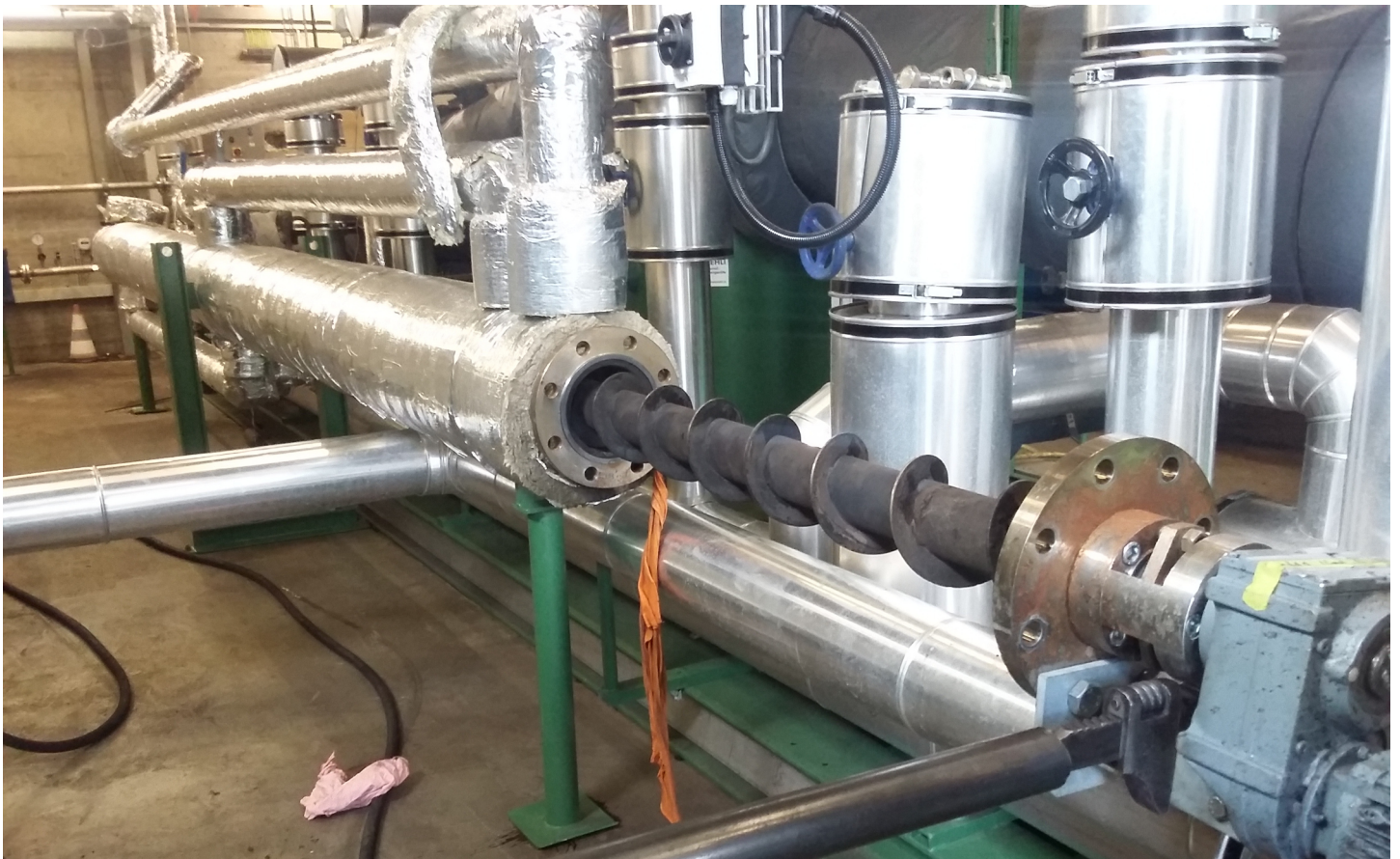


IN VIER STUNDEN WIRD AUS BIOABFALL KOHLE

Vor gut 100 Jahren hat der deutsche Chemiker Friedrich Bergius beschrieben, wie sich pflanzliche Stoffe unter Einwirkung von Druck und Wärme binnen Stunden in Kohle verwandeln. Die «hydrothermale Karbonisierung» (HTC), so die wissenschaftliche Bezeichnung des Verfahrens, erlebt heute eine Renaissance: Eine Pilotanlage in Chur hat das Potenzial von HTC zur Rückgewinnung von Pflanzennährstoffen aus organischen Abfällen untersucht, ebenso die energetische Verwertung von HTC-Kohle.



Die eigentliche Innovation der Churer Anlage ist dieses 6 m lange Rohr, in dem der Klärschlamm erhitzt und komprimiert wird, bevor er in den Reaktor gelangt. Die Erwärmung erfolgt durch 270 °C heisses Thermoöl, das im Mantel des Rohres zirkuliert. Im Innern des Rohres schiebt eine Schnecke (auf dem Foto ein Stück herausgezogen) den Klärschlamm langsam voran und sorgt zugleich dafür, dass er sich während des Erhitzens nicht an der Innenwand des Rohres festsetzt. Foto: BFE-Schlussbericht

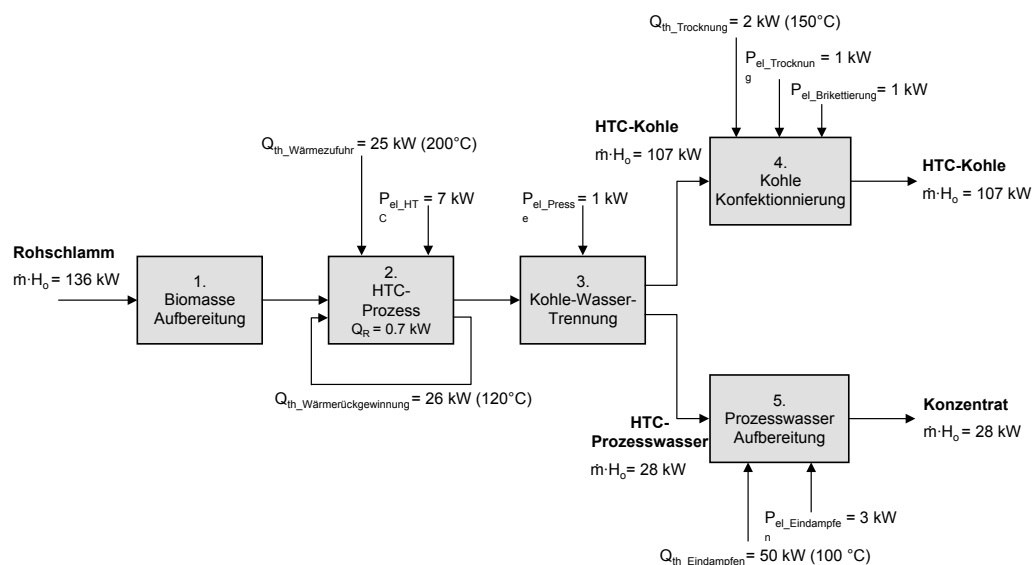
Was wir im Alltag gern als «Abfall» bezeichnen, ist nicht selten eine Quelle von Wert- und Nährstoffen. Das gilt auch für den Klärschlamm, der in Abwasserreinigungsanlagen (ARA) anfällt und bisher meist in Schlammverbrennungsanlagen (auch Monoverbrennung genannt), Kehrichtverbrennungsanlagen und Zementwerken entsorgt wird. Dabei enthält Klärschlamm unter anderem Stickstoff und Phosphor, zwei Grundstoffe von Pflanzendünger. Ab dem Jahr 2026 muss mindestens 50 % des Phosphors aus dem Klärschlamm zurückgewonnen werden, so verlangt es die «Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen» (VVEA). Für die Rückgewinnung existieren verschiedene Wege. Einer davon wurde jüngst in einer Pilotanlage für «hydrothermale Karbonisierung» (HTC) in Chur untersucht.

In der HTC-Anlage wird Klärschlamm aus der nahe gelegenen ARA Chur einem Druck von 20 bar ausgesetzt und zugleich in zwei Stufen auf 200 °C erhitzt. Der heisse Schlamm verharrt in diesem Zustand vier Stunden in einem Reaktor und verwandelt sich dabei in Kohleschlamm (hydrothermale Karbonisierung). Der Kohleschlamm wird anschliessend ausgepresst – es entstehen HTC-Kohle und Prozesswasser. Der im Klärschlamm enthaltene Phosphor soll überwiegend ins Prozesswasser überführt werden. Damit das gelingt, wird der Kohleschlamm vor der Auspressung angesäuert. Danach kann der Phosphor aus dem Prozesswasser extrahiert werden. «Wir konnten mit der Pilotanlage in Chur rund 30 % des im Faulschlamm enthaltenen Phosphors zurückgewinnen», sagt Gabriel Gerner von der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW), der das Projekt wis-



Andreas Mehli zeigt ein Stück HTC-Kohle. Das Produkt der hydrothermalen Karbonisierung wird oft auch als «Biokohle» bezeichnet, was allerdings missverständlich ist, da auch fossile Kohle «biologischen» Ursprungs ist. HTC-Kohle kann für die Energieerzeugung genutzt werden, sie ist aber auch als Bodenverbesserer, Dünger oder als Werkstoff für die Batterieherstellung im Gespräch. Ausgebracht auf landwirtschaftlichen Feldern, bleibt der elementare Kohlenstoff nach heutigen Erkenntnissen im Boden bestehen und wirkt so als Kohlenstoffsänke; die Pflanzenkohle ist möglicherweise förderlich für den Wasserhaushalt im Boden und für das Pflanzenwachstum. ZHAW-Forscher haben in der HTC-Kohle eine Häufung von langkettigen Fettsäuren gefunden, eine günstige Voraussetzung zur Herstellung von Biodiesel. Foto: B. Vogel

senschaftlich begleitet hat. Die Forscher um Gerner hatten erwartet, die Karbonisierung würde die Löslichkeit des Phosphors begünstigen, was allerdings nicht eintrat. Trotz des Teilerfolgs bleibt Umweltingenieur Gerner zuversichtlich: «Wenn wir den Kohleschlamm stärker ansäuern und den pH-Wert von 4 auf 3 senken, dürften wir die 50%-Vorgabe der VVEA erfüllen.»



Die Grafik zeigt die benötigte elektrische und thermische Leistung für die Prozessschritte einer HTC-Anlage mit einem Massestrom von 275 kg pro Stunde, wie sie in Chur realisiert war. Umgerechnet auf eine Tonne Klärschlamm (Rohschlamm) benötigt der HTC-Prozess über alle fünf Prozessschritte hinweg 47 kWh elektrische und 280 kWh thermische Energie. Zum Vergleich: Aus einer Tonne nicht gefaultem Klärschlamm mit 15% Trockensubstanz können 140 kg HTC-Kohle mit einem Energiegehalt von 560 kWh gewonnen werden; daraus können rund 500 kWh Wärme (mittels FLOX-Brenner) oder 140 kWh Strom plus 250 kWh Wärme (im Blockheizkraftwerk) gewonnen werden. Grafik: BFE-Schlussbericht

Aufheizen und Karbonisieren in getrennten Schritten

Treibende Kraft hinter der HTC-Pilotanlage ist Andreas Mehli. Der Unternehmer betreibt ein Handelsgeschäft für Landwirtschafts-, Kommunal- und Forstmaschinen mit 35 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Seit 2015 hat er auf seinem Betriebsgelände vor den Toren der Stadt die HTC-Anlage aufgebaut und mit Engagement und Einfallsreichtum nach technischen Verbesserungen gesucht. Ausgangspunkt war eine HTC-Anlage des deutschen Herstellers Grenol. Nachdem es wiederholt zu Verstopfung kam, entschloss sich Andreas Mehli, das Aufheizen des Substrats und den Karbonisierungsprozess in zwei getrennten Prozessschritten zu staffeln. Der erste Teilprozess erfolgt in einer ‹Aufwärmeschnecke›, in der das Substrat von heissem Thermoöl erhitzt wird, während eine Schnecke es langsam weiterbewegt. «Mit dieser innovativen Komponente konnten wir unsere HTC-Anlage zwischen September 2019 und Dezember 2020 fast 1000 Stunden praktisch störungsfrei betreiben», zieht Mehli Bilanz. «Seit Betriebsbeginn haben wir 60 % Verbesserung in der Energieeffizienz erzielt.»

Die Anlage funktioniert also. Und sie funktioniert mit verschiedenen Substraten. Das Forscherteam von ZHAW und Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) führte vier Messkampagnen mit Klärschlamm und zwei weitere mit einem Gemisch aus Gülle und Gärresten durch. Die HTC-Anlage liesse sich auch mit anderen Formen von Biomasse wie Grün-gut, Lebensmittelabfällen oder Gülle betreiben. Doch jedes Substrat hat seine Eigenheiten – und erfordert mitunter eine Anpassung der Anlage. So muss – um nur ein Beispiel zu geben – für faserhaltige Substrate wie Gülle eine andere Presse verwendet werden als für Klärschlamm. Die Forscher von ZHAW und FHNW haben in ihrem Begleitprojekt die Stoffflüsse detailliert untersucht. Sie stellen damit Grundlagen für die Auslegung künftiger HTC-Anlagen bereit.

Aus HTC-Kohle wird Wärme und Strom

Am Ende der Karbonisierung stehen HTC-Kohle und Prozesswasser. Beide Produkte können energetisch genutzt werden – ersteres durch Verbrennung oder Vergasung, letzteres durch Vergärung in einer Biogasanlage. Die Analyse der Energieflüsse der Klärschlammverwertung zeigt, dass vier Fünftel der Energie in der Kohle stecken, und immerhin ein Fünftel im Prozesswasser. In Chur wurde das Prozesswasser versuchsweise in einer 20-Fuss-Container-Biogasanlage verwertet. Mit der HTC-Kohle wurden Vergasungs-, Pyrolyse- und Ab-



Über das isolierte vertikale Rohr im Vordergrund gelangt der auf 200 °C erhitzte und auf 20 bar komprimierte Klärschlamm in den HTC-Reaktor (weisser Container). Dort verwandelt sich der Klärschlamm in einem nur vier Stunden dauernden Prozess in Kohleschlamm, aus dessen Feststoffen anschliessend durch Pressung HTC-Kohle gewonnen wird. Foto: BFE-Schlussbericht



Der Karbonisierungsreaktor besteht aus einem Rohr, das in elf Schleifen von jeweils zwölf Metern Länge angeordnet ist und insgesamt 5600 l Schlamm fasst. Der Reaktor ist sehr gut isoliert, so dass der Schlamm auf seiner vierstündigen Reise durch das Reaktorrohr nur 10 Grad (von 200 auf 190 °C) abkühlt. Im Reaktor verwandelt sich der Klärschlamm in Kohleschlamm, der nach dem Verlassen des Reaktors in einem Wärmetauscher auf 60 °C abgekühlt und in einer Schneckenpumpe entspannt wird. Foto: BFE-Schlussbericht

brandversuche durchgeführt. Da die Karbonisate unter anderem deutlich mehr Stickstoff und Schwefel als Holz enthalten, wurden die Grenzwerte der Luftreinhalteverordnung für Stickoxid-, Schwefeldioxid- und Staubemissionen überschritten, und es wurde eine verstärkte Schlackebildung beobachtet. «Die energetische Nutzung ist zwar möglich, aber nur mit einer angepassten und für HTC-Kohle optimierten Verbrennungseinrichtung und einer entsprechenden Rauchgasreinigung zu empfehlen», lautet das Fazit im Projekt-Schlussbericht. Als umweltgerechtere Alternative soll nun die Vergasung in kleineren Festbettvergäsern mit anschliessender Verbrennung des Gases in einem FLOX-Brenner untersucht werden.

Noch nicht abschliessend geklärt ist die Frage, in welchen Fällen sich eine energetische Verwertung von HTC-Kohle und Prozesswasser lohnt und zum Beispiel einer Vergärung der Substrate in einer Biogasanlage vorzuziehen ist. Nach Einschätzung von Andreas Mehli ist das HTC-Verfahren besonders dann vorteilhaft, wenn eine Verwertung in der Biogasanlage wegen Plastikrückständen nicht möglich ist. Zu beachten ist auch, dass die Karbonisierung selber Energie verbraucht. Diese entspricht im Fall von Lebensmittelresten 20 bis 30% der im Substrat enthaltenen Energie, im Fall von Klärschlamm sogar 50 - 100%, je nachdem, ob der Klärschlamm im Faulturm war oder nicht. Allerdings ist das HTC-Verfahren laut Mehli trotzdem empfehlenswert, da unter dem Strich weniger Energie für die Klärschlamm-trocknung benötigt wird als mit der heute geläufigen thermischen Wirbelschicht-trocknung. Daneben sei das HTC-Verfahren vorteilhaft für die Phosphorrückgewinnung.

Anwendung in der Surselva geplant

Nach Abschluss des Pilotbetriebs wird die HTC-Anlage am bisherigen Standort abgebaut. Was bleibt? Die Karbonisierungstechnologie hat die technische Reife unter Beweis gestellt. «Offen ist zur Zeit noch, mit welchen Substraten und welchen Verwertungen der HTC-Kohle die Technologie wirtschaftlich interessant ist. Ökonomisch interessant dürfte die Verwertung von Klärschlamm sein, weil dessen Entsorgung finanziell entschädigt wird», meint ZHAW-Forscher Gerner.

IM JAHR 1913 ENTDECKT

Das Verfahren der «hydrothermalen Karbonisierung» (HTC) geht auf den deutschen Chemiker Friedrich Bergius zurück. In einem 1913 verfassten Aufsatz beschrieb er, wie sich die Umwandlung von Biomasse in Kohle, die in der Natur Millionen von Jahren in Anspruch nimmt, technisch innert weniger Stunden nachahmen lässt. Für die Entdeckung des Verfahrens zur Herstellung des Energieträgers Kohle erhielt er 1931 den Chemie-Nobelpreis. 2012 nahm die Schweizer Firma AVA-CO2 in Karlsruhe eine HTC-Demonstrationsanlage in Betrieb. Industrielle HTC-Anlagen entstanden seither u.a. in der chinesischen Stadt Jining und in Relzow (Norddeutschland). Das HTC-Verfahren findet überdies Anwendung bei der Herstellung chemischer Grundstoffe. BV

Doch auch die Verkohlung von Grünschnitt und Gastroabfällen scheint Potenzial zu haben. Mit diesen beiden Substraten soll die erste kommerzielle Anlage in der Schweiz arbeiten, welche die Region Surselva – ein Verband von 15 Gemeinden des Vorderrheintals – im Jahr 2022 im Bündner Dorf Rueun in Betrieb nehmen will. Die dort hergestellte HTC-Kohle soll in verschiedenen mit Holzhackschnitzeln beschickten Fernwärmanlagen der Surselva energetisch verwertet werden, die Verwendung des Prozesswassers ist noch offen. Ein lau-



Nach dem Reaktor gelangt der Kohleschlamm in eine Presse, wo nach Abfluss des Prozesswassers die HTC-Kohle mit nur noch rund 30% Wassergehalt übrig bleibt. Foto: BFE-Schlussbericht

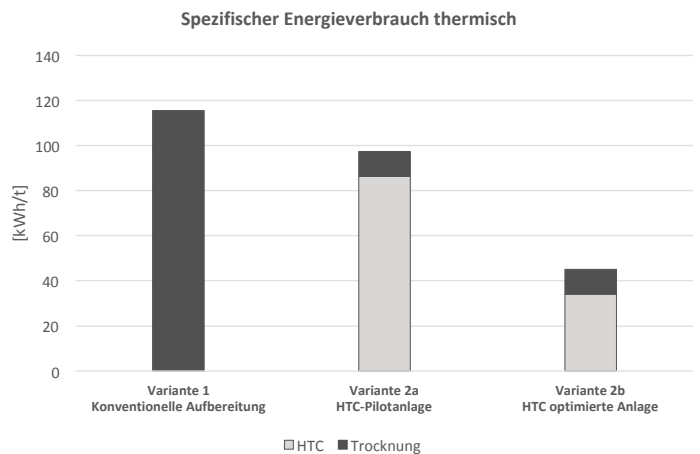
fendes BFE-Projekt soll die Machbarkeit einer solchen Anlage bestätigen. In einem Folgeprojekt werden Fragen der Raumplanung, Logistik und des Immissionsschutzes geklärt. Die Abklärungen zur HTC-Anlage obliegen der Stiftung «Alpines Energieforschungszentrum» (AlpEnForCe) in Disentis. Für Projektleiter Roland Cajacob ist die Anlage ein Schritt hin zur regionalen Abfallverwertung und Energieerzeugung aus Biomasse: «Grünschnitt und Gastroabfälle mussten bisher bis zu 90 km zu den Verwertungsbetrieben transportiert werden; neu können sie praktisch vor der Haustür in Energie umgewandelt werden.»

- Der **Schlussbericht** zum Projekt «HTC Innovationscampus Rheinmühle – Pilotanlage zur Hydrothermalen Karbonisierung» ist abrufbar unter: <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=40894>
- **Auskünfte** erteilen Dr. Sandra Hermle (sandra.hermle@bfe.admin.ch), Leiterin des BFE-Forschungsprogramms Bioenergie, und Dr. Men Wirz (men.wirz@bfe.admin.ch), verantwortlich für das Pilot- und Demonstrationsprogramm des BFE.
- Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Bioenergie unter www.bfe.admin.ch/ec-bioenergie.

P+D-PROJEKTE DES BFE

Die Churer Pilotanlage zur hydrothermalen Karbonisierung wurde vom Pilot- und Demonstrationsprogramm des Bundesamts für Energie (BFE) unterstützt. Damit fördert das BFE die Entwicklung und Erprobung von innovativen Technologien, Lösungen und Ansätzen, die einen wesentlichen Beitrag zur Energieeffizienz oder der Nutzung erneuerbarer Energien leisten. Gesuche um Finanzhilfe können jederzeit eingereicht werden.

- www.bfe.admin.ch/pilotdemonstration



Die herkömmliche Trocknung von Klärschlamm (bestehend aus einer mechanischen Entwässerung mittels Dekanterzentrifuge und einer thermischen Wirbelschichttrocknung) braucht mehr Wärmeenergie als mit dem HTC-Verfahren. Mit einer optimierten HTC-Anlage dürfte der energetische Vorteil noch deutlicher ausfallen. Beim Strom hat die (noch nicht optimierte) HTC-Pilotanlage einen etwas höheren Verbrauch. Grafik: BFE-Schlussbericht



Ein Teil des Forscherteams, das die Pilotanlage zur hydrothermalen Karbonisierung untersucht hat (v.l.n.r.): Daniel Lustenberger (FHNW), Peter Dubaj (Mehli Landmaschinen AG) und Gabriel Gerner (ZHAW). Foto: zVg