

# Die Brennstoffzelle – Option zur nachhaltigen Erzeugung von Wärme und Strom auf Kläranlagen

Ingo Schoppe (Liebfeld/Schweiz), Daniel Wendler, Claus Linnemann, Karl Heinz Rosenwinkel und Stephan Kabelac (Hannover)

## Zusammenfassung

Die bisherige energetische Nutzung des anfallenden Faulgases auf Kläranlagen wird kurz vorgestellt, wobei auch auf die grundsätzlichen physikalischen Randbedingungen der Energieumwandlung eingegangen wird. Im Weiteren werden das Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle erläutert und mögliche Einsatzfelder im Bereich der Abwasserreinigung aufgezeigt. Abschließend werden die Schritte für eine zielgerichtete Anwendung und Weiterentwicklung der Brennstoffzellentechnologie im Bereich der Abwasserreinigung skizziert.

Schlagwörter: Abwasserreinigung, kommunal, Energie, Kläranlage, Klärgas, Brennstoffzelle

## Summary

### Generation of Heat and Electricity with Fuel Cells at Sewage Treatment Plants

The paper briefly describes in which way digester gases that are produced in sewage treatment plants have been used for energy generation up to now and it also deals with the fundamental physical outline conditions of energy conversion. It moves on to explain the functioning of a fuel cell and points out possible areas of use in the field of wastewater treatment. In conclusion, the paper outlines the different steps for a targeted application and further development of fuel cell technology in wastewater treatment.

Key words: wastewater treatment, municipal, energy, sewage treatment plant, biogas, fuel cell

## 1. Einleitung

Im Betrieb von Abwasserreinigungsanlagen gewinnt die Wirtschaftlichkeit, nicht zuletzt infolge fortschreitender Privatisierung, zunehmend an Bedeutung. Vor allem die Betriebskosten stehen hier im Mittelpunkt des Interesses. Nachdem der Personaleinsatz auf den meisten Anlagen weitestgehend optimiert wurde, rücken nun hinsichtlich einer Verbesserung der Wirtschaftlichkeit die Energiekosten verstärkt in den Blick-

punkt. Zwar sanken infolge der Liberalisierung des Strommarktes die Energiepreise, dies kann jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass der politische Wille in die entgegengesetzte Richtung strebt und als Folge der sich abzeichnenden Ressourcenverknappung mit einer Verteuerung von Energie zu rechnen ist. Durch die Einführung von „Umwelt-Steuern“ sollen Anreize zum sparsamen Einsatz von Energie gegeben und Energieverschwendung finanziell bestraft werden. So ist mittel- bis langfristig eine Erhöhung der Energiekosten abzu-

sehen. Über diese rein ökonomischen Aspekte hinaus werden weiterhin ökologische Fragen diskutiert. Hierbei rückt die gesamtökologische Betrachtung in den Mittelpunkt [1]. Dem ökologischen Nutzen wird der durch eine Abwasserreinigungsanlage entstandene ökologische Schaden gegenübergestellt und bilanziert. Es existieren verschiedene Methoden zur Aufstellung einer Ökobilanz; ein einheitliches, allgemein anerkanntes Bewertungsverfahren wurde allerdings noch nicht geschaffen. Der Verbrauch von Energie ist jedoch in jedem Fall als Schädigung anzusehen [1, 2]. Um diese Schädigung möglichst gering zu halten, muss mit dem Rohstoff Energie sparsam umgegangen werden. Zudem sollten die Verfahren zur Energieerzeugung möglichst umweltschonend sein.

Des Weiteren muss nach Lösungen für die Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes gesucht werden. Die Umweltpolitiker haben sich auf der einen Seite zur Halbierung des Ausstoßes verpflichtet (Erklärung von Kyoto). Auf der anderen Seite wird die Stromerzeugung aus Atomkraft, die neben den bekannten Nachteilen eine geringere CO<sub>2</sub>-Produktion aufweist als die Verstromung fossiler Brennstoffe, zunehmend kritisch betrachtet. Folglich ist einerseits eine weitestgehende Energieeinsparung anzustreben, andererseits sollte der verbleibende Energiebedarf nach Möglichkeit aus regenerativen Energiequellen gedeckt werden. Der Energieerzeugung durch Verfahren mit niedriger CO<sub>2</sub>-Emission wird somit in der Zukunft eine größere Bedeutung zukommen, als dies schon derzeit der Fall ist.

Hinsichtlich aller oben genannten Probleme/Widersprüche bietet die Brennstoffzellentechnologie in vielfacher Hinsicht interessante Lösungsansätze:

- Hohe Energieausbeute, d. h. geringer Brennstoffbedarf
- Geringe (bei Wasserstoff als Brennstoff gar keine direkte) CO<sub>2</sub>-Emission
- Möglichkeit der Energieautarkie (für Kläranlagen mit Hilfe des entstehenden Faulgases realisierbar).

### 2. Derzeitiger Stand der Faulgasnutzung auf Abwasserreinigungsanlagen

Wird der aus der Abwasserreinigung abgezogene Schlamm anaerob stabilisiert (dies ist nach einer Umfrage der ATV zu über 85 % der Fall [4]), entsteht methanhaltiges Gas. Dieses Klärgas wird nach dem Stand der Technik derzeit auf verschiedene Weise verwertet:

- Verbrennung in Heizkesselanlagen (*Wärmegewinnung*)
- Verbrennung in Blockheizkraftwerken (BHKW) unter Nutzung von *Kraft-Wärme*-Kopplung
- Gasaufbereitung auf Erdgasqualität.

Bei der Verwertung in Heizkesselanlagen wird das Biogas verbrannt und die entstehende Wärme zum Aufheizen des Rohschlammes sowie für weitere Heizzwecke verwendet. Dies ist vor allem auf kleineren Kläranlagen der Fall, wo die Mengen des anfallenden Biogases nicht für einen wirtschaftlichen BHKW-Betrieb ausreichen.

Die am weitesten verbreitete Verwertungsform von Biogas ist das BHKW. Hier wird mit Hilfe eines Gasmotors ein Generator betrieben, der Elektrizität erzeugt. Die Abwärme des Motors (Kühlwasser und Abgas) wird zur Vorwärmung des Rohschlammes und zur Beheizung des Faulbehälters genutzt. Die Bandbreite an Motorenkonzepten ist vielfältig [5, 6] und soll an dieser Stelle nicht weiter erläutert werden.

Eine weitere Verwertungsmöglichkeit ist die Aufbereitung des minderwertigen Brennstoffes Faulgas (CH<sub>4</sub>-Anteil ca. 65 Vol.-%, relativ hohe CO<sub>2</sub>- und Schwefelgehalte, unregelmäßige Zusammensetzung) auf Erdgasqualität (CH<sub>4</sub>-Anteil ca. 95 %). Während bei den beiden erstgenannten Verfahren eine direkte Energieumsetzung des Biogases auf der Kläranlage erfolgt, zielt die Aufbereitung des Klärgases mittels Methan-anreicherung auf den anschließenden Verkauf (Einspeisung in das örtliche Gasversorgungsnetz) ab. Die zum Betrieb von Kläranlage und Gasaufbereitung benötigte Energie wird somit nicht selbst erzeugt, sondern wird komplett von einem Energieversorgungsunternehmen bezogen. Im Ausland wird dieses Verfahren bereits an mehreren Stellen praktiziert, in Deutschland nach Kenntnis der Autoren lediglich auf dem Klärwerk Mönchengladbach [6].

### 3. Grundlagen der Energieumwandlung

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die in einem Brennstoff enthaltene Energie (chemische Energie) zu nutzen. Historisch gewachsen ist die energetische Umsetzung von Brennstoffen in Dampfmaschinen, Verbrennungsmotoren und Gasturbinen. Die Umwandlung erfolgt dabei in drei Schritten: Die chemische Energie, die im Brennstoff enthalten ist und über den Brennwert quantifiziert wird, wird mit Hilfe einer Verbrennung in thermische Energie umgesetzt. Diese thermische Energie wird dann in einer Wärme-Kraft-Maschine in mechanische Energie umgewandelt. In einem letzten Schritt wird mit einem Generator Elektrizität erzeugt. Abbildung 1 stellt diesen Umwandlungsprozess von Energieformen schematisch dar.

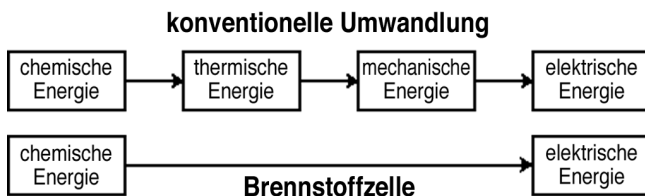


Abb. 1: Darstellung des konventionellen Umwandlungs- und des Brennstoffzellenprinzips

In einer Brennstoffzelle, deren Funktionsweise an späterer Stelle erläutert wird, wird die chemische Energie des Brennstoffs direkt in elektrische Energie umgewandelt, ohne den Umweg über die thermische Energie zu nehmen. Dieser Prozess wird auch „kalte Verbrennung“ genannt. Der prinzipielle Ablauf ist ebenfalls in Abbildung 1 dargestellt. Die direkte Umwandlung hat den Vorteil, dass die Umwandlung von thermischer Energie (Wärmeenergie) in mechanische Energie vermieden wird, denn der maximale Wirkungsgrad (Carnot-Wirkungsgrad) dieses Teilschrittes wird durch den 2. Hauptsatz der Thermodynamik auf Werte deutlich unter 100 % begrenzt.

Zwar kann mechanische Energie unbeschränkt in Wärmeenergie umgewandelt werden, umgekehrt ist Wärmeenergie nur mit erheblichen Einschränkungen in mechanische Energie zu wandeln. Demnach existieren hoch- und minderwertige Energieformen. Mechanische und elektrische Energie sind, wie in erster Näherung auch chemische Energie, hochwertige Energieformen. Sie können durch reversible Prozesse unbegrenzt ineinander umgewandelt werden.

Aus physikalischer Sicht ist es anzustreben, vor allem mechanische oder elektrische Energie zu erzeugen. Mit technisch ausgereiften BHKW ist ein elektrischer Wirkungsgrad von maximal 45 % erreichbar, was dem theoretisch möglichen Potenzial sehr nahe kommt [7]. Der oftmals angeführte Gesamtwirkungsgrad, der häufig über 80 % liegt, beinhaltet zusätzlich die nutzbare Abwärme. Mit Brennstoffzellen können höhere elektrische Wirkungsgrade bei etwa gleichen Gesamtwirkungsgraden erzielt werden [8].

## 4. Energiebedarf einer Kläranlage

Der Energiebedarf einer Kläranlage ist im Wesentlichen von der gewählten Verfahrenstechnik und den lokalen Randbedingungen wie z. B. Geografie, Infrastruktur, Kanalnetz, Abwasseranfall etc. abhängig. Daher kann der tatsächliche Energiebedarf einer Anlage im Einzelfall erheblich von den Durchschnittswerten abweichen, die in der Literatur angegeben werden.

Auf einer Kläranlage werden vor allem elektrische Energie und Wärme benötigt. Mit der elektrischen Energie werden die maschinentechnischen Anlagenteile wie Pumpen, Kompressoren und Belüfter betrieben, aber auch die gesamte Mess-Steuer-Regel-Technik (MSR) benötigt Elektrizität. Als Hauptverbraucher sind das Zulaufpumpwerk, die Belüftungsaggregate und die Rücklaufschlammförderung zu nennen. Die Wärme wird für die Beheizung der Schlammfäulung benötigt. Des Weiteren müssen die Betriebsgebäude geheizt werden.

Während der elektrische Energiebedarf über das Jahr gesehen als nahezu konstant bezeichnet werden kann, unterliegt der

Wärmebedarf einer jahreszeitlichen Schwankung. Der mittlere spezifische Energiebedarf wird in der Literatur mit  $25 \text{ kWh}_{el}/(E \cdot d)$  und  $22 \text{ kWh}_{th}/(E \cdot d)$  angegeben, wobei der thermische Bedarf im Winter bis zu  $25 \text{ kWh}_{th}/(E \cdot d)$  betragen kann [9].

Daraus folgt, dass im Mittel mehr elektrische als thermische Energie auf einer Kläranlage benötigt wird. Im Winterbetrieb wird von beiden Energieformen ungefähr dieselbe Leistung benötigt. Folglich ist für die Energieversorgung einer Kläranlage ein BHKW-Konzept anzustreben, das sich durch einen hohen elektrischen Wirkungsgrad bzw. eine hohe Stromkennzahl (Verhältnis der elektrischen zur thermischen Leistung) auszeichnet.

## 5. Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle

Eine Brennstoffzelle wandelt chemische Energie direkt in Elektrizität um, sodass der Umweg über Wärme und mechanische Energie entfällt (Abbildung 1). Es existieren fünf verschiedene Typen von Brennstoffzellen, die sich derzeit noch alle in der Entwicklungsphase befinden, wenn auch in unterschiedlichen Stadien. Ausgehend von der jeweils erforderlichen Betriebstemperatur lassen sich Brennstoffzellen in drei Bereiche gliedern:

- Niedertemperatur-Brennstoffzellen,  $80 - 120 \text{ }^\circ\text{C}$
- Mitteltemperatur-Brennstoffzellen,  $200 \text{ }^\circ\text{C}$
- Hochtemperatur-Brennstoffzellen,  $650 - 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Das Funktionsprinzip der einzelnen Typen ist unterschiedlich, jedoch können einige gemeinsame Charakteristika genannt werden:

Die Brennstoffzelle besteht aus zwei katalytisch wirksamen, porösen und deshalb für die Reaktionsprodukte und -produkte durchlässigen Elektroden, zwischen denen sich ein Elektrolyt befindet. Von außen wird kontinuierlich eine leicht oxidierbare Substanz, in der Regel Wasserstoff oder ein wasserstoffreiches Gasgemisch, an die Anode (brennstoffseitige Elektrode) herangeführt. Der Kathode (luftseitige Elektrode) wird Sauerstoff oder Luft zugeführt. Bei der chemischen Reaktion entsteht neben elektrischer Energie nutzbare Abwärme, deren Temperaturniveau vom Brennstoffzellentyp abhängt.

Abbildung 2 verdeutlicht das Funktionsschema einer Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC, Phosphoric-Acid Fuel Cell). Dieser Brennstoffzellentyp gehört zu den Mitteltemperatur-Brennstoffzellen und ist der für BHKW-Anwendungen am weitesten entwickelte Typ (marktfähiges Produkt). An der Anode werden Wasserstoffmoleküle in je zwei Protonen (positive geladene  $\text{H}_2$ -Kerne) und zwei Elektronen zerlegt. Die Protonen gelangen durch den für sie leitfähigen Elektrolyten auf die Kathodenseite. Die Elektronen müssen durch einen äußeren Stromkreis fließen und können dabei elektrische Leistung verrichten. Auf der Kathode nimmt je ein Sauerstoff-Atom zwei Elektronen und zwei Wasserstoff-Protonen unter Bildung eines Wassermoleküls auf. Wasser ist das einzige „Abfallprodukt“ der Brennstoffzelle selber;  $\text{CO}_2$  kann jedoch bei der Herstellung von  $\text{H}_2$  (z. B. bei Reformierung von Erdgas, s. u.) freigesetzt werden. Eine gute Beschreibung auch aller anderen einzelnen Brennstoffzellen-Typen, sowie Hintergrundinformationen gibt es unter <http://www.innovation-brennstoffzelle.de/>.

Das in Kläranlage anfallende Klärgas enthält im Durchschnitt etwa 65 % Methan ( $\text{CH}_4$ ), 34 % Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und 1 % Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Daneben treten manchmal verschiedene Spurenelemente auf, wie beispielsweise halogenierte oder fluorierte Kohlenwasserstoffe. Wie schon an anderer Stelle erwähnt, können die im Einzelfall gemessenen Werte durch lokale Besonderheiten erheblich von diesen Durchschnittswerten abweichen. Das größte Problem für die Gasverwertung mittels Brennstoffzelle stellt der Schwefelwasserstoff dar. Dieser wirkt als Katalysatorgift bei vielen Metallen, u. a. auch bei Platin, und hemmt so den Reformierungsprozess erheblich. Ähnlich wie bei der Verwertung in Gasmotoren ist eine sorgfältige Gasentschwefelung auf unter 0,2 ppm vorzusehen [10]. Die Spurenelemente, wie Fluorchlorkohlenwasserstoffe, Benzole, Phenole usw. müssen ebenfalls vor einer Gasverwertung entfernt werden. Verfahrenstechnische Lösungen dazu existieren genügend, da diese Gasaufbereitungsschritte auch bei der Verwendung in Gasmotoren durchgeführt werden müssen. Prinzipiell lässt sich sagen, dass die Elimination von Schwefelwasserstoff und den anderen Spurenstoffen technisch immer möglich ist, lediglich die Umsetzung solcher Anlagenkonzepte stößt manchmal an die wirtschaftlichen Grenzen [3].

Da der zur Reaktion benötigte Wasserstoff auf der Erde nicht als Primärenergiequelle zur Verfügung steht, muss er aus anderen Stoffen gewonnen werden. Die Reformierung von Erdgas stellt zurzeit die Standardlösung für die Versorgung einer Brennstoffzelle dar, jedoch gibt es auch Anwendungen, bei denen Biogas, dessen Methangehalt geringer als der des Erd-

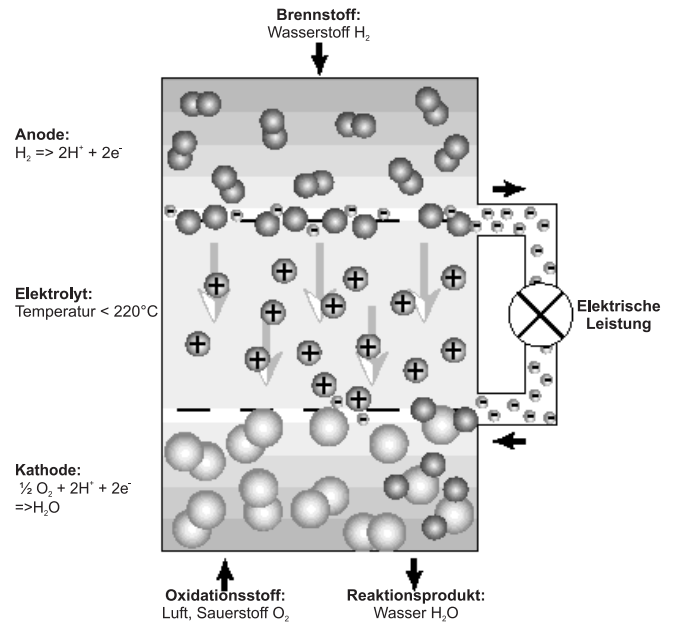


Abb. 2: Funktionsprinzip einer PAFC-Brennstoffzelle

gases ist, umgesetzt wird. Es stehen mehrere Verfahren zur Reformierung von einfachen Kohlenwasserstoffen wie Methan zur Verfügung [10, 11], die in der Fachliteratur ausführlich beschrieben werden. Die Reformierung dieser Gase ist eine endotherme Reaktion. Bei den nachfolgend angegebenen Wirkungsgraden sind diese Energieeinbußen durch die Refor-

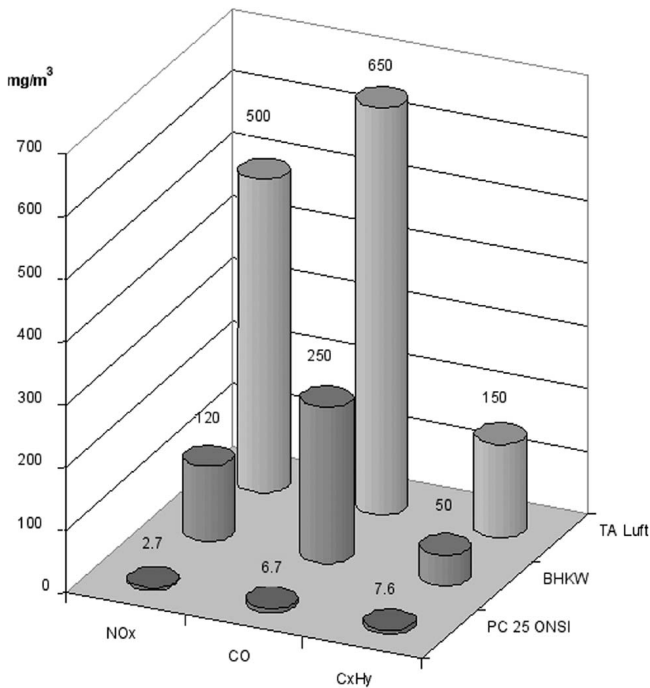


Abb. 3: Gegenüberstellung mittlerer Emissionswerte für die Brennstoffzelle PC25, ein BHKW und der Grenzwerte nach TA Luft [8]

mierung bereits berücksichtigt, sodass es sich um tatsächliche System-Wirkungsgrade handelt.

Die derzeitigen Anlagen erreichen schon heute elektrische Wirkungsgrade von 40 % [12]. Da die Brennstoffzellentechnologie ein relativ junger Forschungszeitweig ist, können diesem Verfahren enorme Entwicklungsmöglichkeiten eingeräumt werden. Hingegen ist das Entwicklungspotenzial des Verbrennungsmotors nahezu erschöpft. Nach Herstellerangaben werden Brennstoffzellen in Zukunft in der Lage sein, elektrische

Wirkungsgrade von 50 % und mehr zu erreichen. Mit nachgeschalteten Gas- oder Dampfturbinen, in denen die Abwärme von Hochtemperaturzellen genutzt wird, sollen sogar elektrische Wirkungsgrade von über 70 % erreicht werden können [10].

Darüber hinaus besitzen die Brennstoffzellen den Vorteil, dass ihr Betrieb nahezu abgasfrei ist, was einerseits zu einer generellen Verminderung von Abgasemissionen und -immissionen beiträgt und durch den im Vergleich zu konventionellen BHKW höheren Wirkungsgrad zu einer Verringerung des Treibhauseffektes führt. Abbildung 3 [8] stellt die Emissionsgrenzwerte der Technischen Anleitung Luft (TA Luft) den Emissionen eines BHKW und einer Brennstoffzelle PC 25 der Firma ONSI gegenüber.

## 6. Mögliche Einsatzfelder

Auf allen Gebieten der Brennstoffzellentechnologie wird zur Zeit intensiv geforscht. Aus diesem Grund sind nur wenige Hersteller bereit, detaillierte Informationen über ihre Produkte zu veröffentlichen. Die Einsatzfelder lassen sich grob nach der Arbeitstemperatur der Brennstoffzellen unterscheiden. Die Niedertemperatur-Brennstoffzellen, vor allem die Polymer-Elektrolyt Brennstoffzelle (PEFC oder auch PEM), besitzen ein flexibles Leistungsverhalten und eine hohe Leistungsdichte, wodurch kleine Aggregatabmessungen realisiert werden können. Aus diesem Grund ist die PEFC vor allem für die mobile Anwendung geeignet und somit besonders für die Automobilindustrie von großem Interesse. Bis zur Serienreife dieser Zellen muss noch erhebliche kapital- und zeitintensive Entwicklungsarbeit geleistet werden, wobei die sichere und kompakte Bereitstellung des Wasserstoffs eines der Hauptprobleme darstellt. Der Druck auf die Automobilkonzerne, schadstoffarme bzw. schadstofffreie Autos zu produzieren, wächst zusehends [13]. Somit kann spekuliert werden, dass in absehbarer Zeit mit leistungsfähigen Brennstoffzellen dieses Typs zu rechnen ist.

Durch ihre Eigenschaften kann die Niedertemperatur-Zelle für kleinere Anlagen mit einer Leistung von weniger als 100 kW<sub>el</sub> eine interessante Alternative sein. Die kompletten Aggregate könnten kostengünstig in Großserie gefertigt werden. Probleme in der Entwicklung könnten sich eventuell daraus ergeben, dass in der Automobilbranche andere Brennstoffe zum Einsatz kommen, beispielsweise reformiertes Methanol oder reiner Wasserstoff statt Erdgas. Auch werden andere Anforderungen an die Systemdynamik gestellt, während die Langlebigkeit weniger wichtig als bei stationären Anlagen ist. Durch das niedrige Temperaturniveau der Zelle und die aufwendige Gasreformierung kann jedoch kaum damit gerechnet werden, dass der elektrische Wirkungsgrad von stationären kleinen PEFC-Anlagen den von PAFC-Anlagen erreicht. Bei der Nutzung in Kläranlagen könnte sich das niedrige Niveau der Nutzwärme (Zelltemperatur max. 80 °C) als negativ erweisen.

Wie bereits erwähnt, stellt die Mitteltemperatur-Brennstoffzelle den am weitesten entwickelten Typ dar. Insbesondere sind hier die Entwicklungen der amerikanischen Firma ONSI Corporation zu nennen, die bis zum Jahre 1998 144 BHKW-Anlagen des Typs PC 25 verkauft hat. Inzwischen bietet ONSI neben der herkömmlichen PC 25, die mit Erdgas gespeist werden muss, auch eine Biogasvariante dieses Zelltyps an. Eine dieser Anlagen ist seit dem Frühjahr 2000 auf dem Klärwerk Köln-Rodenkirchen im Einsatz.

Allgemein lässt sich sagen, dass die Mitteltemperatur-Zellen im Marktsegment der klassischen BHKW anzusiedeln sind. Aus diesem Grund ist dieser Typ für den Einsatz auf Kläranlagen prädestiniert. Experten vermuten, dass die Brennstoffzellen-Technologie sich erst im Marktsegment BHKW etablieren muss, bevor sie in andere Anwendungsbereichen vordringen kann [8, 14, 15]. Die Anwendung von Brennstoffzellen auf Kläranlagen könnte eine Säule im Marktsegment der BHKW-Anwendungen werden. Durch elektrische Wirkungsgrade, die denen der konventionellen BHKW ähneln, und das hohe, einfach zu nutzende Temperaturniveau qualifizieren sich die Mitteltemperatur-Brennstoffzellen für die Energieversorgung von Kläranlagen.

Im Bereich der Hochtemperatur-Brennstoffzellen besteht noch Entwicklungsbedarf. Es existieren nur wenige großtechnische Versuchsanlagen, und hinsichtlich einer kommerziellen Realisierung sind derzeit nur schwerlich Aussagen zu treffen. Vor allem die Materialanforderungen sind bei diesen Zelltypen wegen der hohen Arbeitstemperaturen extrem. Trotzdem besitzen die Hochtemperatur-Brennstoffzellen das größte Potenzial aller Brennstoffzellensysteme bezüglich des elektrischen Wirkungsgrades im stationären Bereich. Auch sollten sie am besten von allen Typen direkt mit Klärgas betrieben werden können, sofern es vorher von Schwefelverbindungen und anderen Katalysatorgiften gereinigt wurde.

### 7. Ausblick

Die Möglichkeiten und Anforderungen von Brennstoffzelle und Kläranlage passen grundsätzlich gut zueinander. Zum einen produziert die jeweilige Anlage das, was die andere benötigt (Symbiose), zum anderen stehen beide Systeme für eine ökonomisch und ökologische High-Tech-Lösung auf ihrem jeweiligen Fachgebiet. Ein gemeinsames Konzept scheint nicht nur ökonomisch und technisch realisierbar, sondern ist

auch ein Schritt in Richtung eines verantwortungsvollen Umweltmanagements.

Die Energieversorgung einer Abwasserreinigungsanlage bietet für die Brennstoffzellentechnologie einen hervorragenden Markteinstieg. Durch die Struktur des Energiebedarfs (mehr als die Hälfte der Energie wird in elektrischer Form benötigt) kann die Brennstoffzelle bei entsprechender Leistung gegenüber dem klassischen BHKW nicht nur konkurrieren, sondern langfristig sogar dominieren.

Seitens der Siedlungswasserwirtschaft sollte außerdem ein Interesse an einer Implementierung der Brennstoffzellentechnologie bestehen, da das Ansehen der Abwasserwirtschaft durch den Einsatz solcher innovativer Technologien nur verbessert werden kann.

Die derzeitigen Schwächen der Brennstoffzellentechnologie dürfen jedoch nicht übersehen werden. Dazu zählen die noch kurze Lebensdauer der eigentlichen Zellen sowie die hohen Investitionen und Betriebskosten. An beiden Problemen wird derzeit mit Hochdruck gearbeitet, so dass kurz- oder mittelfristig leistungsfähige Aggregate zur Verfügung stehen werden.

Meldet die Abwassertechnik jetzt ihr Interesse an, so kann sie eventuell Einfluss auf die Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie nehmen und somit die besten Voraussetzungen für einen zukünftigen Einsatz von Brennstoffzellen auf Kläranlagen schaffen. Für die Erarbeitung bedarfsorientierter Entwicklungskonzepte ist die fachübergreifende Zusammenarbeit der Fachrichtungen Maschinenbau (insbesondere Energie- und Verfahrenstechnik) und Siedlungswasserwirtschaft unerlässlich.

### Literatur

- [1] Die ökologische Bewertung einer Kläranlage – Vor- und Nachteile von zwei Ökobilanzmethoden; S. Fahner, H. Bühner, C. Grabski, T. Heim; *Korrespondenz Abwasser*, 7/1998, S. 1309
- [2] Ökobilanz einer Kläranlage; S. Fahner, H. Bühner, C. Grabski, H. Leuenberger; *Korrespondenz Abwasser*, 6/1996, S. 1053
- [3] Möglichkeiten des Einsatzes von Brennstoffzellen zur thermisch-elektrischen Faulgasnutzung auf Abwasserreinigungsanlagen; I. Schoppe; Diplomarbeit, Universität Hannover; 2000
- [4] Entsorgung von Kläranlagenrückständen in Deutschland; B. Esch, G. Krüger; *Korrespondenz Abwasser*, 6/1999, S. 943

- [5] Klärschlamm; Handbuch der ATV; Ernst & Sohn Verlag; 4. Auflage; Berlin; 1996
- [6] Möglichkeiten der Biogasnutzung; N. Dichtl; Biogas – Verwertung und Aufbereitung; ATV-Schriftenreihe, Band 09; GFA; Hennef; 1997
- [7] Planungsstudie über den wirtschaftlichen Einsatz eines BHKW im erweiterten Klärwerksverbund der Stadt Springe; Lars Kalninsch; Diplomarbeit, Fachhochschule Hannover, Fachbereich Maschinenbau; Hannover, 1995
- [8] Brennstoffzelle als Energiewandler; W. Drenckhahn, K. Hassmann; *Energie-wirtschaftliche Tagesfragen*, 43. Jg., Heft 6; 1993
- [9] Kostenvergleichsrechnung am Beispiel Faulgasverwertung auf Kläranlagen; J. Hoffmann, R. Schrader; *Korrespondenz Abwasser*, 5/1997, S. 910
- [10] Hydrogen generation from natural gas for the fuel cell systems of tomorrow; A. L. Dicks; *Journal of Power Sources*; Jg. 6; 1996
- [11] Reformierung von Erdgas: Wasserstoffversorgung für Membranbrennstoffzellen; A. Heizel, D. Schlegel, B. Vogel; Einsatz von Brennstoffzellen, 5. Fachforum; Hamburg; 1998
- [12] Brennstoffzellen – Ein Überblick; K. Ledjeff-Hey, F. Mahlendorf, J. Roes; 6. Fachforum, Einsatz von Brennstoffzellen; Leipzig; 1999
- [13] Brennstoffzelle, ein Fahrzeugantrieb der Zukunft; K. E. Noreikat; Energieversorgung mit Brennstoffzellenanlagen; VDI-Berichte Nr. 1174; VDI Verlag GmbH; Düsseldorf; 1995
- [14] Die Brennstoffzelle läuft sich warm; W. Baier; Standpunkt, Siemens AG / KWU; 11/1997
- [15] Effiziente Verstromung von Biogas aus der Kovergärung landwirtschaftlich angebauter Energiepflanzen und organischen Abfälle aus Kommunen und Landwirtschaft in Brennstoffzellen; R. Loock, B. Büttner, T. Foellmer, U. Kilian, S. Diehle; Machbarkeitsstudie der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.; Hamburg; 1997

### Autoren

*Dipl.-Ing. Ingo Schoppe*  
CSD Ingenieure und Geologen AG  
Hess Straße 27 d, CH-3097 Liebefeld  
E-Mail: i.schoppe@csd.ch

*Dipl.-Ing. Daniel Wendler, Prof. Dr.-Ing. Karl Heinz Rosenwinkel*  
Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover  
Welfengarten 1, 30167 Hannover

*Dipl.-Ing. Claus Linnemann, Prof. Dr.-Ing. Stephan Kabelac*  
Institut für Thermodynamik der Universität Hannover  
Callinstraße 36, 30167 Hannover

