

MIT HYDROTHERMALER KARBONISIERUNG VON KLÄRSCHLAMM ZU NETTO-NULL

Die hydrothermale Karbonisierung (HTC) macht Klärschlamm als Biokohle erstmals zu einer echten CO₂-Senke. Neue Messdaten aus Pilot- und Grossanlagen zeigen: HTC ist eine Schlüsseltechnologie für Kläranlagen auf dem Weg zu Netto-Null.

Stefan Gautschi, gautschi project engineering gmbh
 Andreas Mehli; Alexander Treichler, GRegio Energie AG
 Alain Fischer, ARA Buchs (SG)

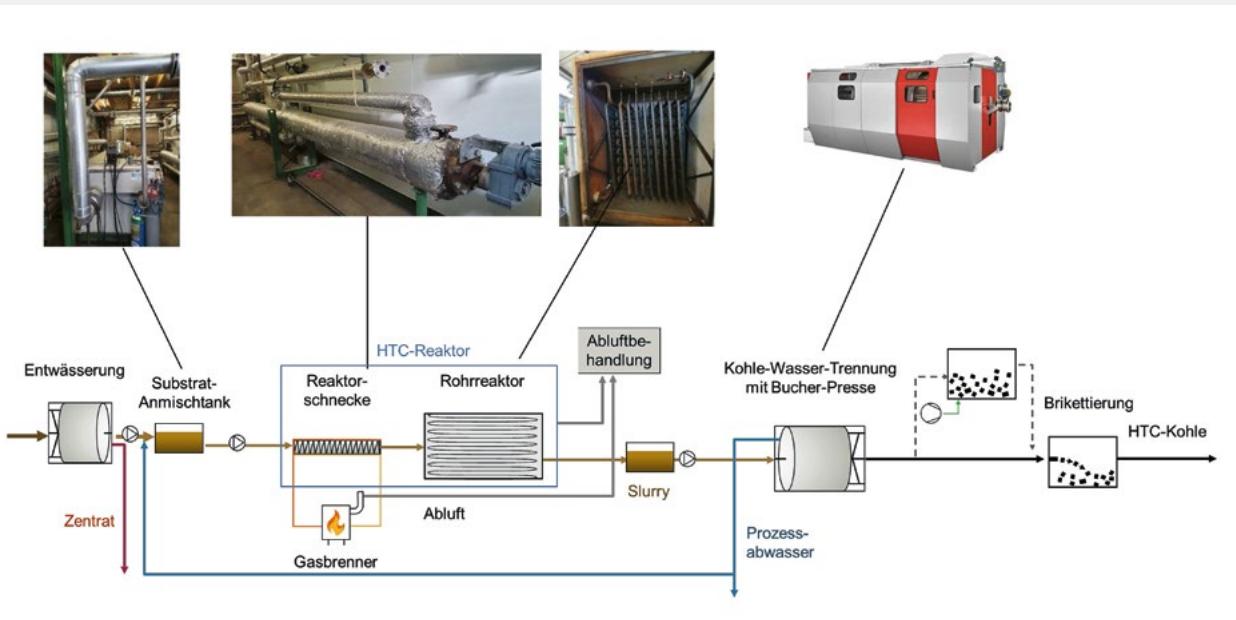


Fig. 1 Schematische Darstellung des Verfahrens für eine HTC-Anlage.

RÉSUMÉ

ATTEINDRE LE ZÉRO NET GRÂCE À LA CARBONISATION HYDROTHERMALE DES BOUES D'ÉPURATION

En Suisse, les boues d'épuration sont majoritairement déshydratées, séchées et valorisées par traitement thermique dans des cimenteries, des usines d'incinération des ordures ménagères et des installations d'incinération des boues. Ce processus entraîne la perte de nutriments importants, limite le gain énergétique net et libère à nouveau du CO₂ biogène. La carbonisation hydrothermale (HTC) offre une alternative à faibles émissions: les biomasses humides comme les boues d'épuration sont transformées en charbon biologique (hydrochar en anglais) sous l'effet de la pression et de la chaleur, utilisable comme source d'énergie stockable, comme puits de carbone ou comme une combinaison des deux. Un déchet coûteux peut ainsi devenir une matière recyclable rentable. Cette technologie offre également de nouvelles possibilités aux stations d'épuration des eaux usées pour récupérer le phosphore et l'azote. La HTC contribue ainsi à la stratégie climatique et au cycle des nutriments. L'entreprise GRegio Energie AG examine la contribution que la HTC peut apporter à la réduction des émissions résiduelles dans le cadre d'une feuille de route zéro net d'une STEP.

Die hydrothermale Karbonisierung (HTC, engl. *Hydrothermal Carbonization*) imitiert den natürlichen Prozess der Kohlebildung, aber statt in Jahrtausenden macht sie dies in nur wenigen Stunden. Der Schlamm wird auf rund 200 °C erhitzt, während er mit etwa 20 bar kontinuierlich durch einen Reaktor (HTC-Reaktor in Fig. 1) strömt. Die unter diesen Bedingungen ablaufenden Reaktionen führen innerhalb von vier Stunden zur Bildung von stabilen organischen Verbindungen in einem wässrigen Schlamm (Slurry). Durch das Trennen des Slurry (z. B. in einer *Bucher-Presse*) entstehen die beiden Hauptprodukte des HTC: energiereiche feste Biokohle (Hydrochar) und weiter verwertbares Prozesswasser.

Eine frühere Studie (*Aqua & Gas* 11/24 [1]) beleuchtete das Entwicklungspotenzial des HTC mit Fokus auf die Phosphorrückgewinnung. Heute liegen umfangreiche Betriebserfahrungen vor, unter anderem aus der 2023 in Phoenixville (USA) installierten Grossanlage (Fig. 1-3). Ergänzend lieferte eine

* Kontakt: S. Gautschi stefan.gautschi@gautschi-eng.ch

Pilotanlage (Fig. 4-7) mit Schlamm der ARA Buchs detaillierte Erkenntnisse zum Verhalten von Schlamminhaltsstoffen während der Karbonisierung. Der vorliegende Bericht zeigt das Potenzial des HTC-Verfahrens für die Erreichung von Netto-Null in Kläranlagen und dessen Beitrag zur Weiterentwicklung der Kreislaufwirtschaft auf Schweizer Abwasserreinigungsanlagen (ARA). Zudem werden die Nutzungsmöglichkeiten des Wertstoffs Klärschlamm-Biokohle umfassend vorgestellt.



Fig. 2 HTC-Anlage auf der ARA Phoenixville, USA.

(© A. Mehli)



Fig. 3 HTC-Anlage auf der ARA Phoenixville, USA, mit dem Reaktor (rechts), Bucher-Presser (Mitte) und Auswurf Klärschlammkohle (links).

(© A. Mehli)



Fig. 4 Die Pilotanlage mit Reaktor, Heizung und Druckbehälter. (© A. Mehli)



Fig. 6 Substratlagerung der Pilotanlage. (© S. Gautschi)



Fig. 5 Wärmetauscher der Pilotanlage. (© A. Mehli)



Fig. 7 Biokohle aus der Kammerfilterpresse der Pilotanlage. (© A. Mehli)

Parameter	Wert	Quelle / Hinweis
Umwandlungsrate (TS Klärschlamm zu TS Biokohle)	65–70%	ARA Phoenixville
Wärmebedarf	923 kWh/t BK	ARA Phoenixville
Strombedarf	554 kWh/t BK	ARA Phoenixville
Biomethan aus Prozesswasser	83 Nm ³ CH ₄ /t BK 6 NL CH ₄ / kg PW	eigene Berechnungen
Wärmegewinnung aus Prozesswasser	828 kWh/t BK	
Netto-Wärmebedarf, um eine Tonne TS Biokohle herzustellen (nach Nutzung Methan aus Prozesswasser)	95 kWh/t BK	
Methanpotenzial pro Tonne BK	Messwert abhängig von CSB	
Deckungsgrad Prozesswärme durch Methan	bis zu 90%	

Tab. 1 Kennzahlen Energiebedarf und CO₂-Emissionen (1 t Biokohle aus 10% TS Klärschlamm).

TS: Trockensubstanz, BK: Biokohle, PW: Prozesswasser, CSB: chemischer Sauerstoffbedarf.

Parameter	Wert	Quelle / Hinweis
Heizwert	12 700 MJ/t BK (≈ 3528 kWh/t BK)	Pilotanlage
Heizölequivalent	353 l Heizöl pro Tonne BK	Umrechnung
CO ₂ -Emission bei Verbrennung	1,098 t CO ₂ /t BK	Umrechnung

Tab. 2 Eigenschaften der Biokohle aus ausgefaultem Klärschlamm.

Schlammes genutzt und dazu in den Anmischtank vor dem Reaktor zudosiert werden. Damit kann die «verlorene Kohle» rückgeführt und insgesamt die Kohlenstoffeffizienz erhöht werden.

Energiebedarf und Methanertrag

Neben dem Strom- und Wärmebedarf des Reaktors spielt das Prozesswasser eine zentrale Rolle. Es weist einen hohen

CSB-Gehalt auf und besitzt ein deutliches Biomethanpotenzial (BMP; Tab. 1). Mit CSB-Werten von 30 000–40 000 mg CSB/l in Prozesswasser aus karbonisiertem Faulschlamm lässt sich unter geeigneten Bedingungen ein BMP von durchschnittlich 6 NL CH₄/ kg Prozesswasser erreichen [3]. Bezogen auf die produzierte Biokohle kann das produzierte Methan einen erheblichen Anteil der benötigten

Prozesswärme decken. In der Praxis können bis zu 90% der HTC-Wärmeenergie durch die Vergärung des Prozesswassers bereitgestellt werden.

Die Energiebilanz stützt sich auf die Betriebsdaten der ARA Phoenixville. Die Werte zeigen, dass sich der Netto-Wärmebedarf einer modernen HTC-Anlage auf moderate Werte reduziert, insbesondere bei konsequenter Wärmerückgewinnung.

Energetische Eigenschaften der Biokohle

Die aus ausgefaultem Klärschlamm erzeugte Biokohle der Pilotanlage (ARA Buchs) weist einen Heizwert (Hu) von 12 700 MJ pro Tonne TS auf, was 3531 kWh/t TS oder dem Äquivalent von 353 Litern Heizöl entspricht. Bei Verbrennung entstehen rund 1,098 Tonnen biogenes CO₂ pro Tonne Biokohle (Tab. 2). Ein Wert, der durch die CO₂-Bindung während der HTC-Karbonisierung jedoch mehr als kompensiert werden kann, sofern die Kohle nicht energetisch verwertet, sondern eingelagert wird.

KLÄRSCHLAMM –

VOM ABFALL ZUM WERTSTOFF

Aus einem teuren Abfallstoff (Klärschlamm) lassen sich mit der HTC-Technik verschiedene Wertstoffe gewinnen. (Fig. 8 und 9).

Prozesswasser als Energieträger

Aufgrund hoher CSB-Konzentrationen galt das Prozesswasser lange als eine

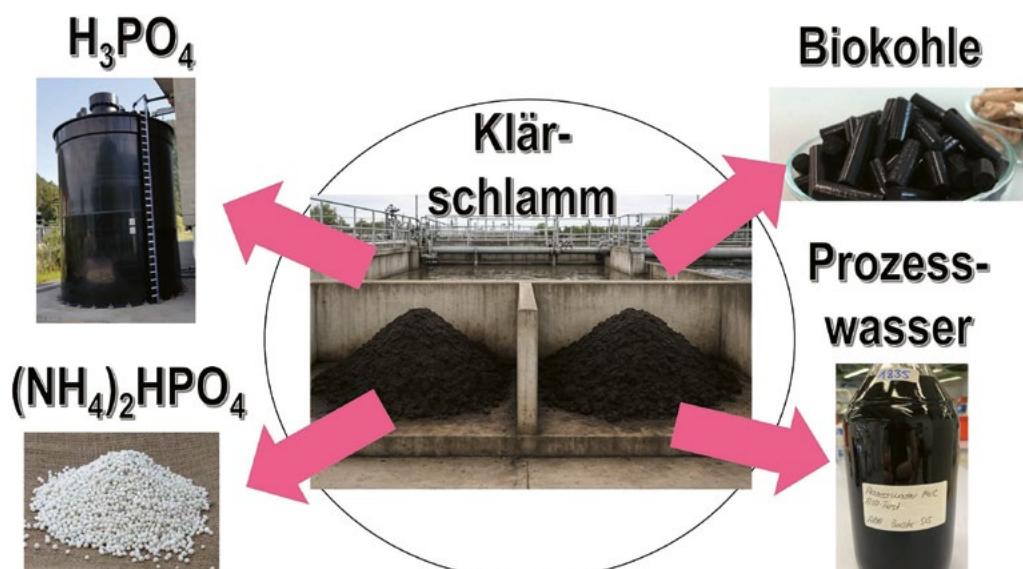


Fig. 8 Verschiedene Wertstoffe, in die Klärschlamm mithilfe des HTC-Verfahrens umgewandelt wird.

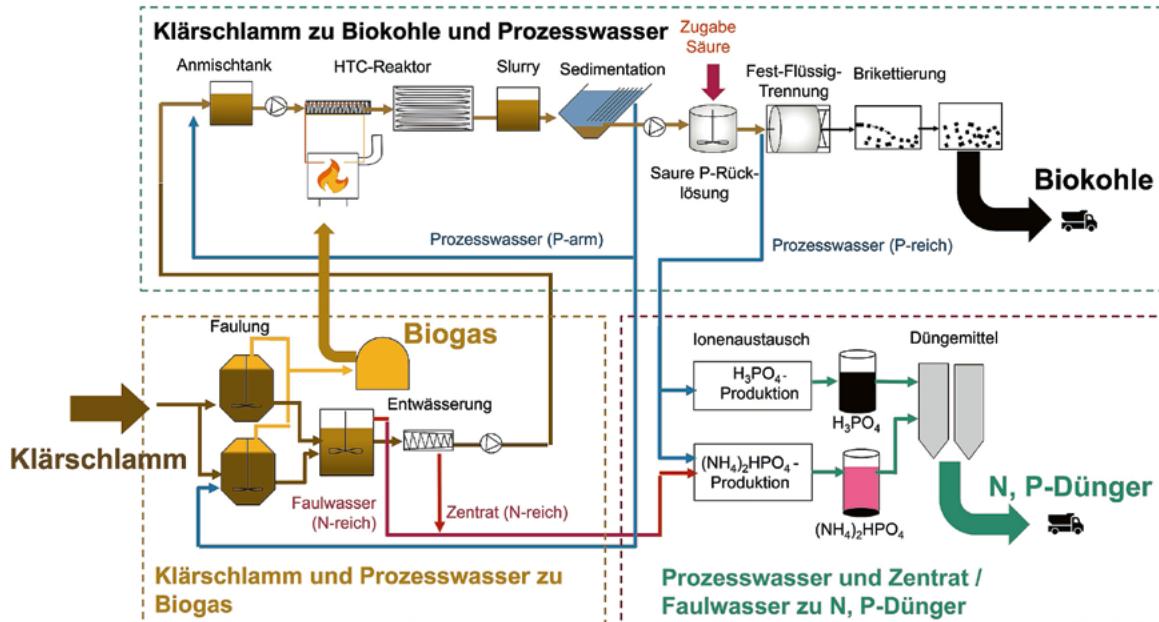


Fig. 9 Schema: Verwertung von Klärschlamm in Biogas, N/P-Dünger und Biokohle.

Herausforderung für die Abwasserbehandlung. Heute gilt es als sinnvoller, das Prozesswasser einer anaeroben Behandlung zu unterziehen: Je nach CSB-Gehalt können in der Vergärung wesentliche Methanmengen erzeugt werden, die entweder zur internen Wärmeversorgung oder zur Gasnetzeinspeisung genutzt werden.

Rückgewinnung von Nährstoffen

Die Untersuchungen der Pilotanlage zeigen, dass rund 39% des Phosphors in der Biokohle und 61% im Prozesswasser verbleiben. Durch Variation des pH-Werts lässt sich der Phosphor gezielt in die eine oder andere Fraktion lenken. Durch Extraktion der Biokohle mit Schwefelsäure lassen sich ca. 90% des Gesamtporphors isolieren [2].

In den Pilotversuchen wurden 92% des Stickstoffs in das Prozesswasser überführt. Dies stellt einen wesentlichen Vorteil dar, da die Biokohle dadurch nahezu stickstofffrei bleibt und das Risiko der Bildung von Stickoxiden und Lachgas bei der Verbrennung deutlich reduziert wird. Aktuell werden Technologien entwickelt, um den im Prozesswasser enthaltenen Phosphor mittels Ionentauscher zu hochreiner Phosphorsäure aufzubereiten und gleichzeitig zusammen mit faulwasserbasiertem Ammonium zu Diammonium-

phosphat (DAP, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) als Dünger umzusetzen [1, 2].

Wert der Biokohle

Die HTC führt zu einer dichten, formstabilen Biokohle, die sich hervorragend brikkettieren lässt. Ihr Wert ergibt sich nicht nur aus dem Heizwert, sondern auch aus dem niedrigen CO₂-Fussabdruck: Da die Prozessenergie in variablem Masse elektrisch bereitgestellt werden kann, eignet sich HTC als *Power-to-Coal*-Technologie,

welche erneuerbare Überschussenergie in einen saisonal speicherbaren Energieträger überführt.

VERWERTUNG DER BIOKOHLE

HTC-Biokohle kann als nahezu phosphorfreier Festbrennstoff in Brikkettform saisonal gelagert und in KVA, Fernwärmeanlagen oder Zementwerken eingesetzt werden (Fig. 10 und 11).

Alternativ eröffnet die dauerhafte Einlagerung der Kohle eine neue Option für



Fig. 10 Einbindung von Klärschlamm-Biokohle in lagerfähige Ballen.

(© A. Mehli)



Fig. 11 Zukunftsvisions: Einlagerung von Klärschlamm-Biokohleballen als CO₂-Senke. (KI-generiertes Bild)

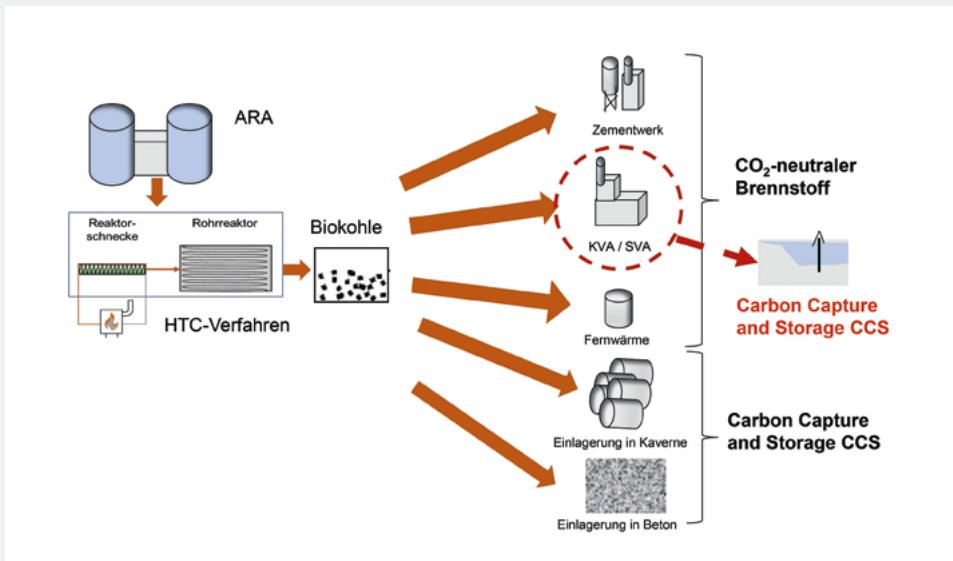


Fig. 12 Biokohle kann als Energieträger oder als CO₂-Senke genutzt werden.

den Aufbau belastbarer Negativemissionen von ARA. Damit wird erstmals die Möglichkeit geschaffen, unvermeidbare Emissionen der Abwasserbehandlung vollständig zu neutralisieren, das heisst, auf Netto-Null zu bringen. Wenn sowohl der Energieinhalt als auch die Negativemissionen der Biokohle genutzt werden sollen, ist der Weg über die Verbrennung mit kombinierter CO₂-Abscheidung einzuschlagen.

Die längerfristige Speicherung des CO₂ erfolgt bereits in geologischen Formationen wie z.B. in ehemaligen Erdölfeldern in Norwegen (Fig. 12).

AUSBlick

Die Entwicklung der hydrothermalen Karbonisierung verläuft dynamisch, auch wenn weltweit nur wenige Unternehmen an grossmassstäblichen Anlagen arbeiten. Doch die technologischen Vorteile sind mittlerweile klar sichtbar. Sobald erste HTC-Grossanlagen über längere Zeit stabil laufen und die Biokohle wirtschaftlich verwertet werden kann, dürfte die Technologie rasch an Bedeutung gewinnen.

Der Verband Schweizerischer Abwasserfachleute (VSA) steht Negativemissionstechnologien positiv gegenüber [4].

HTC: SCHLÜSSELTECHNOLOGIE FÜR NETTO-NULL

Die hydrothermale Karbonisierung (HTC) von Klärschlamm, vor gut einem Jahrzehnt als vielversprechende Innovation gestartet, entfaltet heute ihr gesamtes Potenzial: Entwässerter Faulschlamm wird unter Druck und Wärme zu speicherbarer Biokohle umgewandelt. Das entstandene Prozesswasser lässt sich anaerob vergären, wodurch Biogas für die Beheizung des Reaktors entsteht. Aus dem Prozesswasser können zudem Phosphor und Stickstoff zu Dünger aufbereitet werden. Besonders wertvoll ist die nährstoffbefreite Biokohle selbst: als Ersatzbrennstoff für Fernwärme oder als Negativemissionstechnologie durch langfristige Einlagerung. Damit wird HTC zur Schlüsseltechnologie für Netto-Null und markiert einen Paradigmenwechsel in der Klärschlammverwertung. Schweizer Vorreiter in der Entwicklung der HTC-Technik in diesem Bereich ist die Churer Firma GRegio Energie AG.

HTC besitzt das Potenzial, Klärschlamm in einen Wertstoff zu verwandeln, Nährstoffe in den Kreislauf zurückzuführen und den Weg der ARA zu Netto-Null entscheidend zu verkürzen.

Die Frage lautet daher nicht ob, sondern wann HTC Stand der Technik in der Klärschlammverwertung wird.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Gautschi, S.; Mehli, A. et al. (2024): HTC-Verfahren auf der ARA Buchs; *Aqua & Gas* No. 11
- [2] Gerner, G. et al. (2023): *Hydrothermal Carbonization of Sewage Sludge: New Improvements in Phosphatic Fertilizer Production and Process*; *Energies* 2023, 16, 7027, <https://doi.org/10.3390/en16207027>
- [3] Treichler, A; Nägele, H. (2025): *VARESI Valorisation of industrial residues for a sustainable industry* - Projektbericht; Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften ZHAW; Bundesamt für Energie BFE. <https://www.aramis.admin.ch/Dokument.aspx?DocumentID=73920>
- [4] [https://wasser-wissen.ch/branche-netto-null/VSA-Seite-wasser-wissen.ch/Netto Null](https://wasser-wissen.ch/branche-netto-null/VSA-Seite-wasser-wissen.ch/Netto-Null)
- [5] Div. Autoren (Dez. 2024): *Projekt DeCIRRA; Swiss NET Scenario report by SP3*



BLUE COMMUNITY: GEMEINSAM ENGAGIERT FÜR UNSER WASSER!

JETZT BLUE
COMMUNITY
WERDEN!



GEMEINDEN, TECHNISCHE BETRIEBE,
UNTERNEHMEN UND HOCHSCHULEN
ÜBERNEHMEN VERANTWORTUNG.



LUKAS BOUMAN, VSA
LUKAS.BOUMAN@BLUECOMMUNITY.CH
BLUECOMMUNITY.CH