



Klärschlamm: vom schadstoffbelasteten Abfall zum Wertstoff

Klaus Günter Steinhäuser (klaus-g.steinhaeuser@posteo.de), Hans-Joachim Grommelt (hans-joachim.grommelt@web.de), Markus Große Ophoff (m-go@outlook.de)

Zusammenfassung

Voraussetzung für eine ökologische vertretbare Verwertung von kommunalem Klärschlamm ist die möglichst weitgehende Schadstofffreiheit mit dem Ziel einer möglichst umfassenden Nutzung der enthaltenen Nährstoffe. Hohe Schadstoffgehalte sind ein Grund, die bodenbezogene Verwertung des Klärschlammes künftig vollständig einzustellen. Ziel ist jedoch, den Wertstoff Phosphat, der von der EU als kritischer Rohstoff eingestuft ist, dabei nicht zu verlieren. Mehrere Verfahren werden hierzu angeboten; allerdings befinden sich die meisten noch im Pilotmaßstab. Anhand von Auswahlkriterien ist ein unabhängiger Vergleich notwendig, damit sich Kläranlagenbetreiber für die für sie ökologisch und ökonomisch sinnvollste Variante entscheiden können. Wichtiges Ziel bleibt, die Schadstofffrachten deutlich zu reduzieren, damit künftig eine bodenbezogene Verwertung wieder möglich wird. Dies erfordert auch stoffpolitische Maßnahmen an der Quelle.

1. Einleitung

Vor mehr als 200 Jahren begann in den Städten der Bau erster Abwasserkanäle, um Schmutz und Fäkalien durch Schwemmkanalisation in die Flüsse zu leiten. Die dadurch zunehmende Verunreinigung der Gewässer und seuchenhygienische Probleme bei der Nutzung des Flusswassers als Trinkwasser (z.B. Cholera-Epidemie in Hamburg) führten dazu, dass Anfang des 20. Jahrhunderts damit begonnen wurde, das Wasser vor Einleitung in Gewässer in Kläranlagen zu reinigen.

Seit der Industrialisierung enthält das Abwasser nicht mehr nur Fäkalien und Sauerstoff-zehrende Schmutzstoffe, sondern in zunehmendem Maße auch Chemikalien aus Haushalten sowie aus Gewerbe- und Industriebetrieben, die ihr Abwasser in die öffentliche Kanalisation einleiten. Die Zusammensetzung des

Abwassers und folglich auch des Klärschlammes hat sich dadurch stark verändert.

Der Rohstoff Klärschlamm ist einerseits eine Schadstoffsene, d.h. die Abwasserreinigung ist so konzipiert, dass möglichst alle für Gewässer schädlichen Stoffe, die nicht vorher vermieden wurden, herausgefiltert werden. Sie werden entweder durch den Klärvorgang abgebaut oder an Klärschlamm adsorbiert. Dieser enthält dann ein komplexes, analytisch nur zum Teil erfassbares Substanzgemisch, darunter auch gefährliche Stoffe wie Arzneimittel und Krankheitserreger, die nicht in die Umwelt gelangen sollten. Andererseits enthält Klärschlamm wertvolle Nährstoffe, insbesondere Phosphor. Diese gilt es in möglichst bioverfügbarer Form im Sinne der Kreislaufwirtschaft wieder zu nutzen.

Die Abwasserreinigung in Kläranlagen ist ein mehrstufiger Prozess (Abbildung 1): Nach Abtrennung grober Bestandteile setzt sich der im Abwasser enthaltene (Primär-)Schlamm in einem Vorklärbecken ab. Das Abwasser gelangt dann in die biologische Reinigungsstufe, wo unter Zuführung von Luft-sauerstoff Bakterien organische Inhaltsstoffe zu CO₂ und Wasser oxidieren. Nitrifizierende Bakterien oxidieren Ammonium-Stickstoff zu Nitrat. Bei diesem Prozess entsteht Belebtschlamm, der sich in der Nachklärung absetzt und überwiegend zurückgeführt wird. Überschüsse werden als (Sekundär-)Schlamm abgetrennt. Phosphor und Stickstoff im gereinigten Abwasser werden in größeren Kläranlagen im Anschluss durch so genannte Denitrifikation in die Luft abgegeben (Stickstoff) bzw. durch Fällung (phosphorhaltiger Tertiärschlamm) reduziert.

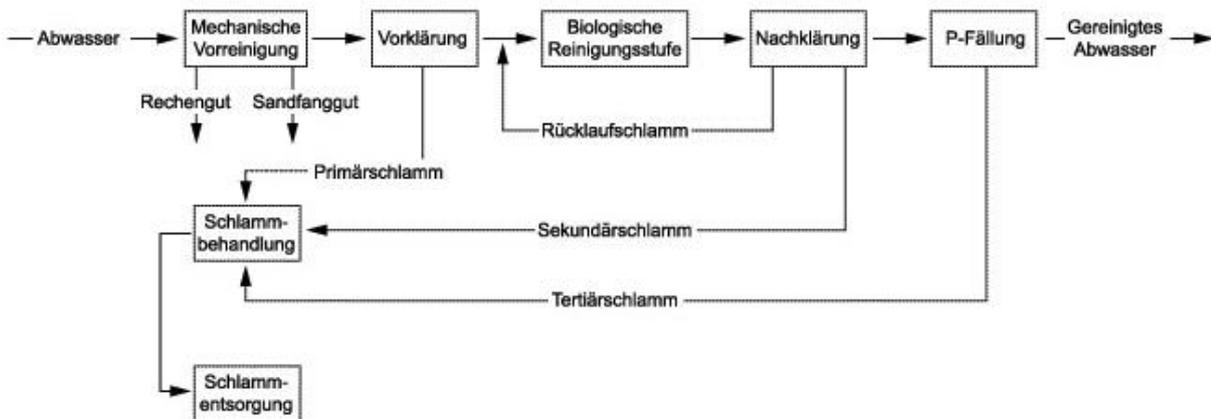


Abb. 1: Funktionsweise einer Kläranlage (erste bis dritte Reinigungsstufe) mit Anfall von Klärschlamm

Das Abwasser enthält nach diesen drei Reinigungsstufen immer noch Mikroschadstoffe (u.a. Arzneimittel) in zwar geringer aber weiterhin schädlicher Konzentration. Zunehmend sollen deshalb in den kommenden Jahren große Kläranlagen mit einer 4. Reinigungsstufe ausgerüstet werden, in der das Abwasser durch Aktivkohle oder UV-Licht / Ozon weitergehend gereinigt wird [1].

Die vereinigten Schlämme der ersten drei Reinigungsstufen werden als Rohschlamm abgeführt. Dieser enthält einen Großteil des Phosphors, der Schwermetalle und der schwer abbaubaren Schadstoffe. Er wird eingedickt und gelangt dann in größeren Kläranlagen meist in Faulbehälter, in denen unter Entstehung von methanhaltigem Klärgas weitere organische Substanz abgebaut wird. Der Faulschlamm wird unter Zugabe von Flockungshilfsmitteln in Zentrifugen oder Pressen auf einen Feststoffgehalt von 30-35 % eingedickt.

2021 fielen in Deutschland 1,717 Mio. t Trockenmasse (TM) Klärschlamm aus kommunalen Kläranlagen an [2]. Dabei entfallen auf große Kläranlagen (> 50.000 Einwohnerwerte {EW} – Größenklassen 4b und 5) ca. 950.000 t TM, während kleine Kläranlagen (<10.000 EW – Größenklassen 1 bis 3) ca. 400.000 t TM beitrugen [3]. Nahezu unabhängig von der Größenklasse der Kläranlage sind dies 15–16 kg TM Klärschlamm je Einwohner und Jahr [4]. Wurde vor 25 Jahren noch der größte Teil des Klärschlammes deponiert, so ist dies seit 2005 verboten. Klärschlamm wird entweder verbrannt oder landwirtschaftlich (oder landbaulich) verwertet. Die seit langem umstrittene bodenbezogene Nutzung zeigt eine deutlich abnehmende Tendenz und betrug 2021 nur noch 19,5 %. Die Mitverbrennung in Kohlekraftwerken, Zementwerken und Abfallverbrennungsanlagen umfasste 47 % des angefallenen Klärschlammes. Dieser Anteil wird künftig abnehmen, da die Verbrennung von Kohle in Kraftwerken aus Gründen des Klimaschutzes nicht mehr stattfinden wird. 32,5 % wurden in Monoverbrennungsanlagen für Klärschlamm verwertet. Am weitesten verbreitet ist die Wirbelschichtverbrennung, aber auch andere Feuerungstypen wie Staubfeuerung, Drehrohröfen und Rostfeuerung finden Anwendung. Die Verwertung von Klärschlamm in Pyrolyse- und Vergasungsanlagen hat mit ins-

gesamt 10.800 t Trockenmasse einen geringen Anteil [3].

Die Herausforderungen bei der Verwertung von Klärschlamm sind: Wie lassen sich vor- und nachsorgender Umweltschutz so miteinander kombinieren, dass der Klärschlamm, insbesondere seine wertvollen Inhaltsstoffe, genutzt wird, ohne dass seine umweltgefährdenden Bestandteile verbreitet werden? Wie kann man die Schadstoffbelastung des Abwassers und damit des Klärschlammes reduzieren? Wie lassen sich die Wertstoffe im Kreislauf führen?

2. Schadstoffe im Klärschlamm

Das Ziel der Behandlung von Abwasser in einer Kläranlage ist die Reinigung des Wassers, damit schädliche Stoffe und pathogene Keime nicht in die Gewässer gelangen. Klärschlamm ist damit eine Schadstoffsänke für viele Chemikalien. Dies trifft insbesondere auf die nicht überschaubare Vielfalt an organischen Schadstoffen und ihrer Transformationsprodukte zu, die aus Haushalten, Krankenhäusern, Gewerbe und Industrie ins Abwasser gelangen. Darunter sind Arzneimittel, Biozide und Pflanzenschutzmittel, Additive aus Plastik, Lösemittel, per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) und Mikroplastik ebenso wie pathogene oder Antibiotika-resistente Bakterien.

Wird Klärschlamm bodenbezogen genutzt, werden die angesammelten Schadstoffe großflächig ausgebracht. Sie können sich in (Kultur-)Pflanzen anreichern, Bodenorganismen und das Bodenmikrobiom schädigen oder wegen ihrer hormonellen Wirksamkeit oder anderer Wirkungen Umweltschäden hervorrufen.

In der Vergangenheit standen die **Schwermetallbelastungen** des Klärschlammes im Vordergrund. Diese sind in den Jahren 1977 bis 2000 deutlich zurückgegangen [5], besonders ausgeprägt bei Blei, Cadmium und Quecksilber, weniger deutlich bei Kupfer, Nickel und Zink. Seitdem besteht nur noch eine schwach abnehmende Tendenz (Tabelle 1). Quecksilber mit einer durchschnittlichen Konzentration von 0,4 mg/kg TM (2015) ist allerdings immer noch ein Problem: Die Umweltqualitätsnorm (UQN) für Quecksilber (Richtwert 20 µg/kg Frischmasse [FM] in Fischen) wird noch vielfach übertroffen.

Tabelle 1: Entwicklung ausgewählter Schwermetallkonzentrationen in mg/kg TM in landwirtschaftlich genutzten Klärschlämmen in Deutschland [5, 6]

Stoff	1977	1982	1986-1990	1997	2002	2004	2008	2012	2015
Blei	220	190	113	63	50	44	39	34	31
Cadmium	21	4,1	2,5	1,4	1,1	1,0	0,96	0,97	0,74
Chrom	630	80	62	46	45	41	34	33	33
Kupfer	378	370	322	274	306	306	298	292	294
Nickel	131	48	34	23	27	26	25	25	25
Quecksilber	4,8	2,3	2,3	1,0	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4
Zink	2140	1480	1045	809	750	757	744	762	773

Von rund 1.200 umweltrelevanten **Arzneimittelwirkstoffen** [6] liegen zu mehreren Stoffen Daten zu Einleitungen von Kläranlagen und in Oberflächengewässern vor; weniger ist bekannt

zu Medikamentenresten in Klärschlämmen und Böden [7]. Eine Studie des Umweltbundesamts nennt folgende Gehalte von Arzneimittel-Wirkstoffen in Klärschlamm: 3 bis 21 mg/kg

Trockenmasse (TM) Ciprofloxacin, 0,75 bis 8,9 mg/kg TM Levofloxacin, 0,054 bis 1,1 mg/kg TM Carbamazepin, 0,023 bis 0,16 mg/kg TM Clarithromycin, 0,0056 bis 1,1 mg/kg TM 17 α -Ethinylöstradiol, 0,074 bis 2,1 mg/kg TM Diclofenac und 0,044 bis 1,1 mg/kg TM Metoprolol [8]. Auch wenn sich zahlreiche Arzneimittel nicht in Klärschlamm anreichern, empfiehlt der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), dass dieser vorsorglich möglichst wenig in der Landschaft ausgebracht werden soll [9].

Mikroplastik sind Plastikpartikel von kleiner 0,5 cm Durchmesser [10]. Wichtige Quellen für Mikroplastik in Abwasser sind Haushalte, Gewerbe und Industrie, das achtlose Entsorgen von Kunststoffmüll in die Umwelt sowie der Abrieb von Reifen und Kunstrasenplätzen. Gelangt Mikroplastik über Haushaltsabwasser oder Niederschlagswasser in Kläranlagen, wird dort mehr als 90 % des Mikroplastiks zurückgehalten, das meiste davon in Klärschlamm. Damit ist Klärschlamm eine Senke für Mikroplastik [11,12]. In Primär-, Überschuss- und Faulschlämmen werden Konzentrationen im Bereich von 1 bis 10 Gramm Mikroplastik je Kilogramm Trockenmasse ermittelt [13,14]. Düngen Landwirte mit dem Klärschlamm Äcker und Felder, gelangt demnach ein Großteil dieser Partikel in Böden. In Deutschland wurden 2016 mit Klärschlämmen rund 9.700 t Mikroplastik auf Feldern verteilt [15]. Werden Klärschlamme verbrannt, verbrennen auch die Mikroplastik-Partikel.

Besonders problematisch sind die **per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS)**, die in der Umwelt nicht abgebaut werden und deshalb „ewige Chemikalien“ genannt werden. Sie haben häufig bei sehr niedrigen Konzentrationen schädliche Wirkungen auf die menschliche Gesundheit und Umweltorganismen und werden inzwischen überall gefunden, selbst in emissionsfernen Gebieten. Messungen der PFAS-Konzentrationen in Klärschlamm zeigen in den USA Durchschnittswerte von 31 $\mu\text{g}/\text{kg}$ TM [16], in Europa von 114 $\mu\text{g}/\text{kg}$ TM [17]. Untersuchungen von Klärschlämmen in Bayern ergaben häufig Konzentrationen > 100 $\mu\text{g}/\text{kg}$ TM. Bei Überschreitungen waren meist industrielle Einflüsse nachweisbar [18]. Zhou et al. stellen in einem kürzlich erschienenen Review heraus, dass die Belastung von Klärschlämmen mit PFAS ein weltweites Problem darstellt. Sie betrachten allerdings den biologischen Abbau dieser Verbindungen in Klärschlamm als Möglichkeit zur Risikominderung [63]. Die EU beabsichtigt, wegen der hohen und dauerhaften Risiken die gesamte Stoffgruppe der PFAS schrittweise vollständig zu verbieten [17], was der Forderung des BUND entspricht [19]. Da PFAS sich erst bei sehr hohen Temperaturen zersetzen, reichen die in Abfallverbrennungsanlagen üblichen Temperaturen von ca. 850 °C nicht aus [20].

Ein Blick auf die Konzentrationsentwicklung **organischer Schadstoffe** zeigt, dass rückläufig vor allem die Werte solcher Stoffe sind, die sehr strengen stoffrechtlichen Regelungen unterliegen, z.B. PCB, polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F). Demgegenüber ist z.B. bei Nonylphenol, Phthalaten, PBDE und Organozinnverbindungen allenfalls eine

schwach abnehmende Tendenz festzustellen [5, 6, 21]. Außerdem verringerten sich in den vergangenen 20-30 Jahren mit jeder Novellierung auch die (öko-)toxikologisch begründeten Grenz- und Schwellenwerte vieler Schadstoffe, so dass eine wirkliche Entlastung nicht eingetreten ist. Hinzu kommt, dass sich die Aufmerksamkeit auf immer neue Schadstoffe richtet, die im Klärschlamm gefunden werden. Hierzu zählen diverse Arzneimittel-Wirkstoffe, polycyclische Moschusverbindungen und Triclosan [22] sowie Mikroplastik-Partikel.

Außerdem enthält Klärschlamm auch pathogene Keime, Antibiotika-resistente Bakterien und mobile genetische Elemente. Kläranlagen sind ein „Hotspot“ für den horizontalen Gentransfer. Klärschlamm stellt deshalb eine Haupteintragsroute von Antibiotikaresistenzen in den Boden dar [23]. Die Schlammfaulung bewirkt eine gewisse Reduktion der mikrobiologischen Belastung. **Hygienische Risiken** durch biologische Kontaminanten sind dennoch weiter vorhanden.

Klärschlamm ist eine Vielstoffmatrix. Nur ein geringer Teil der in Klärschlamm enthaltenen Schadstoffe wird üblicherweise analysiert und überwacht. Minderungserfolge bei einzelnen Schadstoffen lösen deshalb das Problem der Verunreinigung von Böden nicht.

3. Nährstoffe im Klärschlamm

Der Zulauf zu Klärwerken enthält im Durchschnitt 6 bis 8 mg Phosphor und 50 bis 54 mg Stickstoff pro Liter, wobei regional große Unterschiede auftreten. Demnach enthalten die 9.631 Mio. m³ Abwasser pro Jahr 70.000 bis 80.000 t Phosphor sowie 483.000 bis 517.000 t Stickstoff. Während Stickstoff während der Denitrifikation im Klärprozess überwiegend als Luftstickstoff entweicht und nur zum geringen Anteil an Klärschlamm adsorbiert, haften ca. 70 % des Phosphors, d.h. ca. 50.000 t, an Klärschlamm (Abbildung 2) [24].

Phosphor ist ein essentielles Element für das Pflanzenwachstum. Phosphat für Düngezwecke wird vor allem aus Nordafrika in die EU importiert. In der EU wird nur eine Phosphatmine in Finnland betrieben. Die Phosphatvorkommen weltweit sind begrenzt (Abbildung 3), weshalb die EU Phosphor seit 2014 zu den kritischen Rohstoffen zählt [25]. Mit Blick auf die Bedeutung des Rohstoffs Phosphor hebt auch das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes) die Notwendigkeit einer nachhaltigen Bewirtschaftung dieses ressourcenrelevanten Stoffstroms hervor [26]. Hinzu kommt, dass die Sediment-Phosphate häufig mit Schwermetallen, insbesondere Cadmium (bis zu 147 mg/kg P) und Uran (bis zu 687 mg/kg P) verunreinigt sind und aufbereitet werden müssen [27]. Die Bedingungen des Abbaus des Rohphosphats führen zu großflächigen Zerstörungen der Landschaft. Außerdem führt der Aufschluss zu Phosphorsäure zu umfangreichen Ablagerungen von Phosphorgips [28].

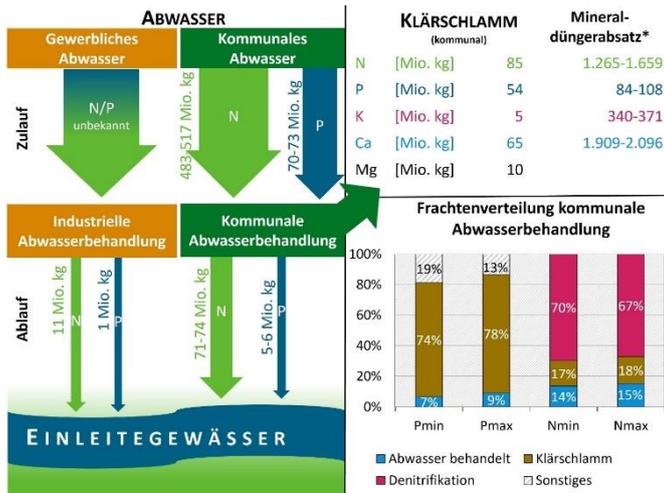


Abb. 2: Nährstofffrachten aus industriellen und kommunalen Quellen [24]

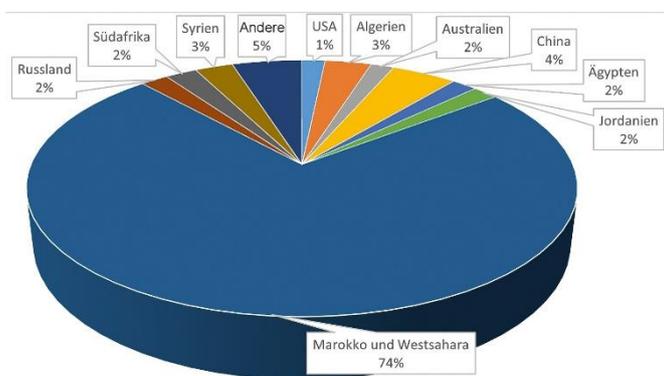


Abb. 3: Globale Verteilung der erkundeten Reserven von Rohphosphat [6]

Derzeit werden in Deutschland ca. 85.000 t Phosphor in Mineraldüngern auf Feldern eingebracht. Vergleicht man diesen Wert mit den 50.000 t in Klärschlamm, wird deutlich, dass große Anteile des primären Mineralphosphats durch sekundäres Klärschlammphosphat ersetzt werden können [29, 30].

So erwünscht Phosphor für den Pflanzenbau ist, so unerwünscht ist er in Gewässern. Phosphor begünstigt das Algenwachstum, wodurch die biologische Vielfalt in Binnengewässern reduziert wird (Eutrophierung). Etwa je zur Hälfte gelangt Phosphor durch Abschwemmung von landwirtschaftlichen Flächen und durch Abwasser aus Kläranlagen in Oberflächengewässer [31]. Besonders in Mittelgebirgsregionen ist der Anteil des Abwassers hoch. Die Oberflächengewässerverordnung fordert für den guten ökologischen Zustand gemäß Wasserrahmenrichtlinie in den meisten Fließgewässertypen Konzentrationen < 0,1 mg/l Gesamt-P und < 0,07 mg/l PO₄-P [32]. Diese Werte werden häufig überschritten, insbesondere in Gewässern mit einem hohen Anteil von Abwasser aus kommunalen Kläranlagen. Eine geringere Düngung mit Phosphaten in der Landwirtschaft und eine effektivere Eliminierung von Phosphor in Kläranlagen sind erforderlich. So kommen 24 % der abwasserbürtigen Phos-

phorfracht aus Kläranlagen < 10.000 EW, die aber nur 8 % des (kommunalen) Abwasservolumens beitragen [33].

Eine Reduktion der Phosphoremissionen in die Umwelt ist aber auch eine globale Notwendigkeit. Bei der Ermittlung der planetaren Belastungsgrenzen für die biogeochemischen Kreisläufe berechneten Rockström und Steffen mit Mitarbeitern, dass der Eintrag von Phosphor in die Weltmeere (ca. 22 Mio t pro Jahr) die natürliche Witterungsrate von ca. 1,1 Mio t deutlich überschreitet. Allenfalls das 10-fache der natürlichen Witterungsrate wäre verkraftbar, will man langfristig eine Sauerstoffverarmung der Ozeane vermeiden [34, 35]. Dies bedeutet: Die Einträge von Phosphatdüngern in die Umwelt sind regional und global deutlich zu reduzieren und der Abbau mineralischen Phosphats ist durch Kreislaufführung zu verringern.

4. Gesetzliche Grundlagen

Mit der Novellierung der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) 2017 hat die Bundesregierung neue Regeln für die Verwertung von Klärschlamm in Kraft gesetzt [36]. Diese Verordnung verfolgt unter anderem die folgenden Ziele:

- die bisher geltenden Anforderungen an die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung werden verschärft und der Anwendungsbereich der Verordnung auch auf Maßnahmen des Landschaftsbaus ausgedehnt. Klärschlamm soll künftig in der Regel nicht mehr direkt auf Äcker und Felder ausgebracht werden.
- Als zentrales Element sieht die Verordnung erstmals umfassende Vorgaben zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlämmen und Klärschlammverbrennungsaschen vor. Phosphor soll zurückgewonnen werden, um entweder für Düngezwecke oder zur Herstellung chemischer Produkte eingesetzt zu werden. Die Abhängigkeit von Phosphatimporten soll dadurch gesenkt werden.

Tabelle 2: Grenzwerte für die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm [36]

Substanz	AbfKlärV 2017 / DüMV 2012
Arsen	40 mg/kg TM
Blei	150 mg/kg TM
Cadmium	1,5 mg/kg TM
Chrom VI	2,0 mg/kg TM
Kupfer	900 mg/kg TM
Nickel	80 mg/kg TM
Quecksilber	1,0 mg/kg TM
Thallium	1,0 mg/kg TM
Zink	4.000 mg/kg TM
AOX	400 mg/kg TM
Benzo[a]pyren	1,0 mg/kg TM
6 einzelne PCB	je 0,1 mg/kg TM
Chlorierte Dioxine + Furane (PCDD/F) & dioxin-ähnliche PCB (dl-PCB).	30 ng/kg TM
PFAS (PFOA + PFOS)	0,1 mg/kg TM

Die Grenzwerte für die bodenbezogene Verwertung wurden mit der Düngemittelverordnung (DüMV) verknüpft (Tabelle 2) [37]. Beispielsweise gelten für Cadmium und PCB (polychlorierte Biphenyle) strengere Grenzwerte und für PFAS wurde ein Grenzwert hinzugefügt. Die „Qualitätssicherung Landbauliche Abfallverwertung“ (QLA) nennt darüber hinaus weitere Untersuchungsparameter und präsentiert ein Zertifizierungssystem für Klärschlämme [22].

Die Pflicht zur Phosphorrückgewinnung gilt grundsätzlich für alle Kläranlagen, soweit der Klärschlamm mehr als 2 % Phosphor in der Trockenmasse enthält:

- Für Klärwerke der Größenklasse 5 (> 100.000 Einwohnerwerten [EW]), gilt die Recyclingpflicht von 2029 an.
- Für Abwasserbehandlungsanlagen der Größenklasse 4b (> 50.000 EW) gilt diese Pflicht von 2032 an.
- Kleine und mittelgroße Anlagen (Größenklassen 1 bis 4a) können von der zuständigen Behörde unter Einhaltung der Grenzwerte die Genehmigung erhalten, Klärschlämme weiterhin bodenbezogen zu verwenden.

Für die Rückgewinnung gelten folgende Quoten: Soweit der Phosphor durch Fällungsverfahren gewonnen wird, sind mindestens 50 % Ausbeute erforderlich, mindestens aber so viel, dass 2 % Phosphor in der Trockenmasse im verbleibenden Klärschlamm unterschritten werden. Bei der Rückgewinnung aus Klärschlammasche beträgt die Quote 80 % des Gehalts in der Asche.

Klärschlämme mit weniger als 2 % Phosphor in der Trockenmasse werden einer Mitverbrennung zugeführt. Bis 31.12.2023 sollten die Kläranlagenbetreiber über die geplanten und bereits eingeleiteten Maßnahmen zur Phosphorrückgewinnung und zur Klärschlamm Entsorgung berichten.

5. Phosphorrückgewinnung

Wie viel Phosphor sich zurückgewinnen lässt, hängt vom behandelten Stoffstrom ab: Die Phosphorkonzentration im Abwasser ist mit < 0,001 % (durchschnittlich 6,9 mg/L) meist sehr gering. In der Klärschlamm-Trockenmasse beträgt sie in der Regel über 2 % und in Klärschlammasche liegt sie überwiegend zwischen 6 bis 8 % [24].

Die **Fällungsverfahren** gewinnen Phosphate aus dem Abwasser oder dem (ausgefauten) Klärschlamm zurück. Bei letzterem beruhen sie darauf, den im Schlamm enthaltenen Phosphor zu mobilisieren und als Magnesiumammoniumphosphat (Struvit) oder Calciumphosphat auszufällen. Fällungen mit Magnesiumsalzen führen darüber hinaus zur Rückgewinnung eines Teils des Stickstoffs. Ein Vorteil dieser Verfahren ist, dass sie auf Kläranlagen verschiedener Größe integrierbar sind und keine Transporte zu zentralen Anlagen erforderlich sind. Oft erreichen sie allerdings nicht die von der AbfklärV geforderte 50 %-ige Rückgewinnung aus Klärschlamm. Es kann jedoch gelingen, den Phosphorgehalt des Klärschlammes auf weniger als 2 % zu senken, womit die Vorgaben der

AbfklärV erfüllt werden. Die Verfahren mit höheren Rückgewinnungsquoten schaffen dies nur durch einen umfangreichen Chemikalieneinsatz (z.B. „Stuttgarter Verfahren“ [38]). Viele Verfahren beschränken sich auf Klärschlämme, bei denen Phosphor in der 3. Reinigungsstufe durch das so genannte Bio-P-Verfahren abgetrennt wurde und eignen sich nicht für Eisen- oder Aluminiumphosphatfällungen. Es verbleibt ein phosphatarmer Schlamm, der abschließend (mit)verbrannt wird.

Ein Beispiel ist das Verfahren „Berliner Pflanze“, das großtechnisch realisiert ist [39]. Die Phosphorabtrennung in der Kläranlage erfolgt über das Bio-P-Verfahren. Beim Bio-P-Verfahren nutzt man die Fähigkeit Polyphosphat-akkumulierender Mikroorganismen im Schlamm, Phosphat dem Abwasser zu entziehen. Der ausgefautete Schlamm wird durch Belüftung einer CO₂-Strippung unterzogen, wodurch der pH-Wert auf ca. 8 steigt. Durch Zugabe von Magnesiumchlorid (MgCl₂) fällt bei ausreichender Konzentration von gelöstem Phosphat und Ammonium mineralisches Struvit aus. Das gewonnene Struvit (jährlich ca. 1.500 t) wurde bis 2022 an Agrarbetriebe verkauft. Dieser Verkauf wurde eingestellt, da das Produkt wegen einer bakteriellen Belastung die Anforderungen der DüMV nicht mehr erfüllte und außerdem Fremdbestandteile wie Holz und Mikroplastik enthielt [40].

Zahlreiche Verfahren gewinnen Phosphor aus **Klärschlamm-asche**. Es ist also eine Monoverbrennung des Klärschlammes vorgeschaltet. Meist wird die Klärschlamm-asche in Säure gelöst und nach Abtrennung der Schwermetalle Phosphatsalze oder Phosphorsäure nasschemisch gewonnen. Phosphorsäure lässt sich vielfältig, z.B. in der chemischen Industrie, und nicht nur für Düngezwecke, nutzen. In einigen Verfahren wird die Asche thermochemisch behandelt. Der Asche werden Zuschlagstoffe beifügt. Sie wird erhitzt und flüchtige Schwermetalle ausgetrieben. Der verbleibende Rückstand, der noch mineralische Bestandteile enthält, soll – soweit er die Vorgaben der Düngemittelverordnung einhält – direkt als Dünger verwendet werden. Die geforderte Rückgewinnungsquote von 80% wird bei den Verfahren aus Klärschlamm-asche in der Regel eingehalten. Monoverbrennungsanlagen und damit gekoppelte Rückgewinnungseinrichtungen benötigen eine Mindestmenge an Klärschlamm, um effektiv und wirtschaftlich arbeiten zu können. Außer bei großen Klärwerken sind diese Einrichtungen deshalb nicht auf dem Betriebsgelände. Ein Transport des Klärschlammes zur Verbrennungsanlage ist erforderlich.

Zwei Beispiele sind das inzwischen in Hamburg großtechnisch realisierte „Tetraphos“-Verfahren [41] und das „Ashdec“-Verfahren [42, 43], das in Altenstadt (Bayern) errichtet werden soll.

Bei Tetraphos wird der Asche verdünnte Phosphorsäure hinzugefügt. Die Phosphate lösen sich dabei fast vollständig. Der unlösliche Rückstand wird abfiltriert und deponiert. Das Filtrat

ist eine Roh-Phosphorsäure. Diese wird in mehreren Schritten gereinigt:

- Durch Zugabe von Schwefelsäure kristallisiert Calciumsulfat (CaSO_4) aus und wird als Gips abfiltriert.
- Weitere Metalle wie Magnesium, Aluminium und Eisen werden mit Hilfe eines Ionenaustauscherharzes entfernt. Dieses wird mit einer Säure regeneriert, wobei eine Metallsalzlösung entsteht, die zur Phosphatfällung in der 3. Reinigungsstufe von Kläranlagen eingesetzt werden kann.
- Die metallarme Roh-Phosphorsäure wird im Vakuum auf eine handelsübliche Konzentration von etwa 75 % aufkonzentriert.

Bei Ashdec wird die Klärschlammasche mit Natriumcarbonat und etwas (unverbranntem) Klärschlamm (als Reduktionsmittel) versetzt und in einem Drehrohrofen bei 850 – 1.000 °C erhitzt. Dadurch werden die flüchtigen Schwermetalle (Hg, Cd, Pb) und Arsen ausgetrieben und in der Abgasreinigung abgeschieden. Das Phosphat wird dabei (vermutlich durch Reduktion von Eisen) in eine bioverfügbare Form umgewandelt. Der gereinigte Klärschlamm, der vor allem noch Silikate und Aluminate enthält, soll direkt als Dünger verwendet werden.

Eine Sonderstellung nehmen die **integrierten Verfahren** ein, bei denen die thermische Behandlung und die Phosphorrückgewinnung in einer Anlage erfolgen. Diese alternativen Ansätze sind sehr unterschiedlich: Häufig wird der Klärschlamm (zunächst) in reduzierender Atmosphäre erhitzt, wodurch brennbare Gase (Syngas) und Pyrolysekohle entstehen. Bei der Klärschlammopyrolyse bleibt der Phosphor mit anderen Inhaltsstoffen des Klärschlammes in der Kohle (z.B. Pyreg-Verfahren [44]). Allerdings werden Schwermetalle nicht effektiv abgetrennt und bleiben so wie die entstehenden kanzerogenen PAK (polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe) an die Kohle gebunden [45]. Andere Verfahren überführen anschließend den Rückstand in Luftsauerstoff enthaltende (oxidierende) Atmosphäre, wobei die Kohle verbrennt. Schwermetalle werden abgetrennt; Phosphor in Form von Phosphaten oder Phosphorsäure gewonnen. Bei metallurgischen Verfahren wird Klärschlamm mit evtl. Zuschlagstoffen bis zur Schmelze erhitzt und in der Schlacke angereichert. Schließlich ist noch auf die hydrothermale Karbonisierung (HTC) hinzuweisen, bei der man Klärschlamm unter Druck auf ca. 170 – 180 °C erhitzt. Aus dem entstandenen kohlehaltigen Rückstand wird das Phosphat durch Säure gelöst und danach ausgefällt [46, 47]. Einige Anbieter streben eine Realisierung integrierter Verfahren auch auf dem Gelände kleinerer Kläranlagen an. Eine großtechnische Umsetzung in Deutschland hat bisher noch nicht stattgefunden.

Ein Beispiel für die thermische Behandlung in reduzierender Atmosphäre mit anschließender Oxidation ist das Verfahren der Fa. Grenzbach [48]. Der Klärschlamm wird entwässert und getrocknet bis zu einem Trockenmasse-Gehalt von 75 %. Die dafür notwendige Energie kommt weitgehend aus der Prozesswärme des Verfahrens. Ggf. ist eine Stützfeuerung erfor-

derlich. Die Klärschlamm pellets werden in einen Drehrohrofen geschüttet und auf 1200 Grad Celsius erhitzt. Die Verweilzeit beträgt etwa 20 Minuten. Das Material durchläuft dabei drei Zonen: die Trocknungszone, eine sauerstoffarme Reduktionszone und eine Oxidationszone. In der Reduktionszone reagiert Kohlendioxid bei hohen Temperaturen mit Kohlenstoff zu Kohlenmonoxid (Boudouard-Gleichgewicht). Kohlenmonoxid reduziert die Phosphate im Klärschlamm zu elementarem Phosphor, der verdampft und in der Oxidationszone zu Phosphorpentoxid oxidiert wird. Dieses reagiert in einem Wäscher mit Wasser zu einer 54%-igen Phosphorsäure. Auch der Rest des Schüttungsmaterials gelangt in die Re-Oxidationszone und wird zu einem mineralischen Granulat abgekühlt, das Basalt-ähnlichen Charakter haben soll. Bisher existiert nur eine Pilotanlage für 90.000 EW.

Metallurgische Verfahren werden in Japan großtechnisch eingesetzt. Die japanische Firma Kubota behandelt Klärschlamm in einem Schmelzofen und erhält dadurch phosphathaltige Schlacke, die direkt als Dünger eingesetzt werden kann [49]. Das System besteht aus einem Doppelzylinder, bei dem der innere Zylinder ein Schmelzofen ist, in dem Klärschlamm verbrennt. Der auf 85 – 90 % Trockensubstanz vorgetrocknete Klärschlamm wird mit geringen Mengen von Natrium- und Calciumsalzen versetzt und gelangt in einen rotierenden Außenzylinder, der das Brenngut durchmischt und gleichmäßig der Schmelzkammer im Innenzylinder zuführt. Bei Luftzufuhr verbrennt dort der Klärschlamm und schmilzt bei 1.250 – 1.350 °C zu einer Schlacke, die in ein Wasserbad tropft und über ein Förderband abtransportiert wird. Die Schlacke wird granuliert. Durch geeignete Prozessführung entweichen in einer schwach reduzierenden Atmosphäre Schwermetalle (Cd, Pb, Zn) – nicht jedoch Phosphor – gemeinsam mit dem Rauchgas, das nachverbrannt wird. In der Rauchgasreinigung werden die Schwermetalle im Flugstaub abgeschieden. Die granulierten Schlacke enthält ca. 25 % P_2O_5 . Nach Angaben der Firma benötigt das Verfahren keine externe Energiezufuhr.

In einem Positionspapier des BUND werden mehrere Verfahren exemplarisch beschrieben [50]. Sechs Jahre nach Inkrafttreten der novellierten AbfKlärV gibt es somit nur wenige großtechnische Anlagen, viele Verfahrensvorschläge mit Pilot- oder Demonstrationsanlagen, aber noch keine Rückgewinnungsverfahren, die man als „Stand der Technik“ bezeichnen könnte. Viel Zeit wurde verloren, zumal man vom Beginn des Aufbaus einer Anlage im großtechnischen Maßstab bis zur Serienreife acht bis zehn Jahre benötigt.

6. Grundlagen: Stoffpolitik, Ressourcenschutz, Wasserstrategie

Verantwortliches ökologisches Handeln heißt, natürliche Kreisläufe so weit wie möglich zu schließen. Dies gilt für Kohlenstoff ebenso wie für die Nährstoffe wie Phosphor und Stickstoff in Abwasser. Im Sinne eines Ressourcenschutzes ist es deshalb ein Ziel, Klärschlamm mit seinen wertvollen Inhaltsstoffen direkt landwirtschaftlich zu verwerten, wie es in vorindustrieller

Zeit üblich war. Eine weitgehende Schadstofffreiheit von Abwasser und Klärschlamm würde auch dem Schutz der Ressourcen Wasser und Boden und ihrer vielfältigen Nutzungen dienen. Mit den derzeit verfügbaren Verfahren zur Behandlung von Klärschlamm gelingt diese Kreislaufschließung nur zum geringen Teil. Grund dafür ist die immer noch zu hohe Belastung mit Schadstoffen.

Jahrzehntelanges, nicht nachhaltiges Handeln hat dazu geführt, dass Klärschlamm mit zahlreichen umweltgefährlichen Stoffen belastet ist, die es vor der Industrialisierung noch nicht gab. Viele dieser Stoffe sind so langlebig, dass sie über Jahrzehnte in der Umwelt stabil sind. Gemäß der REACH-Verordnung der EU sind Stoffe mit einem Produktions- oder Importvolumen größer 1 Tonne pro Jahr mit ihren Eigenschaften zu registrieren und bei vorhandenen Risiken zu beschränken oder zu verbieten [51]. Die Umsetzungsschritte für eine nachhaltige Stoffpolitik sind allerdings oft sehr langsam und halbherzig. Das Ziel der schadstofffreien Umwelt im Rahmen des „Green Deal“ der EU ist noch in weiter Ferne. Eine nachhaltige Stoffpolitik, die planetare Grenzen beachtet und zu der auch die Substitution gefährlicher Stoffe durch nachhaltige Chemikalien, die vor allem leicht abbaubar sein sollen, zählt, ist erforderlich [52, 53].

Auch die Nationale Wasserstrategie setzt sich zum Ziel, die „Risiken durch Stoffeinträge zu begrenzen“ und nimmt dabei Bezug auf die stoffpolitischen Pläne der EU [54]. Die Rückgewinnung von Nährstoffen aus Abwasser und Klärschlamm soll dabei eine vorrangige Maßnahme sein.

Kläranlagen sind „end of pipe“-Techniken. Ihre Reinigungsleistung hat Grenzen und viele Schadstoffe passieren die Kläranlagen oder werden an Klärschlamm adsorbiert. Deshalb sollten die nachsorgenden Techniken durch eine vorsorgende Stoffpolitik flankiert werden. Je weniger Schadstoffe Klärschlamm enthält, desto leichter lässt er sich wieder verwerten.

Noch ist es eine Vision, Abwasser wie in der Vergangenheit mit seinen wertvollen Inhaltsstoffen direkt wieder zu verwerten. In Streusiedlungen ohne Kanalanschluss, Kleingärten und einigen neu konzipierten Wohnquartieren ohne gewerbliche Einleiter kann man ebenso wie bei großen Open Air-Veranstaltungen den Kreislauf von Kohlenstoff und Nährstoffen lokal schließen. Mehrere Modellprojekte erproben diesen alternativen Ansatz [55, 56]. Z.B. stellt der in Trenntoiletten getrennt gesammelte Urin mit seinem hohen Stickstoff- und Phosphorgehalt einen wertvollen Dünger dar [57]. Die Arzneimittelbelastung lässt sich allerdings nicht vermeiden. Insgesamt lässt sich konventionelle Klärtechnik kurz- und mittelfristig nicht ersetzen, auch im Hinblick auf die Reinigung der indirekt eingeleiteten gewerblichen und industriellen Abwässer.

7. Bewertung der Verfahren zur Verwertung von Klärschlamm

Die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm ist ein Auslaufmodell. Zwar ist die Verwertung von Klärschlamm in der Landwirtschaft aus Sicht der Nutzung der darin enthaltenen Nährstoffe grundsätzlich sinnvoll. Jedoch überwiegen seit langem die Bedenken wegen des Schadstoffgehaltes des Klärschlammes. Aktuell dominiert noch die Mitverbrennung in Zement- und Kohlekraftwerken sowie Abfallverbrennungsanlagen. Kohlekraftwerke werden nach Decarbonisierung der Energieerzeugung nicht mehr zur Verfügung stehen, so dass sich die Mitverbrennung auf phosphorarme Klärschlämme und Klärschlämme, denen durch Fällungsverfahren der Phosphor entzogen wurde, beschränken wird. Es verbleiben Verfahren zur thermischen Behandlung des Klärschlammes, bei denen sich der Phosphor rückgewinnen lässt.

Diverse Verfahrensvorschläge zur Phosphorrückgewinnung liegen vor, sind aber nur zu einem geringen Teil großtechnisch erprobt. Kläranlagenbetreiber sollten bei der Auswahl des für sie geeigneten Verfahrens die nachfolgend genannten Auswahlkriterien beachten. Allerdings sind sie aktuell weitgehend auf Informationsmaterial der Anbieter mit Werbecharakter angewiesen. Deshalb wäre es sinnvoll, ökologisch sinnvolle Verfahren einer vergleichenden ökologischen Bilanzierung durch eine unabhängige Stelle zu unterziehen. Die wenigen Publikationen, die einige Verfahren vergleichen, geben nur vorläufige partielle Hinweise [27, 58]. Eine konkrete Empfehlung, welche Verfahren ökologisch, technisch und ökonomisch besonders sinnvoll sind, kann deshalb aktuell nicht gegeben werden.

Folgende Auswahlkriterien sind besonders relevant:

- Transportaufwand

Nasschemische Fällungsverfahren zur Gewinnung von Phosphaten aus Klärschlamm haben den Vorteil, dass sie sich oft auf Kläranlagen integrieren lassen und von dem dort tätigen Personal durchgeführt werden können. Monoverbrennungsanlagen lassen sich demgegenüber nur mit größerem Einzugsgebiet betreiben. Sehr kleine Verbrennungsanlagen an Kläranlagen mit weniger als 50.000 EW sind nicht empfehlenswert, weil solche Anlagen eine kontinuierliche, stabile Anlieferung von Klärschlamm benötigen, und der spezifische Aufwand z.B. für die Abgasreinigung zu hoch wäre. Der abgereicherte Klärschlamm ist allerdings zu einer Verbrennungsanlage zu transportieren.

- Emissionen

Die Emissionen aller Verbrennungsanlagen – ob Mitverbrennung oder Monoverbrennung oder die meisten integrierten Verfahren – unterliegen den Anforderungen der 17. BImSchV. Auch bei der thermischen Behandlung von Klärschlammesche und vielen alternativen Verfahren müssen Schadstoffe, vor allem Schwermetalle, in einer effektiven Rauchgasreinigung

abgeschieden werden. Organische Stoffe werden bei Verbrennungstemperaturen von 850 °C und höher zu CO₂ verbrannt. Fluorchemikalien (PFAS) benötigen jedoch eine Temperatur der Verbrennungsgase von wenigstens 1100 °C mit einer Mindestaufenthaltszeit von 2 Sekunden. Ist der Klärschlamm höher mit PFAS belastet, sind die üblichen Temperaturen der Abfallverbrennung ungeeignet. Auch ist auf eine effektive Elimination von Stickstoffoxiden – sowohl NO_x als auch Lachgas (N₂O) – zu achten.

- Energie- und Klimabilanz

Grundsätzlich wird bei allen Verfahren, bei denen die organische Substanz des Klärschlammes vollständig oxidiert wird, diese als CO₂ emittiert. Verschlechternd für die Bilanz an Treibhausgasen sind Verfahren, bei denen eine Stützfeuerung mit Gas benötigt wird. Bei den Fällungsverfahren ist zu berücksichtigen, dass die Mitverbrennung des abgereicherten Klärschlammes ebenfalls zu Treibhausgasemissionen führt. Verfahren, bei denen die Klärschlamm-Asche zur weiteren Reinigung erhitzt werden muss, schneiden schlechter ab. Nur bei den Verfahrensvarianten, bei denen kohlehaltige Rückstände entstehen (Beispiele: HTC-Verfahren und Pyrolyse), sind die verfahrensbedingten CO₂-Emissionen geringer [58]. Günstiger schneiden dezentrale Verfahren ab, bei denen die freigeordnete Wärmeenergie der Klärschlammverbrennung gemeinsam mit der Faulgasverbrennung z.B. zur Klärschlamm-trocknung oder für Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) genutzt wird.

- Reststoffe

Nach Abtrennung des Düngerphosphats fallen in praktisch allen Verfahren Reststoffe an. Bei den Fällungsverfahren aus Klärschlamm oder Abwasser ist es phosphorarmer Klärschlamm, der einer (Mit-)Verbrennung zuzuführen ist. Bei Verbrennungsaschen liegt nach Abtrennung des Phosphors meist unlösliche Restasche vor, die wegen ihres hohen Schwermetallgehaltes zu deponieren ist. Werden – wie bei der thermischen Behandlung von Klärschlamm-Aschen oder bei einigen alternativen Verfahren – die Schwermetalle aus der Asche ausgetrieben, fallen schwermetallhaltige Flugstäube an und es ist sicherzustellen, dass der phosphathaltige Rückstand mit mineralischen Bestandteilen nur wenig Schwermetalle enthält. Hierbei ist besonders auf erhöhte Kupfer- und Zinkgehalte zu achten. Bei Pyrolysekarbonisaten ist die Umweltverträglichkeit durch die Anwesenheit von PAK stark eingeschränkt. Auch ist bei einigen Verfahren zu klären, ob das phosphathaltige Produkt ohne weitere Aufbereitung den Anforderungen des Düngerechts genügt.

- Pflanzenverfügbarkeit des Recyclats

Ein entscheidendes Beurteilungskriterium für die Nutzung des Phosphors aus Abwasser, Klärschlamm oder Klärschlamm-Asche als Dünger ist die Pflanzenverfügbarkeit des Recyclats. Diese wird üblicherweise mithilfe der Löslichkeit in neutraler Ammoniumcitratlösung oder durch Pflanzversuche bestimmt

[59]. Bei allen Fällungsprodukten, sei es Magnesiumammoniumphosphat (Struvit) oder verschiedene Calciumphosphate, ist in der Regel eine hohe Pflanzenverfügbarkeit gegeben. Auch aus Phosphorsäure lassen sich pflanzenverfügbare Phosphatdünger herstellen. Nach Herstellerangaben schneiden Recyclate aus Verfahren, bei denen die Aschen oder die Rückstände aus integrierten Verfahren (z.B. Schmelzschlacken oder Karbonisate aus der Pyrolyse) thermisch behandelt wurden, ebenfalls günstig ab. Dies ist aber im Einzelfall zu überprüfen. Eisen- und Aluminiumphosphat aus der chemischen Fällung in der 3. Reinigungsstufe sind in der Regel schlecht pflanzenverfügbar.

- Entwicklungsstand und Effektivität

Der Vorteil mehrerer nasschemischer Fällungsverfahren ist, dass sie an einigen großen Kläranlagen bereits erfolgreich eingesetzt werden. Dies wird allerdings dadurch aufgewogen, dass nicht sichergestellt ist, dass sie im Dauerbetrieb genügend hohe Phosphorrückgewinnungsquoten erzielen. Außerdem sind sie für Eisen- und Aluminiumphosphate aus der chemischen Fällung meist ungeeignet und führen nur dann zu guten Ergebnissen, wenn eine Bio-P Eliminierung vorgeschaltet ist.

Die Klärschlammmonoverbrennung ist inzwischen bewährt und eingeführt. Demgegenüber stehen für den Aufschluss der Aschen zur Gewinnung der als Düngemittel verwendbaren Phosphate kaum großtechnisch bewährte Verfahren zur Verfügung. Bei der Mehrzahl der Verfahren liegen nur Erfahrungen aus Pilot- und Demonstrationsanlagen vor.

Dies gilt ebenso für die integrierten Verfahren der Klärschlammbehandlung (z.B. HTC-Verfahren, thermische Verfahren mit integrierter Phosphorrückgewinnung). Dies ist bedauerlich, zeigen doch einige dieser Verfahren durchaus Vorteile gegenüber der Monoverbrennung mit anschließendem Aufschluss der Asche.

- Kosten

Zur Beurteilung der Kosten der Klärschlammverwertung liegen nur wenige gesicherte Zahlen vor. Das Umweltbundesamt veranschlagt für die Kosten der landwirtschaftlichen Klärschlamm-ausbringung zwischen 160 und 320 €/t TM, günstiger als die Mitverbrennung (280 bis 400 €/t TM) und die Monoverbrennung (280 bis 480 €/t TM) [6]. Noch schwerer sind die Kosten der Phosphorrückgewinnung zu kalkulieren, da Herstellerangaben meist nicht verlässlich sind. Erste Schätzungen gehen von 3 bis 11 € pro Einwohner und Jahr aus. Ideal wäre, wenn die Kosten für die P-Rückgewinnung durch den Erlös des Verkaufs von Sekundärphosphat kompensiert würden. Dies hängt jedoch von dem Marktpreis im Vergleich zu primärem Mineralphosphat ab.

8. Schritte zur Akzeptanz von Recycling-Phosphat

Für eine erfolgreiche Rückführung des Phosphors aus Klärschlamm in den Wertstoffkreislauf ist eine Fülle gesetzlicher Bestimmungen zu beachten, die nicht widerspruchsfrei sind und zurzeit das P-Recycling eher erschweren. Einschlägig sind Wasserrecht, Abfallrecht, Düngerecht und das Stoffrecht [60]. Mehr rechtliche Klarheit ist wünschenswert. Die EU-Düngemittelverordnung setzt einen Rechtsrahmen für Düngemittel, die EU-weit gehandelt und verwendet werden dürfen [61], und ergänzt die deutsche Düngemittelverordnung, die für in Deutschland gehandelte Düngemittel Maßstäbe setzt. Problematisch ist allerdings der hohe Aufwand des Anerkennungsverfahrens, wie Heyl et al. am Beispiel von Knochenkohle herausstellen [62]. Für die jeweiligen Recyclate muss bestätigt werden, dass sie diesen rechtlichen Anforderungen genügen.

Eine weitere Frage ist die Akzeptanz der P-Recyclate auf dem Düngemittelmarkt. Wie bei vielen anderen Recyclingprodukten tendieren Kunden dazu, Sekundärprodukte als minderwertig zu betrachten, was die preisliche Konkurrenzfähigkeit beeinträchtigt. Es wird notwendig sein, auch vonseiten des Staates durch gesetzliche Vorgaben und Aufklärungskampagnen die Akzeptanz hochwertiger, nicht mit Cadmium oder Uran kontaminierter Sekundärphosphate zu fördern.

9. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Klärschlamm ist eine wesentliche Quelle für das Recycling eines kritischen Rohstoffs: Phosphor. Die gesetzlichen Voraussetzungen für die weitgehende Einsparung von mineralischem Primärphosphat sind seit 2017 gegeben. Hierzu sind technische Verfahren nötig, die die in Klärschlamm vorhandenen Schadstoffe sicher abtrennen. Für dieses Ziel reichen ausgefeilte „end of pipe“-Techniken nicht aus, sondern es muss auch eine entschlossene, nachhaltige Stoffpolitik im Sinne des EU-Ziels einer schadstofffreien Umwelt an der Quelle ansetzen. Fluorchemikalien (PFAS) und Arzneimittel sind zwei prominente Beispiele, die zu bedenklichen Abwasser- und Klärschlammbelastungen führen.

Der Schadstoffgehalt von Klärschlamm ist ein Grund, die schon seit Jahrzehnten umstrittene direkte landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm endgültig zu beenden, und zwar nicht nur – wie gesetzlich vorgesehen – für große Kläranlagen der Größenklassen 4b und 5, sondern vollständig. Da die heute dominierende Mitverbrennung von Klärschlamm – auch wegen der Einstellung der Kohleverbrennung – keine Lösung darstellt, die zur Rückgewinnung von Phosphor führt, sind Verfahren zu entwickeln und einzusetzen, die Phosphor effektiv aus Klärschlamm zurückgewinnen. Drei grundsätzliche Verfahrensansätze stehen zur Verfügung: Fällung von Phosphaten aus Faulschlamm und anschließende (Mit-)Verbrennung des abgereicherten Schlammes, Monoverbrennung des Schlammes und anschließende Isolierung der Phosphate aus der Asche und integrierte Verfahren, bei denen die thermische Behandlung des Schlammes und die Phosphorrückgewinnung in einer Anlage erfolgen. Die Mehrzahl der Verfahrensvorschläge ist

bisher nur in Pilot- und Demonstrationsanlagen realisiert. Unabhängige Daten zum ökologischen Vergleich fehlen noch weitgehend. Deshalb sollten drei weitere Jahre genutzt werden, um diesen Vergleich durchzuführen und den Kläranlagenbetreibern damit eine Grundlage für die Entscheidung zu einem Verfahren zu geben.

In einem Positionspapier hat der BUND den aktuellen Wissensstand zur Phosphorrückgewinnung dargestellt und zahlreiche Empfehlungen für einen umweltverträglichen Ausbau der Phosphorrückgewinnung gegeben [50]. Hierzu zählen die Forderung nach einer übergreifenden Planung, Auswahlkriterien zur Verfahrensauswahl, Anforderungen an die thermischen Verfahren bezüglich Luftreinhaltung und Hinweise zu Energie- und Klimabilanzen.

Ein besonderes Problem stellt die Kontamination von Klärschlämmen mit den hochpersistenten PFAS dar, die sich bei den üblichen Verbrennungstemperaturen nicht vollständig zersetzen. Bisher existiert ein Grenzwert für die bodenbezogene Verwertung, der allerdings nicht mehr den aktuellen Wissensstand widerspiegelt. Ein Grenzwert für Sekundärphosphate ist erforderlich. Ebenso sollten hochbelastete Schlämme identifiziert und einer Hochtemperaturverbrennung zugeführt werden.

Schließlich sind gesetzliche und ökonomische Maßnahmen erforderlich, damit Sekundärphosphate auf dem Markt konkurrenzfähig zu Primärphosphaten werden und von den Landwirten akzeptiert werden. Generell ist die Belastung unserer Gewässer und Böden mit Nährstoffen wie Phosphor zu hoch und nicht nachhaltig. Weitere Strategien auf dem Abwassersektor und in der landwirtschaftlichen Praxis sind notwendig, um die Belastung zu reduzieren.

Literaturverzeichnis

- [1] EU-Kommission (2022): Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die Behandlung von kommunalem Abwasser (Neufassung), COM(2022) 541 final, <https://environment.ec.europa.eu/system/files/2022-10/Proposal%20for%20a%20Directive%20concerning%20Urban%20wastewater%20treatment%20%28recast%29.pdf>
- [2] DESTATIS (2022): Wasserwirtschaft: Entsorgungswege des Klärschlammes aus der biologischen Abwasserbehandlung 2021, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Tabellen/liste-klarschlammverwertungsart.html#633398>
- [3] Stark K. et al. (2022): Status Quo der thermischen Klärschlammbehandlung und Phosphorrückgewinnung in Deutschland. In: Olaf Holm, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Peter Quicker, Stefan Kopp-Assenmacher (Hrsg.): Verwertung von Klärschlamm, ISBN 978-3-944310-43-5, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, 9-24

- [4] DWA (2020): 32. Leistungsnachweis kommunaler Kläranlagen – Klärschlammfall, https://www.dwa-bw.de/files/media/content/PDFs/LV_Baden-Wuerttemberg/Homepage/BW-Dokumente/Homepage%202013/Nachbarschaften/32.LN_2019_Endfassung_klein.pdf
- [5] DESTATIS/DWA (2015): Abwasser und Klärschlamm in Deutschland – Statistische Betrachtungen, Korr. Abwasser, Abfall 2015 (62), <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Publikationen/Downloads-Wasserwirtschaft/abwasser-klärschlamm-5322102159004.pdf?blob=publicationFile&v=5>
- [6] UBA (2018): Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/2018_10_08_uba_fb_klaerschlamm_bf_low.pdf
- [7] BUND (2020): Position 70: Arzneimittel in der Umwelt https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/bund/position/position_arzneimittel.pdf
- [8] Stenzel F. et al. (2019): Arzneimittelrückstände in Rezyklaten der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen, Abschlussbericht, UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.) Texte 31/2019, Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-03-29_texte_31-2019_arzneimittelrueckstaende-klärschlamm_v2.pdf
- [9] SRU (2007) : Sachverständigenrat für Umweltfragen (2007): Arzneimittel in der Umwelt, Stellungnahme Nr. 12, Berlin, https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2004_2008/2007_Stellung_Arzneimittel_in_der_Umwelt.pdf
- [10] EU-Kommission (2022): Commission Regulation (EU) .../... of XXX amending Annex XVII to Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) as regards synthetic polymer microparticles, D083921/01 (Draft Implementing Act), <https://ec.europa.eu/transparency/comitology-register/screen/documents/083921/1/consult?lang=en>
- [11] BMBF (2022): Plastik in der Umwelt – eine Forschungsinitiative des BMBF, Webinar #13: Mikroplastik in Abwasser - Eintragspfade, Regulierung und Handlungsempfehlungen, <https://bmbf-plastik.de/de/veranstaltung/mikroplastik-in-abwasser-2> (abgerufen am 09.08.2023)
- [12] Barjenbruch F. (2023): persönliche Mitteilung am 17. August 2023
- [13] BMBF (2022): Verbundprojekt REPLAWA: Reduktion des Eintrags von Plastik über das Abwasser in die aquatische Umwelt, https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2022-09/REPLAWA_Schlussbericht_Mikroplastik-Eintrag_C3%A4ge%20C3%BCber%20Abwasser_02WPL1445A%20ff_220828.pdf
- [14] MicBin (2021): Plastik in der Umwelt – Quellen · Senken · Lösungsansätze, Mikroplastik in Binnengewässern Untersuchung und Modellierung des Eintrags und Verbleibs im Donauebiet als Grundlage für Maßnahmenplanung, https://www.micbin.de/download/Abschluss_MicBin_02-11-2021-Final.pdf
- [15] Chemnitz, C. & Rehmer, C. (2019): Ernährung - ein unappetitlicher Kreislauf, in: Heinrich-Böll-Stiftung, BUND (Hrsg): Plastikatlas, Berlin: 20-21, https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/chemie/chemie_plastikatlas_2019.pdf
- [16] Seay B.A. et al. (2023): Per- and polyfluoroalkyl substances fate and transport at a wastewater treatment plant with a collocated sewage sludge incinerator, Sci Total. Environ. 874, 162357 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162357>
- [17] ECHA (2023): Registry of restriction intentions until outcome – Per- and polyfluorinated substances (PFAS), <https://echa.europa.eu/de/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e18663449b>
- [18] Ulrich H. et al. (2016): Entwicklung der PFC-Belastung in kommunalen Klärschlämmen in Bayern, Korrespondenz Abwasser, Abfall 63 Nr. 9, 788-796, https://www.lfu.bayern.de/analytik_stoffe/pfc/pfc_belastung_abwasser_klaerschlamm/doc/entwicklung_pfc_belastung_ks.pdf
- [19] BUND (2021): Fluorchemikalien: Langlebig, gefährlich, vermeidbar. Hintergrundpapier https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/chemie/chemie_fluorchemikalien_hintergrund.pdf
- [20] Brunn H. et al (2023): PFAS: forever chemicals—persistent, bioaccumulative and mobile. Reviewing the status and the need for their phase out and remediation of contaminated sites, Environmental Sciences Europe 2023, 35(1):20, <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00721-8>
- [21] Oliva J. et al. (2009): Klärschlamm – Materialien zur Abfallwirtschaft, Report REP 0221, Umweltbundesamt (AT) Klagenfurt 2009, <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0221.pdf>
- [22] QLA - Qualitätssicherung Landbauliche Abfallverwertung (2017): Qualitäts- und Prüfbestimmungen für Klärschlämme, https://www.qla.de/sites/default/files/Dokumente/QP_Klaerschlamm_November_2017.pdf
- [23] Wolters B. et al (2022): Erarbeitung anspruchsvoller Standards für die mittelfristige Fortführung der bodenbezogenen Verwertung von Klärschlämmen aus Abwasserbehandlungsanlagen mit kleiner Ausbaugröße, Umweltbundesamt (Hrsg.) Umwelt & Gesundheit 3/2022, Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/2022-09/REPLAWA_Schlussbericht_Mikroplastik-Eintrag_C3%A4ge%20C3%BCber%20Abwasser_02WPL1445A%20ff_220828.pdf

- [en/479/publikationen/uug_03-2022_erarbeitung_anspruchsvoller_standards.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uug_03-2022_erarbeitung_anspruchsvoller_standards.pdf)
- [24] Sichler T. et al. (2022), „Abschätzung zusätzlich aus Abwasser und Klärschlämmen kommunaler und gewerblicher Herkunft extrahierbarer Wertstoffe“, Umweltbundesamt (Hrsg.), UBA-Texte 156/2022 Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_156-2022_abschaetzung_zusaetzlich_aus_abwasser_und_klaerschlaemmen_kommunaler_und_gewerblicher_herkunft_extrahierbarer_wertstoffe.pdf
- [25] EU-Kommission (2014): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss der Regionen über die Überprüfung der Liste kritischer Rohstoffe für die EU und die Umsetzung der Rohstoffinitiative, COM(2014)297 final, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014DC0297>
- [26] BMUV (2020): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III – 2020 bis 2023 - Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/ressourceneffizienz_programm_2020_2023.pdf
- [27] Kraus F. et al. (2019): Ökobilanzieller Vergleich der P-Rückgewinnung aus dem Abwasserstrom mit der Düngemittelproduktion aus Rohphosphaten unter Einbeziehung von Umweltfolgeschäden und deren Vermeidung, UBA Texte 13/2019, Umweltbundesamt (Hrsg), Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-19_texte_13-2019_phorwaerts.pdf
- [28] 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, Österr Wasser- und Abfallw, 68, 118-133, <https://doi.org/10.1007/s00506-016-0295-6>
- [29] DESTATIS (2023): Inlandsabsatz von Düngemitteln, <https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Grafiken/Newsroom/2022/Interaktiv/20220926-duengemittel.html>
- [30] Roskosch A. & Heidecke P. (2022): Phosphatdünger aus Klärschlamm, UmweltMagazin, Nr. 5-6
- [31] DWA (2023): DWA Themen T1/2023 – Handlungsempfehlung zur integrativen Bewertung der weitergehenden Abwasserbehandlung von kommunalen Kläranlagen, <https://shop.dwa.de/DWA-Themen-Integrative-Bewertung-Abwasser/TH-KA-8.1-PDF-23>
- [32] BMJ (2016): Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer – (Oberflächengewässerverordnung - OGewV), https://www.gesetze-im-internet.de/ogewv_2016/OGewV.pdf
- [33] DWA (2022). 34. Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen – Nährstoffe im Abwasser, https://de.dwa.de/files_media/content/06_SERVICE/Zahlen%20%7C%20Fakten%20%7C%20Umfragen/leistungen_vergleich_2022_8seiter_A4_web.pdf
- [34] Rockström J. et al. (2009): A safe operating space for humanity, Nature, Vol. 461, S. 472 – 475, <https://www.nature.com/articles/461472a>
- [35] Steffen W. et al. (2015): Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet, Science, Vol. 347, No. 6223, <https://science.sciencemag.org/content/347/6223/1259855>
- [36] Bundesregierung (2017): Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2017 Teil I Nr. 65, 3465-3512 https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBL&jumpTo=bgbl117s3465.pdf#_bgbl_%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl117s3465.pdf%27%5D_1691571493455
- [37] BMJ (2012): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV), https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/D%3BC3%BCMV.pdf
- [38] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden Württemberg (2022): Phosphor-Rückgewinnung, <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/umwelt-natur/abfall-und-kreislaufwirtschaft/kreislaufwirtschaft/recycling-und-abfalltechnik/phosphor-rueckgewinnung/>
- [39] Heinzmann B. & Lengemann A. (2022): Stand der Phosphorrückgewinnung in Berlin, Internationales Symposium RE-WATER, Braunschweig, https://re-water-braunschweig.com/wp-content/uploads/heinzmann_lengemann_p-rueckgewinnung_berlin.pdf
- [40] Natz, S. (Berliner Wasserbetriebe – BWB) (2022): persönliche Kommunikation
- [41] Rak A. (2018): Das Remondis Tetrachlor-Verfahren. In: Olaf Holm, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Peter Quicker, Stefan Kopp-Assenmacher (Hrsg.): Verwertung von Klärschlamm, ISBN 978-3-944310-43-5, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH S.491-494, https://books.vivis.de/wp-content/uploads/2022/12/2018_VvK_491-494_Rak.pdf
- [42] Ulbrich J. et al. (2021): AshDec: Thermochemische P-Rückgewinnung aus Klärschlamm, Nutriman Webinar, 01.03.2021, https://nutriman.net/sites/default/files/2021-03/Presentation%20Webinar-26-2-21-ID%20398_397%20AshDec.pdf
- [43] BAM (2020): R-Rhenania - Modifiziertes Rhenania Phosphat aus Klärschlamm für Bayern, <https://www.bam.de/Content/DE/Projekte/laufend/R-Rhenania/r-rhenania.html> (abgerufen am 08.02.2024)
- [44] Gerber H. (2023): Phosphat recyceln & Kohlenstoff binden, Umweltmagazin 53, Nr. 3-4, 12-14,

- <https://www.ingenieur.de/fachmedien/umweltmagazin/special-phosphor-aus-klaerschlam-zurueckholen/phosphor-recyceln-kohlenstoff-bindn/>
- [45] Überschär K.H. (2006): Möglichkeiten der Dekontamination: 2, Organische Stoffe/Kontaminanten; 2.5, Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK). Landbauforsch Völkenrode SH 294:101-109, https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/bitv/zi040841.pdf
- [46] Buttman M. (2023): Gut Klärschlamm pressen, gibt viel Phosphor, Umweltmagazin 53, Nr. 3-4, <https://www.ingenieur.de/fachmedien/umweltmagazin/special-phosphor-aus-klaerschlam-zurueckholen/gut-klaerschlam-presse-gibt-viel-phosphor/>
- [47] Remy C. und Stüber J. (2015): Weiterentwicklung des Klima- und Ressourceneffizienzpotentials durch HTC-Behandlung ausgewählter Berliner Klärschlämme - HTC-Berlin, <https://publications.kompetenz-wasser.de/de/publication/845/>
- [48] Grenzebach (2022): Whitepaper - Phosphor-Recycling aus Klärschlamm: Was Kommunen jetzt wissen müssen <https://www.grenzebach.com/de/produkte/phosphor-recycling-anlagen/whitepaper/>
- [49] Scholz R.W. & Bilbao J. (2018): Verwertbarer Phosphor aus Klärschlämmen – Leistungen des erprobten Kubota-KFSM-Verschmelzungsprozesses, Korrespondenz Abwasser Abfall 65(6), 539-544
- [50] BUND (2023): Position 76: Klärschlamm: Nährstoffquelle und Schadstoffsenke, https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/bund/position/klaerschlam-naehrstoffquelle-schadstoffsenke-position-76-bund.pdf
- [51] EU (2006): Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02006R1907-20221217&qid=1677942073398&from=DE>
- [52] BUND (2023): Position 69: Herausforderungen für eine nachhaltige Stoffpolitik – Notwendigkeit einer Transformation im globalen Kontext, https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/ressourcen_und_technik/Herausforderungen_fuer_eine_nachhaltige_Stoffpolitik_Positionspapier_BUND_2023.pdf
- [53] Steinhäuser K.G. et al. (2022): The necessity of a global binding framework for sustainable management of chemicals and materials—Interactions with climate and biodiversity sustain. Chem. 2022, 3(2), 205-237, <https://doi.org/10.3390/suschem3020014>
- [54] BMUV (2023): Nationale Wasserstrategie (15.März 2023), https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewasser/nationale_wasserstrategie_2023_bf.pdf
- [55] EAWAG (2021): Blue Diversion Autarky – Abwasserbehandlung ohne Netzanschluss, <https://www.eawag.ch/de/forschung/menschen/abwasserprojekte/autarky/>
- [56] Hamburg Wasser (2023): Abwasser neu denken – Hamburg Water Cycle, <https://www.hamburgwasser.de/umwelt/vorsorge/hamburg-water-cycle> (abgerufen am 08.02.2024)
- [57] GDCh (2022): Wertvoller Abfall – Klärschlamm und Urin als Phosphorquellen, <https://faszinationchemie.de/artikel/news/wertvoller-abfall-klaerschlam-und-urin-als-phosphorquellen/> (abgerufen am 08.02.2024)
- [58] Björnsen Beratende Ingenieure (2023): Untersuchung der Klimawirkung unterschiedlicher Klärschlammbehandlungsverfahren mit dem Ziel eines Phosphor-Recyclings aus kommunalem Klärschlamm, BUND Naturschutz in Bayern e.V., https://www.bund-naturschutz.de/fileadmin/Bilder_und_Dokumente/Presse_und_Aktuelles/2023/Abfall/PM-115-23_Klaerschlam_Studie.pdf
- [59] Kratz S. & Schnug E. (2009): Zur Frage der Löslichkeit und Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor, Journal für Kulturpflanzen 61 (1), 2-8
- [60] Ehbrecht A. et al. (2023): Nachhaltige Nutzung von Phosphor-Rezyklaten, KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall 70 (4), 275-281
- [61] EU (2019): Verordnung (EU) Nr. 2019/1009 des Europäischen Parlaments und des Rates am 5. Juni 2019 mit Vorschriften für die Bereitstellung von EU-Düngeprodukten auf dem Markt und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 1069/2009 und (EG) Nr. 1107/2009 sowie zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 2003/2003, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1009&qid=1692103921468>
- [62] Heyl K. et al. (2023): Using bone char as phosphate recycling fertilizer: An analysis of the new EU Fertilizing Products Regulation, Environmental Sciences Europe 35:109, <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-023-00819-z>
- [63] Zhou T. et al. (2024): Occurrence, fate, and remediation for per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in sewage sludge: A comprehensive review, Journal of Hazardous Materials 466 (2024) 133637 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133637>

Korrespondenzadresse

Klaus Günter Steinhäuser

Derfflingerstr. 14

12249 Berlin

Email: klaus-g.steinhaeuser@posteo.de

Tel.: +49 172 7607739