

Werner Bruckner

Brennstoffzellenbusse kommen bei Europäern an

Das größte europäische Brennstoffzellen-Busprojekt CUTE ging mit überwältigendem Erfolg zu Ende. Den Weg vom Prototypen zur Marktreife fördert die Europäische Kommission im öffentlichen Verkehr in den nächsten Jahren mit weiteren 48 Mio. EUR.

In den vergangenen zwei Jahren haben 27 öffentliche Busse in neun europäischen Städten mehr als eine Million Kilometer unfallfrei und ohne schädliche Emissionen vor Ort zurückgelegt. Für den europäischen Energiekommissar Andris Piebalgs stellt sich nicht mehr die Frage, „ob diese Technik funktioniert, sondern nur, ab wann sie im Wettbewerb besteht“.

Viele der vier Millionen Passagiere haben selbst bei Wind und Wetter extra länger gewartet, um mit einem wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenbus zu fahren. Die Menschen begegneten den Fahrzeugfahrern mit freundlichem Winken und nach oben gerichtetem Daumen. CUTE (Clean Urban Transport in Europe) hat die Öffentlichkeit überzeugt. Städtische Verkehrsbetriebe, acht Industriepartner sowie acht Forschungs- und Beratungsunternehmen aus sieben Ländern haben mit den Brennstoffzellenbussen den Prototypstatus verlassen und viele Erfahrungen gesammelt.

Umwelt- und Wirtschaftlichkeitsanalyse

Neben der technischen Machbarkeit unter verschiedensten Bedingungen standen ökonomische und vor allem ökologische Aspekte im Mittelpunkt des Projekts. Insgesamt trägt das Wasserstoff/Brennstoffzellen-Bussystem (H₂/FC-Bussystem) zu einer Verbesserung der Luftqualität in Ballungsräumen bei, weil der Verkehrsbetrieb ohne schädliche Emissionen abläuft. Im Vergleich dazu stößt ein Diesel-Euro-3-Bus mehr als 80 Prozent seiner schädlichen Lebenszyklus-Emissionen während des Betriebs in der Stadt aus. Die Umweltbelastungen für die Produktion der Brennstoffzellenbusse übertreffen die von Dieselnissen zwar noch um das Doppelte, doch sie machen nur einen kleinen Teil der Emissionen im gesamten Lebenszyklus aus. Das bescheinigen die Universität Stuttgart und die PE Europe GmbH, ein Spezialist für ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit aus Leinfelden-Echterdingen, die für die Wirtschaftlichkeits- und Umweltanalyse beim CUTE-Projekt verantwortlich waren.

Die Ökobilanz des gesamten Systems hängt sehr stark von der gewählten Wasserstoffherstellung, dem Versorgungsweg und der Effizienz der Brennstoffzellenbusse ab. Sie schneidet schlechter ab, wenn die

Der Autor

Dipl. Journalist **Werner Bruckner**, freier Fachautor für Energie & Finance & ITK & Biomedizin; WeBruckner@aol.com

Wasserstoffherstellung auf nicht erneuerbaren Ressourcen basiert. „Die Randbedingungen der Versorgung mit Energieträgern wie Gas oder Elektrizität für die Wasserstoffherstellung beeinflussen die Ökobilanz des H₂/FC-Bussystem entscheidend. Generell findet beim Wasserstoff-Brennstoffzellen-Bussystem eine Verlagerung der Emissionen statt – weg vom Busbetrieb hin zu der Kraftstoffbereitstellung“, betont der für die Ökobilanz verantwortliche Ingenieur Michael Faltenbacher von PE Europe (siehe auch Interview).

Im CUTE-Projekt hatten die Spezialisten für Nachhaltigkeit die Aufgabe, die strategische Entscheidungsfindung zu folgender Frage auf EU-Ebene vorzubereiten: Bietet die Wasserstoff-/Brennstoffzellentechnologie eine Alternative aus ökologischer und ökonomischer Sicht für den Nahverkehr in Europa?

Dabei war für alle Projektpartner nicht ausschlaggebend, die letzten Prozente an wirtschaftlicher und ökologischer Effizienz zu realisieren. In diesem Stadium brauchten die Partner vor allem eine verlässliche Datenbasis, an der sich Zukunftspotenziale messen lassen.

Praxistest Städte und Verkehrsbetriebe

Um ihre jeweils drei Brennstoffzellenbusse mit komprimiertem gasförmigen Wasserstoff zu versorgen, haben die Städte Amsterdam, Barcelona, Hamburg, London, Luxemburg, Madrid, Porto, Stockholm und Stuttgart eine eigene Infrastruktur aufgebaut. Je nach regionalen Besonderheiten, Stärken und Präferenzen setzen die Städte dabei auf unterschiedliche Verfahren für die Erzeugung und Lagerung des Wasserstoffs: von der Vor-Ort-Erzeugung über Dampfreformierung oder Elektrolyse bis zur Anlieferung von flüssigem Wasserstoff aus zentraler Produktion.

Alle Verfahren haben Vor- und Nachteile. So setzt die technisch ausgereifte Dampfreformierung aus Erdgas bei der Wasserstoffherstellung CO₂ frei. Die CO₂-Emissionen des mittels Wasserelektrolyse

produzierten Wasserstoffs hängen von der Bereitstellung des benötigten Stroms ab. Hier schneidet auf erneuerbaren Energien basierender Strom am besten ab. Dieser kostet aber noch relativ viel. Die zentrale Produktion stellt zwar große Wasserstoffmengen bereit, aber der Transport fordert auf Grund der niedrigen Dichte des Gases seinen Preis. Flüssiger Wasserstoff lässt sich zwar effizienter transportieren, die Verflüssigung verbraucht jedoch viel Energie.

Im Praxistest standen die Verlässlichkeit und die Wartungsintensität der Anlagen im Mittelpunkt. Über die Anlagen vor Ort äußerten sich die Nutzer der Elektrolyse positiv. Einige Probleme bereitete die Dampfreformierung aus Erdgas bei den installierten Kleinanlagen, vor allem bei niedriger Auslastung. Die Betankungsanlagen waren durchschnittlich in über 80 Prozent der Fälle verfügbar.

Die Verkehrsbetriebe lobten besonders die hohe Zuverlässigkeit der Brennstoffzellenbusse. Selbst Fahrzeughersteller DaimlerChrysler zeigte sich überrascht davon, dass die so genannten Brennstoffzellen-Stacks eine Lebensdauer von mehr als 3000 Betriebsstunden erreicht haben.

Vor diesem Hintergrund baut Hamburg die Flotte der umweltfreundlichen Busse aus und übernimmt die Brennstoffzellenbusse aus Stockholm und Stuttgart. London und Amsterdam wollen nachziehen.

Nicht nur die Technik überzeugte. „Wir erreichen auch unsere Qualitäts- und Sicherheitsziele“, gaben die CUTE-Partner in ihrer gemeinsamen Erklärung bekannt. Trotzdem erkennt Projektkoordinator Schuckert noch Verbesserungsbedarf: „In den Fahrzeugen waren nicht die Brennstoffzellen das Problem, sondern eher Komponenten wie Umrichter, Ventile an Gasanlagen oder das Betankungssystem.“ Verbesserungspotenzial liege außerdem in der Dauer des Betankungsvorgangs sowie in der Bedienung der Geräte.

Aussichten

Nach der Veröffentlichung der CUTE-Ergebnisse im Mai dieses Jahres hat die Europäische Kommission den Beginn einer neuen Wasserstoffinitiative bekannt gegeben. In den nächsten drei Jahren sollen in der Initiative „Wasserstoff für den Verkehr“ annähernd 200 wasserstoffbetriebene Fahrzeuge in den Praxistest gehen. Insgesamt wollen der öffentliche und der private Sektor rund 105 Mio. EUR investieren, von denen 48 Mio. EUR von der Europäischen Kommission stammen. Zu der Initiative gehören etwa die Projekte HyFleet:CUTE, ZERO REGIO und HyCHAIN:MINITRANS. Bei HyFleet:CUTE, dem Nachfolger von CUTE, sollen 47 wasserstoffbetriebene Busse auf drei Kontinenten im Einsatz sein, davon 14 Busse mit Wasserstoffverbrennungsmotoren auf den Straßen von Berlin. Ihren ersten Einsatz hatten zwei dieser Busse von MAN/Neomann schon bei der Fußball-WM. HyFleet:CUTE unterstützt damit als erstes Projekt neue Generationen effizienterer und wettbewerbsfähiger Busse beider Technologien.

Werner Bruckner

Ökobilanz für strategische Entscheidungen

Wirtschaftlichkeit und Ökobilanz standen bei einem Gespräch von „Internationales Verkehrswesen“ mit Michael Faltenbacher und Marc Binder, beide von PE Europe – einem Unternehmen für ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit aus Leinfelden-Echterdingen – über das Wasserstoff-Brennstoffzellen-Projekt CUTE im Vordergrund.

IV: Die Menschen in den neun europäischen CUTE-Städten haben die Brennstoffzellenbusse bejubelt. Kaum eine andere neue Technologie genießt einen so großen Rückhalt in der Bevölkerung. Wie erklären Sie sich das?

Faltenbacher: Die Menschen wünschen sich Technologien, die konkrete Probleme lösen und nicht nur verlagern oder an anderer Stelle sogar neue verursachen. Die meisten ahnen intuitiv, dass die Wasserstoff-/Brennstoffzellentechnologie ihren Sehnsüchten entgegenkommt. Andere wie wir von PE Europe gehen mit Ingenieurspräzision, jahrelanger Erfahrung aus der Automobilbranche, umfangreichen Datenbanken und unserer Software GaBi daran, die Ökobilanz und Wirtschaftlichkeit von Projekten wie CUTE möglichst exakt zu berechnen.

IV: Unterstützen Ihre Ergebnisse die Sehnsüchte und Wünsche?

Faltenbacher: Die Brennstoffzellenbusse stoßen im Betrieb keine schädlichen Emissionen aus. Somit profitieren die städtischen Bewohner von sauberer Luft, die weniger verkehrsbedingte Schadstoffe wie Feinstaub, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Stickoxide aufweist. Insgesamt findet beim Wasserstoff-Brennstoffzellen-Bussystem (H₂/FC-Bussystem) eine Verlagerung der Emissionen statt – weg von dem Busbetrieb hin zur Kraftstoffbereitstellung. Aber wir haben bei der Erzeugung von Wasserstoff wesentlich bessere Möglichkeiten, den Schadstoffausstoß während der Herstellung zu kontrollieren. Beim konventionellen Dieseldieselbusbetrieb ist die Abgasreinigung aufwändiger als etwa bei der konstant betriebenen Dampfpreformierung aus Erdgas.

Die Städte können damit den Schadstoffeintrag in den meist stärker belasteten innerstädtischen Luftraum reduzieren, wenn sie den Wasserstoff außerhalb der Stadt erzeugen. Dabei beeinflussen die Randbedingungen der Versorgung mit Energieträgern wie Gas oder Elektrizität für die Wasserstoffherstellung die Ökobilanz des H₂/FC-Bussystem entscheidend. In der ganzen Nachhaltigkeitsdiskussion dürfen wir uns nicht einfach nur Teile des Lebenszyklus ansehen.

Binder: Bei CUTE haben wir darum zum ersten Mal ein spezifisches modulares Modell für eine Lebenszyklusbetrachtung eines H₂/FC-Bussystems etabliert. Auf diese Weise können wir jetzt mit Herstellung, Betrieb und Entsorgung alle Lebenszyklusphasen für das gesamte System – sowohl bei der Wasserstoffbereitstellung als auch für den Brennstoffzellenbus – betrachten und die Umweltprofile (H₂/FC-Bussystem) und Kosten (H₂-Produktion) quantifizieren. Mit dem erstellten Modell stellen wir nun Entscheidungsträgern auf Projekt- und EU-Ebene ein Werkzeug zur Verfügung, das eine Aussage ermöglicht, ob bzw. unter welchen Randbedingungen diese Technologie eine Alternative aus ökologischer und ökonomischer Sicht für den Nahverkehr in Europa bietet. In diesem Stadium brauchen die Partner also vor allem eine verlässliche Datenbasis, an der sich Zukunftspotenziale messen lassen. Damit können wir konkrete umwelt- oder wirtschaftspolitische Entwicklungsziele für diese Technologie definieren.

IV: Wo stößt das H₂/FC-Bussystem Emissionen aus? Welche außer CO₂ sind noch wichtig?

Faltenbacher: Vor allem die Wasserstoffherstellung setzt Emissionen frei. Bei der Erdgasdampfpreformierung sind zum einen die direkten Betriebsemissionen aus dem Reformer und zum anderen die Herkunft der eingesetzten Energieträger Erdgas und Strom wichtig. So herrschen in den Förderländern teilweise unterschiedliche Umweltstandards, die Transportentfernung des eingesetzten Erdgases spielt ebenfalls eine Rolle. Eine weitere entscheidende Rolle spielt die Frage, wo der Strom für den Betrieb des Reformers und die Verdichtung des Wasserstoffs herkommt. Bei der Elektrolyse, die nur Strom und Wasser als Eingangsgröße braucht, lebt oder stirbt die Wasserstoffherstellung mit der Stromerzeugung. Bei Strom aus Windenergie und Wasserkraft stehe ich bestens da, bei Biomassekraftwerken bis auf die Stickoxide und Partikelemissionen ebenso. Aber eine Elektrolyse zu betreiben und den Strom aus fossilen Energien wie Braunkohle oder Erdgas zu erzeugen, das macht ökologisch keinen Sinn. Der Einsatz von erneuerbaren Energien unterstützt das Kyoto-Abkom-

men, also vor allem einen geringeren CO₂-Ausstoß. Auch bei lokalen Umweltauswirkungen – etwa durch Kohlenwasserstoffe, Stickoxide oder Partikelemissionen verursacht – demonstriert das H₂/FC-Bussystem seinen Vorteil gegenüber dem Dieseldieselbus. Die Überlegenheit hängt aber auch von der Art und dem Ort der Wasserstoffherstellung ab. **IV:** Der Finanzrahmen von CUTE soll ca. 90 Mio. EUR betragen haben, davon hat die Europäische Kommission 20 Mio. EUR beigesteuert. Wie stellt sich beispielsweise die Wasserstoffbereitstellung aus ökonomischer Sicht dar?

Binder: PE Europe hatte die Aufgabe, eine Kostenanalyse der Wasserstoffinfrastruktur basierend auf realen Projektdaten durchzuführen. Für den Betrieb der Brennstoffzellenbusse mussten die neun Städte zunächst die Wasserstoffinfrastruktur aufbauen und anschließend betreiben. Wir haben dabei für die Wasserstoffproduktion, und für die Tankstellen folgende Kostenkategorien berücksichtigt: Anschaffung der Anlagen, (Vor-Ort-Erzeugung falls installiert, Kompressor, Zapfanlage), Kosten für Speicherung, Wartungskosten, Betriebskosten (Energieträger, Hilfsstoffe etc.). Aus der Einbeziehung aller dieser Kosten bekommen wir die realen Wasserstoffkosten des CUTE-Projekts. Dabei machen die Nicht-Betriebskosten abhängig von standortspezifischen Randbedingungen wie Energiepreisen und Investitionskosten bis zu 50 Prozent aus, weil sich auf Grund der kleinen Anlagen und vergleichsweise geringen Wasserstoffherstellungsmengen die Kosten ungünstig verteilen. Je nach aktuellem Strom- oder Erdgaspreis und regionalen Randbedingungen steht bei der Wasserstoffherstellung die Elektrolyse oder die Dampfpreformierung besser da.

Basierend auf der Darstellung des Status Quo wurden innerhalb des Projekts Zukunftsszenarien der Wasserstoffherstellung mittels Elektrolyse und Dampfpreformierung erstellt. Diese zeigen hohe Kostenreduktionspotenziale bei den Nicht-Betriebskosten auf.

IV: Und wie schneidet das Brennstoffzellen-Bussystem insgesamt im Vergleich zu seinen konventionellen Wettbewerbern Diesel und Erdgasbus ab?

Faltenbacher: Zunächst muss man berücksichtigen, dass die Wasserstoff-/Brennstoffzellentechnologie ja gegen eine seit über hundert Jahren ausreifende Mineralöl-/Verbrennungsmotortechnologie antritt. Die Herausforderung beim CUTE-Projekt war nicht, die höchstmögliche erzielbare ökologische und wirtschaftliche Effizienz zu erreichen. Die Fahrzeuge für

CUTE hat DaimlerChrysler vor allem auf Zuverlässigkeit und nicht auf Effizienz gebaut. Bei der Wasserstoffinfrastruktur und den Brennstoffzellenbussen handelt es sich gegenwärtig noch um Prototypen. Darum haben wir noch einen Mehrverbrauch gegenüber dem Dieselbus und somit noch nicht die potenziellen Effizienzvorteile von Brennstoffzell-Bussen realisiert.

Im Anschlussprojekt Hyfleet:CUTE soll der Nachfolgebus bis zu 20 Prozent weniger Energie verbrauchen als ein vergleich-

bares Dieselfahrzeug. Damit bekommen wir für das gesamte H₂/FC-Bussystem überzeugendere Ergebnisse, weil sich damit die Wirtschaftlichkeit im vergleichbaren Maßstab erhöht, die Umweltemissionen aber fallen. Bei Hyfleet:CUTE soll zudem eine Hybridisierung mit Bremsenergierückgewinnung erfolgen, was ebenfalls zu einer Effizienzsteigerung der Busse beiträgt.

Weiteres Optimierungspotenzial zeigen auch die eingesetzten Wasserstoffproduktionsanlagen. Hier liegen die Potenziale in

einer Größenordnung von 10 bis 20 %. Gleichzeitig sinken bei größeren Produktionszahlen sowohl die Wasserstoff- als auch die Buskosten. Es gilt jetzt, die nächsten Schritte zu unternehmen, um beide Systemkomponenten – Wasserstoffinfrastruktur und Brennstoffzellenfahrzeuge – serienreif zu machen und ihre Wettbewerbsfähigkeit zu demonstrieren.

IV: Wir danken Ihnen für das Gespräch.
