

Sekundärer Phosphor als Rohstoff für die chemische Industrie

Phosphorrecycling als Beitrag zur Versorgungssicherheit der Bioökonomie

E. Ganglberger, M. Feldbaumer

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

31/2021

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Interimistischer Leiter: DI Theodor Zillner

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen: <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

Sekundärer Phosphor als Rohstoff für die chemische Industrie

Phosphorrecycling als Beitrag zur Versorgungssicherheit
der Bioökonomie

Dr.ⁱⁿ Erika Ganglberger, DI Marcus Feldbaumer
Österreichische Gesellschaft für Umwelt und Technik (ÖGUT)

Wien, Mai 2021

Ein Projektbericht im Rahmen der Schriftenreihe Nachhaltig Wirtschaften,
Berichte aus Energie- und Umweltforschung.

Das Projekt wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Klimaschutz,
Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) durchgeführt.

Vorbemerkung

Das 21. Jahrhundert stellt die Menschheit vor enorme Herausforderungen. Klimakrise, Umweltverschmutzung, die Zerstörung von Ökosystemen und der damit einhergehende Biodiversitätsverlust sowie die zunehmende Verknappung endlicher Ressourcen zeigen die Grenzen linearen Wirtschaftens auf und machen ein Umdenken notwendig. Nachhaltigen Wirtschaftskonzepten, wie jenen der Kreislaufwirtschaft oder der Bioökonomie, wird zur Lösung der genannten Herausforderungen eine entscheidende Rolle zugesprochen.

In einer kreislaufforientierten Wirtschaft etwa werden Rohstoffe sowie die daraus produzierten Güter möglichst ressourcenschonend hergestellt, die Lebensdauer der Erzeugnisse prolongiert sowie deren Nutzung intensiviert, um so Energie- und Ressourcenverbrauch, Abfallaufkommen und Schadstoffausstoß auf ein Minimum zu reduzieren. Erst wenn Produkte nicht mehr anderweitige Verwendung finden, werden diese dem Abfallstrom zugeführt um daraus durch Recycling Sekundärrohstoffe zu gewinnen. Jene Abfälle, die sich – z.B. aufgrund ihres Schadstoffgehalts – nicht zur stofflichen Verwertung eignen, können unter anderem energetisch genutzt werden.

In Ergänzung dazu steht die Bioökonomie – ein Konzept, das in möglichst allen Bereichen und Anwendungen fossile Ressourcen durch nachwachsende Rohstoffe ersetzen soll. Aber auch biogene Ressourcen sind nicht unbegrenzt verfügbar. Daher ist es sowohl aus ökologischen als auch aus ökonomischen Gründen notwendig, Biomasse möglichst vollständig zu verwerten, beziehungsweise Konzepte zu entwickeln, die eine ressourceneffiziente Nutzung berücksichtigen und höhere Wertschöpfung erzielen. Zugleich soll auch hier eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft unterstützt werden, welche – neben der kaskadischen Nutzung – auf die Rückführung von biogenem Material in den Produktionskreislauf, die Verwertung von Reststoffen und eine vollständige Schließung des Kohlenstoffkreislaufs abzielt.

Für eine Transformation unseres linearen Wirtschaftssystems hin zur Kreislaufwirtschaft sind neue technologische Ansätze, innovative Geschäftsmodelle, systemisches interdisziplinäres Denken, enge Vernetzung der Akteure und verbessertes Informationsmanagement notwendig. Um diese Umgestaltung zu unterstützen, fördert das Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) gezielt angewandte Forschungs- und Entwicklungsvorhaben in den Themenbereichen Bioökonomie und Kreislaufwirtschaft, mit dem Ziel Innovationen anzustoßen und die langfristige Wettbewerbsfähigkeit des österreichischen Wirtschaftsstandorts zu stärken.

Der vorliegende Bericht dokumentiert in umfassender Weise die Ergebnisse eines Projekts im Themenbereich „Biobasierte Industrie“, gefördert im Rahmen der FTI Initiative Kreislaufwirtschaft der Sektion Innovation im BMK. Unsere Motivation ist es, kontinuierlich Ergebnisse geförderter Projekte zentral, themenübergreifend und öffentlich zugänglich zu machen. Damit

wollen wir einen Anstoß zur Lösung unserer großen gesellschaftlichen Herausforderungen geben und folgen dem Ziel des BMK, unter der Initiative „open4innovation“ (www.open4innovation.at) die Basis für Vernetzung und für die Gestaltung von Neuem zu schaffen.

Theodor ZILLNER / René ALBERT

Thementeam Ressourcen

Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,

Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

1 Danksagung

Im Rahmen des Projekts erfolgten Interviews mit Expert:innen und Stakeholdern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Verwaltung.

Besonders bedanken möchten wir uns bei

DI Arabel Amann (TU Wien)
Dr. Lukas Egle (MA 48)
Ass. Prof. DI Dr. Markus Ellersdorfer (Uni Leoben)
Prof. DI Dr. Thomas Ertl (BOKU)
Prof. DI Dr. Wolfgang Kern (Uni Leoben),
Dr. Florian Kretschmer (BOKU)
Prof. DI Dr. Matthias Zessner (TU Wien)

und bei folgenden Unternehmen und Interessenvertretungen:

Borealis AG
Brenntag Austria GmbH
Cleantech- Cluster Upper Austria
Donau Chemie AG
Fachverband der chemischen Industrie Österreichs (FCIO)
Timac Agro Österreich
Prayon

Allen Mitwirkenden möchten wir an dieser Stelle für die gute Zusammenarbeit und das engagierte Einbringen ihrer Expertise ein herzliches Dankeschön aussprechen!

2 Kurzfassung

Das Element Phosphor (P) kommt in der Natur vorwiegend in Form von Phosphaten vor und ist ein für alle Lebewesen essentieller Nährstoff. Somit ist Phosphor auch für die Nahrungsmittelproduktion von entscheidender Bedeutung. Wurden landwirtschaftliche Flächen früher mit Gülle gedüngt, machten gesteigerte Ansprüche an deren Produktivität bald den Einsatz von mineralischen Phosphorquellen notwendig. Diese finden sich in Phosphaterzlagerstätten, deren abbauwürdige Vorkommen global sehr ungleich verteilt sind.

Etwa 90 % des abgebauten Phosphors werden in der Düngemittelindustrie eingesetzt. Dazu wird das abgebaute Phosphaterz erst zu Rohphosphat weiterverarbeitet. Rohphosphat kann in weiterer Folge zu unterschiedlichen Düngemitteln prozessiert werden. Phosphor kommt aber auch in anderen industriellen Anwendungen eine wichtige Bedeutung zu. Hier kommen ca. 10 % des gefördert Phosphors zum Einsatz. Da dieser bei unterschiedlichsten Herstellungsprozessen zum Einsatz kommt, wird Phosphor auch als „Nährstoff der Industrie“ bezeichnet. Ausgangsstoff für diese zahlreichen Anwendungen ist technische Phosphorsäure oder weißer Phosphor, die ebenfalls aus Rohphosphat hergestellt werden.

Bisher waren kaum abbauwürdige mineralische Phosphorvorkommen in der EU bekannt. Gekoppelt mit einer künftig wohl steigenden Nachfrage nach diesem Rohstoff ergeben sich gewisse Versorgungsrisiken. Aus diesem Grund wurde Phosphor in Form von Rohphosphat und weißem Phosphor auf die Liste der kritischen Rohstoffe der EU gesetzt.

Derzeit verläuft die Nutzung von Phosphor noch weitgehend linear. Um die Abhängigkeit von Importen zu verringern, wäre ein effektives Rohstoffrecycling, also eine Kreisauflührung des Rohstoffs, wünschenswert. Kommunaler Klärschlamm ist dabei als der Abfallstrom identifiziert worden, der im Allgemeinen die größte Senke für Sekundärphosphor darstellt. Einschlägige Projekte beschäftigen sich seit Jahren mit der Rückgewinnung von Phosphor aus dieser anthropogenen Quelle.

Die Klärschlammmonoverbrennung mit anschließender Phosphorrückgewinnung aus der Asche wird diesbezüglich derzeit als der vielversprechendste Ansatz gesehen. Dabei wird nicht nur Phosphor rückgewonnen, sondern auch Schad- und Störstoffe im Zuge des Verbrennungsprozesses zuverlässig beseitigt.

Effektives Rohstoffrecycling erfordert einerseits das Vorhandensein von Rückgewinnungstechnologien, andererseits muss eine entsprechende Nachfrage nach dem Sekundärrohstoff gegeben sein. In der Vergangenheit wurde hauptsächlich der Einsatz von sekundärem Phosphor in der Düngemittelindustrie thematisiert. Dennoch wären die technischen Möglichkeiten für weitere Anwendungsgebiete bereits vorhanden.

Die vorliegende Arbeit untersucht das Nutzungspotenzial von Sekundärphosphor in der heimischen Industrie. Zu diesem Zweck wurden eine Literaturrecherche durchgeführt sowie Expert:innen und Stakeholder befragt. Es zeigte sich, dass derzeit der Einsatz in der Düngemittelindustrie am praktikabel-

ten erscheint. Obwohl die heimische Industrie auch technische Phosphate verarbeitet, sind die Mengen und erzielbaren Produktpreise (derzeit) zu gering, um diese Anwendungsbereiche als attraktiv erscheinen zu lassen.

Im europäischen Kontext hätte die Implementierung einer innovativen Wertschöpfungskette basierend auf Sekundärphosphor durchaus Potenzial. Gerade weißem Phosphor käme hier eine besondere Bedeutung zu, da die EU über keine eigenen Produktionsstätten mehr verfügt.

3 Abstract

The element phosphorus (P) occurs naturally in the form of phosphates and is an essential nutrient for all organisms. Thus, it is of crucial importance for food production. Agricultural areas were previously fertilized with manure. Increased demands on the productivity of agricultural operations soon made the use of mineral phosphorus sources necessary. Phosphorus can be found in Phosphate ore deposits which are distributed very unevenly around the world.

90 % of produced phosphorous are used in the fertilizer industry where mined phosphate ore is first processed into phosphate rock. Phosphate rock can then be processed into various fertilizers.

Approx. 10 % of the phosphorus extracted is used in industrial applications where either technical phosphoric acid or white phosphorus - both made from phosphate rock - are used. Since phosphorus is involved in countless production processes, phosphorus can also be viewed as a technical nutrient analog.

So far, hardly any mineral phosphorus deposits have been found in the EU. Coupled with an increasing demand for phosphorus in the future, certain supply risks are bound to arise. For this reason, both phosphate rock and white phosphorus are included on the EU's list of critical raw materials.

The use of phosphorus is largely linear. In order to reduce the dependency on imports, however, effective raw material recycling is needed.

Municipal sewage sludge has been identified as the waste stream that is generally the largest sink for secondary phosphorus. Relevant projects have been dealing with the recovery of phosphorus from this anthropogenic source for years. Sewage sludge mono-incineration with subsequent phosphorus recovery from the ash is currently seen as the most promising approach in this regard. Not only is phosphorus recovered by this approach but pollutants and contaminants are also reliably removed in the course of the incineration process. However, effective raw material recycling not only requires the availability of recovery technologies, but also the creation of value chains.

In the past, secondary phosphorus was mainly used in the fertilizer industry. Nowadays, technical possibilities for further areas of application are already available & feasible.

This paper investigates the potential of secondary phosphorus use in domestic industry applications. For this purpose, a literature research was carried out and experts and stakeholders were interviewed. Although technical phosphates are processed by local industry, the quantities and achievable product prices are (currently) too low to make commitments outside of applications in the fertilizer industry.

In the European context, the implementation of an innovative value chain based on secondary phosphorus has great potential. White phosphorus is of particular importance, as the EU no longer has its own local industries.

4 Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
2	Bedeutung von Phosphor	12
2.1	Natürlicher Phosphorkreislauf und anthropogener Einfluss.....	12
2.2	Phosphor in der chemischen Industrie	14
3	Phosphor: ein kritischer Rohstoff	20
3.1	Phosphatvorkommen.....	20
3.2	Herstellung von marktfähigen Phosphatgestein.....	23
3.3	Globale Produktionsmengen und Reserven.....	23
4	Versorgung Europas mit Rohphosphat und Phosphorprodukten	26
4.1	Phosphor in Österreich	28
4.2	Sekundärphosphor aus Klärschlamm.....	33
5	Sekundärphosphor für die chemische Industrie	35
5.1	Einsatzmöglichkeiten von Sekundärphosphor	35
5.2	Phosphorrecycling in Österreich – Herausforderungen und Lösungsansätze	37
6	Handlungsempfehlungen	39
7	Ausblick.....	40

1 Einleitung

Das Element Phosphor (P) ist für alle Lebewesen essentiell und ein nicht substituierbarer Nährstoff. In der Natur kommt Phosphor nicht elementar, sondern ausschließlich in Form von Phosphaten vor. Im Hydroxylapatit $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}]$ beispielsweise bildet anorganisches Phosphat zusammen mit Calcium den Hauptbestandteil von Knochengewebe und Zahnschmelze bei Wirbeltieren (Greb *et al.*, 2016). Überdies bilden Phosphate die Grundsubstanz von Nukleinsäuren und sind als Spurenelement am Energiestoffwechsel der Zellen in Form von Adenosin-5'-triphosphat (ATP) beteiligt. Erwachsene Menschen enthalten im Durchschnitt etwa 700 g Phosphor, wovon täglich ca. 1,8 g ausgeschieden werden (Huber, 2008). Aufgrund seiner unverzichtbaren physiologischen Rolle zählt Phosphor neben Stickstoff und Kalium auch für Pflanzen zu einem der wichtigsten Nährstoffe (Killiches *et al.*, 2013).

Für das Pflanzenwachstum stellt Phosphor meist einen limitierenden Faktor dar. Dieser Umstand macht ihn zu einem wichtigen Dünger in der Landwirtschaft, der dem Boden in Form von organischem Dünger (z. B. Gülle) oder mineralischem Industriedünger zugesetzt wird (Huber, 2008). Zur Herstellung des mineralischen Düngers werden große Mengen an Rohphosphat benötigt. Gegenwärtig ist daher ein erheblicher Teil der Weltbevölkerung von endlichen Phosphatgesteinsreserven abhängig, weil mit Hilfe von Mineraldünger die Nahrungsversorgung sichergestellt wird (Greb *et al.*, 2016).

Etwa 90 % der weltweit abgebauten Phosphate werden in der Düngemittelindustrie eingesetzt. Der Rest findet breite Anwendung in der Industrie und wird beispielsweise zur Produktion von Flamm- und Korrosionsschutzmitteln, Additiven, Streichhölzern, Weichmachern, Pflanzenschutzmitteln oder für die Herstellung von Lebensmittel-Zusatzstoffen genutzt (Huber, 2008).

Da Europa (EU-27) kaum abbauwürdige Phosphatgesteinsreserven besitzt, ist die EU in hohem Maße auf Importe angewiesen und somit abhängig von außereuropäischen Exporteuren (Egle *et al.*, 2016). Schätzungen zufolge werden derzeit rund 96 % des europäischen Phosphorbedarfes durch Importe abgedeckt (El Wali, Golroudbary und Kraslawski, 2019).

Mit Blick auf eine wachsende Weltbevölkerung von derzeit mehr als sieben Milliarden Menschen und der gleichzeitigen Verknappung von fruchtbaren Böden rückt die Nährstoffzufuhr und damit auch die Zufuhr von Phosphor im Agrarwesen immer mehr in den Fokus. Hier steht ein künftig steigender Bedarf einer Verknappung an qualitativ hochwertigen Rohphosphaten gegenüber. Seit Jahren nimmt die Schwermetallbelastung der erschlossenen Lagerstätten mit Cadmium (Cd) und Uran (U) (Greb *et al.*, 2016) zu.

Aufgrund der oben genannten Gründe wurde Phosphor in Form von Rohphosphat und P_4 (weißer Phosphor, elementarer Phosphor) von der EU Kommission als kritischer Rohstoff eingestuft (European Commission, 2020). Durch die Rückgewinnung von Phosphor aus phosphorreichen Abfällen könnte die europäische Rohstoffversorgung gestärkt werden.

Eine akute Rohstoffknappheit ist aktuell dennoch nicht zu befürchten (Killiches *et al.*, 2013), da in regelmäßigen Abständen Phosphatgesteinsvorkommen entdeckt werden. So hat das Unternehmen

Norge Mining kürzlich die möglicherweise weltweit größte Lagerstätte von Phosphatgestein in Norwegen entdeckt (Phosphat Price, 2021). Dieser Fund könnte in Zukunft beträchtlich zur Versorgungssicherheit Europas beitragen.

Dennoch wird die Rückgewinnung von Phosphor aus Abfällen gegenwärtig stark thematisiert. In diesem Zusammenhang identifizierte auch das Projekt „Austrian BioCycles: Biobasierte Industrie als Bestandteil der Kreislaufwirtschaft“ (<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/publikationen/austrian-bio-cycles-biobasierte-industrie-kreislaufwirtschaft.php>) Klärschlamm als eine bisher kaum genutzte biogene Phosphorquelle in Österreich, dessen Rückgewinnung und Aufbereitung einen beträchtlichen Teil des in Österreich eingesetzten Mineraldüngers substituieren und somit als Rohstoffquelle der Bioökonomie fungieren könnte.

Neben Klärschlamm existieren weitere phosphorreiche Abfälle wie beispielsweise Tiermehle (Egle *et al.*, 2016). Der Fokus liegt zur Zeit jedoch auf kommunalen Klärschlämmen, da diese die mengenmäßig größte Senke für Phosphor darstellen (Egle, Zessner und Rechberger, 2014a) und der direkte Einsatz von unbehandelten Klärschlämmen in der Landwirtschaft mehr und mehr in die Kritik gerät (Kretschmer, Zingerle und Ertl, 2018). Somit werden zeitgleich neue Managementansätze für Klärschlamm notwendig (Haidinger, 2020).

Aufgrund seines hohen Nährstoffgehalts wird Klärschlamm seit langem als Dünger in der Landwirtschaft eingesetzt. Verbesserte Analysemethoden, die Verunreinigungen von Klärschlämmen mit Mikroplastik und diversen anderen potenziell problematischen Stoffen aufgezeigt haben (Kreuzinger, 2020), brachten die gängige Praxis jedoch mehr und mehr in Verruf. In einigen Ländern wurde der Ruf nach einem umfassenden Klärschlammmanagement laut, das neben der effizienten Nährstoffrückgewinnung auch die Schadstoff-Entfrachtung im Blick hat. Schweiz und Deutschland nehmen dabei eine Vorreiterrolle ein. In der Schweiz wurde die direkte Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft bereits 2006 verboten und eine Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser mit einer zehnjährigen Übergangsfrist seit 2016 vorgeschrieben (Theiler *et al.*, 2018). Deutschland erließ 2017 eine entsprechende Verordnung, die ein Rückgewinnungsgebot von Phosphor in Abhängigkeit von Klärwerksgröße und Phosphorgehalten vorschreibt und die bodenbezogene Verwertung ab 2032 generell verbietet (Otte-Witte, 2020). Auch im österreichischen Regierungsprogramm 2020-2024 finden sich folgende Ziele: die Unterbindung der Ausbringung von mit Schadstoffen belasteten Klärschlämmen, die Prüfung eines generellen Ausbringungsverbots von Klärschlamm, sowie die Entwicklung einer Phosphorstrategie (<https://www.bundeskanzleramt.gv.at/bundeskanzleramt/die-bundesregierung/regierungsdokumente.html>). Auch der Bundes- Abfallwirtschaftsplan (BMNT, 2018) sieht für Klärschlamm neue Behandlungsgrundsätze vor, die eine weitgehende Zerstörung von im Klärschlamm enthaltenen Schadstoffen und eine Kreislaufführung des Rohstoffs Phosphor beinhaltet. Bis 2030 sollen auch in Österreich 65-85 % des im Klärschlamm enthaltenen Phosphors rückgewonnen werden.

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Verfahren entwickelt, die die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm adressieren. In den Fokus rückte dabei mehr und mehr die Klärschlammmonoverbrennung mit anschließender Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammmasche. Ein Vorteil besteht hier darin, dass bei diesem Ansatz sowohl Sekundärphosphor gewonnen als auch zeitgleich Problemstoffe

zuverlässig beseitigt werden können. Weitere Vorteile sind die Zwischenlagerfähigkeit von Klärschlammmasche und die Möglichkeit, Klärschlämme unabhängig vom Klärschlammstandort sowie gemeinsam mit anderen phosphorreichen Abfällen zu behandeln (Egle, Rechberger und Zessner, 2014b). In Fachkreisen werden jedoch auch andere Managementansätze, teils kontrovers, diskutiert (Egle *et al.*, 2016).

Die Klärschlammverwertung steht dabei im Spannungsfeld von (Haidinger, 2020):

- Abwasserwirtschaft: Entsorgungssicherheit sowie Entsorgungskosten sind hier von vorrangigem Interesse.
- Landwirtschaft: ein Dünger aus Sekundärrohstoffen muss konkurrenzfähig gegenüber herkömmlichen Produkten sein; die Ausbringungsbeschränkungen von Klärschlamm machen ein neues Management dieser Flächen notwendig.
- Boden- und Gewässerschutz: es darf zu keiner Beeinträchtigung der Bodengesundheit kommen; die Wirkung von Schad- und Störstoffen im Klärschlamm ist vielfach noch unbekannt; eine flächige Bodensanierung ist nur mit sehr großem Aufwand realisierbar.
- und Abfall-/Kreislaufwirtschaft: das Vorsorgeprinzip sieht vor, denkbare Umweltschäden bereits im Voraus zu vermeiden; Nachhaltigkeit bedingt eine ökonomisch und ökologisch sinnvolle Kreislaufführung von Rohstoffen; die Abfallhierarchie sieht die stoffliche Nutzung vor der energetischen Nutzung vor; das Schließen von Kreisläufen bei gleichzeitiger Ausschleusung von Schadstoffen steht im Fokus.

Verschiedene beteiligte Stakeholder mit oftmals divergierenden Interessen sowie viele zu berücksichtigende Kriterien machen die nationale Strategieentwicklung einer möglichst nachhaltigen Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm komplex. Ökonomische und ökologische Auswirkungen verschiedener Managementstrategien müssen abgeschätzt, sowie die praktische Umsetzbarkeit einzelner Verfahren geprüft werden.

Zu diesen Fragestellungen wurde das Projekt „StraPhos – Zukunftsfähige Strategien des Phosphormanagements für Österreich“ beauftragt. Auf Basis von Szenarioanalysen wurden dabei unterschiedliche Phosphorrecycling-Strategien analysiert und bewertet. Die Ergebnisse wurden im August 2021 publiziert ([Amann, 2021](#)) und können maßgeblich zur Optimierung des künftigen Phosphormanagements Österreichs beitragen.

Ergänzend dazu werden in gegenständlicher Arbeit die Potenziale von Sekundärphosphor in der österreichischen chemischen Industrie beleuchtet. Es wurde untersucht, wie der Einsatz von rückgewonnenem Phosphor forciert werden kann und in welchen Bereichen diesbezüglich der größte F&E-Bedarf besteht. Weiters bietet die Arbeit einen Überblick über die globale, europäische und österreichische Phosphorindustrie sowie die Bedeutung von Phosphor.

2 Bedeutung von Phosphor

Wie in **Kap. 1** bereits erwähnt, ist das Element Phosphor als wichtiger Makronährstoff von Pflanzen für die Nahrungsmittelerzeugung essenziell (Killiches *et al.*, 2013). Neben dem Einsatz als Düngemittel ist Phosphor in vielen weiteren Bereichen bedeutend.

2.1 Natürlicher Phosphorkreislauf und anthropogener Einfluss

Phosphor ist meist das wichtigste wachstumslimitierende Element eines Ökosystems und kommt in der Natur ausschließlich gebunden (nicht gediegen), vorwiegend in Form von Phosphaten vor (BMU, 2007). Bei Phosphaten im engeren Sinn handelt es sich um Salze und Ester der Phosphorsäure. Die Phosphate des natürlichen Phosphorkreislaufs (**Abb.1**) haben ihren Ursprung in phosphorhaltigem Gestein (meist Apatit) und im Bestandsabfall (Gesamtheit der toten organischen Substanz). Da es im Gegensatz zu Stickstoff und Kohlenstoff keine gasförmigen natürlichen Phosphor-Verbindungen gibt, erfolgt der gesamte Phosphattransport entweder in wässriger Lösung oder absorbiert an Partikeln (Werner, 1999). Durch Apatit-Verwitterung und Zersetzung von organischem Material liegt Phosphor in der Bodenlösung auch als gelöstes Phosphat in direkt pflanzenverfügbarer Form in Abhängigkeit vom pH-Wert als H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-} bzw. auch in organischen Verbindungen wie Phytin vor. Über die Nahrungskette wird der von Pflanzen assimilierte Phosphor erst von Phytophagen und in weiterer Folge von Zoophagen aufgenommen. Durch Zersetzungsprozesse des Bestandsabfalls wird der gebundene Phosphor schließlich wieder frei, womit sich der Kreislauf schließt.

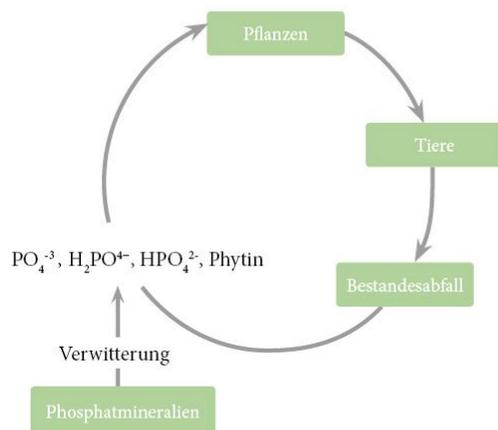


Abbildung 1: Vereinfachte schematische Darstellung des natürlichen Phosphorkreislaufs (Quelle: eigene Darstellung 2021)

Das im Boden vorkommende Phosphat ist allerdings nur zu einem geringen Teil direkt pflanzenverfügbar, denn gelöstes Phosphat ist, neben labilem und stabilem Phosphat, mit 1-2 kg/ha die kleinste von drei Phosphatfraktionen, die im Boden unterschieden werden können. Labiles Phosphat ist an Eisen- oder Aluminiumoxide bzw. an Tonminerale locker gebunden und kann durch Resorption wieder pflanzenverfügbar werden. 450-900 kg/ha können so im Boden vorliegen. Stabiles Phosphat ist mit 3000-

6000 kg/ha die größte der drei Fraktionen, hat jedoch keinerlei Bedeutung für die Pflanzenernährung. Als wichtigste Vertreter der letzten Fraktion seien hier die Apatite genannt (LAD, 2006). Für Pflanzen ist also nicht die absolute Phosphatmenge im Boden entscheidend, sondern dessen Bioverfügbarkeit.

Der natürliche Phosphorkreislauf ist stark anthropogen beeinflusst. Mengenmäßig spielt hier vor allem die Landwirtschaft eine maßgebliche Rolle (Werner, 1999). Um Ernteerträge zu steigern werden landwirtschaftlich genutzte Böden neben Stickstoff und Kalium auch mit Phosphor gedüngt. In der traditionellen Landwirtschaft erfolgt dies hauptsächlich in Form von Gülle. Immer höhere Ansprüche an die Produktivität der Böden machten schließlich den Einsatz von weiteren Phosphatquellen notwendig. Das Naturprodukt Guano galt lange Zeit als Hauptquelle für Phosphatdünger. Diese Vorkommen sind inzwischen erschöpft. Heutzutage dient daher phosphorhaltiges Gestein als Ausgangsmaterial zur Herstellung verschiedener mineralischer Phosphatdünger (Killiches *et al.*, 2013).

Eine übermäßige Phosphatdüngung kann allerdings negative Konsequenzen für die Umwelt nach sich ziehen, indem sie das Gleichgewicht in Ökosystemen stört und beispielsweise zur Eutrophierung von Gewässern führt (Killiches *et al.*, 2013). Ein sparsamer Einsatz des Nährstoffs Phosphor in der Landwirtschaft ist somit wünschenswert. Aus diesem Grund fördert die ÖPUL im Zuge des Phosphor-Mindeststandards den verantwortungsvollen Umgang mit Phosphatdüngern. Phosphat darf mengenmäßig maximal bedarfsgerecht eingesetzt, die P-Düngeempfehlungen nach den Richtlinien für die sachgerechte Düngung (SGD) nicht überschritten werden.

Phosphorhaltiges Gestein dient weiters auch als Rohstoff zur Herstellung von technischen Phosphaten, deren Anwendungsbereiche in der Industrie äußerst vielfältig sind. Auch diese technischen Phosphate können den natürlichen Phosphorkreislauf mitunter beeinträchtigen. Phosphathaltige Waschmittel verschärfen etwa das Problem der Eutrophierung von Gewässern (Felmeden, 2013). In Österreich stammen immer noch ca. 18 % der Phosphor-Fracht im rein häuslichen Abwasser (5.800 t P/a) aus der Anwendung phosphorhaltiger Reinigungsmittel (Egle, Zessner und Rechberger, 2014a).

Gegenwärtig mehren sich die Bestrebungen, Phosphor im Sinne der Kreislaufwirtschaft als Sekundärrohstoff einzusetzen. Kommunaler Klärschlamm stellt dabei eine anthropogene Phosphorquelle dar, die als Düngemittel bzw. Rohstoff für die Düngemittel- bzw. Phosphatindustrie in Betracht kommt.

Im Falle einer Verwendung als Düngemittel spielt auch hier die Bioverfügbarkeit eine entscheidende Rolle. Kommunaler Klärschlamm, der unbehandelt auf Feldern aufgetragen wird, ist meist nährstoffreich und die enthaltenen Nährstoffe sind im Allgemeinen recht gut bioverfügbar. Die Bioverfügbarkeit von Sekundärphosphorprodukten ist hingegen abhängig von den angewandten Rückgewinnungs- und Weiterverarbeitungstechnologien (Egle, Rechberger und Zessner, 2014b). Wie oben bereits erwähnt, wird die direkte Ausbringung von Klärschlamm auf landwirtschaftliche Flächen zunehmend kritisch gesehen, was eine weitere Behandlung des Klärschlammes notwendig macht.

2.2 Phosphor in der chemischen Industrie

Geschätzte 80-90 % der globalen Phosphorproduktion dienen der Herstellung mineralischer Düngemittel (Egle *et al.*, 2016). Phosphate, die nicht in der Düngemittelindustrie eingesetzt werden, werden als technische Phosphate bezeichnet (BMU, 2007). Diese dienen beispielsweise der Getränke- und Lebensmittelindustrie, Futtermittelindustrie sowie Reinigungsmittelindustrie als Rohstoff. Der Einsatz von Phosphaten in Waschmitteln und Weichspülern geht aufgrund der problematischen Umweltauswirkungen seit einigen Jahren stetig zurück (Killiches *et al.*, 2013). **Tab. 1** liefert einen Überblick über wesentliche Phosphate und deren Spezifika.

Tabelle 1: Übersicht über wesentliche phosphorhaltige Stoffe, deren Charakteristika und Verwendung: Die Färbung ist angelehnt an die Verarbeitungswege in Abb. 2 (Quelle: eigene Abbildung, 2022).

Bezeichnung	Kurzbeschreibung	Chem. Charakteristika	Verwendung
Rohphosphat	aufbereitetes konzentriertes Phosphaterz	meist Apatit: $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{X}$ X = F, OH oder Cl	Rohstoff
Rohphosphorsäure (Grünsäure)	verunreinigte Phosphorsäure	H_3PO_4 mit starken Verunreinigungen (bspw. Schwermetallen)	Zwischenprodukt
Superphosphate: • Superphosphat • Doppelsuperphosphat • Triplesuperphosphat	körnig-feste wasserlösliche Phosphate	chemisch uneinheitlich Phosphate, die sich durch ihren Phosphatgehalt und wasserlösliche Nebenbestandteile unterscheiden.	Düngemittel
Ammoniumphosphate: • Monoammoniumphosphat (MAP) • Diammoniumphosphat (DAP)	Ammoniumsalze der Phosphorsäure	Verbindungen auf Basis von Ammoniumphosphat $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$	Düngemittel
NKP-Dünger	Mehrnährstoffdünger		Düngemittel
Weißer Phosphor	Elementarer Phosphor	P_4	Zwischenprodukt
Phosphorpentoxid	Oxid des Elements Phosphor	P_4O_{10}	Zwischenprodukt, Trocknungsmittel
Technische bzw. thermische Phosphorsäure	konzentrierte gereinigte Phosphorsäure	H_3PO_4	verschiedenste technische Anwendungen

Abb. 2 stellt schematisch mögliche Verarbeitungsprozesse von Rohphosphat (aufbereitetes konzentriertes Phosphaterz) dar. Rohphosphat kann direkt als zermahlendes Bergbauprodukt in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Aufgrund der geringen Pflanzenverfügbarkeit wird das Rohphosphat jedoch meist weiterverarbeitet (Killiches *et al.*, 2013). Dabei wird es entweder mit Salz-, Schwefel-, Salpeter- oder Phosphorsäure aufgeschlossen oder es wird mithilfe eines sehr energieintensiven thermischen Prozesses weißer Phosphor (elementarer Phosphor/ P_4) hergestellt (A. de Boer, Wolzak und Sloopweg, 2019).

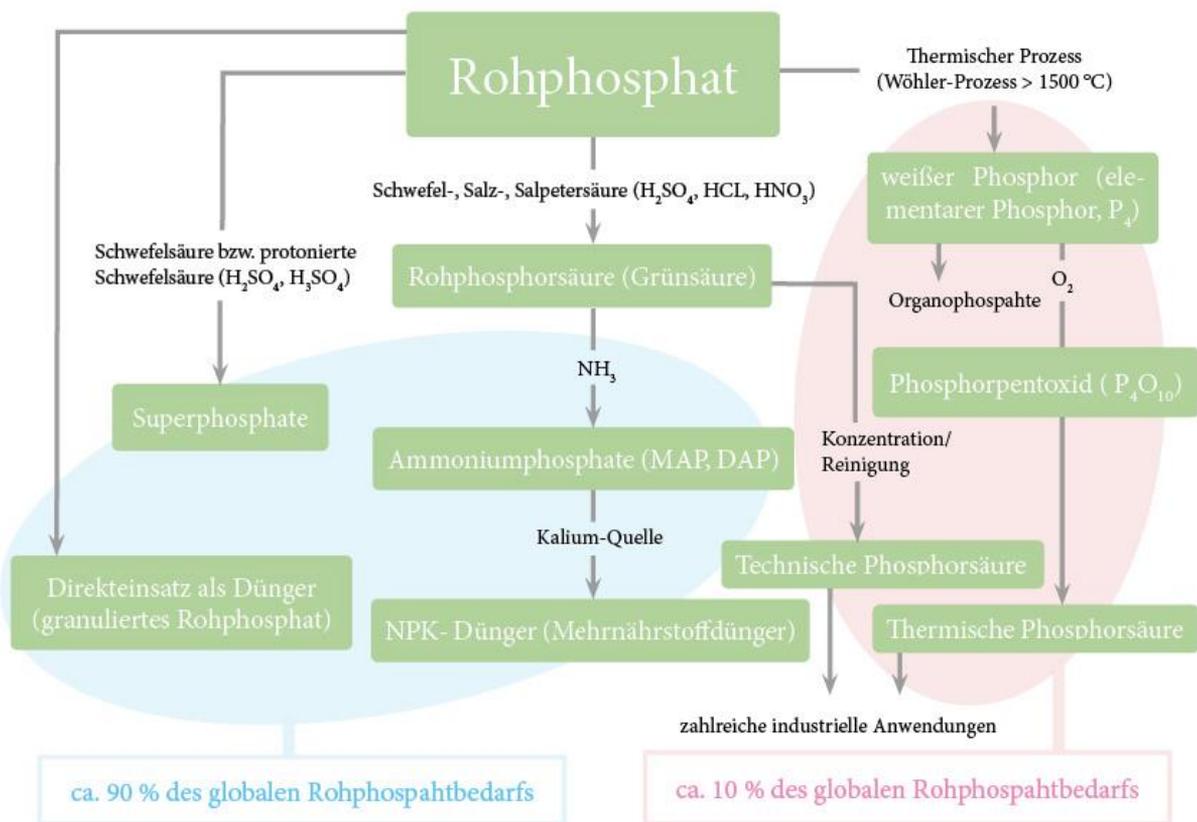


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Verwertungsmöglichkeiten von aufbereitetem Phosphaterz (Rohphosphat). Ca. 90 % der Rohphosphaterzeugung werden in der Düngemittelindustrie eingesetzt. Die restlichen 10 % dienen zur Herstellung von technischen Phosphaten, die in zahlreichen industriellen Anwendungen zum Einsatz kommen (Quelle: eigene Darstellung nach A. de Boer, Wolzak und Sloopweg, 2019).

Mithilfe der unterschiedlichen Aufschlussverfahren können entweder Superphosphate (Dünger) oder Phosphorsäure hergestellt werden. Zur Phosphorsäureherstellung wird mithilfe von Säuren im sogenannten Nassprozess Rohphosphorsäure (auch Grünsäure genannt) gewonnen, die durch den Zusatz von Ammoniak zu Ammoniumphosphaten und schließlich durch Zugabe von Kalium zu Mehrnährstoffdüngern weiterverarbeitet werden. Soll die Rohphosphorsäure für industrielle Anwendungen aufbereitet werden, muss diese erst gereinigt und aufkonzentriert werden. Die so prozessierte Rohphosphorsäure wird technische Phosphorsäure genannt (A. de Boer, Wolzak und Sloopweg, 2019).

Die Herstellung von weißem Phosphor erfordert einen sehr energieintensiven thermischen Prozess (Wöhler Prozess). Weißer Phosphor kann im Weiteren durch Oxidation und anschließende Hydrolyse ebenfalls zu hochreiner Phosphorsäure für industrielle Anwendungen abseits der Düngemittelindustrie weiterverarbeitet werden. Auf diese Weise hergestellte Phosphorsäure wird thermische Phosphorsäure genannt. Sie stellt das Ausgangsprodukt für eine Vielzahl an technischen Anwendungen dar. Weiters können aus weißem Phosphor auch Organophosphate hergestellt werden (A. de Boer, Wolzak und Sloopweg, 2019), die beispielsweise bei der Herstellung von Insektiziden, Pharmazeutika, aber auch chemischen Kampfstoffen (Sarin) zum Einsatz kommen.

95 % der heute verfügbaren Phosphorsäure wird im Nassprozess hergestellt, da dieser weniger energieintensiv durchgeführt werden kann. Weißer Phosphor ist für spezielle Anwendungen notwendig

und wird gegenwärtig nur in Kasachstan und China in großen Mengen zu Exportzwecken produziert (A. de Boer, Wolzak und Slootweg, 2019).

Thermische und technische Phosphorsäure dient als Ausgangsprodukt für eine Vielzahl an phosphorhaltigen Spezialchemikalien. Hinsichtlich Produktionsumfang sind die Natrium-Phosphate (vor allem Pentanatriumtriphosphat, Trinatriumphosphat, Tetranatriumdiphosphat, Natriumdihydrogenphosphat, Dinatriumhydrogenphosphat, Dinatriumdihydrogendiphosphat) die wichtigsten technischen Phosphate (BMU, 2007). Natrium-Phosphate kommen als Lebensmittelzusatzstoffe (E339 und E451) und als Zusatzstoffe für Reinigungsmittel zum Einsatz.

Weitere technische Phosphate mit wirtschaftlicher Bedeutung (BMU, 2007):

- Kaliumphosphate (Lebensmittelzusatzstoffe E340)
- Ammoniumphosphate (Flammschutzmittel, Brandschutzbeschichtung)
- Magnesiumphosphate (Lebensmittelzusatzstoffe E343, Futtermittelzusatz)
- Calciumphosphate (Futtermittelzusatz, Knochenersatzmaterial)
- Borphosphate (chemischer Katalysator)
- Aluminiumphosphate (Flussmittel für Gläser, Keramiken etc., Medizinische Anwendungen [Adjuvans (Hilfsstoff bei Impfstoffen), Antazidium (Neutralisierung von Magensäure)])
- Zinkphosphate (Korrosionsschutz, Zahnzement)
- Chromphosphate (Polymerindustrie, Korrosionsschutz)
- Lithiumphosphate (Lithium-Eisenphosphat-Akkumulatoren)

Darüber hinaus existieren noch zahlreiche weitere Phosphorverbindungen, die in der Industrie Verwendung finden. Die technische Applikation von Phosphor dient dabei der Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit, Feuerfestigkeit, Schmierfähigkeit, Haftungseigenschaften und als Korrosionsschutz. Phosphor substituiert dabei teils problematische Stoffe wie etwa Chrom(VI) (Illy *et al.*, 2015).

Die Phosphorchemie birgt auch Risiken. So ist die Herstellung von Phosphatdüngemitteln ein energieintensiver Prozess, der somit Treibhausgase verursacht. Außerdem entstehen bei der Phosphorsäureherstellung große Mengen von teils mit Schwermetallen belastetem Gips, die meist nicht weiterverwendet, sondern an Land oder im Meer als Abfall deponiert werden (Killiches *et al.*, 2013).

2.2.1 Phosphorsäure

Obwohl ein Großteil der produzierten Phosphorsäure (H_3PO_4) in der Düngemittelindustrie zum Einsatz kommt, findet Phosphorsäure auch breite Anwendung in diversen anderen Industrien, etwa in der Lebensmittel-, Pharma- und Metallindustrie.

Wie bereits beschrieben (**Kap. 2.2**) wird Phosphorsäure überwiegend im Nassprozess hergestellt. Dabei wird Rohphosphat mit Säuren aufgeschlossen. Die so hergestellte Rohphosphorsäure oder Grünsäure ist stark verunreinigt (v.a. Schwermetallen). Die Art der Verunreinigungen sind abhängig von der geographischen Herkunft des verwendeten Phosphatgesteins (A. de Boer, Wolzak und Slootweg, 2019). Ein wesentliches Qualitätskriterium bei Grünsäure ist ihr Feststoffgehalt, der die Pumpbarkeit beeinflusst: ein Feststoffgehalt von 2-4 % führt bereits zu massiven Beeinträchtigungen.

Für verschiedene technische Anwendungen wird Phosphorsäure in unterschiedlichen Reinheitsgraden benötigt. Für die Halbleiterherstellung ist beispielsweise eine besonders reine Phosphorsäure notwendig (Fremdstoffkonzentration 0.01-0,1 ppm), für den technischen Einsatz muss Grünsäure gereinigt und aufkonzentriert werden. Dies erfolgt meist via Extraktion und Fällung (A. de Boer, Wolzak und Sloomweg, 2019).

Beispielhafte Einsatzbereiche der Phosphorsäure (H_3PO_4):

- **Metallbehandlung:** Phosphatierung von Metallen (Oberflächentechnik), Erzeugung von Schutzschichten, die elektrisch isolierend wirken, Korrosionsschutz und verbesserte Lackhaftung bieten, sowie Verschleiß verringern (Kuthe Magazin, 2019)
- **Brennstoffzellen:** Elektrolyt in Phosphorsäurebrennstoffzelle (Mitteltemperatur-Brennstoffzelle)
- **Feuerfester Haftvermittler:** Anwendung in feuerfesten Erzeugnissen
- **Anodisierung und Chemical Polishing:** Beschichtung und Aufhellung von Metallen
- **NMR Spektrographie:** externer Standard zur Bestimmung der relativen Konzentration von phosphorhaltigen Substanzen
- **Chemischer Katalysator:** beispielsweise potente Organokatalysatoren (Katalyse organischer Reaktionen mithilfe metallfreier Moleküle) (Maji, Mallojjala und Wheeler, 2018)
- **Lebensmittelzusatzstoffe:** E338
- **Medizin:** Pharmazeutischer Hilfsstoff (Phosphatpuffer, Säureemulgator) in Medizinprodukte und Zahnzement
- **Futtermittelherstellung:** Zusatzstoff in Futtermitteln
- **Wasseraufbereitung:** Korrosionsschutz für Wasserleitungen, Aktivierung von Aktivkohle (Phosphor als Dehydratisierungsmittel im Herstellungsprozess)
- **Galvanisierung:** Beschichtungstechnik
- **Ausgangsbasis für phosphorhaltige Chemikalien:** bspw. Phosphor-Derivate (Polyurethan-Industrie, Automobilindustrie, Kunststoffe, Lacke etc.) (Preiß, 2021).

Das belgische Unternehmen Prayon ist der größte europäische Player im Bereich der technischen Phosphate und mit einem Marktanteil von 50 % auch der weltgrößte Phosphorsäurehersteller. Diese wird von Prayon im Nassprozess hergestellt. Das Unternehmen ist auf hochwertige Produkte spezialisiert. 2019 wurden 47 % der Produktionsmenge für technische Anwendungen, 30 % für die Lebensmittelindustrie, 16 % im Bereich Gartenbau (Spezialdünger) und nur 7 % für konventionelle Düngemittel produziert (Prayon, 2019).

Im Jahr 2015 wurden weltweit ca. 83 Mio. Tonnen Phosphorsäure hergestellt, was einer Steigerung von 20 Mio. Tonnen seit 2005 entspricht. China, die USA sowie Marokko und Westsahara gehören zu den größten Produzenten. Nur ein Bruchteil der hergestellten Menge gelangt in den Export. Lediglich Marokko und Westsahara sowie Jordanien exportieren größere Mengen ins Ausland (AEEP, no date)

2.2.2 Weißer Phosphor (elementarer Phosphor, P₄)

Weißer Phosphor (P₄) ist eine wachsweiche, durchscheinende Masse, deren Oberfläche im frischen Zustand gelblich erscheint (Peter, 2004). Bei längerer Lagerung intensiviert sich diese gelbe Färbung, weshalb er auch gelber Phosphor genannt (Seilnacht, 2021).

Weißer Phosphor wird über den sehr energieintensiven (carbothermischen) Wöhler-Prozess in einem Elektrolichtbogenofen bei einer Reaktionstemperatur von ca. 1500°C hergestellt (BMU, 2007). 70 % des weißen Phosphors werden zur Herstellung von thermischer Phosphorsäure verwendet. Dabei wird P₄ erst oxidiert und in weiterer Folge hydrolysiert. Die so gewonnene Phosphorsäure zeichnet sich durch ihre hohe Reinheit aus, lediglich Verunreinigungen mit Arsen müssen gelegentlich entfernt werden (A. de Boer, Wolzak und Sloomweg, 2019). Lagerung und Transport von weißem Phosphor sind problematisch, da es sich um die reaktivste Form des Phosphors handelt, die sich äußerst leicht entzündet. Aus diesem Grund wird weißer Phosphor in Wasser gelagert. Zudem ist weißer Phosphor hochgiftig, schon die direkte Aufnahme von 50 mg wirken bei einem erwachsenen Menschen tödlich (Peter, 2004).

Seit dem Konkurs des einzigen Herstellers Thermophos B.V. 2012 wird in Europa kein weißer Phosphor mehr produziert. Größere Mengen werden gegenwärtig nur mehr in den USA, China, Kasachstan und Vietnam produziert. Kasachstan ist dabei die Hauptbezugsquelle der EU (A. de Boer, Wolzak und Sloomweg, 2019).

Obwohl weißer Phosphor derzeit ausschließlich aus Rohphosphat hergestellt wird, gab es in der Vergangenheit bereits Bestrebungen, diesen auch aus phosphorhaltigen Abfällen herzustellen. Im Jahr 2014 wurde beispielsweise die RecoPhos Technologie, an deren Entwicklung auch die Montanuni Leoben beteiligt war, vorgestellt. Das Verfahren nutzt Klärschlammasche als Rohstoffquelle. Die Technologie wurde 2016 von Israel Chemicals Ltd. gekauft (A. de Boer, Wolzak und Sloomweg, 2019).

Abb. 3 zeigt unterschiedliche Wege der Weiterverarbeitung von weißem Phosphor auf. Aufgrund der Tatsache, dass P₄ nur mehr in wenigen Ländern produziert wird, wurde P₄ von der EU in die Liste der kritischen Rohstoffe aufgenommen.

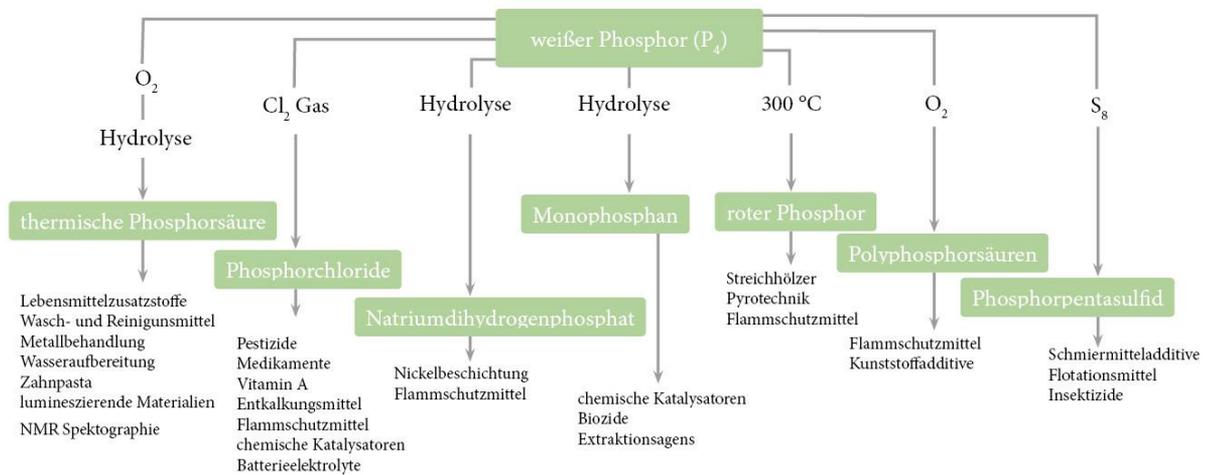


Abbildung 3: Verarbeitungswege von weißem Phosphor (Quelle: verändert nach A. de Boer, Wolzak und Slotweg, 2019).

Aus weißem Phosphor kann auch roter, violetter, schwarzer sowie faseriger Phosphor hergestellt werden (Seilnacht, 2021). Diese Stoffe besitzen unterschiedliche spezifische Eigenschaften, sind aber von untergeordneter wirtschaftlicher Bedeutung.

Da Phosphorsäure, verglichen mit weißem Phosphor, in viel größeren Mengen produziert wird, gibt es Bestrebungen, Phosphorsäure als Präkursor für traditionell auf weißem Phosphor basierende Chemikalien zu verwenden (Geeson und Cummins, 2018).

3 Phosphor: ein kritischer Rohstoff

Wie bereits in **Kap. 2** beschrieben, ist Rohphosphat der Ausgangsstoff für mineralischen Phosphat-Dünger und für technische Phosphate. Phosphor steht auf der Liste der kritischen Rohstoffe der EU, da Europa (EU-27) kaum abbauwürdige Phosphatgesteinsreserven besitzt und in hohem Maße auf Importe angewiesen ist (Egle *et al.*, 2016). Im Folgenden wird ein Überblick zur Verfügbarkeit des Rohstoffs gegeben.

3.1 Phosphatvorkommen

Das Element P ist zu etwa 0,1 % in der Erdkruste enthalten, wirtschaftlich abbaubare Phosphaterzlagertstätten mit einem P_2O_5 (Phosphorpentoxid)-Gehalt von $> 5\%$ sind jedoch auf wenige Staaten konzentriert. In diesem Zusammenhang werden meist die Länder Marokko und Westsahara, China, USA, Algerien, Russland, Jordanien und Südafrika angeführt (Bertau *et al.*, 2017).

Phosphate kommen in der Natur fast ausschließlich in Apatitmineralen vor und haben abhängig von ihrer Entstehungsgeschichte P_2O_5 -Gehalte von 5 bis 37 % [Killiches *et al.* 2013 zitiert nach (Gwosdz *et al.* 2006)]. Sie beinhalten neben Phosphat auch Kalzium und andere Elemente wie Fluor, Chlor, Thorium, Uran, Vanadium oder Seltene Erden, die sich positiv oder negativ auf den Wert des Gesteins auswirken können. Gesundheitsgefährdende Elemente wie Cadmium oder Uran können beispielsweise die Brauchbarkeit des Apatits als Düngemittel einschränken (Killiches *et al.*, 2013).

Phosphate können marin-sedimentär, magmatisch sowie aus Guano entstanden sein. Weltweit dominierend sind die marin-sedimentär gebildeten Lagerstätten, die rund 90 % aller Vorkommen ausmachen und durch chemisch-biologische Vorgänge im Meer entstanden sind (BMU, 2007). Sie werden heute vor allem in Küstennähe abgebaut und weisen im Vergleich zu den magmatischen Lagerstätten größere Verunreinigungen auf, haben jedoch einen höheren Phosphatanteil. Derzeit stammen 85 % der geförderten Phosphate aus sedimentären Lagerstätten und knapp 15 % aus magmatischen, wo sie fast ausschließlich im industriellen Tagebau abgebaut werden (Killiches *et al.*, 2013). Die als Guano-Lagerstätten bezeichneten Phosphatvorkommen spielen heutzutage keine Rolle mehr.

Die Preise für Rohphosphat schwanken erheblich, im Jahr 2008 kam es kurzzeitig gar zu einer Vervierfachung (Egle, Rechberger und Zessner, 2014b). Das gab den Ausschlag, sich näher mit der Endlichkeit dieser Ressource zu beschäftigen. Cordell *et al.* (2009) postulierten einen „Peak Phosphor“ für 2035, also die maximale Abbauleistung der weltweiten Phosphorproduktion. Berechnet wurde dieser Peak anhand einer geschätzten Phosphorkonzentration in den Phosphorerzlagertstätten und der kumulierten Phosphorproduktion zwischen 1900 und 2007 des USGS (U.S. Geological Survey) (Egle, Rechberger und Zessner, 2014b; White und Cordell, 2010). 2010 wurde ein neuer „Peak Phosphor“ berechnet, der auf neuen Schätzungen des IFDC (International Fertilizer Development Center) beruht und zum einen die Produktionskapazitäten deutlich höher, zum andern den Zeitpunkt des Peaks deutlich später zeichnet (**Abb. 4**) (White und Cordell, 2010).

Peak-Phosphor Szenarios

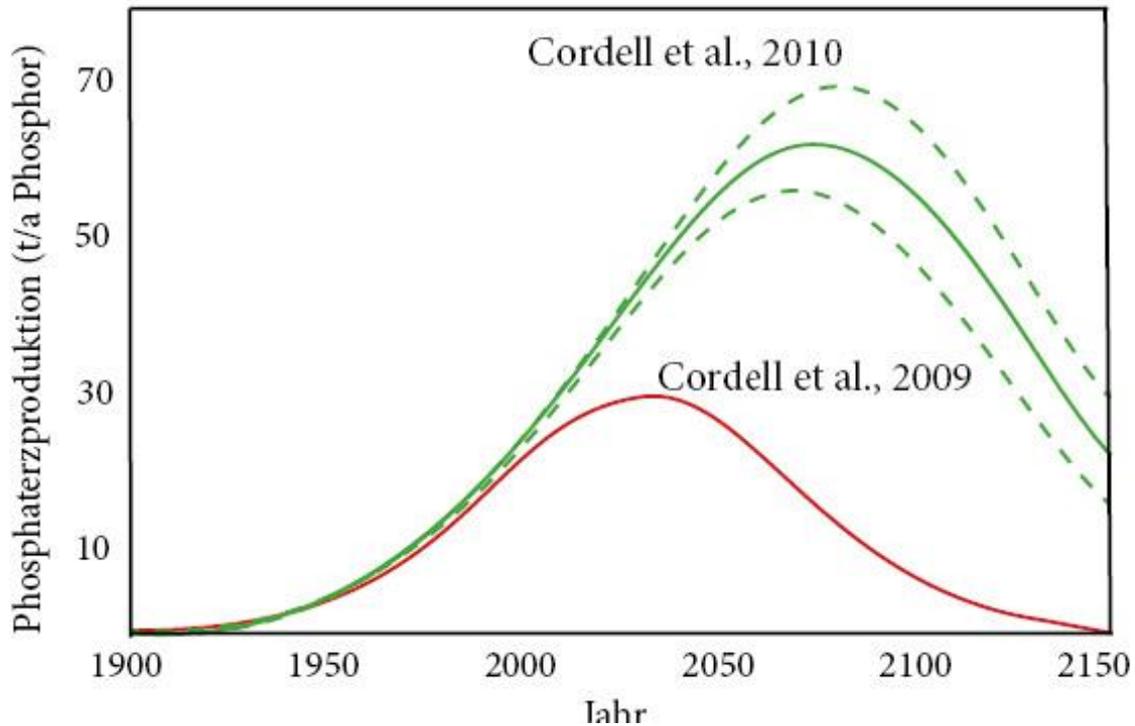


Abbildung 4: Unterschiedliche „Peak Phosphor“ Szenarien in Abhängigkeit der abgeschätzten Rohstoffreserven. Die rote Kurve zeigt die Berechnung von 2009 auf Basis von Daten des USGS. Die grünen Kurven basieren auf neuen Daten des IFDC (Quelle: verändert nach White und Cordell, 2010).

Unabhängig vom Zeitpunkt eines Peak Phosphor ist es bereits jetzt wichtig, sich mit alternativen Phosphorquellen zu beschäftigen, um in Zukunft die Versorgung sicherstellen zu können (White und Cordell, 2010).

Die statistische Reichweite der (nach heutigem Stand der Technik wirtschaftlich abbaubaren) Phosphatvorkommen wird aktuell mit ca. 300 Jahren angegeben und selbst bei einer Nachfrageverdoppelung als unkritisch angesehen. Die Sorge eines baldigen „Peak Phosphor“ erscheint aus heutiger Sicht eher unbegründet (Bertau et al. 2017).

Aufgrund der abnehmenden Qualität der Rohphosphate und der global sehr ungleich verteilten Vorkommen ergeben sich dennoch Versorgungsrisiken. Für Deutschland wird hierbei unter Einbeziehung des Herfindahl-Hirschman-Indexes (HHI) und dem Gewichteten Länderrisikos (GLS) ein mittleres Versorgungsrisiko für Phosphor angegeben (Greb *et al.*, 2016). Der Herfindahl Hirschman-Index dient dabei als Maß für die Monopolarität eines Wirtschaftszweigs. Das gewichtete Länderrisiko bewertet rohstoffexportierende Länder anhand von sechs Governance-Indikatoren (bspw. politische Stabilität, Korruptionsbekämpfung) der Weltbankgruppe.

Die Europäische Kommission bewertet periodisch im Rahmen der Studie „EU`s List of critical raw Materials (2020)“ die Versorgungssicherheit relevanter Rohstoffe (**Abb. 5**). Dabei wird die wirtschaftliche

Bedeutung spezifischer Rohstoffe anhand deren Wichtigkeit für diverse Endanwendungen und der Performance von möglichen Substituten ermittelt. Weiters wird das Versorgungsrisiko anhand mehrerer Einflussfaktoren (bspw. Importabhängigkeit) berechnet.

Ersichtlich wird vor allem die Bedeutung von weißem Phosphor. Im Jahr 2017 nahm weißer Phosphor bezüglich des Versorgungsrisikos den dritten Platz (hinter leichten und schweren seltenen Erden) ein. Gegenüber dem Jahr 2017 ist im Jahr 2020 das Versorgungsrisiko zwar gesunken, die wirtschaftliche Bedeutung von weißem Phosphor gleichzeitig aber gestiegen.

Phosphatgestein weist eine ähnliche wirtschaftliche Bedeutung wie weißer Phosphor auf, allerdings ist das Versorgungsrisiko wesentlich geringer. Gegenüber dem Jahr 2017 ist hier ebenfalls die wirtschaftliche Bedeutung und in weit geringerem Maße das Versorgungsrisiko gestiegen.

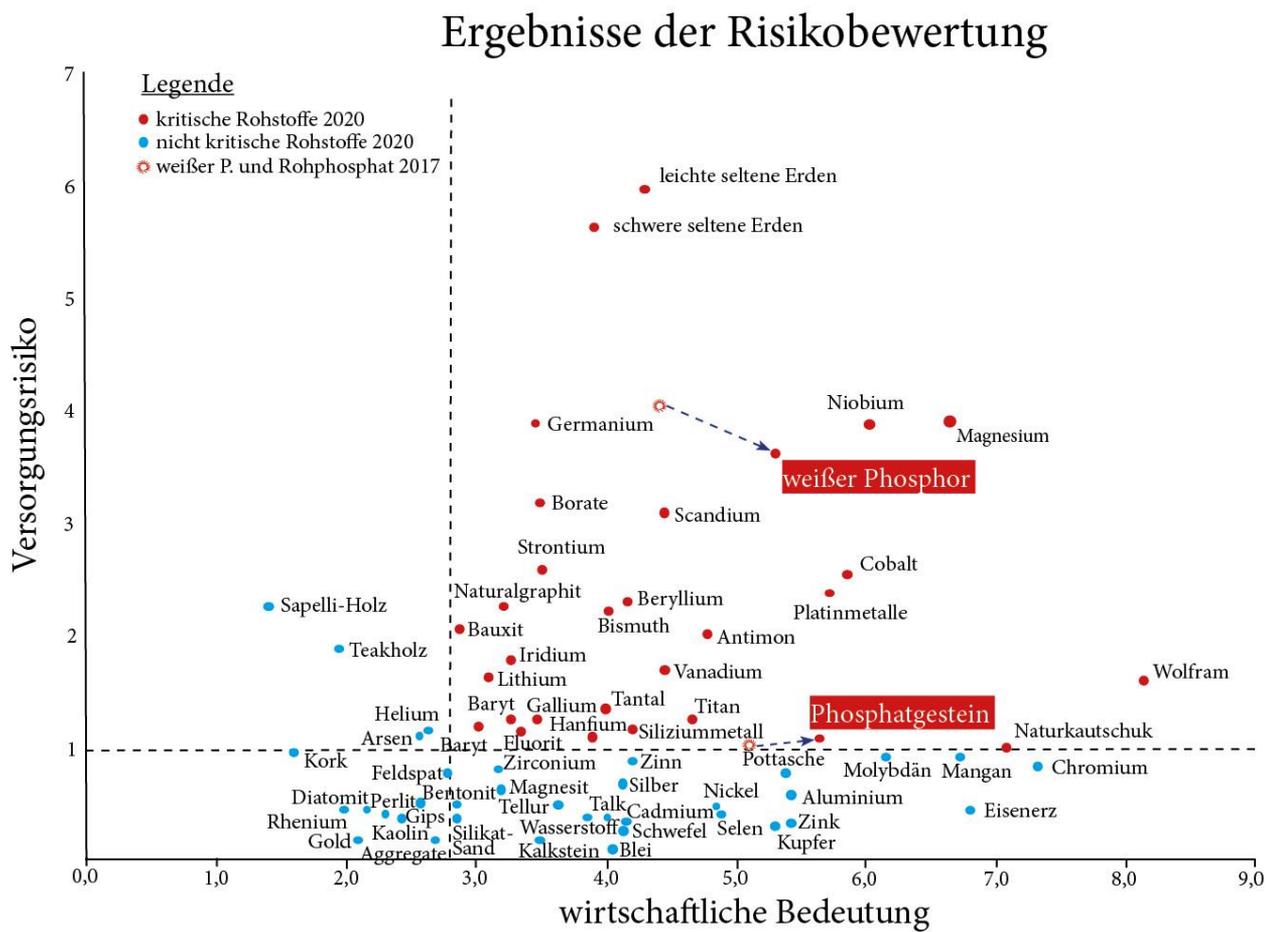


Abbildung 5: Risikoanalyse bzgl. kritischer Rohstoffe der Europäischen Kommission 2020 (2017). Anhand der Parameter "Versorgungsrisiko" und "wirtschaftliche Bedeutung" wird die Kritikalität relevanter Rohstoffe erörtert. Zur Gesamteinschätzung der Kritikalität wird der Achswert bzw. die Länge des Vektors vom Nullpunkt zum Rohstoff addiert und mit 2017 verglichen. Beide Kennzahlen sind dimensionslos (Quelle: eigene Abbildung nach European Commission, 2020).

Abb. 5 zeigt die Kritikalität von weißem Phosphor und von Phosphatgestein. Diese Situation verändert sich laufend durch das Auffinden neuer Lagerstätten. Erst kürzlich entdeckte das Unternehmen Norge

Mining nach eigenen Angaben das vielleicht größte derzeit bekannte Vorkommen von Phosphatgestein in Südwestnorwegen (Phosphat Price, 2021). Eine Erschließung dieser Rohstoffe könnte zu einer zukünftigen Abnahme des Versorgungsrisikos von Europa führen.

3.2 Herstellung von marktfähigen Phosphatgestein

Marktfähiges Phosphatgestein (Rohphosphat) muss einen ausreichend hohen Gehalt an P_2O_5 aufweisen, damit daraus Phosphorsäure, Düngemittel oder elementarer Phosphor hergestellt werden kann. Die weltweiten Phosphatgesteinsreserven werden auf über 300 Milliarden Tonnen geschätzt (U.S. Geological Survey, 2020).

Das gewonnene Roherz wird in der Regel aufbereitet, durch Techniken wie Absieben, Zerkleinern, Waschen, Zyklonierung von Verunreinigungen wie Ton und Sand befreit und dadurch in eine angereicherte Form gebracht. Mittels Flotation wird das angereicherte Phosphat weiter zum Phosphat-Konzentrat (Rohphosphat) aufgearbeitet und getrocknet. Da störende Begleitstoffe lagerstättenspezifisch sind, werden die Roherze im Förderland mit speziellen Verfahren bearbeitet und schließlich als Konzentrate exportiert. Konzentrate weisen einen P_2O_5 -Gehalt von 30 – 38 % auf (zur Phosphor-Erzeugung sind 24 % ausreichend) (BMU, 2007).

Rohphosphat kann direkt in der Düngemittelindustrie eingesetzt werden. Es kann aber auch weißer Phosphor oder technische Phosphorsäure hergestellt werden.

Zu den wichtigsten Unternehmen im Bereich Rohphosphat-Herstellung zählen unter anderem die chinesische Yuantianhua Gruppe, das marokkanische Staatsunternehmen Office Chérifien des Phosphates (OCP), das US-amerikanische Unternehmen Mosaic und der russische Düngemittelhersteller PhosAgro (Killiches *et al.*, 2013).

3.3 Globale Produktionsmengen und Reserven

Die Bezeichnung für phosphathaltige Rohstoffe erfolgt in der Literatur nicht konsistent. Synonym werden oft folgende Begriffe genutzt: Phosphaterz, Rohphosphat, Phosphatgestein, Phosphor-Ressource (Reinhardt, Rettenmaier und Vogt, 2019). Dies führt etwa bei der Abschätzung der vorhandenen Reserven zu teils unterschiedlichen Angaben in der Literatur.

Im Jahr 2019 wurde laut dem U.S. Geological Survey (2020) 240 Mio. t marktfähiges Phosphatgestein produziert. Bis zum Jahr 2023 wird eine Kapazitätserhöhung der globalen Phosphatminen um 20 Mio. t gegenüber dem Jahr 2019 prognostiziert.

Der stärkste Ausbau der Minenkapazitäten findet derzeit in Afrika und im Nahen Osten statt: Die größten Projekte finden sich in Jordanien, Marokko, Saudi-Arabien, Senegal und Togo (U.S. Geological Survey, 2020). Für den globalen Verbrauch von P_2O_5 (Phosphorpentoxid), das in Phosphorsäure, Düngemitteln und anderen Produkten enthalten ist, wird ein Anstieg um 3 Mio. t von 47 Mio. t im Jahr 2019 auf 50 Mio. t im Jahr 2020 erwartet (U.S. Geological Survey, 2020).

Abb.6 zeigt die globale Produktion von marktfähigem Phosphatgestein nach Ländern in Prozent des gesamten jährlichen Produktionsvolumens von rund 240 Mio. t im Jahr 2019.

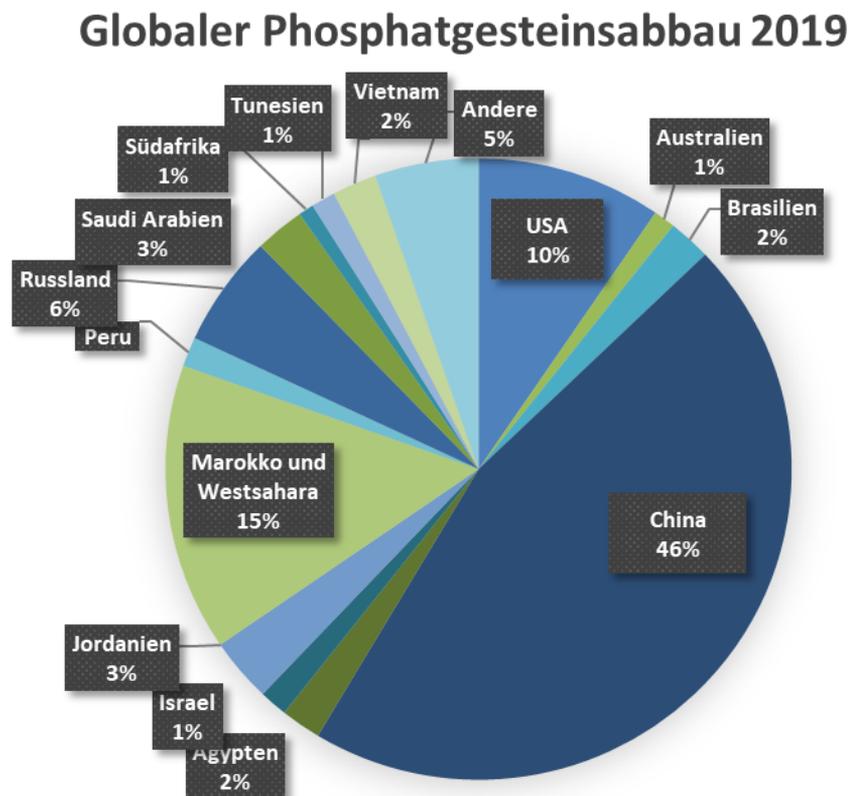


Abbildung 6: Prozentuelle Darstellung der globalen Produktion von marktfähigen Phosphatgestein im Jahr 2019. Gesamt wurden 240 Mio. t hergestellt (Quelle: eigene Darstellung nach U.S. Geological Survey, 2020).

Im Jahr 2019 fand der überwiegende Teil der Produktion in China statt. Hier wurde nach offizieller Statistik 110 Mio. t Rohphosphat (möglicherweise nur Phosphaterz) produziert. China war somit für fast die Hälfte der globalen jährlichen Rohphosphatproduktion verantwortlich. Marokko mit Westsahara lag mit 36 Mio. t an zweiter Stelle gefolgt von den Vereinigten Staaten mit 23 Mio. t.

China und die USA zählen zu den größten Rohphosphatproduzenten, verbrauchen die gesamte Produktionsmenge aber fast ausschließlich im Inland. Zu den größten Exporteuren zählen derzeit Marokko und Westsahara, Jordanien, Peru, Ägypten, Israel und Algerien (AEEP, no date). Trotz der steigenden Produktionskapazitäten der letzten Jahre pendelten die globalen Exporte konstant zwischen 20-30 Mio. t pro Jahr. 2015 wurden 30 Mio. t der weltweiten Rohphosphatproduktion exportiert, was weniger als 15 % der globalen Gesamtproduktionsmenge entspricht (AEEP, no date).

Ungeachtet der aktuellen Produktionsverteilung sind die globalen Phosphat-Reserven völlig anders verteilt (**Abb. 7**). Marokko und Westsahara verfügen demnach mit 72 % über mehr als Zweidrittel der globalen Reserven, was einer Menge von 50.000 Mio. t Rohphosphat entspricht. Insgesamt liegen die derzeitigen Schätzungen bei 69.000 Mio. t Rohphosphatreserven.

In Europa waren Phosphatgesteinsreserven bis vor kurzem nur in Finnland in nennenswertem Ausmaß bekannt. Laut U.S. Geological Survey (2020) sollen hier Reserven lagern, die einer Menge von 1.000 Mio. t marktfähigem Phosphatgestein entsprechen. Das Geological Survey of Finland nennt Phosphatgesteinsreserven in der Höhe von 2.360 Mio. t. Allerdings beträgt der durchschnittliche P_2O_5 Gehalt hier nur 4 % (Ahokas, 2015). Finnland ist derzeit das einzige Land in der EU, in dem Phosphatgestein abgebaut wird. Die European Phosphate Fertilizer Alliance (AEEP) gibt die derzeitige Produktion mit 0,9 Mio. t/a an.

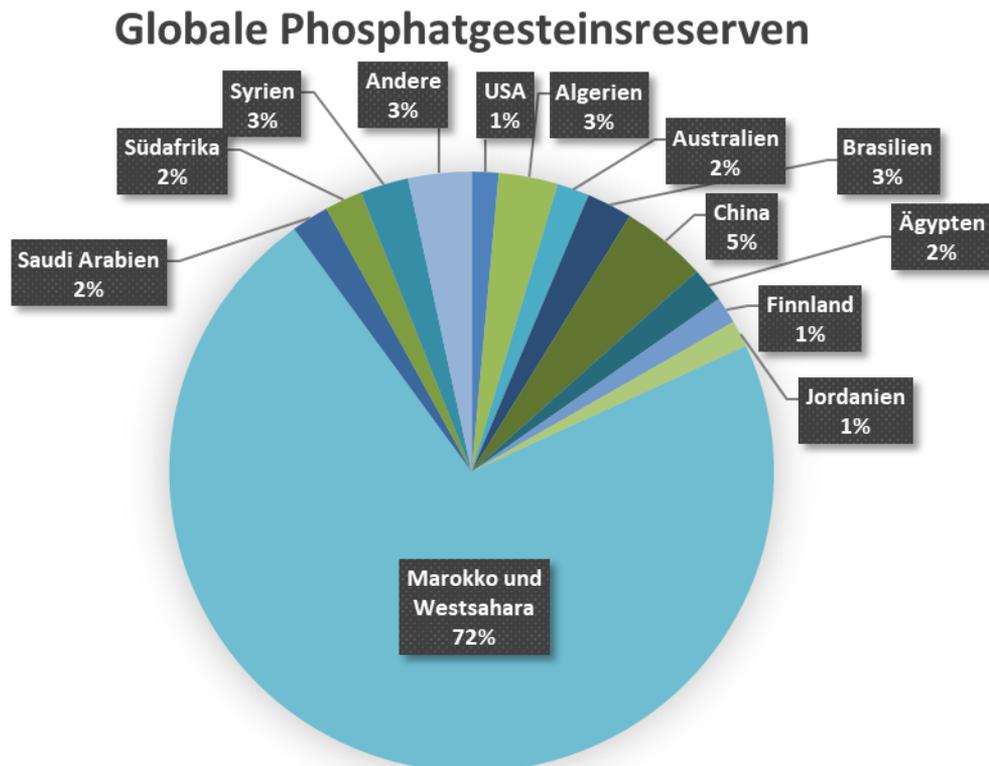


Abbildung 7: Angenommene prozentuelle Verteilung der globalen Phosphatgesteinsreserven. Die Schätzungen belaufen sich auf 69.000 Mio. t marktfähiges Phosphatgestein (Quelle: U.S. Geological Survey, 2020; eigene Darstellung).

Die neu entdeckten Phosphatgesteinsvorkommen in Norwegen sind in **Abb. 7** noch nicht berücksichtigt.

4 Versorgung Europas mit Rohphosphat und Phosphorprodukten

Konzentrierter Phosphor wird größtenteils in Form von Phosphatgestein, Phosphorsäure und Düngemittel in die EU importiert.

Mit einem jährlichen Volumen von ca. 6 Mio. t ist die EU nach Indien der zweitgrößte Importeur von Phosphatgestein. **Tab. 2** zeigt die Hauptbezugsquellen von Rohphosphat der EU (Stand 2015). Marokko, Russland und Algerien waren demnach die Hauptlieferanten von Rohphosphat.

Land	Import-
Marokko	1.630
Russland	1.357
Algerien	702
Israel	506
Südafrika	429
Senegal	350
Ägypten	228
Syrien	195
Summe:	5.397 ≈ 5,40 Mio. t

Tabelle 2: Hauptbezugsquellen der EU für Rohphosphat im Jahr 2015. In Summe wurden 5,4 Mio. t Rohphosphat importiert (Quelle: AEEP, n.d.).

Weiters importiert die EU 1,5 Mio. t Phosphorsäure hauptsächlich aus Israel, Marokko und Westsahara. Darüber hinaus zählt die EU auch zum Nettoimporteure von Monoammoniumphosphat (MAP), Diammoniumphosphat (DAP) sowie Triplesuperphosphat (TSP) (AEEP, no date). **Tab. 3** zeigt die Importmengen von Phosphorsäure, MAP und DAP im Jahr 2015. Phosphorsäure, MAP und DAP wurden demnach hauptsächlich aus Marokko und Russland bezogen.

Produkt	Länder	Importmenge (kt)
Phosphorsäure	Marokko	542
	Russland	442
	Tunesien	131
	Jordanien	117
	Türkei	91
	Weißrussland	26
	Summe:	1349 ≈ 1,35 Mio. t
DAP	Marokko	543
	Russland	442
	Tunesien	131
	Jordanien	117
	Türkei	91
	Ägypten	37
	Weißrussland	26
	Summe:	1387 ≈ 1,39 Mio. t
MAP	Russland	335
	Marokko	143
	Jordanien	36
	Israel	23
	China	17
Summe:	554 ≈ 0,55 Mio. t	

Tabelle 3: Importmengen von Phosphorsäure DAP und MAP im Jahr 2015 (Quelle: AEEP, n.d.).

Aus den Tabellen wird ersichtlich, dass Europa derzeit fast zur Gänze von außereuropäischen Importeuren abhängig ist. Deshalb wird in jüngster Vergangenheit vermehrt nach alternativen Bezugsquellen gesucht.

Die Schweiz und Deutschland versuchen durch ein wirkungsvolles Phosphatrecycling die bestehenden Versorgungsrisiken zu entschärfen. Als wichtigste heimische Rohstoffquelle gilt kommunaler Klärschlamm, der neben Tiermehlen die mengenmäßig bedeutendste anthropogene Rohstoffquelle für Phosphat darstellt (Greb *et al.*, 2016).

Die globale Phosphatindustrie ist ein stark vertikal integrierter Wirtschaftszweig, das heißt die meisten Phosphatdüngemittelproduzenten engagieren sich selbst im Bergbau und sichern sich somit ihre Rohstoffversorgung. Nur 30 % der Phosphatdüngemittelhersteller sind auf den Kauf von Rohphosphat oder Phosphorsäure angewiesen (Killiches *et al.*, 2013). Das belgische Unternehmen Prayon, das mit einem Marktanteil von 50 % der größte Hersteller von Phosphorsäure ist, wird beispielsweise zu gleichen Teilen von der belgischen Société Régionale d'Investissement de Wallonie und der marokkanischen OCP gehalten. Bei letzterem handelt es sich um einen marokkanischen Staatsbetrieb, der nicht nur Phosphorprodukte herstellt, sondern auch über Phosphatminen verfügt und somit den Rohstoff bereitstellt. Auch das kasachische Unternehmen Kazphosphate verfügt sowohl über die Infrastruktur zur Herstellung von Phosphorprodukten als auch über Minen zum Abbau von phosphathaltigem Gestein.

4.1 Phosphor in Österreich

Österreich besitzt keine eigenen Phosphatgesteinsreserven und ist somit zu 100 % von Importen abhängig (Egle *et al.*, 2016). Das meiste Rohphosphat für Österreich kommt aus Marokko und Westsahara und wird über Slowenien geschifft.

Von Egle *et al.* (2014a) wurde eine Studie zur Phosphorbilanz Österreichs veröffentlicht. Dabei wurde eine Stoffflussanalyse durchgeführt und sämtliche nationalen Phosphor-Flüsse analysiert. Für die zugrundeliegenden Erhebungen wurden alle Phosphorverbindungen in elementaren Phosphor (P) umgerechnet.

Dabei zeigte sich, dass Österreich mit 70.000 t Phosphor jährlich deutlich mehr Phosphor importiert als exportiert (52.000 t). Die Differenz akkumuliert sich in der Land- und Forstwirtschaft und in der Abfallwirtschaft. Der Hauptteil des importierten Phosphors entfällt auf Rohphosphate bzw. Mineraldünger (48.000 t/a). Ein nicht unbeträchtlicher Anteil von 32.000 t/a wird als Mineraldünger exportiert (Egle, Zessner und Rechberger, 2014a).

Mit Ausnahme von Wirtschaftsdünger in der Landwirtschaft (Gülle) erfolgt die Nutzung von Phosphor auch in Österreich derzeit hauptsächlich linear (Egle *et al.*, 2016), eine Kreislaufführung des Rohstoffs ist kaum vorhanden. Die vorhandenen sekundären Phosphorquellen, die einem Rohstoffrecycling zugeführt werden könnten, bleiben ungenutzt.

Kommunaler Klärschlamm mit einer P-Fracht von 6.600 t/a gefolgt von Tiermehl (4.500 t/a) sind die größte Sekundärphosphorquellen in Österreich. Das entspricht ca. 68 % des jährlich in Form von Mineraldünger (16.300 t P/a) in der Landwirtschaft verbrauchten Phosphors (Egle, Zessner und Rechberger, 2014a).

4.1.1 Phosphorbedarf der österreichischen Industrie

Die größten industriellen Verbraucher von Phosphaten in Österreich sind mit Abstand die Düngemittelproduzenten Timac Agro und Borealis AG. Ansonsten werden Phosphate in Österreich hauptsächlich

im Metalltreatment, der Wasseraufbereitung, bei der Reinigungsmittelerzeugung und im Lebensmittelbereich eingesetzt. Nach Aussagen eines österreichischen Chemiedistributors wird vornehmlich 75 %ige Phosphorsäure an industrielle Abnehmer verkauft.

Tab. 4 gibt Auskunft über die Importe von Phosphorprodukten (exklusive Rohphosphat) im Jahr 2019 (Statistik Austria, 2021). Dabei wird ersichtlich, dass der österreichische Markt eher klein ist. Der Gesamtwert der Importe betrug lediglich ca. 25, 1 Mio. Euro. Von besonderem Interesse in Bezug auf das Phosphorrecycling sind dabei Phosphorsäure und weißer Phosphor (elementarer Phosphor), da diese die Ausgangsprodukte für alle weiteren phosphathaltigen Chemikalien darstellen.

Phosphorsäure wird durchschnittlich zu einem Preis von ca. 700 €/t importiert. Zu beachten ist, dass hier nicht nach unterschiedlichen Qualitäten unterschieden wird. Es ist anzunehmen, dass qualitativ hochwertige Produkte deutlich höhere Preise erzielen. Die Importmenge belief sich im Jahr 2019 auf ca. 11,5 Mio. t. Daraus ergibt sich ein Gesamtwert der im Jahr 2019 importierten Phosphorsäure von ca. 8,3 Mio. Euro.

Elementarer Phosphor war mit einem Durchschnittspreis von ca. 10.000 €/t die mit Abstand hochpreisigste Importware der angeführten Produkte aus dem Jahr 2019. Insgesamt wurden davon ca. 4,9 t importiert.

Die relativ geringen Mengen bzw. die niedrigen Preise begrenzen den Investitionsspielraum für ein ökonomisches Phosphorrecycling. Doch die Preise für Phosphorprodukte unterliegen starken Schwankungen und aus Sekundärphosphor produzierte phosphorhaltige Chemikalien können potenziell auch exportiert werden.

Zolltarifnummer / Warenbezeichnung	Importmenge (kg)	Wert (€)	Euro/kg	technische Anwendungsbeispiele
28352990 Andere Phosphate	1 985 214	2 011 448	1,01	
28352910 Triammoniumphosphat	124 235	298 805	2,41	Flammschutz
28352200 Mononatriumdi- od. Dinatriumhydrogenphosphat	264 868	821 734	3,10	Nahrungsmittelindustrie
28352930 Trinatriumphosphat	780 045	856 975	1,10	Korrosionsschutz
28352400 Kaliumphosphate	1 886 409	2 861 694	1,52	Nahrungsmittelindustrie
25101000 Ca-Phosphate, natürl. Phosphatkreide, ungemahlen	36 397 529	3 337 532	0,09	Futtermittelherstellung
25102000 Ca-Phosphate, natürl. Phosphatkreide, gemahlen	9 592 798	1 311 452	0,14	Futtermittelherstellung
28092000 Phosphorsäure; Polyphosphorsäuren, chem. uneinheitlich	11 547 795	8 310 677	0,72	siehe oben
28047000 Phosphor	4 891	51 885	10,61	siehe oben
31031100 Superphosphate, Diphosphorpentaoxid=>35 %	8 001 641	2 500 579	0,31	Trocknungsmittel
31031900 Andere Superphosphate	2 096 569	417 776	0,20	Dünger
29041000 Deriv.,Salze und Ethylester d.C-wasserst.;nur Sulfogr.	2 157 008	2 348 052	1,09	Kunststoffadditive
Summe:	74 839 002	25 128 609		

Tabelle 4: Importstatistik von phosphathaltigen Chemikalien aufgeschlüsselt nach Zolltarifnummern aus dem Jahr 2019. Rot umrandet sind Phosphorsäure und Phosphor (weißer Phosphor), da sie die Ausgangsprodukte für alle weiteren phosphorhaltigen Chemikalien darstellen und prinzipiell auch aus Sekundärrohstoffen hergestellt werden könnten (Quelle: Eigene Darstellung nach Statistik Austria, 2021).

4.1.2 Klärschlamm: Aufkommen und Verteilung in Österreich

Wie in **Kap. 4.1.1** ausgeführt, handelt es sich bei kommunalem Klärschlamm um den Abfallstrom, der die größte Senke für Phosphor in Österreich darstellt. Im Folgenden werden daher die österreichischen Klärwerke und das jährliche Klärschlammaufkommen näher betrachtet.

Größenverteilung der Kläranlagen Österreichs:

Laut dem Lagebericht „Kommunales Abwasser“ vom Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus waren im Jahr 2016 insgesamt 1.883 Kläranlagen $EW_{60} > 50$ in Österreich registriert. Weiters gibt es in Österreich rund 27.500 Kleinkläranlagen (Ausbaukapazität $\leq 50 EW_{60}$), die eine Ausbaukapazität von 0,26 Mio. EW_{60} aufweisen (Langergraber *et al.*, 2018). Die Kapazität dieser Anlagen ist, bezogen auf die Ausbaukapazität aller österreichischen Abwasserreinigungsanlagen, mit weniger als 1 % von untergeordneter Bedeutung. **Tab. 5** liefert einen Überblick über die Verteilungsverhältnisse, die bei der Entwicklung eines Managementkonzepts zur Phosphorrückgewinnung eine nicht unwesentliche Rolle spielen, da der Großteil des Klärschlammes in wenigen Anlagen anfällt.

Größenklasse ($EW_{60} > 50$)	Anzahl der Kläranlagen	Prozentueller Anteil an der Kläranlagenzahl [%]	Ausbaukapazität [EW_{60}]	Prozentueller Anteil an der Ausbaukapazität [%]
51-1.999	1.248	66,3	469.053	2,1
2.000-10.000	368	19,6	1.743.393	7,9
10.001-15.000	46	2,4	595.225	2,7
15.001-150.000	202	10,7	8.947.908	40,6
>150.000¹⁾	19	0,01	10.280.867	46,7
Summen	1.883	100	22.036.446	100

Tabelle 5: Übersicht über die derzeitige Ausbaukapazität der Kläranlagen in Österreich. EW_{60} gibt den organischen Einwohnerwert an. Bei einem organischen Einwohnerwert von EW_{60} wird ein biochemischer Sauerstoffbedarf von 60g/d BSB5 einer Einzelperson angenommen (Quelle: Überreiter *et al.*, 2018). 1) Berücksichtigung von drei großen Abwasserbehandlungsanlagen mit überwiegend industriellen Abfall.

Phosphorentfernung aus Kläranlagen (Anforderungen und deren Erfüllung):

Nach Art. 5 Abs. 8 der Richtlinie 91/271/EWG ist für Anlagen $> 10.000 EW_{60}$ eine Entfernung von Phosphor von mindestens 80 % (bezogen auf die Einzelanlagen) zu gewährleisten. Bei einem Gesamtgebietsnachweis (bezogen auf eine Gebietseinheit) mit Berücksichtigung aller Anlagen muss über das gesamte Gebiet eine Entfernung von Phosphor zu mindestens 75 % erfolgen (Überreiter *et al.*, 2018). Die Reinigungsleistung der kommunalen Kläranlagen $> 50 EW_{60}$ für Gesamtphosphor betrug im Jahr 2016 90 %. Somit wurden die Anforderungen übererfüllt (Überreiter *et al.*, 2018).

Klärschlammaufkommen, Verwertung und Beseitigung:

Klärschlamm kann in der Landwirtschaft eingesetzt, verbrannt oder einer sonstigen Verwertung (vor allem als kompostierter Klärschlamm im Landschaftsbau) zugeführt werden. In der Vergangenheit wurde Klärschlamm auch deponiert.

Tab. 6 zeigt, dass die thermische Verwertung von Klärschlamm stark zugenommen hat und mit nunmehr 53 % den Großteil der Verwertung ausmacht. Die Deponierung hat hingegen stark abgenommen und betrug im Jahr 2016 nur mehr 0,03 % der Verwertung. Das lässt sich damit erklären, dass seit dem Inkrafttreten der Deponieverordnung 2008 (BGBl. II Nr. 104/2014) unbehandelter bzw. lediglich entwässerter Klärschlamm nicht mehr deponiert werden darf. Bei der landwirtschaftlichen Verwertung sowie der Kategorie „Sonstige Verwertung/ sonstige Entsorgung“ ist kein klarer Trend erkennbar.

Jahr	Summe KS- Aufkommen TS (t)	Verwertung in der Landwirt- schaft		Deponierung		Verbrennung		Sonstige Verwer- tung, sonstige Entsorgung	
		t TS	%	t TS	%	t TS	%	t TS	%
1995	187.430	42.760	23	58.240	31	64.020	34	22.410	12
2000 ¹⁾	221.365	37.322	17	41.670	19	69.344	31	73.030	33
2006 ¹⁾	254.596	39.480	16	24.914	10	98.272	39	91.930	36
2016 ²⁾	237.938	48.313	20	63	0,0 3	127.248	53	62.315	26
2018 ³⁾	234.500	48.200	20		k.A.	126.100	53	62.800	27

Tabelle 6: Darstellung der Entwicklung des Klärschlammaufkommens sowie dessen Verwertung (Landwirtschaft, Deponierung, Verbrennung, sonstige Verwertung/sonstige Entsorgung) dar. TS = Trockensubstanz, 1) In der Aufstellung ist nur der kommunale Klärschlammanteil der industriellen Kläranlagen mit kommunalen Anteil enthalten, nicht aber der industrielle Klärschlammanteil, 2) Übermittlung von Summenmeldungen für kommunale Kläranlagen ≥ 2.000 EW₆₀ durch die Bundesländer. Enthält keine Gewerbeanteile, 3) (Quelle: BMK, 2020; BMNT, 2018).

Im Jahr 2016 entfielen 238.000 t TS Klärschlamm auf Kläranlagen mit einer Ausbaupazität ≥ 2.000 EW₆₀. Das entspricht etwa 98 % des Gesamtaufkommens (Überreiter et al., 2018). Kommunaler Klärschlamm ist mit ca. 6.600 t P/a somit jener Abfallstrom, dessen Phosphorfracht am größten ist.

Zusammenfassend wird also ersichtlich, dass die österreichischen Klärwerke sehr effektiv darin sind, Phosphor aus dem Abwasserstrom zu entfernen. Das wiederum macht Klärschlamm zu jenem Abfallstrom, der die größte Senke für Phosphor darstellt. Da sich die Ausbaupazität der österreichischen Klärwerke sehr heterogen zeigt, ist auch das Klärschlammaufkommen entsprechend unterschiedlich verteilt. Daraus folgt, dass nicht für alle Klärwerke dieselben Maßnahmen zur Phosphorrückgewinnung zielführend sein müssen.

4.2 Sekundärphosphor aus Klärschlamm

Klärschlamm stellt die größte Phosphorsenke dar und ist ein kritischer, nicht substituierbarer Rohstoff, von dem in Österreich keine nennenswerten mineralischen Ressourcen vorhanden sind. Strengere Bestimmungen seitens der Abfallwirtschaft machen ein Umdenken in der Klärschlammbewirtschaftung notwendig.

4.2.1 Phosphorrückgewinnung

Phosphorrückgewinnungsverfahren sind Techniken, mit denen Phosphor aus bisher ungenutzten Sekundärrohstoffen rückgewonnen werden kann. Ziel ist es, eine Verwertung direkt in der Landwirtschaft als Dünger, in der Düngemittelindustrie oder in der Phosphorindustrie zu ermöglichen. Phosphorrückgewinnungsverfahren zeichnen sich dadurch aus, dass mit ihnen eine gezielte Schadstoffentfrachtung bzw. Wertstoff-Schadstoff-Trennung vollzogen wird. Die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung bzw. die Verwendung von (aufgeschlossener) Klärschlammasche als Düngemittel wird nicht als Verfahren zur Phosphorrückgewinnung gewertet, da Schadstoffe nicht abgetrennt werden. Als Rezyklate werden die mit den Phosphorrückgewinnungsverfahren gezielt erzeugten phosphorhaltigen Erzeugnisse bezeichnet. Klärschlamm und Klärschlammasche sind keine Rezyklate in diesem Sinne (BMU, 2015).

Unterschiedliche Verfahrensansätze zur Rückgewinnung von Phosphor aus phosphorreichen Abfällen wurden bereits entwickelt, viele sind bereits einsatzfähig und teils auch großtechnisch umgesetzt (Egle *et al.*, 2016). Generell kann zwischen einer Rückgewinnung aus dem Schlammwasser, dem Klärschlamm sowie der Klärschlammasche unterschieden werden, wobei jeder Ansatz spezifische Vor- und Nachteile mit sich bringt (Egle, Rechberger und Zessner, 2014b). In der Studie von Egle *et al.* (2014b) „Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser“ werden unterschiedliche Rückgewinnungstechnologien analysiert und nach technischen, ökonomischen und ökologischen Kriterien bewertet.

Als aktuell vielversprechendste Option gilt die Klärschlammmonoverbrennung mit anschließender Phosphorrückgewinnung aus der Asche. Derzeit ist für Österreich eine Monoverbrennungsstrategie von Klärschlamm mit vier zentralen Monoverbrennungsanlagen im Gespräch. Klärschlamm wird dabei zentral monoverbrannt und Phosphor aus der Asche rückgewonnen. Um ein derartiges Managementkonzept ökonomisch und ökologisch umzusetzen, müssen unter anderem logistische Herausforderungen bewältigt werden.

4.2.2 Geschäftsmodelle

Eine große Herausforderung für ein effektives Phosphorrecycling, besteht darin, die Lücke zwischen Rückgewinnung und Recycling zu schließen (**Abb. 8**), denn dafür müssen Wertschöpfungsketten verknüpft werden. Eine Rohstoffrückgewinnung alleine ermöglicht noch kein effizientes Recycling (Kabbe, 2019).

Rückgewinnung \neq Recycling

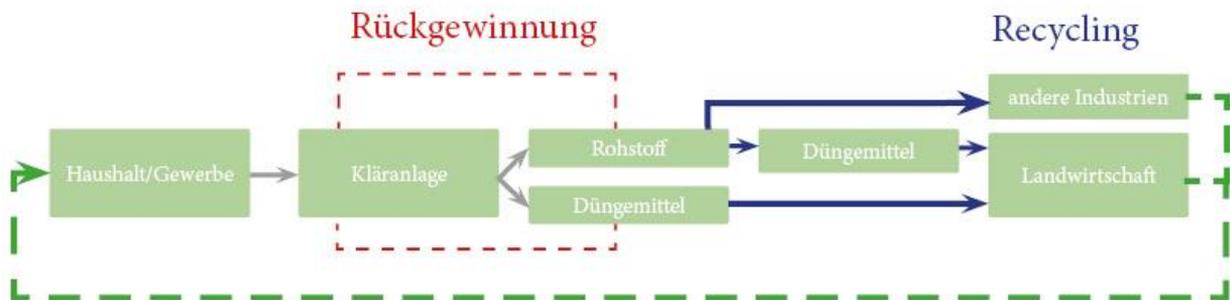


Abbildung 8: Rückgewinnung kann nicht mit Recycling gleichgesetzt werden. Effektives Recycling wird erst möglich, wenn entsprechende Wertschöpfungsketten vorhanden sind (Quelle: Eigene Abbildung verändert nach Kabbe, 2019).

Zur Umsetzung eines effektiven Recyclings müssen langfristig tragfähige Geschäftsmodelle für die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm etabliert werden. Es braucht die Abschätzung zukünftiger Produkterlöse und eine Vermarktungsstrategie für die Produkte. Prinzipiell ist entweder eine Direktvermarktung von Recyclingdünger bzw. Phosphorprodukten durch den Klärwerksbetreiber bzw. Dritte oder eine direkte Einspeisung in die Düngemittelindustrie bzw. Phosphatindustrie möglich (Kraus, 2020).

Unter Direktvermarktung werden alle Prozesse verstanden, bei denen das Recyclingphosphat nach dem Rückgewinnungsprozess chemisch nicht verändert wird, sondern lediglich die physikalischen Eigenschaften angepasst werden. Dies impliziert kommerzielle Qualitätskriterien für Düngemittel, wie u.a. Oberflächentextur, durchschnittlicher Korndurchmesser, Korngrößenverteilung, Fließverhalten, Feuchtigkeitsgehalt, Schüttdichte, Kornfestigkeit und Form. Ein Beispiel für die Direktvermarktung wäre Struvit, ein Sekundärphosphor, der direkt aus dem Schlammwasser rückgewonnen wird (Kraus, 2020).

Die Möglichkeit, Sekundärphosphor in die Produktionsprozesse der Düngemittel- oder Phosphatindustrie einzubringen, ist für bestimmte Zwischenprodukte, vor allem Calciumphosphate und Phosphorsäure, eine attraktive Option, da dies marktabhängige, aber einigermaßen kalkulierbare Abnahmepreise garantiert. Calciumphosphate könnten alternativ zu Rohphosphat eingesetzt werden und diese teilweise substituieren. Im Ergebnis würden kommerzielle Düngemittel mit verschiedenen Nährstoffverhältnissen aus sekundären und konventionell abgebauten Phosphaten entstehen (Kraus, 2020).

Neben der technischen Umsetzbarkeit und effektiven Vermarktungsstrategien sollte ein nachhaltiges Sekundärrohstoffmanagement weitere Einflussfaktoren und Stakeholder mitberücksichtigen (**Kap. 1**). Wird eine zentrale Monoverbrennung von Klärschlamm angestrebt, so ist beispielsweise auch die Beantwortung logistischer Fragestellungen entscheidend, um die ökologische Sinnhaftigkeit des Phosphorreyclings zu gewährleisten (Kretschmer, Zingerle und Ertl, 2018). Aufgrund der Komplexität der Thematik wurde vom BMK die Studie „StraPhos - Zukunftsfähige Strategien für ein österreichisches Phosphormanagement“ beauftragt (Amann, 2021).

5 Sekundärphosphor für die chemische Industrie

Das technische Know-how für den Einsatz von Sekundärphosphor ist für viele Anwendungsbereiche bereits gegeben. Erste Anlagen im großen Maßstab werden gerade gebaut oder wurden vor kurzem fertiggestellt.

5.1 Einsatzmöglichkeiten von Sekundärphosphor

Bezüglich der Einsatzmöglichkeiten von recyceltem Phosphor gibt es technisch kaum Einschränkungen. Auch die Produktion von Phosphorsäure in Lebensmittelqualität aus Klärschlamm ist bereits technisch machbar. Neben bestehenden rechtlichen Hürden wäre allerdings mit einem Akzeptanzproblem bei Kund:innen zu rechnen.

Damit ergeben sich theoretisch unterschiedlichste Einsatzbereiche für rückgewonnenen Phosphor in verschiedensten Industrien, da das Element in so vielen Fertigungsprozessen eine kritische Rolle spielt (**Kap. 2 und 3**) (Nättorp *et al.*, 2019). **Abb. 9** zeigt, wie eine innovative Wertschöpfungskette auf Basis von Sekundärphosphor aussehen könnte. Damit Sekundärphosphor als Rohstoff attraktiver wird, muss jedoch die bestehende Phosphorwertschöpfungskette neu gedacht werden.

Zur Implementierung und Weiterentwicklung einer innovativen Phosphorwertschöpfungskette sollten dabei folgende technologische Innovationen forciert werden (A. de Boer, Wolzak und Slotweg, 2019):

- Hocheffiziente Rückgewinnung von Phosphor aus sekundären Phosphorquellen
- Innovativer Nasssäureprozess, um rückgewonnenen Phosphor zu Grünsäure (Roh-Phosphorsäure) weiterverarbeiten zu können
- Energieeffiziente und umweltschonende carbothermische Reduktion von Grünsäure zu weißem Phosphor (P_4)
- Neue Prozesse zur Herstellung von hochwertigen phosphorhaltigen Spezialchemikalien

Nättorp *et al.* (2019) nennen als wichtigsten Schritt zur Umsetzung dieser neuen Wertschöpfungskette die Verwirklichung einer disruptiven Technologie zur Herstellung von P_4 mit minimalem Energieeinsatz und optimierter Ökobilanz.

Innovative Sekundärphosphor Wertschöpfungskette

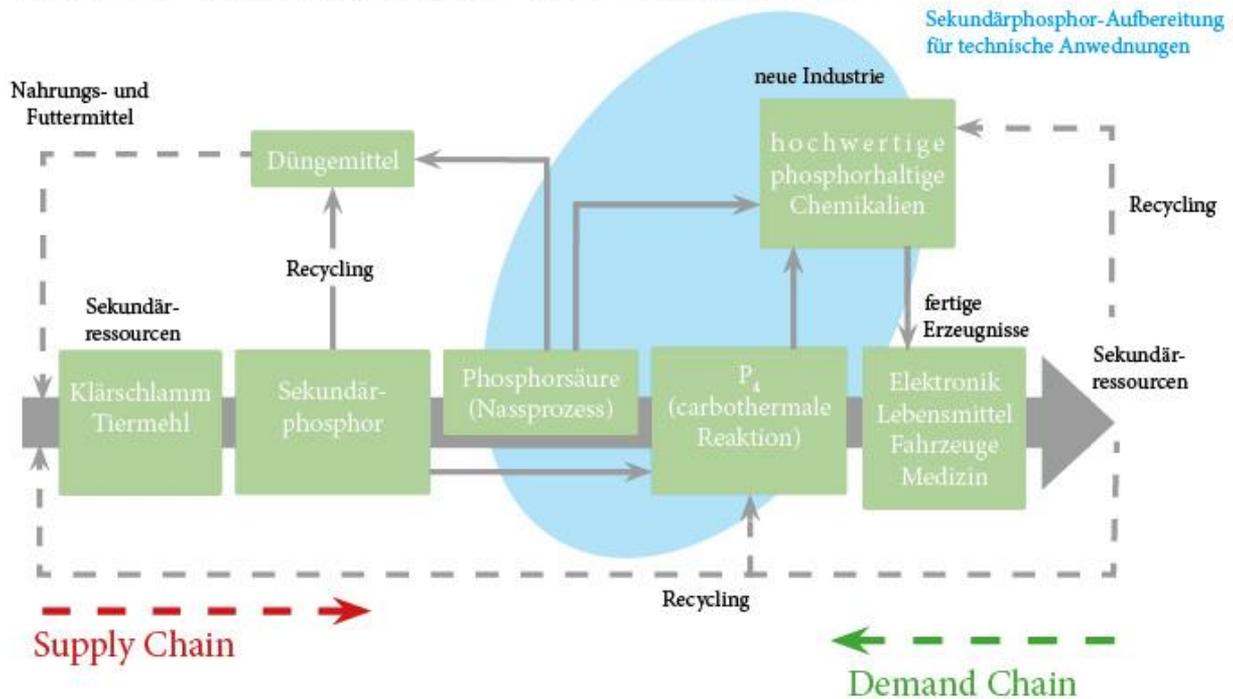


Abbildung 9: Potenziale einer neuen innovativen Wertschöpfungskette ausgehend von Sekundärphosphor (Quelle: eigene Abbildung nach Nättorp et al., 2019)

Gegenwärtig wird hauptsächlich der Einsatz von rückgewonnenem Phosphor in der Düngemittelindustrie thematisiert. Ein Vorteil von Sekundärphosphor sind die meist geringeren Cadmiumgehalte im Vergleich zu Rohphosphat. Mit der neuen Düngemittelverordnung der EU werden 60 mg Cd/kg P₂O₅ vorgeschrieben (DüV, 2020). Eine weitere Verschärfung der gesetzlichen Grenzwerte würde Sekundärphosphor als Rohstoff attraktiver machen.

5.1.1 Aktuelle Projekte in Österreich

Aktuelle Projekte in Österreich fokussieren hauptsächlich auf den Einsatz von Sekundärphosphor in der Düngemittelindustrie. Hier ist der inländische Bedarf der Industrie bei weitem am größten und der Einsatz des Sekundärrohstoffes am einfachsten umsetzbar.

Borealis setzt in ihrem Werk in Österreich derzeit 5-10 % Klärschlammasche direkt in der Düngemittelerzeugung ein. 12.000 t Klärschlammasche der Wiener Kläranlagen können so jährlich recycelt werden. Wien Energie arbeitet weiters an einer Verwertungsstudie, um weitere Einsatzmöglichkeiten für Klärschlammasche zu eruieren. Da die direkte Beimischung von Klärschlammasche mengenmäßig limitiert ist, arbeitet man daran, diese für die Düngemittelindustrie aufzubereiten – etwa in Form von Calciumphosphat oder Phosphorsäure (mündliche Auskunft, Egle, 2021).

Im Bereich der Technologieentwicklung wird gegenwärtig das Verfahren ILS (Ionentauscher-Loop-Stripping) erprobt. Dabei handelt es sich um ein Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Schlammwasser (mündliche Auskunft, Ellersdorfer, 2020). Rückgewinnungsverfahren aus dem Schlammwasser gibt

es bereits mehrere. Das Verfahren ILS wird im Vergleich zu den anderen Verfahren als günstiger bzw. als ausgereifter eingeschätzt. Prognosen zu den Produktionskosten und Produktpreisen können noch nicht abgegeben werden (Stand 2020). Neben Phosphor kann mit dem Verfahren auch Stickstoff abgetrennt werden. Laborversuche lassen den Rückschluss zu, dass, bezogen auf die Menge im Trübwasser, 90-95 % Abscheidung von Stickstoff und 80-90 % Abscheidung von Phosphor erreicht werden kann (mündliche Auskunft, Ellersdorfer, 2020). Allerdings findet sich der Großteil des Phosphors im Klärschlamm und nicht im Schlammwasser. Dennoch können diese und ähnliche Technologien von großem Nutzen sein, da sie verfahrenstechnische Vorteile mit sich bringen (Vermeidung von Inkrustationen) (Egle, Rechberger und Zessner, 2014b).

5.1.2 Erste großtechnische Anlagen in Deutschland

In Deutschland sind erste Anlagen zur Herstellung von Sekundärphosphor bereits in Betrieb. So verwirklichte Remondis in Hamburg die erste großtechnische Anlage zum Recycling von Phosphor aus Klärschlammasche. Mithilfe des TetraPhos®-Verfahrens wird Phosphorsäure hergestellt, die laut Hersteller eine 60 % besser Ökobilanz aufweist als konventionell hergestellte Phosphorsäure. Neben Phosphorsäure fallen im Herstellungsprozess auch Gips sowie Eisen- und Aluminiummetalle an, die ebenso recycelt werden können. Gips kann in der Baustoffindustrie verwertet werden, Eisen- und Aluminiumsalze kommen unter anderem als Fällungsmittel zur Abwasserreinigung zum Einsatz (Remondis, 2021). Das Unternehmen arbeitet auch daran, Phosphorsäure aus Sekundärphosphor als Korrosionsschutz in der Automobilindustrie einzusetzen.

Im Zuge des Projekts Seraplant entsteht gerade eine Phosphorrecyclinganlage im Industriemaßstab in Sachsen-Anhalt. Hier sollen jährlich 60.000 t Phosphatdünger produziert werden (Seraplant, 2020).

5.2 Phosphorrecycling in Österreich – Herausforderungen und Lösungsansätze

Obwohl seit Jahren an Technologien zur Phosphorrückgewinnung geforscht wird, fehlt bisher die erfolgreiche großtechnische Umsetzung. In Österreich wird derzeit vor allem Monoverbrennung mit Phosphorrückgewinnung aus der Asche forciert. Raumplanung und Logistik spielen dabei eine wichtige Rolle, denn Verbrennungsanlagen sind zentral, Kläranlagen dezentral angeordnet.

An der BOKU wurde die logistische Komponente des Themas Phosphorrecycling verstärkt thematisiert. Von besonderem Interesse war dabei der ländliche Raum. Hier besteht die Herausforderung, in Ergänzung zu den vier geplanten Monoverbrennungsanlagen, adäquate Systeme und Technologien zu implementieren, die auch auf kleineren Anlagen eine Klärschlammbehandlung sowie eine Rohstoffrückgewinnung ermöglichen (mündliche Auskunft, Ertl und Kretschmer, 2020).

Im Westen Österreichs ist die Errichtung weiterer Verbrennungsanlagen politisch kaum durchsetzbar. Vorarlberg exportiert gegenwärtig den Großteil des anfallenden Klärschlammes nach Bayern, wo eine

Mitverbrennung stattfindet. Dadurch wird Phosphor exportiert. Innsbrucker Klärschlamm wird derzeit nach Oberösterreich gefahren.

Muss Klärschlamm mit dem LKW transportiert werden, ist für den effizienten Transport ein möglichst trockener Klärschlamm wünschenswert, da nicht entwässerter Klärschlamm bis zu 70 % Wasser enthält. In Innsbruck steht eine der 10 größten Kläranlagen in Österreich mit ca. 600.000 EW. Hier wurde zusätzlich zur Klärschlammmentwässerung eine Klärschlamm Trocknung installiert. Dadurch konnte man das Klärschlammvolumen auf ca. ein Drittel reduzieren (mündliche Auskunft, Ertl und Kretschmer, 2020). Untersuchungen der BOKU zeigen, dass bei langen Transportwegen die Trocknung trotz zusätzlichem Aufwand energetisch sinnvoll ist (mündliche Auskunft, Ertl und Kretschmer, 2020).

Die Verbrennung selbst ist ebenfalls energieintensiv. Hier ist es wichtig, dass die produzierte Wärme auch entsprechend genutzt wird, indem man diese beispielsweise in ein Fernwärmenetz einspeist. Dies wirkt sich auch positiv auf die anfallenden Kosten aus, da es möglich ist, mit dem Verkauf von Wärme zusätzliche Erträge zu erzielen (mündliche Auskunft, Ertl und Kretschmer, 2020).

Es ist wahrscheinlich, dass es nicht eine Technologie gibt, die in jedem Kontext sinnvoll eingesetzt werden kann, sondern dass ein Bündel an unterschiedlichen Technologien notwendig ist, um eine optimale Kreislaufführung des Phosphors bei gleichzeitiger Schadstoffentfrachtung zu gewährleisten (mündliche Auskunft, Ellersdorfer, 2020).

5.2.1 Schnittstelle Düngemittelindustrie

In der Düngemittelindustrie ist die Konkurrenzfähigkeit von sekundärem Phosphor meist noch nicht gegeben. Ein Hindernis besteht darin, dass der Sekundärrohstoff oftmals zu viel Sand enthält, der die Produktionsanlagen zerstört bzw. die Instandhaltungskosten erhöht. Ein Ansatzpunkt, um den Störstoff Sand zu reduzieren, liegt in der Kläranlage selbst. Ein adaptierter Abwasserreinigungsprozess könnte die Sandfracht verringern.

Schwermetallbelastungen der Asche können ein weiteres Problem darstellen. Hier bestünde die Möglichkeit, die Klärschlammasche entsprechend aufzubereiten. Ein anderer Ansatzpunkt zur besseren Verarbeitbarkeit von rückgewonnenem Phosphor in der Düngemittelindustrie ist die Vorschaltung einer Aufbereitungsstufe im Düngemittelherstellungsprozess selbst.

Optimierungspotenziale, um Sekundärphosphor konkurrenzfähiger zu machen, liegen damit im Klärwerk, in der Ascheaufbereitung und auch in der Verfahrenstechnik der Düngemittelindustrie. Idealerweise werden diese Stellschrauben gut aufeinander abgestimmt.

Auch mobile Lösungen (DenkGrün, Green Sentinel) zur Klärschlammbehandlung sind am Markt erhältlich. Diese erfüllen derzeit jedoch noch nicht die Anforderungen der Düngemittelindustrie.

Als verbesserungswürdig wird seitens der Industrie die Abstimmung mit den Behörden angesehen. Hier ist ein verstärkter Informationsaustausch, auch über Bundesländergrenzen hinweg, notwendig, um den Einsatz von rückgewonnenem Phosphor in der Düngemittelindustrie zu beschleunigen.

5.2.2 Schnittstelle Landwirtschaft

Produktakzeptanz und Change-Management in der Düngemittelindustrie kommt ebenfalls eine große Bedeutung zu. Alle Stakeholder über die gesamte Wertschöpfungskette müssen bei einem effektiven Sekundärrohstoffmanagement mit den gesetzten Maßnahmen einverstanden sein. Auch das hergestellte Endprodukt – hier der Phosphatdünger – muss bei den Kund:innen auf Akzeptanz stoßen.

Für den/die Landwirt:in ist hierbei natürlich entscheidend, dass ein Produkt aus Sekundärrohstoffen qualitativ gleichwertig zu einem konventionellen Produkt ausschließlich aus Rohphosphat ist. Maßgeblich sind hier beispielsweise Reinheit, Hygiene, Inhaltsstoffe und erforderliche Arbeitsbreite in der Ausbringung.

In der Vergangenheit wurden Düngemittel aus Sekundärphosphor seitens der Landwirtschaft eher kritisch gesehen. Diesbezüglich hat in jüngster Vergangenheit ein Imagewechsel stattgefunden: nun werden Produkthinweise wie „Enthält Klärschlammasche“ teils schon als Werbung interpretiert.

Wird das Sekundärrohstoffmanagement entlang der Wertschöpfungskette entsprechend optimiert, könnten bis zu 20 % des Rohphosphats zur Herstellung der Düngemittelindustrie mit Sekundärphosphor substituiert werden. Damit könnte der Großteil der Klärschlammasche in Österreich verwertet werden.

Im Falle einer Monoverbrennung von Klärschlamm mit Phosphorrückgewinnung aus der Asche findet jedenfalls eine Schadstoffentfrachtung statt, gleichzeitig wird aber auch organische Substanz vernichtet, die sich bei einem direkten Eintrag in die Landwirtschaft positiv auf die Qualität des Bodens auswirkt (mündliche Auskunft, Ertl und Kretschmer, 2020).

5.2.3 Weitere Einsatzbereiche für Sekundärphosphor in Österreich

Wie oben beschrieben, wäre es technisch bereits möglich, Sekundärphosphor auch jenseits der Düngemittelindustrie einzusetzen. In Deutschland wird dieser Verwertungsweg teilweise schon verfolgt. Im Rahmen dieses Projekts konnte in Österreich seitens der phosphatverarbeitenden Industrie kein diesbezügliches Interesse erkannt werden. Als Gründe dafür können der relativ kleine österreichische Markt sowie die aktuell eher niedrigen Preise für phosphathaltige Chemikalien genannt werden.

6 Handlungsempfehlungen

- Stakeholder aus dem einschlägigen Forschungsbereich wünschen sich eine gezielte Forschungsförderung in Form einer Ausschreibung mit Schwerpunkt Phosphorrecycling, um vielversprechende Technologien weiter zu entwickeln und pilothaft umzusetzen. Zur FTI-Initiative

Kreislaufwirtschaft ergeben sich Berührungspunkte, da das Thema einer systemischen, integralen Betrachtung über die gesamte Wertschöpfungskette bedarf.

- Stellschrauben für die Optimierung von sekundärem Phosphor in der Düngemittelindustrie sind Adaptierungen im bzw. vor dem Klärprozess, bei der Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm oder Klärschlammasche und bei der Verfahrenstechnik zur Rohstoffweiterverarbeitung. Die Vernetzung der Akteur:innen entlang der Wertschöpfungskette könnte diese Potenziale wirkungsvoll heben.
- Neben technologischen Innovationen sind auch logistische Fragestellungen entscheidend, etwa um eine zentrale Klärschlammbehandlung zu evaluieren.
- Intensiver Informationsaustausch aller Stakeholder scheint notwendig, damit der vorherrschenden Verunsicherung etwa der Klärwerksbetreiber bezüglich kommender Maßnahmen begegnet werden kann.
- Der Informationsaustausch insbesondere in der Verwaltung sollte über Bundesländergrenzen hinweg erfolgen.
- Obwohl der nationale Verbrauch an technischen Phosphaten eine Produktionsanlage für P_4 in Österreich ökonomisch nicht sehr attraktiv erscheinen lässt, gäbe es im europäischen Kontext dennoch Potenzial. Gerade die Förderung von disruptiven Technologien zur energie- und umweltschonenderen Produktion von P_4 wird als wichtig angesehen, um eine innovative Phosphorwertschöpfungskette zu etablieren.

7 Ausblick

Eine effektive Kreislaufführung von Phosphor kann nur gelingen, wenn neben den Technologien zur Rückgewinnung auch eine Nachfrage für Sekundärphosphor besteht. Dafür müssen entsprechende Wertschöpfungsketten etabliert werden. Bisher konzentrierte man sich auf die Düngemittelindustrie als wichtigsten Abnehmer. Da 90 % der globalen Rohphosphatproduktion in der Düngemittelindustrie Verwendung finden, ist dies naheliegend. Allerdings wäre es technisch bereits ebenso möglich, Sekundärphosphor zu qualitativ hochwertigeren Phosphorprodukten weiterzuverarbeiten und dadurch für eine Vielzahl von technischen Anwendungen aufzubereiten.

Damit eine dauerhafte Nachfrage nach Sekundärphosphor generiert werden kann, müssen jene Produkte konkurrenzfähig gegenüber konventionellen Produkten sein. Die Voraussetzungen dazu sind jedoch meist noch nicht gegeben. Entscheidend sind der Preis des Sekundärprodukts, die Qualität und die rechtlichen Rahmenbedingungen.

In Österreich wird gegenwärtig nur der Einsatz von rückgewonnenem Phosphor in der Düngemittelindustrie adressiert. Bei einer nationalen Monoverbrennungsstrategie von Klärschlamm könnte damit ein Großteil des anfallenden kommunalen Klärschlammes verwertet werden. Dennoch sollte die Weiterverarbeitung zu hochwertigen phosphathaltigen Chemikalien nicht ganz außer Acht gelassen werden. Gerade bei weißem Phosphor wird das Versorgungsrisiko von der Europäischen Kommission als sehr hoch eingeschätzt.

Stellschrauben zur Optimierung des Einsatzes von rückgewonnen Phosphor im Bereich der Düngemittelindustrie finden sich entlang der gesamten Wertschöpfungskette. So könnten Maßnahmen im Klärwerk, bei der Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammasche sowie in der Verfahrenstechnik bei der Düngemittelherstellung zu einer Verbesserung beitragen. Gesetzte Maßnahmen sollten sinnvollerweise eng aufeinander abgestimmt sein.

Erste großtechnische Anlagen wurden in Deutschland bereits in Betrieb genommen. Getrieben durch gesetzliche Vorgaben in einigen Ländern, werden diesen Anlagen noch weitere folgen und sich auch die zugrundeliegenden Technologien weiterentwickeln. Welche Technologien sich in Zukunft durchsetzen werden, ist offen. Die Neuentdeckung von Rohstofflagerstätten könnte darüber hinaus zu einem veränderten Versorgungsrisiko führen.

In Summe wird also deutlich, dass effektives Phosphorrecycling nicht nur von der Weiterentwicklung einzelner Technologien abhängt. Vielmehr braucht es ein systemisches Zusammenspiel von Sammlung, Aufbereitung und Abnehmern. Somit dient das Thema Phosphorrecycling auch als gutes Beispiel, um die Herausforderungen und Chancen des kreislauforientierten Wirtschaftens exemplarisch aufzuzeigen.

Literaturverzeichnis

A. de Boer, M., Wolzak, L. und Sloopweg, J. C. (2019) *'Phosphorus: Reserves, Production and Applications'*, in Ohtake, H. und Tsuneda, S. (eds) *Phosphorus Recovery and Recycling*. Springer Singapore, Singapore, pp. 75–100. doi: 10.1007/978-981-10-8031-9.

AEEP (no date) *AEEP | Data and statistics, Alliance Européenne des Engrais Phosphatés*. Alliance Européenne des Engrais Phosphatés, Brüssel, Verfügbar unter: <http://aEEP.eu/data-and-statistics/phosphoric-acid/> (Aufgerufen am 24. Mai 2021).

Ahokas, K. (2015) *'Finland's phosphorus resources are more important than ever'*, Geoforumi, Geological survey of Finland stakeholder magazine, Verfügbar unter: <http://verkkolehti.geoforumi.fi/en/2015/10/finlands-phosphorus-resources-are-more-important-than-ever/> (Aufgerufen am 24. Mai 2021).

Amann, A. et al. (2020) *'StraPhos – Zukunftsfähige Strategien für ein österreichisches Phosphormanagement'*, Zwischenbericht, TU Wien, Wien, p. 31.

Amann, A. et al. (2021) *'StraPhos- Zukunftsfähige Strategien des Phosphormanagements für Österreich'*, Endbericht TU Wien, Wien, https://iwr.tuwien.ac.at/fileadmin/mediapool-wasserguete/Projekte/StraPhos/Endbericht_StraPhos_Barrierefrei.pdf

Bertau, M. et al. (2017) *'Phosphatrückgewinnung Statuspapier der ProcessNet-Fachgruppe 'Rohstoffe''*, DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V, Frankfurt am Main, p. 21.

BMLFUW (2016) *'Kommunales Abwasser, Österreichischer Bericht 2016'*, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, p. 136.

BMNT (2018) *'Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2017, Teil 1'*, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Wien, p. 304.

BMU (2007) *'Erfassung und radiologische Bewertung von Hinterlassenschaften mit Norm-Materialien aus früheren Tätigkeiten und Arbeiten einschließlich der modellhaften Untersuchung branchentypischer Rückstände'*, Bundesministerium Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, TÜV Süddeutschland, Bau und Betrieb GmbH, München, Verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/schriftenreihe_rs695_teil_3b.pdf (Aufgerufen am 30. November 2020).

BMU (2015) *'Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphorrückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz'*, Bundesministerium Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, Aachen, p. 226.

Cordell, D., Drangert, J.-O. und White, S. (2009) *'The story of phosphorus: Global food security and food for thought'*, *Global Environmental Change*, 19(2), pp. 292–305. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009.

DüV (2020) *'Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV)'*, p. 46. Verfügbar unter: http://www.gesetze-im-itenet.de/d_v_2017/D%C3%BCV.pdf (Aufgerufen am 25. Mai 2021).

Egle, L. et al. (2016) 'Phosphor: Eine kritische und zugleich unzureichend genutzte Ressource der Abwasser- und Abfallwirtschaft – Stand des Wissens und Ausblick für Österreich und Europa', Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 68(3–4), pp. 118–133. doi: 10.1007/s00506-016-0295-6.

Egle, L., Rechberger, H. und Zessner, M. (2014b) 'Endbericht Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser', Wien: TU Wien, p. 323.

Egle, L., Zessner, M. und Rechberger, H. (2014a) 'Endbericht Phosphorbilanz Österreich, Grundlage für ein nachhaltiges Phosphormanagement – gegenwärtige Situation und zukünftige Entwicklung', TU Wien, Wien, p. 108.

El Wali, M., Golroudbary, S. R. und Kraslawski, A. (2019) 'Impact of recycling improvement on the life cycle of phosphorus', Chinese Journal of Chemical Engineering, 27(5), pp. 1219–1229. doi: 10.1016/j.cjche.2018.09.004.

European Commission (2020) 'Study on the EU's list of critical raw materials (2020): critical raw materials factsheets.', European Commission, Brüssel, Verfügbar unter: <https://data.europa.eu/doi/10.2873/92480> (Aufgerufen am 20 Mai 2021).

Felmeden, J. (2013) 'Phosphorrückhalt in der Mischwasserbehandlung durch Retentionsbodenfilter-Anlagen', Kassel Univ. Press (Wasser, Abwasser, Umwelt, 33), Kassel, p. 245.

Geeson, M. B. und Cummins, C. C. (2018) 'Phosphoric acid as a precursor to chemicals traditionally synthesized from white phosphorus', Science, 359(6382), pp. 1383–1385. doi: 10.1126/science.aar6620.

Greb, V. G. et al. (2016) 'Phosphatrecycling aus Klärschlammaschen - warum Phosphorsäure der Königsweg ist', in Kausch, P. et al. (eds) Rohstoffwirtschaft und gesellschaftliche Entwicklung. Springer, Berlin Heidelberg, pp. 49–63. doi: 10.1007/978-3-662-48855-3_5.

Haidinger, F., ÖWAV (2020) 'Klärschlammbewertung aus Sicht des Umweltschutzes', Vortrag, Klärschlammtagung 2020, Österreichischer Wasser- und Abwasserwirtschaftsverband.

Huber, I. (2008) 'Research and development activities in phosphorous recycling', 10, pp. 11–13.

Illy, N. et al. (2015) 'Phosphorylation of bio-based compounds: the state of the art', Polymer Chemistry, 6(35), pp. 6257–6291. doi: 10.1039/C5PY00812C.

Kabbe, C. (2019) 'Circular Economy: Bridging the Gap between Phosphorus Recovery and Recycling', in Phosphorus Recovery and Recycling, Springer, Singapore, pp. 45–57.

Killiches, F. et al. (2013) 'Phosphat: Mineralischer Rohstoff und unverzichtbarer Nährstoff für die Ernährungssicherheit weltweit', Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, p. 32.

Kraus, F. (2020) 'Phosphorrückgewinnung- -wo geht's lang?' Vortrag, Klärschlammtagung 2020, Österreichischer Wasser- und Abwasserwirtschaftsverband.

Kretschmer, F., Zingerle, T. und Ertl, T. (2018) 'Perspektiven der künftigen Klärschlammbewirtschaftung in Österreich', Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 70, pp. 579–587. doi: 10.1007/s00506-018-0518-0.

Kreuzinger, N., (2020) *'Mikroplastik, Resistenzen, anthropogene Spurenstoffe'*, Vortrag, Klärschlammtagung 2020, Österreichischer Wasser- und Abwasserwirtschaftsverband.

Kuthe Magazin (2019) *'Phosphatieren mit Eisen, Zink und Mangan'*, Kluthe Magazin, 11 März. Verfügbar unter: <https://kluthe.com/magazin/phosphatieren-eisen-zink-mangan/> (Aufgerufen am 24. Mai 2021).

LAD (2006) *'Informationen zur Düngung'*, Landesarbeitskreis Düngung Niedersachsen / Sachsen-Anhalt, p. 95. Verfügbar unter: https://www.iva.de/sites/default/files/benutzer/uid/publikationen/lad_broschuere_niedersachsen_sachsen-anhalt_6._auflage.pdf (Aufgerufen am 21. Mai 2021).

Langergraber, G. et al. (2018) *'Kleinkläranlagen in Österreich – Entwicklung, Bestand und Management'*, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 70(11), pp. 560–569. doi: 10.1007/s00506-018-0519-z.

Maji, R., Mallojjala, S. C. und Wheeler, S. E. (2018) *'Chiral phosphoric acid catalysis: from numbers to insights'*, *Chemical Society Reviews*, 47(4), pp. 1142–1158. doi: 10.1039/C6CS00475J.

Nättorp, A. et al. (2019) *'Development of Phosphorus Recycling in Europe and Japan'*, in *Phosphorus Recovery and Recycling*, Springer, Singapore, pp. 3–27.

Neubauer, C. (2020) *'Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich'*, Statusbericht 2020, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien, p. 150.

Otte-Witte, R. (2020) *'Auswirkung der Klärschlammverordnung auf die Schlammmentsorgung in Deutschland- Ergebnisse der DWA Arbeitsgruppe KEK 1.5 "Übergreifende Fragestellungen der Klärschlammbehandlung und -verwertung auf Kläranlagen kleiner und mittlerer Größe'*, Vortrag, Klärschlammtagung 2020, Österreichischer Wasser- und Abwasserwirtschaftsverband.

Peter, J. (2004) *'Das Element Phosphor: lebensnotwendig, hochgiftig, vielseitig'*, Gemeindeverband Sempachersee, Dienststelle Landwirtschaft und Wald Kanton Luzern, p. 27. Verfügbar unter: <https://sempachersee.ch/wp-content/uploads/2019/03/Phosphorbrosch%C3%BCre.pdf> (Aufgerufen am 24. Mai 2021).

Phosphat Price (2021) *'Norway's Newly Discovered Phosphate, Vanadium and Titanium Deposits Now in EU's Spotlight'*, Phosphate Price, Verfügbar unter: <https://phosphateprice.com/norways-newly-discovered-phosphate-vanadium-and-titanium-deposits-now-in-eus-spotlight/> (Aufgerufen am 20. Mai 2021).

Prayon (2019) *'A worldwide leader in phosphate chemistry'*, Prayon S. A., Verfügbar unter: https://www.prayon.com/publications/feuillet_PRAYON_EN_OK_2020.pdf (Aufgerufen am 24. Mai 2021).

Preiß, J. (2021) *'Spezialchemie'*, PCC SE. Verfügbar unter: <https://www.pcc.eu/chemie/spezialchemie-2/> (Aufgerufen am 24. Mai. 2021).

Reinhardt, G., Rettenmaier, N. und Vogt, R. (2019) *'Festlegung des Indikators für die Bilanzierung der Ressource Phosphat in Umweltbewertungen'*, Institut für Energie und Umweltforschung, Haidelberg, Verfügbar unter: <https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/ifeu-paper-1-2019-final.pdf> (Aufgerufen am 30. November 2020).

REMONDIS (2021) *Phosphorrückgewinnung // REMONDIS Nachhaltigkeit, Die REMONDIS Welt der Nachhaltigkeit*, REMONDIS SE & Co.KG, verfügbar unter: <https://www.remondis-nachhaltigkeit.de/handeln/phosphorrueckgewinnung/?skip=1&cHash=e49b3d88f8ecbcb8713407d8ff0f6e0> (Aufgerufen am 25. Mai 2021).

Seilnacht, T. (2021) *'Periodensystem: Phosphor, Periodensystem der Elemente'*, Verfügbar unter: <https://www.seilnacht.com/Lexikon/15Phosp.htm> (Aufgerufen am 24. Mai 2021).

SERAPLANT (2020) *'SERAPLANT Dünger aus Phosphorrecycling, Phosphorrecycling im Industriemaßstab Dünger aus Sekundärrohstoffen'*, Verfügbar unter: <https://seraplant.com/> (Aufgerufen am 25 Mai 2021).

STATISTIK AUSTRIA (2021) *'Auswertung Importstatistik Phosphor 2019'*.

Theiler, M. et al. (2018) *'Aktuelle Entwicklungen der Phosphorrückgewinnung: Was macht die Schweiz?'*, p. 11.

Überreiter, D. E. et al. (2018) *'Kommunales Abwasser, Österreichischer Bericht 2018'*, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Wien, p. 137.

U.S. Geological Survey (2020) *'Mineral commodity summaries 2020, Mineral commodity summaries 2020'*, Reston, Virginia, pp. 122–123. doi: 10.3133/mcs2020.

Werner, W. (1999) *'Ökologische Aspekte des Phosphor-Kreislaufs'*, Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung, 11(6), pp. 343–351. doi: 10.1007/BF03037725.

White, S. und Cordell, D. (2010) *'Peak Phosphorus: the sequel to Peak Oil | Phosphorus Futures, the phosphorus challenge'*, verfügbar unter: <http://phosphorusfutures.net/the-phosphorus-challenge/peak-phosphorus-the-sequel-to-peak-oil/> (Aufgerufen am 24. Mai 2021).

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über wesentliche phosphorhaltige Stoffe, deren Charakteristika und Verwendung: Die Färbung ist angelehnt an die Verarbeitungswege in Abb. 2 (Quelle: eigene Abbildung, 2022).	14
Tabelle 2: Hauptbezugsquellen der EU für Rohphosphat im Jahr 2015. In Summe wurden 5,4 Mio. t Rohphosphat importiert (Quelle: AEEP, n.d.).....	26
Tabelle 3: Importmengen von Phosphorsäure DAP und MAP im Jahr 2015 (Quelle: AEEP, n.d.).	27
Tabelle 4: Importstatistik von phosphathaltigen Chemikalien aufgeschlüsselt nach Zolltarifnummern aus dem Jahr 2019. Rot umrandet sind Phosphorsäure und Phosphor (weißer Phosphor), da sie die Ausgangsprodukte für alle weiteren phosphorhaltigen Chemikalien darstellen und prinzipiell auch aus Sekundärrohstoffen hergestellt werden könnten (Quelle: Eigene Darstellung nach Statistik Austria, 2021).	30
Tabelle 5: Übersicht über die derzeitige Ausbaupkapazität der Kläranlagen in Österreich. EW_{60} gibt den organischen Einwohnerwert an. Bei einem organischen Einwohnerwert von EW_{60} wird ein biochemischer Sauerstoffbedarf von 60g/d BSB5 einer Einzelperson angenommen (Quelle: Überreiter et al., 2018). 1) Berücksichtigung von drei großen Abwasserbehandlungsanlagen mit überwiegend industriellen Abfall.	31
Tabelle 6: Darstellung der Entwicklung des Klärschlammaufkommens sowie dessen Verwertung (Landwirtschaft, Deponierung, Verbrennung, sonstige Verwertung/sonstige Entsorgung) dar. TS = Trockensubstanz, 1) In der Aufstellung ist nur der kommunale Klärschlammanteil der industriellen Kläranlagen mit kommunalen Anteil enthalten, nicht aber der industrielle Klärschlammanteil, 2) Übermittlung von Summenmeldungen für kommunale Kläranlagen $\geq 2.000 EW_{60}$ durch die Bundesländer. Enthält keine Gewerbeanteile, 3) (Quelle: BMK, 2020; BMNT, 2018).	32

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vereinfachte schematische Darstellung des natürlichen Phosphorkreislaufs (Quelle: eigene Darstellung 2021)	12
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Verwertungsmöglichkeiten von aufbereitetem Phosphaterz (Rohphosphat). Ca. 90 % der Rohphosphaterzeugung werden in der Düngemittelindustrie eingesetzt. Die restlichen 10 % dienen zur Herstellung von technischen Phosphaten, die in zahlreichen industriellen Anwendungen zum Einsatz kommen (Quelle: eigene Darstellung nach A. de Boer, Wolzak und Sloopweg, 2019).....	15
Abbildung 3: Verarbeitungswege von weißem Phosphor (Quelle: verändert nach A. de Boer, Wolzak und Sloopweg, 2019).	19
Abbildung 4: Unterschiedliche „Peak Phosphor“ Szenarien in Abhängigkeit der abgeschätzten Rohstoffreserven. Die rote Kurve zeigt die Berechnung von 2009 auf Basis von Daten des USGS. Die grünen Kurven basieren auf neuen Daten des IFDC (Quelle: verändert nach White und Cordell, 2010).....	21
Abbildung 5: Risikoanalyse bzgl. kritischer Rohstoffe der Europäischen Kommission 2020 (2017). Anhand der Parameter „Versorgungsrisiko“ und „wirtschaftliche Bedeutung“ wird die Kritikalität relevanter Rohstoffe erörtert. Zur Gesamteinschätzung der Kritikalität wird der Achswert bzw. die Länge des Vektors vom Nullpunkt zum Rohstoff addiert und mit 2017 verglichen. Beide Kennzahlen sind dimensionslos (Quelle: eigene Abbildung nach sEuropean Commission, 2020).....	22
Abbildung 6: Prozentuelle Darstellung der globalen Produktion von marktfähigen Phosphatgestein im Jahr 2019. Gesamt wurden 240 Mio. t hergestellt (Quelle: eigene Darstellung nach U.S. Geological Survey, 2020).	24
Abbildung 7: Angenommene prozentuelle Verteilung der globalen Phosphatgesteinsreserven. Die Schätzungen belaufen sich auf 69.000 Mio. t marktfähiges Phosphatgestein (Quelle: U.S. Geological Survey, 2020; eigene Darstellung).	25
Abbildung 8: Rückgewinnung kann nicht mit Recycling gleichgesetzt werden. Effektives Recycling wird erst möglich, wenn entsprechende Wertschöpfungsketten vorhanden sind (Quelle: Eigene Abbildung verändert nach Kabbe, 2019).....	34
Abbildung 9: Potenziale einer neuen innovativen Wertschöpfungskette ausgehend von Sekundärphosphor (Quelle: eigene Abbildung nach Nätörp et al., 2019)	36

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)