

Die Abwasserentsorgung als Kohlenstoffsенке?

Die Hydrothermale Karbonisierung

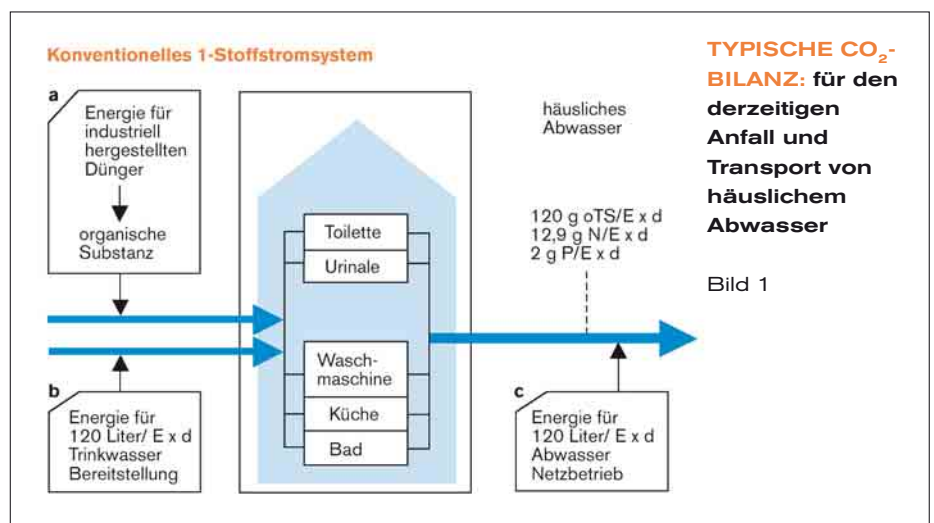
Ulf RAKELMANN, Thomas WERNER; Zhiqiang LI; Henning SCHONLAU; Thomas GIESE; Kim AUGUSTIN; Christian GÜNNER

Hydrothermale Karbonisierung: Die stoffliche Abwasserverwertung bietet der Entsorgungswirtschaft eine neue Perspektive.

Auch die Effizienz städtischer Entsorgungssysteme steht durch die globalen Herausforderungen des Klimawandels auf dem Prüfstand. Statt, dass durch zunehmend komplexer werdende Abwasserentsorgungssysteme immer mehr CO₂ emittiert wird, können innovative Verfahren einen Beitrag zu einer Kohlenstoff-Sequestrierung in Böden leisten. In diesem Zusammenhang wird von HAMBURG WASSER das Verfahren der Hydrothermalen Karbonisierung vorgestellt. Die HTC ist in die Entsorgung städtischer Teilstoffströme integrierbar. Das Karbonisierungsverfahren zur Erzeugung von Kohlepartikeln aus feuchter Biomasse, kann die Rückgewinnung von Nährstoffen aus Abwasser einbeziehen. Es besteht die begründete Hoffnung, dass auch die Eliminierung von Medikamentenrückständen ohne energetischen Mehraufwand ein Bestandteil des HTC-Prozesses werden kann. Die vorrangige Zielsetzung der Stadthygiene beim Umgang mit Abwasser und Abfällen bleibt dabei uneingeschränkt gewährleistet, denn die Produkte des HTC-Prozesses sind steril. Insgesamt bekommt die stoffliche Abwasserverwertung durch das HTC-Verfahren eine neue Perspektive, was anhand eines Vergleichs von CO₂-Emissionen gezeigt wird.

1. Suche nach alternativen Prozessen

Technische Wertschöpfungsprozesse sind in der Regel mit Kohlendioxidemissionen verbunden. Da diese derzeit überwiegend aus der Nutzung begrenzter Vorkommen von fossilen Energieträgern herrühren und insofern unmittelbar zum Klimawandel beitragen, sind sie ein Indikator für einen Mangel an Nachhaltigkeit. Auch die häusliche Abwasserentsorgung, welche seit Generationen in industrialisierten Ländern verantwortungsvoll vor allem die Stadthygiene ge-



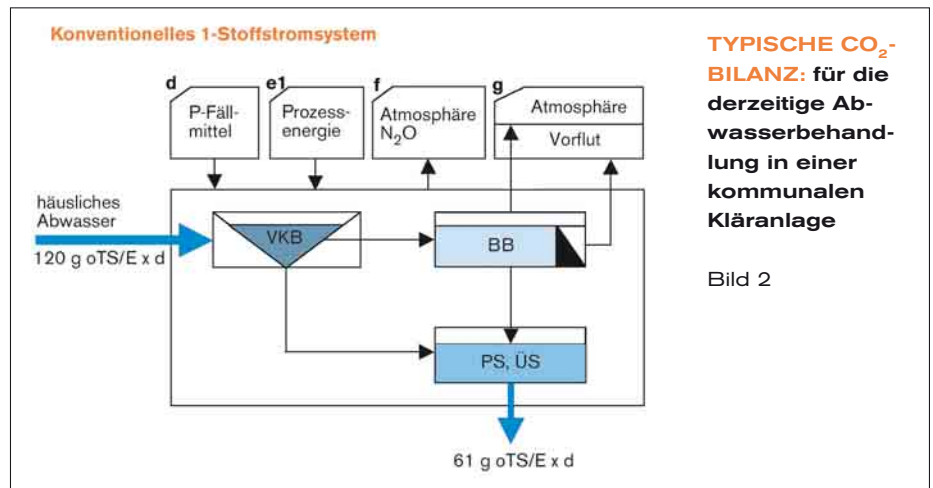
währleistet, ist heute immer noch ein klimarelevanter Prozess. Daran ändert auch das Ziel nichts, Umweltbelastungen durch Systemveränderungen weitestgehend zu vermeiden, denn die Restemissionen erweisen sich als systembedingt. Beim gegenwärtigen Entsorgungsprozess werden aus Gründen des Gewässerschutzes mit erheblichem Aufwand zielgerichtet Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorverbindungen zu großen Teilen aus dem Abwasser entfernt. Direkt, wie indirekt resultieren hieraus beträchtliche klimarelevante Emissionen. Der heutige Stellenwert des Kohlenstoffs in der konventionellen Abwasserentsorgungsbilanz gibt deshalb Anlass an alternativen Entsorgungssystemen zu arbeiten. Hamburg Wasser hat für Innovationen in städtischen Entsorgungsinfrastrukturen eine eigene Entwicklungsplattform, den HAMBURG WATER Cycle® geschaffen /1/. Ziel von Weiter- und Neuentwicklungen ist die intelligente Integration von örtlich angepassten Infrastrukturelementen oder die Errichtung eigenständiger Sanitärsysteme in urbanen Räumen, um den bisherigen Ressourcenbedarf in der Ver- und Entsor-

gungswirtschaft ohne Verlust an Naturschutzstandards und Sanitärkomfort zu minimieren. Die Reduktion von Emissionen und der vermehrte Einsatz von kohlendioxidneutralen Energieträgern durch Weiterentwicklungen des häuslichen Abwasserentsorgungssystems sind deshalb nicht nur eine essentielle Zielsetzung, sondern auch ein wichtiger Indikator zur Erreichung von Nachhaltigkeitszielen. Im nachfolgenden Artikel wird zunächst eine, für einen grundlegenden Systemvergleich zweckdienliche CO₂-Bilanz der konventionellen städtischen Abwasserentsorgung für die Betriebsphase aufgestellt, welche die verursachenden Parameter Kohlenstoff und die Nährstoffe Stickstoff und Phosphor einschließt. Im Anschluss wird ein Verfahren vorgestellt, dass einen Platz in der laufenden Debatte um zukunftsweisende Infrastruktursysteme für städtische Stoffströme einnehmen wird. Das Anwendungspotenzial einer Hydrothermalen Karbonisierung von häuslichem Abwasser gibt der Entsorgungswirtschaft schon heute eine neue Perspektive /2/.

2. Kohlendioxid-Bilanz der konventionellen häuslichen Abwasserentsorgung

Der DWA-Fachausschuss für neuartige Sanitärssysteme /2/ verwendet das konventionelle häusliche Abwasserentsorgungsverfahren als Referenzsystem; es ist repräsentativ für eine häufige städtische Anwendung in Deutschland, aber auch im internationalen Maßstab. In der Systematik wird es als 1-Stoffstromsystem bezeichnet, da das gesammelte häusliche Schmutzwasser als Stoffstromgemisch abgeleitet und behandelt wird. Dieses System liegt der hier dargestellten CO₂-Bilanz zugrunde. Das im 1-Stoffstromsystem abgeleitete Niederschlagswasser, das auch aus einer Mischkanalisation stammen kann, findet in der Bilanz keine Berücksichtigung. Die CO₂-Bilanz wird entlang der in den Bildern 1 bis 3 skizzierten Wasserver- und Abwasserentsorgungskette aufgenommen und im Text unter den Buchstaben a bis j erläutert.

a. In der Agrarwirtschaft werden mit der Ernte von pflanzlichen Nahrungsmitteln den Böden Nährstoffe entzogen. Diese Verluste müssen für ein erneutes Wachstum ausgeglichen werden. Der enorme Bedarf an Nahrungsmitteln zur Ernährung der Weltbevölkerung macht es seit rund 100 Jahren notwendig, die erforderlichen Nährstoffmengen zur Bodendüngung industriell zu erzeugen. Das geschieht mit erheblichem Einsatz von fossilen Energieträgern und der Bildung von klimaverändernden Emissionen. Durch den menschlichen Verzehr der heute global erzeugten Lebensmittel werden die verdauten organischen Substanzen zusammen mit den Nährstoffen in das lokale Abwasserentsorgungssystem importiert. Phosphorverbindungen gelangen in relevanten Mengen zusätzlich über Haushaltsreinigungsmittel in das häusliche Rohabwasser. Ein lebensnotwendiger Teil der vom Menschen aufgenommenen organischen Substanz wird zu CO₂ umgesetzt. Letztendlich kann pro Einwohner und Tag gegenwärtig in Deutschland mit einer Belastung des häuslichen Abwassers von 120 g organischer Trockensubstanz, oTS, 12,9 g Gesamtstickstoff und 2,0 g Gesamtphosphor gerechnet werden /3/. Die industrielle Herstellung einer entsprechenden Menge an Düngestickstoff, z. B. Calcium-Ammonium-Nitrat, führt zusammen mit der Herstellung einer hinreichenden Menge an Phosphordünger, z. B. Phosphat, zu einwohnerspezifischen Emissionen von etwa 140 g CO₂/E · d, wenn die bei der Produktion von anfallenden CO₂ Äquivalente durch die Emissionen von N₂O und CH₄ berücksichtigt werden. Et-



TYPISCHE CO₂-BILANZ: für die derzeitige Abwasserbehandlung in einer kommunalen Kläranlage

Bild 2

wa 90 % der Emissionen fallen dabei auf die Produktion von Stickstoff-, 10 % auf die Produktion von Phosphordünger /4, 5/.

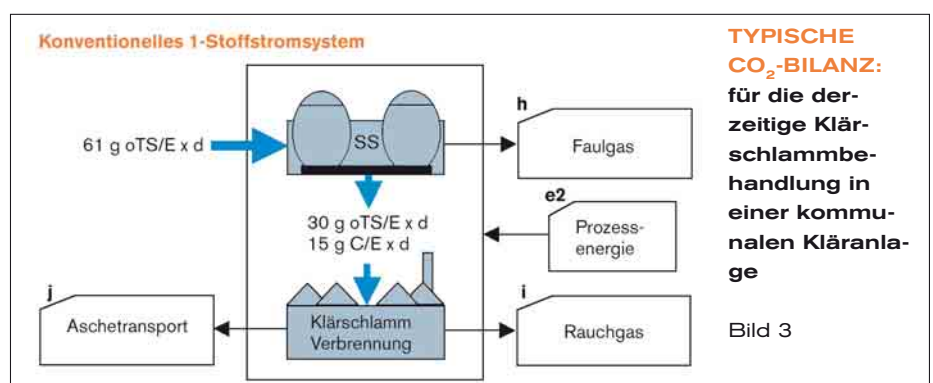
b. Bei der Trinkwasserbereitstellung und der nachfolgenden Abwasserentsorgung im Kanalnetz wird sich an den Betriebsverhältnissen in Hamburg orientiert. Der örtliche Trinkwasserverbrauch wird mit 120 Litern pro Einwohner und Tag zugrunde gelegt. Bei einem Stromverbrauch für die Trinkwasserbereitstellung bis zum Nutzer von 0,5 kWh pro m³ resultiert in Hamburg unter Berücksichtigung örtlicher Umrechnungsfaktoren hieraus eine Emission von 31 g CO₂/E · d.

c. Für den Betrieb des Hamburger Abwasserkanalnetzes zur Ableitung von 120 Litern pro Einwohner und Tag bis zur Kläranlage wurde über den Energieverbrauch eine Emission von rund 5 g CO₂/E · d errechnet. Der Anteil des im Netz transportierten Niederschlagswassers wurde bei der Ermittlung der angegebenen CO₂-Emission herausgerechnet.

Gewachsene, städtische Abwasserentsorgungssysteme für häusliches, gewerbliches, industrielles Abwasser, ggf. mit Mischwasseranteilen, sind nicht für den Erhalt von Kohlenstoff in Form von organischer Substanz und die Rückgewinnung von Nährstoffen wie Stickstoff-

und Phosphorverbindungen ausgelegt, sondern für deren gezielte Beseitigung. In konventionellen 1-Stoffstromsystemen wird Schmutzwasser vermisch und in einer Kläranlage per Nitrifikation, Denitrifikation, Phosphatfällung und Stabilisierung des Primär- und Überschussschlammes durch Faulung behandelt. Der jeweilige Wirkungsgrad der einzelnen Behandlungsstufen in denen die organische Substanz sukzessiv zu CO₂ oxidiert wird unterliegt in der konventionellen Abwasserbehandlung relativ geringfügigen Schwankungen und wurde der Fachliteratur entnommen /6/. Die abschließende thermische Verwertung des Faulschlammes durch Verbrennung wird in deutschen Großstädten häufig angewandt, so auch in Hamburg. Die Oxidation des Kohlenstoffanteils in der organischen Substanz erfolgt in den dargestellten Stufen von 120 g oTS zu 61 g oTS zu 26 g oTS und abschließend in der Verbrennungstufe zu 0 g oTS. Beim Gesamtbehandlungsprozess des häuslichen Abwassers wurden sowohl CO₂, als auch CO₂ Äquivalente für die Bilanz berücksichtigt.

d. In einer konventionellen Kläranlage werden die Phosphorverbindungen im Abwasser durch Ausfällung entfernt und sind im weiteren Verlauf der Abwasserbehandlung Bestandteil des Klärschlammes. Der Einsatz des in den Aschen



TYPISCHE CO₂-BILANZ: für die derzeitige Klärschlammbehandlung in einer kommunalen Kläranlage

Bild 3

vorliegenden Phosphors als Sekundärrohstoff in der Landwirtschaft, steht erst am Beginn einer technisch wirtschaftlichen Entwicklung. Aus der Herstellung der in der Kläranlage eingesetzten Phosphatfällmittel resultieren Emissionen von $8 \text{ g CO}_2/\text{E} \cdot \text{d}$ /7/. Diese Emissionen werden in die Bilanz aufgenommen, da die Ausfällung lediglich der Elimination von Phosphor aus dem Abwasser dient. Weder der phosphatreiche Fällschlamm noch die phosphatreiche Asche substituieren Düngerphosphat.

e1+2. Um die gesetzlichen Normen der Abwasserentsorgung einzuhalten, benötigt die Abwasserbehandlung Prozessenergie, wobei ein Großteil der notwendigen Energie durch die Schlammbehandlungsverfahren zurück gewonnen werden kann. In Hamburg sind das durch einen optimierten Verbund der Anlagen 100% der benötigten thermischen Energie und rd. zwei Drittel der benötigten elektrischen Energie für die Abwasserbehandlung. Die zusätzlich benötigte Prozessenergie beträgt etwa 20 kWh pro Einwohner und Jahr, woraus sich eine Emission von $28 \text{ g CO}_2/\text{E} \cdot \text{d}$ errechnet. CO_2 -Emissionen, die sich hauptsächlich aus der energieaufwändigen Beseitigung von Stickstoffverbindungen aus dem häuslichen Abwasser und der Klärschlammentwässerung ergeben, sind in den angegebenen Prozessemissionen der Abwasserbehandlung bereits berücksichtigt. Ebenfalls einbezogen sind die Emissionen, die aus dem Energieverbrauch der Klärschlammentwässerung und Trocknung resultieren.

f. Bei der biologischen Abwasserbehandlung wird sowohl bei der Nitrifikation, als auch der Denitrifikation unerwünschtes Distickstoffoxid gebildet und freigesetzt /8/. N_2O ist ein klimawirksames Gas, was in der Bilanz als CO_2 -Äquivalent einbezogen wird. Die Emission als Äquivalent beträgt $73 \text{ g CO}_2/\text{E} \cdot \text{d}$.

g. Bei Zugrundelegung von deutschen Lebensgewohnheiten ist häusliches Abwasser an der Quelle durchschnittlich

mit 120 g organischer Trockensubstanz pro Einwohner und Tag belastet /3/, was einem Ausgangswert von 60 g Kohlenstoff im Abwasser pro Einwohner und Tag entspricht. Die organische Substanz bzw. der Kohlenstoffanteil wird in der beschriebenen konventionellen Abwasserbehandlung⁽⁶⁾ zu insgesamt rund 49% letztendlich als CO_2 -Emission aus dem Abwasser entfernt. Ca. 43% gehen davon direkt in die Atmosphäre und ca. 6% in die Vorflut, wo die organische Substanz mineralisiert und mittelfristig ebenfalls zu CO_2 umgesetzt wird. Die Beseitigung von rechnerisch rund 59 g oTS pro Einwohner und Tag aus dem Abwasser führt zu einer Emission von $108 \text{ g CO}_2/\text{E} \cdot \text{d}$. Die verbleibende organische Substanz von $61 \text{ g oTS}/\text{E} \cdot \text{d}$ liegt dann im sich anschließenden Abwasserbehandlungsprozess als vermischter Primär- und Überschussschlamm vor und wird den weiterführenden Schlammbehandlungsverfahren zugeführt.

h. Die im Primär- und im Überschussschlamm enthaltenen $61 \text{ g oTS}/\text{E} \cdot \text{d}$ werden in Faulbehältern anaerob stabilisiert. Das gewonnene Faulgas wird, wie unter **e1+2** beschrieben, als Prozessenergieträger in der Abwasserbehandlungskette eingesetzt. Von den $61 \text{ g oTS}/\text{E} \cdot \text{d}$ werden etwa $35 \text{ g oTS}/\text{E} \cdot \text{d}$ zu Faulgas umgesetzt und im Anschluss thermisch verwertet. Aus der Umsetzung von $35 \text{ g oTS}/\text{E} \cdot \text{d}$ zu Faulgas und der Methanverbrennung resultiert eine Emission von $64 \text{ g CO}_2/\text{E} \cdot \text{d}$.

i. Der stabilisierte Klärschlamm enthält von den ursprünglichen $120 \text{ g oTS}/\text{E} \cdot \text{d}$ im häuslichen Abwasser noch ca. $26 \text{ g oTS}/\text{E} \cdot \text{d}$. Im anaerob stabilisierten Klärschlamm sind demnach noch rund 22% von der organischen Substanz vorhanden, mit dem ein Einwohner das häusliche Abwasser belastet, entsprechend $13 \text{ g C}/\text{E} \cdot \text{d}$. Wird der stabilisierte Klärschlamm wie in Hamburg thermisch verwertet, so resultiert aus der Verbrennung der organischen Substanz eine Emission von rund $48 \text{ g CO}_2/\text{E} \cdot \text{d}$. Auch durch die

Verbrennung des stabilisierten Klärschlammes wird ein Teil des Energiegehaltes im häuslichen Abwasser als notwendige Prozessenergie für die Kläranlage zurück gewonnen, wie unter **e** beschrieben.

j. Um die CO_2 -Bilanz zu vervollständigen wurde der Abtransport der Verbrennungsrückstände in die Darstellung aufgenommen. In Hamburg werden die Verbrennungsrückstände per Lkw zu einem ortsnahen Unternehmen gefahren und dort in einem Verhüttungsprozess stofflich verwertet. Durch die relative Ortsnähe der Verwertungsanlagen entstehen durch den Transport nur geringfügige Emissionen von weniger als $1 \text{ g CO}_2/\text{E} \cdot \text{d}$.

Die vorliegende Aufstellung zeigt, dass ein Einwohner im Rahmen der konventionellen städtischen Abwasserentsorgung eine Emission von 505 g Kohlendioxid pro Tag auslöst. Davon sind in Tabelle 1 z.B. $285 \text{ g CO}_2/\text{E} \cdot \text{d}$ als klimawirksam ausgewiesen, d.h. diesen Emissionen liegen im Wesentlichen Verbräuche von nicht erneuerbaren Energieträgern zugrunde. Hierin sind außer den CO_2 -Emissionen auch klimawirksame Emissionen anderer Gase enthalten, die als CO_2 -Äquivalente in die Bilanz aufgenommen wurden. Sie entstehen hauptsächlich bei der industriellen Nährstoffproduktion.

Als klimaneutral werden darüber hinaus die Emissionen zu $220 \text{ g CO}_2/\text{E} \cdot \text{d}$ aufsummiert, die aus der Umsetzung der organischen Substanz im häuslichen Abwasser, d. h. hauptsächlich aus nachwachsenden Rohstoffen, im Gesamtentsorgungsprozess entstehen.

3. Hydrothermale Karbonisierung

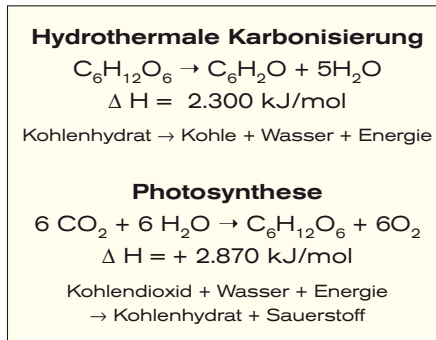
Die Hydrothermale Karbonisierung ist ein Verfahren zur Erzeugung von partikulärer Kohle aus Biomasse in wässrigem Milieu. Bereits eingeführt ist die Kurzform HTC; dabei steht das C als Synonym für reinen Kohlenstoff.

Text	Text-Stichworte	g CO ₂ /E · d bzw. Äquivalente	g CO ₂ /E · d klimawirksam	g CO ₂ /E · d klimaneutral
a	Nährstoffproduktion	140	140	-
b	Wasserbereitstellung	31	31	-
c	Netzbetrieb	5	5	-
d	P-Fällmittel	8	8	-
e 1, 2	Prozessenergie	28	28	-
f	N ₂ O Emission als CO ₂ Äquivalent	73	73	-
g	oTS Elimination aus Abwasser	108	-	108
h	Faulgasverwertung	64	-	64
i	Klärschlammverbrennung	48	-	48
j	Rückstandstransport	< 1	< 1	-
Σ		505	285	220

Der Prozess, der die in der Natur in langen Zeiträumen ablaufende Kohleentstehung zeitlich verkürzt nachbildet, wurde am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Potsdam in der Arbeitsgruppe von Markus Antonietti wiederentdeckt und mit dem heutigen wissenschaftlichen Kenntnisstand neu erfasst /9/. Die grundlegende Verfahrensentwicklung geht auf Friedrich Bergius zurück, der 1931 zusammen mit Carl Bosch für diese und andere Entdeckungen den Nobelpreis erhielt.

Beim HTC-Verfahren wird unter Druck insbesondere pflanzliche Biomasse zusammen mit Wasser und gegebenenfalls einer geringen Menge eines Katalysators unter Luftabschluss in einem Temperaturbereich von 180 bis 240 °C erhitzt. Die ablaufende Reaktion ist exotherm. Insbesondere entsteht theoretisch kein Kohlendioxid, sondern je nach Reaktionsführung partikuläre Kohle. Der physikalisch, chemische HTC-Prozess ist gegenüber Veränderungen in der Zusammensetzung der Eingangsmaterialien unempfindlicher als Prozesse, die in biologischen Reaktoren ablaufen. Weitere Vorteile sind die direkte und einfache Nutzung von eingesetzter Biomasse mit hohem Wasseranteil, ohne diese unter zusätzlichem Energieaufwand vortrocknen zu müssen. In einem Zeitfenster von mehreren Stunden ist der Karbonisierungsprozess durch Wasserabspaltung von Kohlehydraten beendet. Die dann im Wasser vorliegenden Kohlepartikel verrotten größtenteils nicht, d. h. eingelagert in Böden werden sie auf lange Sicht nicht durch Bodenorganismen abgebaut. Auf den Zeitraum der Abbaubarkeit kann durch die Reaktionsführung der HTC-Einfluss genommen werden. Die stark vereinfachte Reaktionsgleichung der HTC wird in Bild 4 gezeigt /10/. Wie Kohlenhydrate durch Photosynthese gebildet werden, zeigt in diesem Zusammenhang die zweite Gleichung.

Bei den bisher gebräuchlichen Verfahren zur Umwandlung von Biomasse in Brennstoffe ist die Kohlenstoffeffizienz relativ gering. Nur ein kleiner Teil des zu Beginn in der Biomasse enthaltenen Kohlenstoffs, ist später im verwertbaren Endprodukt enthalten. Dagegen beträgt die theoretische Kohlenstoffeffizienz bei der HTC 100 %, in der praktischen Abwasserentsorgungsanwendung wird sie von Hamburg Wasser mit 80 % angenommen. Bei der alkoholischen Gärung beträgt sie 67 %, bei der anaeroben Umsetzung zu Biogas 50 %. Die Kohlenstoffeffizienz bei der Gewinnung von sequestrierbarem Kohlenstoff liegt je nach Py-



Reaktionsgleichungen HTC und Photosynthese Bild 4

rolyseverfahren bei weniger als 50%, bei der Holzkohleherstellung durch Holzverkohlung ca. 30 %, bei der Erzeugung von Humus durch Kompostierung liegt die Kohlenstoffeffizienz lediglich bei 5 bis 10 % /9, 10, 11/. Der nicht zu Kohlenstoff umgesetzte Biomasseanteil entweicht durch anaeroben oder aeroben mikrobiellen Abbau in Form von Kohlendioxid oder auch Methan in relativ kurzen Zeiträumen in die Atmosphäre. Bei der natürlichen Zersetzung von Biomasse in Böden wird nur etwa 1 % des in die Pflanze eingelagerten CO₂ als sehr langsam umsetzbarer Humus in den Böden sequestriert.

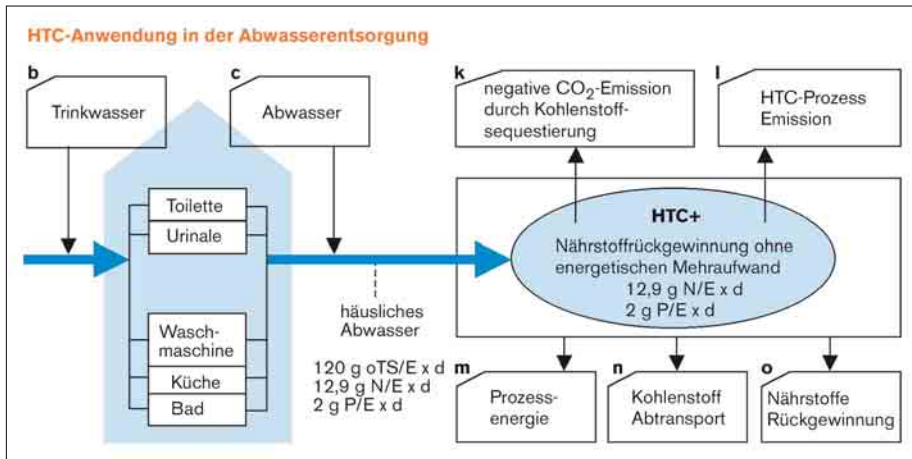
Mit der im Vergleich zu anderen Verfahren relativ hohen Kohlenstoffeffizienz des HTC-Prozesses eröffnen sich mit dem gewinnbaren partikulären Kohlenstoff neben der thermischen Verwertung neue Nutzungsperspektiven in der Abwasserwirtschaft. Über die Auswahl der Eingangsmaterialien und die Reaktionsführung der HTC auf die Eigenschaften

der Produkte Einfluss nehmen zu können, schafft Raum für viele innovative Anwendungsmöglichkeiten. Neben der Möglichkeit der Einlagerung in Böden kann der Kohlenstoff auch als industrieller Rohstoff dienen, der Kohlenstoff in Produkten substituiert, die bisher aus fossilen Energieträgern hergestellt wurden.

Hamburg Wasser hat im Jahr 2008 eine Reihe von HTC-Behandlungen von Abwasserschlämmen und Abwasserteilströmen an der Hochschule Ostwestfalen-Lippe am Standort Höxter durchführen lassen /12/. Bestätigt wurde die grundsätzliche Karbonisierbarkeit von Stoffströmen der Abwasserentsorgung sowie eine erwartete gute Entwässerbarkeit der behandelten Schlämme. Mittlerweile werden in Hamburg Anwendungen einer Karbonisierung in der Abwasserentsorgungswirtschaft sondiert und insbesondere die neuen Möglichkeiten einer stofflichen Verwertung von Abwasserteilströmen für alternative, teilstromorientierte Entsorgungsverfahren überdacht.

4. Anwendungspotenzial der HTC in der häuslichen Abwasserentsorgung

Historisch gesehen haben sich in Städten technisch einheitliche Abwasserentsorgungsverfahren herausgebildet. Wie im DWA-Kläranlagen-Leistungsvergleich dokumentiert, konnten die Ablaufemissionen der Kläranlagen in die aufnehmenden Gewässer hinsichtlich der Phosphor-, Stickstoff- und Kohlenstoffverbindungen in den vergangenen 20 Jahren



MÖGLICHE CO₂-BILANZ: für Anfall, Transport und Behandlung von häuslichem Abwasser bei einer HTC-Anwendung

Bild 5

stark reduziert werden. In Großkläranlagen werden die Stickstoffverbindungen zu 75 %, die Phosphorverbindungen zu 95 % aus dem Abwasser entfernt und die organische Substanz annähernd zu 100 % zu CO₂ umgesetzt, denn letztendlich werden auch die organischen Kohlenstoffverbindungen, die mit dem Ablauf der Kläranlage in die Gewässer gelangen zu CO₂ umgesetzt.

Die über lange Zeiträume gewachsenen Abwasserentsorgungssysteme sind weder für den Erhalt oder die stoffliche Nutzung der organischen Substanz mit seinem Kohlenstoffanteil, noch für die Rückgewinnung von Nährstoffen ausgelegt, sieht man von der Faulgasverwertung und der thermischen Verwertung von etwa 22 % des Kohlenstoffs ab, der nach dem Durchlaufen der konventionellen Abwasserbehandlungsstufen im stabilisierten Klärschlamm zur Erzeugung von Prozessenergie noch zur Verfügung steht. Die CO₂-Reduktionspotenziale hinsichtlich der klimarelevanten Emissionen sind bei den konventionellen Verfahren zur Abwasserreinigung und Klärschlammbehandlung nahezu erschöpft. Damit ist in der konventionellen Abwasserentsorgung ein Schlüsselfaktor nicht mehr gegeben, die Anpassungsfähigkeit an die heute globalen Anforderungen zur Erhöhung der Systemeffizienz von Entsorgungsanlagen.

Was ändert sich durch die Anwendung des HTC-Verfahrens? Mit dem Verfahren würden grundlegend neue Lösungsmöglichkeiten für Problemstellungen in der Abwasserentsorgungswirtschaft geschaffen und gleichzeitig neue ingenieurtechnische Optimierungspotenziale zur Bearbeitung freigestellt werden. Um die Innovation des HTC-Verfahrens anschaulich darzustellen, wurde analog zur konventionellen Entsorgung für häusliches Abwasser in Kapitel 2, eine alternative CO₂-Bilanz aufgestellt. Im Bild 5 ist die Wasserver- und Abwasserentsorgungskette mit einer HTC-Anwendung skizziert und im Text unter den Buchstaben **k** bis **o** erläutert. Die Erläuterungen zu **b** und **c** finden sich im Kapitel 2.

k. Im HTC-Prozess wird aus organischer Substanz partikulärer Kohlenstoff gewonnen. Die Kohlenstoffeffizienz beträgt gemäß ersten praktischen Untersuchungsergebnissen von Hamburg Wasser etwa 80 %. Danach können von 120 g organischer Substanz ca. 48 g Kohlenstoff/E · d gewonnen werden. Die Erzeugung dieser Kohlenstoffmenge und ihrer dauerhaften Einlagerung im Boden entspricht einem Entzug von 176 g CO₂/E · d aus der Atmosphäre. Mit dem HTC-Prozess wird ein innovativer Weg zur Umkehr des herkömmlichen Kohlendioxidregimes dokumentiert, eine Kohlenstoffsenke.

l. Die verbleibenden 20 % des Kohlenstoffs, d. h. 12 g C/E · d der organischen Substanz wird zu 44 g CO₂/E · d umgesetzt und letztendlich, ggf. nach thermischer Nutzung, als CO₂ emittiert. Die Emission erfolgt direkt oder indirekt über eine Umsetzung in den Vorflutern in die Atmosphäre.

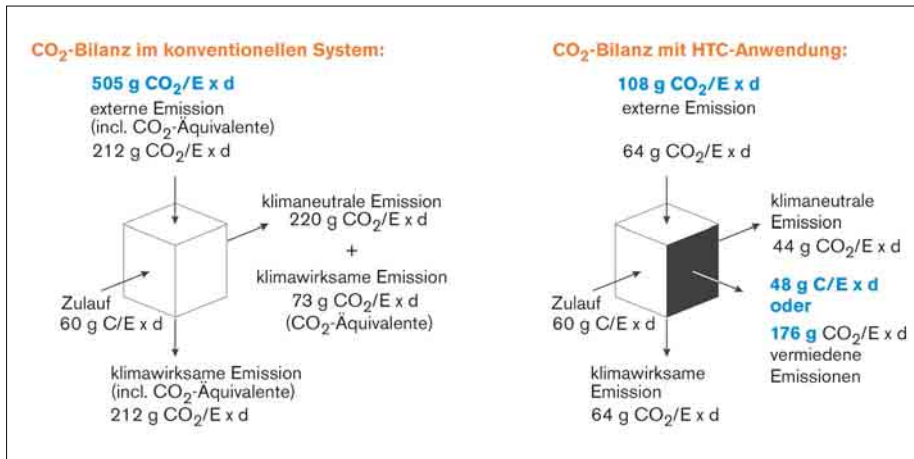
m. Die Systemeffizienz der Abwasserentsorgung kann durch einen reduzierten Energieverbrauch bei einer HTC-Anwendung grundlegend verbessert werden. Der Karbonisierungsprozess von organischer Substanz ist exotherm. Da aber in einem kontinuierlichen HTC-Prozess die Wärme nicht verlustfrei rückgeführt werden kann, wird zunächst davon ausgegangen, dass die im konventionellen Abwasserbehandlungsprozess eingesetzte Energie von 20 kWh/E · a für das HTC-Verfahren ebenfalls auskömmlich sein wird, woraus sich eine Emission von 28 g CO₂/E · d errechnet. Als Optimierungsziel wird der energieautarke HTC-Betrieb angestrebt. Dem kommt entgegen, dass der Energieaufwand im konventionellen System für die aerobe Kohlenstoff und Stickstoffentfernung entfällt.

n. Um die CO₂-Bilanz zu vervollständigen wurde der Abtransport der erzeugten Kohle in die Darstellung aufgenommen. Es wird davon ausgegangen dass die Kohle per Lkw zu einem ortsnahen Unternehmen gefahren und dort in einem Herstellungsprozess zu einem Bodenverbesserungsmaterial verarbeitet wird. Durch die relative Ortsnähe der Verwertungsanlagen entstehen durch den Kohletransport, ähnlich wie beim Aschetransport nur geringfügige Emissionen von weniger als 1 g CO₂/E · d (Tabelle 2).

o. In einer Kohlendioxid-/Kohlenstoffbilanz spielt die Rückgewinnung von N-P-Düngestoffen aus häuslichem Abwasser eine wichtige Rolle. Untersuchungsergebnisse von Hamburg Wasser haben bestätigt, dass eine weitgehende Rückgewinnung von Nährstoffen aus häuslichem Abwasser ohne energetischen Mehraufwand mit bekannten Verfahren möglich, insbesondere aber in den HTC-Prozess integrierbar ist. Da rückgewon-

CO ₂ -Emissionen bei einer HTC-Anwendung bei der städtischen Abwasserentsorgung					
Text	Text Stichworte	HTC g CO ₂ /E · d	g CO ₂ /E · d klimawirksam	g CO ₂ /E · d klimaneutral	g CO ₂ /E · d CO ₂ negativ
b	Wasserbereitstellung	31	31	–	–
c	Netzbetrieb	5	5	–	–
k	HTC Sequestrierung	–	–	–	176
l	HTC Prozessemission	44	–	44	–
m	Prozessenergie	28	28	–	–
n	Kohletransport	< 1	< 1	–	–
o	Nährstoffrückgewinnung	–	–	–	–
Σ		108	64	44	176

Tab. 2



VERGLEICH DER KOHLENSTOFF-/KOHLENDIOXIDBILANZ:
im konventionellen System und einem HTC-System

Bild 6

nene Nährstoffe, industriell hergestellte Düngemittel substituieren, werden die bei der Herstellung in Kapitel 2 a beschriebenen Emissionen eingespart. Das gilt auch für die Emissionen, die aus der Herstellung von Phosphatfällmitteln her-rühren, Kapitel 2 d.

Die vorrangige Aufgabe der Abwasserentsorgung ist die Stadthygiene. Sie kann durch die Anwendung des HTC-Prozesses in einem Temperaturfenster von mehr als 180 °C und Drücken von mehr als 20 bar sicherer gewährleistet werden, als durch konventionelle Verfahren. Die Produkte des HTC-Verfahrens sind steril. Darüber hinaus befasst sich Hamburg Wasser mit der Einbindung der Eliminierung von Pharmarückständen im häuslichen Abwasser in den HTC-Prozess ohne dafür zusätzliche Energie aufzuwenden zu müssen.

Ein Vergleich soll das Potenzial für eine HTC-Anwendung in der Abwasserent-

sorgung aufzeigen (Bild 6): Im konventionellen Abwasserentsorgungssystem betragen die Gesamtemissionen einschließlich der klimawirksamen Emissionen über CO₂ Äquivalente aufsummiert 505 g CO₂/E · d. Bei einer HTC-Anwendung kann die Emission auf 108 g CO₂/E · d reduziert werden. Das entspricht einem Gesamtminderungspotenzial von 79 %.

Als externe Emissionen werden die Emissionen bezeichnet, die indirekt mit dem Abwasserbehandlungsprozess in Verbindung stehen und nicht unmittelbar aus der Umsetzung der organischen Substanz im häuslichen Abwasser resultieren. Sie werden derzeit aus fossilen Energieträgern erzeugt und deshalb zusammen mit allen CO₂-Äquivalenten als klimawirksam eingestuft. Im konventionellen Abwasserentsorgungssystem betragen die klimawirksamen Emissionen 285 g CO₂/E · d. Bei einer HTC-Anwen-

dung kann diese Emission auf 64 g CO₂/E · d reduziert werden. Das entspricht einem Gesamtminderungspotenzial um 78%.

Bei Anwendung des HTC-Verfahrens können aus 120 g oTS/E · d im häuslichen Abwasser, mit einem Anteil von 60 g C und einer Kohlenstoffeffizienz des Prozesses von 80%, 48 g C/E · d gewonnen werden. Diese Menge an Kohlenstoff substituiert die Emission von 176 g CO₂/E · d. Der Nettoentzug von CO₂ aus der Atmosphäre beträgt, wenn den gemäß Tabelle 2 negativen 176 g CO₂/E · d die klimawirksamen Emissionen von 64 g CO₂/E · d abgezogen werden, 112 g CO₂/E · d.

Ausblick

Wie bei der Systembetrachtung deutlich wurde, nimmt die Rückgewinnung von Wertstoffen aus häuslichem Abwasser eine herausragende Stellung ein, insbesondere in einer Zeit, in der die Ressourcenverknappung und die Folgen der Verbräuche bereits offensichtlich sind. Die Rückgewinnung von lebensnotwendigem Phosphat aus Abwasser steht dabei unter besonderem Fokus, da die hochwertigen Rohphosphatvorkommen in weniger als 100 Jahren zur Neige gehen werden und aus Abwasser zurück gewonnenes Phosphat bereits heute schon weniger mit Cadmium belastet ist, als die abgebauten Rohphosphate. Dem steht die Bedeutung einer planvollen Rückgewinnung von Stickstoffdünger aus Abwasser nicht nach, da der hohe Verbrauch von endlicher fossiler Energie zu seiner Herstellung erheblich zur Klimaveränderung beiträgt. Etwa 1,2 % des Weltenergiebedarfs wird zur Her-

stellung von industriellem Dünger verwendet. Aus dem Energieverbrauch resultieren ebenfalls 1,2 % der globalen Emissionen von klimaverändernden Gasen /4/. Die Größenordnung der Zahlen macht deutlich wie wichtig es ist sich mit innovativen Verfahren wie der HTC auseinanderzusetzen, wenn sie das Potenzial haben so entscheidend in den Kohlenstoffkreislauf und Energieverbrauch einzugreifen zu können.

Die Anwendung des HTC-Verfahrens zeigt mit der vorgestellten Bilanz sehr weitgehende Reduktionsmöglichkeiten für CO₂-Emissionen gegenüber denen im konventionellen Abwasserentsorgungssystem. Wie im herkömmlichen 1-Stoffstromsystem würde bei einer Anwendung des HTC-Verfahrens die organische Substanz im zu behandelnden Abwasserstrom ebenfalls in geringer Konzentration vorliegen. Die Aufkonzentrierung von Abwasserinhaltsstoffen im Eingangsstoffstrom einer Behandlungsstufe und die Entwässerung der Ausgangsprodukte nach einer Behandlung bleibt daher auch für das HTC-Verfahren eine Schlüsseltechnik, die der weiteren technischen Optimierung bedarf. Im Rahmen von alternativen, teilstromorientierten Entsorgungskonzepten überdenkt Hamburg Wasser, bei einem getrennt vorliegendem Grauwasseranteil des häuslichen Abwassers, diesen wasserreichen Anteil durch vergleichsweise trockenen häuslichen Bioabfall zu ersetzen. Der prozentuale Trockensubstanzgehalt im Eingangsstoffstrom würde sich bei einem solchen Vorgehen erheblich erhöhen lassen. Von etwa 120 Litern Abwasseranfall pro Einwohner und Tag macht der mit Organik und Nährstoffen schwach belastete Grauwasseranteil mehr als 90 Liter aus. Darüber hinaus könnte die Menge der organischen Substanz, ebenso wie der Nährstoffanteil im Eingangsstoffstrom, durch häuslichen Bioabfall aufgestockt werden und so das Anwendungsspektrum als auch die Anwendungsperspektiven des HTC-Verfahrens um den Einsatz von städtischen Stoffströmen mit organischem Anteil erweitert werden.

Die maximale Wertschöpfung des HTC-Verfahrens hinsichtlich der Zielsetzungen in der hiesigen Entsorgungswirtschaft liegt in den Möglichkeiten, die Nährstoffrückgewinnung und ggf. die Eliminierung von Medikamentenrückständen energieeffizient in den Prozess integrieren zu können. Im gleichen Verfahrensschritt kann mit der Festlegung von CO₂ aus der Atmosphäre und dauerhaften Einlagerung von Kohlenstoff in Böden eine Kohlenstoffsänke entstehen. Die stoffliche Verwertung des HTC-

LITERATUR

- /1/ Schonlau, H.; Rakelmann, U.; Li, Z.; Giese, Th.; Werner, Th.; Augustin, K.; Günner, Ch.: Pilotprojekt für ein ganzheitliches Entwässerungskonzept in Städten. In: KA Korrespondenz Abwasser 2008 (55) Nr.10, S.1095 -1099
- /2/ Rakelmann, U.; Li, Z.: Integration of innovative urban waterinfrastructure in regional circular economy systems UNESCO-IHP Symposium, Paris, 12 -14 September 2007
- /3/ DWA-Themen: Fachausschuss KA-1 „Neuartige Sanitärsysteme“, Dezember 2008, ISBN: 978-941089-37-2, Kapitel 3 „Inhaltstoffe des häuslichen Abwassers und seiner Teilströme“, Seite 27 - 36
- /4/ Chan, K. Y.; Cowie, A. Kelly, G.; Singh, B.; Slavich, P. 2008: Soil Organic Carbon Sequestration Potential for Agriculture in NSW, NSW DPI Science & Research Technical paper, ISBN 978 0 7347 1957 7, <http://www.dpi.nsw.gov.au/research/>
- /5/ Wood, S.; Cowie, A (2004): A review of greenhouse gas emission factors for fertiliser production, IEA Bioenergy Task38, http://www.ieabioenergy-task38.org/publications/GHG_Emission_Fertilizer%20Production_July2004.pdf
- /6/ Wiener Mitteilungen, Band 125 - Wien, ÖWAV Seminar 27. - 28.Februar 1995 ISBN 3-85234-015-2
- /7/ Maurer M.; Larsen T. 2002: Nutrients in urine: Energetical aspects of removal and recovery; International Conference „From Nutrient Removal to Recovery“, Amsterdam 2. - 4.Oct. 2002
- /8/ Pollutant Release and Transfer Register, PRTR, Luftemissionen aus kommunalen Kläranlagen, Distickstoffoxid, <http://www.home.prtr.de>
- /9/ Antonietti M., 2006: Zauberkohle aus dem Dampfkochtopf, MaxPlanckForschung 02/2006,04/2006, www.mpg.de
- /10/ Titirici, M.-M.; Thomas, A.; Antonietti, M.: „Back in the black: hydrothermal carbonization of plant material as an efficient chemical process to treat the CO2 problem?“, New J. Chem., 8th March 2007, DOI: 10.1039/b616045
- /11/ Cui, X.J.; Antonietti, M.; Yu, S.H. Structural effects of iron oxide nanoparticles and iron ions on the hydrothermal carbonization of starch and rice carbohydrates, Small, 2 (6): 756-759 June 2006
- /12/ Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Standort Höxter, Karbonisierungsversuche für die Hamburger Stadtentwässerung (2008) Projektleitung Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke, Dipl.-Ing. D. Blöhse
- /13/ Glaser, B.; Woods, W. I.: Amazonian dark earths - explorations in space and time. Springer, Berlin 2004, ISBN 3-540-00754-7
- /14/ Lehmann, J.: Amazonian dark earths - origin, properties, management. Kluwer Academic, Dordrecht 2003, ISBN 1-4020-1839-8
- /15/ Lehmann, J. (2007): Bio-energy in the black, Front Ecol Environ 2007; 5(7): 381 - 378

Kohlenstoffs kann z. B. in der Landwirtschaft durch Beimengung zur Herstellung hochwertiger Substrate genutzt werden. Neben dem Vorteil der Kohlenstoffsänke ist die dauerhafte Kohlespeicherung im Boden mit weitreichendem zusätzlichem Nutzen verbunden. Partikuläre Kohle bewirkt eine strukturelle Bodenverbesserung. U. a. wird das Wasserspeichervermögen verbessert und somit die Bewässerungsnotwendigkeit als auch der hierfür erforderliche Aufwand reduziert, die Stickstofffixierung unterstützt und das Ausspülen von Düngemitteln wie z. B. Phosphat verhindert. Ebenso findet ein Zuwachs an Bodenbakterien in den Mikroporen der Kohle statt, die für eine Nährstoffumsetzung zum Pflanzenwachstum förderlich ist /13/. Die erfolversprechende Rolle von inertem Kohlenstoff als Bestandteil eines fruchtbaren Humus ist ein aktueller Forschungsbereich in der Bodenkunde. Als Beispiel seien hier die Entdeckungen um die Wirkungen von Terra Preta, portugiesisch Schwarzerde, genannt /14, 15/. Die Herstellung und dauerhafte Speicherung von partikulärem HTC-Kohlenstoff im Boden ist ein hoffnungsvoller Weg über eine verbesserte Bodenfruchtbarkeit und dadurch gesteigertem Pflanzenwachstum der Atmosphäre noch zusätzliches CO₂ zu entziehen /15/. International gesehen geht es beim An-

wendungspotenzial des HTC-Verfahrens um weit mehr. Der HTC-Prozess liefert sequestrierbare Kohle und mit einer in den Prozess integrierten Nährstoffrückgewinnung recycelbare, lagerfähige Dünger, die zusammen mit humusbildenden Substanzen einen Bodenverbesserer darstellen. Dies bietet die Möglichkeit, unfruchtbare Flächen in landwirtschaftliche nutzbare Böden umzuwandeln, die ein effizientes Bewässerungs- und Nährstoffmanagement zulassen. Verlorene, ehemals fruchtbare landwirtschaftliche Nutzflächen können auf diese Weise wiederbelebt oder neue ertragreiche Flächen hinzugewonnen werden. Letztendlich geht es bei der Anwendung des HTC-Verfahrens darum, einen wesentlichen Beitrag zur Vermeidung des globalen Klimadesasters zu leisten und der Siedlungswirtschaft eine aktive Teilnahme an den Gegenmaßnahmen zu ermöglichen.

KONTAKT

Dipl.-Ing. Ulf RAKELMANN,
 Dr.-Ing. Thomas WERNER, Dr.-Ing. Zhiqiang LI,
 Dr.-Ing. Henning SCHONLAU, Thomas GIESE,
 Dr. rer. nat. Kim AUGUSTIN,
 Dipl.-Ing. Christian GÜNNER
 HAMBURG WASSER
 Billhomer Deich 2 · 20539 Hamburg
 E-Mail: ulf.rakelmann@hamburgwasser.de