

Additivgestützte Klärschlammverbrennung als Ein-Schritt-Verfahren zur Phosphorrückgewinnung

Einfluss von Additiven auf Phosphorverfügbarkeit sowie Schwermetall- und Schwefeltransfer

B. Sc. Veronika Enders; Dr.-Ing. Matthias Schnell; Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker

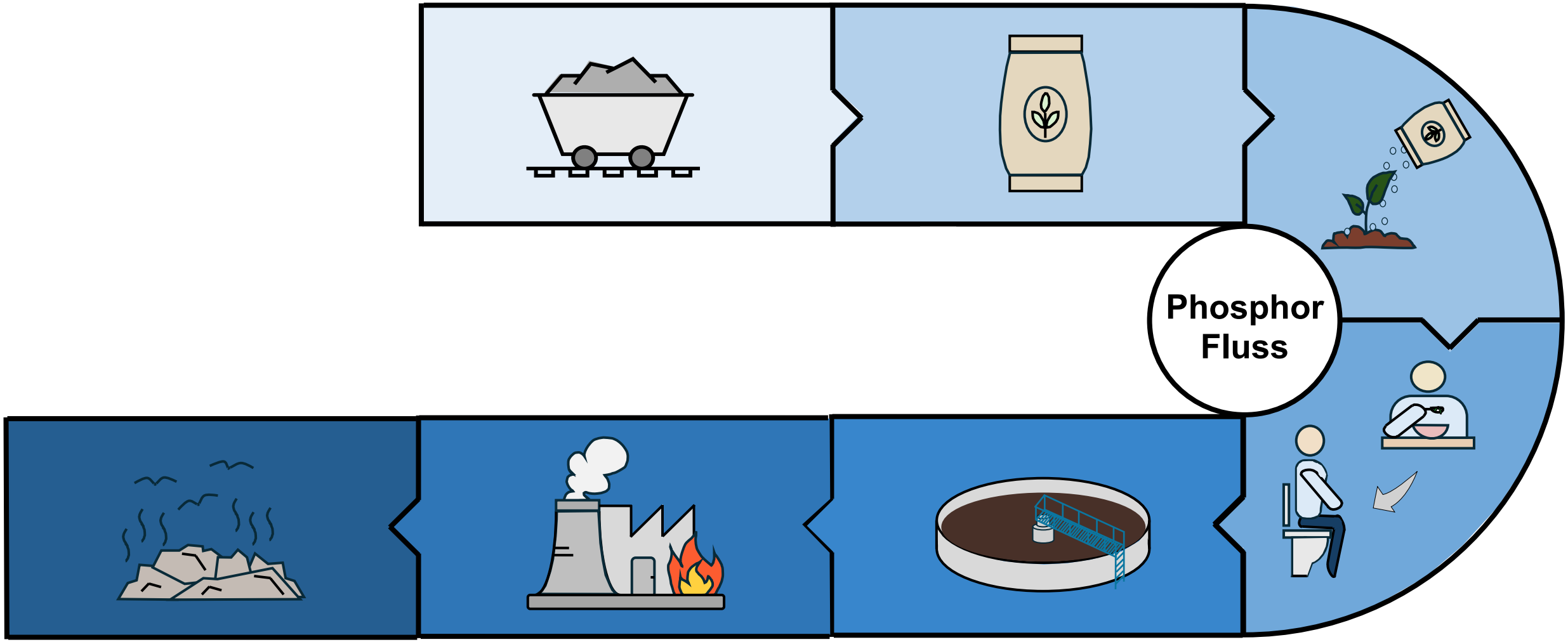
Lehr- und Forschungsgebiet Thermoprozesse und Emissionsminderung in der Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft

RWTH Aachen University

4. Studentenkonferenz 2026 im 58. Kraftwerkstechnischen Kolloquium

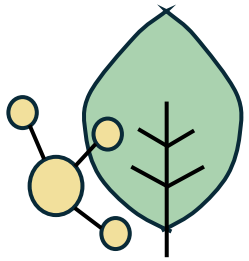
07. Oktober 2026

Motivation

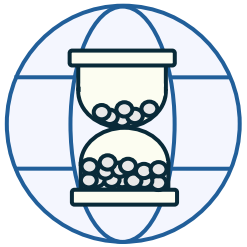


Motivation

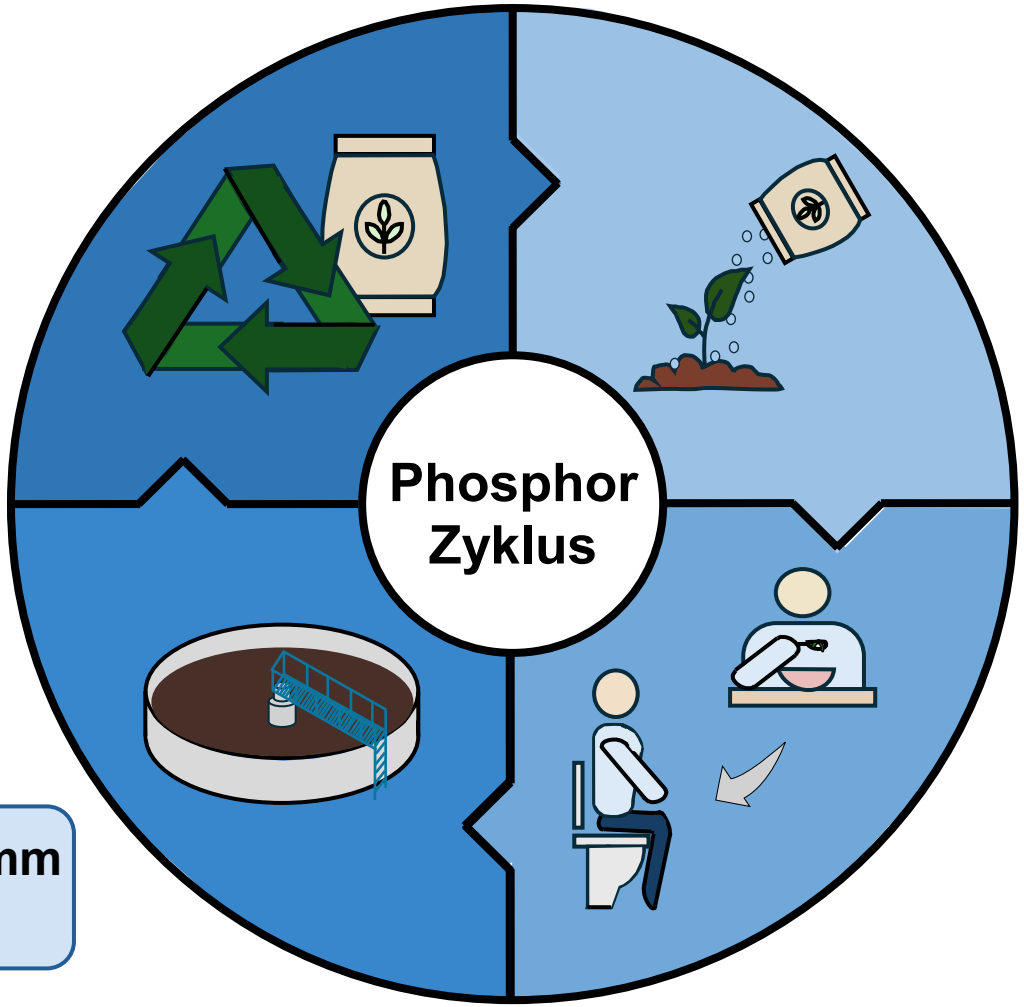
Warum Phosphorrecycling ?



Phosphor (P) ist ein **nicht substituierbarer Nährstoff** für das Pflanzenwachstum



Phosphatgestein ist **begrenzte Ressource**, die **EU besitzt 1 % der weltweiten Reserven** [1]



In **Deutschland**: **Rückgewinnung von P aus Klärschlamm** in Klärschlammverordnung **ab 2029** festgelegt *,[2]

1 Bobba et al., Deep dive on critical raw materials for batteries in the EU, 2025
* ab 2029 für Kläranlagen mit mehr als 100.000 EW, ab 2032 für Kläranlagen mit mehr als 50.000 EW; jeweils für Klärschlamm ab 20 g P/ kg Trockenmasse
2 Klärschlammverordnung – AbfKlärV, 27.09.2017

Gliederung

- Ein-Schritt-Verfahren
- Vorversuche im Muffelofen
- Versuche in stationärer Wirbelschichtfeuerung
- Zusammenfassung und Ausblick

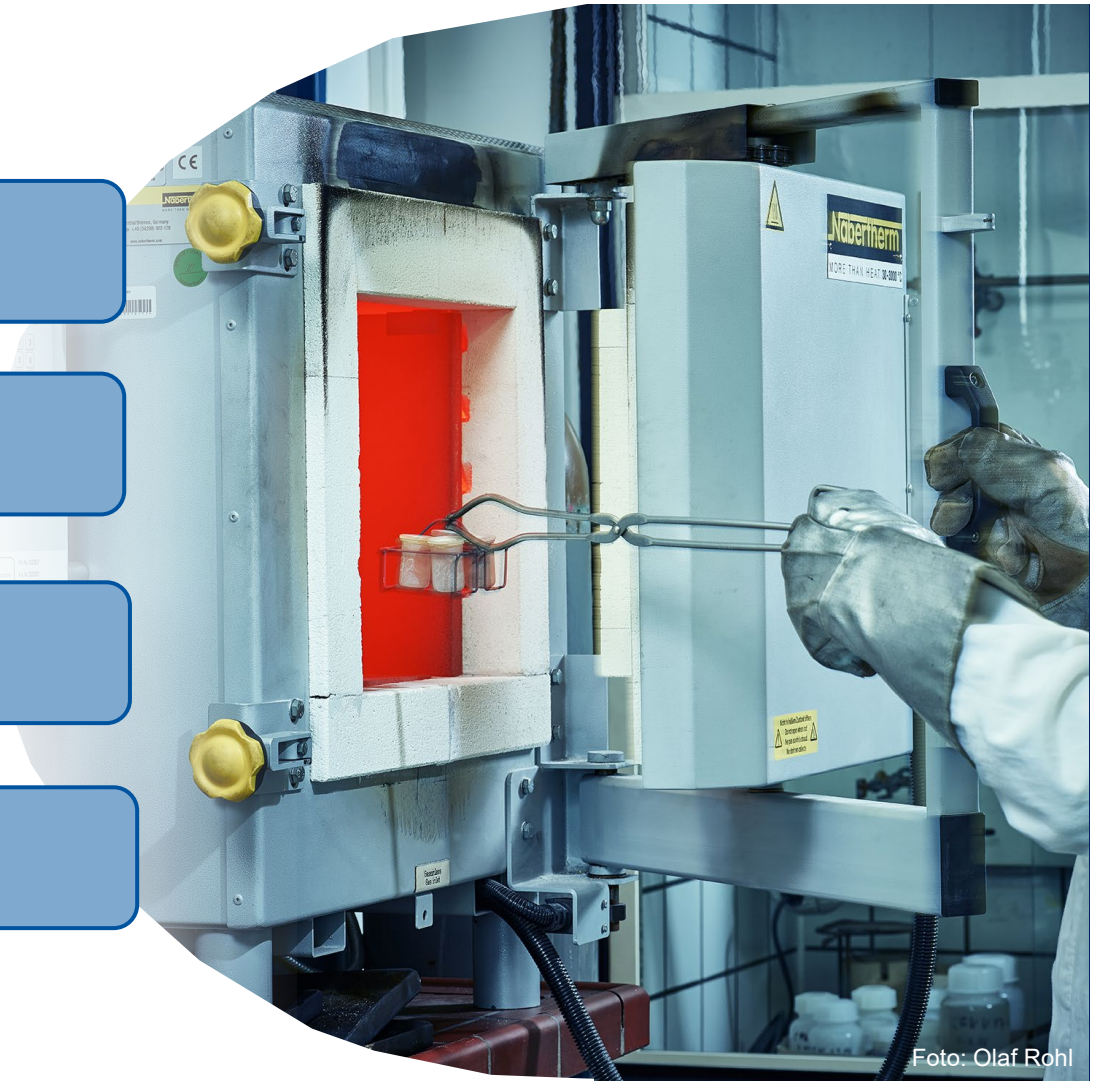
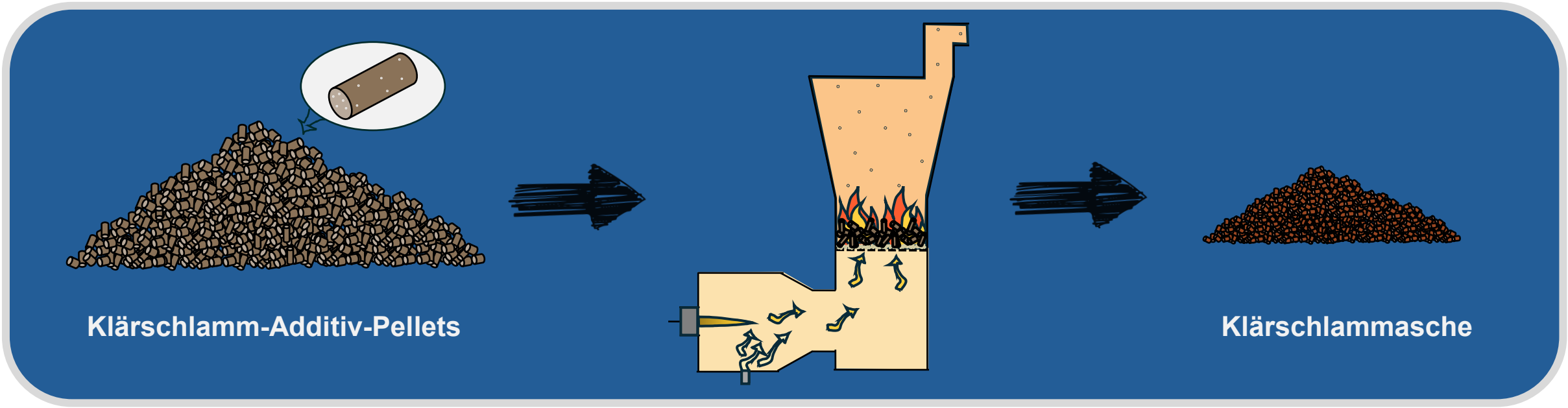
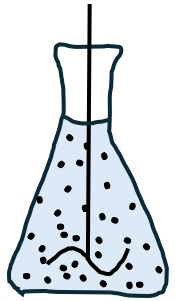


Foto: Olaf Rohl

Ein-Schritt-Verfahren



Phosphorverfügbarkeit für Pflanzen:

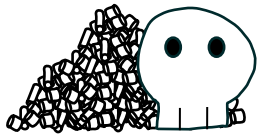


Löslichkeit in Neutralem Ammoniumcitrat (NAC)

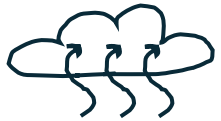
≈

Pflanzenverfügbarkeit auf neutralem Boden [3]

Weitere Forschungsschwerpunkte:



Schwermetallgrenzwerte nach Düngemittelverordnung einhalten



Schwefeltransfer in die Gasphase begrenzen

3 Ploteau et al.. Final report of the Phos4You partnership: deploying phosphorus recycling from wastewater in North-West Europe; 2021, 10.17185/duepublico/75173

Vorversuche im Muffelofen

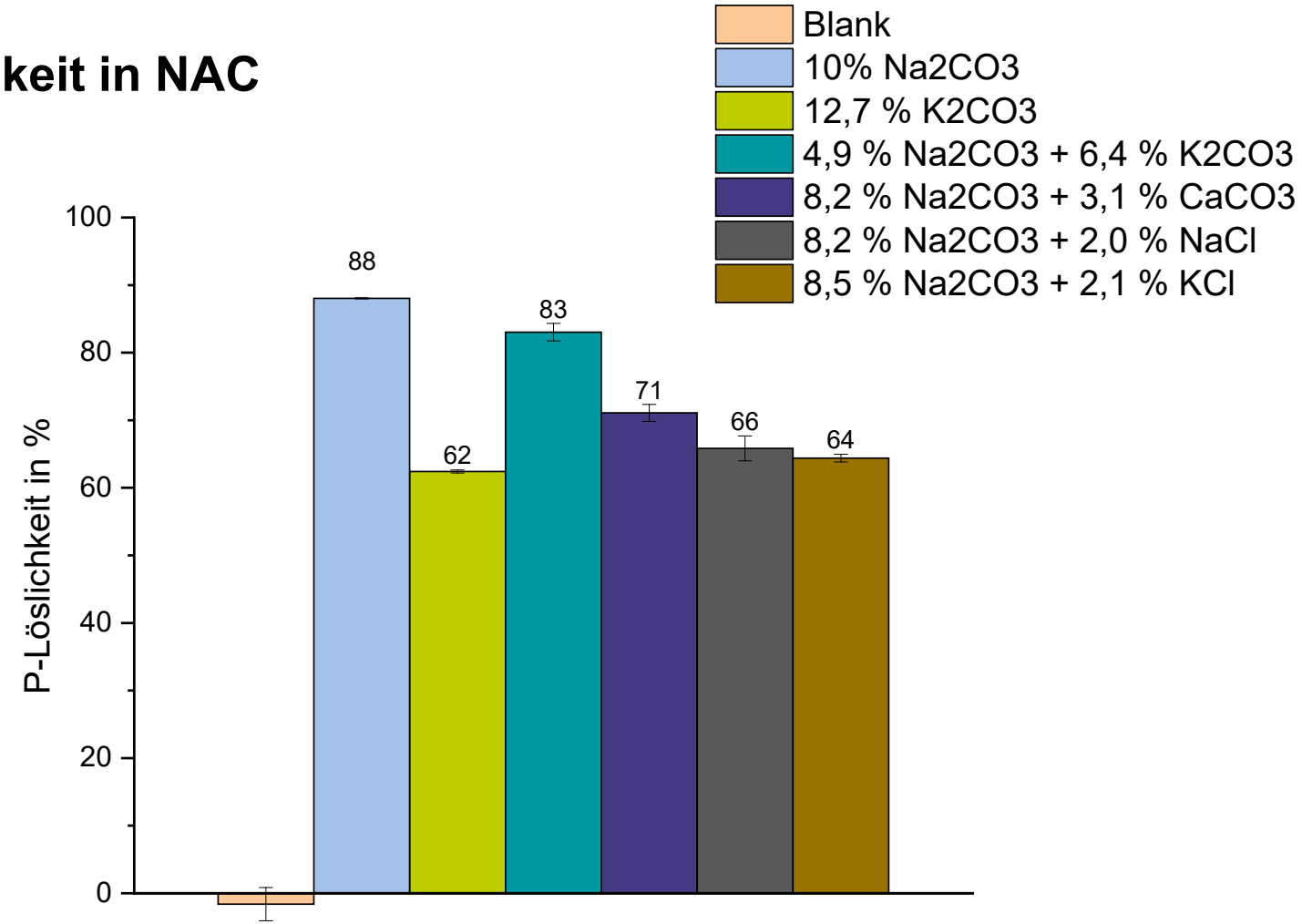
Vorversuche im Muffelofen

Versuchsablauf und Phosphorlöslichkeit in NAC

Versuchsablauf



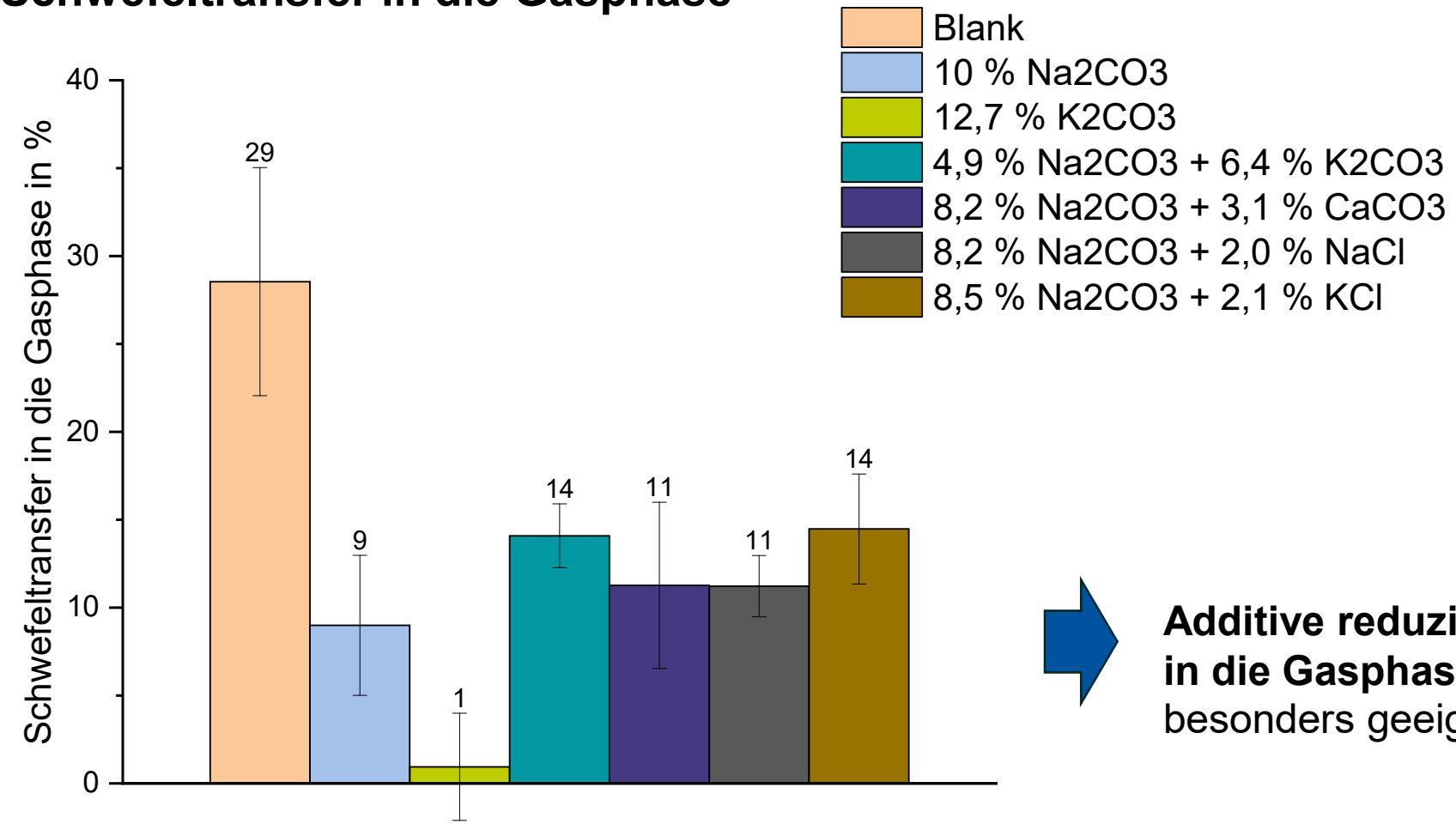
Ausgangsmaterial: Gemisch aus gemahlenem und getrocknetem Klärschlamm und Additiv, 40 g pro Versuch



Angaben in **gew.-%** bezogen auf die **Klärschlamm-Additiv-Trockenmasse** (molares Verhältnis von **2,8 ± 0,16 (Erd-)Alkali/P**)

Vorversuche im Muffelofen

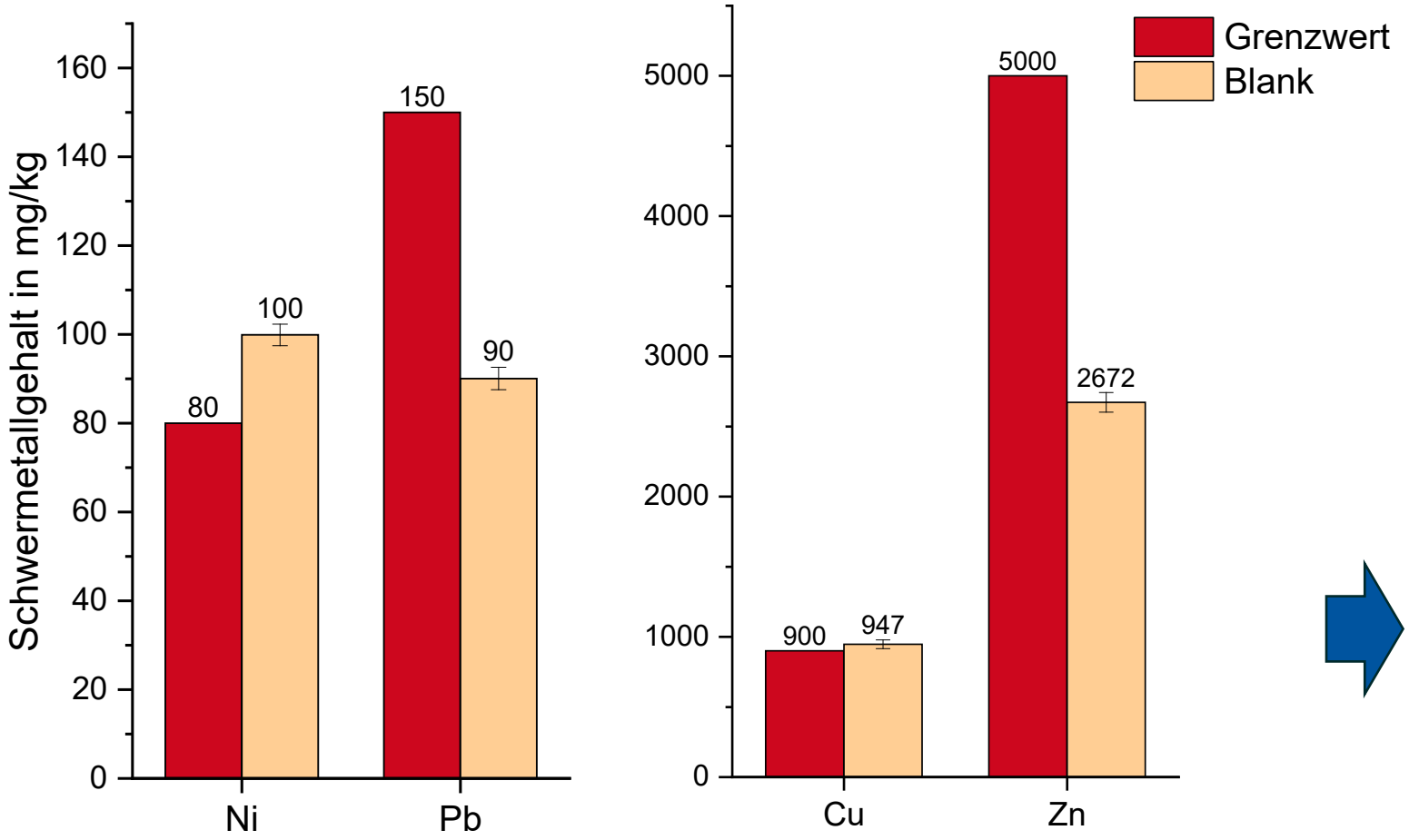
Schwefeltransfer in die Gasphase



Additive reduzieren den Schwefeltransfer in die Gasphase um mindestens 50 %, besonders geeignet ist K_2CO_3

Vorversuche im Muffelofen

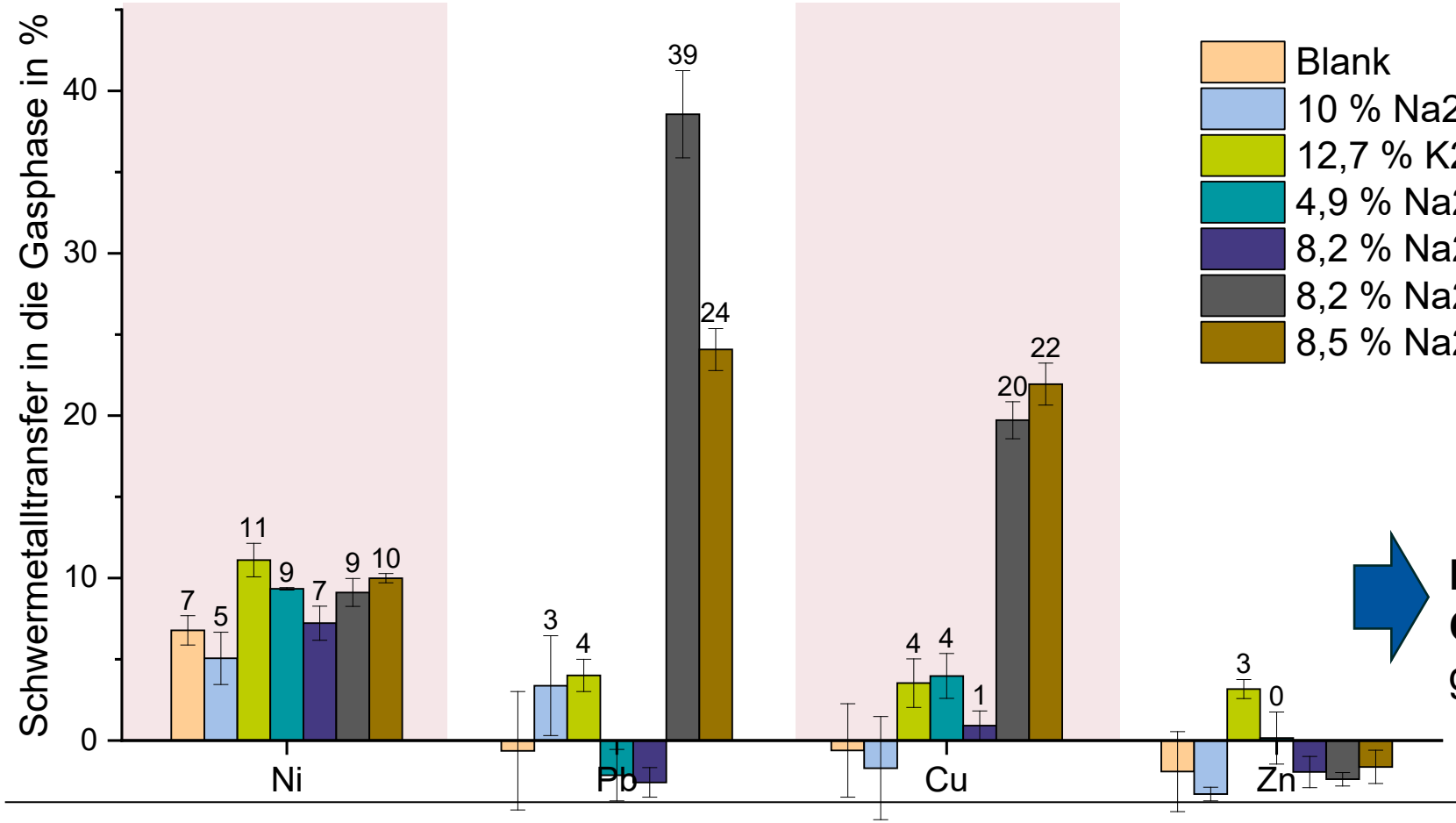
Schwermetallgehalte der Klärschlammasche



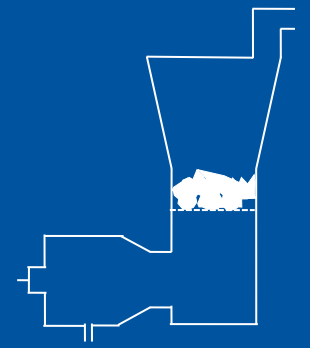
Fokus auf Reduktion der Schwermetallgehalte an **Ni** und **Cu**

Vorversuche im Muffelofen

Schwermetalltransfer in die Gasphase



Ni: kein Additiv besonders geeignet
Cu: Cl-haltige Additive besonders geeignet, bereits bei 2 gew.-%

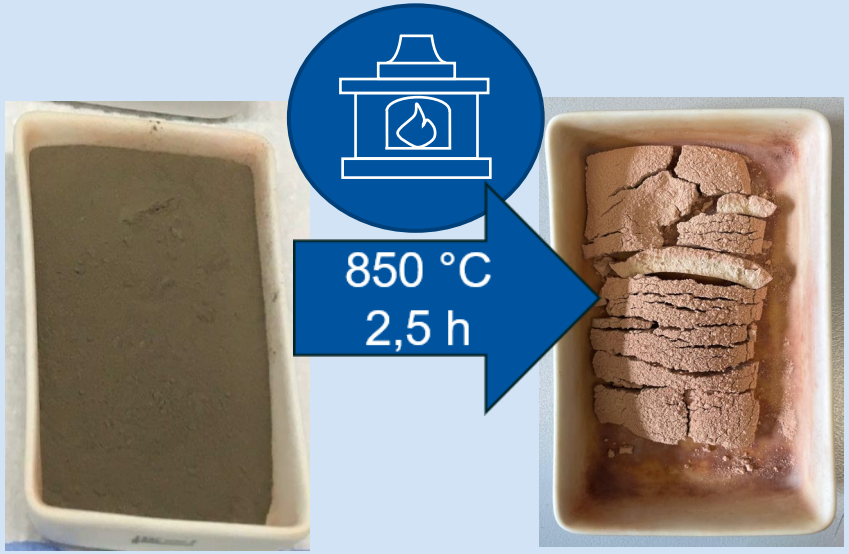


Versuche in der stationären Wirbelschichtfeuerung

Vergleich Muffelofen zu stationärer Wirbelschichtfeuerung

Versuchsablauf

Muffelofen



Ausgangsmaterial: Gemisch aus gemahlenem und getrocknetem Klärschlamm und Additiv, 40 g pro Versuch

Stationäre Wirbelschichtfeuerung

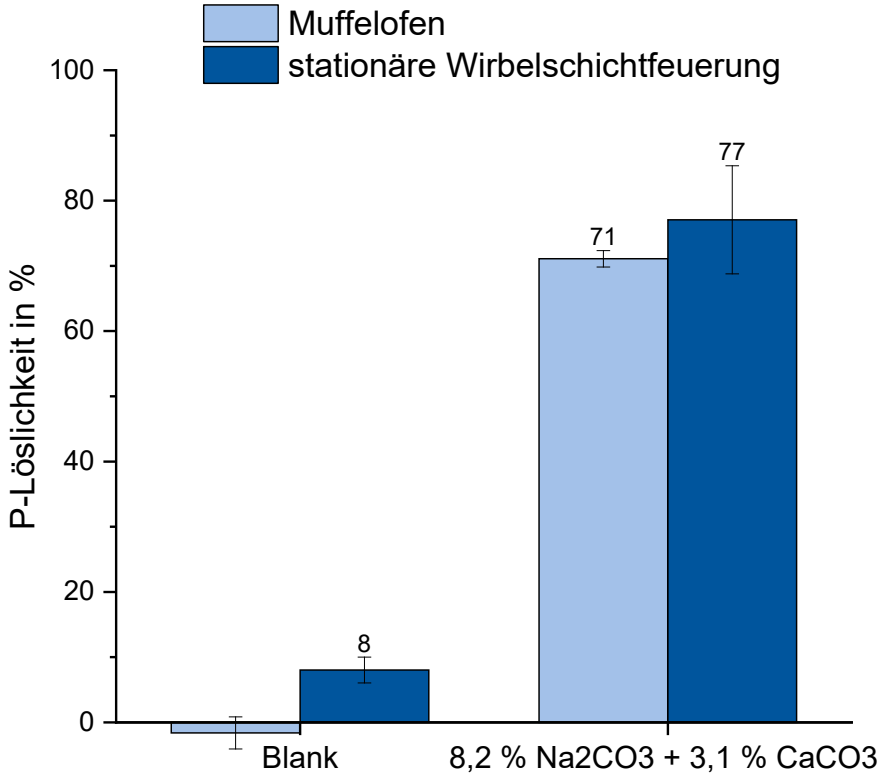


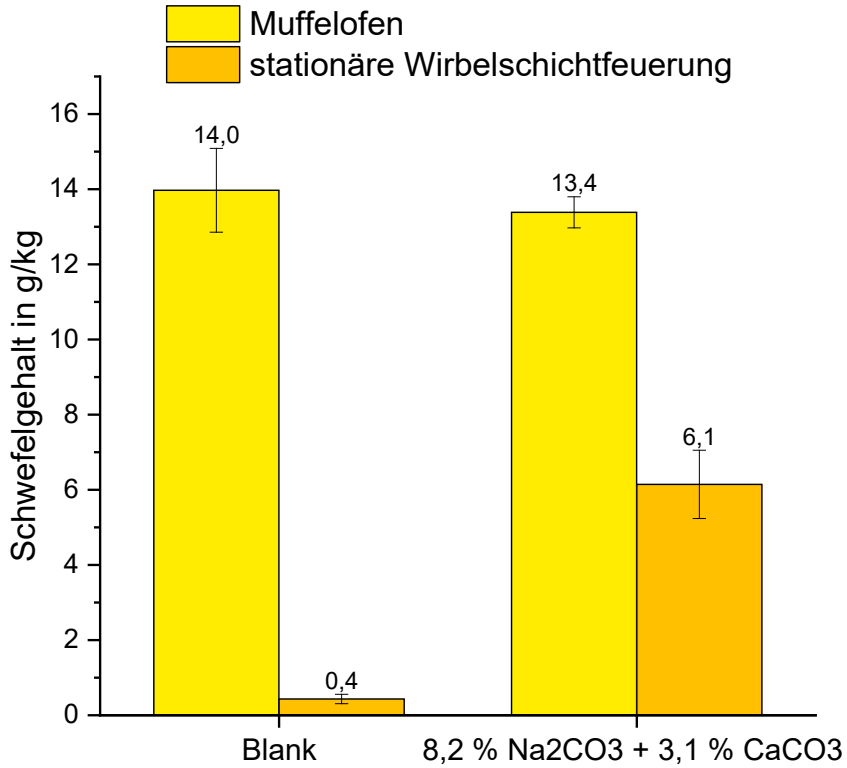
Foto: Sabrina Greif

Ausgangsmaterial: Pellets aus Klärschlamm + Additiv, 30 – 50 kg pro Versuch

Versuche in stationärer Wirbelschichtfeuerung

Phosphorlöslichkeit in NAC und Schwefelgehalt der Klärschlammasche im Vergleich zum Muffelofen



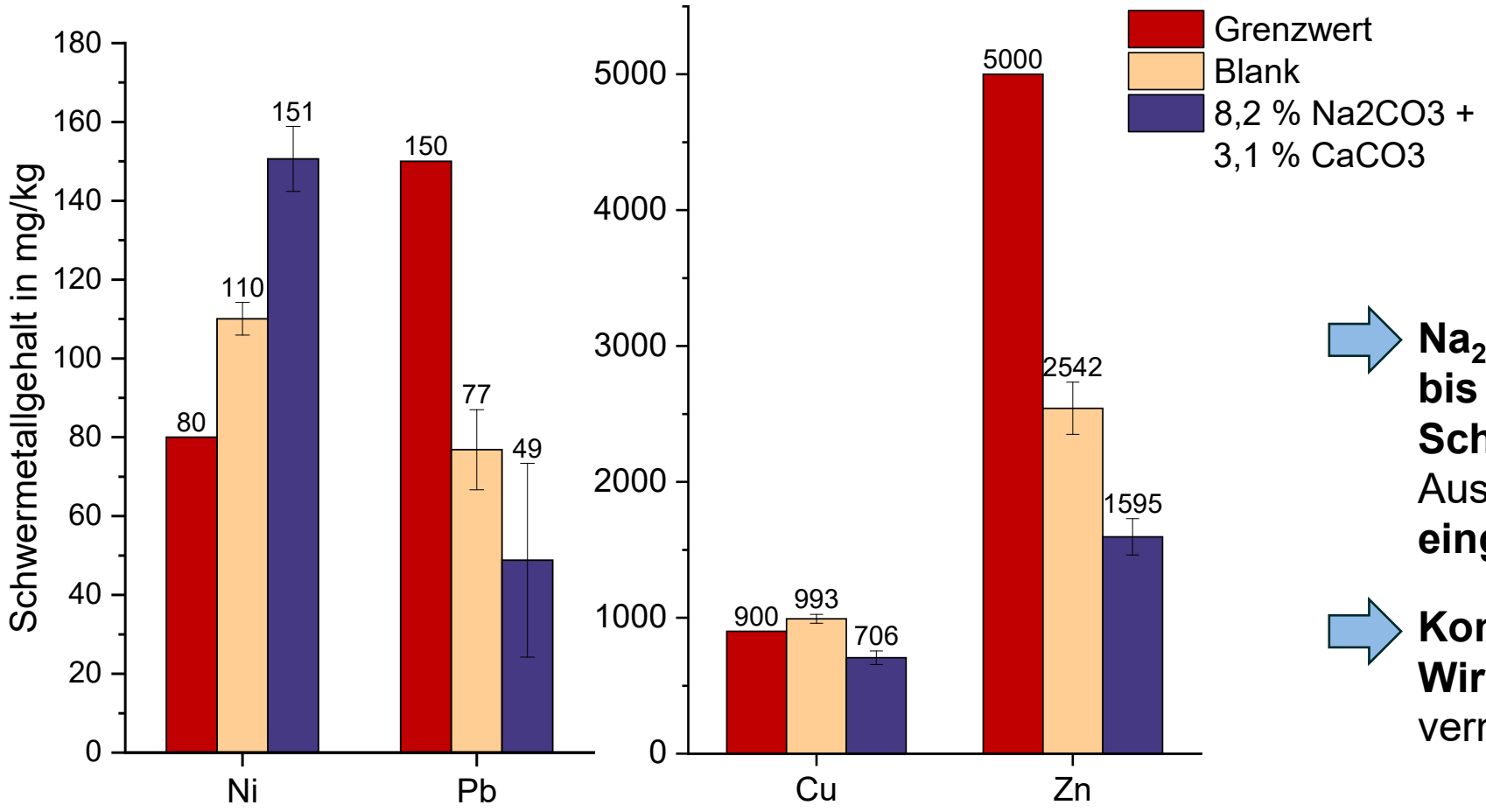


Qualitative Vergleichbarkeit Muffelofen mit stationärer Wirbelschichtfeuerung für P-Löslichkeit in NAC vermutet

Schwefeltransfer in die Gasphase in der stationären Wirbelschichtfeuerung gegenüber Muffelofen verstärkt

Versuche in stationärer Wirbelschichtfeuerung

Schwermetallgehalte der Klärschlammaschen



- **Na_2CO_3 + $CaCO_3$**: **bis auf Ni** werden **alle getesteten Schwermetallgrenzwerte** zur Ausbringung als Düngemittel **eingehalten**
- **Kontamination mit Ni durch Wirbelschichtfeuerungsmaterial** vermutet



Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung und Ausblick

- **Phosphorlöslichkeiten in NAC > 60 %** für alle Additive, maximal für Na_2CO_3
- **Schwefeltransfer in die Gasphase durch Additive gegenüber Blank um 52 – 97 % verringert**
- **Ni-Gehalt vernachlässigbar reduzierbar Cu-Gehalt mit Cl-haltigen Additiven** um bis zu **22 % reduziert**
- **Umsetzbarkeit des Ein-Schritt-Verfahrens im Technikumsmaßstab** anhand von Na_2CO_3 - $CaCO_3$ **bestätigt**

- **Stationäre Wirbelschichtfeuerung** für **weitere Additive** (Na_2CO_3, Na_2CO_3-NaCl)
- **Schwefeltransfer in die Gasphase begrenzen**
- **Ni-Grenzwert** in der Klärschlammasche **einhalten**
- **Düngeversuche** an Pflanzen durchführen

Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit

B. Sc. Veronika Enders; Dr.-Ing. Matthias Schnell; Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker

RWTH Aachen University
52056 Aachen

www.teer.rwth-aachen.de

Quellenverzeichnis

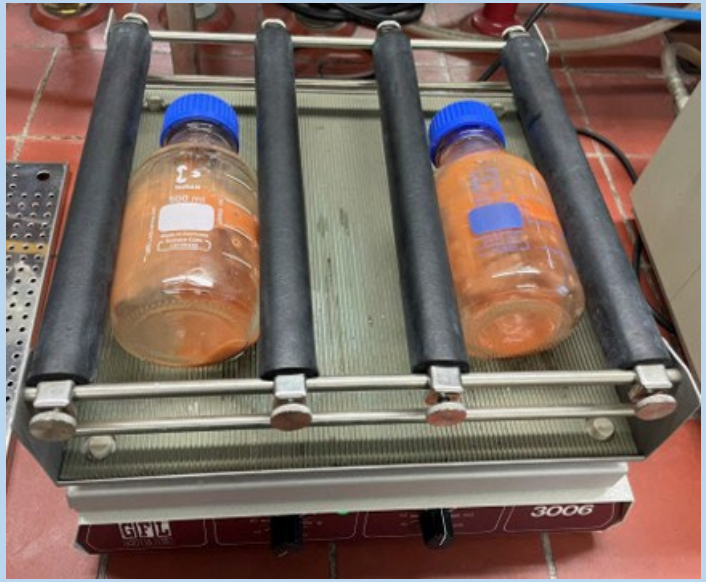
1. Bobba, S., Latunussa, C., Manni, F.M. and Mathieux, F., Deep dive on critical raw materials for batteries in the EU, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2025, https://data.europa.eu/doi/10.2760/3300656, JRC141715.
2. Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (Klärschlammverordnung - AbfKlärV) 27.09./2017; AbfKlärV - nichtamtliches Inhaltsverzeichnis
3. Ploteau Marie-Edith, Althoff Anke, Nafo Issa, Teichgräber Burkhard, “Final report of the Phos4You partnership: deploying phosphorus recycling from wastewater in North-West Europe”, December 2021, edited by LIPPEVERBAND, 10.17185/duepublico/75173

P-Löslichkeitsversuch in NAC

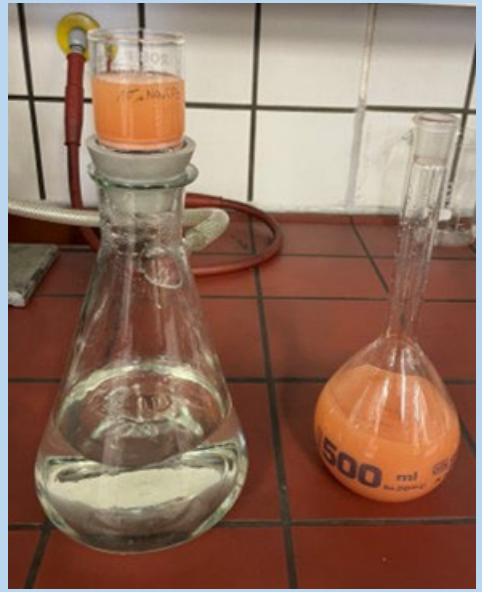
Versuchsdurchführung:



+ NAC



1h auf Schüttelapparat



Filtrieren und Trocknen

$$P_{rel,NAC} = \frac{P_{NAC\ gelöst}}{P_{KSA}} = \frac{P_{KSA} - P_{KSA-Rückstand}}{P_{KSA}} \cdot 100\ \%$$