

Eine weitere Alternative zum Dieselmotor?

Wirtschaftlicher Nullemissionsbetrieb mit Wasserstoffmotor

Alvaro Sousa, München; Richard Läßle, Nürtingen

Im öffentlichen Nahverkehr sind derzeit unterschiedliche Antriebskonzepte für Busse im Gespräch: neben dem konventionellen Dieselmotor, die mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzelle, der Elektromotor und auch der Wasserstoffverbrennungsmotor. Letzterer unterscheidet sich vom Diesel im Prinzip nur durch den Brennstoff. Das Münchener Startup-Unternehmen Keyou setzt auf diese Alternative in Form einer Umrüstung. Diese basiert auf vorhandenen Dieselmotoren und macht die betreffenden Fahrzeuge zu Nullemissionsfahrzeuge.

Der Gedanke, Busse und Lkw – oder auch Pkw – mit Wasserstoffverbrennungsmotoren auszustatten, ist nicht neu. Es gab in der Vergangenheit eine ganze Reihe von Projekten mit Testfahrzeugen, die durchaus erfolgreich verliefen. Dass es dann wieder etwas ruhiger um den Wasserstoffverbren-

ner wurde, liegt wohl an den stark im Fokus stehenden Elektro- und Brennstoffzellenantrieben. Doch das scheint sich im Augenblick zu relativieren, was vor allem mit den Nachteilen der Batterietechnologie zusammen hängt. Die Herstellung von Batterien erfordert Werkstoffe, die als „kritisch“ eingestuft werden und deren Recycling noch nicht geregelt ist, vor allem Lithium, Kobalt und Seltene Erden. Dagegen besteht ein Wasserstoffmotor aus denselben Werkstoffen wie ein Diesel- oder Benzinmotor. Ebenso sind die Fertigungstechnologien dieselben.

Die Ökobilanz für dieses alternative Antriebssystem ist sehr positiv, nicht zuletzt auch deshalb, weil aus dem Auspuff eines H₂-Motors nur unschädlicher Wasserdampf, keine Stickoxide und kein Feinstaub strömen. Für Kommunen, die mit einer schlechten Luftqualität kämpfen, wäre der Was-

serstoffverbrenner also eine Option. Dies betrifft nach Ansicht von Keyou auch die Kosten, denn diese sollen im Idealfall, über die Lebensdauer gesehen, auf dem Niveau heutiger Dieselfahrzeuge liegen. Die Anschaffung einer neuen Fahrzeugflotte wäre bei einer Umrüstung der vorhandenen gar nicht notwendig. Der Einbau der „Keyou Inside Technologie“ ist auch in Neufahrzeuge möglich – die bevorzugte Variante des Unternehmens aus München.

Erfolgreiche Prüfstandsphase

Im Rahmen einer Veranstaltung rund um das Thema Wasserstoff Ende Juni 2017 präsentierte Keyou erstmals einen umgebauten Dieselmotor der Fachwelt, und zwar auf einem Prüfstand auf dem Gelände der ehemaligen IFA-Motorenwerke in Nordhausen. Unter den Besuchern waren Vertreter bekannter Nutzfahrzeughersteller, Bus- und Flottenbetreiber sowie Experten aus Forschung und Lehre, Politik und Presse. Thomas Korn, CEO des Münchner Startups: „Das Interesse vieler Stadtbus- und Lkw-Flottenbetreiber zeigt, dass Endkunden dringend auf der Suche nach sauberen, aber gleichzeitig betriebswirtschaftlich sinnvollen und praktikablen Mobilitätslösungen mit zu Dieselfahrzeugen vergleichbarem Kundennutzen sind.“

Der Prototypmotor war ein 6-Zylinder mit 7,8 Litern Hubraum, geliefert vom Entwicklungspartner Deutz. „Im Unterschied zu den Entwicklungen von BMW und MAN in der Vergangenheit haben wir das Motorkonzept von der stöchiometrischen Wasserstoffverbrennung im saugmotorischen Betrieb auf einen turboaufgeladenen Magerbetrieb umgestellt. Dabei führt ein nun mögliches hohes Verdichtungsverhältnis sowie die geringen Ladungswechselverluste und geringere thermische Verluste im Teillastbereich zu einem deutlich höheren Wirkungs-

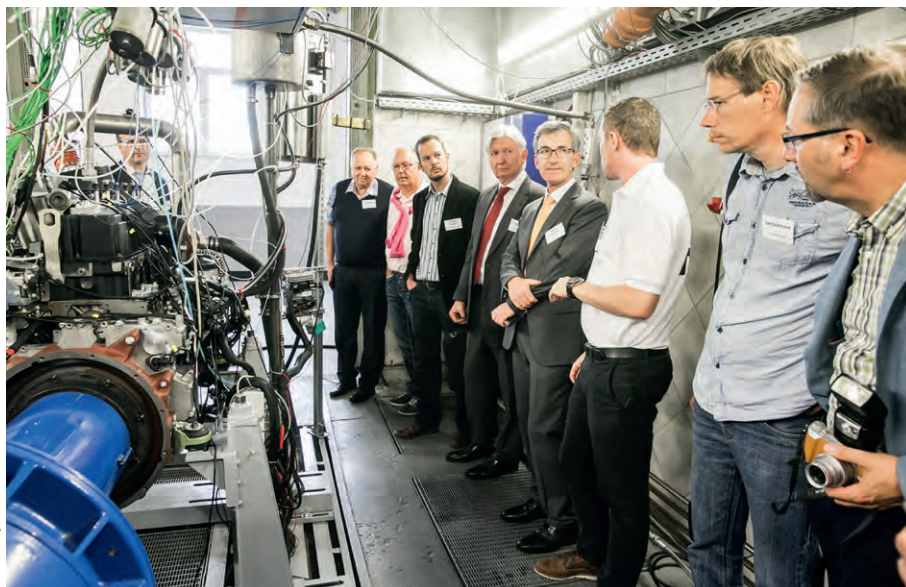


Foto: Keyou

Abb. 1: Der von Keyou zum Wasserstoffmotor umgebaute 7,8L/6-Zylinder-Diesel von Deutz auf dem Prüfstand in Nordhausen. Die Fülle der Verkabelung macht klar: hier gibt es eine Menge Stellschrauben, um Hard- und Software zu optimieren.



Zum Autor

Alvaro Sousa ist Mitbegründer und Chief Technology Officer von Keyou. Er hat Fahrzeugtechnik studiert und war ab 2004 Entwicklungsingenieur bei BMW in München und Kalifornien und dort zuständig für Wasserstoff- und Brennstoffzellenantriebe. Seit 2010 ist er Dozent an der Universität Porto.



Zum Autor

Richard Läßle arbeitet seit 15 Jahren als Fachjournalist im Bereich Technik. Er hat Maschinenbau mit Schwerpunkt Energietechnik studiert und war anschließend als Konstruktionsingenieur in mehreren Unternehmen tätig.

gradpotential“, erklärte Keyou-Technikchef und Autor Alvaro Sousa.

Prof. Hermann Rottengruber, Leiter des Instituts für Mobile Systeme und Lehrstuhlleiter für Energiewandlungssysteme für mobile Anwendungen an der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, zeigte sich beeindruckt, dass bereits nach so kurzer Zeit ein Wirkungsgrad von 42 Prozent auf dem Prüfstand erreicht wurde. Für ihn ist klar: der Verbrennungsmotor ist auch mittelfristig ein unverzichtbares Antriebskonzept, und betrieben mit Wasserstoff die ideale Antriebstechnologie im Nutzfahrzeugsektor.

Ähnlich vertrat auch Dr.-Ing. Ralph Pütz, Professor für Nutzfahrzeugtechnik, Verbrennungsmotoren, Getriebetechnik und Motorsporttechnik an der Hochschule Landshut und Leiter des Instituts für angewandte Nutzfahrzeugforschung Belicon die Auffassung, dass die Elektromobilität mittelfristig weder die ökologische Effizienz noch die Wirtschaftlichkeit der etablierten Euro-VI-Dieselsonzepte erreichen wird. Wasserstoff-Ottomotoren mit Nebenproduktwasserstoff betrieben wären hingegen eine Option.

Dipl.-Ing. Burkhard Eberwein, bis vor wenigen Jahren Sachgebietsleiter Fahrzeugmanagement Omnibus bei den Berliner

Verkehrsbetrieben (BVG), griff auf frühere Projekte mit Wasserstoffmotor-Bussen in der Hauptstadt zurück. „Der Wasserstoffverbrennungsmotor ist deutlich kostengünstiger als die Brennstoffzelle und die Abgaswerte sind besser als bei Omnibussen mit Erdgasantrieb (CNG)“, so sein Fazit. Tom Elliger vom TÜV Süd unterstrich: Wasserstofffahrzeuge sind genauso sicher wie Fahrzeuge mit konventionellen Kraftstoffen.

Langzeittest unter realistischen Bedingungen

Gerade der Testbetrieb von Wasserstoffbussen der BVG 2010 bis Anfang 2015 lieferte aufschlussreiche Ergebnisse. Es ist das einzige Langzeitprojekt dieser Art, welches im Rahmen der von der Bundesregierung unterstützten Clean Energy Partnership (CEP) stattfand. Die CEP ist ein Zusammenschluss führender Technologie-, Energie- und Mineralölkonzerne sowie Automobilhersteller. Das Ziel ist es, die Alltagstauglichkeit von Wasserstoff als Kraftstoff zu erproben. Das Projekt hat aber eine Vorgeschichte. Bereits 2006 nahmen die Berliner Verkehrsbetriebe 15 Wasserstoffbusse in Betrieb, 14 mit Wasserstoffverbrennungsmotor und einen mit Brennstoffzelle. Vier dieser Wasserstoffbusse wurden 2010 in das CEP-Projekt überführt, wie dem „Schlussbericht“ vom 31. August 2015 zu entnehmen ist. Der Bericht spricht daher vom „Weiterbetrieb von vier Bussen mit Wasserstoffverbrennungsmotoren“. Die Busse hatten eine Länge von 12 m. Bei den Antriebsaggregaten handelte es sich um Saugmotoren mit einer Leistung von 150 kW. Das Projekt profitierte von einer vorhandenen Betankungsinfrastruktur mit zwei Tankstellen. Allein mit dieser geringen Anzahl an Bussen war die Auslastung sicher gestellt.

Mit Vor- und Nachfolgeprojekt zusammen waren die Fahrzeuge achteinhalb Jahre in Betrieb, das entspricht der „normalen Verweildauer eines Dieselfahrzeugs in der Flotte eines ÖPNV-Betreibers“, wie der Schlussbereich der Clean Energy Partnership (CEP) in Hamburg betont. Weiter heißt es in der Projektbeschreibung: „Ein zentraler Arbeitsschwerpunkt lag dementsprechend in der Untersuchung des Alterungsverhaltens und der Zuverlässigkeit der Komponenten des Systems. Daneben sollte das Vorhaben wesentlich zur Entwicklung von Verfahren und Standards in den Bereichen Wartung von Wasserstoffbussen und Werkstattbetrieb unter besonderer Berücksichtigung von Wasserstoff als Kraftstoff beitragen.“

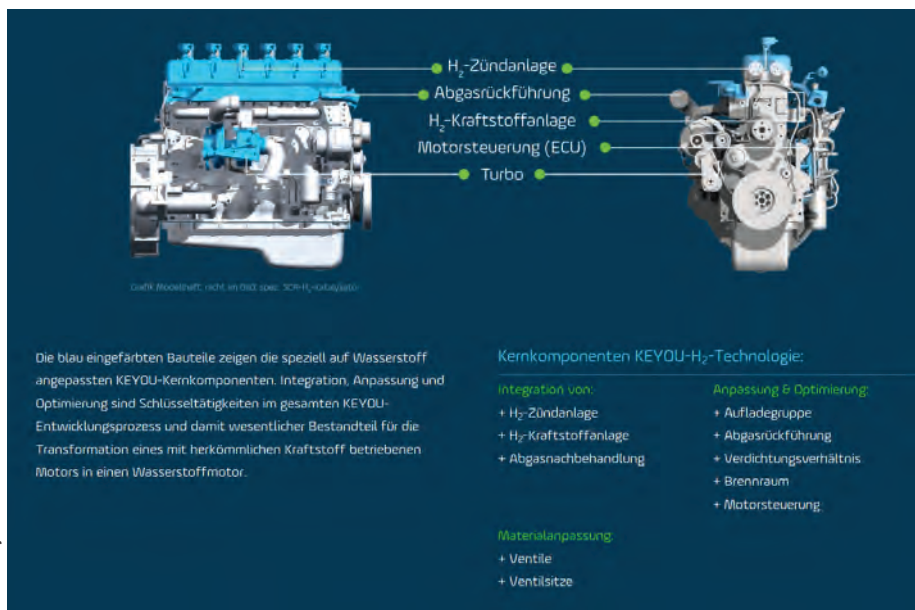


Abb. 2: Der Umrüstsatz macht aus einem herkömmlichen Verbrennungsmotor einen emissionsfreien Wasserstoffmotor.

Grafik: Keyou

Die Ergebnisse des Schlussberichts: Die „Langzeitstandfestigkeit“ der Wasserstoffbusse zeigte sich vergleichbar mit denen von Dieselmotoren. Die Verfügbarkeit lag bei 92 Prozent. Die Fahrleistung der Busflotte während der CEP-Versuchsphase lag bei rund 497.000 km bei einem monatlichen Spitzenwert von 12.500 km. Mit den Fahrleistungen des Vorgängerprojekts kam die Flotte auf fast 900.000 km. Es wurden über 6700 Betankungen durchgeführt, wobei eine Betankung im Schnitt zwölf Minuten dauerte. Der Wasserstoffverbrauch wird auf knapp 22 kg/100 km beziffert. Die Kosten pro 100 km beliefen sich auf 143,60 Euro, darin sind neben den Wasserstoffkosten auch Reparatur- und Wartungskosten enthalten. Der Bericht resümiert: Der Wasserstoffverbrennungsmotor erreichte im normalen Linienbetrieb eine zu Dieselmotoren vergleichbar hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit, weshalb die Wartungs- und Reparaturkosten in etwa den Kosten für den Betrieb von Dieselmotoren entsprachen.

Diesel ist derzeit zwar noch der günstigere Treibstoff, aber der Grund dafür ist vor allem dem Umstand geschuldet, dass die Markteinführung von Wasserstoff noch in den Kinderschuhen steckt. Weiteres Einsparpotenzial läge in der Nutzung des so genannten Nebenproduktwasserstoffes der chemischen Industrie. Zwar hat dieser nicht die Reinheit von elektrolytisch gewonnenem Wasserstoff, aber für die Motorverbrennung reicht sie aus. Anders bei der Brennstoffzelle, hier ist eine hohe H₂-Güte erforderlich. Zum Brennstoffzellenantrieb hält der Bericht außerdem fest: „Im unmittelbaren Vergleich der Kosten zur Brennstoffzellentechnologie sind schließlich auch die Kosten sowohl für die Anschaffung der Busse, als auch für den Austausch der Brennstoffzelle zu beachten: Brennstoffzellenbusse sind in der Anschaffung nicht nur wesentlich teurer als Busse mit Wasserstoffverbrennungsmotoren, da die Brennstoffzelle zudem ca. alle 15.000 km ausgetauscht werden muss, entstehen im Laufe eines 10-jährigen Be-

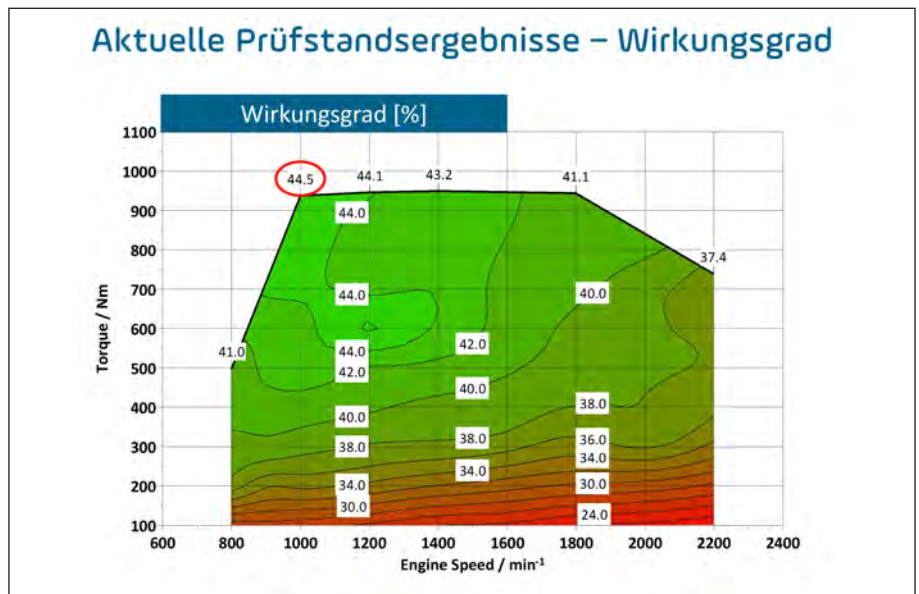


Abb. 3: Aktuelles Wirkungsgrad-Diagramm des Prüfstandsmotors von Keyou. Der Motor erreicht bei einem Drehmoment von 990 Nm und einer Drehzahl von 1100 rpm seinen maximalen Wirkungsgrad von 44,5% (mit AGR, Verdichtungsverhältnis = 13:1). Das ist ein Wirkungsgradwert, der erstmals mit einem H₂-Verbrennungsmotor dieser Größenordnung und Konfiguration erreicht wurde und der über vergleichbaren Dieselmotoren liegt.

Übersicht Motordaten:

- Hubraum: 7,8 l, 6 Zyl.
- Max. Leistung: 182 KW (Zielwert Endausbaustufe mit Direkteinblasung DI: 210 KW)
- Max. Drehmoment: 990 Nm bei 1.300 rpm
- Max. Wirkungsgrad: 44,1% (Zielwert Endausbaustufe mit DI: 45%)
- Verdichtungsverhältnis: 13:1

triebsleben eines Brennstoffzellenbusses kontinuierlich hohe Kosten.“

Erste Prototypen 2018 auf der Straße

Stehen bei Elektro- oder Brennstoffzellenbussen schnell die zwei- bis dreifachen Anschaffungskosten im Vergleich zu Dieselfahrzeugen im Raum, veranschlagt Keyou

hierfür lediglich rund 20 Prozent an Mehrkosten. Und dabei ist zu erwarten, dass die umgebauten Fahrzeuge deutlich besser abschneiden als die Wasserstoffbusse der BVG. Denn die nun verwendete Motorentechnologie repräsentiert die nächste Entwicklungsstufe: Allein der 7,8-Liter-Motor bringt laut Keyou 40 Prozent mehr Leistung als der damals eingesetzte 12,8-Liter-Motor, der Verbrauch halbiert sich gar.

Wie das Münchner Startup außerdem mitteilt, liegt man mit dem Prototypmotor voll im Plan. Aktuell erreicht das Aggregat einen Wirkungsgrad von 44 Prozent, ein bis dato noch nicht erreichter Wert. Als nächstes stehe ein 12-Liter-Motor auf dem Plan, der sich für 18-m-Gelenkbusse oder 26-Tonner Lkw eigne. Die Arbeiten hierzu seien in vollem Gange. Noch in diesem Jahr sollen erste Pilotfahrzeuge im Bus- und Lkw-bereich auf den Straßen unterwegs sein.

Zusammenfassung/Summary

Eine weitere Alternative zum Dieselmotor?

Das Münchner Startup-Unternehmen Keyou hat den Wasserstoffverbrennungsmotor für Nutzfahrzeuge weiterentwickelt. Leistung und Wirkungsgrad liegen auf einem bisher nicht erreichten Niveau. Verantwortlich dafür sind eine Reihe Komponenten, die als Nachrüstlösung für vorhandene Busse und Lkw konzipiert wurden. Für Flottenbetreiber ein kostengünstiger Einstieg in den emissionsfreien Betrieb ihrer Fahrzeuge. Dass Wasserstoffmotoren in Bussen ein gangbarer Weg für einen sauberen Nahverkehr wären, belegen Langzeitprojekte der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) aus den Jahren 2006 bis 2015.

A further alternative for the diesel engine?

The Munich start-up company Keyou has further developed the hydrogen combustion engine for commercial vehicles. Performance and efficiency are on an unprecedented level. This is possible due to a series of components which have been constructed for the available busses and trucks as a retrofit solution. For the fleet operators, this is a low-cost entry into an emission-free operation of their vehicles. Long-term projects of the Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) from 2006 to 2015 prove that hydrogen combustion engines are a practicable way for a clean public transport.