

Aktenzeichen IV-7 – 042 600 003 G

# WaStraK NRW „Einsatz der Wasserstofftechnologie in der Abwasserbeseitigung“ - Phase I

KURZBERICHT

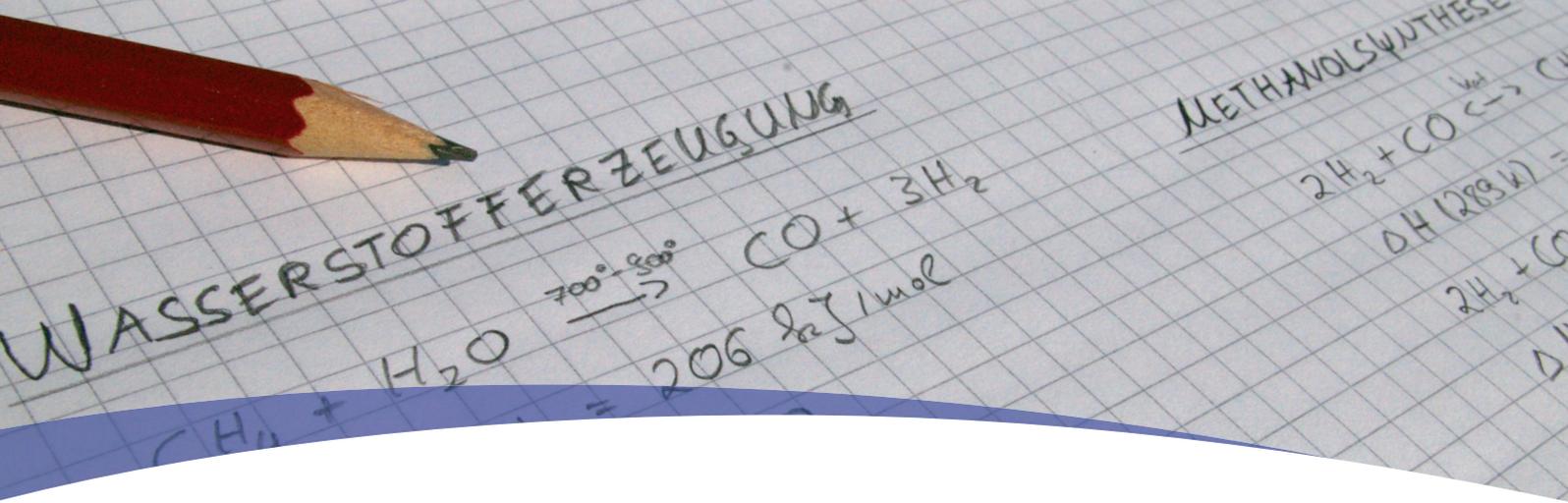
Im Auftrag von:

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,  
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen



Projektpartner:





Aktenzeichen IV-7 – 042 600 003 G

# WaStraK NRW „Einsatz der Wasserstofftechnologie in der Abwasserbeseitigung“ - Phase I

KURZBERICHT

Aachen, im April 2012  
FiW an der RWTH Aachen

Dr.-Ing. F.-W. Bolle



## **Projektbearbeitung**

### **Institution**

Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft  
an der RWTH Aachen (FiW) e.V.  
Kackertstraße 15 - 17  
D-52056 Aachen

TUTTAHS & MEYER Ingenieurgesellschaft für  
Wasser-, Abwasser- und Energiewirtschaft mbH  
Bismarckstr. 2-8  
D-52066 Aachen

Ingenieurbüro Redlich und Partner GmbH  
Beratende Ingenieure für Elektrotechnik  
Rheingauer Straße 9  
D-65388 Schlangenbad

Emschergenossenschaft  
Kronprinzenstraße 24  
D-45128 Essen

### **Bearbeiter**

Dr.-Ing. Friedrich-Wilhelm Bolle  
Dipl.-Ing. Kristoffer Genzowsky  
Dipl.-Ing. Sylvia Gredigk-Hoffmann  
Dipl.-Ing. Michael Reinders  
Dr.-Ing. Henry Riße

Prof. Dr.-Ing. Markus Schröder  
Dr.-Ing. Manja Steinke  
Dipl.-Ing. Bernhard Wöffen

Dipl.-Ing. Frank Illing

Dipl.-Ing. Peter Jagemann  
Dr.-Ing. Karl-Georg Schmelz  
Dipl.-Ing. Patrick Schulte



## Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Zusammenfassung .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Einleitung und Zielsetzung.....</b>   | <b>4</b>  |
| <b>3</b> | <b>Wasserstoff in der Abwasserwirtschaft .....</b>   | <b>5</b>  |
| 3.1      | Technische Möglichkeiten des H <sub>2</sub> -Einsatzes auf Kläranlagen .....   | 5         |
| 3.2      | Rechtsvorgaben, Lenkungs- und Fördermaßnahmen.....   | 9         |
| 3.3      | Optimierungsbedarf und Handlungsbedarf zur Implementierung einer Wasserstofftechnologie auf Kläranlagen in NRW .....   | 10        |
| <b>4</b> | <b>Methanolsynthese aus Faulgas .....</b>  | <b>12</b> |
| 4.1      | Stand der Technik bei der Methanolsynthese.....  | 12        |
| 4.2      | Anwendung von H <sub>2</sub> - und Synthesegas-Technologien auf Kläranlagen zur Synthese von Methanol aus Faulgas..... | 12        |
| 4.3      | Entwicklung eines Verfahrenskonzeptes und Nutzung von Synergieeffekten auf Kläranlagen.....                            | 13        |
| 4.4      | Schaffung einer Planungsgrundlage zur Umsetzung in den Pilotmaßstab.....   | 15        |
| <b>5</b> | <b>Ausblick und Projektphase II .....</b>  | <b>18</b> |
| <b>6</b> | <b>Literatur .....</b>   | <b>20</b> |

## 1 Zusammenfassung

Sowohl die absehbare Endlichkeit fossiler Brennstoffe als auch die Notwendigkeit des Umwelt- und Klimaschutzes erfordern Innovationen für die Energiewirtschaft von morgen. Die Steigerung der Energieeffizienz durch verstärkte Nutzung regenerativer Energien und durch Energieeinsparung sind wesentliche Bestandteile nationaler und internationaler Klimaschutzziele zur Förderung einer nachhaltigen Energieversorgung, wofür auch Kläranlagen ihren Beitrag leisten müssen und können. Kläranlagen fungieren prinzipiell auch als Energieerzeuger insbesondere aus Biogas (Faulgas), welches zudem auch ein potenzieller Ausgangsstoff für die „Veredlung“ zu Biomethan und zu Wasserstoff sein kann. Die Wasserstofftechnologie birgt das Potenzial, einen großen Klimaschutzbeitrag zu leisten. Wasserstoff ist in molekularen Verbindungen ubiquitär verfügbar und kann als Speicher regenerativer Energien sowohl als Fahrzeugtreibstoff als auch zur Erzeugung von elektrischer Energie und Wärme eingesetzt werden. Vor diesem Hintergrund hat das MKULNV NRW das Gesamtvorhaben WaStraK NRW beauftragt, das sich in folgende zwei Arbeitsbereiche untergliedert:

- Band I: Kompendium Wasserstoff in der Abwasserwirtschaft
- Band II: Untersuchungen zur Methanolsynthese aus Faulgas

Das mit Band I zu diesem Vorhaben vorliegende Kompendium enthält eine umfassende Bestandsaufnahme des aktuellen Standes der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik und stellt die Wasserstofferzeugung, -Speicherung, -Transport und -Nutzung von ihrer technischen und wirtschaftlichen Seite für die Abwasserwirtschaft dar. Die gesammelten Kenntnisse werden anhand von nationalen wie internationalen Praxisbeispielen unterlegt.

Grundsätzlich stehen für die **Wasserstofferzeugung** die Verfahren der Dampfreformierung und der Wasserelektrolyse mit relativ großer Entwicklungsreife zur Verfügung. Sowohl bei der Dampfreformierung von Faulgas als auch bei einer regenerativ betriebenen Wasserelektrolyse kann auf Kläranlagen Energie in Form von Wasserstoff in Druckgas-, Flüssig- oder Hydridspeichern für mobile und stationäre Zwecke (intern/extern) gespeichert werden.

Der **Transport** von potentiell auf Kläranlagen erzeugtem Wasserstoff zu möglichen externen Endverbrauchern könnte – sobald ein Pipelinenetz aufgebaut und vorhanden ist – über Wasserstoffpipelines erfolgen. Die Pipelines können neben der Transportfunktion auch eine Speicherfunktion übernehmen und ggf. andere Wasserstoffspeicher substituieren.

Die **direkte Nutzung** des erzeugten Wasserstoffs kann auf Kläranlagen sowohl stationär in einer phosphorsauren Brennstoffzelle (PAFC), Schmelzkarbonatbrennstoffzelle (MCFC) oder oxidkeramischen Brennstoffzelle (SOFC) bzw. in einem H<sub>2</sub>-Gasmotor als auch mobil in Brennstoffzellenfahrzeugen (mit PEM-Brennstoffzelle) erfolgen. Neben dieser direkten Wasserstoffnutzung können auch weitere Energieträger, z.B. in Form von Methanol, Erdgas, Biogas, Faulgas und Abwasser in Brennstoffzellen im mobilen Bereich (PEMFC, DMFC) und

stationären Bereich (PEMFC, PAFC, MCFC, SOFC, mikrobielle Brennstoffzelle) auf Kläranlagen eingesetzt werden.

Wasserstoff kann weiterhin auch als Ausgangsstoff zur Synthese von Energieträgern wie z.B. Methanol eingesetzt werden. Hier setzen die Untersuchungen in Band II an, welche zum Ziel haben, eine Analyse und Weiterentwicklung der Methanolsynthese aus Faulgas durchzuführen und dabei die Integration von regenerativ erzeugtem H<sub>2</sub> bzw. CO<sub>2</sub> in die Synthese verfahrenstechnisch vorzubereiten. Vorteile von Methanol gegenüber Wasserstoff sind die leichtere Handhabung und die vereinfachte Speicherung, da Methanol flüssig und damit drucklos und verlustfrei gespeichert werden kann. Die Anwendungsmöglichkeiten von Methanol sind ebenso vielfältig. Die Methanolerzeugung besteht aus den zwei grundlegenden Teilschritten

- 1) Synthesegasherstellung, die zumeist über Reformierung erfolgt, und
- 2) die eigentliche Methanolsynthese.

Im Rahmen des Bandes II zu diesem Vorhaben wurden die Dampfreformierung, die autotherme Reformierung und die sog. trockene Reformierung von CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> untersucht. Für die in einer weiterführenden Phase 2 angestrebten halbtechnischen Untersuchungen zur Umwandlung von Methan aus Faulgas in Methanol ergaben die bisherigen Untersuchungen, dass die Bereitstellung eines Großteils des Synthesegases über die **Wasserdampfreformierung** als die zuverlässigste Methode erscheint. Für die Methanolsynthese stehen grundsätzlich die Verfahrensgruppen **Methanolsynthese in der Gasphase über feste Katalysatoren** sowie die **Synthese in der Flüssigphase eines suspendierten Katalysators** zur Verfügung. Die Methanolsynthese in der Gasphase aus einem CO/ CO<sub>2</sub>/ H<sub>2</sub>-Gemisch ist auch in sehr kleinem Maßstab realisierbar. Die Herausforderung liegt in der energetischen Prozessoptimierung auch für kleine Anlagen sowie der Ableitung von Optimierungspotenzialen bzw. Identifikation notwendiger Modifikationen zur Einbindung von möglichst hohen Anteilen an CO<sub>2</sub> in den Prozess.

Ein weiterer wesentlicher Ansatzpunkt ist die Einbindung der Methanolsynthese in das energetische Gesamtkonzept der Kläranlage. Große Kläranlagen weisen im Sommerhalbjahr erhebliche Wärmeüberschüsse auf. Gleichzeitig produzieren Kläranlagen-BHKW kontinuierlich Grundlaststrom, auch in Zeiten hoher Einspeisung von Photovoltaik- oder Windkraftstrom. Hier soll das Konzept Methanolherstellung aus Faulgas anknüpfen, indem gezielt nur so viel Faulgas verstromt wird, dass mit der BHKW-Abwärme der Wärmebedarf der Kläranlage gedeckt und das nicht verstromte Faulgas in Methanol umgewandelt werden kann. Das erzeugte Methanol dient als leicht speicherbarer Energieträger für Spitzenlastzeiten bzw. sogar als Regelenenergie in Zeiten geringer Elektrizitätsnachfrage.

Die Kosten aktuell am Markt verfügbarer Anlagen zur Wasserstofferzeugung, -Speicherung sowie Nutzung sind für eine umfassende Markteinführung noch zu hoch. Technische

Optimierungspotenziale, insbesondere im Bereich der Wirkungsgrade, Speicherefähigkeit sowie Lebensdauer einzelner Komponenten, verhindern weiterhin die breite praktische Umsetzung. Unter ökologischen wie ökonomischen Gesichtspunkten, auch vor dem Hintergrund tendenziell weiter steigender Energiepreise ergibt sich noch erheblicher Bedarf an Forschung und Entwicklung. Insbesondere Programme, welche sich aktuell noch in der Grundlagenforschung befinden, z.B. die Entwicklung mikrobieller Brennstoffzellen (MFC) bzw. mikrobieller Elektrolyse-Zellen (MEC) oder die photokatalytische Wasserstoffsynthese, besitzen vielversprechendes Potential zur Stützung der Energiewende auch in der Abwasserwirtschaft.

Perspektivisch können Kläranlagen künftig aufgrund ihrer gleichmäßigen Verteilung in Deutschland entscheidend den Aufbau einer dezentralen **Energieinfrastruktur** unterstützen. Kläranlagen als energetische Großverbraucher, welche in jeder Stadt vorhanden sind, liefern die Möglichkeit, die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie weiter zu etablieren und die konventionelle Kraft-Wärme-Kopplung zu verbessern. Die Rolle der Wasserwirtschaft beim Übergang von einer heute kohlenstoffbasierten zu einer zukünftig möglicherweise wasserstoffbasierten Energieinfrastruktur ist die eines **Katalysators**.

Die erfolgreiche Realisierung dieses Übergangs ist eine **gesamtgesellschaftliche Herausforderung**, die zielgerichtete politische – dabei vor allem gesetzgeberische – und volkswirtschaftliche Weichenstellungen erfordert. Zur Steigerung von Entwicklung und Nutzung muss insbesondere der Ausbau einer Wasserstoffinfrastruktur mit entsprechenden Knotenpunkten vorangetrieben werden. Mit einer politisch geförderten Wasserstoffinfrastruktur und verstärkter Realisierung von Pilot- und Leuchtturmprojekten kann der Anreiz zur weiteren Verbesserung der Betriebsfähigkeit und Marktverfügbarkeit auf Herstellerseite sowie die Akzeptanz hinsichtlich alternativer Energieinfrastrukturen und der Nutzung der Wasserstofftechnologie für die Zukunft auf Seiten der Betreiber großtechnischer Anlagen verstärkt werden. Hier ist ein intensiveres Zusammenwirken aller involvierten Interessengruppen und der Öffentlichkeit notwendig.

Der Beitrag der Abwasserentsorgung bei Entwicklung und Ausbau der Wasserstoffwirtschaft ist im Wesentlichen auf die Umsetzung von Demonstrationsvorhaben und die Nutzung entwickelter Technologien beschränkt. Auf Kläranlagen liegt allerdings der besondere Vorteil eines weitreichenden Anwendungsfeldes vor, womit die Möglichkeit zur pilothaften Implementierung von Gesamtkonzepten und somit der Abbildung der herausfordernden Schnittstellenanpassung und -optimierung gegeben ist.

## 2 Einleitung und Zielsetzung

Die Erkenntnisse der letzten Jahre zeigen, dass die Energieversorgung der Industriegesellschaft, wie wir sie heute kennen, sowohl unter dem Aspekt des Klima- und Umweltschutzes als auch durch die schlichte Endlichkeit fossiler Energieträger in naher Zukunft nicht mehr tragbar sein wird. Im Jahr 2008 wurden in Deutschland 65.601 Mio. L Treibstoff durch den Verkehrssektor [1] sowie 637,6 TWh elektrische Energie verbraucht [2]. Die Erzeugung dieser elektrischen Energie erfolgte zu 62 % aus fossilen Brennstoffen, zu 23 % aus Kernenergie und zu 15 % aus regenerativen Quellen [2]. Um diesen Energiebedarf auch in Zukunft nachhaltig und wirtschaftlich zu decken, ist die zukünftige Weiterentwicklung und Erschließung regenerativer Energiequellen, Energiespeicher und Energienutzungspfade geboten.

Ein Pfad der zukunftsweisenden Energieversorgung liegt in der Wasserstofftechnologie. Wasserstoff wird als der ideale Energieträger für die emissionsfreie Energieversorgung und emissionsfreie Antriebssysteme der Zukunft gesehen.

Die Wasserstofftechnologie birgt für den Standort Kläranlage sowohl hinsichtlich einer möglichen Energieautonomie als auch als Brückenkopf für eine zukünftige Wasserstoffinfrastruktur erhebliches Potential. Daher sollen im Rahmen des Arbeitsbereiches I „Kompendium Wasserstoff in der Abwasserwirtschaft“ folgende Arbeitspakete hinsichtlich der Anforderungen und Möglichkeiten der Wasserstofftechnologie auf Kläranlagen erarbeitet werden:

- Umfassender Überblick über technische Möglichkeiten und Potenziale zur Wasserstoffherstellung und -Nutzung in Abwasserreinigungsanlagen, differenziert bewertet nach technischer Reife, Marktverfügbarkeit, Prozessstabilität, Effizienz und Wirtschaftlichkeit
- Zusammenstellung nationaler und internationaler Praxisbeispiele
- Darstellung vorhandener Optimierungspotentiale zur Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff auf Kläranlagen samt Ableitung von Handlungsempfehlungen

In Ergänzung dazu sollen im Arbeitsbereich II „Untersuchungen zur Methanolsynthese aus Faulgas“ die Möglichkeiten und Anforderungen der Synthese von Methanol als zukünftigem alternativem Energiespeicher erarbeitet werden. Darüber hinaus hat Arbeitsbereich II zum Ziel, eine Analyse und Weiterentwicklung der Methanolsynthese aus Faulgas durchzuführen und dabei die Einkopplung von regenerativ erzeugtem  $H_2$  bzw.  $CO_2$  in die Synthese verfahrenstechnisch vorzubereiten. Weiterhin sollen Überlegungen für die Umsetzung einer Methanolsynthese auf Kläranlagenstandorten angestellt werden.

Für die Auslegung der Methanolsynthese auf Kläranlagen soll die Nutzung von Synergieeffekten mit den bereits vorhandenen oder möglichen zusätzlichen Prozessen untersucht werden. Zur Erzeugung weiterer Mengen an Wasserstoff für eine Methanolsynthese eignet sich auch die Elektrolyse, die durch erneuerbare Energie gespeist wird. Insbesondere wird in diesem Forschungsvorhaben die Einbindung von  $CO_2$  in die Methanolsynthese aus Faulgas betrachtet.

### 3 Wasserstoff in der Abwasserwirtschaft

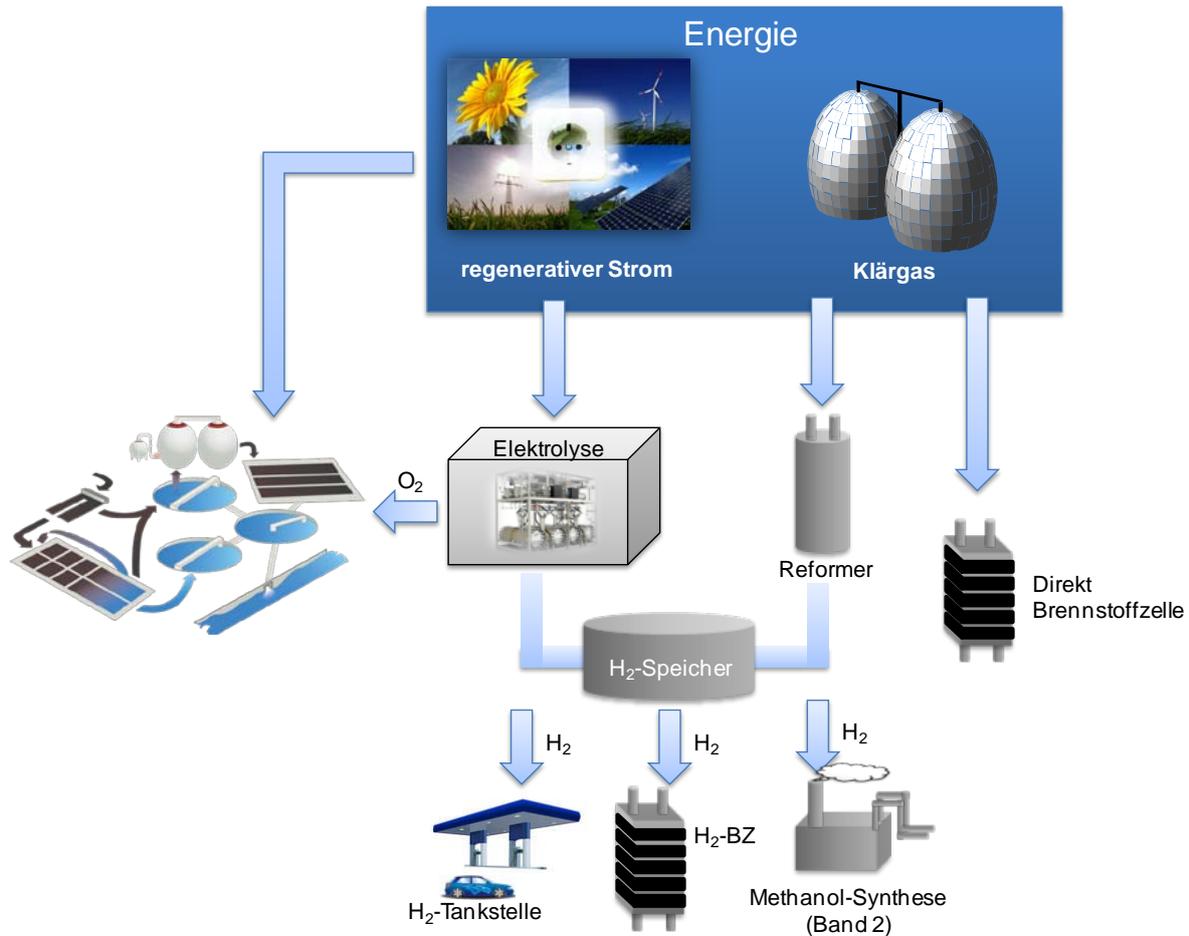
#### 3.1 Technische Möglichkeiten des H<sub>2</sub>-Einsatzes auf Kläranlagen

Unabhängig von vielen Entwicklungs- und Optimierungsanstrengungen verfügbarer Komponenten, die der fundierte Aufbau einer Wasserstoffenergiewirtschaft zukünftig weiterhin erfordern wird, wird ein besonderer Bedarf in der Vernetzung der gesamten Infrastruktur, dem Zusammenspiel der Einzelkomponenten und der Bereitstellung regenerativen Wasserstoffs erkannt. Zumindest in der Übergangsphase von einer heute kohlenstoffbasierten zu einer zukünftig möglicherweise wasserstoffbasierten Energiewirtschaft können Kläranlagen einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag leisten. Falls der Übergang gelingen sollte, bieten Kläranlagen v.a. wegen ihrer besonderen Produktionsbedingungen besondere Synergieeffekte. Darüber hinaus sind Kläranlagen in allen Städten vorhanden und können so als Brückenkopf eines sukzessiv auszubauendes Wasserstoffnetzes dienen. Auf Kläranlagen stehen grundsätzlich die folgenden Möglichkeiten eines regenerativen Wasserstoffeinsatzes zur Verfügung:

1. **Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse von Wasser.** Der bei diesem Prozess gleichzeitig gewonnene Reinsauerstoff kann im Abwasserreinigungsprozess entweder direkt als Sauerstoff oder zur Ozonerzeugung verfahrens- und energieoptimierend eingesetzt werden. So kann der Energieaufwand für die Sauerstoffversorgung der biologischen Abwasserreinigung, der etwa 65 % des Gesamtelektrizitätsverbrauches von Kläranlagen ausmacht, deutlich reduziert oder sogar vollständig substituiert werden.
2. **Wasserstofferzeugung aus dem Faulgas der anaeroben Klärschlammstabilisierung nach Reinigung und Reformierung.**
3. **Wasserstoffspeicherung** in Flüssig-, Druck oder Hydritspeichern.
4. **Wasserstoffnutzung** in Brennstoffzellen, Fahrzeugen und Syntheseprozessen.

Bild 3-1 gibt einen Überblick über die wesentlichen Technologien zur Erzeugung von Wasserstoff und deren Nutzungsmöglichkeiten auf Kläranlagen.

Auch kann der auf Kläranlagen produzierte Wasserstoff nicht nur auf der Kläranlage selbst, sondern auch für externe Nutzer zur Energieversorgung zur Verfügung gestellt werden. Denkbar ist dabei die gesamte in der Wasserstoffenergiewirtschaft diskutierte Bandbreite der Nutzungsoptionen mit der Brennstoffzellentechnologie als proklamiertem Herzstück



**Bild 3-1: Übersicht über die Produktionsmöglichkeiten und die wesentlichen Wasserstoffnutzungspfade auf Kläranlagen**

Durch die  $H_2$ -Erzeugung können Kläranlagen künftig auch als Energieerzeuger, -speicher und -verteiler auftreten und auf diese Weise den Ausbau einer Wasserstoffwirtschaft unterstützen. Als großer Stromverbraucher, aber auch als Stromproduzent bieten Kläranlagen insbesondere in der Implementierungsphase eines neuen Energiemarktes die Chance, die durch die Energiewende zukünftig notwendige Interaktion zwischen dezentralen Stromverbrauchern und Stromerzeugern einerseits und den umgebenden regionalen Energienetzen andererseits zu optimieren.

Die Einsatzkriterien der  $H_2$ -Technologien der einzelnen Bereiche Erzeugung, Speicherung, Transport und Nutzung mit ihren verschiedenen technischen Varianten werden im Rahmen des Vorhabens einzeln betrachtet. Die Rahmenbedingungen und Kriterien für einen technisch sowie wirtschaftlich sinnvollen Einsatz der  $H_2$ -Technologie auf Kläranlagen sind im Folgenden zusammengefasst.

| Kriterien für den Einsatz der H <sub>2</sub> -Technologie auf Kläranlagen |  |  |   |   |   |   |  |  |  |
|---|--|--|---|---|---|---|--|--|--|
|   | Erzeugung                                      |  |   |   |   |   |  |  |  |
|   | Ausbaugröße KA                                 | Input  | Output  | Prozessstabilität   | Abhängigkeiten  | Entwicklungsstand                               | Wirkungsgrad   | Wirtschaftlichkeit   | Sonstige Anforderungen   |
| Faulgas Dampfreformierung   | > 100.000 EW (derzeitige Verfügbarkeitsgrenze) | > 80 m <sup>3</sup> /h Faulgas kontinuierlicher Gasanfall  | > 130 m <sup>3</sup> /h H <sub>2</sub> nach Gasaufbereitung nutzbar, z.B. in Brennstoffzellen             | zeitintensiver Anfahrvorgang (> 6 h), dann kontinuierlicher Betrieb erforderlich                  | Faulgasnutzung/-anfall auf KA<br>H <sub>2</sub> -Abnahme Endverbraucher<br>Anpassung Volumen Wasserstoffspeicher<br><br>selten Faulgasüberschüsse vorhanden, da anfallendes Faulgas bereits genutzt wird (Faulgas-BHKW)   | Marktprodukt, Optimierungspotential vorhanden   | 80 %   | > 800.000 EW   | in Abhängigkeit der Gaszusammensetzung (Spurengase) und Anforderungen des Endverbrauchers (z.B. Brennstoffzelle) aufwändige Aufbereitung des Faulgases   |
| Wasserelektrolyse   | > 60.000 EW                                    | > 3.000 kW, Bezug aus Stromnetz und/oder regenerativen Energien (z.B. Windkraft)<br><br>Spotstromnutzung<br>> 1,5 m <sup>3</sup> /h H <sub>2</sub> O | > 55 kg/h H <sub>2</sub><br>> 440 kg/h O <sub>2</sub> nach Gasreinigung nutzbar, z.B. in Brennstoffzellen | kontinuierlicher und diskontinuierlicher Betrieb (z.B. bei Stromversorgung mit Windkraft) möglich | Art der Stromversorgung (Stromnetz / erneuerbare Energien)<br>H <sub>2</sub> -Abnahme Endverbraucher<br>O <sub>2</sub> -Bedarf / Verfahrenstechnik der Belüftung der biologischen Stufe der KA<br><br>ergänzende Funktion zu weiteren Verfahrenseinheiten (z.B. Dampfreformierung) möglich<br><br>Anpassung Volumen Wasserstoff-/Sauerstoffspeicher | Marktprodukt, Optimierungspotential vorhanden   | 60 – 70 % Gesamtwirkungsgrad<br>ggf. erheblich höher bei Nutzung von Spotstrom, da ggf. alternativ Windkraftträder bei zu großem Wind-/Stromanfall abgeschaltet werden müssten | nicht wirtschaftlich bei hohem Strompreis<br><br>sinnvoller Einsatz für Überschussstrom, bspw. bei Starkwindphasen | Entfeuchtung / O <sub>2</sub> -Eliminierung des Wasserstoffs erforderlich bei Nutzung in einer Brennstoffzelle<br><br>Auf Kläranlagen O <sub>2</sub> -Nutzung möglich; Beitrag zur Substitution der stromintensiven Belüftung → Effizienzsteigerung, Stromsubstitution |
|   | Speicherung                                    |  |   |   |   |   |  |  |  |
|   | Input  | Output   | Verfügbarkeit/Betrieb   | Abhängigkeiten  | Entwicklungsstand   | Wirkungsgrad                                    | Wirtschaftlichkeit   | Sonstige Anforderungen   |  |
| Flüssiggas  | GH <sub>2</sub>                                | LH <sub>2</sub>  | kontinuierlich und diskontinuierlich  | Bemessung Volumen nach H <sub>2</sub> -Bedarf Abnehmer  | Marktprodukt  | 22 - 70 %                                       | Hohe Kosten Anschaffung/Betrieb<br>H <sub>2</sub> -Schlupf   | Vorkühlung auf 200° K  |  |
| Druckspeicher   | GH <sub>2</sub>                                | GH <sub>2</sub>  | diskontinuierlich   | Bemessung Volumen nach H <sub>2</sub> -Bedarf Abnehmer  | Marktprodukt  | 82 – 86 %, abhängig von Druckstufe und Abnehmer |  | Kompression auf 50-700 bar   |  |
| Hydridspeicher  | GH <sub>2</sub>                                | GH <sub>2</sub>  | diskontinuierlich   | Bemessung Volumen nach H <sub>2</sub> -Bedarf Abnehmer  | Marktprodukt mit Optimierungspotential (begrenzte Be-/Entladung)  | 70 – 90 %                                       | Hohe Kosten Anschaffung  | Kompression/Erwärmung  |  |

| Kriterien für den Einsatz der H <sub>2</sub> -Technologie auf Kläranlagen |  |   |   |  |  |  |
|---|--|---|---|--|--|--|
|   | Nutzung  |   |   |  |  |  |
|   | Input  | Leistungs-<br>bereich   | Einsatzbereiche   | Anforderungen Gasqualität  | Entwicklungsstand  | Elektr. Systemwirkungsgrad   |
| PEMFC   | H <sub>2</sub>   | 1-10 kW <sub>elektr.</sub> , bis zu 200 kW <sub>elektr.</sub>   | Mobiler, portabler und stationärer Bereich  | Entfernung von CO <sub>2</sub> , CO und Spurengase   | Prototypen, Feldversuche<br>Optimierungspotential vorhanden  | Potential 70-80 %<br>Aktueller Stand: 38 – 42 %                                    |
| Mobile Nutzung  | GH <sub>2</sub> , LH <sub>2</sub>                                |   | Betankung 200/350/700 bar<br>Busse, Kfz, sonstige Fahrzeuge   | Entfernung von CO <sub>2</sub> , CO und Spurengase   | Marktprodukt<br>Nur wenige Hersteller<br>Brennstoffzellen- / Verbrennungsmotoren   |  |
| H <sub>2</sub> -Motor   | H <sub>2</sub>   |   | Notstromaggregat, energetische Nutzung von Wasserstoffüberschüssen  | Entfernung von CO <sub>2</sub> , CO und Spurengasen  | Demonstrationsanlagen (Prototyp)   | Thermodynamische Begrenzung durch Carnot-Prozess; aktuell: ca. 35%; Potential: 45% |
| DMFC  | Methanol, Luft, reiner Sauerstoff                                |   | Mobiler, portabler, stationärer Bereich<br>Notstromaggregate  |  | Grundlagenforschung  | 20 – 30 % (Zelle)  |
| PAFC  | Erdgas, Biogas, Faulgas<br>Luft, reiner O <sub>2</sub>           | 50 - 200 kW <sub>elektr.</sub>  | stationärer Bereich, direkte Versorgung des Klärwerks mit thermischer Energie möglich (Gebäude/Faultürme) | Entfernung Spurengase<br>Einsatz CO <sub>2</sub> -haltiger Gase bis 45 % möglich   | Marktprodukt   | 38 – 40 %  |
| MCFC  | Erdgas, Biogas, Kohlegas, Faulgas<br>Luft, reiner O <sub>2</sub> | 100 - 300 kW <sub>elektr.</sub>   | stationärer Bereich, thermische Energie nicht direkt nutzbar aufgrund zu hoher Temperaturen               | Entfernung Spurengase N <sub>2</sub> und CO <sub>2</sub> -Konzentrationen wie im Faulgas üblich stellen keine Gefährdung dar | Demonstrationsanlagen (Prototyp)   | bis 65 %   |
| SOFC  | Erdgas, Biogas, Kohlegas<br>Luft, reiner O <sub>2</sub>          | 10 - 25 kW <sub>elektr.</sub><br>Planung: 125 kW <sub>elektr.</sub>   | stationärer Bereich   | Entfernung Spurengase<br>N <sub>2</sub> und CO <sub>2</sub> -Konzentrationen wie im Faulgas ohne Gefährdung                  | Demonstrationsanlagen  | bis 65 %   |
| Methanolsynthese  | H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> bzw. CO                         |   | mobiler Bereich (DMFC, Verbrennungsmotor), chemische Industrie, Petrochemie                               | Entschwefelung   | Marktprodukt bei der Synthese auf Erdgasbasis, Optimierungspotential vorhanden<br>Keine Erfahrungen für alternative Synthesegase wie Bio- oder Faulgas |  |
|   | Input  | Leistungs-<br>bereich   | Einsatzbereiche   | Anforderungen Abwasser   | Entwicklungsstand  | Elektr. Wirkungsgrad, bezogen auf CSB <sub>abb.</sub> (CE-Wert)                    |
| Mikrobielle Brennstoffzelle   | kommunales und industrielles Abwasser (Ablauf Vorklämung)        | 2 kWh <sub>elektr./kg</sub> CSB <sub>abb.</sub><br>(theoretisch bis 4 kWh <sub>elektr./kg</sub> CSB <sub>abb.</sub> ) | Integration in Abwasserreinigungsprozess: Ablauf Vorklämung (Teilstrombehandlung)                         | CSB > 300 mg/L,<br>Temperaturbereich zwischen 12 und 20 °C, pH-Wert > 6,5  | Grundlagenforschung<br>International: Halbtechnik  | je nach Substratart zwischen 40 – 70 %   |

### 3.2 Rechtsvorgaben, Lenkungs- und Fördermaßnahmen

In den für Planung, Genehmigung, Bau und Betrieb zu berücksichtigenden einschlägigen EU-Richtlinien, Gesetzen, Verordnungen, technischen Regeln, Normen und Merkblättern sind bislang teilweise keine hinreichenden spezifischen Vorgaben für Anlagen zur Erzeugung, Speicherung, Transport und Nutzung von Wasserstoff als Energieträger enthalten. Diese Situation fehlender bzw. überwiegend unzureichender gesetzlicher Vorgaben führt zu unverhältnismäßigen Aufwendungen bei der Planung, Genehmigung und Realisierung. Im Einzelfall führt dies zu erheblichen Verzögerungen und zum Teil zu erheblichen monetären Zusatzaufwendungen, um die bestehenden Lücken in den Gesetzen und Verordnungen durch Einzelfallbetrachtungen bewerten und füllen zu können.

Der Gesetzgeber sollte daher die gesetzlichen Rahmenbedingungen zeitnah den Entwicklungen der angestrebten Wasserstoffinfrastruktur anpassen. Als geeignete kurzfristige Maßnahme wäre die Bündelung und Auswertung von Erkenntnissen und Erfahrungen aus bereits mit dem Thema befassten Arbeitskreisen von Fach- und Berufsverbänden, Forschungs- und Entwicklungsvorhaben sowie von Gutachten und Behördenvertretern angeraten. Hieraus könnten die Grundlagen für die erforderlichen Anpassungen der Gesetze und Verordnungen sowie Erfahrungen aus Genehmigungsverfahren und der Überwachungstätigkeit gezogen werden.

Die nachfolgenden Gesetze dienen unter anderem politisch motivierten Lenkungsmaßnahmen, insbesondere der Förderung regenerativer Energiekonzepte bzw. Maßnahmen zur Effizienzsteigerung:

- Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz EEG)
- Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz EEWärmeG)
- Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz KWKG 2002)
- Stromsteuergesetz (StromStG)
- Energiesteuergesetz (EnergieStG).

Da jedoch der Energieträger Wasserstoff und insbesondere dessen Erzeugung auf regenerativer Basis in den vorgenannten Gesetzen bislang keine hinreichende Berücksichtigung gefunden hat, wird der Einsatz von Wasserstoff entgegen den aus der Energiewende resultierenden Zielsetzungen teilweise erheblich benachteiligt. Eine Gleichstellung mit anderen regenerativen Energien ist nicht gegeben. Diese Situation schwächt die Entwicklungspotentiale regenerativ-wasserstoffbasierter Energiekonzepte ganz erheblich.

Zukünftig könnten weitere Einsatzfälle in Nordrhein-Westfalen hinzukommen, die bezüglich des regenerativ erzeugten Wasserstoffeinsatzes vergleichbar durch die vorgenannten Gesetze benachteiligt werden würden, wie beispielsweise mittels regenerativer Quellen elektro-

lytisch erzeugter Wasserstoff und Sauerstoff auf Kläranlagen oder der Einsatz von Wasserstoff-Brennstoffzellen auf Kläranlagen.

Eine Änderung der vorgenannten Gesetze im Hinblick auf eine wasserstoffbasierte Energiewirtschaft erscheint daher dringend angeraten. Damit der Gesetzgeber in die Lage versetzt wird, die erforderlichen Gesetzgebungsänderungen erkennen und umsetzen zu können, wird als kurzfristige Maßnahme eine Bestandserfassung und -bewertung heute und absehbar zukünftig verfügbarer Wasserstoffenergiekonzepte aus regenerativen Quellen angeraten.

### **3.3 Optimierungspotenziale und Handlungsbedarf zur Implementierung einer Wasserstofftechnologie auf Kläranlagen in NRW**

Aus den aktuellen technischen sowie gesellschaftlichen Rahmenbedingungen und Optimierungsbedarfe ergibt sich ein vielfältiger Handlungsbedarf bei der Einführung einer wasserstoffbasierten Energieinfrastruktur. Es sind dies:

- die Wirkungsgrad- und Verfügbarkeitssteigerung von Systemkomponenten in den Bereichen Wasserstofferzeugung, -Speicherung, -Transport und -Nutzung
- der Ausbau von Wasserstoffnetzen, die Berücksichtigung von Belangen der Wasserstoffwelt in Gesetzen und Verordnungen sowie die steuerliche Gleichstellung von regenerativ erzeugtem Wasserstoff als Energieträger
- die Optimierungs- und Ausbaupotenziale öffentlich geförderter Maßnahmen u. v. m.

Ein erster Schritt wurde in NRW mit dem Förderprogramm „Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung in NRW (ResA)“ angestoßen. Hierbei werden seit dem 1.1.2012 im Förderbereich 2 neben Energieanalysen ebenfalls bauliche Maßnahmen wie die Nutzung von Bewegungsenergie, Mikroturbinen, Brennstoffzellen, Blockheizkraftwerke (erstmalige Errichtung und erstes Blockheizkraftwerk am Standort) sowie vergleichbare Maßnahmen finanziell unterstützt.

Insbesondere aus dem Ineinandergreifen der unterschiedlichen Einflussfelder entsteht die Notwendigkeit einer umfassenden Umsetzungsempfehlung. Diese allgemeinen bzw. gesamtwirtschaftlichen Optimierungsbedarfe können jedoch nicht oder nicht hinreichend durch den Einsatz von Wasserstoff auf Kläranlagen wesentlich reduziert oder gar ausgeräumt werden. Die Handlungsempfehlung zum Wasserstoffeinsatz auf Kläranlagen muss sich daher auf die mit den Kläranlagen notwendigerweise verknüpften Einsatzgebiete oder Zielsetzungen beziehen. Deshalb konzentriert sich der aktuelle Handlungsbedarf in Nordrhein-Westfalen im Bereich der Abwasserwirtschaft auf folgende Bereiche:

1. Fortführung und Intensivierung der begonnenen Wasserstoffdemonstrationsvorhaben
2. Erweiterung der öffentlich geförderten Vorhaben der angewandten Forschung wie bspw. der Einsatz eines mit regenerativer Energiequelle gespeisten Elektrolyseures zur Wasserstofferzeugung und synergetischer Integration der Sauerstoffnutzung im Abwasserrei-

nigungsprozess. Diese Methodik der Wasserstofferzeugung in Verbindung mit der gleichermaßen ökonomisch und ökologisch synergetischen Sauerstoffnutzung innerhalb der Kläranlage ist ausschließlich in einer Abwasserreinigungsanlage anwendbar und bietet daher eine weite Übertragbarkeit.

3. Bündelung und Auswertung von Erkenntnissen und Erfahrungen etc. aus Demonstrationsvorhaben auf Kläranlagen bezüglich Optimierung von Gesetzen und Verordnungen, insbesondere in Bezug auf Genehmigungsverfahren auch unter enger Zusammenarbeit mit Behördenvertretern. Die bestehenden Gesetze führen faktisch zu einer Benachteiligung wasserstoffbasierter Energiekonzepte. Dies trifft im Bereich der Abwasserreinigung insbesondere die wasserstoffbasierten Alternativen zu den konventionellen Faulgasnutzungskonzepten (Faulgas-BHKW). Insoweit werden die Anstrengungen zur Berücksichtigung von wasserstoffbasierten Energiekonzepten in den einschlägigen Gesetzen auch der Abwasserwirtschaft von Nutzen sein.

Zur Steigerung der Akzeptanz hinsichtlich der Entwicklung und Nutzung muss grundsätzlich der Ausbau einer Wasserstoffinfrastruktur, mit entsprechenden Knotenpunkten, vorangetrieben werden. Mit einer politisch geförderten H<sub>2</sub>-Infrastruktur kann der Anreiz zur Steigerung der Betriebsfähigkeit und Marktverfügbarkeit auf Herstellerseite sowie nachlaufend zur Nutzung auf Betreiberseite gesteigert werden. Der Beitrag der Abwasserbeseitigung ist dabei im Wesentlichen auf die Umsetzung von Demonstrationsvorhaben und die Nutzung entwickelter Technologien beschränkt. Allerdings liegt auf Kläranlagen der Vorteil eines weitreichenden Anwendungsfeldes vor, womit die Möglichkeit zur pilothaften Implementierung von Gesamtkonzepten besteht und damit die Abbildung und Lösung der grundsätzlich Schnittstellenanpassungen verbundenen Herausforderung.

## 4 Methanolsynthese aus Faulgas

### 4.1 Stand der Technik bei der Methanolsynthese

Zwei chemische Reaktionen ermöglichen die Synthese von Methanol. Ausgangssubstanz ist entweder Kohlenstoffmonoxid oder Kohlenstoffdioxid, das jeweils mit Wasserstoff zu Methanol reagiert. Die Synthese läuft nach folgenden Reaktionsgleichungen ab:



$$\Delta H_r (289 \text{ K}) = - 92 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta H_r (289 \text{ K}) = - 50 \text{ kJ/mol}$$

Beide Reaktionen sind exotherm. Der Hauptreaktionspfad zur industriellen Herstellung von Methanol erfolgt über Kohlenstoffmonoxid (vgl. Gl. (4-1)). Aus  $CO_2$  kann mittels heterogener katalytischer Hydrogenierung Methanol gewonnen werden (vgl. Gl. (4-2)). Die Herstellung über  $CO_2$  ist Bestandteil derzeitiger Forschungsvorhaben im Zusammenhang mit der Methanolsynthese und Kohlenstoffdioxidfixierung.

Die Herstellung von Methanol kann anhand der Parameter Druck und Temperatur sowie der Verwendung unterschiedlicher Katalysatoren in verschiedene Herstellungskonzepte untergliedert werden. Ausgehend von dem Prozessparameter Druck spricht man von der

- Hochdruck (HD)-,
- Mitteldruck (MD)- und
- Niederdruck (ND)-Methanolsynthese.

Neben den Unterschieden bzgl. der Prozessparameter gibt es zwei Wege der Prozessführung einer Methanol-Synthese. Die „**once-through**“-Prozessführung beschreibt einen einfachen Reaktordurchgang. Dem gegenüber steht die „**Recycle Loop**“-Prozessführung, bei dem ein Großteil des nicht umgesetzten Gases wieder in den Reaktor zurückgeführt wird.

Bei der Methanol-Synthese können weiterhin zwei Verfahrenstypen angewendet werden, die sich anhand ihrer Katalysatorform und dessen Einsatz im Verfahren unterscheiden. Es gibt die Methanol-Synthese über feste Katalysatoren und mittels Katalysatoren in Flüssigkeit. In den nachfolgenden Kapiteln werden diese beiden Verfahren erläutert.

### 4.2 Anwendung von $H_2$ - und Synthesegas-Technologien auf Kläranlagen zur Synthese von Methanol aus Faulgas

$H_2$ -Technologien bieten auf Kläranlagen ein breites Anwendungsspektrum. Einige dieser Technologien, wie z.B. die Brennstoffzellentechnik haben die Umsetzung des Wasserstoffs in Energie zum Ziel. Desweiteren sind Technologien zur Umwandlung von Wasserstoff oder

zur Speicherung von Wasserstoff nutzbar. Im Bereich der Speicherung ist es nachteilig, dass Wasserstoff sehr flüchtig ist und technisch nur recht aufwändig zu speichern ist. Das Teilprojekt II „Untersuchungen zur Methanolsynthese aus Faulgas“ setzt am Punkt der Speicherung an. Wasserstoff, der aus Faulgas mittels z.B. einer Dampfreformierung oder elektrolytisch erzeugt werden kann, kann mittels einer Synthese in Methanol umgewandelt werden. Methanol ist aufgrund seiner Eigenschaften bei Normbedingungen flüssig und kann somit technisch einfach gespeichert werden. Es bietet sich ein breites Anwendungsspektrum für das Methanol und seine Nebenprodukte an (siehe Kapitel 4.4).

Die Implementierung einer Methanolsynthese in ein Kläranlagengesamtkonzept, speziell in das energetische Gesamtkonzept, erfordert den Einsatz von Technologien zur Synthesegasherstellung, wie sie auch zur H<sub>2</sub>-Erzeugung genutzt werden, sowie ggf. spezieller Technologien zur Erzeugung von Wasserstoff, wie z.B. die Wasserelektrolyse. Anhand der gewählten Betrachtungsweise wird die Sauerstoffproduktion bei der Wasserelektrolyse hier als Nebenprodukt betrachtet. Insbesondere wurde bei der Implementierung die Einbindung von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) betrachtet, um CO<sub>2</sub> chemisch binden zu können.

Im Rahmen der Projektdurchführung ist ein Verfahrenskonzept entwickelt worden, dass die Umsetzung einer Methanolsynthese auf Kläranlagen unter Einbeziehung von Synergieeffekten zu den Prozessen der Kläranlagen erlaubt (s. Kap.4.3).

Für die Synthesegasherstellung wurden die technologischen Grundlagen der Verfahren zur Dampfreformierung, autothermen Reformierung und Kohlenstoffdioxidreformierung erarbeitet und bewertet. Die Dampfreformierung wurde abschließend als das Verfahren zur Synthesegasherstellung gewählt, da die Verfahrensführung beherrschbar und die Umsetzung in dem angedachten Maßstab technisch gut und sicher lösbar ist.

Die Ausführung der Methanolsynthese ist anhand des eingesetzten Synthesegases und des Katalysators bewertbar. Die Methanolsynthese kann in die Synthese über feste Katalysatoren und über Katalysatoren in der Flüssigphase anhand der Katalysatoren unterschieden werden. Bei der Methanolsynthese über feste Katalysatoren werden je nach Gaszusammensetzung unterschiedliche Katalysatoren eingesetzt. In die Betrachtung eingeflossen sind Katalysatoren für die Synthesegaszusammensetzung CO/ CO<sub>2</sub>/ H<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub>/ H<sub>2</sub>. Marktverfügbar sind zurzeit nur Katalysatoren für Synthesegase aus CO/ CO<sub>2</sub>/ H<sub>2</sub>, weshalb die Marktverfügbarkeit ein wesentliches Kriterium der durchgeführten Bewertung war. Für Synthesegase aus CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> sind die Katalysatoren Inhalte gegenwärtiger Forschung im Bereich der Methanolsynthese.

### **4.3 Entwicklung eines Verfahrenskonzeptes und Nutzung von Synergieeffekten auf Kläranlagen**

Das Grundprinzip des Verfahrens bildet eine Synthese über die Gasphasenreaktion im unteren Niederdruckbereich über feste Katalysatoren. Die Synthesegasbereitstellung soll auf ei-

ner Wasserdampfreformierung mit Möglichkeit der Einspeisung externer Gase beruhen. Die beiden Hauptprozessschritte Synthesegasherstellung (hier: Faulgasreformierung) und Methanolsynthese sind in der unteren Aufzählung um die weiteren Prozessschritte Faulgasfeinentschwefelung, Synthesegasverdichtung und Produktkondensation ergänzt. Der gesamte Prozess zur Methanolsynthese auf Kläranlagen besteht aus folgenden Prozessschritten, welche die Ausgangsbasis für die Planung der Versuchsanlage bilden:

1. Faulgasfeinentschwefelung
2. Faulgasreformierung (Dampfreformierung)
3. Synthesegasverdichtung
4. Methanolsynthese in der Gasphase über festen Katalysator
5. Produktkondensation mit Abtrennung des Methanol/ Wassergemisches

Ein vereinfachtes R+I-Schema der erarbeiteten Versuchsanlage wird in Kapitel 4.1 des Abschlussberichtes dargestellt. Neben den oben genannten Prozessschritten (1-5) werden Verfahrensschritte aufgezeigt, die aufgrund der einzelnen Prozesse in das Gesamtkonzept integriert sind.

Das Verfahrenskonzept sieht an verschiedenen Punkten des Gesamtprozesses Wärmetauscher vor, die die verwendeten Gase einerseits auf die notwendigen Reaktionstemperaturen erhitzen, und andererseits Energie in Form von Wärme zurückgewinnen. Die Rückgewinnung dient der internen Versorgung der Wärmeübertragungsprozesse, somit auch der Minderung des Einsatzes an Energie zur Versorgung des Gesamtprozesses.

Ein Ziel der Methanolsynthese ist die Fixierung von  $\text{CO}_2$  in einem nutzbaren Produkt. Zum jetzigen Zeitpunkt liegen nur wenige Informationen bzw. Forschungsergebnisse vor, die die Einbindung größerer Mengen an  $\text{CO}_2$  in die Synthese, oder die eine Synthese ausschließlich über  $\text{CO}_2$  beschreiben. Ein höherer Anteil an  $\text{CO}_2$  bewirkt die Abnahme des CO-Anteils im Synthesegas. Ein Untersuchungsschwerpunkt der zweiten Projektphase soll eine gesteigerte Einbindung von  $\text{CO}_2$  in die Synthese sein.

Mit steigendem  $\text{CO}_2$ -Anteil muss auch das H : C-Verhältnis durch extern bereit gestellten Wasserstoff in den günstigen Bereich von mindestens 2,5 : 1, optimal annähernd 3 : 1 eingestellt werden. Dafür ist großtechnisch die  $\text{H}_2$ -Erzeugung mittels regenerativer Energie, vor allem Windkraft anzustreben. Zur  $\text{H}_2$ -Erzeugung bietet sich die Nutzung eines Elektrolyseurs an. Je nach Standort ergeben sich Synergien mit den vorhandenen technischen Verfahren zur Nutzung des produzierten Sauerstoffs.

Für die geplanten halbtechnischen Untersuchungen zur Einbindung externer Gase ( $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2$ ) ist vorgesehen, diese über Druckgasflaschen bereit zu stellen. Im großtechnischen Maßstab wäre eine Druckreformierung vorteilhaft, da durch diese der Gesamtprozess energie-

tisch deutlich günstiger ablaufen kann. Insbesondere entfällt die Verdichtungsstufe für das Synthesegas. Dadurch kann auf eine Abkühlung des Synthesegases verzichtet werden, die sonst vor der Verdichtung notwendig wäre.

Durch die Einbindung des CO<sub>2</sub> in Methanol wird CO<sub>2</sub> fixiert und ein energetisch attraktiver, chemischer Energiespeicher geschaffen.

#### **4.4 Schaffung einer Planungsgrundlage zur Umsetzung in den Pilotmaßstab**

Im ersten Schritt zur Schaffung der Planungsgrundlagen für eine „Methanolsynthese aus Faulgas“ ist eine Dimensionierung der Pilotanlage auf Basis des R+I-Schemas (Kapitel 4.1, Bild 4-1, des Abschlussberichtes) nach folgendem Vorgehen durchgeführt worden:

1. Definition der Zielgrößen für die Anlage, hier die gewünschte Produktmenge
2. Entwicklung des R+I-Schemas basierend auf dem gewählten Verfahrenskonzept
3. Durchführung der stöchiometrischen und energetischen Berechnungen des Prozesses, samt Aufstellung eines Modells zur Variation der Eingangsparameter und Variation der Gaszusammensetzungen
4. Durchführung von Massen- und Energiebilanzen
5. Festlegung der Betriebsbereiche der Aggregate bzw. Baugruppen
6. Dimensionierung der Aggregate bzw. Festlegung der Spezifikationen für Angebotsanfragen

Als Zielgröße wurde eine Methanolproduktion von ca. 5 L/h angesetzt. Dabei können in den weiteren Planungsschritten Anpassungen / Iterationen infolge der tatsächlich verfügbaren Leistungsparameter ausgewählter Systemkomponenten notwendig werden.

Die beiden entscheidenden Systemkomponenten sind die Dampfreformierung und die eigentliche Methanolsynthese. Die Reformierleistung bestimmt maßgeblich die zur Verfügung stehende Synthesegasmenge, wobei eine zusätzliche Aufstockung durch externe Gasmenge möglich sein soll.

Die ablaufenden Reaktionen innerhalb des Gesamtprozesses sind anhand der zu erwartenden Reaktionsgleichungen und darauf basierender stöchiometrischer Berechnungen auf ihre Massen-, Volumen-, Energie- und Wärmeströme bilanziert worden. Die Details der Berechnungen sind Kap. 4.3.1 des Abschlussberichtes zu entnehmen.

Desweiteren wurden die notwendigen Aggregate, wie sie im R+I-Schema erkenntlich sind, auf die Reaktionsbedingungen ausgelegt.

Für den Betrieb der Anlage ist es notwendig, die wichtigsten Regelungsabläufe und sicherheitsrelevanten Schaltungen/Vorgänge zu automatisieren. Dies bedarf einer umfangreichen

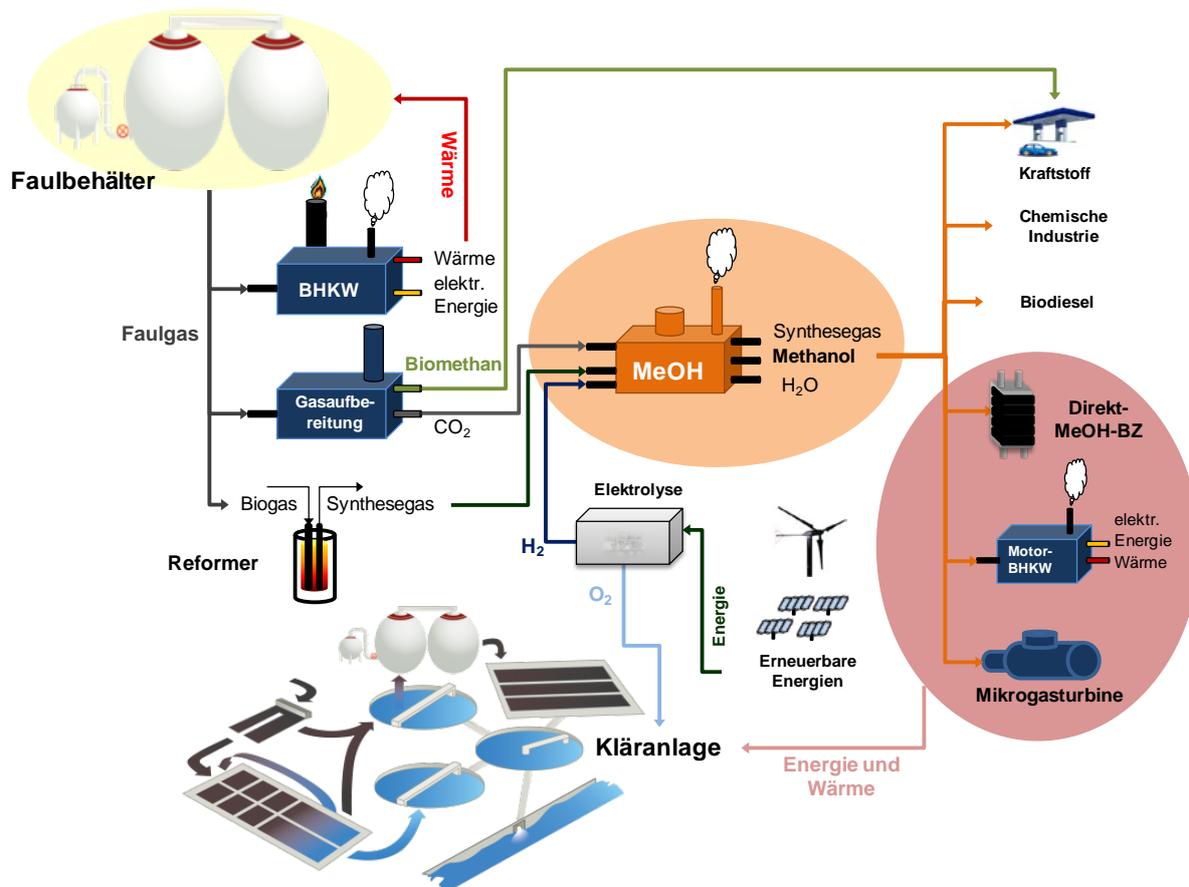
Messtechnik zur Prozessüberwachung, insbesondere Druck- und Temperaturmessungen sowie Messungen, die Informationen über die Vorgänge im Inneren der Aggregate liefern. Weiterhin sind Volumenstrommessungen an den wichtigsten Ein- und Ausgängen insbesondere zur Einstellung des Kreislaufgasvolumenstromes notwendig. Eine Überwachung der qualitativen Zusammensetzung des Synthese- und Produktgases ist ebenfalls vorgesehen.

Die weiteren Untersuchungen zur Methanolsynthese aus Faulgas beinhalten Untersuchungen zu Wärmekapazitäten, zu Standortbedingungen und zu Nutzungsmöglichkeiten für Methanol.

Die Berechnungen zu Wärmekapazitäten nähern sich zu erwartenden und nutzbaren Wärmeüberschüssen auf Kläranlagen und innerhalb des Gesamtprozesses zur Methanolsynthese an. Wesentlicher Ansatzpunkt ist jedoch die Einbindung der Methanolsynthese in das energetische Gesamtkonzept der Kläranlage. So macht es energiewirtschaftlich wenig Sinn, das Faulgas in Niedertarifzeiten zu verstromen und gleichzeitig die Überschusswärme über Notkühler abzugeben. Das gleiche gilt auch bei Stromüberschüssen im Netz, z.B. an Starkwindtagen oder Sonnentagen. Der an Sonnen- oder Starkwindtagen im Kläranlagen-BHKW erzeugte Grundlaststrom würde aus Sicht der Netzbetreiber nicht gebraucht, und müsste im Extremfall sogar noch mit negativer Regelenergie u.a. durch Einsatz von Stromsenken aufgefangen werden.

Um die Randbedingungen zu prüfen, unter denen es ggf. sinnvoll ist, Faulgas nicht zu 100 % zu verstromen, sondern in speicherbare Energie umzuwandeln, wurden Näherungsberechnungen zur Bestimmung möglicher überschüssiger Wärme aufgestellt. Die Grundlagen und eine detaillierte Übersicht der Berechnungen bietet Kapitel 4.4.2 des Abschlussberichtes.

Bild 4-1 stellt eine theoretische Option zur möglichen Herstellung von Methanol und dessen Anwendungsgebiete dar. In Kapitel 4.4 des Abschlussberichtes werden weitere Nutzungsmöglichkeiten für den Einsatz von Methanol diskutiert und dargestellt. Eine bisher noch nicht weiter verfolgte Methode der Methanolnutzung könnte ebenfalls der Einsatz in einer Mikrogasturbine sein. In den Untersuchungen zum Liquid-Phase-Methanol(LPMEOH)-Verfahren wurde eine mit Methanol befeuerte Gasturbine getestet, die sich durch sehr niedrige Schadstoffwerte im Abgas auszeichnet.



**Bild 4-1: Theoretische Optionen zur möglichen Herstellung von Methanol und dessen Anwendungsgebiete auf Kläranlagen**

Für die Integration der Methanolsynthese in Kläranlagen erscheinen nach bisherigem Erkenntnisstand folgende Voraussetzungen notwendig bzw. wünschenswert:

- Faulgasquelle/ Faulbehälter ist auf der Kläranlage vorhanden
- Produktion ausreichender Faulgasmenge (> 50 ... 80 m<sup>3</sup>/h – 60.000 ... 100.000 EW)
- Wärmeüberschuss über lange Zeit im Jahr, somit Anreiz zur effizienteren Nutzung der wertvollen Ressource Faulgas

Wünschenswert wären darüber hinaus umfangreiche Erzeugungskapazitäten anderer erneuerbarer Energien in der Nähe der Kläranlage sowie eine H<sub>2</sub>-Elektrolyse in Nähe der Kläranlage oder der Syntheseanlage. Bei Vorhandensein weiterer nennenswerter Kapazitäten zur Erzeugung regenerativer Energien auf der Kläranlage selbst oder in unmittelbarer Nähe könnte ein weiterer Teil des Stromverbrauches der Kläranlage regenerativ gedeckt werden, so dass insbesondere in den Sommermonaten die Minderverstromung infolge Methanolsynthese kompensierbar würde.

## 5 Ausblick und Projektphase II

Um die Implementierung der Wasserstofftechnologie in die Energieversorgung von morgen zu erreichen sind noch entsprechende Weichenstellungen notwendig. Unter der Voraussetzung, dass die Anforderungen an die Ablaufgüte kommunaler Kläranlagen konstant bleiben, kann davon ausgegangen werden, dass der spezifische Energieverbrauch (elektrisch + thermisch) der kommunalen Kläranlagen durch technische Optimierung, Neuentwicklungen und Sanierungsmaßnahmen tendenziell sinken wird. Gleichzeitig zeichnet sich ab, dass die Energie-Eigenerzeugung durch zusätzliche Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energie (EE) wie PV/Wind/Kleinwasserkraft auf Kläranlagen ansteigen wird. Dadurch ist ein größerer Wärmeüberschuss im Sommerhalbjahr aus der Faulgasverstromung im BHKW zu erwarten.

Die Energieversorgung in Deutschland generell und auch in NRW wird zukünftig durch folgende Merkmale gekennzeichnet sein:

- Größere Anteile erneuerbarer Energien (EE)
- Stärkere Fluktuation der EE-Erzeugung
- Innovative Lösungen für Energiespeicher spielen eine wichtige Rolle bei der optimalen Integration von EE
- Tendenz zur Direktnutzung von EE, da Einspeisevergütung sinkt
- Suche nach neuen Abnehmern für fluktuierende Erzeugung notwendig
- Energiepreisgestaltung wird stärker Angebot und Nachfrage berücksichtigen, ebenso werden Netzdienstleistungen stärker honoriert und gefordert
- Stärkere finanzielle Belastung einer CO<sub>2</sub>-intensiven Stromerzeugung
- Notwendigkeit, CO<sub>2</sub> zu vermeiden, zu speichern und/oder in nutzbare Stoffe umzuwandeln

Daraus leiten sich für Kläranlagen-Energiekonzepte folgende Schlussfolgerungen ab:

1. Gleichmäßiger (Grundlast-) Betrieb eines KA-BHKW ist energiewirtschaftlich nicht sinnvoll
2. Faulgas kann als wertvoller Energieträger für die Bereitstellung von positiver Regelenergie eingesetzt werden
3. Ganzjährige Verwertung der Abwärme von BHKW zur vollwertigen Ausnutzung des Energiepotenzials des Faulgas ist anzustreben
4. Im Gegenzug sind Verwertungsmöglichkeiten (negative Regelenergie) für große Beträge von EE (PV + Wind) in ertragsstarken Zeiten notwendig
5. Daher ist es sinnvoll, Faulgas in diesen Zeiten nur anteilig im BHKW zu verstromen, und es zum anderen in gut speicherbare Energie zu verwandeln. Einen Weg dahin kann die Umwandlung in Methanol aufzeigen. Dabei wird der Energieträger Faulgas optimal ge-

nutzt, da der Energieinhalt des dafür verwendeten Faulgases zu einem Großteil ins Produkt fließt. Zugleich reicht die reduzierte Abwärme des BHKW für die Faulraumheizung aus, und es kann negative Regelenergie durch vermehrte Stromnutzung aus EE (regional erzeugt bzw. aus dem Netz bezogen) bereit gestellt werden.

6. Methanol ist als Energiespeicher geeignet, da eine dezentrale Lagerung in Tanks unter Normaldruck erfolgen kann
7. Methanolsynthese ist auch in kleinem Maßstab realisierbar
8. Methanol kann vielseitig als Energieträger Verwendung finden, insbesondere zur Erzeugung von Spitzenlaststrom für längere Zeiten mit hohem Energiebedarf (schneereiche kalte Wintermonate/Wochen)

In der Projektphase II soll anhand der in Projektphase I geleisteten Vorarbeiten und Planungsgrundlagen eine Pilotanlage geplant, gebaut und betrieben werden, um die Möglichkeiten der Methanolsynthese aus Faulgas, speziell über CO<sub>2</sub>, zu untersuchen. In einer längeren Versuchsphase soll dabei untersucht werden, welche Kriterien bei der Nutzung von Faulgas Einfluss auf den Gesamtprozess der Methanolsynthese aufweisen. Anhand verschiedener Synthesegaszusammensetzungen soll eine annähernd optimale Gasmischung eingestellt werden, die die aussichtsreichsten Ergebnisse verspricht. Die Möglichkeit der Nutzung von Synergieeffekten innerhalb des Gesamtprozesses soll ein Bestandteil der Untersuchungen sein. Am Rande sollen auch die Betrachtungen zu den Synergieeffekten für Kläranlagenprozesse weiter vertieft werden.

Darüber hinaus ist eine Iteration des Kompendiums aus Band I angedacht, um den dann möglicherweise fortgeschrittenen Stand technisch-wirtschaftlicher Entwicklungen in der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie sowie die weitere Diskussion mit Akteuren der Wasserstoffwirtschaft und der Abwasserwirtschaft zu berücksichtigen.

## **6 Literatur**

1. Radke, S.: Verkehr in Zahlen 2009/2010. Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg (2009)
2. Bayer, W.: Energie auf einen Blick., Wiesbaden (2009)