



Nachhaltigkeitsbewertung von Phosphor-Recycling

Webinar

Dr.-Ing. Roland Meyer

Institut für Nachhaltigkeit im Bauwesen

Gliederung

1. Einführung in das Projekt RePhoR
2. Grundlagen der Nachhaltigkeitsbewertung / Ökobilanzierung
3. Anwendung der Methodik der Ökobilanz auf das Phosphorrecycling aus Klärschlamm(-asche)
4. Diskussion der getroffenen Annahmen
5. Fazit

RePhoR - Ein Überblick

- Phosphor (P) ist ein **essentieller und nicht substituierbarer** Baustein in allen Lebewesen und wird vor allem als Dünger für eine ertragreiche Landwirtschaft gebraucht.
- Die **endlichen Phosphaterz-Reserven** sind auf wenige, teilweise politisch instabile Regionen in der Welt begrenzt und zunehmend verunreinigt (Cadmium, Uran).
- Phosphor wurde von der EU bereits im Jahr 2014 auf die Liste der **kritischen Rohstoffe** gesetzt.
- Eine wichtige Rolle zur Sicherung der zukünftigen Versorgung spielt die **Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm**.
- Die Bundesregierung hat mit der im Oktober 2017 in Kraft getretenen **Novellierung der Klärschlammverordnung** die gesetzlichen Rahmenbedingungen geschaffen.
- Diese Entwicklung unterstreicht den großen **Bedarf an innovativen, wirtschaftlichen und nachhaltigen Lösungen** zum P-Recycling.



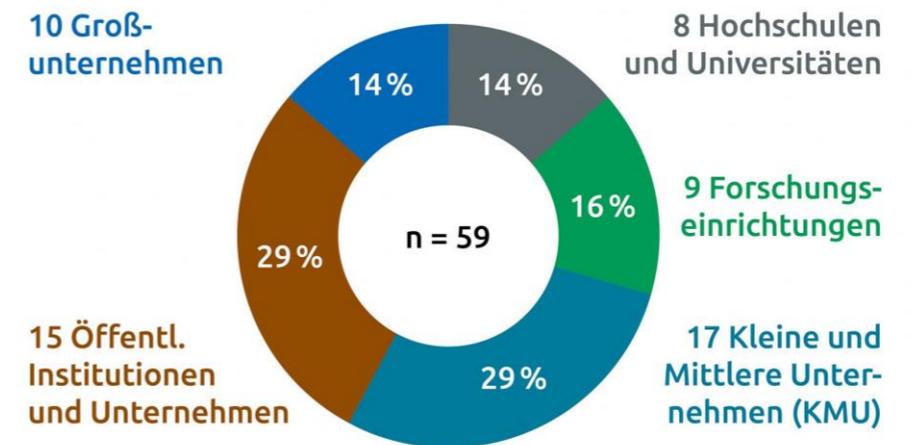
RePhoR – Regionales Phosphor-Recycling (1)

Ziel der von Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Maßnahme **Regionales Phosphor-Recycling (RePhoR)** ist es, durch innovative wirtschaftliche Lösungen zum regionalen P-Recycling einen **Beitrag zur Umsetzung der neuen Klärschlammverordnung** zu leisten.

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus unterschiedlichen Stoffströmen entwickelt. Die **größtechnische Umsetzung** ist jedoch bisher vor allem aufgrund **wirtschaftlicher und rechtlicher Unsicherheiten** nur für sehr wenige Verfahren erfolgt. Daraus ergibt sich ein **hoher Bedarf an der beispielhaften Entwicklung und großtechnischen Umsetzung** von Verfahren zur P-Rückgewinnung unter realen Bedingungen für verschiedene Anlagengrößen und -typen.

RePhoR (Umsetzungsphase) in Zahlen

- » Laufzeit: 5–6 Jahre (Start: 01.07.2020)
- » Anzahl Verbundprojekte: 7
- » geförderte Verbundpartner: 59
- » Fördervolumen: ca. 32 Mio. €



<https://www.bmbf-rephor.de/>

RePhoR - Übersichtskarte

[AMPHORE](#) (1)

Regionales Klärschlamm- und Aschen-Management zum Phosphorrecycling für einen Ballungsraum

[DreiSATS](#) (2)

Technologiedemonstration zur Kombination von Staubfeuerung und Säureaufschlussgranulierung mit integrierter Schwermetallabscheidung für das regionale Phosphorrecycling aus Klärschlämmen im „Mitteldeutschen Dreiländereck“ Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen

[KlimaPhoNds](#) (3)

Klimaneutrale und reststofffreie Klärschlammverwertung mit Phosphorsäureproduktion in Südost-Niedersachsen

[P-Net](#) (4)

Aufbau eines Netzwerks zum ressourceneffizienten Phosphor-Recycling und -Management in der Region Harz und Heide

[RePhoRM](#) (5)

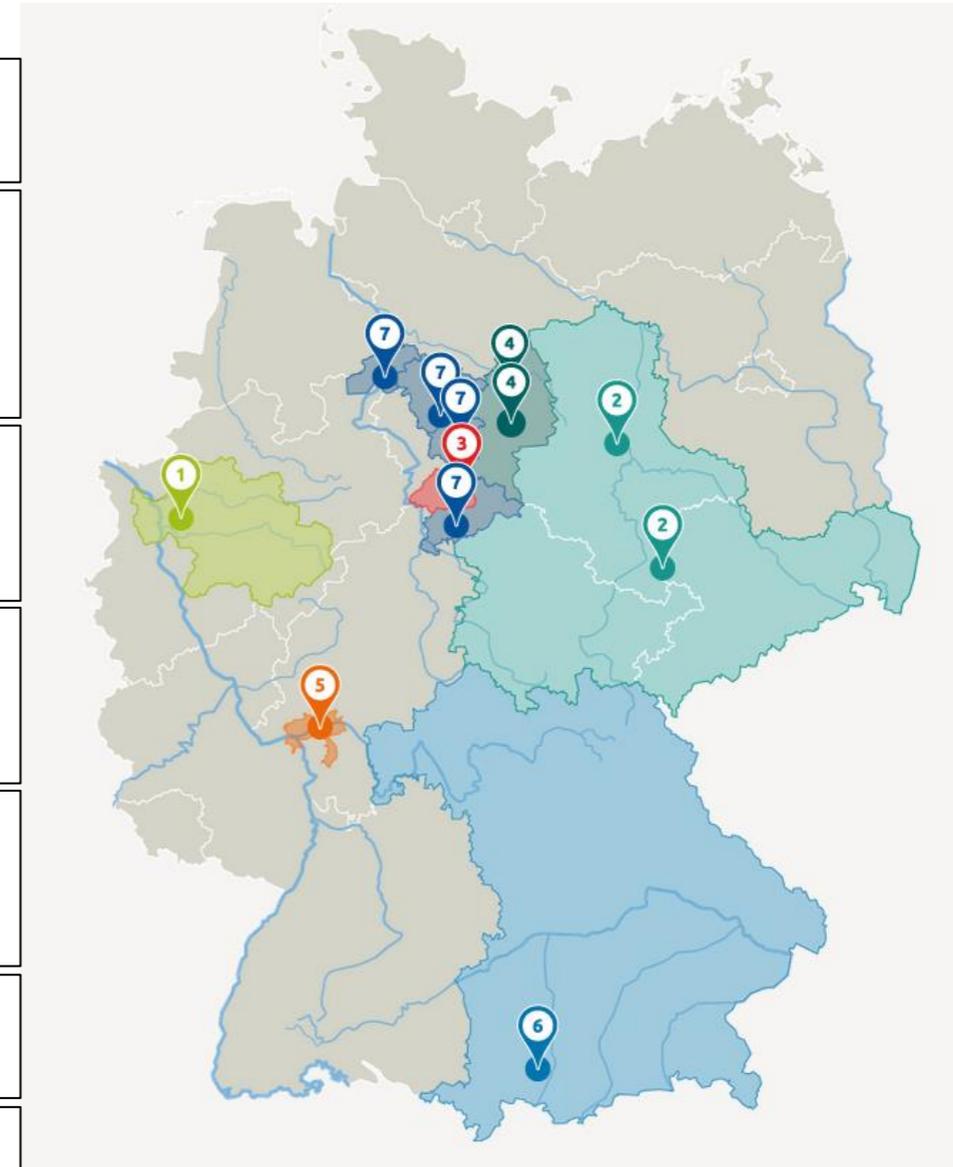
Regionales Phosphorrecycling im Rhein-Main- Gebiet unter Berücksichtigung industrieller und agrarischer Stoffkreisläufe

[R-Rhenania](#) (6)

Modifiziertes Rhenania Phosphat aus Klärschlammasche für Bayern

[SATELLITE](#) (7)

Verfahrenstechniken im Haupt- und Satellitenbetrieb eines interkommunalen Recyclingzentrums für ein optimiertes regionales Nährstoffrecycling



RePhoR - Großtechnik

Dezentrale Verbrennung von Klärschlämmen mit Hilfe der **Staubfeuerung und Verarbeitung der Klärschlammaschen** mit dem darin enthaltenen Phosphor mittels der neu entwickelten Säure-Aufschluss-Granulierung nach dem **Pontes-Pabuli-Verfahren** zu marktfähigen Düngeprodukten.

Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen nach dem nasschemischen **PARFORCE®-Verfahren**, bei dem der Phosphor in Form von Phosphorsäure aus den Aschen zurückgewonnen wird.

Klärschlamm wird in der **Rostfeuerung** unter Zugabe von Natrium-Additiven **thermochemisch behandelt** und wird anschließend zu Phosphat- bzw. Mehrkomponentendünger konfektioniert.

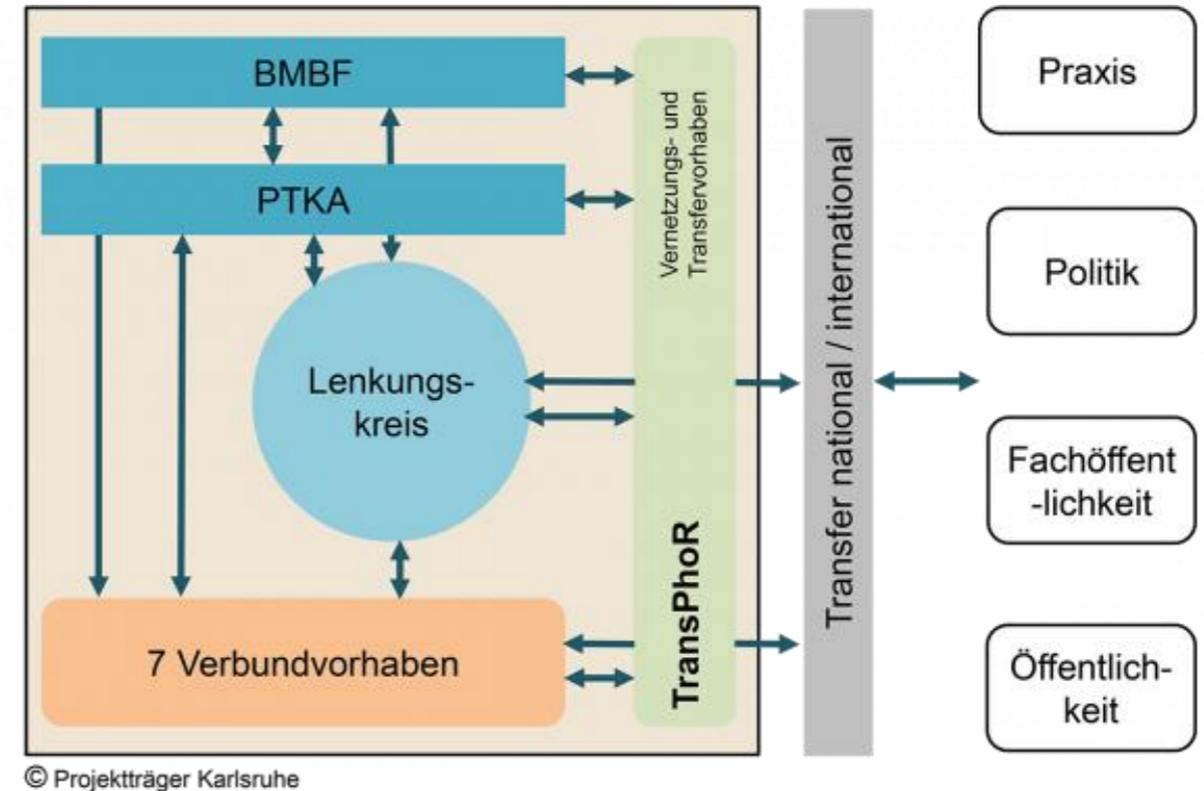
P-Rücklösung aus Überschussschlamm und **Fällung der Phosphate aus dem Zentratwasser des Überschussschlamm** (Magnesium-Ammonium-Phosphat - MAP)

Implementierung der weiterentwickelten **PHOS4green-Techologie** zur P-Rückgewinnung aus Klärschlammaschen.

RePhoR – Regionales Phosphor-Recycling (2)

Das wissenschaftliche Begleitvorhaben **TransPhoR** beschäftigt sich mit der Synthese der Ergebnisse der Verbundvorhaben sowie mit **begleitenden fachlichen Fragestellungen**

- zu Produkten und Märkten,
- zur Nachhaltigkeitsbewertung und
- zu rechtlichen Aspekten.

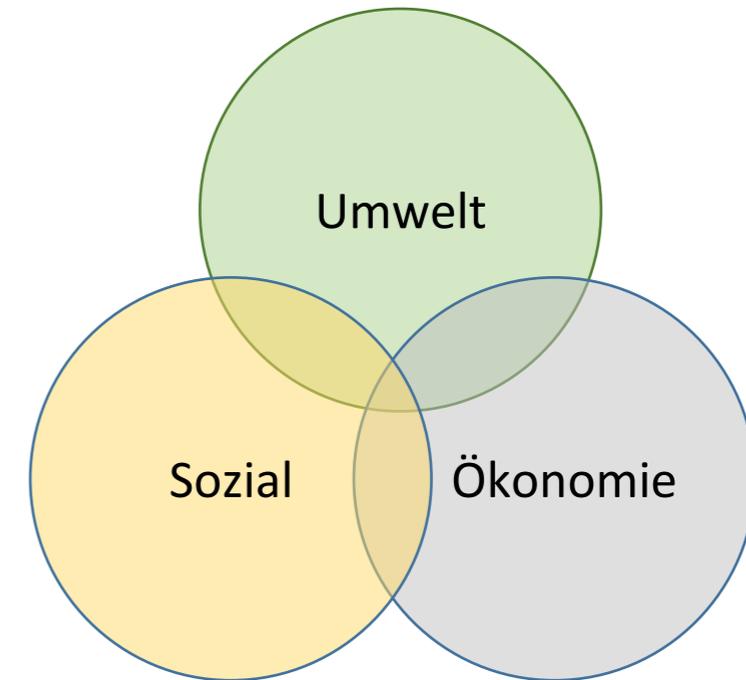


Exkurs Nachhaltigkeitsbewertung

Nachhaltigkeit oder nachhaltige Entwicklung bedeutet, die Bedürfnisse der Gegenwart so zu befriedigen, dass die Möglichkeiten zukünftiger Generationen nicht eingeschränkt werden¹.

Dabei ist es wichtig, die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit – wirtschaftlich effizient, sozial gerecht, ökologisch tragfähig – gleichberechtigt zu betrachten. [BMZ]

Seit der UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung, die 1992 in Rio de Janeiro stattfand, ist die nachhaltige Entwicklung als globales Leitprinzip international akzeptiert. [BMZ]



¹Bericht der Vereinten Nationen Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (Brundtland-Kommission, 1987)

Sustainable Development Goals (SDG)

Die 2030-Agenda der Vereinten Nationen (UN) mit ihren 17 Nachhaltigkeitszielen (Sustainable Development Goals, SDGs) und den dazugehörigen 169 Unterzielen ist ein umfassender programmatischer Rahmen zur Verwirklichung einer weltweiten nachhaltigen Gesellschaft – sie ist der Zukunftsvertrag der Weltgemeinschaft für das 21. Jahrhundert. [BMUV]



Nachhaltigkeitsbewertung

Umwelt

Die Ökobilanzen der Verbundprojekte dienen dem Zweck, die zusätzlichen Umweltauswirkungen, die unter Berücksichtigung der P-Rückgewinnung im Vergleich zu einer Referenz-Klärschlammmentsorgung ohne P-Rückgewinnung hinzukommen, auf eine vergleichbare Weise aufzuzeigen.

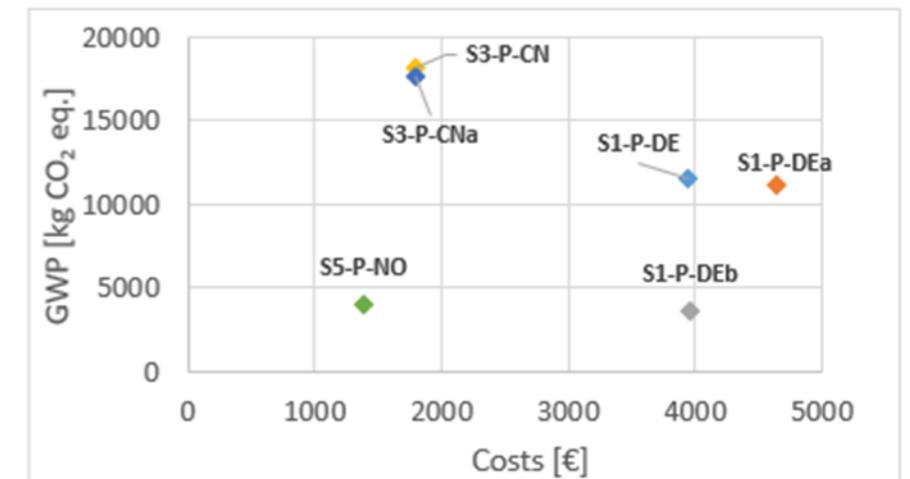
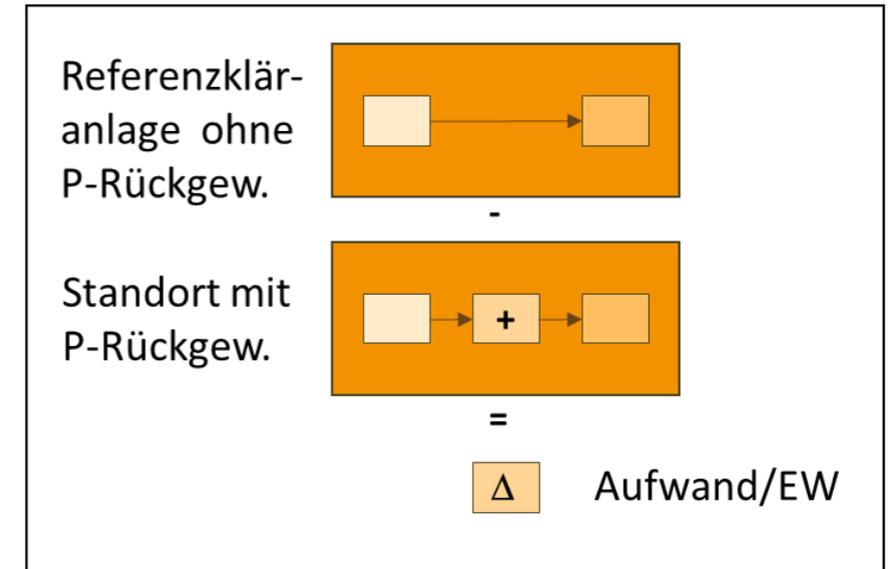
Dabei liegt der Fokus auf der Identifizierung von „Hotspots“, d.h. auf Material- und/oder Energieströmen, die mit bedeutenden Umweltauswirkungen verbunden sind.

Ökonomie

Das Life-Cycle-Costing zeigt die mit den Hotspots verbundenen Kosten auf und kann auf diese Weise als Entscheidungshilfe dienen, um kosteneffiziente Verbesserungspotenziale zu identifizieren.

Sozial

Die Sozialakzeptanzstudie zeigt das Wissen und die Akzeptanz der Technik bezüglich des Sekundärphosphors auf.
Schwerpunkt: Landwirtschaft, Kläranlagenbetreiber, Händler



Nachhaltigkeitsbewertung

Umwelt

Die Ökobilanzen der Verbundprojekte dienen dem Zweck, die zusätzlichen Umweltauswirkungen, die unter Berücksichtigung der P-Rückgewinnung im Vergleich zu einer Referenz-Klärschlammmentsorgung ohne P-Rückgewinnung hinzukommen, auf eine vergleichbare Weise aufzuzeigen.

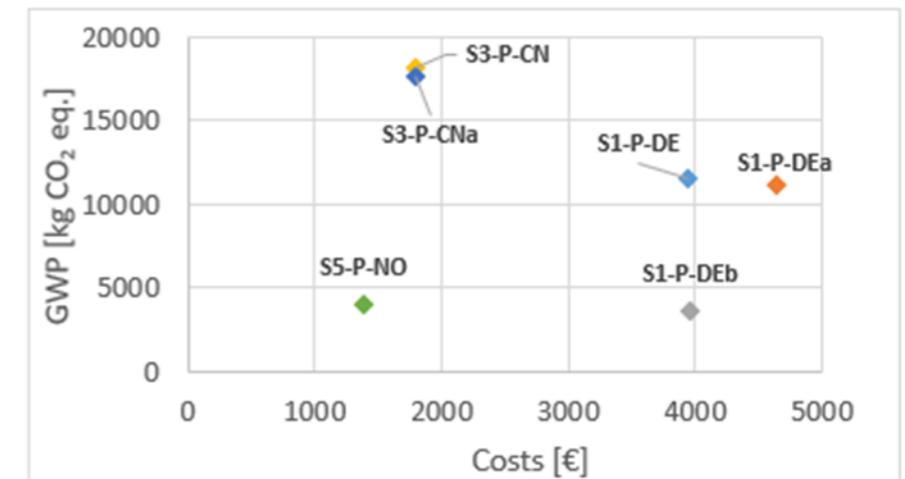
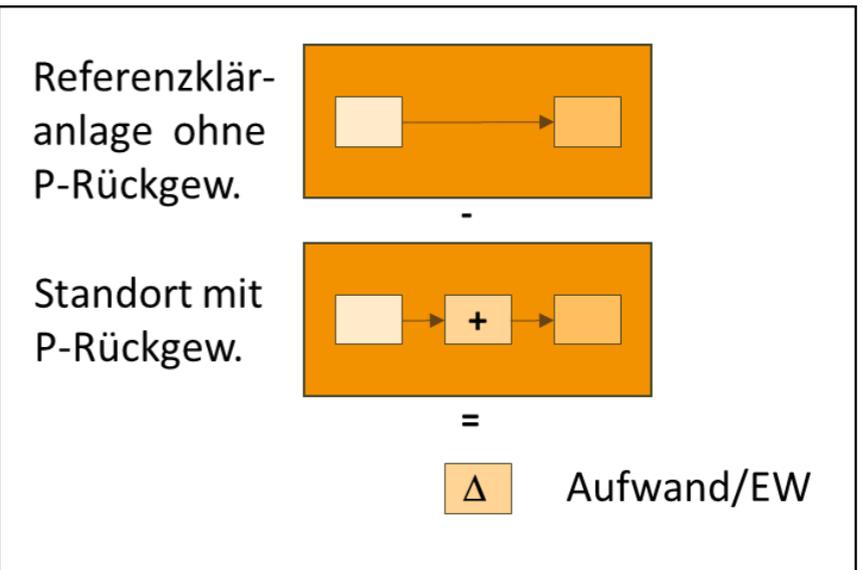
Dabei liegt der Fokus auf der Identifizierung von „Hotspots“, d.h. auf Material- und/oder Energieströmen, die mit bedeutenden Umweltauswirkungen verbunden sind.

Ökonomie

Das Life-Cycle-Costing zeigt die mit den Hotspots verbundenen Kosten auf und kann auf diese Weise als Entscheidungshilfe dienen, um kosteneffiziente Verbesserungspotenziale zu identifizieren.

Sozial

Die Sozialakzeptanzstudie zeigt das Wissen und die Akzeptanz der Technik bezüglich des Sekundärphosphors auf.
Schwerpunkt: Landwirtschaft, Kläranlagenbetreiber, Händler



Sozialakzeptanzstudie – Theorie (1)

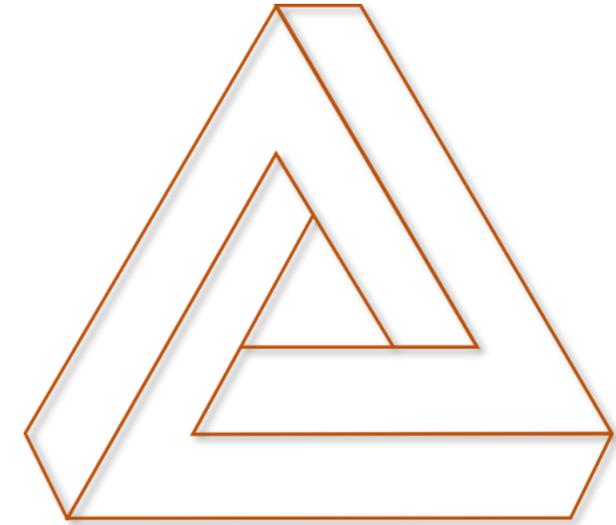
Es ist wichtig zu unterscheiden, ob sich Forscher

- für die soziale Akzeptanz von Maßnahmen zur Förderung erneuerbarer Energien „an der Wahlurne“ (gesellschaftspolitische Akzeptanz),
- für den Bau von (z.B.) lokalen Windkraftanlagen in einer bestimmten Gemeinde (kommunale Akzeptanz - NIMBY) oder
- für (z.B.) höhere Energiekosten für Verbraucher (Marktakzeptanz) interessieren.

Die Akzeptanz der Verbraucher hängt nicht nur vom objektiven Wissen über Technologien ab. Mögliche Variablen, um die Akzeptanz zu steuern sind:

- Wertorientierungen
- Wahrgenommene Natürlichkeit
- Instinktive emotionale Reaktionen (z.B. Ekel)
- Verallgemeinerte Wahrnehmungen von Risiko und Nutzen

**Gesellschaftspolitische
Akzeptanz**



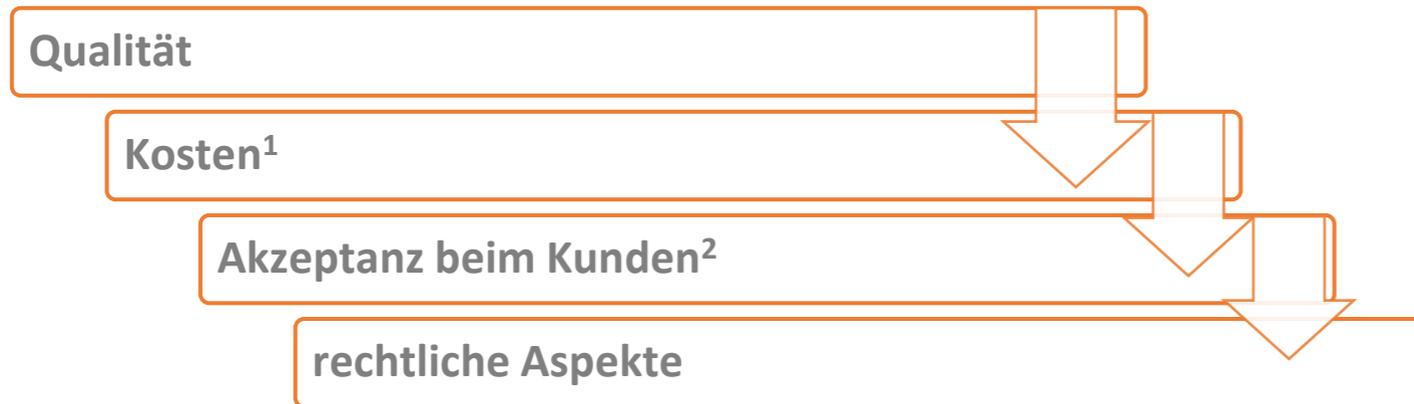
**Kommunale
Akzeptanz**

**Markt-
akzeptanz**

Sozialakzeptanzstudie im Rahmen von RePhoR

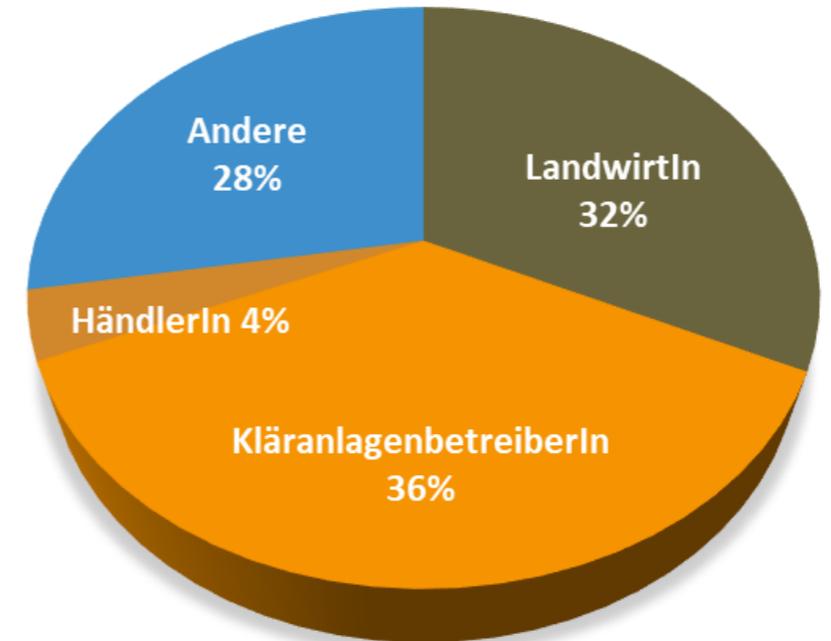
Im Rahmen von RePhoR wurde 2021 eine Sozialakzeptanzstudie durchgeführt. Vorab wurden zur Erarbeitung einer fundierten Umfrage ExpertInnen-Interviews durchgeführt (Ökolandbau, DPP, Wasserverband Eifel-Rur, Laborleiter, Händler, Bauernverband, LANUV).

Identifizierte akzeptanzrelevante Aspekte nach ihrer Wichtigkeit waren:



¹ Während mit ca. 75 % der konventionellen Landwirte keine Preisunterschiede akzeptieren würden, würden ca. 39 % der Biolandwirte einen Preisaufschlag von 10 % und ca. 12 % einen Preisaufschlag von 20 % akzeptieren.

² Ein weiterer Aspekt, der das Potenzial für Sekundärphosphor andeutet, liegt in der Regionalität. So antworteten ca. 43 % der Betroffenen, dass sie der Aspekte der Regionalität überzeugen würde, auf Sekundärdünger zurückzugreifen.



Aufteilung der 184 Rückmeldungen

Nachhaltigkeitsbewertung

Umwelt

Die Ökobilanzen der Verbundprojekte dienen dem Zweck, die zusätzlichen Umweltauswirkungen, die unter Berücksichtigung der P-Rückgewinnung im Vergleich zu einer Referenz-Klärschlammmentsorgung ohne P-Rückgewinnung hinzukommen, auf eine vergleichbare Weise aufzuzeigen.

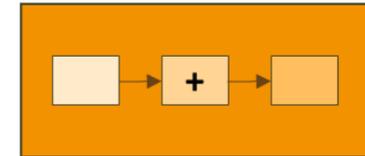
Dabei liegt der Fokus auf der Identifizierung von „Hotspots“, d.h. auf Material- und/oder Energieströmen, die mit bedeutenden Umweltauswirkungen verbunden sind.

Referenzklär-
anlage ohne
P-Rückgew.



-

Standort mit
P-Rückgew.



=



Aufwand/EW

Sozial Ökonomie

Das Life-Cycle-Costing zeigt die mit den Hotspots verbundenen Kosten auf und kann auf diese Weise als Entscheidungshilfe dienen, um kosteneffiziente Verbesserungspotenziale zu identifizieren.

Die Sozialakzeptanzstudie zeigt das Wissen und die Akzeptanz der Technik bezüglich des Sekundärphosphors auf.
Schwerpunkt: Landwirtschaft, Kläranlagenbetreiber, Händler



Grundlagen der Ökobilanzierung

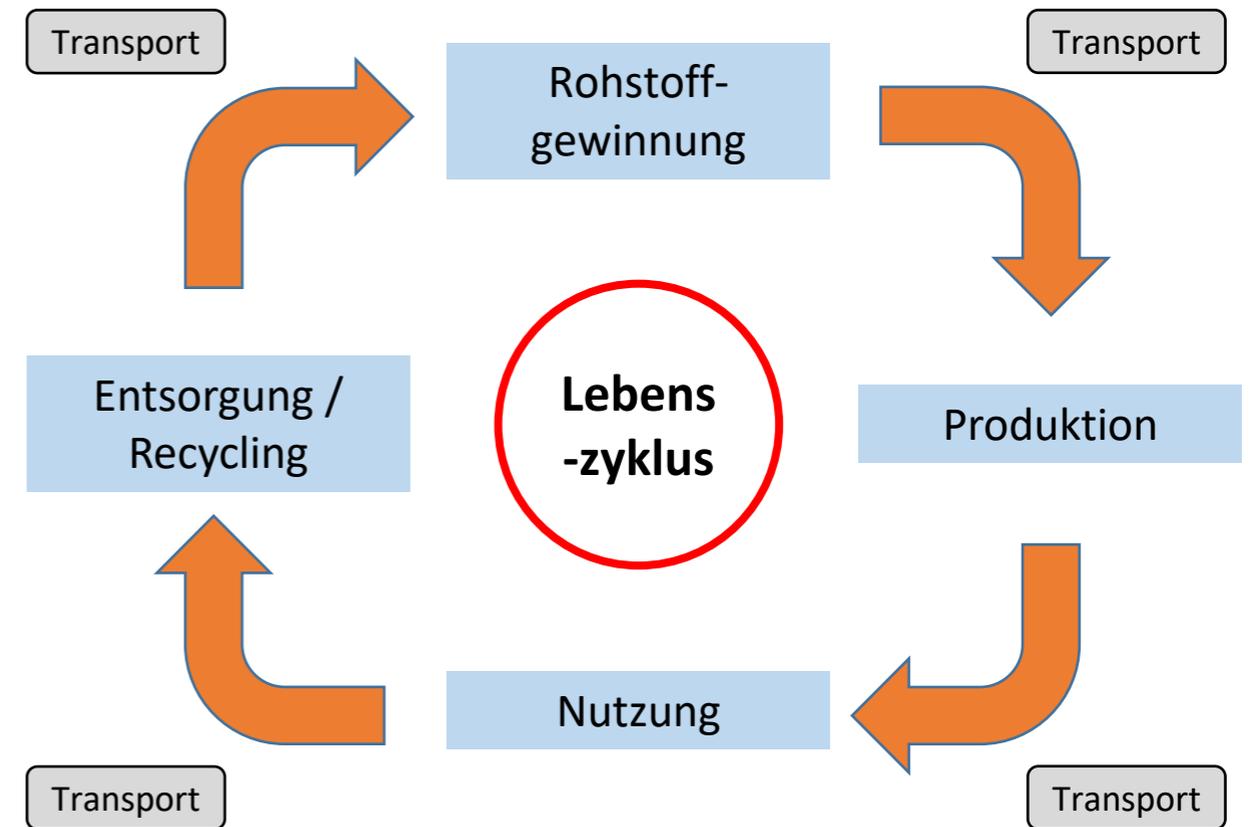
Die Ökobilanz ist ein Verfahren zur Analyse von Umweltaspekten und Wirkungen innerhalb von Produktsystemen

Erfassung und Bewertung der potentiellen Umweltwirkungen

Bewertung von **Produkten, Verfahren, Dienstleistungen** sowie Verhaltensweisen entlang ihres Lebensweges

(von der Wiege bis zur Bahre – cradle to grave)

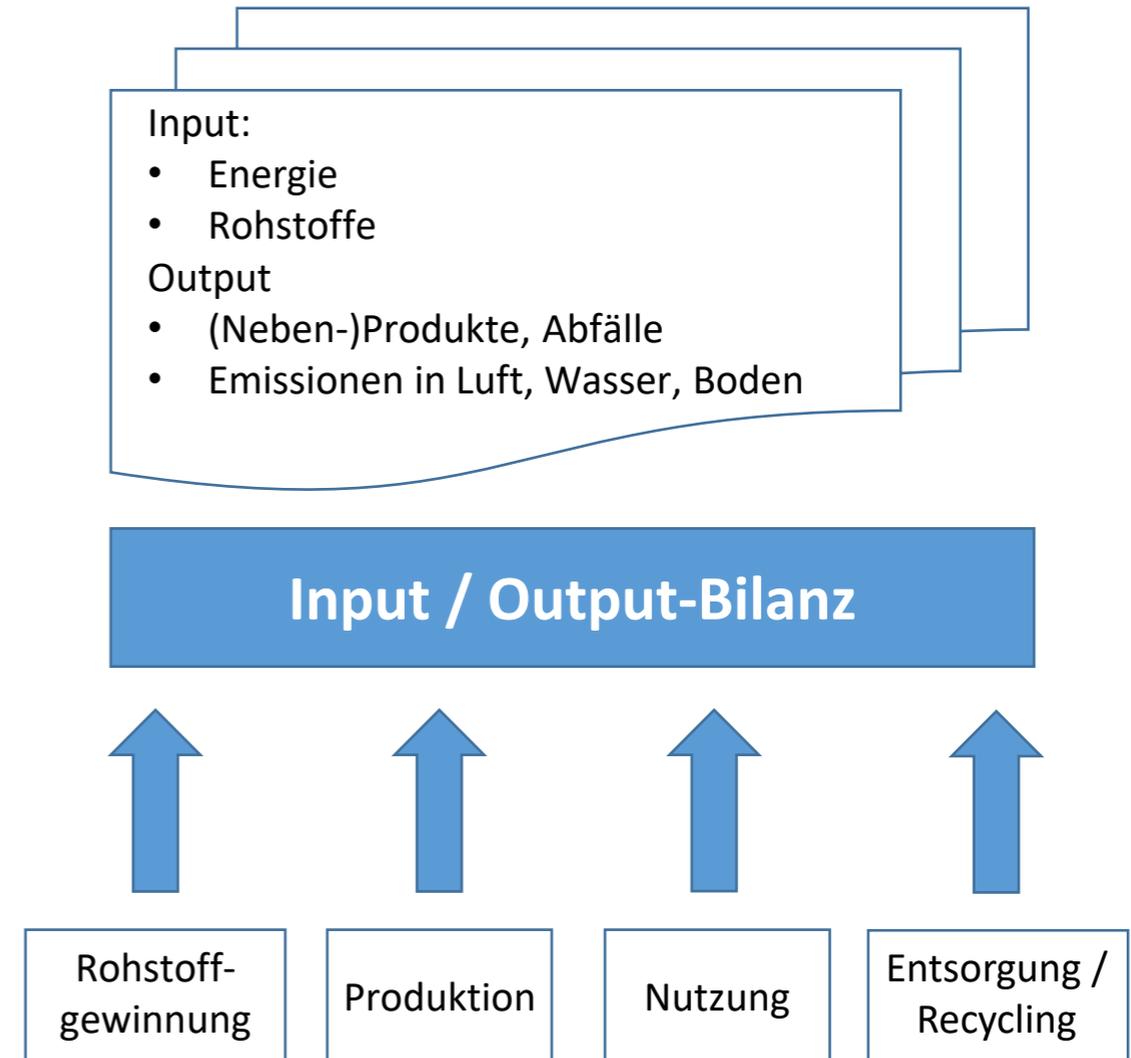
Das standardisierte Vorgehen der Ökobilanz ist in den ISO-Normen 14040 und 14044 geregelt.



Grundlagen der Ökobilanzierung - Sachbilanz

Betrachtung aller Stoffströme, die mit dem betrachteten System verbunden sind:

- *Energieinputs, Rohstoff-Inputs, Betriebsstoff-Inputs und andere physikalische Inputs;*
- *Produkte, Koppelprodukte und Abfall;*
- *Emissionen in die Luft, Einleitung in Wasser und Verunreinigungen des Bodens; und*
- *Weitere Umweltaspekte*
[DIN EN ISO 14040]



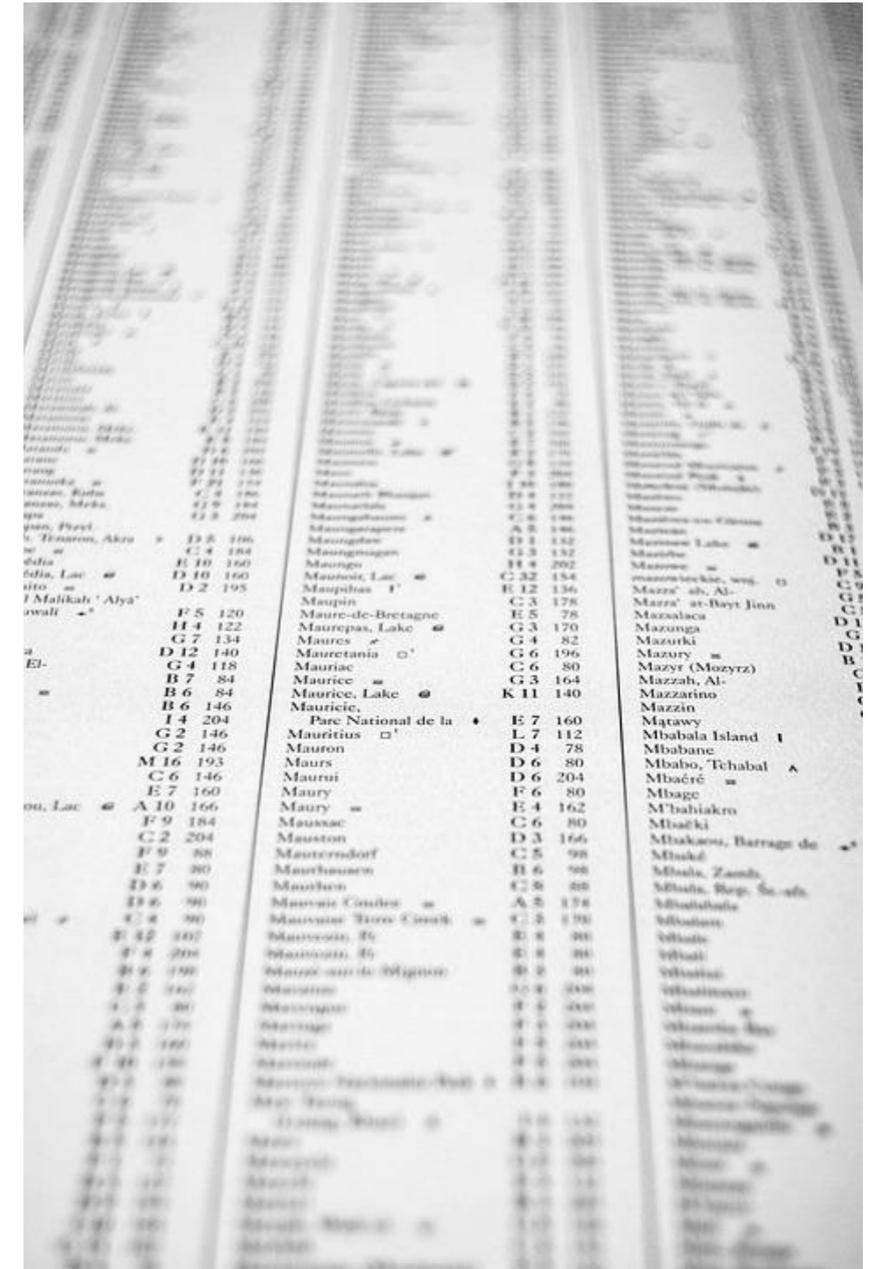
Grundlagen der Ökobilanzierung - Datenqualität

Anforderungen an die Datenqualität müssen festgelegt werden, damit das Ziel und der Untersuchungsrahmen der Ökobilanz erfüllt werden können.

(z.B. zeitlicher, geografischer, technischer Erfassungsbereich, Präzision, Annahmen etc.)

Spezifische Standortdaten oder repräsentative Mittelwerte sollten für diejenigen Prozessmodule benutzt werden, bei denen eine **Sensitivitätsanalyse** ergibt, dass sie den **Hauptanteil der Massen- und Energieflüsse** im zu untersuchenden System stellen (...) von denen anzunehmen ist, dass sie über **umweltrelevante Inputs und Outputs** verfügen.

[ISO 14044]

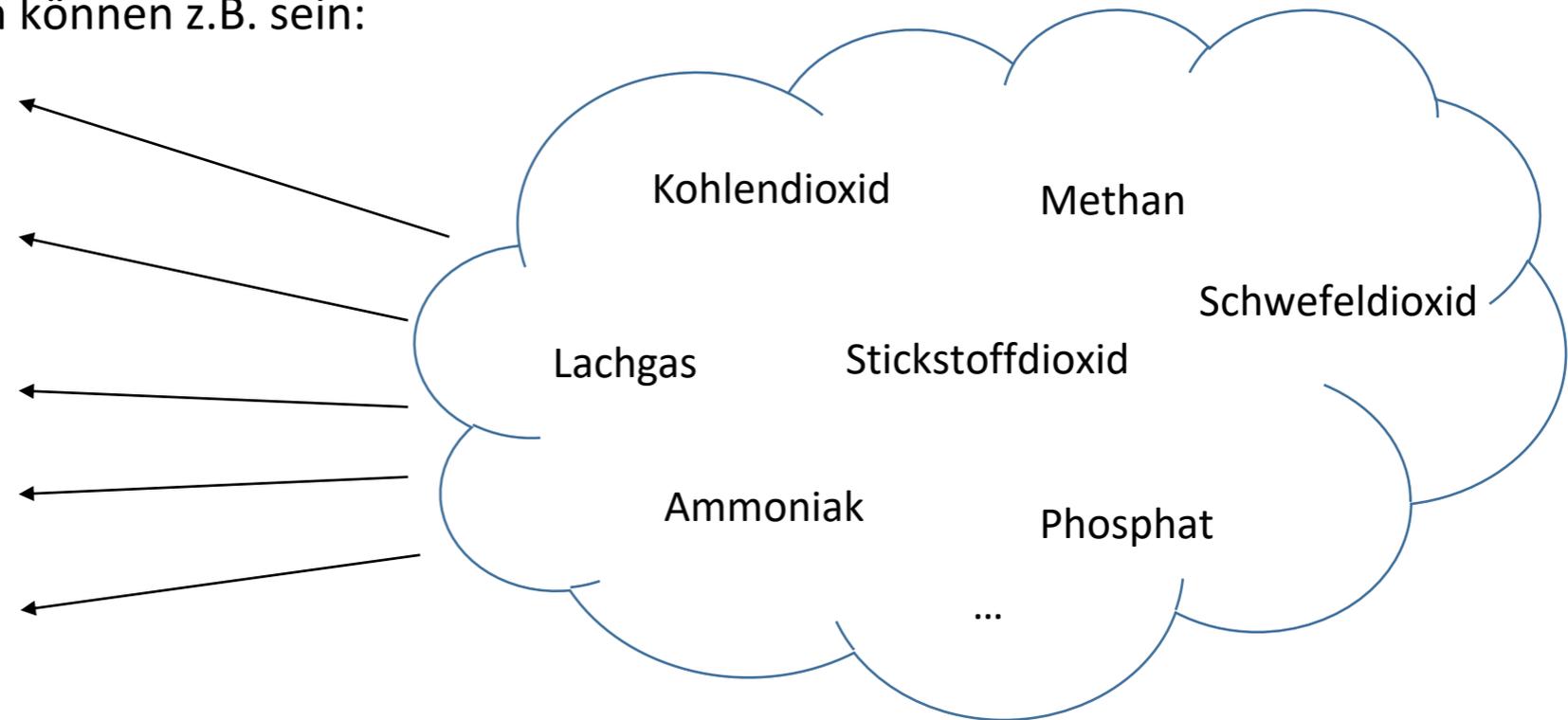


pixabay.com/de/photos/auff%C3%BChren-nachnamen-tisch-428312/

Grundlagen der Ökobilanzierung - Wirkungsabschätzung

Es ist zu prüfen, in wie weit die betrachteten Stoffströme Auswirkungen auf die Umwelt haben. Umweltwirkungen können z.B. sein:

- *Treibhauspotenzial (Klimawandel)*
- *Versauerung*
- *Eutrophierung*
- *Stratosphärischer Ozonabbau*
- *Ozonbildungspotenzial*
- *Humantoxizität*
- *Ökotoxizität*
- *Ressourcenverbrauch*
- ...



Grundlagen der Ökobilanzierung - Wirkungsabschätzung

Charakterisierungsfaktoren des IPCC

Die Zusammenfassung der Stoffströme in den jeweiligen Wirkungskategorien geschieht über die Verwendung von Charakterisierungsfaktoren.

Am Beispiel der Wirkungskategorie „Treibhauspotenzial“ (Referenzsubstanz CO₂) würde der entsprechende Indikatorwert wie folgt berechnet:

Beispielhaft angenommene Emissionen:

- CO₂: 1000 kg
- Methan_{nichtfossil}: 35 kg
- Lachgas: 5 kg

Sachstandsberichte des IPCC (Assessment Report AR)			
	AR 4	AR 5	AR 6
Kohlendioxid	1	1	1
Methan (nicht fossil)	25	28	27
Methan (fossil)	N/A	30	29,8
Lachgas	298	265	273
Stickstoff-Trifluorid	17.200	16.100	17.400
Schwefel-Hexafluorid	22.800	23.500	24.300

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

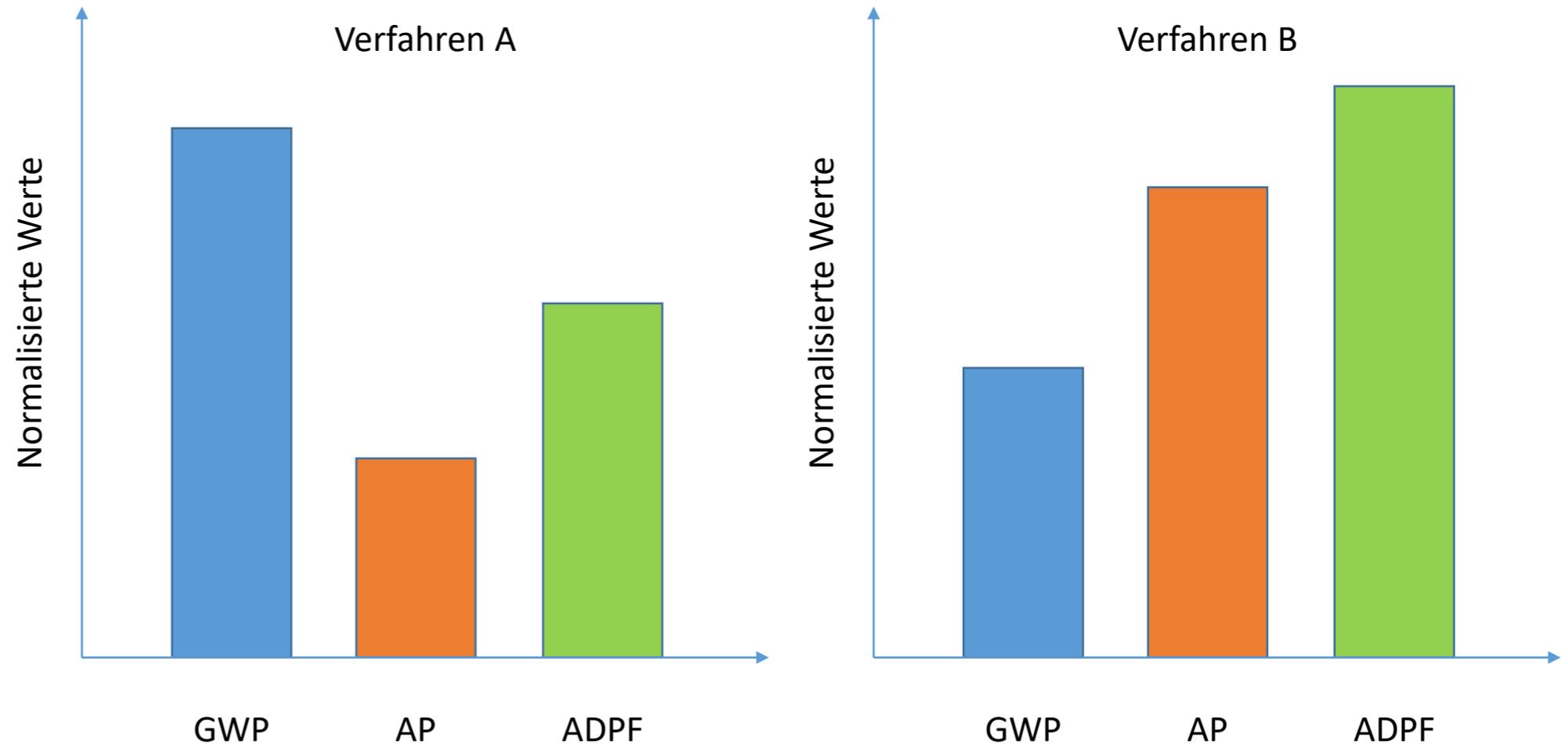
$$1.000 \text{ kg}_{\text{CO}_2} \times 1 + 35 \text{ kg}_{\text{CH}_4} \times 27 + 5 \text{ kg}_{\text{N}_2\text{O}} \times 273 = 3.310 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{Äquivalent}}$$

Grundlagen der Ökobilanzierung - Auswertung

Fiktive Darstellung eines Produktvergleiches auf Basis einer Ökobilanz.

(...) dass es keine wissenschaftliche Grundlage gibt, Ergebnisse von Ökobilanzen übergreifend zu einer numerischen Rangfolge oder zu einem Einzelwert (...) zusammenzufassen.

[ISO 14044]



GWP: Global Warming Potential; AP: Acidification; ADPF: abiotischer Verbrauch mineralischer Ressourcen

Anwendung der Methodik der Ökobilanz auf das Phosphorrecycling aus Klärschlamm(-asche)

Bei einer **vergleichenden Studie** muss vor der Auswertung der Ergebnisse die Vergleichbarkeit der Systeme beurteilt werden. Demzufolge muss der **Untersuchungsrahmen der Studie so festgelegt werden**, dass die **Systeme verglichen** werden können. Systeme müssen unter Anwendung derselben **funktionellen Einheiten** und äquivalenten methodischen Festlegungen, wie z. B.

- Leistung,
- Systemgrenze,
- Datenqualität,
- Allokationsverfahren,
- Kriterien zur Beurteilung von Inputs und Outputs,
- Wirkungsabschätzung,

verglichen werden. [DIN EN ISO 14044]



© Hupp-Dobusch

Anwendung der Ökobilanz - Leistung

Die grundlegende Größe bei einer Ökobilanz stellt die funktionelle Einheit dar, die dazu dient, einen Bezug für alle Input- und Outputflüsse zu schaffen.

Obwohl im Rahmen des Projektes RePhoR die Rückgewinnung von Sekundärphosphor aus Klärschlamm/-asche im Fokus steht, wurde als funktionelle Einheit die gesetzeskonforme Entsorgung des Klärschlammes einer **Kläranlage mit einer Kapazität von 1 Mio. Einwohnerwerten (EW)** mit einer festgelegten Klärschlamm- resp. Klärschlammmaschequalität (**Referenz**) gewählt.

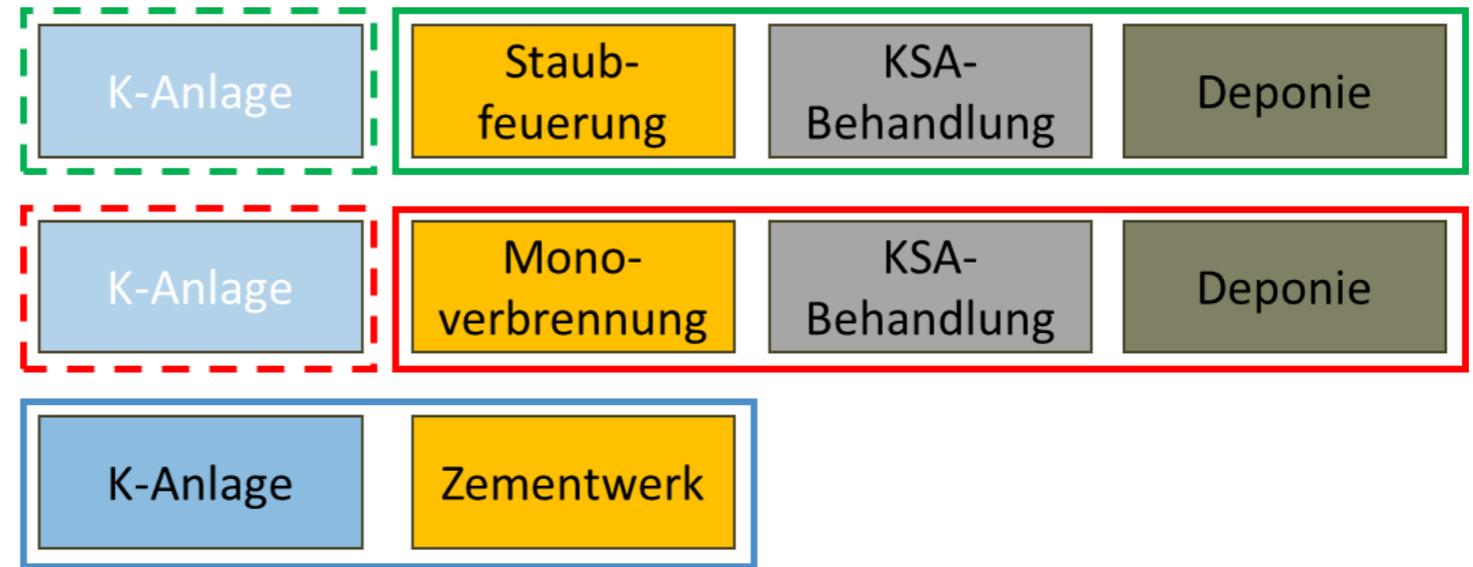
Der Sekundärphosphor stellt somit lediglich ein **Nebenprodukt** dar und wird im Rahmen der Ökobilanz mit einer **Gutschrift** versehen, die der Umweltwirkung der eingesparten **primären Phosphormenge** entspricht.



pixabay.com/de/photos/abwasser-kl%C3%A4ranlage-wasserreinigung-7948361/

Anwendung der Ökobilanz - Systemgrenze

Die vereinfachte Betrachtung des gesamten Lebenszyklus des Klärschlammes setzt sich aus Behandlungsschritten auf der Kläranlage, einer Verbrennungseinheit, einer optionalen Aschebehandlung sowie der Deponierung inklusive aller eingeschlossenen Transporte zusammen.



KSA: Klärschlammasche
— Eigentlicher Recyclingprozess
- - - Gesamtsystem

Diskussion der getroffenen Annahmen (1)

Im Rahmen der Fördermaßnahme RePhoR bestand die Schwierigkeit der Festlegung von Annahmen insbesondere in der **hohen Variabilität der Verfahrensansätze** sowie in der **Variabilität der zur Behandlung anstehenden Klärschlämme/Klärschlammaschen**. Insofern galt es, einerseits durch klare Vorgaben eine **Vergleichsbasis** zu finden, die für alle Teilprojekte anwendbar war, ohne andererseits Verfahrensspezifika durch fixierte Vorgaben nicht ausreichend zu berücksichtigen.

Es wurde in enger **Abstimmung mit allen Verbundprojekten** in denen ein Phosphorrückgewinnungsverfahren erprobt wird, eine **Vorgehensweise entwickelt**, die eine **Vergleichbarkeit** der darauf basierenden Ökobilanzen **sicherstellen** wird, gleichermaßen aber auch Raum für die technikspezifischen Besonderheiten der Teilprojekte eröffnet.

Diskussion der getroffenen Annahmen (2)

Ansatz sekundärer Datenquellen:

- Sekundäre Datensätze aus der Datenbankecoinvent sollen verwendet werden
- Verbundübergreifende Kontrolle durch Veröffentlichung der verwendeten Daten auf RePhoR-Server

Skalierung:

- Alle Größen sind auf die Behandlung einer Klärschlamm(-asche)menge (Referenz) entsprechend der Vorgabe von 1 Mio. Einwohnerwerten zu skalieren

Verbrennung:

- Standardisierter Ansatz der Monoverbrennungstechnologie
- Gesonderte Ausweisung der Gutschrift (Abwärmenutzung standortabhängig)

[die Gutschrift einer Abwärmenutzung könnte die Aufwendungen des eigentlichen Recyclingprozesses überlagern

→ getrennte Darstellung]

Diskussion der getroffenen Annahmen (3)

P-haltiges Sekundärprodukt:

- Gutschrift für Sekundärprodukt entsprechend den eingesparten Aufwendungen eines primären Phosphorproduktes
 - Phosphordünger als Sekundärprodukt: es wird lediglich der pflanzenverfügbare Phosphor-Anteil mit einer Gutschrift versehen
 - Phosphorsäure als Sekundärprodukt: Gutschrift einer primären Phosphorsäure, die der Qualität des Sekundärproduktes entspricht
- Eine über die Vorgaben der Düngemittelverordnung hinausgehende Behandlung (z.B. zur weiteren Abreicherung von Schwermetallen) wird nicht betrachtet

Anwendung:

- Die Anwendung des Sekundärdüngers ist nicht Bestandteil der Systemgrenze
[komplexes Bodensystem; unterschiedliche Wirkung bei verschiedenen Pflanzen; z.T. Phosphorsäure als Sekundärprodukt]

Fazit (1)

- Für einen Verfahrensvergleich ist der Ansatz eines Referenzklärschlamm-/asche erforderlich, der eine Skalierung erforderlich macht. Diese ist mit Unsicherheiten verbunden.
- Einen wesentlichen Einfluss haben konkrete, standortspezifische Rahmenbedingungen, die im Rahmen der vergleichenden Ökobilanz nicht berücksichtigt werden.
(Nutzung der Abwärme, Versorgung mit Rohstoffen, Transportentfernungen etc.)
- Im Verbund mit der Sozialakzeptanzstudie können wichtige Erkenntnisse zur standortspezifischen Umsetzung gewonnen werden.
- Die sozialen Auswirkungen der primären Phosphorproduktion die sowohl positiv (Schaffung von Arbeitsplätzen, Wirtschaftsfaktor) als auch negativ (Arbeitssicherheit, z.B. Umgang mit gefährlichen Stoffen am Arbeitsplatz) sein können, sind ohne Wertehaltung nicht mit den ökologischen Auswirkungen zu vergleichen.

Fazit (2)

- Die koordinierte Vorgehensweise in der Erstellung der Ökobilanzen sichert einen transparenten (RePhoR-Server) und robusten (gleiche Annahmen) Vergleich der Verfahren ohne Verfahrensspezifika durch fixierte Vorgaben einzugrenzen.
- Auswirkungen von Verfahrensänderungen auf die unterschiedlichen Wirkungskategorien können unmittelbar abgeschätzt werden. (z.B. erhöhter materieller und energetischer Aufwand [Treibhauspotenzial] bei höherer Recyclingquote [Ressourcenverbrauch]).

Der Ansatz der vergleichenden Ökobilanzen stellt ein wichtiges Entscheidungsinstrument dar, muss jedoch stets im Zusammenhang mit den konkreten standortspezifischen Rahmenbedingungen gesehen und bewertet werden.



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit