

Produktion von grünem Wasserstoff an Müllheizkraftwerken

– ein nachhaltiger Baustein für die Kreislaufwirtschaft

Brennstoffzellenfahrzeuge haben in den letzten Jahren insbesondere im Personennah- und Nutzfahrzeugverkehr immer größere Verbreitung gefunden, und mit zunehmender Anzahl steigt auch der Bedarf nach grünem Wasserstoff. Müllverbrennungsanlagen könnten in diesem Zusammenhang den Nukleus für ein regionales Wasserstoff-Ökosystem bilden: Sie sind in der Lage, größere Mengen an Grünstrom zu erzeugen und mithilfe einer nachgeschalteten Elektrolyse grünen Wasserstoff herzustellen. Der vorliegende Beitrag erläutert die Grundlagen der Wasserstoffnutzung in der Mobilität, beleuchtet das theoretische Produktionspotenzial und stellt anhand eines konkreten Beispiels mögliche Strategien für eine regionale Wasserstoffinfrastruktur vor.

von: Felix Knicker, Dr. Dipl.-Ing. Arne Schäfer (beide: Tractebel Engineering GmbH) & Achim Schreider (ENGIE Impact GmbH)

„Aus Müll wird Mobilität“ (MH₂Regio), „Müll macht mobil“ (H₂-W) oder „Waste-to-Wheels“ (TRACTEBEL) – das sind einige der Titel, mit denen Wasserstoff-Projekte in Kopplung mit Müllheizkraftwerken heute überschrieben sind. Deutschlandweit wurde in diesem Kontext bereits ein gutes Dutzend solcher Wasserstoff-Projekte angekündigt, welche sich derzeit in unterschiedlichen Planungsstadien befinden; so ist z. B. das H₂-W Projekt in Wuppertal bereits seit dem Jahr 2020 in Betrieb [1]. Auch im europäischen Kontext findet das Waste-to-Wheels-Konzept in vielen Ländern Anklang. Projekte finden sich u. a. in Belgien, den Niederlanden und dem Vereinigten Königreich. Die ENGIE-

Gruppe um das gleichnamige französische Energieversorgungsunternehmen, zu der auch TRACTEBEL gehört, hat eine Vielzahl dieser Projekte begleitet. Gemeinsam ist allen Projekten die Nutzung des produzierten Wasserstoffs im Mobilitätssektor, beispielsweise zum emissionsfreien Antrieb von Nutzfahrzeugen im öffentlichen Personennahverkehr und der Entscheidungslogistik.

Grundlagen der Wasserstoffnutzung in der Mobilität und Rahmenbedingungen

Mit der Markteinführung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen im öffentlichen Personen-

Abb. 1: Schematische Darstellung der Wertschöpfungskette Waste-to-Wheels [4]



nahverkehr (ÖPNV) und im Nutzfahrzeugsegment steigt der Bedarf nach grünem Wasserstoff derzeit zunehmend an. Im Vergleich zu Diesel-Fahrzeugen ermöglichen Brennstoffzellen (BZ)-Fahrzeuge einen lokal CO₂-emissionsfreien Betrieb, die Reduktion der Emissionen von Luftschadstoffen (wie Stickoxiden und Feinstaub) sowie Abwärme und Lärm und tragen somit zu einer Verbesserung der städtischen Umweltbilanz bei. Im Vergleich zu rein batterie-elektrischen Fahrzeugen ermöglichen BZ-Fahrzeuge darüber hinaus höhere Tankreichweiten, höhere Leistungsdichten sowie kürzere Betankungsdauern. Entsprechende BZ-Fahrzeuge eignen sich deshalb besonders für Einsatzbereiche mit hoher Fahrleistung und/oder großen Leistungsbedarfen, wie sie beispielsweise auf Buslinien mit anspruchsvollem Streckenprofil oder auf Abfallsammelrouten mit häufigen Start-Stopp-Zyklen und hohen Leistungsspitzen auftreten.

Wesentlich für den aus unternehmerischer Sicht wirtschaftlichen Betrieb der Fahrzeuge sind hierbei neben den Anschaffungskosten vor allem die Kraftstoffkosten. Während die Anschaffung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen mit Investitionskostenzuschüssen des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) und der Europäischen Union gefördert wird, befinden sich die Marktpreise für grünen Wasserstoff an öffentlichen Tankstellen derzeit noch nicht auf einem wettbewerbsfähigen Niveau. Um heute jedoch im Vergleich zu Fahrzeugen mit Diesel-Antrieb wettbewerbsfähig zu sein, sind beispielsweise im ÖPNV-Bereich Zielpreise von 5 bis 6 Euro je kg Wasserstoff notwendig, während der derzeitige Abnahmepreis an öffentlichen Pkw-Tankstellen 9,5 Euro je kg beträgt. Vor diesem Hintergrund kommen der kostengünstigen Produktion und Bereitstellung von grünem Wasserstoff eine wichtige Bedeutung zu. Die Kriterien dafür sind in Bezug auf die Produktion von Wasserstoff per Elektrolyse – neben der grundsätzlichen Verfügbarkeit von grünem Strom – hohe Volllastbetriebsstunden, niedrige Strombezugskosten sowie geringe spezifische Anlageninvestitionskosten durch Skaleneffekte. Eine kostengünstige Bereitstellung wird durch geringe Transportdistanzen zwischen Produktion und Abnehmer, eine hohe Abnehmerdichte im Umfeld sowie eine gleichmäßige zeitliche Verteilung der Nachfrage ermöglicht. Die Integration von Elektrolyseanlagen am Standort von Müllheizkraftwerken liefert dazu gute Voraussetzungen.

Müllverbrennungsanlagen als Nuklei für regionale Wasserstoff-Ökosysteme

In Deutschland werden derzeit insgesamt 68 Müllverbrennungsanlagen (MVA) betrieben, die für die thermische Behandlung von Siedlungsabfällen zugelassen sind. Nach Angaben des Umweltbundesamts (UBA) verfügen diese Anlagen über eine Kapazität zur Verbrennung von insgesamt 19,6 Mio. t Siedlungsabfällen pro Jahr [2]. Darüber hinaus existieren weitere Anlagen zur Behandlung von gefährlichen Abfällen (Sonderabfallverbrennungsanlagen)

sowie zur Mitverbrennung von Abfällen als Ersatzbrennstoffe (Industriefeuerungsanlagen, Kohlekraftwerke und Zementwerke).

Die bei der Verbrennung freigesetzte thermische Energie wird zur Bereitstellung von elektrischer Energie, Wärme und/oder Prozessdampf genutzt. Die MVA werden dabei überwiegend als Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) wärmegeführt betrieben und stellen thermische Energie zum Betrieb von Fernwärme- und Prozessdampfnetzen bereit. Das Abfallaufkommen ist unterjährig weitgehend konstant, während durch den wärmegeführten KWK-Betrieb die Stromerzeugung im Winter zugunsten einer höheren Wärmeauskopplung reduziert wird und somit saisonale Unterschiede in der Stromproduktion bestehen. Bezogen auf die Abfallverbrennung lässt sich vereinfachend von einem Grundlastbetrieb sprechen. Der produzierte Strom wird am Großhandelsmarkt gehandelt, üblicherweise mit einer zunächst langfristigen Vermarktung an den Terminmärkten [7].

Eine Besonderheit bei der Stromproduktion an MVA ist die Möglichkeit zur Kennzeichnung eines Teils der Stromerzeugung als Grünstrom. Möglich ist dies durch den biogenen Anteil im Siedlungsabfall, welcher auf Bundesebene im Mit-



ZUKUNFTSSICHER FÜR WASSERSTOFF ?!



Kugelhähne, Bohrlochköpfe und Prüfungen für Wasserstoff-Anwendungen.

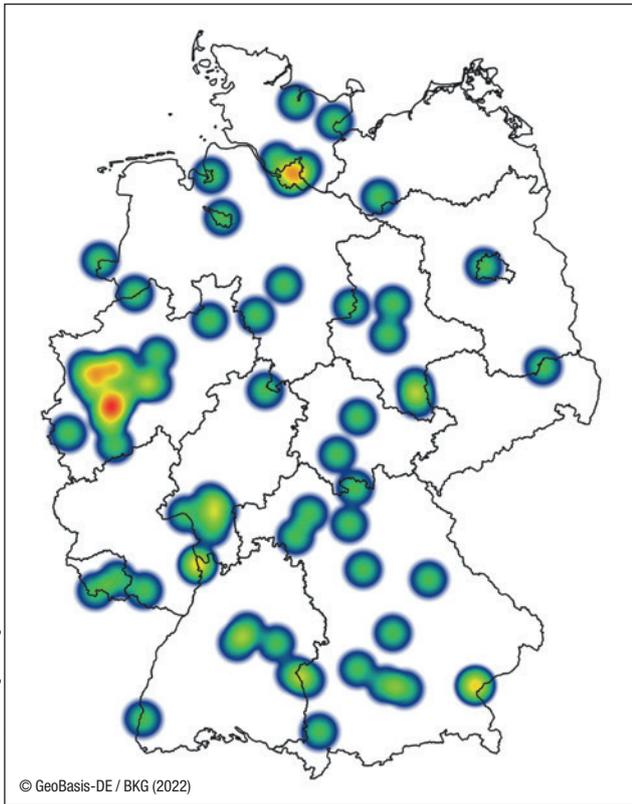
Die richtige Auswahl von Werkstoffen und zuverlässige Dichtheits-tests geben Sicherheit.

1. Materialeignungsprüfung
2. Test auf Wasserstoff-Dichtheit



Weitere Informationen
[H2-READY.COM](https://www.h2-ready.com)

Quelle: Tractebel Engineering



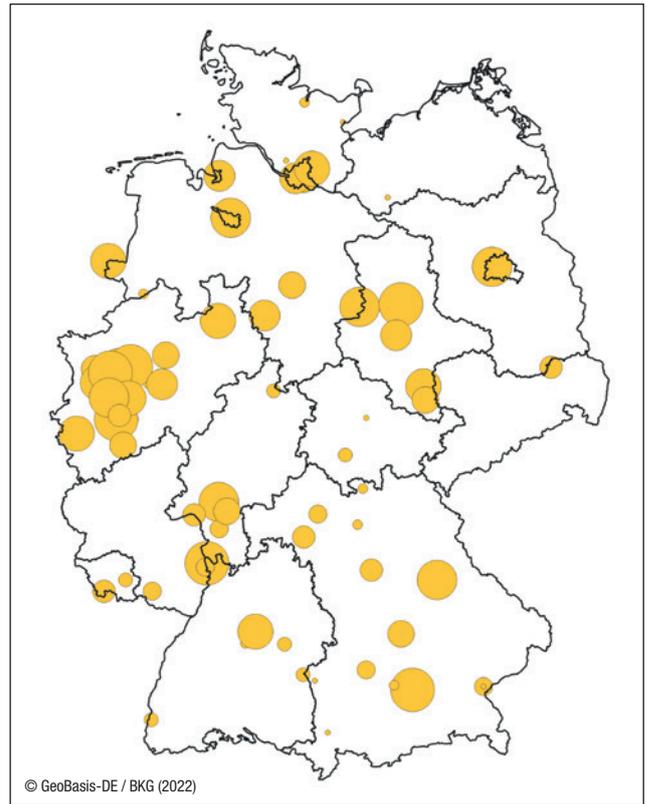
© GeoBasis-DE / BKG (2022)

Abb. 2: Übersichtskarte des Produktionspotenzials für grünen Wasserstoff an Müllverbrennungsanlagen (Heatmap)

tel ca. 50 Prozent (energetisch) beträgt [3]. Dadurch wird den MVA-Betreibern, nach der Eintragung in das Herkunftsnachweisregister des UBA und der Zertifizierung durch einen unabhängigen Gutachter, der Erwerb von Grünstrom-Herkunftsnachweisen ermöglicht – eine wesentliche Voraussetzung zur Erzeugung von grünem Wasserstoff.

Darüber hinaus verfügen Müllverbrennungsanlagen in Bezug auf potenzielle Wasserstoff-Abnehmer häufig über eine günstige geografische Lage – natürlicherweise im Einzugsgebiet urbaner Ballungszentren, mit unmittelbarer Nähe zu Betriebshöfen kommunaler und privater Bus-Verkehrsbetriebe sowie im Umkreis von Industriegebieten mit Standorten von Lkw-Flottenbetreibern (wie z. B. Speditionsunternehmen). Zudem besteht durch den täglichen Anlieferungsverkehr von Abfall durch Abfallsammelfahrzeuge und Wechselbehälter-Lkw ein unmittelbares Nachfragepotenzial vor Ort. Im günstigsten Fall befindet sich ein Fahrzeug-Depot am Standort oder in unmittelbarer Nähe. Die erforderlichen Entfernungen zum Transport von Wasserstoff an potenzielle Abnehmer sind somit gering, im Idealfall ist sogar eine Betankung vor Ort möglich.

Müllverbrennungsanlagen bieten somit durch die gleichmäßige Verfügbarkeit von Grünstrom und das Absatzpotenzial günstige Voraussetzungen zur Produktion von grünem Wasserstoff und zur Bildung eines regionalen Wasserstoff-Ökosystems. Durch die Integration einer Elektrolyseanlage am Standort einer MVA ergeben sich weitere



© GeoBasis-DE / BKG (2022)

Abb. 3: Übersichtskarte des Produktionspotenzials für grünen Wasserstoff an Müllverbrennungsanlagen

Vorteile: So können bereits bestehende Standortflächen und Infrastrukturen genutzt und gleichzeitig auf anlagentechnisch geschultes Betriebspersonal zurückgegriffen werden, was Investitions- und Betriebskosten reduziert. Die prozess-technische Integration zwischen Kraftwerks- und Elektrolyseanlage kann zusätzliche Synergien schaffen, indem bereits vorhandene Betriebsmittel wie vollentsalztes Wasser (Kesselspeisewasser), Druckluft und ggf. Stickstoff zum Betrieb der Elektrolyseanlage genutzt werden. Auch eine abwärmetechnische Integration ist möglich, ebenso wie eine Nutzung des bei der Elektrolyse ebenfalls erzeugten Sauerstoffs im Verbrennungsprozess der MVA. Welche Synergien tatsächlich genutzt werden können, hängt von Anlagenaufbau und -zustand ab und sollte im Einzelfall geprüft werden.

Demgegenüber müssen jedoch auch einige Herausforderungen beachtet werden. So ist beispielweise die Flächenverfügbarkeit auf dem Kraftwerksgelände bei der Planung zu be-

Tabelle 1: Referenzdaten einer Müllverbrennungsanlage		
Heizwert Siedlungsabfall	8,5 MJ/kg _{TS}	[5]
Wirkungsgrad Stromerzeugung (Netto)	11,1 %	[6]
Anlagenauslastung	90 %	Annahme
Biomasse-Anteil	50 %	[3]

Quelle: Tractebel Engineering

Quelle: Tractebel Engineering

rücksichtigen, welche bei Anlagen im Stadtgebiet häufig begrenzt ist. Dies gilt insbesondere für Elektrolyseanlagen mit hoher Produktionsleistung sowie bei gleichzeitigem Aufbau von Betankungs- und Abfüllinfrastruktur vor Ort und stellt höhere Anforderungen an die technische Planung.

Theoretisches Produktionspotenzial für grünen Wasserstoff an Müllverbrennungsanlagen

Welche Mengen an grünem Wasserstoff an Müllverbrennungsanlagen theoretisch produziert werden könnte, lässt sich anhand der Bestandsdaten der MVA berechnen. Insgesamt ergibt sich ein Produktionspotenzial von ca. 40 Mio. kg Wasserstoff pro Jahr bei einer Elektrolyseleistung von in Summe ca. 260 Megawatt (MW). Bezogen auf eine mittlere Anlagengröße mit einer Jahreskapazität von 290.000 Megagramm pro Jahr (Mg/a) ergibt sich eine Produktionsmenge von 590 t Wasserstoff pro Jahr – ausreichend beispielsweise für den Betrieb einer Busflotte von mehr als 70 Fahrzeugen.

Die räumliche Verteilung des Produktionspotenzials ist in **Abbildung 2** als Heatmap dargestellt. Die höchste Potenzialdichte besteht in Ballungsgebieten mit hohem Abfallaufkommen wie z. B. dem Ruhrgebiet, dem Rheinland, dem Rhein-Main-Gebiet oder Großstädten wie Berlin, Bremen, Hamburg und München – ideale Voraussetzun-

gen also für den Aufbau regionaler Wasserstoff-Ökosysteme.

Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffproduktion

Durch den Betrieb von Elektrolyseanlagen ergibt sich für den MVA-Betreiber eine zusätzliche Erlösmöglichkeit durch die Vermarktung des grünen Wasserstoffs, neben der bestehenden Vermarktung von Strom und (Fern-) Wärme sowie den Erlösen aus den Abfallgebühren. Die Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffvermarktung gegenüber der Stromvermarktung ist abhängig vom Strommarktpreis: Angenommen, ein Teil der Stromproduktion der MVA wird kurzfristig am Spot-Markt (Day-ahead-Markt) vermarktet, so kann der Erlös durch eine flexible Steuerung der Elektrolyseanlage optimiert werden. Ausschlaggebend sind hierfür aus unternehmerischer Sicht die kurzfristigen Opportunitätskosten. Es lässt sich ein äquivalenter Strom-Grenzpreis berechnen, bis zu dem sich der Verkauf von Wasserstoff gegenüber der Vermarktung von Strom lohnt.

Betrachtet man den Verlauf der Großhandelspreise am Day-ahead-Markt in Deutschland für die vergangenen drei Jahre, so zeigt sich, dass eine Wasserstoff-Vermarktung bei einem Verkaufspreis von beispielsweise 6 Euro/kg in mehr als 8.000 Stunden pro Jahr in den Jahren 2019 und 2020 höhere Erlöse erzielt hätte als der direkte Stromverkauf. Höhere Strompreise, wie sie im

Jahr 2021 aufgetreten sind, führen hingegen zu einer deutlichen Reduktion der Betriebsstunden der Elektrolyseanlage. Hiermit stellt sich für den MVA-Betreiber (sowie für Betreiber von EE-Anlagen im Allgemeinen) die Frage nach einer langfristigen Strategie der Stromvermarktung und -nutzung.

Voraussetzung für den Erlös-optimierten Betrieb ist, dass die Wasserstoffnachfrage zu jeder Zeit gedeckt werden kann, z. B. durch den Betrieb eines Speichers zum Lastausgleich.

Die Kosten zur Produktion von grünem Wasserstoff, die Wasserstoffgestehungskosten, werden wesentlich durch die operativen Kosten (d. h. durch den Strompreis und die erreichbaren Volllastbetriebsstunden der Elektrolyseanlage) beeinflusst. Die Investitionskosten haben dabei einen höheren Einfluss auf Projekte mit niedriger Anlagenleistung, während der Einfluss dieser Kosten mit zunehmender Auslastung der Elektrolyseanlage sinkt. In der Praxis ist daher eine möglichst hohe Auslastung anzustreben. **Abbildung 5** stellt die Entwicklung der Wasserstoffgestehungskosten beispielhaft für eine Referenzanlage mit einer Elektrolyseleistung von 4 MW dar.

Es wird deutlich, dass Anlagenauslastung und Strompreis einen hohen Einfluss auf die Wasserstoffgestehungskosten haben. So ist, bezogen auf den Zielpreiskorridor für die Mobilität, bei einem Strompreis von 40 Euro pro Megawatt-▶

Zertifikat abgelaufen?
Jetzt umstellen auf:
KLINGERSIL® C-4240

KLINGER
Germany

Die Trinkwasserversorgung
ohne Kompromisse –
Prüfbestätigung
nach Elastomerleitlinie
bis März 2026

KLINGER GmbH, 65510 Idstein, Tel. +49 6126 40160, mail@klinger.de, www.klinger.de

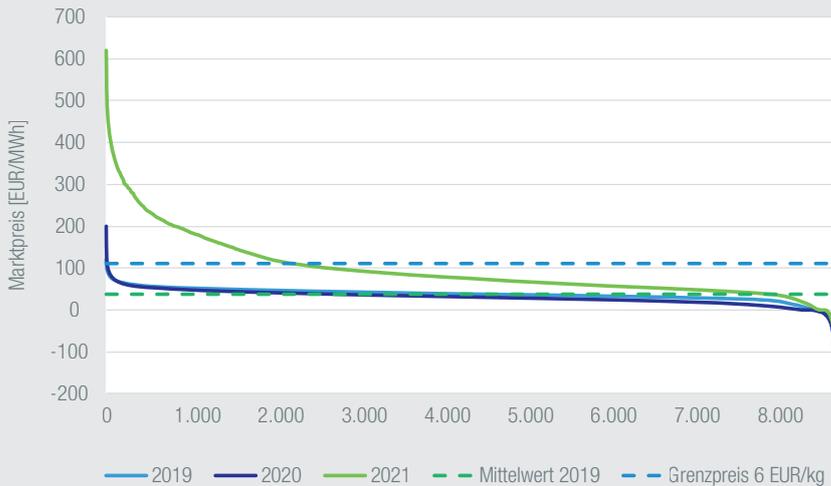


Abb. 4: Jahresdauerkennlinie Großhandelspreise Strom, Marktgebiet DE-LU (2019–2021), basierend auf [8]

stunde (MWh) eine Auslastung von mindestens 50 Prozent nötig, um unter dem Zielpreis von 6 Euro je kg Wasserstoff zu bleiben.

Bei höherer Anlagenauslastung kann auch bei höheren Strompreisen Wasserstoff zu Kosten unterhalb des Zielpreises produziert werden. Bei Vollaustattung würden Stromkosten von 58 Euro/MWh in der Beispielrechnung genau den Zielpreis von 6 Euro/kg treffen. Generell gilt: Je höher die Systemauslastung und je niedriger die Stromkosten, desto niedriger sind auch die Wasserstoff-Gestehungskosten.

Darüber hinaus gibt es weitere Möglichkeiten, die Gestehungskosten zu verringern; allen voran durch ein breites Spektrum an Förderprogrammen zum Aufbau der Wasserstoff-Infrastruktur. In diesem Zusammenhang bietet auf Bundesebene das BMDV verschiedene Förderprogramme im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (kurz: NIP) an, wodurch Investitionszuschüsse in Höhe von bis zu 65 Prozent der

Abb. 5: Wasserstoff-Gestehungskosten in Abhängigkeit der Anlagenauslastung und der Stromkosten



Quelle: Tractebel Engineering

Strategie für eine regionale Wasserstoffinfrastruktur am Beispiel des Projekts MH₂Regio

Im Rahmen des HyExperts-Projekts „MH₂Regio“ wurde im Jahr 2021 eine Strategie für eine regionale Wasserstoff-Infrastruktur für die Stadt Frankfurt am Main entwickelt. Hierzu hat die Stadt Fördermittel aus dem HyLand-Förderprogramm zur Erarbeitung einer Studie erhalten, die unter Einbezug von Projektpartnern aus der Mobilität erstellt wurde. Ausgangspunkt des Projekts ist das Müllheizkraftwerk Nordweststadt im Frankfurter Stadtgebiet, an dem die Installation einer Elektrolyseanlage mit bis zu 5 MW Leistung untersucht wurde [9]. Basierend auf einer Analyse des zukünftigen Wasserstoffbedarfs im Rhein-Main-Gebiet mit 500 bis 1.000 t für das Jahr 2025 [10] hat Tractebel eine Studie zur Bestimmung des technisch und wirtschaftlich optimalen Gesamtkonzepts erstellt.

Der am Müllheizkraftwerk erzeugte grüne Wasserstoff soll verschiedenen Anwendergruppen aus dem Personennahverkehr, der Logistik und der Binnenschifffahrt als Kraftstoff bereitgestellt werden. Ziel des Projekts war es, für diese Anwendergruppen standardisierte technische Anlagenkonzepte zu erstellen, die eine einfache Adaption auf Standorte und Anforderungen ermöglichen.

Die optimale Gestaltung der erforderlichen Wasserstoff-Infrastruktur – von der Elektrolyse über den Transport bis zur Tankstelle – wurde in verschiedenen Szenarien modellgestützt untersucht. Neben unterschiedlichen Optionen zum Transport des Wasserstoffs (Trailer oder Pipeline) wurden mehrere Standorte und Nachfrageprofile der Anwender im Modell optimiert. Auf Basis der Wasserstoff-Kosten als Leitindikator wurde ein Nachfrage-orientierter Ausbau der Infrastruktur als Optimum ermittelt. Als Kosten-optimales Transportmittel wurde dabei der Wasserstoff-Transport in Lkw-Trailern mit 500 bar Druck identifiziert.

Quelle: Tractebel Engineering

Im Ergebnis hat das Projekt den Nachweis erbracht, dass eine regionale Wasserstoffinfrastruktur auch aus Betreiber-sicht wirtschaftlich attraktiv betrieben werden kann. Die Nutzung von Fördermitteln trägt hierzu ebenso bei wie Akteur-spezifische Betreiberkonzepte. Ebenso können aus Sicht des MVA-Betreibers weitere Synergieeffekte durch eine Anlagenintegration erreicht werden – im Falle der Sauerstoffnutzung jedoch nur bei großen Elektrolyseanlagen.

Fazit

Müllverbrennungsanlagen besitzen durch ihre besonderen Voraussetzungen das Potenzial, zu Keimzellen für den Aufbau regionaler Wasserstoff-Infrastrukturen zu werden. Durch die hohe Verfügbarkeit von grünem Strom und die günstige geografische Lage kann grüner Wasserstoff an Müllverbrennungsanlagen kostengünstig hergestellt werden und in der Folge als er-

neuerbarer Kraftstoff zu einer raschen Dekarbonisierung der Mobilität in den Städten beitragen. Die Vielzahl der aktuell verfolgten Projekte in diesem Bereich bestätigt diesen Trend. ■

Literatur

- [1] WSW Wuppertaler Stadtwerke GmbH: Mit Wasserstoff durchs ganze Tal, online unter www.wsw-online.de/wsw-mobil/mehr-service/aktuelles/wasserstoffbusse/, abgerufen am 25. Januar 2022.
- [2] Umweltbundesamt: Thermische Behandlung, online unter www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/entsorgung/thermische-behandlung#thermische-abfallbehandlung, abgerufen am 25. Januar 2022.
- [3] Hoffmann, G. et al.: Nutzung der Potenziale des biogenen Anteils im Abfall zur Energieerzeugung, Dessau-Roßlau 2010.
- [4] Storengy Deutschland GmbH: Storengy H2, Wasserstoff für den Schwerlastverkehr, online unter: www.storengy-h2.de/
- [5] Dehoust, G., Schüler, D., Vogt, R., Giegrich, J.: Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft – Am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz, Dessau-Roßlau 2010.
- [6] Flamme, S., Hanewinkel, J., Quicker, P., Weber, K.: Energieerzeugung aus Abfällen – Stand und Potenziale in Deutschland bis 2030, Dessau-Roßlau 2018.
- [7] Huneke et al.: Beitrag Thermischer Abfallbehandlungsanlagen zur Energiewende, Berlin 2016.
- [8] Bundesnetzagentur: SMARD – Strommarktdaten für Deutschland, online unter smard.de, abgerufen am 25. Januar 2022.

[9] Stadt Frankfurt a. M.: Abschlussbericht MH_2 Regio, unveröffentlicht (Veröffentlichung Februar 2022).

[10] Junker, K., Erb, J., Flatau, R., Sickenberger, T.: Wasserstoffbedarfsprognose für die Region Frankfurt, in: Internationales Verkehrswesen, Ausgabe 3/2021.

Die Autoren

Felix Knicker und **Dr. Dipl.-Ing. Arne Schäfer** sind Prozessingenieure in der Abteilung Thermische Kraftwerke bei der Tractebel Engineering GmbH.

Achim Schreider ist Energieökonom in der Abteilung Energiewirtschaft und Planung bei der ENGIE Impact GmbH.

Kontakt:

Felix Knicker
Tractebel Engineering GmbH
Friedberger Str. 173
61118 Bad Vilbel
Tel.: 06101 55-1512
E-Mail: felix.knicker@tractebel.engie.com
Internet: www.tractebel.engie.com

Jetzt Qualitätsstandards sichern

Produkte Gas und Wasser

NEU
Ausgabe
2-2021



Typen- und Herstellerübersicht

Verschiedene Handelsmarken und Vertrieber eines Produktes

Bestimmungsländer bei EU-Zertifizierungen

Alle von der DVGW CERT GmbH zertifizierten und überwachten Produkte

Alle für das Gerät von der DVGW CERT GmbH erteilten Zertifizierungszeichen

Jetzt bestellen unter shop.wvgw.de

Kompetenz:
Energie & Wasser. | **wvgw**