

## **FORSCHUNGSBERICHTSBLATT**

### **„Systemintegration von Brennstoffzellen auf Kläranlagen - Potenzialabschätzung für Baden-Württemberg“**

Förderkennzeichen: BWI 22006

#### **Kurzbeschreibung des Forschungsergebnisses**

Die Ziele des Vorhabens umfassen die Potenzialabschätzung einer Nutzung von Klärgas in Brennstoffzellen sowie die Ermittlung eines Anforderungs- und Einsatzprofils für den Einsatz von Brennstoffzellen auf Kläranlagen. Des Weiteren sollen die Integration zusätzlicher Komponenten und Verfahrensschritte in den Kläranlagenbetrieb sowie der Einsatz verbesserter Anlagentechnik, auch im Hinblick auf einen energieautarken Betrieb von Kläranlagen, untersucht werden.

#### Grundlagen

Um das vorhandene Potenzial der Nutzung von Klärgas in Brennstoffzellen abzuschätzen, werden in einem ersten Schritt der Grundlagenermittlung zunächst alle Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung (Faulung) in Baden-Württemberg erfasst, da Klärgas bei der Abwasserreinigung nur während des Verfahrensschrittes der anaeroben Schlammstabilisierung entstehen kann. Da kleinere Kläranlagen überwiegend den Schlamm simultan aerob stabilisieren und damit nicht über den entscheidenden Verfahrensschritt zur Erzeugung von Klärgas verfügen, kommen in Baden-Württemberg nur 269 von insgesamt 1.118 Kläranlagen für die Potenzialabschätzung in Frage. Auf diesen Kläranlagen werden jährlich rund 584,7 GWh Klärgas produziert. Diese Ergebnisse basieren sowohl auf der Auswertung verschiedener statistischer Rahmendaten als auch auf einer im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Umfrage.

Im zweiten Schritt werden im Rahmen einer landesweiten Potenzialabschätzung der Einsatz von Anlagen zur thermischen Klärschlamm-trocknung, der Einsatz von Elektrolyseuren und die Möglichkeiten der Co-Fermentation betrachtet. Dabei stellt es sich vor allem aus ökonomischen Gründen als nicht zielführend heraus, diese in diesem Vorhaben eingehender zu diskutieren. Daneben müssen ungeklärte rechtliche Aspekte, fehlende Erfahrungswerte und mangelnde verfahrenstechnische Randbedingungen als Hindernisse genannt werden.

In einem weiteren Schritt werden die zur Klärgasverstromung geeigneten Brennstoffzellentypen und die notwendigen Schritte zur Klärgasaufbereitung bestimmt. Brennstoffzellen gibt es in unterschiedlichen Varianten, die sich vor allem im verwendeten Elektrolytmaterial unterscheiden. Aus technischer Sicht erweisen sich Hochtemperaturbrennstoffzellen der Typen MCFC und SOFC zur Klärgasnutzung besonders geeignet. Neben den hohen erreichbaren

elektrischen Systemwirkungsgraden von 48 % bzw. 50 % sprechen auch die Toleranz gegenüber den im Klärgas enthaltenen  $\text{CO}_2$ - und CO-Anteilen sowie die Möglichkeit zur energetisch günstigen internen Reformierung für diese beiden Brennstoffzellentypen. Für den dauerhaften Betrieb dieser Brennstoffzellen auf Kläranlagen ist eine Aufbereitung des Klärgases erforderlich. Die notwendigen Maßnahmen der Aufbereitung umfassen die Trocknung des Klärgases sowie die Abtrennung von Schwefel-, Halogen- und Siloxanverbindungen. Das ermittelte, zweistufige Anlagenschema zur Klärgasreinigung wird sowohl den technischen als auch den ökonomischen Anforderungen gerecht.

Anhand der Erkenntnisse der ersten Projektabschnitte wird eine Modellkläranlage für 100.000 Ausbau-EW mit einstufiger Belebungsanlage, vorgeschalteter Denitrifikation und anaerober Schlammstabilisierung (Faulung) definiert, die dem typischen Aufbau einer größeren Kläranlage in Baden-Württemberg entspricht. Die Modellkläranlage entspricht auch hinsichtlich des Energieverbrauchs den baden-württembergischen Durchschnittsverhältnissen. Für die Modellanlage ergibt sich ein Stromverbrauch von 2,69  $\text{GWh}_{\text{el}}/\text{a}$  und ein Wärmeverbrauch von 1,83  $\text{GWh}_{\text{th}}/\text{a}$  bei einer Klärgasproduktion von 4,23  $\text{GWh}/\text{a}$ . Die erhaltenen Werte für das Energieangebot und den Energiebedarf stellen die Grundlage zur Untersuchung der Energieversorgung der Modellkläranlage durch Brennstoffzellen und Vergleichstechnologien dar.

Für die ausgewählten Brennstoffzellentypen wird die Energieversorgung der Modellkläranlage in einer ganzheitlichen Bilanzierung im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse von der Wiege bis zu Bahre in energetischer und ökologischer Hinsicht analysiert. Dabei weisen Brennstoffzellen Optimalwerte des Primärenergiebedarfs von 6,23  $\text{GWh}/\text{a}$  (MCFC) bzw. 6,09  $\text{GWh}/\text{a}$  (SOFC) und der kumulierten  $\text{CO}_2$ -Emissionen von 531  $\text{t}_{\text{CO}_2}/\text{a}$  (MCFC) bzw. 487  $\text{t}_{\text{CO}_2}/\text{a}$  (SOFC) auf. Es ergeben sich sowohl bezüglich des Primärenergiebedarfs als auch der kumulierten  $\text{CO}_2$ -Emissionen für die gegebenen Rahmenbedingungen der Modellkläranlage optimale Anlagengrößen von 280  $\text{kW}_{\text{el}}$  für MCFC bzw. 290  $\text{kW}_{\text{el}}$  für SOFC.

Zum Vergleich wird mit Gasmotor-BHKW die derzeit verbreitetste Technologie zur Klärgasverstromung untersucht. Außerdem wird als weitere Variante auch die getrennte Erzeugung von Strom und Wärme betrachtet. Die Variante Gasmotor-BHKW weist zwar bei einer Leistungsgröße von 210  $\text{kW}_{\text{el}}$  mit einem minimalen Wert von 7,17  $\text{GWh}/\text{a}$  einen höheren Primärenergiebedarf und mit 802  $\text{t}_{\text{CO}_2}/\text{a}$  einen deutlich höheren  $\text{CO}_2$ -Ausstoß als beide untersuchten Brennstoffzellentypen auf; sie schneidet jedoch für beide untersuchten Kategorien günstiger ab als die getrennte Erzeugung von Strom und Wärme mit Werten für den Primärenergiebedarf von 8,75  $\text{GWh}/\text{a}$  und kumulierten  $\text{CO}_2$ -Emissionen in Höhe von 1.800  $\text{t}_{\text{CO}_2}/\text{a}$ . Durch den Einsatz von BHKW zur Strom- und Wärmeerzeugung aus Klärgas zur Energieversorgung der Modellkläranlage lassen sich gegenüber der getrennten Erzeugung von Strom und

Wärme ebenfalls Vorteile beim Primärenergiebedarf und bei den kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen realisieren, allerdings in geringerem Umfang, als dies durch den Einsatz von Brennstoffzellen möglich wäre.

Die wirtschaftliche Analyse des Versorgungsfalls Modellkläranlage weist beiden Brennstoffzellen gegenüber dem BHKW höhere Vollkosten der Energieversorgung zu. Auch die getrennte Erzeugung von Strom und Wärme schneidet unter den aktuellen Rahmenbedingungen wirtschaftlich günstiger ab als der Brennstoffzelleneinsatz. Die Ursache für den ökonomischen Nachteil der Brennstoffzellen liegt in den aktuell hohen Investitionskosten. Um mit der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme kostenseitig konkurrieren zu können, müssen die Investitionskosten der Brennstoffzellen um jeweils 50 % auf Werte von 3.330 €/kW<sub>el</sub> (300 kW<sub>el</sub>-MCFC) bzw. 5.340 €/kW<sub>el</sub> (200 kW<sub>el</sub>-SOFC) sinken. Die entsprechenden Werte für die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit zu BHKW betragen 1.330 €/kW<sub>el</sub> (300 kW<sub>el</sub>-MCFC) bzw. 2.140 €/kW<sub>el</sub> (200 kW<sub>el</sub>-SOFC), was gegenüber den aktuellen Werten einer notwendigen Kostenreduktion um 80 % entspricht. Mit den aktuellen Investitionskosten lassen sich CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten von 74 €/t<sub>CO2</sub> (MCFC) bzw. 138 €/t<sub>CO2</sub> (SOFC) gegenüber der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme erreichen. Gegenüber dem BHKW-Einsatz betragen die aktuellen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten der Brennstoffzellen im günstigsten Fall 680 €/t<sub>CO2</sub> (MCFC) bzw. 851 €/t<sub>CO2</sub> (SOFC).

In einem weiteren Schritt wird die bisherige Anlagentechnik der Modellkläranlage durch Komponenten und Baugruppen mit reduziertem Energiebedarf ersetzt. Dabei bleibt das Verfahrensschema der Modellkläranlage unverändert. Mit der neuen Anlagentechnik kann der Strombedarf der Modellkläranlage bis auf 2,00 GWh<sub>el</sub>/a reduziert werden. Gegenüber der herkömmlichen Anlagentechnik bedeutet dies eine Einsparung von 25,4 %. Die Werte für den Wärmebedarf der Kläranlage und das Klärgasaufkommen bleiben unverändert. Durch den Einsatz stromsparender Anlagentechnik lässt sich sowohl der Primärenergiebedarf als auch der CO<sub>2</sub>-Ausstoß gegenüber der Verwendung herkömmlicher Anlagentechnik, unabhängig von der gewählten Art der Energieversorgung, deutlich senken. Die Einsparungen beim Primärenergiebedarf betragen für die jeweils optimalen Anlagengrößen der Brennstoffzellen 27,4 % (MCFC) bzw. 28 % (SOFC), die kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen gehen um 87 % (MCFC) bzw. 95 % (SOFC) zurück. Auch bei der Energieversorgung der Modellkläranlage mit energiesparender Anlagentechnik durch BHKW oder getrennte Erzeugung von Strom und Wärme sinken die Werte gegenüber der Anlage mit durchschnittlicher Anlagentechnik. Für das BHKW ergeben sich Reduktionen des Primärenergiebedarfs um 24 % und der kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen von 57 %. Die entsprechenden Werte für die getrennte Erzeugung von Strom und Wärme betragen 19 % Einsparung beim Primärenergiebedarf und 25 % bei den kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Es zeigt sich, dass sich auch durch den Einsatz energie-

sparender Kläranlagentechnik, unabhängig von der eingesetzten Technologie zur Energieversorgung der Kläranlage, beträchtliche Effekte bezüglich Treibhausgasminderung und Ressourcenschonung erzielen lassen. In diesem Fall lässt sich durch den Einsatz der Brennstoffzellen eine Stromautarkie der Kläranlage erreichen, d. h., es kann geringfügig mehr Strom ins Netz eingespeist werden, als bezogen wird. Dieser Effekt tritt jedoch nur bei gleichzeitigem Zukauf von Erdgas zur Wärmeversorgung bei Spitzenlastzeiten ein, so dass die vollständige Energieautarkie noch nicht ganz erreicht wird.

Leider liegen zur Modernisierung der Anlagentechnik keine Kostendaten vor. Daher lassen sich für diesen Fall weder die Betriebskosten noch die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten ermitteln. Da sowohl der Primärenergiebedarf als auch der CO<sub>2</sub>-Ausstoß genau um die von der Erzeugung der eingesparten Strommengen verursachten Menge zurückgehen, bleiben auch die optimalen Anlagengrößen beider Brennstoffzellen gegenüber der Modellkläranlage mit durchschnittlicher Anlagentechnik unverändert.

#### Potenzialabschätzung für Baden-Württemberg

Als abschließender Schritt werden die technischen Potenziale der Klärgasnutzung in Baden-Württemberg bestimmt. Dabei ergeben sich technische Neubaupotenziale für Brennstoffzellen von 4,4 MW<sub>el</sub> (MCFC) bzw. 4,7 MW<sub>el</sub> (SOFC) sowie technische Potenziale aus dem Ersatz bestehender BHKW von 28,7 MW<sub>el</sub> (MCFC) bzw. 30,1 MW<sub>el</sub> (SOFC). Die daraus resultierenden technischen Gesamtpotenziale der Brennstoffzellen betragen 33,1 MW<sub>el</sub> (MCFC) bzw. 34,8 MW<sub>el</sub> (SOFC). Mit diesen Anlagen könnten jährliche Strommengen von 249 GWh<sub>el</sub> (MCFC) bzw. 261 GWh<sub>el</sub> (SOFC) erzeugt werden. Die technischen Potenziale der Brennstoffzelle fallen v. a. auf größeren Kläranlagen an. Diese besitzen einen hohen Anteil am gesamten Klärgasaufkommen in Baden-Württemberg. Dagegen fallen auf kleineren Kläranlagen nur in Ausnahmefällen ausreichende Klärgasmengen zum sinnvollen Betrieb einer Brennstoffzelle an.

Analog zu anderen Technologien der Stromerzeugung (BHKW, Gasturbinen, etc.) sind auch Brennstoffzellen aus wirtschaftlichen Gründen nicht in jeder beliebigen Leistungsgröße am Markt verfügbar. Die derzeit existierenden Demonstrationsanlagen der Hochtemperaturbrennstoffzellen weisen elektrische Leistungen in einem Bereich zwischen 200 und 300 kW<sub>el</sub> auf. Mittelfristig sind marktverfügbare Modulgrößen von 125 kW<sub>el</sub> zu erwarten. Für diesen Fall betragen die technischen Gesamtpotenziale zur Klärgasverstromung in Baden-Württemberg 22,6 MW<sub>el</sub> (MCFC) bzw. 24,1 MW<sub>el</sub> (SOFC). Die mit diesen Anlagen produzierbaren Strommengen belaufen sich auf 170 GWh<sub>el</sub>/a (MCFC) bzw. 181 GWh<sub>el</sub>/a. Damit können 61 % (MCFC) bzw. 62 % der in Baden-Württemberg anfallenden Klärgasmenge in Brennstoffzellen genutzt werden.

Langfristig sind auch kleinere Modulgrößen von Hochtemperaturbrennstoffzellen denkbar. Bei Modulgrößen von 50 kW<sub>el</sub> betragen die technischen Gesamtpotenziale der Klärgasverstromung in Baden-Württemberg 29,5 MW<sub>el</sub> (MCFC) bzw. 30,5 MW<sub>el</sub> (SOFC), womit sich Jahresstrommengen von 221 GWh<sub>el</sub> (MCFC) bzw. 229 GWh<sub>el</sub> (SOFC) erzeugen lassen. Für diesen Fall beträgt der Anteil der in Brennstoffzellen nutzbaren Klärgasproduktion 79 % (MCFC) bzw. 78 % (SOFC).

Ein weiterer Punkt der Potenzialabschätzung ist die Ermittlung des zusätzlichen Potenzials der Klärgasnutzung in BHKW. In Baden-Württemberg sind derzeit 30,9 MW<sub>el</sub> BHKW-Leistung auf Kläranlagen installiert, mit denen 93,6 MWh<sub>el</sub>/a Strom erzeugt werden. Der Hauptteil entfällt dabei auf Kläranlagen der Klasse 5.

Aus den bislang nicht zur Stromerzeugung genutzten Klärgasmengen errechnet sich ein technisches Zuwachspotenzial der BHKW von 8,0 MW<sub>el</sub>, mit dem sich 60,4 GWh<sub>el</sub>/a Strom erzeugen lassen. Der Hauptteil des Zuwachspotenzials entfällt mit 7,6 MW<sub>el</sub> bzw. 57,0 GWh<sub>el</sub>/a ebenfalls auf größere Kläranlagen. Dagegen bestehen auf kleineren Kläranlagen für die derzeit anfallenden Klärgasmengen keine bedeutenden Zuwachspotenziale mehr.

### **Fortschritte für die Wissenschaft und/oder Technik**

Mit dem Vorhaben können die derzeitigen Potenziale für den Einsatz der Brennstoffzellentechnik auf Kläranlagen sowohl in energetischer, ökologischer wie auch ökonomischer Sicht aufgezeigt werden. Diese Erkenntnisse ermöglichen die Erschließung eines neuen Marktsegments und die weitere Verbreitung dieser innovativen Technologie. Dies erfordert aber weitere Entwicklungen und Neuerungen sowohl auf Seiten der Kläranlagenbetreiber wie auch der Brennstoffzellenhersteller. Als wesentliche Fortschritte für die Wissenschaft und Technik konnten daher Handlungsempfehlungen definiert werden, die im Abschnitt „Empfehlungen für die Praxis“ eingehend beschrieben werden. Des Weiteren ergibt sich aus dem Vorhaben weiterer Forschungsbedarf, der im Folgenden erläutert wird.

### Weiterer Forschungsbedarf

Kläranlagenseitig steht die weitere Erforschung von Wegen zur energieautarken Kläranlage im Mittelpunkt, hierbei sind v. a. Verfahrenskonzepte der Abwasserreinigung mit geringem Energiebedarf noch unzureichend erforscht. Auch bei der Ermittlung der Investitions- und Betriebskosten von energiesparender Anlagentechnik besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. Weiterhin sind Analysen des Energieverbrauchs (Strom und Wärme) von Kläranlagen in möglichst hoher zeitlicher Auflösung nach Verbrauchergruppen mit dem Ziel der Bestimmung von Richtwerten sowohl aus ökologischen als auch aus ökonomischen Aspekten ein vielversprechendes Forschungsgebiet. Daraus kann im weiteren auch eine Korrelation zwischen erforderlichen anlagentechnischen Investitionen und damit erreichbaren Energie-sparpotenzialen auf Kläranlagen ermittelt werden.

Der Einsatz von Elektrolyseuren auf Kläranlagen kann im Rahmen des vorliegenden Projekts u. a. wegen fehlender überschüssiger Strommengen nicht näher erörtert werden. Angesichts der Entwicklung im Bereich der Wasserstoffwirtschaft muss diese Technologie bezüglich der sowohl in technischer als auch in ökonomischer Hinsicht zu erwartenden Fortschritte im Auge behalten werden.

Die Klärschlamm Entsorgung in Baden-Württemberg scheint mittelfristig gesichert; durch sich abzeichnende Änderungen der rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen müssen die Sicherheit und Wirtschaftlichkeit der Entsorgungswege jedoch laufend hinterfragt werden. Insbesondere sind hierbei die anstehenden Veränderungen in der deutschen Kraftwerkslandschaft, die bisher große Mengen an Klärschlamm aufnimmt, zu berücksichtigen.

Die offenen Fragen auf Seiten der Brennstoffzelle lassen sich zweckmäßig in einem entsprechenden Pilotprojekt behandeln. Dem Pilotprojekt soll eine Vorbild-, Informations- und Verbreitungsfunktion des Einsatzes von Brennstoffzellen im Nischenmarkt Kläranlage zukommen. Den Kern des Pilotprojekts sollte der Demonstrationsbetrieb einer Hochtemperaturbrennstoffzelle auf einer Kläranlage in Baden-Württemberg über einen längeren Zeitraum bilden. Neben dem Nachweis der prinzipiellen Machbarkeit der Klärgasverstromung in Hochtemperaturbrennstoffzellen dient der Dauerbetrieb zur Ermittlung und wissenschaftlichen Auswertung von Betriebsdaten. Im Rahmen des Pilotprojektes sollte die Einbindung der Brennstoffzelle in den Kläranlagenbetrieb erforscht werden. Hierbei ist zunächst die Realisierung einer Aufbereitungsanlage zur Klärgasreinigung erforderlich, mit der das anfallende Klärgas an die Anforderungen der eingesetzten Brennstoffzelle angepasst werden kann. Des Weiteren ist die Nutzung der beim Betrieb entstehenden Abwärme durch Integration der Brennstoffzelle ins Wärmeversorgungsnetz der Kläranlage sicherzustellen.

In der Betriebsphase der Brennstoffzelle können aus den erhaltenen Betriebsdaten Degradationseffekte und Teillastwirkungsgrade für die Klärgasnutzung ermittelt werden. Durch Variation der Anteile von  $\text{CH}_4$  und  $\text{CO}_2$  im Klärgas lassen sich Aussagen zur Nutzbarkeit weiterer biogener Brenngase in Brennstoffzellen gewinnen. Von besonderem Interesse ist hierbei die Ermittlung von Systemwirkungsgraden für einzelne Gassorten. Ein weiterer wesentlicher Punkt im Rahmen des Pilotprojekts wäre die Ermittlung von Rahmendaten zum Personal- und Wartungsbedarf von Hochtemperaturbrennstoffzellen im Dauerbetrieb, über die bisher ebenfalls noch keine wissenschaftlich gesicherten Erkenntnisse vorliegen.

## **Empfehlungen für die Praxis**

Für Kläranlagenbetreiber und Brennstoffzellenhersteller können als Ergebnis der Forschungsarbeiten zahlreiche Handlungsempfehlungen ausgesprochen werden.

### Handlungsempfehlung an Kläranlagenbetreiber

Um Einsparpotenziale beim Energieverbrauch der Kläranlage definieren und nutzen zu können, bedarf es der Ermittlung des exakten Strom- und Wärmebedarfs nach Baugruppen und Komponenten in möglichst hoher zeitlicher Auflösung. Hierzu sollten geeignete Messapparaturen auf Kläranlagen eingebaut sowie die jeweiligen Verbräuche laufend bestimmt und aufgezeichnet werden. Diese Verbrauchswerte können mit äußeren Einflüssen auf den Kläranlagenbetrieb, wie Abwassertemperatur, Lufttemperatur, Abwasserzulaufmenge, Niederschläge etc., korreliert werden. Aus den so gewonnenen Daten lassen sich für jede Kläranlage individuell Indikatoren zur Reduzierung des Energieverbrauchs ableiten.

Mit der Installation stromsparender Anlagentechnik lassen sich auch ohne Brennstoffzelleneinsatz nicht nur der Primärenergiebedarf und die Betriebskosten senken, darüber hinaus ergeben sich auch beträchtliche ökologische Vorteile durch eine drastische Reduktion der kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kläranlage. Gerade bei eventuell erforderlichen Neuinvestitionen sollte dieser Aspekt berücksichtigt werden. Daneben bestehen weitere Energieeinsparpotentiale durch den Einsatz verbesserter Wärmedämmung und der Anwendung energiesparender Verfahren zur Abwasserreinigung. Während die Verringerung der Wärmeverluste kurzfristig erreicht werden kann, stellt jede Umstellung im Verfahrensablauf eine Maßnahme mit entsprechend langer Vorlaufzeit dar, bei der stets die Auswirkungen auf die gesamte Kläranlage betrachtet werden müssen. Beim Betrieb der Kläranlage soll das Personal dazu angehalten werden, dem Leitfaden zur Senkung des Stromverbrauchs auf Kläranlagen zu folgen.

Im Zuge der Potenzialermittlung stellen sich die auf Kläranlagen in Baden-Württemberg installierten BHKW-Kapazitäten als über weite Strecken überdimensioniert heraus, mit der Folge wirtschaftlich nicht optimaler Betriebsweisen mit geringen Jahresnutzungen. Auch werden noch nicht alle vorhandenen BHKW in klärgasgeführter Fahrweise betrieben, wodurch nicht nur die maximal mögliche Stromproduktion aus Klärgas verfehlt wird, sondern auch dem Betreiber geringere EEG-Einspeisevergütungen gewährt werden. Außerdem steigen durch unvollständige Verstromung des Klärgasaufkommens die kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kläranlage durch den erforderlichen höheren Fremdstrombezug.

Für Kläranlagen ohne bisherige eigene Stromerzeugung empfiehlt sich aus ökologischen Gründen die Installation von Stromerzeugungsanlagen, mit dem Einbau optimal dimensionierter BHKW können auch wirtschaftliche Vorteile erzielt werden. Dagegen rechnet sich der

Bau von Behältern zur jahreszeitübergreifenden Speicherung von Klärgas wegen der hohen Investitions- und Betriebskosten im Allgemeinen nicht.

#### Handlungsempfehlung an Brennstoffzellenhersteller

Der größte Nachteil der zur Klärgasverstromung geeigneten Brennstoffzellen liegt in den im Vergleich mit konkurrierenden Technologien zu hohen Investitionskosten. Hier sind erhebliche Kostensenkungen erforderlich, die v. a. durch Einführung von Serienfertigung, aber auch durch apparative Vereinfachungen der Anlagen erzielt werden können.

Zu einer möglichst optimalen Abdeckung des Marktsegments Klärgasverstromung empfiehlt sich die Markteinführung kleinerer Leistungsgrößen von Brennstoffzellen. Einen ersten Schritt könnten Anlagen mit elektrischen Leistungen von 125 kW<sub>el</sub> darstellen, langfristig sind Modulgrößen von 50 kW<sub>el</sub> wünschenswert.

Für die Hersteller von SOFC-Anlagen steht eine Zulassung der Brennstoffzellen nach DVGW G 262 noch aus, die nicht nur für die Klärgasverstromung, sondern auch für die Nutzung weiterer biogener Brenngase, bspw. Biogas, erforderlich ist.