

Erkenntnisse aus 8 Jahren interdisziplinärer Forschung des Leibniz-WissenschaftsCampus Phosphorforschung Rostock (P-Campus)

Förderzeitraum der Graduiertenschule Phase 1 des P-Campus:

April 2015 bis Juni 2019

Förderzeitraum der Graduiertenschule Phase 2 des P-Campus:

Juni 2019 bis November 2023

Berichtszeitraum: April 2015 bis März 2023

Verfasser: Dr. D. Zimmer, Prof. U. Bathmann

Weitere Co-Autorinnen und -Autoren sind die Projektverantwortlichen bzw. Promovierenden der geförderten Projekte (siehe Anhang).

zur [Webseite des P-Campus](#)



Inhaltsverzeichnis

Kapitel	Seite
(1) Ziele des P-Campus, Zusammenfassung und Ausblick	1
(2) Ausgewählte Projektergebnisse des P-Campus der ersten und zweiten Förderphase	9
(3) Zusammenarbeit zwischen den Partnern und internationale Sichtbarkeit	19
(4) Ausblick: Die Zukunft des P-Campus nach 2023	21
Anhang:	
Liste der Promotions- und Anschubprojekte von 2015 bis 2023	A1
Liste der abgeschlossenen Dissertationen	A7
Liste der Publikationen in Kapitel 2	A8

Abkürzungen der Partner-Einrichtungen

AUF	Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
FBN	Forschungsinstitut für Nutztierbiologie, Dummerstorf
INP	Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie, Greifswald
IOW	Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde
IPK	Leibniz-Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung. Teilsammlungen Nord, Groß Lüsewitz
LIKAT	Leibniz-Institut für Katalyse, Rostock
MNF	Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät
P-Campus	Leibniz-WissenschaftsCampus Phosphorforschung Rostock
UR	Universität Rostock
UMR	Universitätsmedizin Rostock

(1) Ziele des P-Campus, Zusammenfassung und Ausblick

Leibniz-WissenschaftsCampi sind eine Initiative der Leibniz-Gemeinschaft und ermöglichen eine thematisch fokussierte interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Leibniz-Einrichtungen und Hochschulen. Im **P-Campus** forschen etwa 100 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus vier Leibniz-Instituten, dem Forschungsinstitut für Nutztierbiologie und der Universität Rostock interdisziplinär für ein nachhaltigeres P-Management, denn **Phosphor (P) ist ein lebensnotwendiges Element und wird derzeit nicht suffizient und effizient genutzt, was erhebliche Umweltprobleme verursacht.**



Abb. 1 Vier Leibniz-Institute, das Forschungsinstitut für Nutztierbiologie und die Universität Rostock vernetzen sich im P-Campus.

Mit den Mitteln der Leibniz-Gemeinschaft wurden im P-Campus vor allem **Promotionsprojekte** gefördert, darüber hinaus kleine Projekte von P-Campus Mitgliedern in Form von **Risiko- oder Anschubprojekten**. Darüber hinaus haben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des P-Campus in wesentlichem Umfang weitere Drittmittelförderungen eingeworben. Der P-Campus wurde in zwei Phasen gefördert: In der Förderphase 1 insgesamt 11 Promotions- und 16 Anschubprojekte und in der Förderphase 2 insgesamt 15 Promotions- und 17 Anschubprojekte.

Die Erkenntnisse aus den Promotions- und Anschubprojekten aber auch die Ergebnisse aus den thematisch angegliederten und zusätzlich eingeworbenen Drittmittelprojekten der ersten Förderphase bildeten die Grundlage für die weitere Forschung und die Projekte der zweiten Förderphase. In beiden Förderphasen war und ist die Graduiertenschule und damit die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses der Kern des P-Campus. Durch die Ansiedelung der Dissertationen als Kooperationsprojekte zwischen den Leibniz-Instituten einerseits und der Universität Rostock andererseits, wurden eine starke Vernetzung und ein interdisziplinäres Arbeitsumfeld mit einem breit gefächerten Programm für die Nachwuchsforschenden geschaffen.

Von 2015 bis 2019, während der **ersten Förderphase**, lag der Fokus auf den drei Forschungsclustern „I. P-Kreisläufe und -flüsse in der Umwelt“, „II. Effizienz und Suffizienz der P-Nutzung, P-Recycling“ und „III. P als Element in und aus katalytischen Verfahren“ sowie dem Querschnittsthema „Fortschrittsbestimmende Analysenmethoden“. Alle 11 geförderten Promotionsprojekte der P-Campus-Graduiertenschule I (PGS 1) wurden abgeschlossen. Davon mündeten 7 Projekte in erfolgreiche Dissertationen und für 2 weitere Projekte ist dies in Bearbeitung.

Für die **zweite Förderphase** ab 2019 wurden die Forschungsschwerpunkte um das zusätzliche Forschungscluster „IV. P in der molekularen Biologie“ und das Querschnittsthema V. „P-Governance“ erweitert (Abb. 2). Das vorherige Querschnittsthema der ersten Förderphase wurde in die bestehenden Forschungscluster intergiert.



Abb. 2 Die 15 Promotionsprojekte der zweiten Förderphase in Stichworten und Bild, blaue Waben = Projekte in Cluster I. „P in der Umwelt“, grüne Waben = Projekte in Cluster II. „P-Effizienz und -Suffizienz“, gelbe Waben = Projekte in Cluster III. „P in der Katalyse und Synthese“, graue Waben = Projekte in Cluster IV: „P in der molekularen Biologie“, rote Wabe = Projekt im Querschnittsthema V. „P-Governance“

Von den in der P-Campus-Graduiertenschule II (PGS2) geförderten 15 Promotionsprojekten wurden 8 abgeschlossen; von diesen Projekten wurden bereits zwei Dissertationen erfolgreich beendet. Es sind elf weitere Dissertationen für 2023 bzw. das kommende Jahr geplant. Im Anhang befindet sich eine Übersicht über alle in der PGS1 und PGS2 geförderten Promotions- und Anschubprojekte sowie die bislang abgeschlossenen Dissertationen.

Im Folgenden werden Erkenntnisse der beiden Förderphasen zusammengefasst.

Phosphorformen in Böden und Sedimenten - Phosphortransport und -transformation von terrestrischen Böden bis in die Ostsee

Um die **Herkunft, Bioverfügbarkeit, Umsetzung** und den **Verbleib** von P-Verbindungen in Gewässern abzuschätzen, wurden in mehreren Promotions- und Anschubprojekten in Boden-, Wasser- und Sedimentproben (Warnow und Ostsee) nasschemisch neben Gesamt-P auch Phosphat und weitere **P-Fraktio-**

nen bestimmt. Außerdem wurden mittels P-XANES und ^{31}P -NMR die anorganischen und organischen Phosphatverbindungen auch spektroskopisch bestimmt. Die in Böden dominierenden Fe-P-Verbindungen werden während des erosionsbedingten, jahreszeitlich, witterungsbedingt und landnutzungsbedingt stark schwankenden Transports und folgend in der Wasserphase mikrobiell umgebaut. Die Anteile an labilen, leichter bioverfügbaren P-Formen verringern sich und stabilere P-Formen nehmen relativ zu. Von den Sedimentationszonen in küstennahen Feuchtgebieten bis zu den tieferen Sedimenten der Ostsee nimmt der Anteil der stabilen P-Verbindungen zu und es kommt so zu einer Verschiebung von Fe-P-Verbindungen hin zu Ca-P-Verbindungen. Parallel nimmt durch die mikrobiell bedingten Abbauprozesse die Variabilität der organischen P-Verbindungen von terrestrischen Böden zu den tiefen Sedimenten der Ostsee ab.

Um die von der HELCOM geforderte Verringerung der jährlichen P-Frachten in die Ostsee zu erreichen, müsste die **P-Retention** der Warnow und ihrer Zuflüsse sowohl land- als auch wasserseitig erhöht werden. Natürliche und konstruierte küstennahe Feuchtgebiete bieten sich zur weiteren Retention und Stabilisierung der P-Verbindungen ebenfalls an. Einen signifikanten Beitrag zur Erosionsverminderung von (P-haltigen) Bodenteilchen, zur Ansiedlung höherer Pflanzen und damit zum Dünenerhalt, leisten **biologische Bodenkrusten**. In den Sanddünen der Ostsee trägt diese Pioniergemeinschaften durch ihre Nährstoffakkumulation und Stabilisierung der Bodenoberfläche zum Küstenschutz bei.

Analytik organischer P-Verbindungen - Nachweis von Glyphosat in der Ostsee

Es gelang erstmals der **analytische Nachweis des Breitbandherbizides Glyphosat in der Ostsee** bzw. in Seewasser und damit der Nachweis, dass Glyphosat in die marine Umwelt transportiert wird. Die methodische Herausforderung dafür lag im Zusammenspiel zwischen den chemischen Eigenschaften des Glyphosates und den Salzen des Seewassers, welche die Analytik von Glyphosat erschwerten. Im Rahmen der Arbeiten im P-Campus wurden Techniken zur Reduzierung der Salzmatrix von Seewasser durch z. B. Elektrodialyse einerseits getestet und die Eignung glyphosatspezifischer Festphasen für die Anwendung mit Seewasser andererseits untersucht. Basierend auf den Ergebnissen konnten Protokolle für die Bestimmung von Glyphosat in Küsten- und *offshore*-Bereichen entwickelt werden. In einer Kooperation zwischen verschiedenen P-Campus-Partnern konnte eine isotopenmarkierte Substanz synthetisiert werden, welche notwendige Grundlage für den analytischen Nachweis eines glyphosatspezifischen Abbauproduktes in einem Lysimeterexperiment war.

Einfluss von anorganischen Phosphorverbindungen auf Cyanobakterienblüten in der Ostsee

Cyanobakterien sind die einzigen Bakterien, die wie Algen und Pflanzen zur oxygenen Photosynthese befähigt sind. Daher spielen sie eine wichtige Rolle im globalen Kohlenstoffzyklus. Darüber hinaus sind viele Cyanobakterien zur Fixierung von Luftstickstoff befähigt und können insbesondere aquatische Ökosysteme auch mit Stickstoffverbindungen versorgen. In der Ostsee bilden fadenförmige, stickstofffixierende Cyanobakterien eine dominierende Gruppe im Phytoplankton, die insbesondere in den **Sommermonaten** Massenentwicklungen, sogenannte Blüten im Oberflächenwasser der zentralen Ostsee ausbilden können. Diese **Cyanobakterienblüten** sind häufig von toxischen Arten wie z. B. *Nodularia* spp. dominiert, die damit einen großen Einfluss auf das Ökosystem Ostsee und seine Nutzung ausüben. Neben meteorologischen Faktoren wie hohe Oberflächentemperatur und Windstille, die zur Schichtung des Ostseewassers führen, wird vermutet, dass die **Verfügbarkeit von anorganischem Phosphat ein Auslöser der Cyanobakterienblüten** darstellen könnte. Daher wurden im P-Campus-Teilprojekt „Cyanobloom - The role of inorganic phosphate supply on the development of cyanobacterial summer blooms in the Baltic Sea“, die Auswirkungen der P-Verfügbarkeit auf Cyanobakterien im Labor sowie im Freiland in einem gemeinsamen Projekt der UR und dem IOW untersucht.

Wege zur Erhöhung der P-Effizienz im Pflanzenbau

In der Landwirtschaft bieten bisher als **Unkräuter** angesehene Pflanzen ein Potential durch zeitweilige Akzeptanz z. B. im Maisbestand, um sowohl die **P-Aufnahme** des **Maises** zu **erhöhen** als auch den Herbizideinsatz zu reduzieren. Dies kann zusätzlich zur Erhöhung der Biodiversität auf Ackerflächen beitragen und die **Auswaschungsgefahr von P mindern**.

Einzelne **Kartoffelsorten** unterscheiden sich hinsichtlich ihrer **P-Ausnutzung und P-Effizienz** erheblich. Die Wurzellänge oder Phosphataseaktivität beeinflussen beispielsweise die P-Effizienz der Pflanzen und könnten gezielt in der Kartoffelzüchtung genutzt werden, um P-effizienterer Sorten zu selektieren. Bereits heute könnten, unter Ausschöpfung des vorhandenen Sortenspektrums, so P-effizientere Kartoffelsorten angebaut werden, um die P-Düngung im Kartoffelanbau und damit die **Eutrophierungsgefahr** für angrenzende Gewässer zu **reduzieren**.

Im **Rotklee- und Luzerneanbau** scheint die Sortenwahl im Hinblick auf die P-Verwertung von geringer Bedeutung zu sein, solange die verwendeten Sorten an die jeweiligen Umweltbedingungen angepasst sind. Hinsichtlich des **Grund-**

wasserschutzes deutet sich an, dass Luzerne in Bodentiefen von 60 bis 90 cm auf Grund der höheren Reduktion von N_{\min} -Gehalten besser geeignet ist als Rotklee; bezüglich **P-Auswaschungen** zeigen sich keine wesentlichen Unterschiede.

Aquakultur und P-Recycling

Die **Aquaponik** kann ebenfalls einen Beitrag zur P-effizienteren Nahrungsmittelproduktion liefern, da sie bei artenspezifischer Optimierung der Prozesswässer und gezielter Zusammenpassung der spezifischen Arten ein **hohes Potential** für die **gemeinsame Produktion** von **Fischen** und **Kulturpflanzen**, unter gleichzeitig weitestgehender **Kreislaufführung der Nährstoffe** wie P hat. Die gezielte Ausfällung von P aus diesen Fischwässern bzw. die Nutzung der Sedimente aus den Anlagen eröffnet außerdem die Möglichkeit des Einsatzes dieser Recyclingprodukte als Pflanzendünger oder als Tierfutter.

P-Recyclingprodukte und P-Metabolismus bei Nutztieren

Derartige **P-Recyclingprodukte** können beispielsweise auch zur Anzucht von **Larven der Schwarzen Soldatenfliege** genutzt werden. Diese sind in Bezug auf ihr **Biomassewachstum** und ihre **P-Ausnutzung** wesentlich effizienter als herkömmliche Nutztiere und können einen erheblichen Teil konventioneller Rationen im **Hühnerfutter** ersetzen. Neben der Erforschung des Potenzials neuer Nutztierspezies besteht ein wichtiges Ziel darin, den Zusatz von P aus mineralischen Quellen im Futter weitgehend zu vermeiden und **P aus pflanzlichen Quellen besser zu nutzen**. Einen Schwerpunkt der molekularen Analysen bildet die Aufklärung tierseitiger Prozesse. Aus den bei **P-Diäten bei Monogastricern** beobachteten Effekten auf Stoffwechsel- und Signalebene lassen sich Ansatzpunkte für **genetische Ursachen und epigenetische Effekte** ableiten, die zukünftig für die gezielte Züchtung P-effizienterer Tiere genutzt werden können.

Phosphor-Governance

Bisher sind in Deutschland und der EU die **Rechtsvorschriften unzureichend**, um nicht nur eine effiziente, sondern auch hinsichtlich der Düngung **suffiziente** und damit **nachhaltige Landwirtschaft** zu fördern. Die **Umgestaltung der EU-Agrarförderung**, die gezielte Ausrichtung von **Politikinstrumenten** auch auf Suffizienz, welche auch **diversere Fruchtfolgen**, eine **standortangepasste Tierhaltung** und die Nutzung von **Recyclat-Düngemitteln** fördern, ist dringend notwendig. Diese Ansätze wurden in der zweiten Förderphase im Querschnittsthema V. P-Governance weiterverfolgt. Der Schwerpunkt lag hierbei auf der Reform der **Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP)**. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass die reformierten Agrarsubven-

tionen zwar einige neue Vorgaben/ Förderinstrumente enthalten, die nachhaltigem P-Management zuträglich sein könnten. Aufgrund der **fehlenden Reform der grundlegenden Förderstruktur** bleibt die Gemeinsame Agrarpolitik jedoch weiterhin ein Hindernis bei der Schließung von P-Kreisläufen.

Effiziente Nutzung P-haltiger Verbindungen in der Synthese und Katalyse

Phosphorhaltige Verbindungen finden Einsatz in fast allen Bereichen der Chemie. Sie spielen eine zentrale Rolle in der **Katalyse und Synthesechemie**. Phosphor ist somit eines der **Schlüsselemente** in der Katalyse und Synthese. Durch den Einsatz von P-haltigen Katalysatoren wird die **effiziente Durchführung** vieler Reaktionen und somit der selektive Zugang zu zahlreichen Produkten überhaupt erst ermöglicht. Im Sinne einer **nachhaltigeren Chemie** leisten P-haltige Katalysatoren einen großen Beitrag zur Entwicklung **energie- und ressourceneffizienter Prozesse**. In diesem Zusammenhang kann durch die Abtrennung und Wiederverwendung, also durch **Recycling**, die **effiziente Nutzung P-haltiger** Verbindungen ermöglicht werden. In mehreren Doktoranden- und Anschubprojekten wurden diese Aspekte und Herausforderungen adressiert.

Verschiedene wichtige Synthesemethoden in der Chemie nutzen große (stöchiometrische) Mengen an Phosphorreagenzien. Hierbei fallen entsprechend große Mengen an P-haltigen Abfällen an. Für mehrere dieser Methoden ist es gelungen, diese Abfälle während der Reaktion direkt wieder in das benötigte Reagenz zu überführen. Hierdurch war es möglich, die für die Reaktionen benötigten P-haltigen Verbindungen in kleinsten (**katalytischen**) **Mengen** einzusetzen und somit eine **effizientere Nutzung P-haltiger** Verbindungen zu realisieren. Des Weiteren ist es gelungen, P-basierte Katalysatoren durch Immobilisierung sowie durch organophile Nanofiltration effizient abzutrennen und anschließend wiederzuverwerten, also zu **recyclen**.

P-basierte Organokatalysatoren für die stoffliche Nutzung von CO₂ und SO₂

Neben der Entwicklung von Methoden zur effizienteren Nutzung von P-haltigen Verbindungen wurden neue P-basierte Organokatalysatoren entwickelt, die eine effiziente **stoffliche Nutzung von CO₂ als Synthesebaustein** ermöglichen. Solche Transformationen werden klassischerweise mit Übergangsmetallen durchgeführt. Der Einsatz dieser metall-freien Katalysatoren erlaubt die Umsetzung von CO₂ z. B. zu zyklischen Carbonaten schon bei Raumtemperatur und geringen CO₂-Drücken und ermöglicht somit eine **energieeffiziente Prozessführung**. Die gewonnenen Produkte sind interessante Synthesebausteine, Monomere für Isocyanat-freie Polyurethane und grüne Lösungsmittel. Ebenso

ist die **Valorisierung industrieller Abfallprodukte** wie z. B. des zur Luftverschmutzung beitragenden SO₂ zu harmlosen Produkten gelungen.

Was haben wir im P-Campus erreicht?

Der Austausch und die Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Fachdisziplinen und Institutionen konnte im Rahmen des P-Campus signifikant erweitert und intensiviert werden. Von 2015 bis Dezember 2022 wurden durch die Mitglieder des P-Campus insgesamt 446 Publikationen veröffentlicht. In den Jahren 2018 bis 2021 wurden pro Jahr mehr als 50 begutachtete Publikationen von P-Campus Mitgliedern veröffentlicht. Die Zahl der begutachteten, partnerschaftlichen Publikationen von P-Campus-Mitgliedern stieg in P-Campus II deutlich an (Abb. 3). In der Anfangsphase der P-Campusentwicklung, von 2012 bis 2015, gab es insgesamt nur drei begutachtete, partnerschaftliche Publikationen. Ausgehend von der ersten Förderphase gab es dann von 2016 bis 2019 insgesamt 31 und von 2020 bis Ende 2022, also ausgehend von der 2. Förderphase, 39 derartige Publikationen.

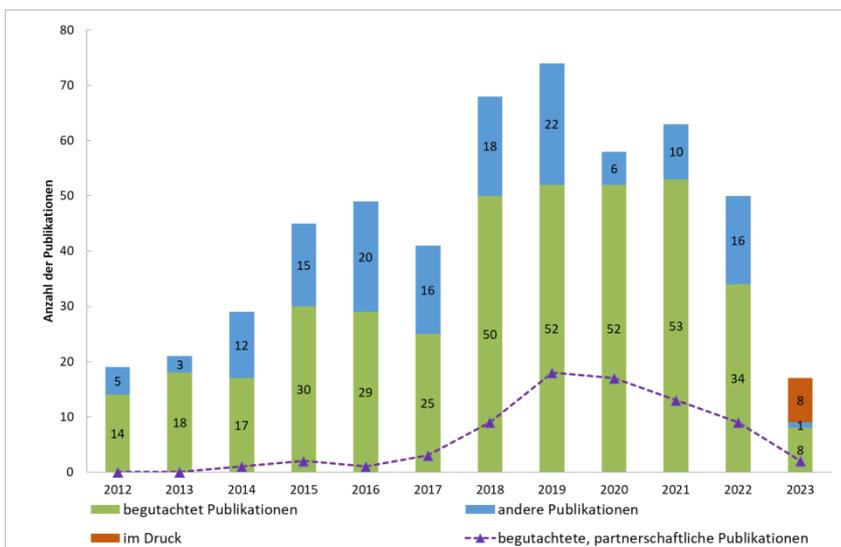


Abb. 3 Anzahl der Publikationen im P-Campus im Zeitraum 2012-2023

So sind im P-Campus auch zukünftig aus dieser **interdisziplinären Zusammenarbeit** mit ihren ganz unterschiedlichen Expertisen und Blickwinkeln neue Fragestellungen und Erkenntnisse im weiteren Verlauf zu erwarten.

Durch die Aktivität des P-Campus wurde die nationale und internationale **Sichtbarkeit der P-Forschung** in der Region Mecklenburg-Vorpommern und dem Standort Rostock gesteigert. Dazu trug u. a. auch die Ausrichtung des International Phosphorus Workshop 8 (IPW8) durch den P-Campus in Rostock im Jahr 2016 und die Präsentation der Forschung vieler P-Campus Mitglieder auf dem IPW9 in Zürich im Jahr 2019 bei.

2022 wurde vom 14. bis 16. September der 18th European Workshop on Phosphorus Chemistry (EWPC-18) in Rostock durch Mitglieder des P-Campus ausge-

richtet (LIKAT, Institut für Chemie der Universität Rostock und Koordinationsbüro des P-Campus). Der EWPC ist eine sehr bedeutende Konferenz in der Phosphorchemie und daher war dies eine großartige Gelegenheit, den Forschungsstandort Rostock und die vielfältige Forschung im P-Campus zu präsentieren.

Während der Laufzeit des P-Campus wurde die Forschung durch zusätzliche Drittmittelprojekte erweitert, die u. a. durch die erwähnte interdisziplinäre Zusammenarbeit im P-Campus erst realisierbar waren. Die eingeworbenen Drittmittelfinanzien betragen ein Mehrfaches der Höhe des Fördervolumens, das die Leibniz-Gemeinschaft, die Leibniz-Institute, die Universität Rostock, das Ministerium für Wissenschaft, Kultur, Bundes- und Europaangelegenheiten M-V und das Ministerium für Klimaschutz, Landwirtschaft, ländliche Räume und Umwelt M-V seit 2015 bereitstellten. Auch hierin zeigt sich das hohe Innovationspotential im P-Campus.

Während der zweiten Förderphase konnten zwei **assozierten Partnerschaften** geschlossen werden, zum einen mit Mitgliedern der AG Soil Fertility an der Universität Kopenhagen und zum anderen mit Mitgliedern der Gesellschaft Deutscher Chemiker, AG Phosphorchemie. Auch die Zahl **internationaler Promovierender** wurde von einem Promotionsstudenten in der PGS1 auf sechs Promovierende in der PGS2 erhöht.

Über die **Öffentlichkeitsarbeit**, wie z. B. im Rahmen der „Langen Nacht der Wissenschaften“ oder die öffentliche Ringvorlesungen des P-Campus, wurde



die Problematik der mangelnden Kreislaufführung und Nachhaltigkeit sowie die Notwendigkeit eines suffizienteren Umgangs mit den natürlichen P-Ressourcen verstärkt in die Öffentlichkeit getragen.

Ein P-Campus-Konzeptvideo gibt einen Überblick über die Forschungsschwerpunkte des P-Campus und kann über die P-Campus Webseite (<https://wissenschaftscampus-rostock.de/ziele-konzept.html>) und auf dem YouTube-Kanal des P-Campus abgerufen werden. Da das Video auf Deutsch ist, sind englische Untertitel verfügbar.



Ein besonderer Höhepunkt des P-Campus ist das [„Handbuch zur Auswahl der Aufschluss- und Bestimmungsverfahren für Gesamtphosphor in Umweltproben“](#). Es enthält detaillierte

Methodenbeschreibungen zur P-Analytik, die wichtigsten Begriffe und Instrumente zur Absicherung und Darstellung von Analyseergebnissen. Das Handbuch wird auf Anfrage an das Koordinationsbüro allen Interessierten zur Verfügung gestellt und steht in deutscher und englischer Sprache zur Verfügung.

Wie geht es weiter?

Die zweite und somit letzte Förderphase des P-Campus als Leibniz-WissenschaftsCampus endet am 30. November 2023. Aktuell werden Möglichkeiten eruiert, die breite interdisziplinäre und erfolgreiche wissenschaftliche Zusammenarbeit des P-Campus fortzuführen, zu vertiefen und weiter auszubauen. Das Koordinationsbüro des P-Campus ist wesentlicher Baustein der bisherigen Erfolge; es soll daher bestehen bleiben, um sowohl die Antragstellung der geplanten Förderlinien als auch die spätere Organisation der Förderungen wie bisher zu koordinieren und so die Marke „P-Campus“ fortzuführen. Es werden aktuell zwei Förderlinien verfolgt:

i) ein Leibniz-Forschungsverbund zum Thema „P-Health - Phosphor in Landwirtschaft, Umwelt und Ernährung: Ökologische Konsequenzen und gesellschaftliche Herausforderungen“

ii) ein DFG-Graduiertenkolleg „PhAMoS - Phosphorus Acquisition, Metabolism and Signaling in aquatic and terrestrial organisms“

Beide geplanten Förderlinien werden mit abgegrenzten, aber einander ergänzenden Forschungsfragen erarbeitet, so dass Kooperationen zwischen den Forschenden möglich sind.

(2) Ausgewählte Projektergebnisse des P-Campus´ der ersten und zweiten Förderphase

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse aus den Promotions- und Anschubprojekten der letzten 8 Jahre vorgestellt. Im Anhang befindet sich für jeden Teilabschnitt in Kapitel 2 ein Literaturverzeichnis.

Phosphorformen in Böden und Sedimenten - Phosphortransport und -transformation von terrestrischen Böden bis in die Ostsee

Die P-Einträge aus der Landwirtschaft über das Dränwasser in die Warnow erfolgten wasserführungsgekoppelt überwiegend im Winter und im zeitigen Frühjahr, wobei etwa 75% der P-Fracht potenziell bioverfügbar sind. Bioverfügbar sind aber nicht nur freie Phosphationen, sondern auch organische P-Verbindungen. Die Anteile der unterschiedlichen P-Fraktionen und ihre Bioverfügbarkeit schwanken jahreszeitlich, witterungsbedingt und landnutzungsabhängig in einzelnen Flussabschnitten. Daher ist es, um die Bioverfügbarkeit und damit das Eutrophierungsrisiko sowie die Herkunft und Umwandlung der P-Verbindungen abzuschätzen, unzureichend nur, wie gewöhnlich üblich, die Gesamt-P-Konzentration und die als bioverfügbar angenommenen Phosphatkonzentrationen zu bestimmen. Aufgrund des geringen P-Retentionspotentials der Warnow und ihrer Nebenflüsse steigt die P-Fracht bis zur Mündung in die

Ostsee an. Es müssten insgesamt die Bodenerosion und der P-Abfluss von Tierhaltungsbetrieben und ländlichen Siedlungen verringert und das P-Retentionspotential der Warnow und ihrer Nebenflüsse erhöht werden, wenn die P-Fracht in die Ostsee nach Vorgaben der HELCOM verringert werden soll.

Bei der Untersuchung von terrestrischen Ackerböden, über semiterrestrische Feuchtgebiete, Sedimente in Söllen und in der Darß-Zingster-Boddenkette bis in tiefe Becken der Ostsee konnte nachgewiesen werden, dass P vor allem in den schwerer verfügbaren P-Fraktionen vorliegt. Dabei nahm der relative Anteil der labileren P-Verbindungen von den terrestrischen Böden zu den Ostseesedimenten ab und der der stabileren P-Verbindungen und damit schlechter bioverfügbaren nahm zu. In terrestrischen, ackerbaulich genutzten Böden ist P vor allem an Eisen- und Aluminiumoxide gebunden. Auf dem Hügelkuppen allerdings, wenn durch die Erosion bereits der Oberboden abgetragen ist, so dass das Ausgangsmaterial, der kalkhaltige Geschiebemergel, oberflächennah ansteht, wurden vor allem Ca-P-Verbindungen nachgewiesen. In terrestrischen Böden, Sollsedimenten und semiterrestrischen Böden der Feuchtgebiete findet sich außerdem eine Vielzahl organischer P-Verbindungen. Die Konzentration der Al- und Fe-Verbindungen sowie die Vielfalt der organischen P-Verbindungen sinken von den terrestrischen Böden zu den Sollsedimenten, während die stabilen P-Verbindungen und die Ca-P-Verbindungen zunehmen. Die Verlagerung von Bodenpartikeln in Sollsedimente zeigt klar, dass zum Schutz der Sölle vor dem Eintrag von Bodenpartikel umliegender Äcker, welche neben P z. B. auch Pflanzenschutzmittel enthalten können, Randstreifen vergrößert oder Bewirtschaftungen weiter angepasst werden müssen.

In den semiterrestrischen Böden der Küstenfeuchtgebiete dominieren Al- und Fe-P-Verbindungen. Das heißt, Bodenpartikel der angrenzenden Ackerflächen wurden in den Feuchtgebieten abgelagert, so dass diese Feuchtgebiete die weitere Verlagerung von P-haltigen Bodenpartikeln in die Ostsee verhindern können. In Sedimenten der Darß-Zingster-Boddenkette und insbesondere der Ostsee sinkt mit der Wassertiefe der Anteil der labileren P-Verbindungen und der der stabileren steigt. Die P-Verbindungen in den Sedimenten sind hauptsächlich schwerer verfügbare Ca-P-Verbindungen. Parallel konnte mittels ^{31}P -NMR nachgewiesen werden, dass die Vielfalt der Mono- und Diester-P-Verbindungen mit zunehmender Entfernung von der Küste abnimmt und in den tiefen Becken Orthophosphate dominieren. Dies spricht für einen mikrobiellen Abbau der organischen Verbindungen auf dem Weg der Bodenpartikel vom Land in die tiefere Ostsee und parallel, insbesondere unter Sauerstoffmangelsituation, für die Reduktion der Fe-Bindungspartner und Freisetzung der Phosphationen, welche dann zusammen mit den Ca-Ionen im Meerwasser beispielsweise zu Ca-Apatiten ausgefällt werden. Eine weitere Quelle für die stabilen

Ca-P-Verbindungen in den Ostseesedimenten kann Fischkot sein. In Untersuchungen zu derartigen Sedimenten in Aquakulturanlagen wurden ausschließlich Ca-P-Verbindungen nachgewiesen.

Analytik organischer P-Verbindungen - Nachweis von Glyphosat in der Ostsee

Für die Bestimmung organischer Verbindungen in Seewasser ist meist eine Anreicherung der zu untersuchenden Stoffe im Probenwassers notwendig, was bei polaren organischen Verbindungen jedoch oft durch die Salzwassermatrix behindert wird. Dies betrifft z. B. die Substanzen Glyphosat und Aminomethylphosphonsäure (MPn), welche u.a. im Fokus der Cluster „P-Kreisläufe und -flüsse in der Umwelt“ der PGS1 und „P in der Umwelt“ der PGS2 standen. Glyphosat ist ein weltweit eingesetztes Breitbandherbizid und wurde zusammen mit seinem Abbauprodukt Aminomethylphosphonsäure (AMPA) vielfach in der aquatischen Umwelt, so z. B. im Ostsee-Ästuar, nachgewiesen. Das natürlich vorkommende MPn wird als Substrat für die oxische Methanproduktion in Gewässern im Zusammenhang mit dem „ozeanischen Methan-Paradox“ diskutiert. Entwicklung von Methoden zur Bestimmung dieser Substanzen in Seewasser, speziell der Ostsee, waren Ziele der Arbeiten.

Mittels Elektrodialyse (ED) konnte der Salzgehalt von Seewasser reduziert und die Effizienz nachfolgender Probenaufarbeitungsschritte v. a. für polare Substanzen erhöht werden, wie die Untersuchung von >200 umweltrelevanten Substanzen neben Glyphosat, AMPA und MPn zeigte. Durch Anwendung der ED konnte erstmals MPn in einer Ostseeprobe bestimmt werden.

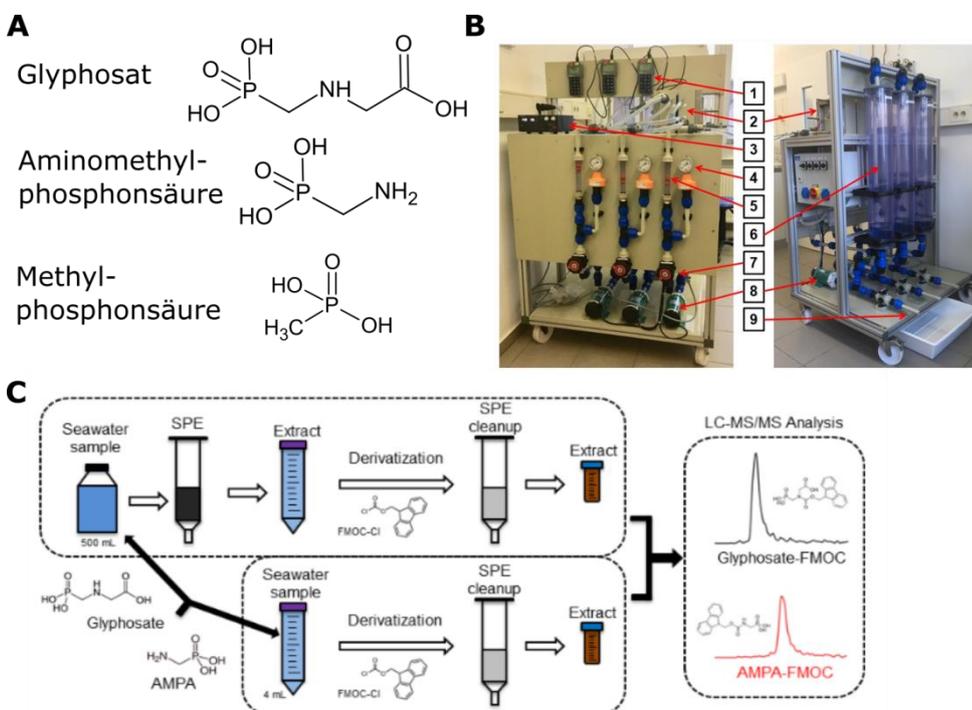


Abb. 4

A untersuchte Organophosphonatverbindungen,

B Elektrodialyse-System zur Reduzierung des Salzgehaltes von Seewasser (übernommen aus Wirth et al., 2019)

C erarbeitete Protokolle zur Bestimmung von Glyphosat und AMPA in küsten- und offshore-Bereichen der Ostsee (übernommen aus Wirth et al., 2021).

Für die Bestimmung von Glyphosat und AMPA konnte eine salzmatrix-unempfindliche substanz-spezifische Festphase zur Probenanreicherung identifiziert

werden, womit der Nachweis in der Ostsee gelang. Die Untersuchungen im Warnowästuar und der westlichen Ostsee zeigten, dass der Transport über Flüsse ein wichtiger Eintragsweg in die Ostsee und dass Kläranlagen Punktquellen v. a. für AMPA sein können.

In einer Kooperation von P-Campus-Partnern wurde isotopenmarkiertes AMPA synthetisiert werden, welches eine notwendige Grundlage für den analytischen Nachweis des Abbauproduktes AMPA aus isotopenmarkiertem Glyphosat in einem Lysimeterexperiment war. Dieses Experiment ergab einen weitgehenden Glyphosatabbau im Boden bei ordnungsgemäßer Anwendung.

Cyanobloom – Einfluss von anorganischen Phosphorverbindungen auf Cyanobakterienblüten in der Ostsee

In diesem Teilprojekt wurden Laboruntersuchungen mit Freilandanalysen mit dem Ziel kombiniert, einen detaillierten Einblick in die Anpassung von Cyanobakterien an verschiedene Phosphatmengen zu erhalten. Zunächst wurden Laboruntersuchungen an dem Ostseeisolat *Nodularia spumigena* CCY9414 auf physiologischer und molekularer Ebene durchgeführt. Dabei wurde das Wachstum des Modellcyanobakteriums unter P-freien mit P-haltigen Medien verglichen und die Akkumulation von Polyphosphat, einem weitverbreiteten zellulären Speicher für P qualitativ (Abb. 5) und quantitativ analysiert.

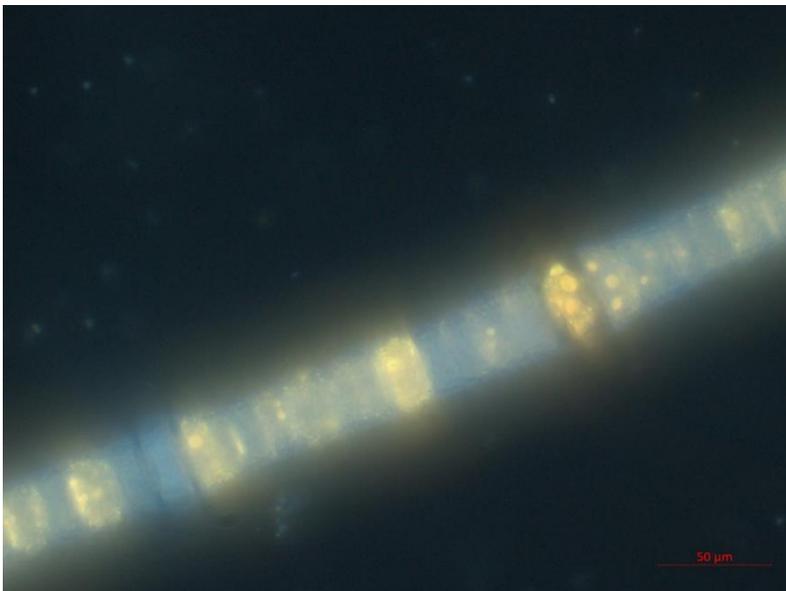


Abb. 5: Lichtmikroskopische Aufnahme von *Nodularia spumigena* CCY9414. Durch Zusatz des Fluoreszenzfarbstoffs DAPI sind in den Zellen Polyphosphatgranula sichtbar.

Die Untersuchung der genomweiten Genexpression erlaubte die detaillierte Beschreibung des sogenannten P-Stimulons, d. h. aller Gene die unter P-Mangel verstärkt oder vermindert im Genom abgelesen werden. Neben der erwarteten Steigerung der Ablesung von Genen für die Aufnahme verschiedener anorganischer und organischer P-Formen wurden auch Gene für die Stickstofffixierung, Bildung bioaktiver Substanzen sowie von Gasvesikeln verstärkt exprimiert, die für die Ausbildung von Cyanobakterienblüten wichtig sind. Diese

Ergebnisse unterstützen die Hypothese, dass eine verstärkte Limitation von P-Quellen an der Auslösung von cyanobakteriellen Sommerblüten in der Ostsee beteiligt sein könnte. Weiterhin wird dieser Datensatz dazu beitragen, in Genexpressionsmustern von Cyanobakterien aus der Ostsee deren P-Status interpretieren zu können.

In den Freilanduntersuchungen wurde zunächst ein sogenanntes Mesokosmos-experiment durchgeführt, in dem definierte Mengen von Ostseewasser in ca. 1000 Liter-fassende Gefäße eingefüllt wurden und mit bestimmten Nährstoffzusammensetzungen versehen wurden. Diese Proben wurden für 10 Tage unter natürlichen Bedingungen an der finnischen Ostseeküste inkubiert und durch ein internationales Konsortium beprobt. Unser Team war für die Bestimmung der cyanobakteriellen Fraktion durch Mikroskopie sowie der bakteriellen Diversität durch molekulare Analysen verantwortlich.

Neben diversen fädigen Cyanobakterien wurden auch sehr kleine, sogenannte Picocyanobakterien nachgewiesen. Die molekularen Untersuchungen machten deutlich, dass insbesondere die Picocyanobakterien bis zu 25% der Bakterienpopulation darstellen und im Laufe des Experiments in ihrer Anzahl zunahmten. Schließlich wurden Cyanobakterienblüten direkt in der Ostsee beprobt. Dabei kam ein neuartiges System zum Einsatz, das vom Festland aus bei Auftreten von Cyanobakterienblüten Wasserproben zu definierten Zeitpunkten aufnimmt und fixiert, so dass anschließend die cyanobakterielle Diversität sowie deren Genexpressionsmuster in Freilandproben analysiert werden können. Diese Genexpressionsmuster aus dem Freiland sollen perspektivisch mit den vorhandenen Daten aus Laboruntersuchungen verglichen werden, um anhand dieser Daten einen detaillierten Einblick in die Physiologie blütenbildender Cyanobakterien und dem Einfluss von P zu gewinnen.

Biologische Bodenkrusten

Biologische Bodenkrusten besiedeln als Pioniergemeinschaft vegetationsfreie Bodenoberflächen z. B. von Küstendünen. Dieser Zusammenschluss einer großen Vielzahl von Mikroorganismen, Moosen und Flechten, formt eine lebende und zusammenhängende Schicht, die von großer Bedeutung für die Stabilität des darunter liegenden Bodens ist. Die geringe Phosphataseaktivität der biologischen Bodenkrusten demonstrierte, dass das Wachstum dieser Gemeinschaft hauptsächlich Wasser-limitiert ist, aber auch, dass durch die Bio-krusten Nährstoffe wie Phosphat im ansonsten sehr nährstoffarmen Dünen sand akkumuliert werden.

Zudem begünstigt die biologische Aktivität dieser Lebensgemeinschaft eine Mobilisierung des ansonsten vornehmlich in stabilen Verbindungen

eingeschlossenen Phosphats. Die dabei angereicherten Phosphatverbindung sind leichter pflanzenverfügbar und begünstigen damit das Ansiedeln weiterer Pflanzen und fördern dadurch den Dünschutz.

Wege zur Erhöhung der P-Effizienz im Pflanzenbau

Durch die Vergesellschaftung von Mais mit verschiedenen Unkrautarten stieg die Phosphataseaktivität im Boden und, unabhängig von der Mykorrhizierungsneigung der Unkräuter selbst, die Mykorrhizierungsrate von Mais, was die P-Versorgung der Pflanze nachweislich erhöhte. Im Feldversuch wurde eine wachstumsneutrale Unkrauttoleranz unter Mais erreicht. Weitere Untersuchungen sind aber nötig, um abschließende Empfehlungen, insbesondere zu akzeptierbaren Unkrautarten und deren zeitlicher Toleranz, aussprechen zu können.

Der hohe P-Bedarf bei gleichzeitig niedriger P-Aufnahmeeffizienz auch auf P-reichen Böden erfordert eine relativ hohe P-Düngung der Kartoffel und erhöht die Gefahr der P-Auswaschung und damit das Risiko der Gewässereutrophierung. Durch Untersuchung unterschiedlicher Kartoffelsorten konnte nachgewiesen werden, dass eine intensivere Durchwurzelung und die Abgabe von Phosphatasen die Pflanzenverfügbarkeit des (organisch gebundenen) Ps erhöht. In Feldversuchen unterschied sich der Ertrag aller getesteten Kartoffelsorten zwischen den P-unter- und optimal versorgten Böden nicht wesentlich. Folglich wäre es ohne Ertragseinbußen möglich, die P-Düngung bereits mit dem heutigen Sortenspektrum zu reduzieren. Im Weiteren sollten die für die P-Effizienz verantwortlichen Gene in der Kartoffel identifiziert werden. Aufgrund ihrer geringen P-Aneignungseffizienz wurden verschiedene Kartoffel-Genotypen auf einen möglichen Zusammenhang zwischen der Expression von mikro-RNAs, Phosphataseaktivität und P-Aneignung untersucht. Es konnte allerdings kein funktionaler Zusammenhang zwischen der mikro-RNA-Expression und der Phosphataseaktivität der Wurzeln nachgewiesen werden, da die Phosphataseaktivität bereits vor der mikro-RNA angestiegen war.

Obwohl Leguminosen einen relativ hohen P-Bedarf haben, konnte im Promotionsprojekt „P-Leguminosen“ gezeigt werden, dass die P-Zufuhr nur geringe Auswirkungen auf die Erträge von Rotklee und Luzerne hat, was auf eine hohe P-Nachlieferung im Boden sowie eine hohe aktive P-Mobilisierung durch die Leguminosen hindeutet. Die positiven agronomischen Wirkungen organischer Dünger, insbesondere von Bioabfallkompost, waren eher mit der Bodenqualität als mit der P-Versorgung verbunden. Hohe Gehalte an mineralischem N im Unterboden können mit hohen N-Verlusten in das Grundwasser verbunden sein. Hinsichtlich des Grundwasserschutzes scheint Luzerne in einer Bodentiefe von 60 bis 90 cm besser geeignet zu sein als Rotklee mit niedrigeren N_{\min} -

Gehalten. Die intraspezifischen Effekte waren marginal. Somit scheint die Sortenwahl im Hinblick auf die P-Verwertung im Rotklee- und Luzerneanbau von geringer Bedeutung zu sein, solange die verwendeten Sorten an die jeweiligen Umweltbedingungen angepasst sind.

Effizienz und Suffizienz der P-Nutzung in der Aquaponik

Die Nutzung der Prozesswässer mit den ausgeschiedenen Nährstoffen der Fische aus der Aquakultur zur Pflanzenproduktion in der Hydroponik als sogenannte Aquaponik ist eine Möglichkeit der Ressourcenschonung und Kreislauf-führung. Aufgrund suboptimaler Nährstoffzusammensetzung der Prozesswässer für die Pflanzenernährung und produktionsbedingter Schwankungen der pH-Werte und Nährstoffkonzentrationen müssen aber beispielsweise die P-Konzentrationen im Prozesswasser für die Pflanzen angepasst werden. Es konnte nachgewiesen werden, dass dies innerhalb von Grenzen möglich ist, ohne dass die Fischgesundheit oder das Pflanzenwachstum beeinträchtigt werden, sodass eine gemeinsame Produktion von Pflanzen und Fischen möglich ist. Die Anpassung muss bedarfsgerecht und spezifisch an die Fischart und Kulturpflanzenart erfolgen.

P-Recycling in der Aquakultur

In diesem Projekt wurde ein technologisches Konzept zur Ausfällung (als Ca-P) und Nutzung des in Gülle und Schlämmen aus Fischzuchtanlagen enthaltenen Ps erarbeitet. Das Verfahren soll einfach und robust sein und direkt zu verwertbaren Produkten führen. Mittels eines sauren Aufschlusses durch organische Säuren wie Zitronensäure oder durch Schwefelsäure (mind. 37%ig) konnten insgesamt mehr als 80% des Phosphors aus Schlämmen der Fischzucht zurückgewonnen werden. Die Ausfällung als Calciumphosphate (CaP) gestaltete sich durch die teilweise hohen Stickstoffkonzentrationen schwieriger. Das erhaltene Phosphorsalz stellt somit ein Mischprodukt aus CaP und MAP (Magnesium-Ammonium-Phosphat) dar. Die Ergebnisse des Projekts ermöglichen die Förderung eines mittlerweile bereits abgeschlossenen Projektes im Rahmen eines KMU-Förderprogramms des BMBF. Im Ergebnis dieses Projektes erfolgte der Bau eines Prototyps zur P-Separation aus Gülle. Die Ergebnisse dieses Projekts können auch auf andere Medien übertragen werden.

P-Metabolismus bei Nutztieren

Die Tierhaltung ist ein unverzichtbarer Bestandteil der landwirtschaftlichen Wertschöpfungskette, da sie organisches Material mit Nährwert in den Kreislauf zurückführt. Die Schwarze Soldatenfliege (SSF) ist eine in der EU für die Futtermittelproduktion zugelassene neue Nutzinsektenspezies. Die Larven der SSF enthalten hochwertiges Eiweiß, das für die Fütterung eine wertvolle

Alternative zu importiertem Sojaprotein darstellt. Für die Fütterung der SSF-Larven kann ein sehr breites Spektrum an unterschiedlichen Substraten eingesetzt werden. Dies ermöglicht die Nutzung von Nebenprodukten und Reststoffen für die Larvenaufzucht, die weniger gut für die Fütterung anderer Nutztiere geeignet sind. Wie andere Nutztiere benötigen die Larven allerdings ebenfalls ernährungsphysiologisch ausgewogene Futterquellen. In diesem Zusammenhang wird untersucht, ob mittels der SSF-Larven P sowie Kalzium (Ca) aus Klärschlamm-Rezyklaten bestehend aus Biokohle oder einem Veraschungsprodukt mit einer höheren P-Konzentration wieder in den Nährstoffkreislauf integriert und dabei deren Wachstum durch Supplementierung des Futtermittels verbessert werden kann.

In der Schweine- und Geflügelfütterung ist, aufgrund ineffizienter P-Nutzung, die P-Konzentration in den Exkrementen hoch. Die Analysen weisen darauf hin, dass die aktuelle P-Versorgung von Schweinen und Geflügel weit über die Deckung der physiologischen Bedarfe hinausgeht. Der übermäßige Einsatz von P-freisetzenden Enzymen (Phytasen) über die Futtermittel verbessert zwar einerseits die Bioverfügbarkeit von P, führt aber auch zu einem zusätzlichen Eintrag von mineralischem P in die Umwelt.

Die tierseitigen Analysenschwerpunkte liegen auf Gesundheitsmerkmalen in der sensiblen Phase des Legebeginns bei Geflügel oder der Aufzucht bei Schweinen. Entscheidend ist eine vielschichtige Phänotypisierung, da die meisten Gewebe eines Organismus mit hormonellen Schlüsselfaktoren der P-Homöostase wie dem Vitamin-D-System interagieren. Es wurde das komplexe Zusammenspiel zwischen einer Vielzahl von Geweben und Zelltypen als Reaktion auf unterschiedliche P-Gehalte in der Tierernährung nachgewiesen. Bioinformatische Analysen zeigten die Verschaltung von Dünndarm, Knochen, Nieren und Nebenschilddrüsen für eine funktionierende Mineralstoffverwertung auf. Dabei spielt vor allem das Vitamin-D-Hormon eine entscheidende Rolle, wobei Vitamin-D-Effekte auch in Organen nachweisbar sind, die nicht direkt an der systemischen Regulation des Mineralstoffwechsels beteiligt sind. Dementsprechend sind neben der Verdaulichkeit und Knochenmineralisierung als wichtige Schaltstellen der P-Verwertung auch andere Komponenten in die Bewertung von Fütterungsstrategien einzubeziehen. Weiterhin wurde erstmals der genetische Beitrag an der Variation der P-Homöostase bei Schweinen erforscht. Die Analysen unterstrichen einerseits die hohe individuelle Vielfalt im P-Haushalt und andererseits die komplexe genetische Architektur dieses Merkmals als Basis zur Entwicklung neuer Zuchtkriterien. Aktuelle Untersuchungen fokussieren auf die Aufklärung der rassespezifischen Variabilität des Vitamin-D-Systems. Dazu werden körpereigene Regulationsprozesse in Bezug auf Merkmale der Mineralstoffverwertung in modernen und alten Schweinerassen untersucht.

Phosphor-Governance

In Projekten zur P-Governance konnte nachgewiesen werden, dass sowohl in den untersuchten Entwicklungs- und Schwellenländern als auch im Industrieland Deutschland die Rechtsvorschriften unzureichend sind, um nachhaltige Landbewirtschaftungspraktiken zu verwirklichen und die P-Kreisläufe zu schließen. Für eine nicht nur effiziente, sondern hinsichtlich Nährstoffeinsatz auch suffiziente Landwirtschaft mit weitestgehend geschlossenen Nährstoffkreisläufen sind die Umgestaltung der Agrarförderung und die Etablierung entsprechender Politikinstrumente unumgänglich. Zu den notwendigen Änderungen zählen beispielsweise strengere Grenzwerte im EU-Düngerecht für Schwermetalle wie Cd in P-Mineraldüngern, um innovative organische P-Düngemittel aus Abfallströmen zu fördern, die gezielte Förderung diverserer Fruchtfolgen mit Zwischenfruchtanbau und eine stark minimierte und standortangepasste Nutztierhaltung.

Die Erkenntnisse zur Umgestaltung der Agrarförderung (GAP) vertiefend zeigte sich, dass die reformierte Agrarpolitik weiterhin eine unzureichende Steuerungswirkung auf die Schließung von P-Kreisläufen erzielt. Neben der Kritik der grundlegenden Fördermittelstruktur weisen die Forschungsergebnisse auch darauf hin, dass Agrarsubventionen, wie aktuell umgesetzt, grundsätzlich keinen zentralen Stellenwert in der Agrarpolitik einnehmen sollten, sondern dass andere ökonomische Instrumente wie Zertifikatmärkte und Steuern globale Umweltprobleme effektiver und effizienter adressieren können. Folglich sollte die Agrarförderung der EU umfangreich umgestaltet und auf die Bereitstellung öffentlicher Güter sowie Forschung und Entwicklung ausgerichtet werden.

Recyclierbare P-basierte Organokatalysatoren für die stoffliche Nutzung von CO₂

Es wurden neuartige und P-basierte Organokatalysatoren für die stoffliche Nutzung von CO₂ entwickelt. Mit Hilfe dieser Katalysatoren konnten eine Reihe von cyclischen Carbonaten u. a. aus nachwachsenden Rohstoffen und CO₂, im Multigramm-Maßstab hergestellt werden. Die besten Katalysatoren erlaubten dabei diese Reaktion energieeffizient bei Raumtemperatur und geringen CO₂-Drücken durchzuführen. Derartige Carbonate werden als Bausteine für die Synthese von Polymeren, als grüne Lösungsmittel, industrielle Schmiermittel und als Kraftstoffadditive genutzt. Um eine effiziente Nutzung der P-haltigen Katalysatoren zu ermöglichen, wurde eine Reihe von Recyclingkonzepten untersucht. Zum einen wurden Katalysatoren direkt auf anorganischen und organischen Trägern immobilisiert und zum anderen mittels Plasmatechniken auf Oberflächen copolymerisiert. Die besten Systeme ermöglichten ein effizientes Recycling mit Recyclingraten von bis zu 99 % über bis zu 15 Zyklen.

Effizientere Transformationen basierend auf P-haltigen Katalysatoren

Für wichtige organische Transformationen, wie z. B. die Wittig- und Appel-Reaktionen, werden üblicherweise stöchiometrische Mengen an P-haltigen Reagenzien eingesetzt. Hier gelang es, katalytische Varianten dieser Reaktionen zu etablieren. Durch ein spezielles Katalysatordesign gelang es, darüber hinaus eine besonders nachhaltige Variante zu entwickeln, die zum einen auf einem grünen Lösungsmittel und zum anderen auf dem Einsatz von PMHS, einem Abfallprodukt der Silikonherstellung, basiert. Die Arbeiten bildeten die Grundlage für die Entwicklung von basen-freien katalytischen Wittig-Reaktionen. Diese Reaktion führt zu medizinisch interessanten Strukturmotiven. Bemerkenswert ist, dass eine Reihe dieser Verbindungen antitumorale Wirkung zeigten. Vor kurzem konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe eines der entwickelten Katalysatorsysteme die Hydrierung von Doppelbindungen möglich ist, wobei interessanterweise Wasser die Wasserstoffquelle ist.

Recycling von Phosphaten für die Biokatalyse

Organische Phosphate kommen in einer Reihe biokatalytischer Prozess zum Einsatz und werden in der Regel nach der Reaktion mit der Reaktionslösung entsorgt. Mittels Lanthan- und Yttrium-Salzen gelang die Entwicklung eines Verfahrens, das die fast vollständige Abtrennung und damit das Recycling von organischen Phosphaten, welche für biokatalytische Synthesereaktionen benötigt werden, ermöglicht. Damit kann dieses Verfahren genutzt werden, die organischen Phosphate wiederholt aufzureinigen und erneut für biokatalytische Reaktionen zu nutzen. Diese Ergebnisse wurden patentiert.

Synthese und Reaktivität neuer P-haltiger Verbindungen

Neben der Synthese von P-haltigen aromatischen Heterocyclen wie z. B. Phosphabenzene (Phosphinine) auf der Basis von ungesättigten Kohlenwasserstoffen (Olefine, Alkine) sowie P- und P-N-Bausteinen, welche potentiell in neuen katalytischen Verfahren angewandt werden können, wurde die Reaktivität von Phosphorverbindungen in den Oxidationsstufen +3 und +1 untersucht. Hierbei wurden insbesondere niedrig-kordinierte (niedervalente) Spezies untersucht. Diese für die Aktivierung kleiner Moleküle, wie zum Beispiel **CO₂**, eingesetzt werden. Solche Transformationen werden klassischerweise mit Übergangsmetallen durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe von niedervalenten P-Spezies Amine bei Raumtemperatur aktiviert werden können, um so eine große Vielfalt von neuartigen Phosphanen zu erhalten, die potentielle Liganden und Organokatalysatoren darstellen. Ebenso ist es gelungen, industrielle Abfallprodukte wie SO₂ effektiv zu valorisieren. Darüber hinaus konnten wichtige Beiträge zur Chemie von Gruppe 13/15 Mehr-

fachbindungssystemen geleistet werden. Erstmals wurde in diesem Zusammenhang ein reversibler Ligandenaustausch an einem Phosphorzentrum belegt, was die Fähigkeit des Phosphors wie ein Übergangsmetall zu reagieren belegt. Darüber hinaus wurden neuartige Ligandensysteme auf Basis von Phosphor in der Oxidationsstufe +1 untersucht, die ein vielfältiges Potential in der homogenen Katalyse und somit in energieeffizienten Transformationen besitzen.

(3) Zusammenarbeit zwischen den Partnern und internationale Sichtbarkeit

Die **Mitgliederzahl** im P-Campus stieg von etwa 70 in 2015 zu Beginn der ersten Förderphase auf mehr als 100 in 2019; derzeit hat der P-Campus knapp 100 Mitglieder. Von 2015 bis Ende 2022 wurden durch P-Campus Mitglieder insgesamt 440 Publikationen veröffentlicht, von denen 326 begutachtete Artikel waren. Von 2012 bis Ende 2015 gab es 3 partnerschaftliche begutachtete Publikationen, d. h., dass an diesen Artikeln Autoren aus entweder mindestens zwei Leibniz-Instituten oder mindestens einem Leibniz-Institut und der Universität Rostock beteiligt waren. Von 2016 bis Ende 2019 waren es 31, und von 2020 bis Ende 2022 sogar 39 derartige partnerschaftliche, begutachtete Publikationen. Dies unterstreicht die zunehmende **interdisziplinäre Vernetzung innerhalb des P-Campus**.

In der Zeit von 2012 bis Ende 2015 wurden insgesamt 8 Artikel als Open Access veröffentlicht, von 2016 bis Ende 2019 waren es 114 und von 2020 bis Ende 2022 waren es 111 Artikel.

Im Anschluss an die erste Förderphase wurde 2020 eine **Netzwerkanalyse** des P-Campus auf Grundlage der erzielten Publikationen und Konferenzpostern bis Ende 2019 erstellt, um eine erste nachvollziehbare Übersicht über die Zusammenarbeit und Vernetzung zwischen den P-Campus-Mitgliedern und Partnerinstitutionen zu erhalten. Dabei zeigte sich mittels der begutachteten Publikationen der letzten etwa 45 Jahre, dass die P-Forschung in (der Region) Rostock durch den P-Campus gebündelt und intensiviert wurde. Berechnet man über die Publikationen des P-Campus einen Impact Factor (IF) wie bei Journalen, so ergibt sich ein Wert von >7 . Entfernt man dabei die Selbstzitationen im P-Campus, so sinkt der IF auf >6 ; dieser korrigierte IF ist also nur unwesentlich kleiner als der IF und gibt die Außenwirkung der P-Campus-Publikationen und somit ihre hohe Bedeutung in der P-Forschung wieder.

2020 vernetzen die etwa 100 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des P-Campus mehr als 800 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler weltweit miteinander. Beispielhaft sind einige Akteure aus den unterschiedlichen Institutionen mit besonders großem Anteil an der Vernetzung hervorgehoben (Abb.

6). Wie durch die WGL-Förderung angestrebt, wird ersichtlich, dass die Vernetzung der Forschenden der Leibniz-Institute vorwiegend über die Universität Rostock erfolgt, die mit den Fakultäten AUF (grüne Punkte) und MNF (orange Punkte) den Mittelpunkt des Netzwerks bildet. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des IOWs (blaue Punkte) bilden selbst ein ausgedehntes Netzwerk und sind eng mit den beiden Fakultäten verbunden. Das FBN (gelb) und das LIKAT (lila) bilden jeweils einzelne Netzwerke, welche über einzelne spezielle Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler vor allem über die MNF verknüpft sind. Das INP (türkis) und das IPK (rot) sind vorwiegend über die AUF mit dem P-Campus-Netzwerk verknüpft.

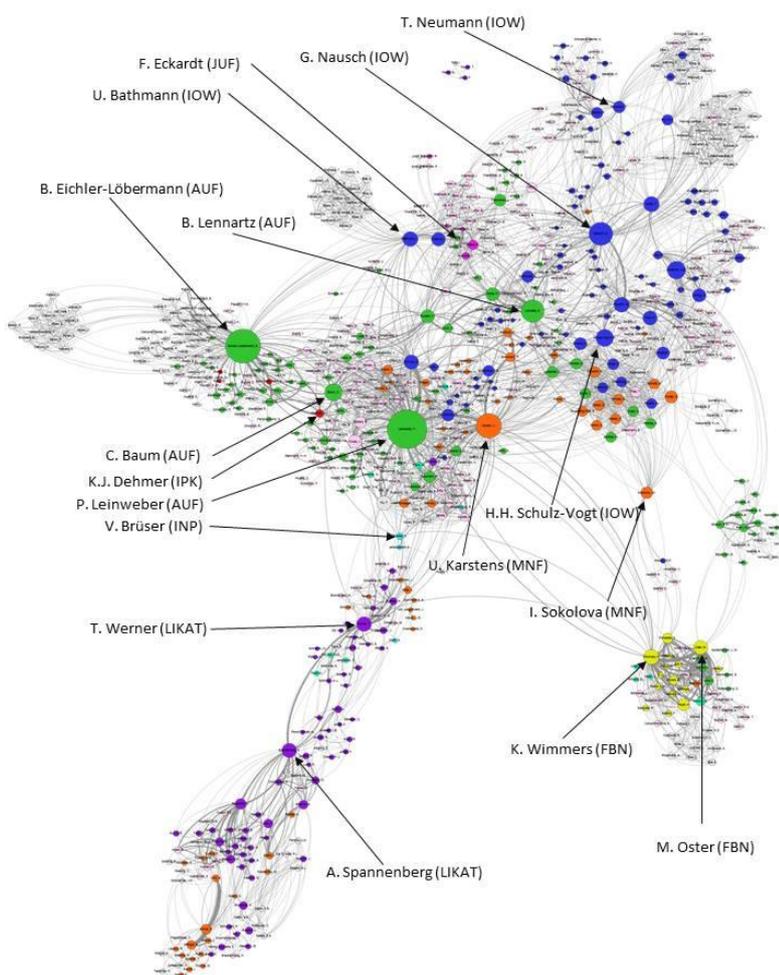


Abb. 6 Vernetzung der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des P-Campus auf Grundlage der Publikationen und Konferenzposter: jeder Punkt ist eine Person; die Punktfarbe gibt die Zugehörigkeit zum Institut wieder und die Punktgröße entspricht der Anzahl der Ko-operationen, beispielhaft sind einzelne Personen hervorgehoben (entnommen Gros 2020)

Die Netzwerkanalyse wurde mit den Daten bis 2019 erstellt, bezieht sich also nur auf die erste Förderphase des P-Campus durch die WGL

2016 wurde durch den P-Campus der „**8. International Phosphorus Workshop**“ (IPW8) mit 230 Teilnehmern in Rostock ausgerichtet. Ausgehend von den Präsentationen des IPW8 wurde 2017 durch den P-Campus eine **Sonderausgabe** in der Zeitschrift **Ambio** editiert, welche 2018 erschien:

Krämer, I.; Bathmann, U.; Eichler-Löbermann, B.; Leinweber, P.; Tränckner, J.; Wimmers, K. (2018) Special issue: Handling the phosphorus paradox in

agriculture and natural ecosystems: Scarcity, necessity, and burden of P. *Ambio* 47 (1), ISSN: 0044-7447 (Print) 1654-7209 (Online).

(<https://link.springer.com/journal/13280/volumes-and-issues/47-1/supplement>)

An sechs der 15 Artikel in diesem Sonderband waren P-Campus Mitglieder als Erst- und Co-Autorinnen und Co-Autoren beteiligt. Die **Internationale Sichtbarkeit** des P-Campus konnte so drastisch erhöht werden. Dies zeigte sich auch im **IPW9** im Juli 2019 in Zürich, auf dem 10 Mitglieder des P-Campus Ihre Beiträge als Vorträge oder Poster präsentierten.

2022 wurde vom 14. bis 16. September der 18th European Workshop on Phosphorus Chemistry (**EWPC-18**) in Rostock durch Mitglieder des P-Campus ausgerichtet (LIKAT, Institut für Chemie der Universität Rostock und Koordinationsbüro des P-Campus). Der EWPC ist eine sehr bedeutende Konferenz in der Phosphorchemie, insbesondere für Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler, und war so auch eine großartige Gelegenheit, den Forschungsstandort Rostock und die vielfältige Forschung im P-Campus zu präsentieren. Neben den 31 internationalen Vorträgen aus der Chemie konnte mit drei Vorträgen in einer speziellen P-Campus-Session auch die facettenreiche P-Forschung im P-Campus vorgestellt werden.

(4) Ausblick: Zukunft des P-Campus nach 2023

Die derzeitige Förderung der WGL für den P-Campus endet am 30. November 2023. Seit 2021 wurden im P-Campus intensiv nachfolgende Fördermöglichkeiten mit dem Ziel diskutiert, dieses einzigartige multi- und interdisziplinäre Netzwerk zu erhalten und auszubauen. Als Resultat werden derzeit ein Leibniz-Forschungsverbands sowie eines DFG-Graduiertenkollegs organisiert.

Leibniz-Forschungsverbände sind Verbände zwischen thematisch fokussierten, über-regional zusammenarbeitenden Leibniz-Instituten und Universitäten/ Hochschulen, in denen partnerschaftliche Promotionen angestrebt werden. Die Förderung erfolgt für maximal dreimal vier Jahre; dabei sind neben den Fördermitteln der Leibniz-Gemeinschaft auch entsprechende Eigenmittel der beteiligten Institute aufzubringen. Der angestrebte Leibniz-Forschungsverbund „P-Health - Phosphor in Landwirtschaft, Umwelt und Ernährung: Ökologische Konsequenzen und gesellschaftliche Herausforderungen“ (Arbeitstitel) soll aus vier Forschungsschwerpunkten (I. P in Landwirtschaft und Ernährung, II. P in der Umwelt, III. P-Recycling, IV. P-Ressourcen, P-Governance) und einem Querschnittsthema (Transfer und Bildung) bestehen. Neben den vier bisherigen Leibniz-Instituten, dem FBN und der Universität Rostock mit der Universitätsmedizin werden voraussichtlich zwei weitere Hochschulen und

sechs weitere Leibniz-Institute involviert sein. Aktuell werden 18 Teilprojekte für den Leibniz-Forschungsverbund diskutiert.

Ein **DFG-Graduiertenkolleg** ist auf die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses ausgerichtet und beinhaltet neben einem Forschungsprogramm auf hohem wissenschaftlichem Niveau auch ein Graduiertenprogramm mit innovativen Lehr- und Betreuungselementen. Die maximale Förderungsdauer beträgt zweimal viereinhalb Jahre. Das in Vorbereitung befindliche DFG-Graduiertenkolleg „PhAMoS - Phosphorus Acquisition, Metabolism and Signaling in aquatic and terrestrial organisms“ enthält zwei übergeordnete Themenkomplexe („T1 Interaktionen zwischen Organismen/Zellen und Umwelt: Regulationsmechanismen der P-Aufnahme, -speicherung und Abgabe“ und „T2 Rolle der biologischen P-Formen in der Koordination der Signalwege und metabolischen Kreisläufe in der Zelle“). Dem Themenkomplex T1 können sechs Teilprojekte, dem Themenkomplex T2 drei Teilprojekte zugeordnet werden und weitere drei Teilprojekte können beiden Themenkomplexen zugeordnet werden.

Beide Förderlinien werden mit abgegrenzten, aber einander ergänzenden Forschungsfragen erarbeitet, so dass Kooperationen zwischen den Forschenden möglich und wahrscheinlich sind. Neben der Förderung der Forschung und Graduiertenausbildung soll mit beiden Förderlinien auch die interdisziplinäre Vernetzung der P-Campus-Mitglieder erhalten werden. Gleichzeitig sollen im Rahmen des geplanten Leibniz-Forschungsverbunds weitere Leibniz-Institute und Forschungseinrichtungen in ein nationales P-Forschungsnetzwerk, dessen Zentrum in Mecklenburg-Vorpommern liegt, eingebunden werden.

Anhang

Tabelle A Durch den P-Campus geförderte Promotions- und Anschubprojekte der ersten und zweiten Förderphase

(P = Promotionsprojekt, A = Anschubprojekt, * = noch laufendes Projekt). Die Projekte sind in die Projektcluster der zweiten Förderphase eingeordnet.

Projekttitle	Laufzeit	Projektverantwortliche (Institute)	PhD	Art
Cluster I. P in der Umwelt				
Natural and anthropogenic organic P compounds – inositolphosphates, phospholipids and glyphosate	2015-2019	D. Schulz-Bull & M. Kanwischer (IOW), U. Kragl & P. Leinweber (UR)	C. Lohrer	P
Desalting - Desalting of marine water through electrodialysis	2017-2018	M. Kanwischer & D. Schulz-Bull (IOW), U. Kragl (UR)	-	A
DFG - DFG-Antragsvorbereitung "Beeinflussung der Biodiversität & biologischen Aktivität in terrestrischen und aquatischen Systemen durch Glyphosat und AMPA"	2018-2019	P. Leinweber (UR), M. Kanwischer (IOW)	-	A
AMPA - Synthese von isotopenmarkiertem AMPA für die qualitative und quantitative Analyse des Glyphosatabbaus im Boden	2019	M. Kanwischer (IOW), T. Werner (LIKAT), P. Leinweber & A. Schulz (UR)	-	A
I.3 Analysis of glyphosate and glufosinate in sea water and as indicator compounds for industrial cropping	2019-2022	M. Kanwischer & D. Schulz-Bull (IOW), P. Leinweber (UR)	M. Wirth	P
PIAG - Plasmainduzierte Abbaureaktionen in Glyphosathaltigen Substraten	2019-2020	V. Brüser & J. Kolb (INP), P. Leinweber (UR)	-	A
PAS - Plasmabasierte Methoden zum Aufschluss von biologischen Substraten für die P-Analytik	2018-2019	R. Schumann (UR), V. Brüser (INP)	-	A
EvaPhoN II bis III - Evaluation der Phosphoraufschlüsse in unterschiedlichsten Naturmaterialien	2015-2019	R. Schumann & K. Baumann (UR), D. Schulz-Bull & M. Kanwischer (IOW)	-	A
P-Digest - Zusammenstellung von Langzeitdaten und Ringversuchsdaten zum P-Aufschluss aus unterschiedlichen Naturmaterialien innerhalb des P-Campus für das Internet P-Handbook	2019	R. Schumann & P. Leinweber (UR), D. Zimmer (IOW), V. Brüser (INP)	-	A

Projekttitle	Laufzeit	Projektverantwortliche (Institute)	PhD	Art
SERAIP - Shifted excitation Raman difference spectroscopy testing for analysis of inorganic phosphorus, inositol phosphates (InsPx) and myo-inositol in environmental and animal samples	2019	K. Wimmer (FBN), G. Tränkle, B. Sumpf & M. Maiwald (FBH), P. Leinweber & R. Schumann (UR)	-	A
MPn - Methodische Voruntersuchungen für die Analytik von MPn	2022-2023	M. Kanwischer (IOW), R. Schumann (UR)	-	A*
Phosphatases – Development of new quantitative assays along terrestrial-aquatic gradients	2015-2019	U. Karsten, R. Schumann (UR) & C. Baum (UR), M. Nausch (IOW)	I. Schaub	P
Quality, Quantity and Transformation of P losses from diffuse sources to the Baltic Sea	2015-2019	M. Nausch & H. Schulz-Vogt (IOW), B. Lennartz (UR)	S. Jahn	P
P-NMR - ³¹ P-NMR-Spektroskopie: Weiterentwicklung der Methoden und Anwendung auf P-Verbindungen und -flüsse in der Umwelt	2017-2018	P. Leinweber (UR), D. Michalik (LIKAT), D. Schulz-Bull (IOW)	J. Prüter	A
ProCycle - Die Rolle von Protisten im Phosphorkreislauf biologischer Bodenkrusten	2019-2020	M. Albrecht, K. Glaser & P. Leinweber (UR), M. Labrenz (IOW)	-	A
I.2 P Pools and mobilization potential in lowlands and coastal regions	2019-2022	P. Leinweber (UR), D. Michalik (LIKAT), T. Leipe (IOW)	J. Prüter	P
PQ4N - Phosphorus as a cue regulating microbial N ₂ O production	2019-2020	N. Wrage-Mönnig (UR), M. Voss (IOW)	-	A
I.1 Risks and benefits of rewetting coastal wetlands after agricultural use	2019-2022	B. Lennartz (UR), D. Schulz-Bull & M. Kanwischer (IOW)	M. Koch, S. Ahmad	P
PhosPhyDiv - Die neuen Phosphor-Bodenfertilitäts-klassen und ihre Beziehungen zu Phytodiversität und Vegetationstypen	2022-2023	F. Jansen & U. Buczko (UR, LÖ), N. Wrage-Mönnig & J. Müller (UR, Gl)	-	A*
Cluster II Effizienz und Suffizienz der P-Nutzung, P-Recycling				
The P cycle and its application in land-based integrated aquaculture systems	2015-2019	H. Palm & A. Bischoff-Lang (UR), K. Wimmers (FBN)	S. Strauch	P
II.1 P recycling in animal husbandry	2019-2022	J. Tränckner (UR, WW), H. Palm (UR, AQ), D. Schulz-Bull (IOW), C.C. Metges (FBN)	J. Schleyken, F. Gumpert	P

Projekttitle	Laufzeit	Projektverantwortliche (Institute)	PhD	Art
Verfahrenstechnische Konzepte zur Gewinnung landwirtschaftlich nutzbarer P-Recyclate aus Reststoffen der Tierproduktion	2017-2018	J. Tränckner (UR), C. C. Metges (FBN)	-	A
Genetic and nutritional effects on the efficiency of P use of monogastric animals	2015-2019	K. Wimmers (FBN), P. Wolf (UR)	C. Gerlinger	P
II.2 Efficiency of recovered phosphorus for monogastric animals	2019-2023	P. Wolf (UR), C.C. Metges (FBN)	M. M. Seyedalmoosavi	P*
Genetic regulation of phosphatase production and activity to increase P uptake from deficient soils	2015-2019	R. Uptmoor (UR), K. J. Dehmer (IPK)	K. Wacker	P
PIPapo - Unraveling molecular signaling pathway involved in phosphorus acquisition of potato	2017-2018	R. Uptmoor (UR), K. J. Dehmer (IPK)	-	A
Med-Rhizo - Erfassung der Kulturpflanzen-Wurzelarchitektur in Medium Size-Rhizotronen	2023	K. J. Dehmer & M. Kavka (IPK), B. Eichler-Löbermann (UR)	-	A
MixedRoots - Root exudations and root architecture in mixed crops	2023	B. Eichler-Löbermann (UR), M. Holz (ZALF), K. J. Dehmer & M. Kavka (IPK)	-	A
Mechanismen der P-Mobilisierung in der Rhizosphäre von Unkräutern und Kulturpflanzen	2015-2019	K. J. Dehmer (IPK), C. Baum & B. Gerowitt (UR)	A. Zacher	P
II.3 P efficiency of forage legumes and their capacity to utilize P from recycling products	2019-2023	K. J. Dehmer (IPK), B. Eichler-Löbermann (UR)	Y. Hu	P*
Processing of alternative P sources for fertilization in agriculture	2015-2019	V. Brüser (INP), P. Leinweber (UR)	S. Jahanbakhsh	P
PlaBiPhos - Plasmaunterstützte Behandlung von Biomasse und Klärschlämmen für die Phosphorrückgewinnung	2022-2023	V. Brüser & J. Kolb (INP), J. Tränckner (UR)	-	A
Plasma - Plasmaunterstützte Oxidation von Phosphonsäureabfällen für die Phosphorrückgewinnung	2023	V. Brüser & J. Kolb (INP), J. Tränckner (UR)	-	A
Cluster III P in der Katalyse und Synthese				
Synthesis of new heterocyclic ring systems containing P	2015-2018	M. Hapke (LIKAT), A. Schulz (UR)	T. Täufer	P

Projekttitle	Laufzeit	Projektverantwortliche (Institute)	PhD	Art
Large scale application of P based organocatalysts in batch and flow for the synthesis of fatty acid derived cyclic carbonates	2015-2019	U. Kragl (UR), T. Werner, & M. Beller (LIKAT)	J. Steinbauer	P
CryspHos - Abtrennung von organischen Phosphaten durch Kristallisation	2018	J. von Langermann (UR), T. Werner (LIKAT)	-	A
HPOP - Immobilization of P-based organocatalysts by plasma techniques	2019	T. Werner (LIKAT), V. Brüser (INP)	-	A
P-Aktiv - Evaluierung neuer P-basierter Organokatalysatoren	2019	T. Werner (LIKAT), A. Schulz (UR)	-	A
P-Redox - Cyclovoltammometrische Messungen an Phosphorliganden	2019	C. Hering-Junghans (LIKAT), R. Francke (UR)	-	A
P-CAT - Entwicklung enantioselektiver katalytischer Wittig Reaktionen basierend auf chiralen Phosphorverbindungen als Katalysatoren	2019-2020	T. Werner (LIKAT), A. Börner (UR)	-	A
P-ChemBind - Phosphor-Protein-Interaktionen in der Quervernetzung	2019	J. von Langermann & U. Kragl (UR), T. Werner (LIKAT)	-	A
III.1 Synthesis of novel P-based ligands for complexes to activate small molecules	2020-2023	C. Hering-Junghans (LIKAT), U. Kragl (UR)	J.-E. Siewert	P*
III.2 Application of P-based organocatalysts and biocatalysts for the resolution of racemic carbonates	2020-2023	J. von Langermann (UR), T. Werner (LIKAT)	C. Terazzi	P*
III.3 Synthesis of potential anti-tumor and adhesion-promoting agents by P-based organocatalysis for oncology and biomedical engineering	2020-2023	T. Werner (LIKAT), H. Murua Escobar (UMR), V. Brüser (INP)	J. Tönjes	P*
Cluster IV. P in der molekularen Biologie				
IV.1 Gene expression in biogeochemical cycling of phosphorus in biological soil crusts of sand dunes of the Baltic Sea	2019-2022	U. Karsten (UR), M. Labrenz (IOW)	S. Kammann	P
IV.2 Sustainability of potatoe production: Cloning and sequencing of candidate genes improving P aquisition efficiency to reduce fertilizer inputs	2020-2023	R. Uptmoor (UR), K.J. Dehmer (IPK)	J. Kirchgesser	P*

A4

Projekttitle	Laufzeit	Projektverantwortliche (Institute)	PhD	Art
IV.3 The role of inorganic phosphate supply on the development of cyanobacterial summer blooms in the Baltic Sea	2019-2023	M. Hagemann (UR), M. Labrenz (IOW)	M. Santoro	P*
Extremophile - Novel mechanisms of P-dependent energy transductions in an animal extremophile	2019	I. Sokolova (UR), E. Sokolov & M. Zettler (IOW)	-	A
MitoP - The role of reversible phosphorylation in regulation of mitochondrial bioenergetics	2018-2019	I. Sokolova (UR), K. Wimmers (FBN)	-	A
EpiPTG - Dietary effects on DNA methylation in porcine parathyroid glands	2019-2020	M. Oster & K. Wimmers (FBN), P. Wolf (UR), B. Vollmar (UMR)	-	A
IV.4 Phosphorus as a metabolic regulator during environmental stress in animals	2020-2023	I. Sokolova (UR), S. Ponsuksili (FBN)	L. Adzigbli	P*
IV. 5 Molecular mechanisms of phosphate homeostasis and osteoimmunological processes and their consequence for health and welfare	2020-2023	K. Wimmers & M. Oster (FBN), D.-C. Fischer (UMR)	M. Hasan	P*
FGF23 - Development of an ELISA for quantification of FGF23 as a marker of phosphate homeostasis in pigs	2022-2023	K. Wimmers (FBN), D.-C. Fischer (UMR)	-	A*
GePFI - Gennetzwerke des Phosphormetabolismus von Fischen und fakultativ anaeroben Invertebraten	2022-2023	T. Goldammer (FBN), I. Sokolova (UR)	-	A*
HistoNSD - Untersuchung ausgewählter Antikörper für die immunhistochemische Analyse der Nebenschilddrüsen von Schweinen	2023	J. Keiler (UMR), M. Oster (FBN)	-	A*
CULTIVATE - Cultivation of bone-forming cells and analysis of respective expression profiles	2023	K. Wimmers & H. Reyer (FBN). D.-C. Fischer (UMR)	-	A*

Querschnittsthema V. P-Governance				
Political-legal P governance by means of certificate markets and charges	2015-2019	F. Ekardt (FNK, UR), P. Leinweber (UR), U. Bathmann (IOW)	J. Stubenrauch	P
Governance options for closed P cycles - the GAP 2020 revision	2019-2022	F. Ekardt (FNK, UR), P. Leinweber (UR), U. Bathmann (IOW)	K. Heyl	P
Wasser-Governance - Recht und Governance der Gewässer – international, europäisch, national	2022	F. Ekardt (FNK, UR), B. Garske, U. Bathmann (IOW)	-	A

Abkürzungen: FBH = Ferdinand-Braun-Institut – Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik; FNK = Forschungsstelle Nachhaltigkeit und Klimapolitik

Tabelle B Aktuell abgeschlossene Dissertationen, die durch den P-Campus finanziert wurden. PGS = P-Campus Graduiertenschule; PGS1 = Förderphase 1, PGS 2 = Förderphase 2

Dissertationen	Beteiligte Partner	Forschungscluster	PGS
Johannes Steinbauer (2018) Entwicklung neuartiger Katalysatorsysteme zur Synthese zyklischer Carbonate aus Epoxiden und CO ₂ , Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Universität Rostock	LIKAT, UR	III	PGS1
Sebastian Strauch (2018) Nutrient fluxes in commercial African catfish (<i>Clarias gariepinus</i> Burchell) recirculating aquaculture systems (RAS): Implications for aquaponics. Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät der Universität Rostock	UR, FBN	II	PGS1
Jessica Stubenrauch (2019). Phosphor-Governance in ländervergleichender Perspektive – Deutschland, Costa Rica, Nicaragua. Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät der Universität Rostock	UR, IOW	II	PGS1
Constantin Lohrer (2020) Organophosphorus Compounds in the German Baltic Coastal Area. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Universität Rostock	IOW, UR	I, II, Q	PGS1
Sina Jahanbakhsh (2020) Experimental Investigation of Single Microdischarges in a Sinusoidally Driven Barrier Corona Discharge. Universität Greifswald	INP, UR	II, III	PGS1
Marisa A. Wirth (2020) Analysis of the Herbicide Glyphosate and related Organophosphonates in Seawater. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Universität Rostock	IOW, UR	I	PGS2
Iris Schaub (2021) Die alkaline Phosphataseaktivität: ein Indikator für den Phosphorstatus in Phytoplanktongemeinschaften? Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Universität Rostock	UR, IOW	I	PGS1
Anika Zacher (2022) Zur Rolle von Unkräutern in Mais und Kartoffeln bei der effizienten Nutzung des P-Pools im Boden. Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät der Universität Rostock	UR, IPK	II	PGS1
Julia Prüter (2023) Phosphorverbindungen und -Umwandlungen entlang ihrer Transportpfade von terrestrischen in aquatische Ökosysteme. Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät der Universität Rostock	UR, IOW, LIKAT	I	PGS2

Literaturverzeichnis Kapitel 2

Phosphorformen in Böden und Sedimenten - Phosphortransport und -transformation von terrestrischen Böden bis in die Ostsee

- Bitschowsky & Nausch (2019) Spatial and seasonal variations in phosphorus speciation along a river in a lowland catchment (Warnow, Germany). *Science of The Total Environment* 657, 671-685, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.009
- Rönspeiß et al. (2021) Bioavailability of various phosphorus fractions and their seasonality in a eutrophic estuary in the southern Baltic Sea - a laboratory approach. *Front. Mar. Sci.* 8, 715238, DOI: 10.3389/fmars.2021.715238
- Rönspeiß et al. (2020) Spatial and seasonal phosphorus dynamics in a eutrophic estuary of the southern Baltic Sea. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 233, DOI: 10.1016/j.ecss.2019.106532
- Nausch et al. (2017) Phosphorus fractions in discharges from artificially drained lowlandcatchments (Warnow River, Baltic Sea). *Agricultural Water Management* 187, 77-87, DOI: 10.1016/j.agwat.2017.03.006
- Prüter et al. (2023) Phosphorus speciation along a soil to kettle hole transect: sequential P fractionation, P XANES, and ³¹P NMR spectroscopy. *Geoderma* 429, 116215, DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116215
- Prüter et al. (2023) Characterization of phosphate compounds along a catena from arable and wetland soil to sediments in a Baltic Sea lagoon. *Soil Syst.* 7, 15, DOI: 10.3390/soilsystems7010015
- Prüter et al. (2020) Phosphorus speciation in sediments from the Baltic Sea, evaluated by a multi-method approach. *Journal of Soils and Sediments* 20, 1676–1691, DOI: 10.1007/s11368-019-02518-w
- Prüter et al. (2020) Organic matter composition and phosphorus speciation of solid waste from an african catfish recirculating aquaculture system. *Agriculture* 10 (10), 466, DOI: 10.3390/agriculture10100466

Analytik organischer P-Verbindungen - Nachweis von Glyphosat in der Ostsee

- Lohrer et al. (2020) Methodological aspects of methylphosphonic acid analysis: Determination in river and coastal water samples. *Talanta* 211, 120724, DOI: 10.1016/j.talanta.2020.120724.
- Wirth et al. (2019) Electrodialysis as a sample processing tool for bulk organic matter and target pollutant analysis of seawater. *Marine Chemistry* 217, 103719, DOI: 10.1016/j.marchem.2019.103719.
- Wirth et al. (2021) The challenge of detecting the herbicide glyphosate and its metabolite AMPA in seawater – Method development and application in the Baltic Sea. *Chemosphere* 262, 128327. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128327.
- Wirth et al. (2021) AMPA-¹⁵N – Synthesis and application as standard compound in traceable degradation studies of glyphosate. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 225, 112768, DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.112768.

Cyanobakterien

Hagemann et al. (2019) Cyanobacterium *Nodularia spumigena* strain CCY9414 accumulates polyphosphate under long-term P-limiting conditions. *Aqu Micr Ecol* 82, 267-276, DOI: 10.3354/ame01896

Santoro et al. (2023) Acclimation of *Nodularia spumigena* CCY9414 to inorganic phosphate limitation - Identification of the P-limitation stimulon via RNA-seq. *Front. Microbiol.* 13, 1082763, DOI: 10.3389/fmicb.2022.1082763

Biologische Bodenkrusten

Baumann et al. (2021) Contribution of biological soil crusts to soil organic matter composition and stability in temperate forests. *Soil Biology and Biochemistry* 160, DOI: 10.1016/j.soilbio.2021.108315

Glaser et al. (2022) Microbial communities in biocrusts are recruited from the neighboring sand at coastal dunes along the Baltic Sea. *Front. Microbiol.* 13, 859447, DOI: 10.3389/fmicb.2022.859447

Kammann et al. (2023) Successional development of the phototrophic community in biological soil crusts on coastal and inland dunes. *MDPI Biology*, 12, 58, DOI: 10.3390/biology12010058

Schaub et al. (2019) Effects of an early successional biological soil crust from a temperate coastal sand dune (NE Germany) on soil elemental stoichiometry and phosphatase activity. *Microbial Ecology* 77, 217-229, DOI: 10.1007/s00248-018-1220-2

Wege zur Erhöhung der P-Effizienz im Pflanzenbau

Eichler-Löbermann et al. (2021) Mixed cropping of maize or sorghum with legumes as affected by long-term phosphorus management. *Field Crops Research* 265, 1-10, 108120, DOI: 10.1016/j.fcr.2021.108120

Hu et al. (2022) Fate of P from organic and inorganic fertilizers assessed by complementary approaches. *Nutr Cycl Agroecosyst* 124, 89-209, DOI: 10.1007/s10705-022-10237-x

Kavka et al. (2021) Potato root and leaf phosphatase activity in response to P deprivation. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1-10, DOI: 10.1002/jpln.202100112

Kirchgesser et al. (2023) Phenotypic variation of root-system architecture under high P and low P conditions in potato (*Solanum tuberosum* L.). *BMC Plant Biology* 23, 68, DOI: 10.1186/s12870-023-04070-9

Wacker-Fester et al. (2019) Genotype-specific differences in phosphorus efficiency of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Frontiers in Plant Science* 10, 1029, DOI: 10.3389/fpls.2019.01029

Zacher et al. (2017) Wirkung der Vergesellschaftung von Mais mit Unkräutern auf die P - Mobilisierung im Boden im Gefäßversuch. In: Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften. Liddy Palm, Göttingen: 29,174-175, (ISSN: 0934-5116)

Zacher et al. (2021) Mixed growth with weeds promotes mycorrhizal colonization and increases the plant-availability of phosphorus under maize (*Zea mays* L.). *Agronomy* 11, 1304, DOI: 10.3390/agronomy11071304

Effizienz und Suffizienz der P-Nutzung in der Aquaponik - P-Recycling in der Aquakultur

Palm et al. (2018) Proportional up scaling of African Catfish (*Clarias gariepinus* Burchell, 1822) commercial recirculating aquaculture systems disproportionately affects nutrient dynamics. *Aquaculture* 491, 155-168, DOI: 10.1016/j.aquaculture.2018.03.021

Strauch et al. (2018) Commercial African Catfish (*Clarias gariepinus*) recirculating aquaculture systems: Assessment of element and energy pathways with special focus on the phosphorus cycle. *Sustainability* 10 [6]: 1805, DOI: 10.3390/su10061805

Strauch et al. (2019) Effects of ortho-phosphate on growth performance, welfare and product quality of juvenile African Catfish (*Clarias gariepinus*). *Fishes* 4, 3, DOI: 10.3390/fishes4010003

P-Metabolismus bei Nutztieren

Gerlinger et al. (2019) Physiological and transcriptional responses in weaned piglets fed diets with varying phosphorus and calcium levels. *Nutrients* 2019, 11, 436, DOI: 10.3390/nu11020436

Gerlinger et al. (2021) Effects of excessive or restricted phosphorus and calcium intake during early life on markers of bone architecture and composition in pigs. *J Anim Physiol Anim Nutr.* 105, 52-62, DOI: 10.1111/jpn.13286

Hasan et al. (2022) Tissue-wide expression of genes related to vitamin D metabolism and FGF23 signaling following variable phosphorus intake in pigs. *Metabolites* 12, 729, DOI: 10.3390/metabo12080729

Omotoso et al. (2021) Jejunal transcriptomic profiling of two layer strains throughout the entire production period. *Sci Rep* 11, 20086, DOI: 10.1038/s41598-021-99566-5

Oster et al. (2021) mRNA profiles of porcine parathyroid glands following variable phosphorus supplies throughout fetal and postnatal life. *Biomedicines* 9, 454, DOI: 10.3390/biomedicines9050454

Ponsuksili et al. (2023). The dynamics of molecular, immune and physiological features of the host and the gut microbiome, and their interactions before and after onset of laying in two hen strains. *Poult Sci* 102(1), 102256, DOI: 10.1016/j.psj.2022.102256

- Reyer et al. (2019) Genetic contribution to variation in blood calcium, phosphorus, and alkaline phosphatase activity in pigs. *Front. Gen.* 10:590, DOI: 10.3389/fgene.2019.00590
- Reyer et al. (2021) Mineral phosphorus supply in piglets impacts the microbial composition and phytate utilization in the large intestine. *Microorganisms* 9 (6), 1197, DOI: 10.3390/microorganisms9061197
- Seyedalmoosavi et al. (2022) Effects of increasing levels of whole Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) larvae in broiler rations on acceptance, nutrient and energy intakes and utilization, and growth performance of broilers. *Poultry Science* 101, 12, 1-15, DOI: 10.1016/j.psj.2022.102202
- Seyedalmoosavi et al. (2022) Growth efficiency, intestinal biology, and nutrient utilization and requirements of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae compared to monogastric livestock species: a review. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 13, 1-20, DOI: 10.1186/s40104-022-00682-7
- Seyedalmoosavi et al. (2022) Lipid metabolism, fatty acid composition and meat quality in broilers supplemented with increasing levels of defrosted black soldier fly larvae. *Journal of Insects as Food and Feed*, 1 - 16, DOI: 10.3920/JIFF2022.0125

Phosphor-Governance

- Heyl et al. (2021) The Common Agricultural Policy beyond 2020: A critical review in light of global environmental goals. *Review of European, Comparative and International Environmental Law* 30, 95-106, DOI: 10.1111/reel.12351
- Heyl et al. (2022) Potentials and Limitations of Subsidies in Sustainability Governance: The Example of Agriculture. *Sustainability*, 14, 15859, DOI: 10.3390/su142315859
- Heyl et al. (2023) Achieving the nutrient reduction objective of the Farm to Fork Strategy. An assessment of CAP subsidies for precision fertilization and sustainable agricultural practices in Germany. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 7, 1088640, DOI: 10.3389/fsufs.2023.1088640
- Heyl, K. (2023) Reducing phosphorus input into the Baltic Sea—An Assessment of the updated Baltic Sea action plan and its implementation through the Common Agricultural Policy in Germany. *Water*, 15 (2), 315, DOI: 10.3390/w15020315
- Stubenrauch et al. (2018) Sustainable land use, soil protection and phosphorus management from a cross-national perspective. *Sustainability* 10 (6), 1988, DOI: 10.3390/su10061988
- Stubenrauch, J. (2022) Innovative phosphorus governance: How to address recurring regulatory shortfalls - The example of Germany, Costa Rica and Nicaragua. In: Ginzky, H. et al. (eds.) *International Yearbook of Soil Law and Policy 2020/2021*, 435-462, DOI: 10.1007/978-3-030-96347-7_17

Recyclierbare P-basierte Organokatalysatoren für die stoffliche Nutzung von CO₂

Großeheilmann et al. (2015) Recycling of phosphorus-based organocatalysts by organic solvent nanofiltration. ACS Sustainable Chem. Eng. 3 (11), 2817–2822, DOI: 10.1021/acssuschemeng.5b00734

Hu et al (2020) Plasma-assisted immobilization of a phosphonium salt and its use as a catalyst in the valorization of CO₂. ChemSusChem 13 (7), 1825-1833, DOI: 10.1002/cssc.201903384

Kohrt & Werner (2015) Recyclable bifunctional polystyrene and silica gel-supported organocatalyst for the coupling of CO₂ with epoxides. ChemSusChem 8 (12), 2031–2034, DOI: 10.1002/cssc.201500128

Steinbauer et al. (2017) Immobilized bifunctional phosphonium salts as recyclable organocatalysts in the cycloaddition of CO₂ and epoxides. Green Chem 19 (18), DOI: 4435–4445. 10.1039/C7GC01782K

Effizientere Transformationen basierend auf P-haltigen Katalysatoren

Grandane et al. (2020) Benzoxepinones: A new isoform-selective class of tumor associated carbonic anhydrase inhibitors. Bioorg. Med. Chem. 28 (11), 115496, DOI: 10.1016/j.bmc.2020.115496

Liu & Werner (2021) Indirect reduction of CO₂ and recycling of polymers by manganese-catalyzed transfer hydrogenation of amides, carbamates, urea derivatives, and polyurethanes. Chem. Sci. 12 (31), 10590-10597, DOI: 10.1039/D1SC02663A

Longwitz & Werner (2020) Reduction of activated alkenes by P(III)/P(V) redox cycling catalysis. Angew. Chem. 132 (7), 2782-2785, DOI: 10.1002/ange.201912991

Longwitz et al. (2019) Organocatalytic chlorination of alcohols by P(III)/P(V) redox cycling. J. Org. Chem 84 (12), 7863-7870, DOI: 10.1021/acs.joc.9b00741

Longwitz et al. (2019) Phosphetane oxides as redox cycling catalysts in the catalytic Wittig reaction at room temperature. ACS Catalysis 9 (10), 9237-9244, DOI: 10.1021/acscatal.9b02456

Pudnika et al. (2021) Base-free catalytic Wittig-/Cross-Coupling Reaction sequence as short synthetic strategy for the preparation of highly functionalized arylbenzoxepinones. Synthesis 53 (19), 3545-3554, DOI: 10.1055/a-1509-6078

Tönjes et al. (2021) Poly(methylhydrosiloxane) as a reductant in the catalytic base-free Wittig reaction. Green Chem. 23 (13), 4852-4857, DOI: 10.1039/D1GC00953B

Recycling von Phosphaten für die Biokatalyse

Neuburger et al. (2023) Rare earth element-based recovery concept for cofactors containing phosphate groups from aqueous solutions. *Chemical Engineering & Technology* 46 (4), 766-775, DOI: 10.1002/ceat.202200393

Neuburger et al. Verfahren zur Abtrennung eines Cofaktors aus einer Lösung. DE Patent App. DE 102021213181.6

Synthese und Reaktivität neuer P-haltiger Verbindungen

Dankert & Hering-Junghans (2022) Heavier group 13/15 multiple bond systems: synthesis, structure and chemical bond activation. *Chemical Communications* 58, 1242-1262, DOI: 10.1039/D1CC06518A

Dankert et al. (2022) Metal-free N-H Bond activation by Phospha-Wittig Reagents. *Angewandte Chemie Internationale Edition* 61, 1-6, DOI: 10.1002/anie.202207064

Dankert et al. (2022): Deoxygenation of chalcogen oxides EO₂ (E = S, Se) with phospha-Wittig reagents. *Dalton Transactions - The international journal for inorganic, organometallic and bioinorganic chemistry* 51, 18642-1865, DOI: 10.1039/D2DT03703C

Gläsel et al. (2021) Synthesis of phosphinines from CoII-catalyzed [2+2+2] cycloaddition reactions. *ACS Catalysis* 11, 13434-13444, DOI: 10.1021/acscatal.1c03483

Gupta et al. (2021) Reactivity of phospha-Wittig reagents towards NHCs and NHOs. *Dalton Transactions - The international journal for inorganic, organometallic and bioinorganic chemistry* 50, 1838-1844, DOI: 10.1039/D1DT00071C

Nees et al. (2023): On the reactivity of phosphaalumenes towards C–C multiple bonds. *Angewandte Chemie Internationale Edition* 62, 1-10, DOI: 10.1002/anie.202215838

Suhrbier et al. (2022): A four-membered heterocyclic prevented biradical that can be described as a zwitterion or masked N-heterocyclic phosphinidene. *Cell Reports Physical Science* 3, 1-11, DOI: 10.1016/j.xcrp.2022.100777

Kapitel 3

Gros (2020) Bericht Netzwerkanalyse P-Campus. Internes Dokument