

Hydrothermale Karbonisierung – HTC-Verfahren

Dennis Blöhse

1.	Einleitung.....	650
2.	Untersuchungen mit Klärschlamm	650
2.1.	Ausgangssituation	650
2.2.	Fragestellung und Zielsetzung.....	651
2.3.	Ergebnisse der Laboruntersuchungen.....	652
2.3.1.	Allgemeine Ergebnisse	652
2.3.2.	Abriss über praktische Erkenntnisse	652
2.3.3.	pH-Wert als Schlüsselfaktor	653
2.3.4.	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Bewertung.....	656
3.	Technisch-ökonomische Bewertung	656
3.1.	Bewertungsgrundlage.....	656
3.2.	Technische Bewertung.....	657
3.2.1.	Verfahren zur Massenreduktion	657
3.2.2.	Verfahren zur P-Rückgewinnung.....	660
3.3.	Ökonomische Bewertung.....	663
3.3.1.	Herangehensweise.....	663
3.3.2.	Kostenschätzung	663
3.3.3.	Kostenvergleich	665
4.	Kurzfassung und Ausblick	667
5.	Quellen	667

Die dargestellten Daten sowie Bewertungsergebnisse entstanden im Rahmen eines Promotions-vorhabens an der Hochschule Ostwestfalen-Lippe (Abteilung Höxter, Fachgebiet für Abfallwirtschaft und Deponietechnik). Die Grundlage dieses Beitrags bildet die Dissertationsschrift [1] mit dem Titel: *Hydrothermale Karbonisierung – Nutzen dieser Konversionstechnik für die optimierte Entsorgung feuchter Massenreststoffe*. Dieser Beitrag ist ein Auszug aus [1] und zeigt auf Basis einer technisch-ökonomische Bewertung der Hydrothermalen Karbonisierung (HTC) die Potenziale und den Entwicklungsbedarf des Verfahrens zur Klärschlammverwertung auf.

1. Einleitung

Die HTC ist ein chemisch-physikalischer Konversionsprozess, der als wässrige Verkohlung von Biomasse bei erhöhten Temperaturen (180 bis 240 °C) unter Druck bezeichnet wird. Die maßgebliche Umwandlung basiert auf der Abspaltung von Sauerstoff aus der Biomassematrix. Hierbei erfolgt eine Umsetzung der organischen Trockenmasse (oTM) des Edukts durch Dehydratisierung zu H_2O und durch Decarboxylierung zu CO_2 . Im verbleibenden Feststoffprodukt steigt – u.a. aufgrund der oTM-Reduktion – der Gehalt an Kohlenstoff und der Brennwert wird erhöht. Darüber hinaus besitzt das Produkt durch die thermische Desintegration (Zellausschluss) ein wesentlich verbessertes Entwässerungsverhalten im Vergleich zum Ausgangsmaterial.

Insbesondere stark wasserhaltige Abfälle und Reststoffe, die aufgrund ihrer Eigenschaften (z.B. nicht vergärbare und schlecht zu entwässern) bisher einer effizienten energetischen Nutzung vorenthalten waren, können nach der HTC z.B. Verbrennungs- oder Vergasungsprozessen zugeführt werden. Durch die verbesserte Entwässerung sind behandelte Abfälle wesentlich transportwürdiger und heizwertreicher.

Die Kohlenstoffeffizienz des Verfahrens ist relativ hoch. Mit etwa 70 % verbleibt ein Großteil des Kohlenstoffs im Feststoffprodukt. Im Prozesswasser (PW) sind durch gelöste Intermediate etwa 25 % C enthalten. Ein geringer Anteil (etwa 5 %) des Kohlenstoffs wird dominierend als CO_2 in die Gasphase überführt. Die aufgeführten Nebenprodukte müssen einer Behandlung unterzogen werden. Die emissionsmindernden Maßnahmen nach dem Stand der Technik können sehr individuell ausfallen [1, 12, 15]. Ob der Aufwand der Reinigung von Prozesswasser (PW) und -gas den Nutzen der HTC-Technologie übersteigt, muss im Einzelfall geklärt werden.

Der wissenschaftliche Grundstein der HTC wurde bereits vor etwa 100 Jahren gelegt. Seit gut zehn Jahren wird die HTC-Technologie mit unterschiedlichen Schwerpunkten wieder intensiv erforscht und für verschiedene Einsatzzwecke weiterentwickelt. Mittlerweile existieren mehrere Demonstrationsanlagen in verschiedenen Maßstäben. Aufgrund der Novelle des Düngerechts sowie der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) und dem damit einhergehenden Bedarf an Entsorgungsoptionen für Klärschlamm, konzentrieren sich die aktuellen Entwicklungen auf diesen Einsatzbereich.

2. Untersuchungen mit Klärschlamm

2.1. Ausgangssituation

Bisherige Erkenntnisse aus Untersuchungen mit Klärschlamm haben gezeigt, dass aufgrund der hohen Ascheanteile keine nennenswerte Brennwertsteigerung durch die HTC erfolgt. Ein wesentlicher Vorteil des Verfahrens liegt in der Verbesserung des Entwässerungsverhaltens. Es werden Gehalte an Trockenrückstand (TR) von > 50 % Feuchtmasse (FM) erreicht, wodurch die Entsorgungsmasse erheblich reduziert wird.

Jedoch entsteht ein zusätzlicher Abwasserstrom, der organisch stark belastet ist und zu einer Rückbelastung der Kläranlage führt. Von energetischem Vorteil ist beispielsweise

eine anaerobe Behandlung (Vergärung) der PW, dadurch können nennenswerte Anteile der PW-Inhaltsstoffe zu Biogas umgesetzt werden. Danach kann die Restbelastung z.B. durch aerobe Reinigungsverfahren weiter reduziert werden. Der biologisch nicht umsetzbare Anteil (refraktäre Inhaltsstoffe) kann allerdings zur Grenzwertüberschreitung der Abflaufwerte einer Kläranlage führen.

2.2. Fragestellung und Zielsetzung

Die nachfolgenden Untersuchungsergebnisse wurden in Zusammenarbeit mit Klärwerksbetreibern erarbeitet. Folgende Fragestellungen haben die Arbeiten begleitet:

- Welche generellen Ergebnisse sind zu erwarten; und gibt es einen Unterschied zu den bisherigen Erkenntnissen (siehe Ausgangssituation)?
- Wie wirken sich Einflussfaktoren (Bild 1) auf die beschriebene Ausgangssituation aus (positiv/negativ)?
- Können daraus Ansätze zur Optimierung hergeleitet werden?

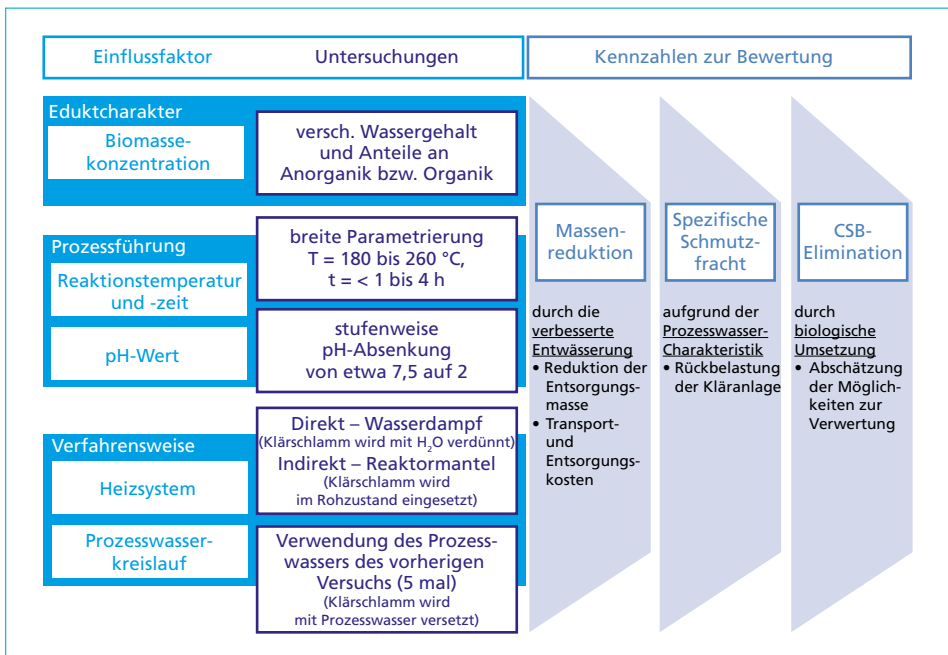


Bild 1: Schematische Darstellung der Untersuchungen

Bild 1 fasst die untersuchten Einflussfaktoren zusammen und gibt einen schematischen Überblick zur Herangehensweise sowie zum Ausmaß der Untersuchungen. Ferner sind die betrachteten Kennzahlen zur Bewertung aufgeführt, die einerseits den Einfluss quantifizieren und andererseits die Basis für die technisch-ökonomische Bewertung (Abschnitt 3) bilden.

Eine detaillierte Beschreibung der Laborversuche sowie der untersuchten Klärschlammproben und Reaktionsprodukte können [1] entnommen werden.

2.3. Ergebnisse der Laboruntersuchungen

2.3.1. Allgemeine Ergebnisse

Bevor die Auswirkungen der oben genannten Einflussfaktoren bewertet werden, sind zunächst folgende generelle Ergebnisse für die HTC (220 °C für 2 h, ohne Prozessoptimierung) aufzuführen:

- Es findet keine Brennwertsteigerung statt (Bild 4).
- Nach Entwässerung (15 bar, 30 min) liegt der TR-Gehalt bei etwa 50 % FM (Bild 2).
- Es liegt eine Massenreduktion von durchschnittlich etwa 70 % FM vor.
- Durch verbesserte Entwässerung wird der Heizwert um etwa 5 MJ/kg FM erhöht (Bild 4).
- Die spezifische Schmutzfracht, bezogen auf die Trockenmasse (TM) des Klärschlammes liegt im Durchschnitt für CSB bei 250 kg CSB/t TM, für N bei 28 kg N/t TM und für P bei 0,7 kg P/t TM

Die biologischen Abbautests mit den PW weisen folgende Ergebnisse auf:

- Die gemessene CSB-Elimination nach der anaeroben Behandlung (Vergärung) liegt im Durchschnitt bei bis zu 70 %.
- Eine aerobe Nachbehandlung des Schlammwassers nach der anaeroben Vorbehandlung weist eine weitere CSB-Elimination von 20 bis 45 % des verbleibenden CSB auf.
- Die gesamte CSB-Elimination nach Kombination einer anaeroben Vorreinigung und einer aeroben Nachbehandlung liegt bei bis zu 80 %.

2.3.2. Abriss über praktische Erkenntnisse

Die Untersuchungen der aufgeführten Einflussfaktoren (Bild 1) bietet eine Vielzahl von Erkenntnissen, die in diesem Beitrag nicht alle berücksichtigt werden können. Als wesentlich hat sich herausgestellt, dass die Senkung des pH-Wertes einen starken Einfluss auf die Untersuchungsergebnisse hat und deshalb im nächsten Abschnitt gesondert betrachtet wird.

In Bezug auf die Einflüsse Biomassekonzentration, Reaktionstemperatur und -zeit sowie die aufgeführten Verfahrensweisen (direkt/indirekt Beheizung, PW-Kreislauf) können folgende Punkte zusammengefasst werden:

Biomassekonzentration

Die HTC und deren Ergebnisse sind grundsätzlich stark stoffabhängig. Beispielsweise führen höhere Anteile an Organik im Klärschlamm zu höheren Belastungen der PW und damit zur Steigerung der spezifischen Schmutzfracht (z.B. CSB-Fracht von 230 auf 270 kg CSB/t TM). Aufgrund saisonaler und auch betrieblicher Veränderungen ist meist eine schwankende Zusammensetzung der Klärschlämme vorhanden. Für eine Einzelfallprüfung (Kläranlage) ist ein breiter Untersuchungsumfang empfehlenswert.

Reaktionstemperatur und -zeit

Vor dem Hintergrund, dass bei niedrigen Temperaturen (z.B. 180 °C) die Entwässerung noch sehr träge verläuft, werden die Prozessparameter 220 °C für 1 bis 2 h als Empfehlung ausgesprochen. Hohe Temperaturen (240 bis 260 °C) zeigen zwar eine Ergebnisverbesserung, die jedoch den energetischen und apparativen Aufwand nicht rechtfertigt.

Heizsystem (direkte/indirekte Beheizung)

Es liegen nur marginale Veränderungen der Kennzahlen bei den angewendeten Verfahrensweisen vor. Auf Basis der Untersuchungen sind beide betrachteten Heizsysteme (direkte und indirekte Beheizung) anwendbar. Die spezifische Schmutzfracht verringert sich nicht zugunsten einer Variante. Zwar liegen bei direkter Beheizung mit Wasserdampf geringere Konzentrationen im PW vor (Verdünnungseffekt) jedoch fallen auch wesentlich höhere PW-Mengen an.

Prozesswasserkreislauf

Eine Kreislaufführung der PW hat im direkten Vergleich mit den oben genannten Verfahrensweisen keinen negativen Einfluss (z.B. Akkumulation refraktärer Inhaltsstoffe im PW). Die spezifischen Schmutzfrachten fallen mit etwa zehn Prozent bei der CSB-Fracht hingegen signifikant niedriger aus. Ferner bietet diese Verfahrensweise weitere technische Vorteile ([1] und Abschnitt 3.2.2).

2.3.3. pH-Wert als Schlüsselfaktor

Auf Basis der Untersuchungsergebnisse liegen die größten Potenziale zur Prozessoptimierung bei einer pH-Senkung mit Mineralsäure (hier Schwefelsäure) vor. Bild 2 macht zunächst das verbesserte Entwässerungsverhalten nach der HTC ohne pH-Anpassung (pH = 7,9) im Vergleich zu einer Referenzprobe (Faulschlamm unter Zugabe von Flockungshilfsmittel (FHM)) deutlich.

Es zeigt sich, dass das Entwässerungsverhalten wesentlich optimiert werden kann, wenn der pH-Wert bei der HTC herabgesetzt wird. Es werden innerhalb weniger Minuten vergleichsweise hohe TR-Gehalte (> 55 % FM) erreicht. Daraufhin wird eine Steigerung der Massenreduktion um bis zu 10 %-Punkte (Abschnitt 2.1.1) auf etwa 80 % gewährleistet.

Ein weiterer Effekt der pH-Senkung ist bei der PW-Zusammensetzung zu beobachten. Bild 3 zeigt PW mit unterschiedlichen pH-Werten in einer Verdünnung von 1:10. Die Färbung nimmt mit sinkendem pH-Wert ab. Augenscheinlich werden komplexe Verbindungen unter den angewandten Bedingungen (220 °C für 2 h bei pH < 6) aufgebrochen bzw. umgewandelt. Die CSB-Fracht ist signifikant niedriger im Vergleich zur neutralen HTC-Referenz (pH 7 bis 8, Tabelle 2).

Durch die pH-Senkung wird jedoch auch ein Anstieg der Stickstoffgehalte festgestellt (Tabelle 2). Tendenziell wird Stickstoff vermehrt aus dem Feststoff extrahiert bzw. in Lösung gebracht. Das Verhältnis von N-Gesamt zu $\text{NH}_4\text{-N}$ wird hingegen in die Richtung des Ammonium-Stickstoffs verschoben. Dies deutet darauf hin, dass organische N-Verbindungen ebenfalls aufgebrochen bzw. umgewandelt werden.

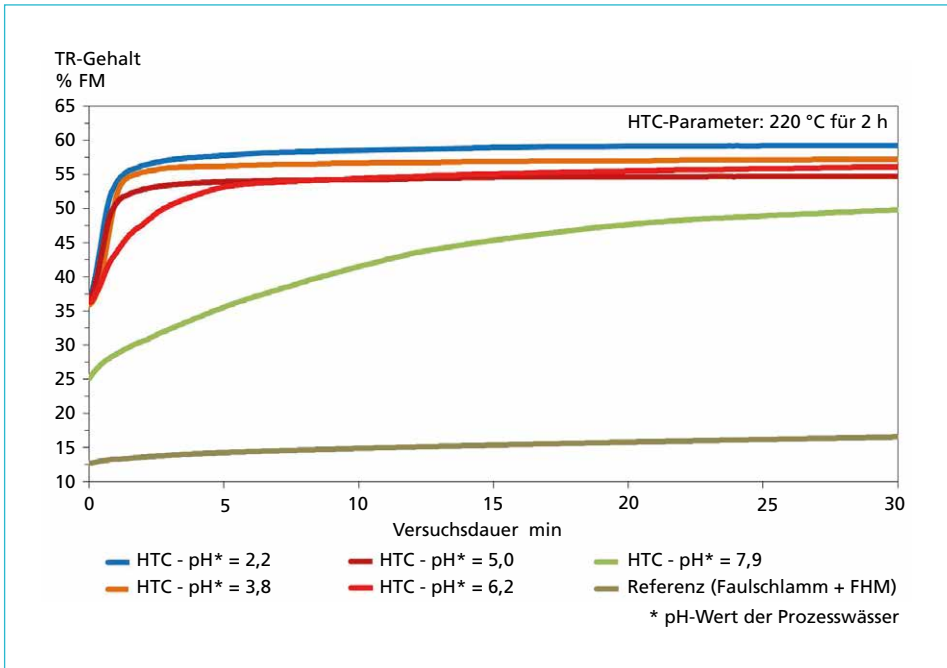


Bild 2: Exemplarische Entwässerungsverläufe (Pressdruck 15 bar) des unbehandelten Faulschlamm (Referenz), des entwässerten Klärschlamm nach der HTC (220 °C, 2 h) mit verschiedenen pH-Werten

Quelle: Blöhse, D.: Hydrothermale Karbonisierung – Nutzen dieser Konversionstechnik für die optimierte Entsorgung feuchter Massenreststoffe. Dissertation, Essen 2017, verändert

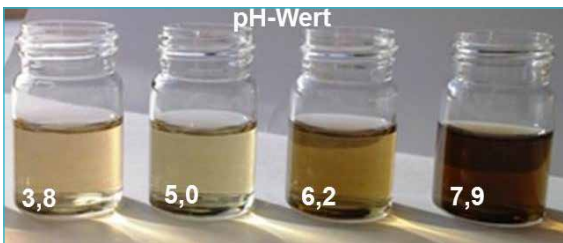


Bild 3:

Fotos der Prozesswässer (Verdünnung 1:10) nach der HTC mit verschiedenen pH-Werten

Quelle: Blöhse, D.: Hydrothermale Karbonisierung – Nutzen dieser Konversionstechnik für die optimierte Entsorgung feuchter Massenreststoffe. Dissertation, Essen 2017

Als weiteres Indiz das bei der HTC mit stark gesenktem pH-Wert komplexe und damit auch meist refraktäre PW-Inhaltsstoffe *eliminiert* werden, sind die Ergebnisse der biologischen Abbautests (Tabelle 1) anzuführen.

Tabelle 1 zeigt eine deutliche Verbesserung der CSB-Elimination mit sinkendem pH-Wert. Zudem steigt das ermittelte Methangaspotenzial bei der anaeroben Umsetzung (Tabelle 2). Im Gesamtergebnis steigt die CSB-Elimination von etwa 80 % auf etwa 90 %, wenn der pH-Wert abgesenkt wird.

Weitere Effekte werden mit der nachfolgenden Darstellung deutlich. Bild 4 zeigt, dass die Feststoffcharakteristik stark beeinflusst wird.

pH-Wert (HTC-Versuche 220 °C/2 h)	CSB-Elimination		
	anaerob* % CSB _{PW}	aerob** % CSB _{SW}	gesamt % CSB _{PW}
pH ~ 8	58 – 64	45 – 46	77 – 80
pH ~ 6	70 – 73	30 – 35	~ 81
pH ~ 4	73 – 77	53 – 55	88 – 89
pH ~ 2	76 – 77	64 – 65	~ 92

*Gärtest, **mod. Zahn-Wellens-Test, PW-Prozesswasser, SW-Schlammwasser

Quelle: Blöhs, D.: Hydrothermale Karbonisierung – Nutzen dieser Konversionstechnik für die optimierte Entsorgung feuchter Massenreststoffe. Dissertation, Essen 2017, verändert

Tabelle 1:

Ergebnisse der biologischen Abbaubarkeit (anaerob/aerob) verschiedener Prozesswässer aus HTC-Versuchen mit unterschiedlichen pH-Werten

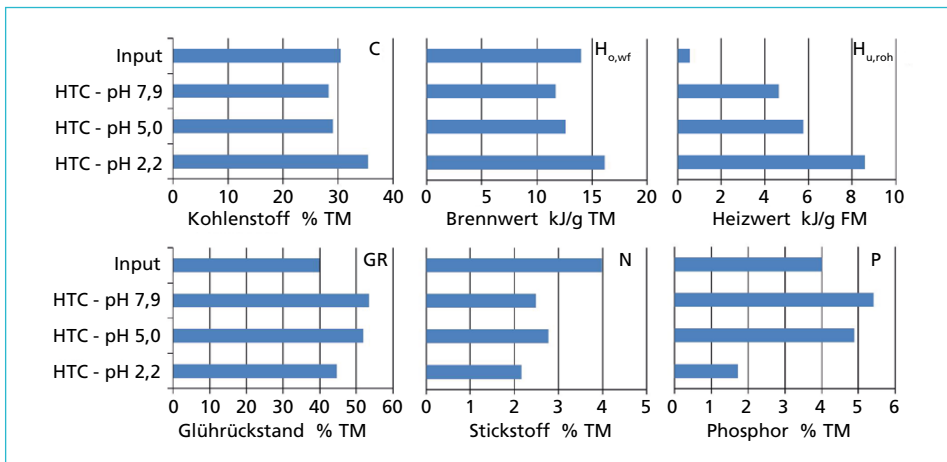


Bild 4: Exemplarische Zusammensetzung des Klärschlammes und des HTC-Feststoffproduktes aus der Karbonisierung mit verschiedenen pH-Werten

Quelle: Blöhs, D.: Hydrothermale Karbonisierung – Nutzen dieser Konversionstechnik für die optimierte Entsorgung feuchter Massenreststoffe. Dissertation, Essen 2017, verändert

Bei starker pH-Senkung bis auf pH 2 werden anorganischen Bestandteilen (Glührückstand) deutlich herabgesetzt, der Kohlenstoffgehalt sowie der Brennwert steigen im Vergleich zum Input (unbehandelter Klärschlamm). In Verbindung mit der verbesserten Entwässerung werden Heizwerte bis etwa 8 MJ/kg FM erreicht.

Im Umkehrschluss liegen viele anorganische Verbindungen in gelöster Form vor. Neben dem Stickstoff (Tabelle 2), wird bei sehr niedrigen pH-Werten (etwa 2) ein Großteil des Phosphors (> 80 %) in das PW überführt. Hierdurch liegt eine Phosphor-Entfrachtung des zu entsorgenden Feststoffs vor ($P < 2\%$ TM bei pH 2,2, Bild 4). Die untersuchten Schwermetalle verbleiben hingegen im Feststoff [1].

Bei einem pH-Wert von 2 sind 6 g P/l und etwa 6 g $\text{NH}_4\text{-N/l}$ im PW gelöst. Unter Zugabe von Magnesiumsalzen kann eine Fällung von Struvit ($\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) durchgeführt werden, was im Rahmen der Arbeit [1] jedoch nicht experimentell untersucht wurde. Die Möglichkeiten zur P-Rückgewinnung werden bei der technischen Bewertung der HTC (Abschnitt 3.2.2) jedoch berücksichtigt.

2.3.4. Zusammenfassung der Ergebnisse zur Bewertung

In Tabelle 2 werden die Untersuchungsergebnisse zusammengefasst. Im technischen Betrieb wird, aufgrund erhöhter Temperaturen ($> 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) beim Separationsschritt, eine weitere Verbesserung der Entwässerungsergebnisse um 10 bis 15 %-Punkte erwartet. Neben dem Datensatz HTC 1 (Labordaten ohne pH-Senkung), sind angepasste Datensätze (HTC 2 und HTC 3) auf Basis einer verbesserten Entwässerung im technischen Maßstab aufgeführt. Die wesentliche Veränderung der Ergebnisse bei pH-Senkung wird darüber hinaus im Datensatz HTC 3 berücksichtigt. Die aufgeführten Datensätze bilden die Grundlage der technisch-ökonomischen Bewertung.

Tabelle 2: Untersuchungsergebnisse

Bezeichnung	Einheit	HTC 1 Labordaten pH 7-8	HTC 2 technisch pH 7-8	HTC 3 technisch pH 2
Massenreduktion	% FM_{in}	69	75	85
Produktausbeute	% TM_{in}	70	68	45
TR-Gehalt	% FM	50	60*	70*
GV	% TM	45	45	55
Prozessgasanfall ($\text{CO}_2 = 98\text{ } \%$, $\text{CO} = 2\text{ } \%$)	$\text{m}^3/\text{t TM}_{\text{KS}}$	35	35	45
CSB-Fracht	$\text{kg}/\text{t TM}_{\text{KS}}$	250	272**	238**
N-Fracht	$\text{kg}/\text{t TM}_{\text{KS}}$	28	30**	52**
P-Fracht	$\text{kg}/\text{t TM}_{\text{KS}}$	0,7	0,8**	37**
anaerob CSB-Elimination	% CSB	70	70	80
CH_4 -Potenzial	$\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{t CSB}$	100	100	150

* Annahme in Anlehnung an technische Ergebnisse z.B. TerraNova: Wirtschaftlichkeit einer TerraNova Ultra Anlage auf 100.000 EW Kläranlage mit Faulung. Hg. v. TerraNova Energy GmbH, 2014; Online verfügbar unter <http://s232856347.online.de/pdf/Wirtschaftlichkeitsberechnung-TerraNova-Ultra-100.000-EW.pdf>, zuletzt geprüft am 21.09.2017

** Berechnete Werte auf Basis der technischen Entwässerung

Quelle: Blöhse, D.: Hydrothermale Karbonisierung – Nutzen dieser Konversionstechnik für die optimierte Entsorgung feuchter Massenreststoffe. Dissertation, Essen 2017, verändert

3. Technisch-ökonomische Bewertung

3.1. Bewertungsgrundlage

In Tabelle 3 sind die Basisdaten des Klärwerksbetriebs aufgeführt. Neben den Eckdaten des jährlichen Anfalls und der Charakteristik des Klärschlammes ist der ermittelte spezifische Säurebedarf (Schwefelsäure) – um einen pH-Wert von 2 zu erreichen – für die Massenbilanzierung aufgeführt.

Bezeichnung	Einheit	Wert
Klärschlamm (KS) (maschinell entwässert)	t $\text{FM}_{\text{KS}}/\text{a}$	65.000
TR-Gehalt	% FM	22
Trockenmasse	t TM/a	14.300
Wassermasse	t $\text{H}_2\text{O}/\text{a}$	50.700
Glühverlust	% TM	60
H_2SO_4 -Verbrauch bei pH-Wert = 2	t $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{t TM}_{\text{in}}$	0,4

Tabelle 3:

Basisdaten zur Bewertung
(Klärwerksbetrieb/Untersuchungsergebnisse)

Quelle: Blöhse, D.: Hydrothermale Karbonisierung – Nutzen dieser Konversionstechnik für die optimierte Entsorgung feuchter Massenreststoffe. Dissertation, Essen 2017

Tabelle 4: Energiebedarf der Prozesswasserreinigung

Bezeichnung	Einheit	spez. Energiebedarf
CSB-Elimination	kWh/kg CSB	0,6
N-Elimination	kWh/kg N	3,5
P-Elimination	kWh/kg P	0,4

Quelle: Blölse, D.: Hydrothermale Karbonisierung – Nutzen dieser Konversionstechnik für die optimierte Entsorgung feuchter Massenreststoffe. Dissertation, Essen 2017, verändert

berücksichtigt, dass die CSB-Fracht durch eine anaerobe CSB-Elimination (Annahme: Vergärung ist energetisch neutral) gemäß Tabelle 2 reduziert wird. Ferner wird eine Energieerzeugung (Strom und Wärme) durch die anaerobe Methanbildung angesetzt, wodurch eine Substitution von Primärenergie und deren Kosten in die Bewertung miteinfließt.

In der technischen Bewertung wird die HTC zunächst als Verfahren zur Massenreduktion betrachtet. Nachfolgend werden die Potenziale zur Phosphor-Rückgewinnung (HTC als Verfahren zur P-Rückgewinnung) aufgegriffen.

Von besonderer Relevanz für die technisch-ökonomische Bewertung ist die Behandlung bzw. Reinigung der PW. Der angesetzte spezifische Energiebedarf für die PW-Reinigung ist in Tabelle 4 differenziert nach relevanten Abwasserinhaltsstoffen (CSB, N und P) aufgeführt.

Für die Berechnung des spezifischen Energiebedarfs der PW-Reinigung wird

3.2. Technische Bewertung

3.2.1. Verfahren zur Massenreduktion

Auf Basis der rechtlichen Rahmenbedingungen (Novelle AbfKlärV) erfolgt die Bewertung mit der Maßgabe, dass eine landwirtschaftliche Verwertung wegfällt und phosphorhaltige Klärschlämme einer Monoverbrennung zugeführt werden. Im nachfolgenden Verfahrensvergleich (Bild 5) werden die Klärschlämme dezentral auf der Kläranlage behandelt. Die Monoverbrennung (inkl. Deponierung der Aschen) erfolgt hingegen zentral.

In Bild 5 sind die betrachteten Möglichkeiten zur Massenreduktion schematisch dargestellt. In allen Fällen findet eine mechanische Entwässerung des Faulschlamm (TR etwa 2,5 % FM) auf einen TR von 22 % statt. Als IST-Zustand werden die dezentrale Entwässerung und der Transport der gesamten entwässerten Klärschlammmasse (65.000 t FM/a) zur zentralen Klärschlammverbrennungsanlage (KVA) betrachtet. Darüber hinaus wird der Stand der Technik mit der thermischen Trocknung (Reduktion der Transport- und Entsorgungsmasse) als Volltrocknung (TR > 90 % FM) angesetzt. Bei der HTC wird nach der zusätzlichen Entwässerung zur Massenreduktion ebenfalls eine nachgeschaltete Volltrocknung (optional) zur Reduktion der Transportmasse betrachtet.

In Bild 5 sind ferner behandlungsbedürftige Nebenprodukte aufgeführt. Es handelt sich um Schlammwasser aus der ersten Entwässerungsstufe, Brüden (Abluft und Kondensat) aus der Trocknung und PW (der zweiten Entwässerung) sowie Prozessgas aus der HTC. Der mögliche Behandlungsaufwand muss bei Vergleichen berücksichtigt werden und wird in die nachfolgenden Betrachtungen einbezogen.

Zunächst werden die Verfahren der thermischen Trocknung (Stand der Technik) und der HTC verglichen. Der IST-Zustand mit Entwässerung des Faulschlammes, der in allen betrachteten Möglichkeiten zur Massenreduktion (Bild 5) implementiert ist, wird erst bei der ökonomischen Bewertung (Abschnitt 3.3) wieder in den Vergleich miteinbezogen.

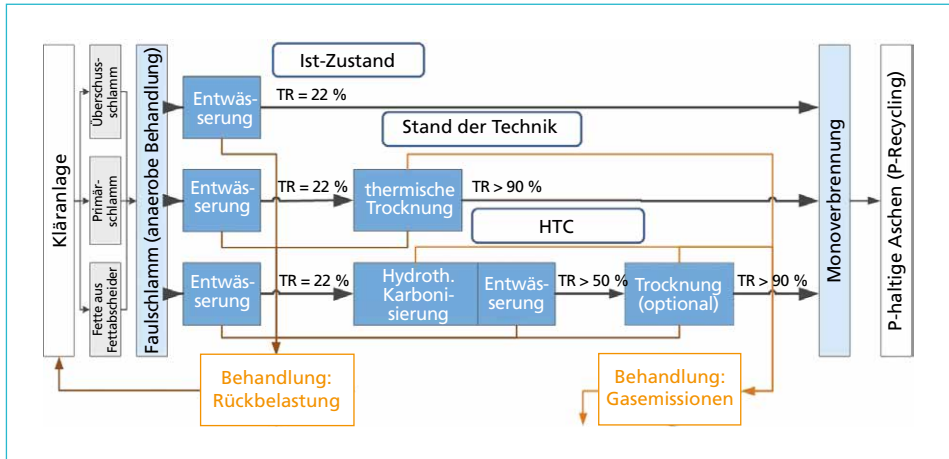


Bild 5: Übersicht der betrachteten Möglichkeiten zur Massenreduktion in einer vereinfachten Verfahrensdarstellung

Quelle: Blöhse, D.: Hydrothermale Karbonisierung – Nutzen dieser Konversionstechnik für die optimierte Entsorgung feuchter Massenreststoffe. Dissertation, Essen 2017

In Tabelle 5 sind die spezifischen Energieverbräuche der Behandlungsverfahren pro Tonne entwässerten Klärschlamm aufgeführt. Die Basis für die HTC bildet der Datensatz HTC 2 (technischer Maßstab ohne pH-Absenkung, Tabelle 2), für die Energieverbräuche der PW-Behandlung wurden die Ansätze der Tabelle 4 herangezogen.

Tabelle 5: Spezifischer Energiebedarf differenziert nach elektrischer und thermischer Energie sowie Verfahrensschritt gemäß Bild 5

Energieverbrauch	Einheit	Behandlungsverfahren	
		thermische Trocknung	Hydrothermale Karbonisierung
HTC-elektrisch	kWh _{el} /t FM _{KS}	–	34
HTC-thermisch	kWh _{th} /t FM _{KS}	–	165
HTC-Entw.-elektrisch	kWh _{el} /t FM _{KS}	–	2
Trocknung-elektrisch	kWh _{el} /t FM _{KS}	68,2	7,6*
Trocknung-thermisch	kWh _{th} /t FM _{KS}	644,5	71,9*
PW-Behandlung-elektrisch	kWh _{el} /t FM _{KS}	–	34,2
Gesamt-Energieaufwand	kWh/t FM_{KS}	712,7	314,7

*Verringerung aufgrund erheblicher Massenreduktion

Quelle: Blöhse, D.: Hydrothermale Karbonisierung – Nutzen dieser Konversionstechnik für die optimierte Entsorgung feuchter Massenreststoffe. Dissertation, Essen 2017, verändert

Der energetische Aufwand für die Behandlung der Brüden aus der thermischen Trocknung sowie die Behandlung der HTC-Prozessgase bzw. -abluft wird gleichwertig angenommen. Aufgrund dessen und wegen fehlender Datenlage wird dieser Energiebedarf bei der Betrachtung vernachlässigt.

In Bild 6 ist der spezifische Energiebedarf gemäß Tabelle 5 differenziert nach elektrischer und thermischer Energie zusammengefasst und für die beiden Verfahren *Trocknung* und *HTC* (inkl. Entwässerung und Trocknung) dargestellt. Der thermische Energieaufwand der HTC ist im Vergleich zur thermischen Trocknung wesentlich geringer [2, 5].

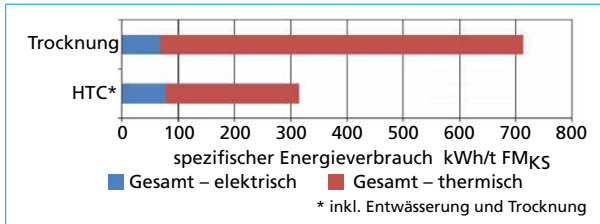


Bild 6:

Spezifischer Gesamtenergiebedarf der thermischen Trocknung und der HTC inklusive Entwässerung und Trocknung gemäß Tabelle 5

Quelle: Blöhse, D.: Hydrothermale Karbonisierung – Nutzen dieser Konversionstechnik für die optimierte Entsorgung feuchter Massenreststoffe. Dissertation, Essen 2017, verändert

Zur weiteren Bewertung werden die Entsorgungsmassen betrachtet. Ausgehend vom IST-Zustand mit einem jährlichen Anfall von 65.000 t FM/a an entwässertem Klärschlamm werden in Bild 7 die resultierenden Massen nach Behandlung mittels Trocknung und HTC (mit nachgeschalteter Trocknung, Bild 5) dargestellt. Die Ergebnisse der Massenbilanzierung werden differenziert nach Anorganik (Asche), Organik und Wasser (Restfeuchte nach Volltrocknung angesetzt mit 9 % FM bzw. TR = 91 % FM) aufgeführt. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der HTC gemäß den drei vorangestellten Datensätzen (Tabelle 2) abgebildet.

Unter der Voraussetzung, dass bei der thermischen Trocknung des entwässerten Klärschlammes (65.000 t FM/a) keine Trockenmasseverluste vorliegen, beträgt die Entsorgungsmasse in diesem Fall etwa 15.700 t/a (mit TR = 91 % FM). Bei der HTC liegen hingegen Umsetzungsverluste an Trockenmasse (Abschnitt 1) vor. Die Entsorgungsmasse bei HTC 1 und HTC 2 liegt bei etwa 11.000 t/a (mit TR = 91 % FM), was im Vergleich zur thermischen Trocknung eine Reduktion von etwa 30 % beträgt.

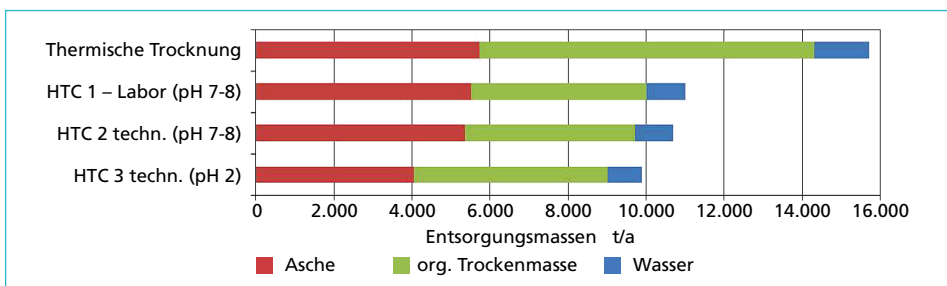


Bild 7: Darstellung der Entsorgungsmassen differenziert in Asche-, organische Trockenmasse- und Wasseranteil nach Trocknung (TR = 91 % FM)

Quelle: Blöhse, D.: Hydrothermale Karbonisierung – Nutzen dieser Konversionstechnik für die optimierte Entsorgung feuchter Massenreststoffe. Dissertation, Essen 2017

Wird die HTC im stark sauren pH-Bereich betrieben (HTC 3), erfolgt eine weitere Massenreduktion (Tabelle 2) aufgrund einer erhöhten Umsetzung der organischen sowie anorganischen Bestandteile. Die jährliche Entsorgungsmasse beträgt in diesem Fall 9.900 t/a (mit TR = 91 %). Die Entsorgungsmasse wird im Vergleich zur *Trocknung* um etwa 37 % reduziert. Ferner zeigt sich, dass die Masse an Verbrennungsasche um etwa 30 % herabgesetzt wird.

Neben der erheblichen Verbesserung des Entwässerungsverhaltens (Bild 2), bieten die aufgeführten Punkte beim Ansatz (HTC 3) mit pH-Senkung eine potenzielle Kostensenkung (Auslegung der Entwässerung, Trocknungsenergie, Transport zur KVA und Kosten der Aschen-Deponierung). Daneben muss beachtet werden, dass u.a. ein hoher Bedarf an Mineralsäure zur pH-Senkung vorliegt (Tabelle 2). Dies wird nachfolgend bei der Bewertung der HTC als Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung berücksichtigt.

3.2.2. Verfahren zur P-Rückgewinnung

Wird der HTC-Prozess im stark sauren pH-Wert-Bereich betrieben, wird ein Großteil des im Klärschlamm gebundenen Phosphors (etwa 85 % P_{in}) in die flüssige Phase überführt (sog. Auslaugung oder Leaching).

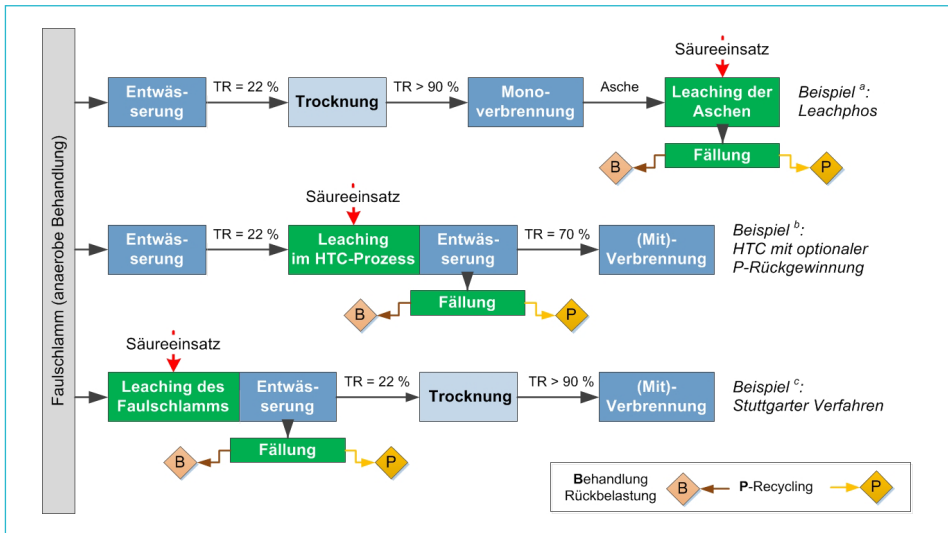


Bild 8: Beispiele für die Phosphor-Rückgewinnungsmöglichkeiten unter Einsatz von Säuren zur Auslaugung/Leaching des Phosphors

Quellen: Blöhse, D.: Hydrothermale Karbonisierung – Nutzen dieser Konversionstechnik für die optimierte Entsorgung feuchter Massenreststoffe. Dissertation, Essen 2017, verändert

Beispiel a: Stemann, J.; Kabbe, C.; Adam, C.: Phosphorrückgewinnung im Rahmen der Klärschlammbehandlung – das EU-Projekt P-REX. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 11. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014, S. 749-764

Beispiel b: TerraNova: Wirtschaftlichkeit einer TerraNova Ultra Anlage auf 100.000 EW Kläranlage mit Faulung. Hg. v. TerraNova Energy GmbH, 2014; Online verfügbar unter <http://s232856347.online.de/pdf/Wirtschaftlichkeitsberechnung-TerraNova-Ultra-100.000-EW.pdf>, zuletzt geprüft am 21.09.2017

Beispiel c: Montag, D.; Everding, W.; Malms, S.; Pinnekamp, J.: Zukunft der Klärschlamm Entsorgung und Phosphorrückgewinnung. In: gwf-Wasser/Abwasser (11), 2015, S. 1122-1131

In Bild 8 sind neben der HTC weitere Beispiele für Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung schematisch dargestellt, die mit dem gleichen Prinzip des Säureaufschlusses (Auslaugung/Leaching) arbeiten. Hierbei wird der Phosphor ebenfalls mit hochkonzentrierter Schwefelsäure aus Verbrennungssasche des Klärschlammes (z.B. Leachphos) oder bereits im Faulschlamm vor der Entwässerung (z.B. Stuttgarter Verfahren) in Lösung gebracht.

Die dargestellten nass-chemischen Ansätze zur Phosphor-Rückgewinnung (Bild 8) benötigen relativ große Mengen an Chemikalien [8] und folgen alle dem gleichen Prinzip:

- Auslaugung mit Mineralsäuren (Zugabe von Säure)
- pH-Wert-Anhebung (Zugabe von Laugen)
- Ausfällung der Phosphate (Zugabe von Calcium- oder Magnesiumsalzen)

Bei der Auslaugung kommt es auch zur Lösung von Schwermetallen, die eine weitere Produktaufbereitung oder vorherige Abscheidung notwendig macht [4]. Dies kann zu einem zusätzlichen Chemikalienbedarf führen.

Tabelle 6 zeigt den ermittelten Säurebedarf der HTC im Vergleich mit den anderen Verfahren auf. Da nur die Potenziale der P-Rücklösung und nicht die nachgeschaltete Produktgewinnung im Rahmen der Arbeit betrachtet werden konnte, sind die Angaben mit einem *größer/kleiner als Zeichen* angegeben.

Tabelle 6: pH-Wert der Rücklösung, spezifischer Säureverbrauch und die P-Rückgewinnungsquote der Verfahren gemäß Bild 8

Verfahren	pH-Wert	spez. Säurebedarf kg H ₂ SO ₄ /kg P _{recy}	Rückgewinnungsquote % P _{in}
Leachphos	3 ²	5,6 ³	70 ³ – 88 ¹ % P _{in}
Auslaugung HTC	~ 2	> 12,0	< 85 % P _{in}
Stuttgarter Verfahren	4 – 5 ³	11,9 ³	38 – 50 ² (45 ³) % P _{in}

¹ Kraus, F.; Kabbe, C.; Remy, C.; Lejean, B.: Phosphorrecycling aus Klärschlamm in Deutschland. Eine Abschätzung von Kosten und Umweltauswirkungen. In: KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 63 (6), 2016, S. 528-537.

² Zettl, U.; Soncourt, M.: Phosphorrückgewinnung – Machbarkeits- und Wirtschaftlichkeitsstudie. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft. Weber-Ingenieure GmbH. Pforzheim, 2015; Online verfügbar unter https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Umwelt/Machbarkeitsstudie_Phosphorrueckgewinnung_Klaeranlage_Reutlingen.pdf, zuletzt geprüft am 21.09.2017.

³ P-REX: Technical Factsheet – Leachphos(R)Ash leaching. Hg. v. P-REX.eu, 2015; Online verfügbar unter http://p-rex.eu/uploads/media/PREX_Factsheet_LEACHPHOS.pdf, zuletzt geprüft am 21.09.2017

Quelle: Blöhsse, D.: Hydrothermale Karbonisierung – Nutzen dieser Konversionstechnik für die optimierte Entsorgung feuchter Massenreststoffe. Dissertation, Essen 2017, verändert

Bei Verfahren zur Auslaugung des Phosphors aus der Verbrennungssasche ist der Säurebedarf (aufgrund geringerer NH₄ und Carbonat-Anteile) geringer und die Rückgewinnungsquote [8] meist höher. Als P-Recyclat wird jedoch (aufgrund fehlender NH₄-Anteile) ein Ca-Phosphat erzeugt. Dies kann als Nachteil zu den Verfahren mit Struvit-Produktion (NH₄MgPO₄) gesehen werden, da Mg-Phosphate eine bessere P-Verfügbarkeit für Pflanzen aufweist [13]. Ein weiterer nachteiliger Aspekt ist, dass Stickstoff durch den Verbrennungsprozess verloren geht und durch z.B. energieintensive Mineraldüngerproduktion substituiert werden muss [8].

Beim Stuttgarter Verfahren sind die Rückgewinnungsquoten (Tabelle 6) bei vergleichsweise hohem Säureeinsatz wesentlich niedriger. Wird der pH-Wert auf < 3 herabgesetzt, können auch höhere Auslaugungsraten erreicht werden [7]. Es musste jedoch festgestellt werden, dass die nachfolgende Entwässerung dann negativ beeinflusst wird [7].

Die P-Rücklösung bei der sauren HTC liegt in einem hohen Bereich und die Feststoffabtrennung durch Entwässerung ist als hervorragend einzustufen. Der ermittelte Säurebedarf bei der HTC ist jedoch ebenfalls hoch. Darüber hinaus fehlen Untersuchungsergebnisse für den Schritt der Phosphatfällung (Ermittlung der Rückgewinnungsquote).

Es sind weitere F&E-Anstrengungen notwendig, um die Möglichkeiten zur P-Rückgewinnung durch die saure HTC abschließend technisch zu bewerten. Folgende Punkte stellen jedoch einen positiven Verlauf weiterer Arbeiten in Aussicht:

- Die Kreislaufführung der entstehenden sauren PW kann den Säurebedarf senken.
- Die Struvitfällung aus HTC-PW erfolgt bereits bei niedrigen pH-Werten (etwa 7), statt wie üblich bei pH 8 und höher [6]. Dies senkt den Chemikalienbedarf für die pH-Wert-Anhebung.
- Die Untersuchungen zeigen, dass nur eine geringfügige Rücklösung der Schwermetalle stattfindet. Damit können aufwendige Schritte zur Produktreinigung ggf. wegfallen.
- Die HTC-Versuche mit pH-Senkung wurden lediglich bei 220 °C für zwei Stunden durchgeführt. In weiteren Untersuchungen ist eine Optimierung dieser Prozessparameter (geringere Temperaturen und Reaktionsdauer) möglich.

Folgende Untersuchungsergebnisse geben wesentliche Impulse, die Weiterentwicklung dieses sauren HTC-Ansatzes anzustreben:

- Die Entwässerungseigenschaften der behandelten Klärschlämme verbessern sich erheblich, wenn eine pH-Senkung bei der HTC erfolgt. Dies verringert den apparativen und energetischen Aufwand für diesen Verfahrensschritt.
- Die spezifische CSB-Fracht wird herabgesetzt und die biologische CSB-Elimination wesentlich gesteigert. Refraktäre CSB-Anteile werden scheinbar eliminiert und es liegt eine erhöhte spezifische Methangasproduktion bei anaerober Behandlung der PW vor.

Als wesentlicher Nachteil sind die hohen Schwefelgehalte in den Produktphasen (fest und flüssig) anzusehen. Deren Auswirkungen und eine mögliche Handhabung bzw. geeignete Gegenmaßnahmen (z.B. Sulfatfällung) sollten in zukünftigen Arbeiten Berücksichtigung finden und müssen in die Bewertung einbezogen werden. In Tabelle 7 sind, neben den oben aufgezeigten Vorteilen, die möglichen Nachteile dargestellt.

Die aufgeführten Punkte geben Potenziale sowie weiterführende Fragestellungen für zukünftige Arbeiten. Die Untersuchungsergebnisse zeigen lediglich die Möglichkeit zur P-Rücklösung für eine potenzielle Rückgewinnung auf, lassen jedoch noch keine abschließende Bewertung zu.

Auf die Möglichkeit der P-Rückgewinnung bei der HTC wird deshalb bei der nachfolgenden ökonomischen Bewertung nicht eingegangen. Eine wirtschaftliche P-Rückgewinnung aus Klärschlamm ist zum aktuellen Entwicklungszeitpunkt (keine Erfahrungen im großtechnischen Dauerbetrieb und noch kein gesicherter Markteintritt für P-Recyclat) auch bei anderen Verfahren meist nicht abschließend zu bewerten.

Tabelle 7: Übersicht der möglichen Vor- und Nachteile einer sauren HTC mit integrierter Phosphor-Rückgewinnung

Vorteil	Nachteil
Rüchlösung von Phosphor zur Struvitfällung	Hoher Säurebedarf zur Phosphor Rücklösung
Erhebliche verbesserte Entwässerung bei niedrigen pH-Werten	Laugenbedarf zur pH-Wert Anhebung (Neutralisation und Fällung)
Erhebliche Massenreduktion des Feststoffproduktes zur Entsorgung	Schwefelgehalt im Prozesswasser → Chemikalienbedarf zur pH-Wert Anhebung und Sulfatfällung
Reduktion der Masse an Verbrennungssasche zur Deponierung	Schwefelgehalt im Feststoff → erhöhte Anforderungen und Chemikalienbedarf in der Abgasreinigung
Bei P-Gehalten von < 2 % TM im Feststoffprodukt zukünftige Option für weitere <i>Mitverbrennung</i>	Stoffe zur Entsorgung → weitere Fällprodukte aus dem Abwasser und den Rückständen der Abgasreinigung
Mögliche Schwermetallkomplexierung am Feststoffprodukt → keine Rücklösung	Hoher technischer Aufwand durch viele Verfahrensschritte
Verbesserte biologische Abbaubarkeit durch Oxidation refraktärer PW-Inhaltsstoffe	Auslegung der Aggregate (Entwässerung, Trocknung, Verbrennung) → Säurebeständig (niedriger pH-Wert)
Methangaspotenzial bei anaerober Behandlung der PW-Inhaltsstoffe steigt	Personalqualifikation Arbeitsschutz (Hochtemperatur und -druck, Gefahrstoffhandhabung)
Optimierungspotenzial durch PW-Kreislaufführung (z.B. Herabsetzen des Säurebedarfs)	Erhöhte Anforderung an den Umweltschutz (Einsatz wassergefährdende Stoffe)

Quelle: Blöhe, D.: Hydrothermale Karbonisierung – Nutzen dieser Konversionstechnik für die optimierte Entsorgung feuchter Massenreststoffe. Dissertation, Essen 2017

3.3. Ökonomische Bewertung

3.3.1. Herangehensweise

Für eine ökonomische Einordnung der HTC werden die drei Beispiele in Bild 5 betrachtet und miteinander verglichen. Zunächst werden die Kosten für absehbare Aufwendungen (Energie Tabelle 5 sowie Transport und Entsorgung) erfasst und gegenübergestellt. Daraufhin erfolgt eine dynamische Kostenvergleichsrechnung (KVR). Hierbei werden die schwer abschätzbaren Kosten für Investition, Personal und sonstige Betriebsmittel einbezogen.

3.3.2. Kostenschätzung

Die absehbaren Aufwendungen setzen sich aus folgenden Punkten zusammen:

- Energieverbrauch (thermisch und elektrisch)
- Transport zur Klärschlammverbrennungsanlage (KVA)
- Annahme- bzw. Entsorgungskosten pro Tonne an der KVA

Die grundlegenden Kostensätze sind in Tabelle 8 aufgeführt. Als Entfernung zur Verbrennungsanlage (KVA) werden pauschal 150 km (Strecke hin/rück: 300 km) angesetzt. Die Entsorgungskosten an der KVA werden mit 40 EUR pro Tonne Klärschlamm (unabhängig vom Zustand) veranschlagt. Damit werden in allen Betrachtungen die Kosten für Transport und Entsorgung gleich gesetzt.

Aufwendung	Einheit	spezifische Kosten
Energie – elektrisch	EUR/MWh _{el}	175
Energie – thermisch	EUR/MWh _{th}	30
Transport zur KVA	EUR/(t FM • km)	0,06
Verwertung KVA	EUR/t FM	40

Tabelle 8:

Spezifische Kostensätze für die Aufwendungen

KVA – Klärschlammverbrennungsanlage

Quelle: Blöhse, D.: Hydrothermale Karbonisierung – Nutzen dieser Konversionstechnik für die optimierte Entsorgung feuchter Massenreststoffe. Dissertation, Essen 2017, verändert

Über die jeweilig anfallenden Entsorgungsmassen sowie des zugrunde gelegten spezifischen Energiebedarfs (Tabelle 5) werden die Positionen mit den Kostensätzen (Tabelle 8) monetär belegt. In Bild 9 sind die Ergebnisse dargestellt.

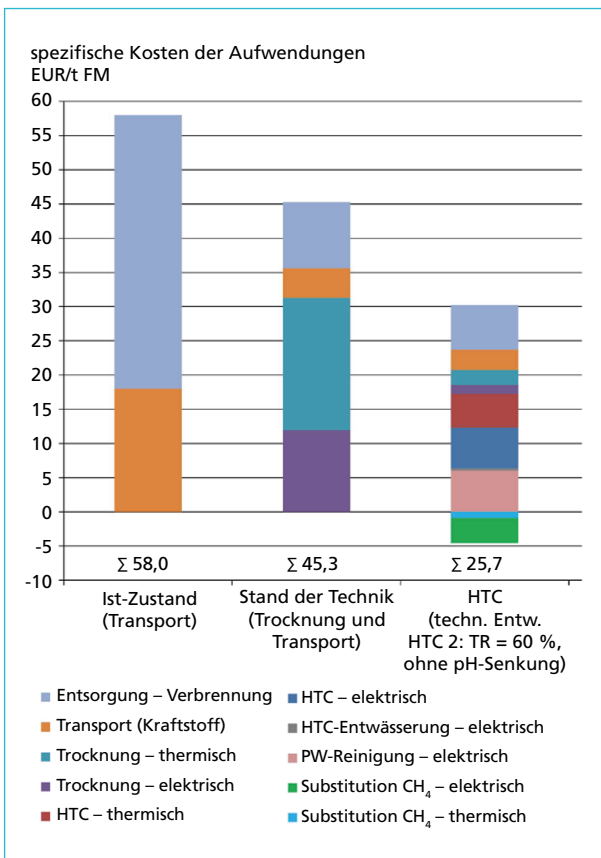


Bild 9:

Spezifische Kosten der ermittelten Aufwendungen für Energie, Transport und Entsorgung

Quelle: Blöhse, D.: Hydrothermale Karbonisierung – Nutzen dieser Konversionstechnik für die optimierte Entsorgung feuchter Massenreststoffe. Dissertation, Essen 2017, verändert

Auf Basis der getroffenen Annahmen liegen die Kosten des IST-Zustandes mit Transport- und Entsorgungskosten bei 58 EUR pro Tonne entwässerten Klärschlamm. Für die thermische Trocknung (Stand der Technik) der gesamten entwässerten Klärschlamm-masse (65.000 t FM/a), fallen spezifische Kosten von etwa 45 EUR/t FM an (inkl. Transport und Entsorgung). Die HTC benötigt im Vergleich dazu etwa 26 EUR/t FM.

Die aufgeführte Kostenhöhe der Beispiele verändert sich durch Variation der getroffenen Annahmen. Folgende Punkte führen in *allen* betrachteten Fällen zu einer Kostenreduktion:

- Verringerung der Energiekosten (Primärenergie) durch den Ansatz der Wärmenutzung
- Herabsetzen der Transportkosten durch geringere Entfernung und/oder keine Leerfahrten
- Variation der Entsorgungspreise bei der Monoverbrennung in der KVA (Vertragsmodalitäten)

An der Kostenstruktur (Bild 9) wird deutlich, dass insbesondere durch den geringeren Energiebedarf und die Reduktion der Entsorgungsmasse (Abschnitt 3.2.1) die spezifischen Kosten – trotz zusätzlicher Aufwendungen der PW-Reinigung – bei der HTC niedriger ausfallen. Zur weiteren Bewertung erfolgt eine dynamische KVR.

3.3.3. Kostenvergleich

Um die wesentlich komplexere Anlagentechnik der HTC (inkl. der PW-Reinigung) zu berücksichtigen, werden folgende schwer abschätzbare Kostenpunkte hinzugezogen:

- Investitionskosten der benötigten Anlagenkomponenten
- Personalbedarf zum Betrieb der Anlagen
- Betriebsmittelverbrauch und sonstige Nebenkosten

Die hierfür getroffenen Annahmen sind in Tabelle 9 zusammenfassend aufgeführt. Nähere Details zu den Investitionsannahmen können [1] entnommen werden. Für die oben dargestellten Aufwendungen (Energie, Transport und Entsorgung) werden die spezifischen Kosten aus Bild 9 als laufende Kosten in der Berechnung berücksichtigt.

Die dynamische KVR erfolgt gemäß KVR-Leitlinien der DVGW und DWA [3]. Als Betrachtungszeitraum werden 30 Jahre angesetzt. Die betrachteten Investitionssummen werden pauschal in 70 % Verfahrenstechnik (AfA = 15 a), 20 % Bautechnik (AfA = 30 a) und 10 % E-MSR-Technik (AfA = 10 a) aufgeteilt und mit entsprechenden Reinvestitionen belegt. Als Preissteigerung werden 2 % (laufende Kosten) bzw. 1 % (Reinvestition) zu Grunde gelegt. Der Realzins beträgt 3 %.

Für die HTC werden zwei Annahmen für die Investitionssumme gewählt. In der kostengünstigeren Variante (Best Case) werden 12 Millionen EUR und in einer kostenintensiven (Worst Case) Variante 20 Millionen EUR angesetzt (Tabelle 9). Die Investitionssummen beinhalten alle benötigten Anlagenteile der notwendigen Verfahrensschritte (HTC, zusätzliche Entwässerung, Trocknung und PW-Reinigung). Die angeführten sonstigen Betriebsmittel sind pauschal mit zusätzlichen 2,5 % der Investitionssumme angesetzt. Der Personalbedarf für die HTC wird mit 6 Mitarbeitern á 50.000 EUR/(MA · a) angenommen.

Die Ergebnisse der dynamischen KVR sind in der Tabelle 9 zusammengefasst. Detaillierte Berechnungsergebnisse sowie die Betrachtung unterschiedlicher Ansätze für den Energieverbrauch der PW-Reinigung können [1] entnommen werden.

Tabelle 9: Ergebnisse der Kostenvergleichsrechnung zur ökonomischen Abschätzung der betrachteten Vergleiche gemäß Bild 5

Bezeichnung		Annahmen	Ergebnis
IST-Zustand Transport/Entsorgung	Investition: Betriebsmittel: Personal:	keine keine keine	76,6 EUR/t
Stand der Technik Trocknung/Transport/Entsorgung	Investition: Betriebsmittel: Personal:	5 Mio. EUR keine keine	69,6 EUR/t
Hydrothermale Karbonisierung Entwässerung/Trocknung Transport/Entsorgung	Investition: Betriebsmittel: Personal:	12 Mio. EUR (Best Case) 2,5 % v. Invest. 6 MA*	69,7 EUR/t
Hydrothermale Karbonisierung Entwässerung/Trocknung Transport/Entsorgung	Investition: Betriebsmittel: Personal:	20 Mio. EUR (Worst Case) 2,5 % v. Invest. 6 MA*	89,4 EUR/t

*MA = 50.000 EUR/a

Quelle: Blöhse, D.: Hydrothermale Karbonisierung – Nutzen dieser Konversionstechnik für die optimierte Entsorgung feuchter Massenreststoffe. Dissertation, Essen 2017, verändert

Das Berechnungsbeispiel für die HTC basiert auf dem Datensatz HTC 2 (technischer Maßstab ohne pH-Absenkung, Tabelle 2). Die ermittelten Gesamtkosten für die Entsorgung einer Tonne entwässerten Klärschlamm liegen in diesem Beispiel zwischen 69,70 und 89,40 EUR (Tabelle 9).

Für den Einsatz der thermischen Trocknung (Stand der Technik) werden als Investitionssumme pauschal 5 Millionen EUR angesetzt. Um den Vergleich für die HTC konservativ zu gestalten, bleiben sonstige Betriebsmittel und der Personalbedarf bei der thermischen Trocknung unberücksichtigt (Tabelle 9). Die spezifischen Gesamtkosten für die Entsorgung einer Tonne entwässerten Klärschlamm belaufen sich in diesem Fall auf 69,60 EUR.

Der IST-Zustand wird in den Vergleich einbezogen, indem die ermittelten Kosten für Transport und Entsorgung (Bild 9) ebenfalls in der KVR als laufende Kosten mit den gleichen kalkulatorischen Vorgaben berücksichtigt werden. Die Gesamtkosten für Transport und Entsorgung einer Tonne des entwässerten Klärschlammes liegen dann bei 76,60 EUR.

Diese ökonomische Einordnung der HTC im Vergleich zur thermischen Trocknung der Gesamtmasse des entwässerten Klärschlammes zeigt, dass auf Basis der durchgeführten Kostenrechnung die spezifischen Entsorgungskosten in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Es wird aber auch deutlich, dass die Kosten der HTC bei kostenintensiven Investitionen (hier z.B. 20 Millionen EUR) die dargestellten Vergleichskosten überschreiten.

Im Vergleich mit Angaben aus der Literatur, die durchschnittliche Entsorgungskosten von etwa 100 EUR/t FM_{KS} [9] darlegen, ist die HTC auch mit den angesetzten konservativen Annahmen noch wirtschaftlich darstellbar.

Die Belastbarkeit der verwendeten Kostendaten ist eingeschränkt. Aufgrund unberücksichtigter Aufwendungen u.a. zur Abluftbehandlung bei Trocknung und HTC (Abschnitt 3.2.1) stellen die Ergebnisse auch keine abschließende Betrachtung dar. Die Ergebnisse sollten deshalb nur zur ökonomischen Einordnung der HTC als Baustein in der Klärschlammbehandlung dienen.

Die berechneten Ergebnisse legen nahe, dass bei der Behandlung von Klärschlamm mittels HTC eine ökonomische Machbarkeit – insbesondere im Vergleich mit den genannten Durchschnittskosten der Literatur – realistisch erscheint.

4. Kurzfassung und Ausblick

Die Hydrothermale Karbonisierung (HTC) kann bei stetiger Weiterentwicklung einen Beitrag zur künftigen Klärschlammentsorgung leisten. Aufgrund der verbesserten Entwässerungseigenschaften wird eine Massenreduktion von > 70 % FM erreicht. Die Kosten für Transport und Entsorgung lassen sich dadurch, bei vergleichsweise niedrigem Energiebedarf, reduzieren. Eine Reinigung der entstehenden Prozesswässer (PW) zur Einhaltung betrieblicher und gesetzlicher Rahmenbedingungen (Emissionsgrenzwerte) bleibt jedoch als Herausforderung bestehen. Zukünftige Entwicklungen müssen hierfür ganzheitliche und betriebssichere Konzepte hervorbringen, die einer ökonomischen Machbarkeit nicht entgegenstehen.

Die Möglichkeit durch Absenkung des pH-Wertes im HTC-Prozess eine Rücklösung von Phosphor (> 80 %) zu erreichen, stellt vor dem Hintergrund der neuen Anforderungen (Pflicht zur P-Rückgewinnung gemäß Novelle AbfklärV) eine neue Option dar. Darüber hinaus sind weitere Vorteile einer *sauren* HTC als Impuls zur Weiterentwicklung in diesem Beitrag aufgeführt. Die umfassende Darstellung der Potenziale, der möglichen Nachteile und der daraus folgenden offenen Fragen soll eine zielführende Entwicklung stützen.

5. Quellen

- [1] Blöhse, D.: Hydrothermale Karbonisierung – Nutzen dieser Konversionstechnik für die optimierte Entsorgung feuchter Massenreststoffe. Dissertation, Essen 2017
- [2] Buttman, M.: Klimafreundliche Kohle durch Hydrothermale Karbonisierung von Biomasse. In: Chemie Ingenieur Technik 83 (11), 2011, S. 1890-1896
- [3] DWA: Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien). 8. überarb. Aufl. Hennef: DWA, 2012
- [4] DWA KEK-1.4: Verfahren und Trends in der Thermischen Klärschlammbehandlung – Teil 2. In: KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 63 (8), 2016, S. 691-696; KRAUS U.A. 2015
- [5] Escala, M.; Zumbühl, T.; Koller, C.; Junge, R.; Krebs, R.: Hydrothermal Carbonization as an Energy-Efficient Alternative to Established Drying Technologies for Sewage Sludge: A Feasibility Study on a Laboratory Scale. In: Energy Fuels 27 (1), 2013, S. 454-460; DOI: 10.1021/ef3015266
- [6] Fettig, J.; Liebe, H.; Austermann-Haun, U.; Meier, J. F.: Verwertung des Prozesswassers aus der hydrothermalen Carbonisierung von organischen Abfällen. Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem AZ: 27760 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (unveröffentlicht). Hochschule Ostwestfalen-Lippe. Höxter, 2013
- [7] iat: Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm – Machbarkeitsstudie. Unter Mitarbeit von Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft (ISWA). Hg. v. DWA – Baden-Württemberg. SEG – Stadtentwässerung Göppingen, iat – Ingenieurberatung GmbH, 2014; Online verfügbar unter http://www.dwa-bw.de/tl_files/_media/content/PDFs/LV_Baden-Wuerttemberg/Homepage/BW-Dokumente/Homepage%202013/Service/Fachdatenbank/Machbarkeitsstudie_Rueckgewinnung_von_Phosphor_aus_Klaerschlamm.pdf, zuletzt geprüft am 21.09.2017

- [8] Kraus, F.; Kabbe, C.; Remy, C.; Lejean, B.: Phosphorrecycling aus Klärschlamm in Deutschland. Eine Abschätzung von Kosten und Umweltauswirkungen. In: KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 63 (6), 2016, S. 528-537
- [9] Montag, D.; Everding, W.; Malms, S.; Pinnekamp, J.; Reinhardt, J.; Fehrenbach, H.: Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphorrückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz. TEXTE 98/2015. Forschungskennzahl 3713 26 301, UBA-FB 002120. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA), 2015; Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_98_2015_bewertung_konkreter_massnahmen_einer_weitergehenden_phosphorrueckgewinnung.pdf, zuletzt geprüft am 21.09.2017
- [10] Montag, D.; Everding, W.; Malms, S.; Pinnekamp, J.: Zukunft der Klärschlamm Entsorgung und Phosphorrückgewinnung. In: gwf-Wasser/Abwasser (11), 2015, S. 1122-1131
- [11] P-REX: Technical Factsheet – Leachphos(R)Ash leaching. Hg. v. P-REX.eu, 2015; Online verfügbar unter http://p-rex.eu/uploads/media/PREX_Factsheet_LEACHPHOS.pdf, zuletzt geprüft am 21.09.2017
- [12] Quicker, P.; Weber, K. (Hg.): Biokohle – Herstellung, Eigenschaften und Verwendung von Biomassekarbonisaten. Wiesbaden: Springer-Fachmedien, 2016
- [13] Römer, W.: Phosphor-Düngewirkung von P-Recyclingprodukten. In: KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 60 (3), 2013, S. 202-215
- [14] Stemann, J.; Kabbe, C.; Adam, C.: Phosphorrückgewinnung im Rahmen der Klärschlammbehandlung – das EU-Projekt P-REX. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 11. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014, S. 749-764
- [15] TerraNova: Wirtschaftlichkeit einer TerraNova Ultra Anlage auf 100.000 EW Kläranlage mit Faulung. Hg. v. TerraNova Energy GmbH, 2014; Online verfügbar unter <http://s232856347.online.de/pdf/Wirtschaftlichkeitsberechnung-TerraNova-Ultra-100.000-EW.pdf>, zuletzt geprüft am 21.09.2017
- [16] VDI 3933:2017-09 – Entwurf: Emissionsminderung – Erzeugung von Biomassekarbonisaten, Beuth Verlag GmbH (ICS 13.040.40), Berlin 2017
- [17] Zettl, U.; Soncourt, M.: Phosphorrückgewinnung – Machbarkeits- und Wirtschaftlichkeitsstudie. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft. Weber-Ingenieure GmbH. Pforzheim, 2015; Online verfügbar unter https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Umwelt/Machbarkeitsstudie_Phosphorrueckgewinnung_Klaeranlage_Reutlingen.pdf, zuletzt geprüft am 21.09.2017