungsgespräch verstanden, um die Lernenden möglichst umfassend mit Informationen zu ihrem neuen Arbeitsplatz zu versorgen. Eine stumme Version der Lernumgebung (leere Felder) dient als Sicherung. Es muss markiert werden, wo welche Information zu finden ist. Die Lernumgebung ist öffentlich, der Zugriff durch die Lernenden kann jederzeit erfolgen. Die Lernumgebung ist über die beiden Links https://prezi.com/xub8jjinosxtp/phosphat/?utm_campaign=share&utm_medium=copy und <http://www.digitale-medien.schule/phosphat%c3%bcckgewinnung.html> erreichbar. Inzwischen gibt es national [34,35,36] wie international [37,38,39] Publikationen, die den Einsatz von Prezi™ für den Unterricht bzw. das Lehren nutzen.

Prezi™ ist eine online verfügbare Software, mit der in erster Linie Präsentationen erstellt werden. Im Unterschied zu z.B. Power Point bietet Prezi™ die Inhalte in Form von Rahmen oder auch völlig frei platziert an, die dann beliebig per Heraus- und Hereinzoomen mit der Maus per „drag“ angesteuert werden können. Bearbeitbar sind die Präsentationen online und gegen eine Gebühr auch offline. Das Betrachten bzw. Halten der Präsentationen ist jedoch nach vorherigem Download auch offline möglich. Für das Erstellen ist ein Account auf prezi.com nötig, für das Betrachten oder Präsentieren hingegen nicht. Zur Nutzung ist dieser Software ist es möglich, die Prezi runterzuladen und wie eine Datei zu verschicken. Diese lässt sich auf den gängigen Betriebssystemen (Windows & Mac) problemlos öffnen und kann so ohne Internetverbindung auch per USB-Stick übergeben werden. Alternativ kann ein Link erstellt werden und der Zugang ist über jeden handelsüblichen Browser zugänglich. Hierfür ist bei mobilen Geräten wie Tablets oder Smartphone hilfreich die kostenlose Prezi™ App herunterzuladen. Entwickelt wurde die Software von Peter Arvai, Péter Halácsy und

Adam Somlai-Fischer im Jahre 2009. Aktuell besitzt Prezi™ weltweit ca. 85 Millionen Nutzer, die bereits über 325 Millionen Präsentationen (sogenannte Prezis) erstellt haben [40].

Ein Multi-Touch Learning Book als digitaler Lernbegleiter im Laborpraktikum



Abbildung 5: Exemplarische Buchseite im Multitouch Learning Book

Das Experimentieren im Labor kann mit Hilfe eines „**Multitouch Learning Books**“ unterstützt. In diesem digitalen Lernbegleiter erhalten die Schülerinnen und Schüler auf einer Seite ihren Forschungsauftrag, die Versuchsanleitung, in Form einer E-Mail, Hilfen (grüne Icons) und Arbeitsaufträge (rote Icons), sowie die Möglichkeit kollaborativ mit den anderen Expertengruppen zu kommunizieren (pinkes Icon).

Bei der Entwicklung der digitalen Materialien wurde besonderes Augenmerk auf die individuelle Förderung der Lernenden gelegt. Aus diesem Grund wurden gestaffelte Hilfen in Form von aufgenommenen Chatverläufen entwickelt (vgl. Abbildung 6 A).

In die Chats werden Informationen in Text-, Bild-, Video- und Audioform eingebunden, sodass im Sinne der individuellen Förderung verschiedene Lerntypen angesprochen werden. Die Hilfen beziehen sich auf sprachliche, technische, experimentelle und kognitive Probleme. Die in Abbildung 2 dargestellte Buchseite zeigt exemplarisch den Aufbau des Multitouch Learning Books. Durch die unterschiedliche Farbgebung der Buttons werden Hilfen (grün), Aufträge (rot) und kollaborative Aufgaben (pink) voneinander getrennt. Die Versuchsdokumentation erfolgt durch das Fotografieren relevanter Versuchsschritte.

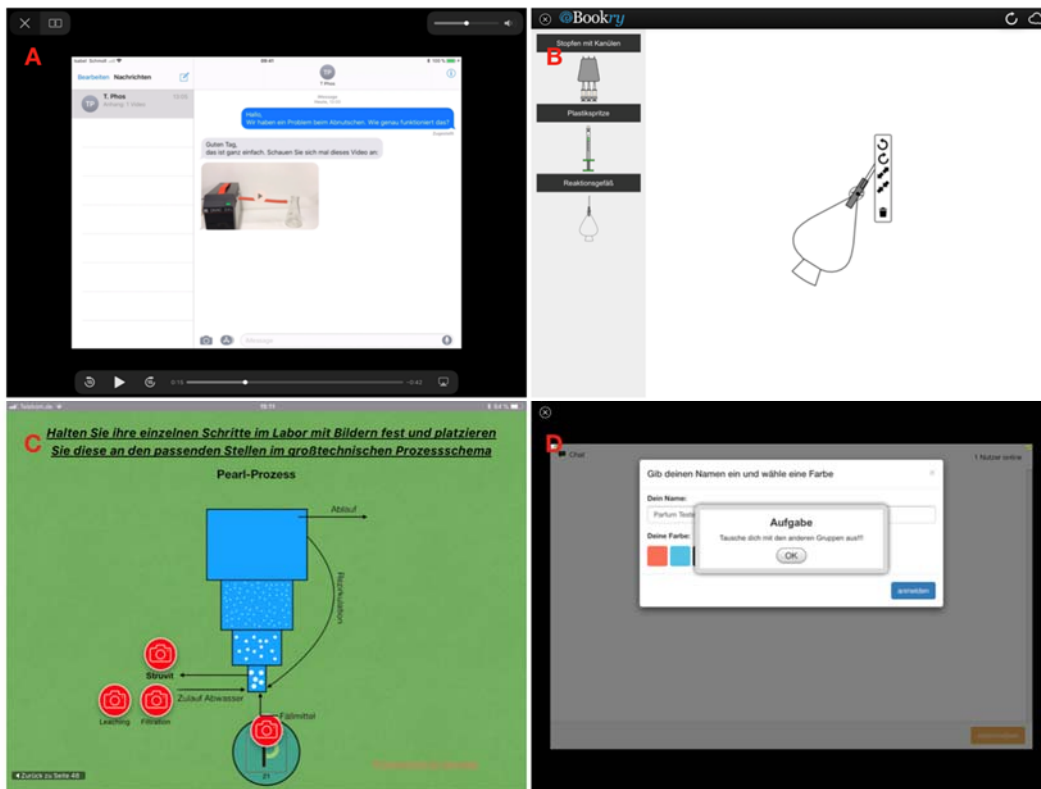


Abbildung 6: A: Video eines aufgenommenen Chatverlaufs als Hilfestellung; B: virtueller Versuchsaufbau per Drag & Drop; C: Verbindung des großtechnischen Prozesses mit der reduzierten Labordurchführung des Verfahrens; D: Kommunikationsmöglichkeit in einem interaktiven Chat zur Kollaboration der einzelnen Expertengruppen

Ein wichtiger Teil des Bewertungsprozesses der einzelnen Verfahren stellt der Vergleich zwischen der großtechnischen Anwendung mit der im Labor durchgeführten Variante dar. Hierfür sind, wie in Abbildung 6 C dargestellt, Foto-Widgets eingefügt, um die einzelnen Bestandteile des Prozesses zu evaluieren. Zu jedem Experiment gehört eine ausgewogene Versuchsplanung. Aus diesem Grund wurden vereinzelt Aufgaben eingebaut, bei denen die Schülerinnen und Schüler ihren Versuchsaufbau virtuell per Drag & Drop darstellen müssen, bevor sie mit dem eigentlichen Experimentieren beginnen. Der in Abbildung 6 D dargestellte Chat verknüpft die einzelnen Bücher untereinander, sodass ein kollaboratives Arbeiten der verschiedenen Expertengruppen ermöglicht wird.

Im Folgenden sollen verschiedene Mehrwerte des Lernbegleiters im Vergleich zur analogen Versuchsvariante stichpunktartig dargestellt werden [siehe auch 41,42,43]:

- Einzelne Stationen sind über Verlinkungen im Multitouch Learning Book mit einander verbunden, sodass es zu einem Aufbrechen eines linearen Lernwegs kommt. Dieser nicht-lineare Lernweg kann die Selbstbestimmung der Schülerinnen und Schüler beim Forschenden Experimentieren fördern.
- Durch die Einbindung interaktive Anwendungen (Widgets) kommt es zu einer besseren Anpassung der Versuchsanleitungen an den Lernprozess und individuellen Bedürfnissen der Schülerinnen und Schüler.
- Durch die Einbindung von Animationen kann das Verständnis und die Problemlösefähigkeit signifikant erhöht werden.

- Durch die Einbindung von einzelnen Lernwerkzeugen und Experimentalwerkzeugen, wie die pH-Messung mit digitaler Messwerterfassung kommt es zu einer sinnigen Verknüpfung zwischen den verschiedenen didaktischen Funktionen digitaler Medien.
- Das Schülerlabormodul ermöglicht eine sinnige Vernetzung von außerschulischen und schulischen Lernorten.

Eine Sankey-Applikation als digitales Bewertungsinstrument der Stoffströme in den technischen Verfahren

Schülerinnen und Schüler als auch Auszubildende chemisch-technischer Lehrberufe sollten in die Lage versetzt werden, über die energetische und stoffliche Bewertung der Prozessteilschritte (Stoff- und Energieeffizienz, Reinheit des Produkts, Abfallart und -menge, Einbindung des Verfahrens in bereits vorhandene technische Anlagen, Risiken für Mensch und Umwelt) zu einer ökologischen und ökonomischen Gesamtbewertung der vorgestellten Verfahren zu gelangen [38,39,40]. Zur Modellierung der Ökobilanzen wurde ein auf Sankey-Diagrammen basierendes, Prozess-visualisierendes Softwaretool entwickelt [44,45,46].

Weitere Informationen zu digitalen Lerneinheiten, Anwendungsbeispiele und komplette Unterrichtseinheiten bietet die Plattform „digitale Medien Schule“ der Joachim Herz Stiftung unter <http://www.digitale-medien.schule/lernumgebungen.html> [47].

3.3.4 Übersicht der entwickelten Materialien zur Phosphor-Rückgewinnung

In der umseitigen Materialübersicht sind alle Informationen, SOPs, Materialien, Links und Einsatzempfehlungen zusammengefasst. Je nach Zielgruppe (Sek.I, Sek.II oder Azubis) sind die Verwendungsempfehlungen der Tabelle zu entnehmen. Selbstverständlich kann durch die modulare Konzeption dieses Angebots innerhalb der Schwierigkeitsgrade - individuell an die Fähigkeiten der Lehrgruppen angepasst - variiert werden.

Auf den Webseiten der beiden Schüler-Kooperationspartner „**FreiEx**“ der Universität Bremen und dem „**iChemLab**“ der PH in Weingarten [dem Nachfolger des Saarbrücker „NanoBioLab“] wird diese Übersichtstabelle dauerhaft abrufbar sein und über interne Verlinkungen die Materialien vorgehalten. Unter <http://www.uni-bremen.de/freiex/> unter dem Reiter PROJEKTE / Phosphorrückgewinnung sowie unter <http://chemie.ph-weingarten.de/forschung/projekte/projekte-archiv/> sind die beiden Schülerlabore erreichbar. Das Angebot zur Phosphor-Rückgewinnung wird verstetigt.

Tabelle 5: Materialübersicht „Phosphor-Rückgewinnung“

Ifd. Nr.	Inhalt
Info	Abt. 00 VORBEREITUNG für Multiplikatoren und Lab-Staff
I	Lehrerhandbuch
II	Auswahlhilfe
III a	Titelblätter für Kennzeichnung der Stationen Abt. 1
III b	Titelblätter für Kennzeichnung der Stationen Abt. 2
III c	Titelblätter für Kennzeichnung der Stationen Abt. 3
III d	Titelblätter für Kennzeichnung der Stationen Abt. 4
III e	Titelblätter für Kennzeichnung der Stationen gesamt
IV	Präsentation zur Einführung ins Schülerlabor
V a	Auswertungsheft für Sek.I
V b	Auswertungsheft für Sek.II
V c	Auswertungsheft für MINT- & UT-Azubis
V d	Auswertungsheft vollständig
VI	Deutsche Phosphor Plattform DPP - Verfahrenskennblätter

SOP-Nr.	Standard Operation Procedures
0	Methodenübersicht
1	Modellklärslamm
2	Modellklärslammmasche
3	Stammlösung & Testlösungen
4	Versuche, Geräte, Chemikalien
5	Chemikalienkatalog, Etiketten
6	Sicherheit & MSDS
7	Phosphoranalysetool MColor von Merck/VWR
8	Herstellung von Modell-KS für Studi & MINT-Azubis
9	div. Geräte manuals (pH-Checker, SodaMaxx etc)

	Digitale Tools
PREZI™	PREZI™ Einführung in das Thema Phosphor-Rückgewinnung
MLB	Multitouch Learning Book als digitaler Lernbegleiter im Labor
Applikation	Sankey zur Bewertung der Stoffströme in den Verfahren

www.uni-bremen.de/freiex/
<http://chemie.ph-weingarten.de/forschung/projekte/projekte-archiv/>

Ifd. Nr.	Inhalt	Dauer	geeignet für...			
			Sek. I	Sek. II	Azubis	Multiplikatoren
Abt. 1 QUANTITATIV						
S 17-01	Phosphatsteststäbchen Aqua Check von Hach	5 min	x	x		x
S 17-02	Nachweis mit Mcolorstest von Merck/VWR, kolorimetrisch	5 min	x	x	x	x
S 17-03	Phosphorsäure Titration			x	x	x
S 17-04	Pocket Colorimeter II von Hach, Küvettentest LCK 348-350, kolorimetrisch	15 min			x	x
S 17-05	Phosphat Bestimmung nach DIN 6878, photometrisch	1 h			x	x
S 17-06	pH-Wert Bestimmung	5 min	x	x	x	x
Abt. 2 QUALITATIV						
S 18-01	Chem.-phys. Abwasserbehandlung (Flockung)	15 min	x	x	x	x
S 18-02	Phosphatnachweis im Boden	15 min			x	x
S 18-03	Phosphatnachweis in Pflanzenasche	15 min	x	x		
AZUBI S 18-03	Phosphatnachweis in Pflanzenasche	15 min			x	x
S 18-04	Kristallisation MAP Mikroskop	15 min		x	x	x
S 18-05	Kristallisation Zirkonylphosphat Mikroskop	15 min			x	x
S 18-06	Kristallisation Ammoniummolybdat Mikroskop	15 min			x	x
S 18-07	Klärschlamm reinigen	15 min				
AZUBI S 18-08	Im Klärwerk	15 min			x	x
Abt. 3 WACHSTUMSVERSUCHE						
S 19-01	S 19-01 Pflanzenwachstumstest Kresse	15 min	x	x	x	x
S 19-02	S 19-02 Pflanzenwachstumstest Bohnen	15 min	x	x	x	x
AZUBI S 19-03	Calciumlaktat-Extraktion	45 min			x	x
Abt. 4 VERFAHREN						
EINFACH: GRUNDLAGEN Schülervariante Sek. I (ohne Klärschlamm & ohne Nutsche)						
S 20-01 Sek.I	Budenheim CO2	45 min	x	x		x
S 20-02 Sek.I	Stuttgarter Verfahren	45 min	x	x		x
S 20-03 Sek.I	PEARL	45 min	x	x		x
MITTEL: ERWEITERUNG Sek.II mit Modell-Klärschlammmasche						
S 20-04 Sek.II	TetraPhos/LEACHPHOS	45 min		x		x
SCHWER: ERWEITERUNG Sek.II, Studenten- & Azubivariante						
S 20-01 Azubis	Budenheim CO2	60 min			x	x
S 20-02 Azubis	Stuttgarter Verfahren	60 min			x	x
S 20-03 Azubis	PEARL	60 min			x	x
S 20-04 Azubis	TetraPhos/LEACHPHOS	60 min			x	x

4 Implementierung der Vorhabeninhalte in Schule, Universität und Ausbildung

In Tabelle 6 ist die **aktuelle Reichweite mit den Zahlen der erreichten Teilnehmer** in einer Übersicht dargestellt. Generell wurden sie prognostizierten Teilnehmerzahlen in der Gesamtsumme erreicht, jedoch in einer abweichenden Verteilung innerhalb der Zielgruppen.

Tabelle 6: Teilnehmerzahlen (Stand Februar 2019)

Zielgruppe	SOLL	IST	NanoBioLab	FreiEx
SchülerInnen	850-1.250	295	193	102
Studierende (+ Ausland)		219 (+ 600)	144	75
Auszubildende	200-270	135	50	85
AusbilderInnen	150-220	76	2	74
LFB/Fortbildungen		81		81
Tagungen		595	385	210
Gesamt	1.200-1.740	1.401	774	627

Von den prognostizierten Teilnehmerzahlen für die Zielgruppe der Schulklassen weichen die beiden Projektpartner sehr deutlich ab. Dies ist eine völlig ungewohnte Sachlage und zwingt die Projektpartner zur Ergreifung unkonventioneller Maßnahmen. So werden teilweise Fahrtkosten übernommen oder bei der Buchung von Laborterminen zu anderen Themen (bspw. CUN) wird eine verpflichtende Teilnahme der Lerngruppen am P-Rück-Vorhaben erforderlich, um extrinsische Anreize zu schaffen. Die Lehrkräfte erhalten auf den Fortbildungen zum Einsatz digitaler Medien in ihren Unterricht die PREZI und das Multitouch Learning Book präsentiert, die im Zuge der Materialentwicklung zur Phosphor-Rückgewinnung erarbeitet wurden. Die LFB-Teilnehmer erfahren also „eher nebenbei“ die P-Problematik.

Studierenden ist die P-Problematik nicht bzw. kaum bekannt. Im Rahmen von Auflagenkursen konnten sie sich informieren und an Praktika teilnehmen. In Evaluationen haben sich die Mehrzahl der teilnehmenden Studenten positiv zur Konzeption und Art der Aufbereitung des Themas und die Einbindung digitaler Tools geäußert. Eine Kooperation mit Prof. Gulacar von der University of California in Davis hat seinen etwa 600 Studierenden (Grundkurs „Einführung Allgemeine Chemie“ für die Fächer BIO, CHE, AGRAR) die Prezi vorgestellt und angewendet. Russischen, australischen und polnischen Kollegen wurde das Material ebenfalls zur Verfügung gestellt.

Die Aktivierung von chem.-technischen Auszubildenden über die allgemeinen Berufsschulen verläuft schleppend, besser gelingt dagegen die Akquise von Azubis der umwelttechnischen Ausbildungsberufe. Erst sehr spät konnten die Kläranlagenleiter, Ausbilder und verantwortlichen Kommunen und Verbände aktiviert werden. Der DWA Nord wird gemeinsam mit der Universität Bremen und der Firma hanseWasser Informationsveranstaltungen mit praktischen Anteilen auch über den Förderzeitraum des Vorhabens hinaus organisieren und durchführen.

4.1 In die schulische Ausbildung

Das Thema „Phosphor-Rückgewinnung“ ist in der Lehrerschaft der **allgemeinbildenden Schulen** weitgehend unbekannt. Eine Sensibilisierung für diese Problematik musste und muss auch weiterhin erfolgen. Auf Fachtagungen und Fortbildungen für Lehrkräfte erläuterten die Projektpartner zunächst die technischen, ökonomischen wie politischen Hintergründe. Ferner wurden die Praktikums-

materialien und Angebote zur digitalen Anbindung vorgestellt und ihre Anbindungen an das schulische Curriculum erläutert. Dabei gab es zwei generell unterschiedliche Herangehensweisen: Zum einen die „klassische“ Bremer Darstellung mit dem Fokus auf Hintergrundinformationen und praktische Umsetzung im Labor, bei der nur wenige Besucher erschienen. Wurde jedoch der Fokus auf die Methoden einer Digitalisierung des Unterrichts am Beispiel der P-Rückgewinnung gelegt, waren die Teilnehmerzahlen signifikant höher. Prof. Huwer wendete diese Variante an und erreichte dadurch deutlich höhere Teilnehmerzahlen. Diese Arbeitsteilung wird von den beiden Partnern auch in der Verstetigung so beibehalten.

In Tabelle 7 sind Verfahrensschritte, die methodischen Ansätze und Arbeitstechniken der P-Rückgewinnung mit den Inhalten des schulischen Curriculums der Fächer Chemie/Biologie sowie den Ausbildungsinhalten der Chemielaboranten abgeglichen dargestellt. Deutlich wird, dass die Übereinstimmung zwischen den Inhalten dieses Vorhabens mit denen der Schule als auch Ausbildung gut bzw. sehr gut ist [15,28,29].

Tabelle 7: Phosphor-Rückgewinnung: Abgleich Methoden und Lehr-Lern-Inhalte

	Prozess-Schritte	Methoden/Lerninhalte	Arbeitstechniken	Bestandteil im schulischen Curriculum	Bestandteil des Ausbildungsplans
1	Probenvorbereitung: evtl. mechanische Vorbehandlung (wiegen, mahlen, sieben, filtrieren, abmessen), Feuchte bestimmen & einstellen	Verschiedene Techniken der Probenvorbereitung und Probeneingangsbuch	TS nach DIN-ISO, Zerkleinerung, Bereitung repräsentativer Mischproben, Wiegen, Lagerhaltung, Dokumentation	tw. x	xxx
2	Prozessführung & Aufbau der Anlage	Planung der Versuchsanordnung	Umgang mit Laborgeräten, sicherer Aufbau von Laborapparaturen, Sicherheit im Labor	tw. x	xxx
3	Leaching des Phosphats aus Abwasser bzw. Klärschlammmatrix durch pH-Senkung > 3,5	Bestimmung des pH-Wertes Indikatoren, Neutralisations-Titration, Volumetrie, Photometrie	Umgang mit pH-Sonden, Sticks, exaktes Wiegen und Ablesen, Berechnung der Einwaagen, Herstellung von Maßlösungen, Herstellung von Verdünnungsreihen	xxx	xxx
4	Filtration I vom ungelösten Rest	Stofftrennung	Einsatz verschiedener Filtrationsmethoden (Filterpapier, Vakuum, Zentrifugation)	xxx	xxx
5	pH-Erhöhung > 8	Bestimmung des pH-Wertes Indikatoren, Neutralisations-Titration, Volumetrie, Photometrie	Umgang mit pH-Sonden, Sticks, exaktes Wiegen und Ablesen, Berechnung der Einwaagen, Herstellung von Maßlösungen, Herstellung von Verdünnungsreihen	xxx	xxx
6	Fällung des Phosphats aus dem Filtrat aus Schritt 3 und Kristallisation bzw. Freisetzung von H₃PO₄	Chemisches GG'w, Redox-Reaktionen, Komplexierung, Löslichkeit	Kristallisation, Bildung schwerlöslicher Phosphat-Salze,	xxx	xxx
7	Filtration II vom gelösten Rest	Stofftrennung	Einsatz verschiedener Filtrationsmethoden (Filterpapier, Vakuum, Zentrifugation)	xxx	xxx
8	optional - Reinigung des Produkts	Umkristallisation	Einsatz verschiedener Filtrationsmethoden (Filterpapier, Vakuum, Zentrifugation), Entsorgung	(x) nur Sek.II LK	xxx
9	Qualitätskontrolle qualitativ	qualitative Nachweisreaktionen	Kristalle via Mikroskopie, RG-Versuche als Molybdat (gelb), als Zirkonphosphat (weiß), Phosphorsalzperle	x	xxx
10	Qualitätskontrolle quantitativ	Gravimetrie, Volumetrisch	mit Schnelltest und via Stick (z.B. Hoch-Lange, Merck), Titration der 2. Stufe der H ₃ PO ₄ , Gravimetrie als Ca ₃ (PO ₄) ₂ oder Struvit	x	xxx
		Instrumentelle Analytik	Photometrie, NMR, ICP	tw. x	xxx
		Pflanzenverfügbarkeit	Versuche zur Löslichkeit, Wachstumstests Lemna, Algen, Kresse		xxx
11	Bestimmung der Ausbeute	Reaktionsgleichungen aufstellen, Stöchiometrie, chemisches Rechnen, Bilanz der angewandten Rückgewinnungsmethode	Verlaufskontrolle über die Teilschritte des Prozesses hinsichtlich Chemikalien-, Energie- & Wasserverbrauch, Abwasser, Nebenprodukte, Zeit, Entsorgung etc.	tw.x	xxx
12	Beurteilung des Verfahrens	Bewertungskompetenz	Bestimmung des Wirkungsgrades		

Positiv war und ist, dass die Lehrkräfte das Thema sehr interessant finden und neben den naturwissenschaftlichen Aspekten auch sein Potenzial gerade für einen interdisziplinären Unterricht sofort erkennen, die in Tabelle 8 zusammengefasst sind. Interdisziplinäre Bezugspunkte - auch zu gesellschaftswissenschaftlichen Fächern und zur Geographie - können von Lehrkräften genutzt werden, um dieses Thema in ihren Unterricht einzubinden.

Tabelle 8: Curriculare Anknüpfungspunkte des Thema Phosphor/Phosphat-Rückgewinnung

Fächer	Mögliche inhaltliche Anknüpfung an das schulische Curriculum
Mathematik	Prozent, Dreisatz, Kinetik, Differentialrechnung, Quantifizierung
Chemie	Stoffkreisläufe, pH-Wert & Säure-Base-Konzept, Titration, Löslichkeitsprodukt, Salzbildung & Fällung, Photometrie, qualitative & quantitative Nachweise
Biologie	Stoffkreisläufe, Photosynthese, Nährstoffe & Pflanzenwachstum, Funktion von Phosphat in der Zelle, ATP, second messenger cAMP
(Umwelt-)Technik	Säure-Base-Konzept, chem-physik. Fälln & Flocken, Salzbildung & Fällung, Löslichkeitsprodukt, Prozessführung und -optimierung, Stellgrößen
Geographie	Welthandel, Rohstoffvorkommen und Abhängigkeiten, Abbautechnologien, Kybernetik, Landwirtschaft und Transport
Politik/BWL	Welthandel, Rohstoffvorkommen und Abhängigkeiten, Migration, Hunger, Kriege/Konflikte

Für ein schulisches Praktikum ab der Jahrgangsstufe 9 ist das unter Kapitel 3.3.3 skizzierte Programm konzipiert. Ziel war und ist die Heranführung an einfache chemisch-labortechnische Arbeitsweisen und die Anwendung zweier halbquantitativer Bestimmungsmethoden (Sticks und die Farbvergleichsmethode mit dem MColorTest® von Merck / VWR).

Fazit + : generell arbeiten SchülerInnen gerne praktisch und hier ist Teamwork gefragt. Gerade die Ermittlung der Rückgewinnungsquoten spornt an, die jeweiligen Umsetzungsschritte in den Verfahren korrekt durchzuführen. Die Filtrationen sind langwierig und gelingen selten rückstandsfrei – dadurch erhalten die SchülerInnen erste Eindrücke über die technischen Probleme, die bei der industriellen Umsetzung dieser Verfahren auftreten können. Die Lehrkräfte sind angetan von der Konzeption der Lernfirma. Begeistert sind die Teilnehmer, wenn das MLB als digitaler Lernbegleiter im Labor eingesetzt wird. Dadurch fällt die Orientierung beim Experimentieren leichter.

Fazit - : SchülerInnen erwarten spektakuläre Effekte bei der Laborarbeit. Damit kann dieses Thema leider nicht aufwarten. Die entstehenden Feststoffe sind weiß, sehr feinkristallin und unscheinbar. Die Filtrationsprozesse sind langwierig und deshalb schnell langweilig. Die SchülerInnen haben Schwierigkeiten bei der Berechnung der Rückgewinnungsquoten, sie beherrschen den Dreisatz oft nicht sicher. Die Lehrkräfte kommen trotz Lob und guter Praktikumsverläufe nicht mit weiteren Lerngruppen. In der analogen Materialvariante überfordern die vielen Zettel schnell.

Insgesamt haben rund 300 SchülerInnen dieses Angebot wahrgenommen.

4.2 In die universitäre Fachausbildung und Lehramtsausbildung

Parallel zur Implementation dieses Schülerlaborangebots in Schule und Ausbildung wurden die Inhalte sukzessive auch in die Lehramtsausbildung in den Fächern Naturwissenschaften und Chemie an den beteiligten Hochschulen integriert und über Lehrerfortbildungen der beteiligten Chemielehrerfortbildungszentren verbreitet. Herr Huwer hat im Zuge seines Aufenthalts in Weingarten dort ein verpflichtendes curriculares Modul „Nachhaltigkeit und Chemie“ im Bachelorstudium Lehramt Chemie sowie im Fach-Studiengang „Umweltbildung“ initiiert. Dort finden die Ergebnisse dieses Projektes ab dem laufenden Wintersemester Anwendung.

Studierenden ist die P-Problematik nicht bzw. kaum bekannt. Im Rahmen von Auflagenkursen konnten sich bisher ca. 220 Studierende informieren und an Praktika teilnehmen. In Evaluationen

haben sich die Mehrzahl der Teilnehmenden positiv zur Konzeption und Art der Aufbereitung des Themas und den digitalen Tools geäußert. Fachhochschulen und Universitäten mit umwelttechnischer Ausrichtung wurde das Material bisher noch nicht explizit angeboten. Das soll jedoch in der noch verbleibenden Restlaufzeit des Vorhabens erfolgen.

In einer Kooperation mit Prof. Gulacar von der University of California in Davis konnte etwa 600 Studierenden (Grundkurs „Einführung Allgemeine Chemie“ für die Fächer BIO, CHE, AGRAR) die Prezi vorgestellt und angewendet werden. Eine Evaluation der erhobenen Daten und Kommentare ergab eine durchweg positive Rückmeldung seitens der Studierenden der naturwissenschaftlichen und agrartechnischen Fächer. Zwei Publikationen im Journal of Chemical Education (JCE) hierzu sind eingereicht. Weiter konnte Prof. Eilks im April während eines Arbeitsbesuchs in Perth und Curtin, Australien, das Vorhaben präsentieren und ist auf großes Interesse gestoßen. Die Unterlagen wurden komplett übersetzt und zur Verfügung gestellt. Russischen und polnischen Kollegen wurde das Material ebenfalls zur Verfügung gestellt.

4.3 In die betriebliche Ausbildung

Die Inhalte und Fertigkeiten dieses Angebotes sollten zur integrativen Nutzung in der Ausbildung der Chemie- und Biologielaboranten und BTA/CTA aufbereitet werden. Der Kreis der Adressaten für Schülerlabore sollte dadurch über die schulische Ebene hinaus erheblich erweitert werden. Nicht nur die Berufsschulen, Ausbildungsstätten und die Fachbetriebe sondern auch Städte und Kommunen, Klärwerksbetreiber und Entsorger, industrielle Partner/ KMU aus den Bereichen Umwelttechnik, Kanal- und Rohrleitungsbau, Wasserver- und -entsorgung und Firmen, die die Phosphor-Rückgewinnungsverfahren vermarkten, könnten davon gleichermaßen profitieren. Die gesetzlichen Vorgaben haben mittlerweile den Wasser-/Abwasserparameter „Phosphat“ in den Fokus gerückt. Ebenfalls von Interesse könnten die Unterlagen für den Garten- und Landschaftsbau und natürlich für die Landwirtschaft sein. Im Folgenden sollen die Besonderheiten der chemischen Labor-Ausbildungsberufe und der UT-Berufe erläutert und auf die jeweiligen Fortschritte bei der Implementierung des Themas „Phosphor-Rückgewinnung“ eingegangen werden.

Allgemeine Berufsschulen

Vergleichbar mit der Situation an den allgemeinbildenden Schulen ist die Lage an den **allgemeinen berufsbildenden Schulen**. Die Informationen darüber, welche Berufsschulzentren chemisch-physikalischen und labortechnische Schwerpunktangebote (CTA/BTA, Laboranten) bieten, lieferten die Publikationen zur Schullandschaft in den Bundesländern des Statistischen Bundesamtes sowie die Bildungserver der Länder (Liste siehe Anlage 1 im Anhang). Es gestaltete sich sehr mühsam, die zentralen Ansprechpartner in der beruflichen Ausbildung zu finden. Eine intensive Werbekampagne im Sommer 2018, die noch einmal im Herbst 2018 wiederholt wurde, zeigte kaum Resonanz. Begründet wurde das gedämpfte Interesse mit dem sehr engen Ausbildungsplan und der nicht besonders hohen Relevanz für die angehenden Laborfachkräfte. Generell wurde auf die Kollegen aus der Umwelttechnik verwiesen.

UT-Ausbildungszentren und Berufsschulen mit UT-Schwerpunktangeboten

Im Gegensatz zur Situation an den allgemeinbildenden (Berufs-)Schulen war das Interesse am Thema bei den **berufsbildenden Schulen mit UT-Schwerpunktangeboten und UT-Ausbildungszentren** wesentlich höher. Die Informationen darüber, welche Berufsschulzentren UT-Schwerpunktangebote bieten, lieferten auch hier die Publikationen zur Schullandschaft in den Bundesländern des Statistischen Bundesamtes sowie die Bildungsserver der Länder (Liste siehe Anlage 1 im Anhang). Auch hier wurde und wird das Vorhaben intensiv beworben.

Verschiedenen **UT-Berufsschulzentren** wurde das Material bisher angeboten. Ein guter Kontakt ist entstanden zur SZUT Bremen, BBS Völklingen, ITECH in Hamburg, BBS Goslar-Baßgeige und zur BBS Lauingen. Die letzten drei Adressen sind die wichtigsten staatlichen Ausbildungsschulen für UT-Berufe. Die Materialien sind ausgetauscht und bereits im Einsatz bzw. befinden sich in der Prüfung.

Die überregionalen **Ausbildungszentren der Umweltberufe** sind jedoch die Ansprechpartner mit dem größten Bezug zum Thema. Hier gelingt eine Implementierung der Hintergrundinformationen mit praktischen Laborarbeiten am sinnvollsten. Die Ausbildung zur Fachkräften in der Umwelttechnik - es werden die vier Disziplinen Wasserversorgungstechnik, Abwassertechnik, Kreislauf- und Abfallwirtschaft, Rohr-, Kanal- und Industrieservice angeboten - besteht seit 2002 und ist dezentral länderübergreifend organisiert. Teilweise ist sie an Volkshochschulen verortet. Jedoch benötigt die Festlegung neuerlicher Lehrinhalte Zeit. Ansprechpartner ist Herr Hellgermann aus Hildesheim. Besonders Prof. Schmelz von der Emscher Genossenschaft und Dr. Hilmer von der DWA Nord treiben die Verbreitung des Lehrangebots bei Anwendern und Ver- bzw. Entsorgern aktiv voran. Dr. Lenz von der VHS in München, Frau Mannebach von der BEW in Essen, Herr Höckerl von der DWA in Linz am Rhein wie auch Herr Saathoff von der VHS in Norden setzen die Materialien bereits ein bzw. diese sind in der Prüfung. Das BIW Bildungswerk Bau in Gera ist ebenfalls involviert.

Die BEW in Essen ist dabei als Vorreiter zu sehen und wird ihren sehr komprimierten Ausbildungslehrplan entsprechend umstellen. Die Auszubildenden der umwelttechnischen Lehrberufe in NRW werden sich dieser für sie wichtigen Fachthematik im Rahmen eines 4-stündigen Blockpraktikums zuwenden, um zukünftig auf den von ihnen verantworteten kommunalen Kläranlagen die Klärprozesse auch im Sinne einer ertragreichen P-Rückgewinnung steuern zu können. Verfahrenstechnisch haben sich die Ausbildungszentren für die Behandlung von regulärem Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammasche nach PEARL, TetraPhos, Budenheim entschieden (siehe Kapitel 3.3.3). Das Stuttgarter Verfahren hat - so die einhellige Meinung der Fachleute - wohl keine technische Bedeutung mehr. Besonderes Augenmerk wird dagegen auf die Extraktion des Phosphats aus der Asche gelegt, da diesem Entsorgungspfad zukünftig höchste Relevanz beigemessen wird.

Fazit + : Die (UT-)Azubis arbeiten schnell, gründlich und weitgehend selbständig. Sie sind ernst bei der Sache und sehen die Hintergrundinformationen als sehr wichtig für ihr Handeln als zukünftig Verantwortliche auf den Kläranlagen und in den Kontrolllaboren an. Sie erkennen, dass sie gerade Teil eines sich neu konstituierenden technologischen Prozesses zur Klärschlammentsorgung sind. Dadurch erhalten die (UT-)Azubis auf ihren Anlagen/im Labor eigene Gestaltungsmöglichkeiten, indem sie z.B. neue effektive Reinigungs-, Aufbereitungs- oder auch Trocknungsvarianten den Begebenheiten vor Ort anpassen, um Phosphat im Klärschlamm anzureichern oder direkt aus dem Abwasserstrom zu fällen.

Fazit - : Die UT-Azubis bemängeln die zur Zeit noch vorherrschende Untätigkeit der Kläranlagenbetreiber. Die Phosphat-Rückgewinnung tritt aktuell weit hinter den Notstand bei der Klärschlamm Entsorgung zurück. Bedingt durch begrenzte oder nur unzureichende Lagerkapazitäten auf ihren Anlagen und die Stilllegung der landwirtschaftlichen Entsorgung sind die Betreiber vorrangig damit befasst, mit Transportunternehmen zu verhandeln, um ihre Klärschlämme in die Verbrennung fahren zu lassen. Auch sehen die Azubis für sich, bedingt durch ihre Stellung in der Angestelltenhierarchie auf den Anlagen, nur wenig Spielraum bei der Implementation neuer Verfahrensschritte, ganz besonders dann, wenn diese mit Ausgaben verbunden sind.

Einen Überblick über die berufsbildenden Schulen mit UT-Schwerpunktangeboten und UT-Ausbildungszentren nach Bundesländern findet sich im **Anhang A6** dieses Zwischenberichts. Die Liste ist nicht vollständig, sondern wird laufend ergänzt.

Abwassermeister, Anlagenbetreiber und ihre Interessensverbände

Auf verschiedenen Tagungen der beiden vergangenen Jahre, die sich mit der zunehmend angespannten Entsorgungslage der Kläranlagenbetreiber befassten, wurde deutlich, dass die Entsorgungsbranche erst sehr spät die Konsequenzen überblickt haben, die aus der geänderten Gesetzeslage resultieren. Nach Schließung der Entsorgungsrouten für Klärschlämme über die Landwirtschaft 2015 gibt es keinen lukrativen und sinnvollen Verwendungszweck mehr für diesen Rest-/Wertstoff. Auf den Anlagen, die über ausreichend Fläche verfügen, türmen sich aktuell Klärschlammberge. Weil sie vor Regen geschützt werden müssen, investieren viele Kommunen in den Hallenbau zur Errichtung von wetterfesten Zwischenlagern. Wer die nicht hat, schließt Kontrakte mit Fuhrunternehmern ab, um den Klärschlamm los zu werden. Die Fuhrunternehmer lagern entweder ein oder verbringen die Fracht in Mono-Verbrennungsanlagen, denn der zukünftige Entsorgungsweg für den Großteil des städtischen und kommunalen Klärschlammes wird die Verbrennung sein. Die (Mono)Verbrennungskapazitäten sind aktuell zwar noch begrenzt, aber in vielen Städten und Großgemeinden sind Genehmigungsverfahren zur Errichtung von Verbrennungsanlagen anhängig. Ab 2023 muss die Entsorgungsrouten für Klärschlämme formal geregelt und ab 2032 umgesetzt sein.

Erst zum Ende des P-Rückgewinnungsvorhabens bekommt es die gewünschte Dynamik. Nach Aussage der **hanseWasser**-Vertreter kam unser Schulungsangebot etwas zu früh! Die Dringlichkeit, die der Problematik der Klärschlamm Entsorgung und der P-Rückgewinnung innewohnt, haben die meisten Anlagenbetreiber und ihre Mitarbeiter erst im Verlauf des Jahres 2018 verstanden. Der DWA Nord, die Emscher Genossenschaft, der EGLV und verschiedene Betreibergesellschaften meldeten sich, um Veranstaltungen zu planen und zu organisieren. Eine erste Tagung fand im Rahmen der Meisterfortbildung am 29.11.2018 in Norden statt. Neben der Einführung in die Phosphatproblematik stehen für die Kläranlagenbetreiber fünf Probleme im Vordergrund:

- Wie wird die Flockung durchgeführt, wenn der Einsatz des Polymers verboten sein wird?
- Lohnt sich die P-Kristallisation onsite aus dem Abwasserstrom überhaupt?
- Wie kann der P-Gehalt im Klärschlamm weiter erhöht werden?
- Mit dem Feuchtegehalt von ca. 23 % pro Kilo wird immer noch 1/4 der Ladung aus Wasser bestehen?
- Was geschieht mit der Asche und wie soll sie wo aufbereitet werden?

Mit der DWA Nord (Hr. Hilmer) und der hanseWasser (Hr. Bernatzki, Hr. Oppermann) wurde Anfang Dezember ein Konzept für eine Schulungs- und Praktikumsveranstaltung für Kläranlagenbetreiber und Meister erstellt, das im Februar 2019 konkretisiert wurde. Im März und Mai 2019 finden Fachtage mit praktischem Anteil an der Universität Bremen in den Räumen und Labors der Chemiedidaktik von Prof. Eilks statt. Die Kosten übernehmen die DWA und hanseWasser, die Einladungen sind bei der DWA in Vorbereitung.

4.4 Unterstützer und Kooperationen mit Unternehmen der Ver- bzw. Entsorgungsbranche

Viel Unterstützung erfährt das Vorhaben von den Anwendern und Ver- bzw. Entsorgern der Branche, besonders sind hier Prof. Schmelz von der TU Duisburg/Essen und der Emscher Genossenschaft, Frau Mannebach von der BEW in Essen, Dr. Lenz von der VHS München und Herr Saathoff von der VHS Norden, die Herren Bernatzki, Oppermann und Fahsing von der Firma hanseWasser, Dr. Schnee und Frau Opitz von den Budenheimer Chemischen Fabriken, Dr. Frank von der Phosphor-Plattform und Dr. Hilmer von der DWA Nord zu nennen.

Eine Implementierung in die chemisch-(umwelt)technische Ausbildung, die über die Phosphor-Rückgewinnungs-Problematik informiert sind, hat begonnen. Durch die Unterstützung seitens Prof. Schmelz von der Emscher-Genossenschaft, der gleichzeitig für die Ausbildung der Umwelttechniker in NRW verantwortlich ist, haben wir einen wichtigen Fürsprecher gewinnen können. Durch seine Vermittlung gelang der Einstieg in die Ausbildung der Umwelttechnik im Rahmen der Blockschulung im Juli 2018 am BEW in Essen. Darüber kam auch der Kontakt zu den VHS in Norden und München zustande. Ferner bestehen erste Kontakte zu Ausbildungszentren in den Bundesländern Niedersachsen, Bayern und Baden-Württemberg. Herr Hellgermann aus Hildesheim ist verantwortlich für die niedersächsische Ausbildungsorganisation und gleichzeitig von behördlicher Seite Leiter der bundesweiten Ausbildungszentren. Schleswig-Holstein, Berlin und Rheinland-Pfalz haben erste positive Rückmeldungen gegeben – es geht also, wenn auch zäh, voran.

5. Ergebnisse und Öffentlichkeitsarbeit

5.1 Lehrerfortbildungen

Das Thema Phosphor-Rückgewinnung steht nicht im Fokus der Öffentlichkeit und ist im bundesweiten schulischen Curriculum nicht verankert. Umso wichtiger sind daher Lehrerfortbildungsveranstaltungen (LFB), um über die Problematik zu informieren und die experimentellen Möglichkeiten für den Unterricht in der Sek I der 9. und 10 Jahrgänge und besonders in den Oberstufen darzustellen. In Tabelle 9 sind die LFB-Veranstaltungen aufgeführt. Ebenfalls aufgeführt sind die Veranstaltungen für Anwender der Entsorgungsbranche.

Tabelle 9: Termine und Veranstaltungen für Multiplikatoren in der Übersicht

Datum	Veranstaltung	Ort	Beitrag	TN
7.3.18	Campus Bremen MINT-Fachtag	Bremen	Workshop/AS	9
7.5.18	Hr. Ralf Marks, Referendare	Bremen	Vortrag+ Praktikum/AS	14
9.5.18	Hr. Ralf Marks, Referendare	Bremen	Vortrag+ Praktikum/AS	17
14.05.2018	Fr. Johanna Dittmar, Referendare	Bremen	Vortrag+ Praktikum/AS	15
7.5.18	9. Netzwerktreffen PROFIL (Saarland)	Saarbrücken	Workshop/JH, IS	35
23.5.18	Digitale Schule (Fortbildungsreihe) der RedNET	Saarbrücken	Workshop/JH, IS	90
16.6.18	MINT-Digital Lehrerfortbildung Hamburg Joachim-Herz-Stiftung	Hamburg	Workshop/JH, IS	40
4.9.18	Lehrerfortbildung	Osnabrück	Vortrag/AS	14
8.11.18	Lehrerfortbildung	Osnabrück	Vortrag+ Praktikum/AS	12
12.11.18	VHS der Kath. Kirche Bad Oesede, Hr. Pott, angehende Landwirte	Georgsmarienhütte	Vortrag+ Praktikum/AS	33
19.11.18	MNU-Tagung	Bremerhaven	Vortrag/CZ, AS	15
20.11.18	Tag der Schülerlabore - Lehrerfortbildung	Saarbrücken	Workshop/JH, IS	60
29.11.18	VHS Norden, Hr. Saathoff, Kläranlagenmeister (Fortbildung)	Norden	Vortrag /AS	50
15.2.19	MNU Tagung Hamburg	Hamburg	Workshop/JH, IS	30
23.3.19	Fortbildung: Digitale Werkzeuge für den Naturwissenschaftlichen Unterricht	Weingarten	Workshop/JH, IS	50
28.3.19	DWA Nord Tagung	Hildesheim		20
28.5.19	Workshop Phosphor-Rückgewinnung in der praktischen Umsetzung	Bremen	AS, SZUT, DWA, hanseWasser	20

5.2 Veranstaltungen

Das Thema Phosphor-Rückgewinnung war und ist völlig neu und das Publikum an der Thematik sehr interessiert. Allerdings resultierten in den wenigsten Fällen daraus konkrete Terminabsprachen. Auch Materialanforderungen liefen im Nachgang nur sehr spärlich ein. Es braucht also noch weitere Anstrengungen, um das Thema Phosphor-Rückgewinnung in den Fokus der Öffentlichkeit zu rücken.

In Tabelle 10 sind die nationalen und internationalen Tagungen und Veranstaltungen aufgelistet, auf denen Prof. Johannes Huwer, Isabell Schmoll, Prof. Özcan Gulacar, Christian Zowada, Antje Siol und Prof. Eilks Vorträge gehalten haben:

Tabelle 10: Tagungsbeiträge in der Übersicht

Datum	Veranstaltung	Ort	Beitrag	TN
20.11.17	MNU-Tagung „Chemieunterricht in Marokko“	Bremerhaven	Vortrag/CZ, AS	25
März 18	Curtin University of Technology Chemistry Environment Sustainability - Inquiry learning for all students in a German cross-country educational initiative	Perth, AUS	Vortrag IE	30
23.5.18	Digitale Schule (Fortbildungsreihe der RedNET)	Saarbrücken	Vortrag/JH, IS	90
1.6.18	24 th Symposium on Chemistry & Science Education Bringing chemistry back to life and society	Bremen	Vortrag IE, OC	50
5.6.18	DBU Sommerakademie Phosphate und Phosphatrecycling als wichtiges Bildungsthema zwischen Chemie und Geographie	Kloster Drühbeck	Kurzvortrag/CZ	20
8.-9.7.18	BEW NRW P-Rück in der UT-Ausbildung	Essen	Vortrag+ Prakt./AS	20
Juli-Sept.	Universität von Sao Carlos, Brasilien: Studienaufenthalt von C. Zowada	Sao Carlos, BR Prof. V.G. Zuin	Vortrag CZ	20
30.8.18	GINT Tagung P-Rück in Schülerlabor & Schule	Oldenburg	Vortrag/AS	15
3.9.18	ECRICE Conference Phosphate recovery – applied environmental technology as a societal relevant context for chemistry education	Warschau, PL	Plenarvortrag IE	100
13.9.18	GDCh-Tagung 35. Fortbildungs- und Vortragstagung der FG Chemieunterricht	Karlsruhe	Vortrag+ Poster/CZ	30
13.9.18	GDCh-Tagung 35. Fortbildungs- und Vortragstagung der FG Chemieunterricht	Karlsruhe	Vortrag+ Poster JH, IS	30
17.9.18	Tagung der Fachgruppe nachhaltige Chemie	Aachen	Vortrag/JH	20
21.9.18	ACS Fall Meeting Phosphate recovery – applied environmental technology as a societal relevant context for chemistry education	Boston, USA	eingeladener Vortrag IE	30
12.11.18	Angehende Landwirte an der Johannes-Schlömann-Schule in Oesede	Georgsmarienhütte	Vortrag+ Praktikum/AS	33
19.11.18	MNU-Tagung Phosphat Rückgewinnung als Thema einer Diskussion um SDG, Anthropozän und planetary boundaries	Bremerhaven	Vortrag/CZ, IE	15
29.11.18	Meisterfortbildung Phosphat-Rückgewinnung in der Anwendung	Norden	Vortrag/AS	50
Dez. 18	Reforms in Science Teaching and Learning towards the 21st Century	Haifa, ISR	eingeladener Vortrag IE	15
21.2.19	Tag der Zukunft Fortbildung	Saarbrücken	Vortrag/JH	30
24.2.19	Digitale Innovation und Kompetenzen in der Lehrerbildung	Saarbrücken	Vortrag/JH	?
22.3.19	Chicago Symposium Series on Excellence in Teaching Mathematics and Science: Research and Practice	Chicago/US	Vortrag/IE	?
Juli 2019	IUPAC World Chemistry Congress	Paris/FR	Vortrag/IE	?

5.3 Publikationen

Um die verschiedenen Aspekte hinsichtlich praktischer Anwendung, didaktisch-methodischer Aufbereitung und digitaler Instrumente dieses Schülerlaborangebots darzustellen, sind Veröffentlichungen in nationalen wie internationalen Journals und Tagungsbänden platziert worden. Folgende Publikationen zum Thema sind bereits erschienen bzw. befinden sich in Begutachtung:

- 1 **Eilks, Ingo; Zowada, Christian; Siol, Antje; Huwer, Johannes; Hempelmann, Rolf** (2018): *Die Zukunft nachhaltig gestalten helfen – der Beitrag von Schülerlaboren*. In: LernortLabor (Hrsg.), MINT.nachhaltigkeitsbildung im Schülerlabor, Dänischenhagen: LernortLabor (2018); 142-149.
- 2 **Zowada, Christian; Siol, Antje; Huwer, Johannes; Hempelmann, Rolf; Eilks, Ingo** (2018): *Phosphor-Rückgewinnung - angewandte Umwelttechnik im Schülerlabor*. In: Lela-Magazin (2018), 17-18
- 3 **Gulacar, Ozcan; Zowada, Christian; Eilks, Ingo** (2018): *Bringing chemistry learning back to life and society*. In: I. Eilks, S. Markic & B. Ralle (eds.): Building bridges across disciplines for transformative education and sustainability, Aachen: Shaker (2018), 49-60
- 4 **Huwer, J., & Thyssen, C.** (2018). *Promotion of transformative education for sustainability with ICT in real-life contexts*. In I. Eilks, S. Markic, & B. Ralle (Eds.), *Building bridges across disciplines for transformative education and a sustainable future*. Aachen: Shaker. (angenommen, im Druck)
- 5 **Huwer, J.** (2018). *Forschendes Experimentieren im Schülerlabor NanoBioLab*. In R. Hempelmann (Ed.), *SaarLab – Verbund der Schülerlabore*. Saarbrücken. (angenommen, im Druck)
- 6 **Huwer, J., & Thyssen, C.** (2018). *Transformation of education for sustainability with ICT in real-life contexts*. *GDCh-Tagungsband Nachhaltige Chemie*. Frankfurt/Main.
- 7 **Huwer, J.** (2018): *Schülerlabore und Bildung in der digitalen Welt*. In R. Hempelmann (Ed.), *SaarLab – Verbund der Schülerlabore*. Saarbrücken. (angenommen, Im Druck)
- 8 **Zowada, Christian; Siol, Antje; Gulacar, Ozcan; Eilks, Ingo**: *Phosphatrückgewinnung – angewandte Umwelttechnik in Schule und Schülerlabor*. In: Chemkon (in Begutachtung).
- 9 **Zowada, Christian; Siol, Antje; Gulacar, Ozcan; Eilks, Ingo**: *Phosphate recovery as a topic for practical and transdisciplinary chemistry learning*. In: Journal of Chemical Education (2019) (in Begutachtung).
- 10 **Zowada, Christian; Gulacar, Ozcan; Siol, Antje; Eilks, Ingo**: *Wichtiger und transdisziplinärer als man denkt: Phosphor und die Phosphate*. In: NiU Chemie (2019) 170, 32-37.
- 11 **Zowada, Christian; Gulacar, Ozcan; Eilks, Ingo**: *Innovating Undergraduate General Chemistry by Integrating Sustainability-related Socio-scientific Issues*. In: ARISE Journal (2019), 1 (2); 3-8.
- 12 **Zowada, Christian; Gulacar, Ozcan; Siol, Antje; Eilks, Ingo**: *Phosphorus - a blind spot in teaching*. In: Daruna (eingeladener Beitrag).
- 13 **Zowada, Christian; Gulacar, Ozcan; Siol, Antje; Eilks, Ingo**: *Phosphorus – A “political” element for transdisciplinary chemistry education*. In: Chemistry Teacher International (2019) (eingereicht).
- 14 **Zowada, Christian; Niebert, Kai; Eilks, Ingo**: *Wenn nicht jetzt wann dann? – Nachhaltige Entwicklung und naturwissenschaftlicher Unterricht*. In: Naturwissenschaften im Unterricht Chemie (2019), eingereicht
- 15 **Zowada, Christian; Mönter, Leif; Eilks, Ingo**: *Über das Verhältnis des naturwissenschaftlichen Unterrichts zu Geographie und Nachhaltigkeit*. In: transfer Forschung <> Schule (2019), eingereicht
- 16 **Gulacar, Ozcan; Zowada, Christian; Eilks, Ingo**: *Integration of a Socio-Scientific Issue into the General Chemistry Curriculum: Examining the Effects on Student Motivation and Self-Efficacy*. in Vorbereitung

Um die anwendungsbezogene Leserschaft zu erreichen, sind zwei Beiträge/Aufsätze in den Fachzeitschriften “Vom Wasser” und “KA” gemeinsam mit der DWA Nord (Hr. Hilmer) und Vertretern der Bremer Firma “hanseWasser” (Hr. Bernatzki, Hr. Oppermann) in Vorbereitung.

5.4 Abgleich zu den erwarteten Erträgen

Als Ertrag des Vorhabens strebten wir an:

- Die Dokumentation von 3 Schülerlaborangeboten zur Bearbeitung von „Phosphor-Rückgewinnung“ für die Jahrgangsstufen der Sekundarstufe I (Klasse 9-10), Jahrgangsstufen der Sekundarstufe II (Klasse 11-13) sowie die Auszubildenden der chemisch-technischen Lehrberufe zum Chemielaboranten und Chemisch-technischen Assistenten CTA in einem universitären Schülerlabor mit begleitenden Angeboten zur Vor- und Nachbereitung, sowie zur Verbindung zu authentischer Forschung bzw. zur beruflichen Orientierung → liegt vor.
- Bereits während der Projektlaufzeit ist beabsichtigt, jedes Angebot mit mindestens vier Lerngruppen (davon jeweils mindestens eine zur Prüfung der Implementierbarkeit auch an einem anderen Standort – BEW Essen) durchzuführen → ist erfolgt.
- Ein dauerhaftes Angebot der drei entwickelten Schülerlaborangebote an beiden Standorten für den Abruf durch interessierte allgemein- und berufsbildenden Schulen und Ausbildungszentren. Die Bereitstellung des Angebots wird mindestens zwei Jahre über den Projektzeitraum hinaus von den beteiligten Universitäten sichergestellt → wird umgesetzt.
- Über die Homepage der beiden Schülerlabore werden die entwickelten Materialien, Konzepte und Erfahrungen interessierten Nutzern zur Verfügung gestellt → ist erfolgt.
- Durch Integration der Schülerlaborangebote in die Lehramtsausbildung werden Studierende für die Arbeit in und mit Schülerlaboren ausgebildet und lernen selber über Inhalte und Umsetzungsmöglichkeiten von Themen aus dem Bereich „Phosphor-Rückgewinnung“ → ist erfolgt.
- An beiden Standorten werden Lehrerfortbildungen zu „Phosphor-Rückgewinnung“ angeboten Für den Antragszeitraum werden je Standort mindestens zwei Fortbildungen veranstaltet. Die Fortbildungen stehen danach auf Abruf für interessierte Standorte, Ausbildungszentren oder Fachkollegien auch dezentral zur Verfügung → ist belegt.
- Wissenschaftlicher Ertrag im Sinne von 16 Publikationen in einschlägigen Lehrerzeitschriften und wissenschaftlichen Zeitschriften (z.B. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, *Chemie konkret - Praxis*, *Journal of Chemical Education* oder *Chemistry Education Research and Practice*), sowie durch 19 Präsentationen auf Fachtagungen und 16 Lehrerkongressen, etwa der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh - FG Chemieunterricht), der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDChP) oder den regionalen Tagungen des Vereins zur Förderung des Mathematischen und Naturwissenschaftlichen Unterrichts (MNU). 8 Qualifizierungsarbeiten wurden erfolgreich abgeschlossen. → ist belegt.

6. Fazit

Die Zusammenarbeit innerhalb der aufzubauenden Netzwerke war angenehm und pragmatisch. Die Entwicklungsarbeiten im Labor sind abgeschlossen. Mit der Konzeption einer „Lernfirma“ wurde eine didaktische Methode gefunden, die von Lehramtsstudierenden, Schülerinnen und Schülern sowie Auszubildenden durchweg positiv aufgenommen wird. Als digitale Tools wurden ein Multitouch Learning Book und eine LCA-Sankey-Applikation entwickelt, die sowohl die PREZI-Einführung in das Thema als auch die Arbeiten im Labor sinnvoll ergänzen.

Die in beiden beteiligten Schülerlaboren bisher bewährte Methode, curriculare Schülerlaborangebote zu entwickeln, zu implementieren und anschließend erfolgreich den Lerngruppen der allgemeinbildenden Schulen und Gymnasien innerhalb ihrer Netzwerke anzubieten, griff bei dieser Thematik nur unzureichend. Um (schulische) Teilnehmer für dieses Schülerlaborangebot zu interessieren, wurden daher zwei neue Strategien verfolgt: 1. Lehrkräfte über digitale Medien erreichen und 2. gezielt Anwender sowie UT-Ausbildungszentren und UT-Berufsschulen gewinnen.

Zu 1.: Prof. Huwer bietet LFB für Studierende, Referendare und Lehrkräfte zum Einsatz digitaler Medien an, in denen ein von Isabel Schmoll und Johannes Huwer entwickeltes Multitouch Learning Book vorgestellt wurde. Dies war das Vehikel zur Verbreitung des Themas „P-Rückgewinnung“ als ein anwendungsbezogenes Beispiel von MLBs. Im NanoBioLab im Saarland und an der PH Weingarten wurden dazu drei Verfahren implementiert und umgesetzt. Parallel steht jetzt das Thema „Phosphor/Phosphat“ für das Saarland und in Baden-Württemberg im schulischen Curriculum.

Zu 2.: Soweit ist es in Norddeutschland leider noch nicht gekommen. Das Interesse am Thema ist in der Lehrerschaft zwar da, es gibt aber nach wie vor keine curriculare Verpflichtung, das Thema „Phosphor/Phosphat“ anzugehen. Frau Siol konzentrierte sich deshalb auf die überregionale Akquise von Berufsschulen mit UT-Ausbildungsangeboten und UT-Ausbildungszentren. Erste Anwenderkurse mit Azubis, Ausbildern und Klärwerksangestellten haben stattgefunden, weitere sind in Vorbereitung.

Nach wie vor viel Unterstützung erfährt das Vorhaben von einigen Anwendern und Ver- bzw. Entsorgern der Branche. Besonders sind Prof. Schmelz von der Emscher Genossenschaft und Frau Mannebach von der BEW, die Herren Bernatzki, Oppermann und Fahsing von der Firma hanseWasser, Dr. Schnee und Frau Opitz von den Budenheimer Chemischen Werken, Dr. Frank von der Phosphor-Plattform und Dr. Hilmer von der DWA Nord zu nennen.

Auf 19 nationalen und internationalen Tagungsveranstaltungen wurden Vorträge zum Thema „Phosphor-Rückgewinnung“ gehalten. Die Materialien - hauptsächlich die PREZI - sind nach Russland, Australien, Polen und in die USA versendet worden. In Brasilien wurde das Thema in einem Vortrag von Christian Zowada vorgestellt. In vier Publikationen wurde das Projekt mit den technischen Verfahren, der Lernumgebung sowie ersten Ergebnissen vorgestellt, weitere werden folgen.

Danksagung:

Wir danken der DBU vertreten durch Frau Dipl.-Biol. Ulrike Peters für die finanzielle Unterstützung und das stete Interesse am Fortgang unserer Arbeit.

7. Literatur

- [1] **European Commission.** *Study on the review of the list of Critical Raw Materials – Criticality Assessments.* publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/08fdab5f-9766-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en (access. Sep 2018).
- [2] **BMBF/UBA Phosphorrückgewinnung** - Aktueller Stand von Technologien / Einsatzmöglichkeiten und Kosten. Tagungspräsentationen 9. Oktober 2013, abgerufen am 14.7.2016
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/einfuehrung_phosphorrueckgewinnung.pdf
- [3] **UBA Texte 49/ 2014:** „Monitoring von Klärschlammmonoverbrennungsaschen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zur Ermittlung ihrer Rohstoffrückgewinnungspotentiale und zur Erstellung von Referenzmaterial für die Überwachungsanalytik“.
- [4] **Montag, D.; Bastian, D.; Pinnekamp, J.** (2016): *Gutachten zur Umsetzung einer Phosphorrückgewinnung in Hessen aus dem Abwasser, dem Klärschlamm bzw. der Klärschlammmasche.* Gerichtet an das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, HAD-Referenz-Nummer: 4824/8
- [5] **Montag, D., Everding, W., Malms, S., Pinnekamp, J., Reinhardt, J., Fehrenbach, H., Arnold, U., Trimborn, M., Goldbach, H., Klett, W., Lammers, T.** (2015) „Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphorrückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz“ Texte 98/2015 Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit Forschungskennzahl 3713 26 301 UBA-FB 002120
- [6] **Rott, E., Minke, R., Steinmetz, H.** (2016): *Phosphonate als Bestandteil der gelösten organischen und partikulären Phosphorfraktion in Kläranlagen.* Wasser und Abfall 5, 21-27
- [7] **Statistischer Monatsbericht: Entwicklung des Inlandsabsatzes von Düngemitteln, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz,** Berlin, Dezember **2010.**
- [8] **Harbs, M.:** *Pressemitteilung Nr. 490 vom 30.12.2010,* Statistisches Bundesamt BRD, Wiesbaden **2010.**
- [9] **Sabelfeld, M., Geißen, S.-U.** (2011): *Verfahren zur Eliminierung und Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser.* Chemie Ingenieur Technik 2011, 83, No. 6, 782–795
- [10] **Wendenburg, H.,** Bonn (BMU) *Eckpunkte für rechtliche Rahmenbedingungen zum Recycling von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm* auf der Veranstaltung des BMBF/UBA 9. Oktober 2013
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/einfuehrung_phosphorrueckgewinnung.pdf abgerufen am 14.7.2016
- [11] **BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.,** Berlin www.bdew.de Stellungnahme des BDEW zur *Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung* (Stand 31. August 2015)
[https://www.bdew.de/internet.nsf/id/6477D68488B1B186C1257EF300419063/\\$file/151029_BDEW_Stellungnahme](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/6477D68488B1B186C1257EF300419063/$file/151029_BDEW_Stellungnahme) abgerufen am 14.7.2016
- [12] **Kabbe, C:** *Overview of phosphorus recovery from the wastewater stream facilities operating or under construction* (©/March 2018)
- [13] **DPP Deutsche Phosphor Plattform** <http://www.deutsche-phosphor-plattform.de/> abgerufen am 16.02.2019
- [14] **Ludwig, H.** (2009): *Rückgewinnung von Phosphor aus der Abwassereinigung. Eine Bestandsaufnahme.* Umwelt-Wissen Nr. 0929. Bundesamt für Umwelt, Bern. www.umwelt-schweiz.ch/uw-0929-d
- [15] **Ostara Nutrient Recovery Technologies Inc.** | <http://ostara.com/about/> abgerufen am 26.09.2016
- [16] **Giesen, A.** (2002) *The Crystalactor – Abwasserbehandlung mittels Kristallisation ohne Abfälle,* DHV Water BV, Amersfoort
- [17] **Steinmetz, H.** (2015): *Phosphorrückgewinnung aus kommunalem Abwasser. Wo stehen wir heute?* Phosphor-Kongress, http://www.prueck-bw.de/pulsepro/data/files/7.%20Steinmetz_klein.pdf, Stuttgart
- [18] **Dr. Schnee, Frau Opitz:** Chemische Fabrik Budenheim KG. <https://www.budenheim.com/de/>
Innovative process for the Recovery of phosphorus from sewage sludge.
www.budenheim.com/fileadmin/user_upload/Downloads/article/ExtraPhos_EN_2016-07-07.pdf (access. Mar 2018).
- [19] <https://eu-recycling.com/Archive/15626>
- [20] https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/buehler_bsh_leachphos.pdf
- [21] <https://www.remondis-aqua.de/aq/aktuelles/neue-verfahren/>
- [22] <https://www.remondis-aktuell.de/032014/wasser/phoenix-aus-der-asche/>
- [23] **Siege, H., Schreiber, J.-R.** (2015): *Orientierungsrahmen für den Lernbereich Globale Entwicklung im Rahmen einer Bildung für nachhaltige Entwicklung.* Ergebnis des gemeinsamen Projekts der Kultusministerkonferenz (KMK) und des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ)

- [24] **Witteck, T.; Eilks, I.** (2005). *Die Max Sauer GmbH – Eine Lernfirma zu Säuren und Basen*. NiUCh 16, 88/89. S. 51-56.
- [25] Düngung mit Phosphat, Kali, Magnesium, **Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen**, März 2015
<https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/pdf/phosphat-kalium-magnesium-pdf>
- [26] **MColorTest™ Firma VWR Merck** <https://de.vwr.com/store/product/794920/schnelltests-phosphat-test-mcolortest>
- [27] **Rahmenlehrplan** für den Ausbildungsberuf ChemielaborantIn (Beschluss d. Kultusministerkonferenz i.d.F. vom 18.03.2005) <http://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/Bildung/BeruflicheBildung/rlp/Chemielaborant00-01-13idF05-03-18.pdf> [28]
- VDC Verband Deutscher Chemotechniker u. Chemisch-technischer Assistenten e.V., Stuttgart**
info@vdc-cta.de und <http://www.vdc-cta.de/index.html>
- [29] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/259542/umfrage/beschaeftigtenzah-der-abwasserentsorgung-in-deutschland/>
- [30] https://prezi.com/xub8jinosxtp/phosphat/?utm_campaign=share&utm_medium=copy
- [31] <http://www.digitale-medien.schule/phosphat%c3%bcckgewinnung.html>
- [32] **Krause, M. & Eilks, I.** (2014). *Innovating chemistry learning with PREZI*. Chemistry in Action, 104 (Winter), 19-25.
- [33] **Zowada, C. & Eilks, I.** (2017). *Fracking: ein kontroverses Thema für den fächerübergreifenden Chemieunterricht multimedial umgesetzt*. MNU Journal, in press
- [34] **Krause, M.; Eilks, I.**(2014): *Lernwege mit PREZI modern gestalten - Beispiele zum Teilchenkonzept*. In: Maxton-Küchenmeister & Meßinger-Koppelt (Hrsg.), *Digitale Medien im naturwissenschaftlichen Unterricht.*, Hamburg: Joachim Hertz-Stiftung Verlag (2014), 209-215
- [35] **Krause, M.; Osterseht, D.; Engelke, T.; Eilks, I.** (2015): *Den Selbstreinigungseffekt von Pflanzen entdecken. Eine multimediale Lernumgebung mit Elementen des forschenden Lernens*. In: Praxis der Naturwissenschaften Biologie in der Schule. 64(8) (2015), 23-25
- [36] **Zowada, C.; Eilks, I.** (2018): *Fracking: ein kontroverses Thema für den fächerübergreifenden Chemieunterricht multimedial umgesetzt*. MNU Journal, 2018(4) (2018), 246-252
- [37] **Bender, C. und Bull, H. C.** (2011): *Using Prezi to motivate Middle School Science Students*. In: i-manager's Journal on School Educational Technology, 7 (3), S. 10-21.
- [38] **Zowada, C.; Gulacar, O., Eilks, I.** (2018): *Incorporating a web-based hydraulic fracturing module in general chemistry as a socio-scientific issue that engages students*. J. Chem. Edu., 95 (2018), 553-559
- [39] **Hoeg, H., DiGiacomo, A., El Halwany, S., Kirstovic, M., Phillips-MacNeil, C., Milanovic, M., Nishizawa, T., Zouda, M., Bencze, L.** (2017): *Science for Citizenship: Using Prezi™ for Education About Socio-scientific Issues*. In: Bencze, L. (Ed.): *Science and Technology Education Promoting Wellbeing for Individuals, Societies and Environments*. Springer International Publishing. S. 359-380.
- [40] **Prezi Inc.** 2017 <https://prezi.com/de/>
- [41] **Ulrich, N.; Huwer, J.** (2017): *Digitale (Schul-)Bücher – Vom E-Book zum Multitouch Learning Book*. In S. Schanze, J. Groß, J. Meßinger-Koppelt, & J. Maxton-Küchenmeister (Eds.), *Fachdidaktische Forschung zum Umgang mit digitalen Werkzeugen zur Unterstützung von Lernprozessen im naturwissenschaftlichen Unterricht* Hamburg. (pp. 63-71)
- [42] **Huwer, J.; Eilks, I.** (2017): *Multitouch Learning Books für schulische und außerschulische Bildung*. eds. (pp. 81-94)
- [43] **Huwer, J.; Bock, A.; Seibert, J.** (2018): *The School Book 4.0: The Multitouch Learning Book as a Learning Companion*. Am. J. of Educational Research, 6(6),763-772. doi:10.12691/education-6-6-27
- [44] **Martinez Blanco, J., Finkbeiner, M., Inaba, A.** (2015): *SETAC/UNEP Guidance on Organizational LCA* http://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2015/04/o-lca_24.4.15-web.pdf (ISBN: 978-92-807-3453-9)
- [45] <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/oekobilanz>
- [46] **Zuin, V. G.** (2016): *Circularity in green chemical products, processes & services: Innovative routes based on integrated eco-design & solution systems*. Current Opinion in Green&Sustainable Chem., 2, 40-44
- [47] Joachim Herz Stiftung: Plattform <http://www.digitale-medien.schule/lernumgebungen.html>

Gesetze, die bei der Rückgewinnung von Phosphor/Phosphat relevant sind

Auf EU-Ebene:

[lex1] WRRL Richtlinie 2000/60/EG seit 1997

zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=LEGISSUM:I28002b> [https://de.wikipedia.org/wiki/Richtlinie_2000/60/EG_\(Wasserrahmenrichtlinie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Richtlinie_2000/60/EG_(Wasserrahmenrichtlinie))

[lex2] Richtlinie RL 91/271/EWG (EU-RL, 2003)

Maßgebend für die Behandlung von kommunalem Abwasser auf europäischer Ebene

https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewasser/kommunalabwasserrichtlinie_91_271_ewg_bf.pdf

auf Bundesebene:

[lex3] Oberflächengewässerverordnung (OGewV, 20.6.2016) https://www.gesetze-im-internet.de/ogewv_2016/OGewV.pdf

[lex4] Abwasserabgabengesetz (Aufnahme der Parameter Stickstoff und Phosphor)

[lex5] Abwasserverwaltungsvorschrift

[lex6] Wasch- und Reinigungsmittelgesetz (WRMG) vom 1.1.1987

[lex7] Düngemittelverordnung (DüMV) Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV) mit Änderung Stand 27.Mai 2015 (BGBl. I S. 886) https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/d_mv_2012/gesamt.pdf abgerufen am 16.2.2019

[lex7] Dünge-Verordnung vom 2.7.2017 regelt u.a.:

[lex9] Klärschlamm-Verordnung (AbfKlärV) mit Änderung Stand 03.Oktober 2017 (BGBl. I S. 1474) https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/abfkl_rv_1992/gesamt.pdf und https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/AbfKl%C3%A4rV.pdf

8. Abbildungen und Tabellen

Abbildungsübersicht

Abb. 1:	<i>Übersicht der Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung (Stand 2018)</i>	9
Abb. 2:	<i>Phosphat-Konzentrationen in der Phosphor-Rückgewinnung</i>	10
Abb. 3:	Versuchsvorschriften	14
Abb. 4:	Aufbau der Lernumgebung	18
Abb. 5:	Exemplarische Buchseite im Multitouch Learning Book	19
Abb. 6:	Auszüge aus dem Multitouch Learning Book	20

Tabellenübersicht

Tab.1:	<i>Charakterisierung der Einsatzstellen zur Phosphor-Rückgewinnung in kommunalen Kläranlage</i>	9
Tab. 2:	<i>Das Schülerlaborangebot zur Phosphor-Rückgewinnung umfasst drei Bausteine</i>	15
Tab. 3:	<i>Phosphor/Phosphat-Rückgewinnung - Konzept für ein umwelttechnisches-Praktikum</i>	16
Tab. 4:	<i>Adressatengerechte Konzeption der Schülerlaborangebote „Phosphor-Rückgewinnung“</i>	17
Tab. 5:	<i>Materialübersicht „Phosphor-Rückgewinnung“</i>	22
Tab. 6:	<i>Teilnehmerzahlen (Stand Februar 2019)</i>	23
Tab. 7:	<i>Phosphor-Rückgewinnung: Abgleich Methoden und Lehr-Lern-Inhalte</i>	24
Tab. 8:	<i>Curriculare Anknüpfungspunkte das Thema Phosphor/Phosphat-Rückgewinnung</i>	25
Tab. 9:	<i>Termine und Veranstaltungen für Multiplikatoren in der Übersicht</i>	30
Tab. 10:	<i>Tagungsbeiträge in der Übersicht</i>	31

9. Anhang



„Phosphor-Rückgewinnung: angewandte Umwelttechnik im Schülerlabor“

Ein Projekt zur Entwicklung und Implementation von Lehr- und Lernmaterialien für ein wichtiges
Thema der Nachhaltigkeitsdebatte

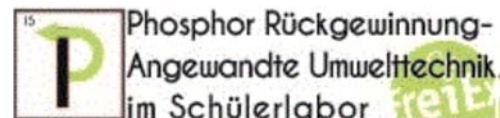
Aktenzeichen der DBU: 33729

Abschlussbericht - Anhang

Förderzeitraum 16. November 2016 – 15. Februar 2019



9. Anhang zum Abschlussbericht DBU Az. 33729



1. Abschlussbericht

2. Zwischenberichte

- 2.1 Zwischenbericht Nr. 1
- 2.2 Zwischenbericht Nr. 2
- 2.3 Zwischenbericht Nr. 3
- 2.4 Zwischenbericht Nr. 4

3 Material komplett

3.0 Materialübersicht tabellarisch

3.1 Abt. 00 VORBEREITUNG

- 3.1.1 Info für Multiplikatoren und Lab-Staff (I – VI)
- 3.1.2 Standard Operation Procedures SOPs (0 - 9)
- 3.1.3 Digitale Tools (Prezi, MLB, Sankey-Applikation) (digital auf CD-Rom)

3.2 Abt. 1 QUANTITATIV (digital auf CD-Rom)

S 17 – 01 bis S 17 - 06

3.3 Abt. 2 QUALITATIV (digital auf CD-Rom)

S 18 – 01 bis S 18 - 08

3.4 Abt. 3 PFLANZENWACHSTUM (digital auf CD-Rom)

S 19 – 01 bis S 19 - 03

3.5 Abt. 4 VERFAHREN (digital auf CD-Rom)

S 20 – 01 bis S 20 – 03 Sek. I

S 20 – 04 Sek. II

S 20 – 01 bis S 20 – 04 AZUBI-Variante

4. Öffentlichkeitsarbeit

- 4.1 Screen Shots der Projekt-Websites
- 4.2 Logo
- 4.3 Flyer
- 4.4 Poster div.
- 4.5 Pressemeldung Universität Bremen
- 4.6 Vorträge und Tagungsbeiträge (tabellarisch)
- 4.7 Publikationen

5. Statistik

- 5.1 Lehrerfortbildungen
- 5.2 Veranstaltungen im Bremer „FreiEx“
- 5.3 Veranstaltungen im Saarbrücker „NanoBioLab“
- 5.4 Kontaktdaten Berufsschulzentren und UT-Ausbildungszentren

Anmerkung: Aufgrund des umfangreichen Materials wurde auf die Erstellung einer vollständigen Druckversion verzichtet. Gebunden wurde ein Extrakt der wichtigsten Informationen sowie das komplette Auswertungsheft **Vd**, in dem alle Experimente und Materialien der Abt. 1-4 enthalten sind. Das vollständige Schülerlaborangebot zur „Phosphor-Rückgewinnung“ befindet sich digital auf der beliegenden CD-Rom und ist über die Websites der beteiligten Schülerlabore „FreiEx“ und „iChemLab“ jederzeit abrufbar.

3. Komplette Materialiensammlung zum Schülerlaborangebot „Phosphor-Rückgewinnung“ 3. Materialübersicht

PHOSPHOR-RÜCKGEWINNUNG IM SCHÜLERLABOR

Ifd. Nr.	Inhalt
Info	Abt. 00 VORBEREITUNG für Multiplikatoren und Lab-Staff
I	Lehrerhandbuch
II	Auswahlhilfe
III a	Titelblätter für Kennzeichnung der Stationen Abt. 1
III b	Titelblätter für Kennzeichnung der Stationen Abt. 2
III c	Titelblätter für Kennzeichnung der Stationen Abt. 3
III d	Titelblätter für Kennzeichnung der Stationen Abt. 4
III e	Titelblätter für Kennzeichnung der Stationen gesamt
IV	Präsentation zur Einführung ins Schülerlabor
V a	Auswertungsheft für Sek.I
V b	Auswertungsheft für Sek.II
V c	Auswertungsheft für MINT- & UT-Azubis
V d	Auswertungsheft vollständig
VI	Deutsche Phosphor Plattform DPP - Verfahrenskennblätter

SOP-Nr.	Standard Operation Procedures
0	Methodenübersicht
1	Modellklärschlamm
2	Modellklärschlammmasche
3	Stammlösung & Testlösungen
4	Versuche, Geräte, Chemikalien
5	Chemikalienkataster, Etiketten
6	Sicherheit & MSDS
7	Phosphoranalysetool MColor von Merck/VWR
8	Herstellung von Modell-KS für Studi & MINT-Azubis
9	div. Geräte manuals (pH-Checker, SodaMaxx etc)

	Digitale Tools
PREZITM	PREZITM Einführung in das Thema Phosphor-Rückgewinnung
MLB	Multitouch Learning Book als digitaler Lernbegleiter im Labor
Applikation	Sankey zur Bewertung der Stoffströme in den Verfahren

www.uni-bremen.de/freieix/

<http://chemie.ph-weingarten.de/forschung/projekte/projekte-archiv/>

Ifd. Nr.	Inhalt	Dauer	geeignet für...			
			Sek. I	Sek. II	Azubis	Multiplikatoren
Abt. 1 QUANTITATIV						
S 17-01	Phosphatsteststäbchen Aqua Check von Hach	5 min	x	x		x
S 17-02	Nachweis mit Mcolor test von Merck/VWR, kolorimetrisch	5 min	x	x	x	x
S 17-03	Phosphorsäure Titration			x	x	x
S 17-04	Pocket Colorimeter II von Hach, Küvettentest LCK 348-350, kolorimetrisch	15 min			x	x
S 17-05	Phosphat Bestimmung nach DIN 6878, photometrisch	1 h			x	x
S 17-06	pH-Wert Bestimmung	5 min	x	x	x	x
Abt. 2 QUALITATIV						
S 18-01	Chem.-phys. Abwasserbehandlung (Flockung)	15 min	x	x	x	x
S 18-02	Phosphatnachweis im Boden	15 min		x	x	x
S 18-03	Phosphatnachweis in Pflanzenasche	15 min	x	x		
AZUBI S 18-03	Phosphatnachweis in Pflanzenasche	15 min			x	x
S 18-04	Kristallisation MAP Mikroskop	15 min		x	x	x
S 18-05	Kristallisation Zirkonylphosphat Mikroskop	15 min			x	x
S 18-06	Kristallisation Ammoniummolybdat Mikroskop	15 min			x	x
S 18-07	Klärschlamm reinigen	15 min				
AZUBI S 18-08	Im Klärwerk	15 min			x	x
Abt. 3 WACHSTUMSVERSUCHE						
S 19-01	S 19-01 Pflanzenwachstumstest Kresse	15 min	x	x	x	x
S 19-02	S 19-02 Pflanzenwachstumstest Bohnen	15 min	x	x	x	x
AZUBI S 19-03	Calciumlaktat-Extraktion	45 min			x	x
Abt. 4 VERFAHREN						
EINFACH: GRUNDLAGEN Schülervariante Sek. I (ohne Klärschlamm & ohne Nutsche)						
S 20-01 Sek.I	Budenheim CO2	45 min	x	x		x
S 20-02 Sek.I	Stuttgarter Verfahren	45 min	x	x		x
S 20-03 Sek.I	PEARL	45 min	x	x		x
MITTEL: ERWEITERUNG Sek. II mit Modell-Klärschlammmasche						
S 20-04 Sek.II	TetraPhos/LEACHPHOS	45 min		x		x
SCHWER: ERWEITERUNG Sek. II, Studenten- & Azubivariante						
S 20-01 Azubis	Budenheim CO2	60 min			x	x
S 20-02 Azubis	Stuttgarter Verfahren	60 min			x	x
S 20-03 Azubis	PEARL	60 min			x	x
S 20-04 Azubis	TetraPhos/LEACHPHOS	60 min			x	x