

# Die Kombination macht's

Brennstoffzelle und Batterie: Nicht entweder oder, sondern sowohl als auch

Manfred Limbrunner, Puchheim

Der Druck, Schadstoffemissionen zu reduzieren, wächst zumal in den Städten stetig. Damit wächst aber auch der Druck auf die öffentlichen Verkehrsunternehmen sowie die Kommunen, ihre Fahrzeugparks auf schadstoffarme Fahrzeuge umzustellen. Dasselbe gilt für den innerstädtischen Lieferverkehr. Die einzige Möglichkeit, die lokalen Emissionen von Fahrzeugen komplett zu eliminieren, liegt in der Elektrifizierung der Fahrzeugflotten. Hierbei stellt sich zunehmend die Frage bei den Betreibern, ob hierbei auf rein batterieelektrische Fahrzeuge oder auf Fahrzeuge gesetzt werden sollte, welche die elektrische Energie aus einer Kombination aus Brennstoffzelle und Wasserstoffspeicher beziehen. Diese Frage lässt sich jedoch aus heutiger Sicht weder zu Gunsten der einen noch der anderen Technologie beantworten. Nur eine Kom-

bination beider Technologien kann die Anforderungen bezüglich Reichweite, Kosten, Verfügbarkeit und Nutzlast aus Kundensicht erfüllen.

Aus der Frage Brennstoffzelle **oder** Batterie wird: Brennstoffzelle **und** Batterie. Nachfolgend wird dies anhand der Kundenanforderungen für innerstädtische Busse erläutert.

Wird mit den oben dargestellten Kundenanforderungen für einen 12-m-Standardbus eine Simulation zur Auslegung des elektrischen Antriebsstrangs durchgeführt, so zeigt sich, dass für die Auslegungsnutzlast (50 Prozent Beladung) und für den Fahrzyklus der Linie 53 in München (Abb. 3; grün hinterlegt) zwar eine Spitzenleistung für den Antrieb von 185 kW, jedoch auf der anderen Seite nur eine Durchschnittsleistung von 20,5 kW erforderlich ist. Dies

würde bei einer Betriebszeit von 14 bis 16 Stunden einen verfügbaren Energiebedarf für den Fahrbetrieb zwischen 287 und 328 kWh bedeuten. Für Klimatisierung und Heizung können überschlägig noch zirka 75 kWh berücksichtigt werden, was einen Gesamtenergiebedarf zwischen 362 und 403 kWh bedeutet. Für einen reinen batterieelektrischen Antrieb müsste bei einer angenommenen Restkapazität von 20 Prozent eine Batterie mit einer Kapazität von 453 bis 504 kWh installiert werden. Für den gleichen Energiebedarf müssten jedoch nur zwischen 30 und 33 kg an Wasserstoff (bei einem konservativen Systemwirkungsgrad von 45 Prozent) installiert werden. Allerdings reduziert sich der Energiebedarf bei einem Brennstoffzellenantrieb, da die Heizung des Busses aus der Abwärme der Brennstoffzelle gespeist werden kann.

Bei einem Vergleich des zu verbauenden Gewichts wäre bei einem rein batterieelektrischen Bus mit Energiedichten von Li-Ion-Akkus von 120 bis 180 Wh/kg zwischen 2517 und 4200 kg an Batterien zu verbauen, während ein Brennstoffzellensystem (60 kW) mit einem dazugehörigen Wasserstoffspeicher nur mit etwa 1000 kg zu Buche schlägt.

Betrachtet man nun die Batteriespeicher und Brennstoffzellensysteme inklusive Wasserstoffspeicher aus der Kostensicht so zeigt sich, dass die Kombination aus Brennstoffzelle und Wasserstoffspeicher Kostenvorteile bei €/kWh besitzen, selbst bei derzeit geringeren Stückzahlen von Brennstoffzellenanwendungen im Markt. Bei einem Brennstoffzellensystem mit 60 kW und einem Wasserstoffspeicher von 30 kg H<sub>2</sub> liegen die spezifischen Kosten zwischen 150 und 250 €/kWh, während Batteriespeicher im Busbereich zwischen 400 und 600 €/kWh liegen. In Bezug auf die Leistung ist die Brennstoffzelle heute allerdings bei den geringen Stückzahlen noch zu teuer, um den Spitzenleistungsbedarf der Busse über Brennstoffzellen wirtschaftlich abdecken zu können.

Dies führt zur Schlussfolgerung, dass eine Kombination aus Brennstoffzelle und Bat-

**Kundenanforderungen innerstädtische 12 Meter Busse:**

Betriebstage pro Jahr:	350 Tage
Betriebsstunden pro Jahr:	14...16 h (ohne Befüllung oder el. Beladung)
Klimatisierung:	10 kW <sub>el</sub> (entspricht ca. 30 kW Kälteleistung)
Heizung:	15 kW <sub>el</sub>
Abschreibungszeitraum:	10 Jahr
Passagierkapazität	> 72 Personen (> 4.896 kg)

Abb. 1: Kundenanforderungen.

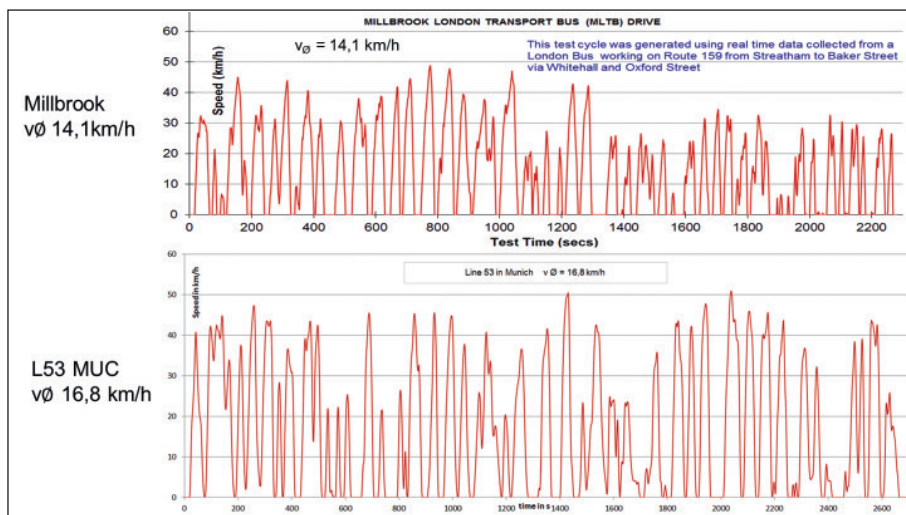


Abb. 2: Fahrzyklus.

terie die Kundenanforderungen am Besten erfüllen kann. Hierbei ist bei der Auslegung darauf zu achten, dass die gesamte Energie für den Fahrbetrieb aus der Brennstoffzelle mit Wasserstoffspeicher kommt, während die Batterie „nur“ die Spitzenlastfälle abdeckt sowie Bremsenergie aufnimmt. Die Brennstoffzelle muss hierbei so dimensioniert werden, dass sie in der Lage ist, mehr als die Durchschnittsleistung des Busses bereitzustellen. Auf diese Weise kann das Powermanagement (Zusammenspiel zwischen Brennstoffzelle und Batterie) so ausbalanciert werden, dass sich die Batterie nie entleert und das Fahrzeug nur mit Wasserstoff betankt werden muss. Dadurch könnte der Bus nach der Betriebszeit innerhalb von maximal 20 Minuten wieder aufgetankt werden (gegenüber mehrstündiger Beladung der Bat-



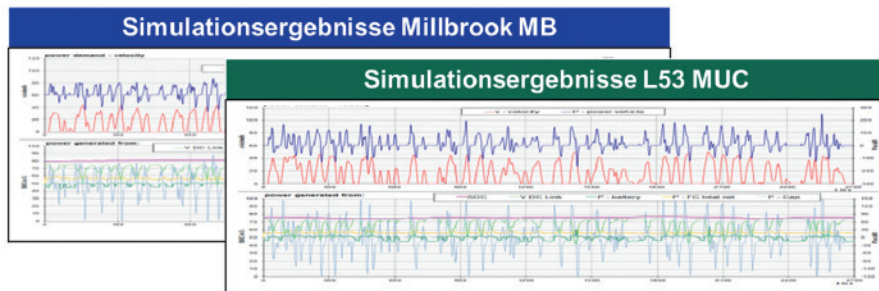
### Zum Autor

**Manfred Limbrunner** ist seit Februar 2018 als Vorstandsmitglied bei Proton Motor für Vertrieb und Marketing verantwortlich. Er kam im November 2000 als Konstrukteur und Projektleiter für diverse mobile und maritime Projekte zu Proton Motor. Dort baute er die Konstruktionsabteilung auf und übernahm deren Leitung, war maßgeblich an der Gestaltung des Qualitätsmanagementsystems beteiligt und wechselte im Oktober 2009 in die Rolle des Produktmanagers. Von März 2011 bis November 2016 war er für die Technische Leitung bei Proton Motor verantwortlich und übernahm anschließend die Leitung der Mobilien Business Unit. Limbrunner hat Maschinenbau mit dem Schwerpunkt Konstruktion an der Fachhochschule in Kempten studiert.

terie) und wäre wieder für 14 bis 16 Stunden einsatzbereit.

Die Proton Motor Fuel Cell GmbH verfolgt dieses Prinzip seit nun mehr zwanzig Jahren, als Proton Motor 1998 gegründet wurde und aus der Firma Magnet Motor hervorgegangen ist, welche schon in den

80er und 90er Jahren hochinnovative elektrische Antriebslösungen realisiert hat. Bereits im Jahr 2000 wurde der erste Bus mit Brennstoffzellen-Plug-In Hybrid in Betrieb genommen. Damals schon mit einem luftgekühlten 30-kW-Brennstoffzellensystem in Kombination mit einer Nickel-Metall-Hybrid-Batterie. 2008 wurde ein Bus



Bus Typ	Nutzlast	Leistung Antrieb+ Nebenverbraucher (ohne AC) [kW]			
		MB P Ø	MB P peak	L53 P Ø	L53 P peak
Midi-Bus	50 %	15,2	103	17,6	151
	100 %	17,1	120	19,6	176
Standart-Bus	50 %	17,8	127	20,5	185
	100 %	20,7	152	23,8	223
Gelenk-Bus	30 %	23,0	173	26,5	252
	100 %	30,0	230	34,3	336

Abb. 3: Simulationsergebnisse.

**TriHyBus®**

- Brennstoffzelle: 45 kW
- Li-Ion Batterien: 27,4 kWh
- Super-Caps: 1 kWh, 200 KW
- Antriebsmotor: 120 kW
- H2-Speicher: 20 kg @ 350 bar

Abb. 4: Steckbrief des TriHy-Busses in Prag.

ANZEIGE

**lightrailday.com®**

**Light Rail Day**  
5<sup>TH</sup> - 6<sup>TH</sup> November 2018  
Stockholm/Sweden

**EU Light Rail**  
**17-18.05.2018**  
**Tram Museum Brussels**

The new **EU Light Rail** conference brings together some of the leading opinion-formers and decision-makers all around the role of technology in the development of sustainable urban travel.

**EU LIGHT RAIL**  
— DRIVING INNOVATION — More information on [www.eulightrail.com](http://www.eulightrail.com)

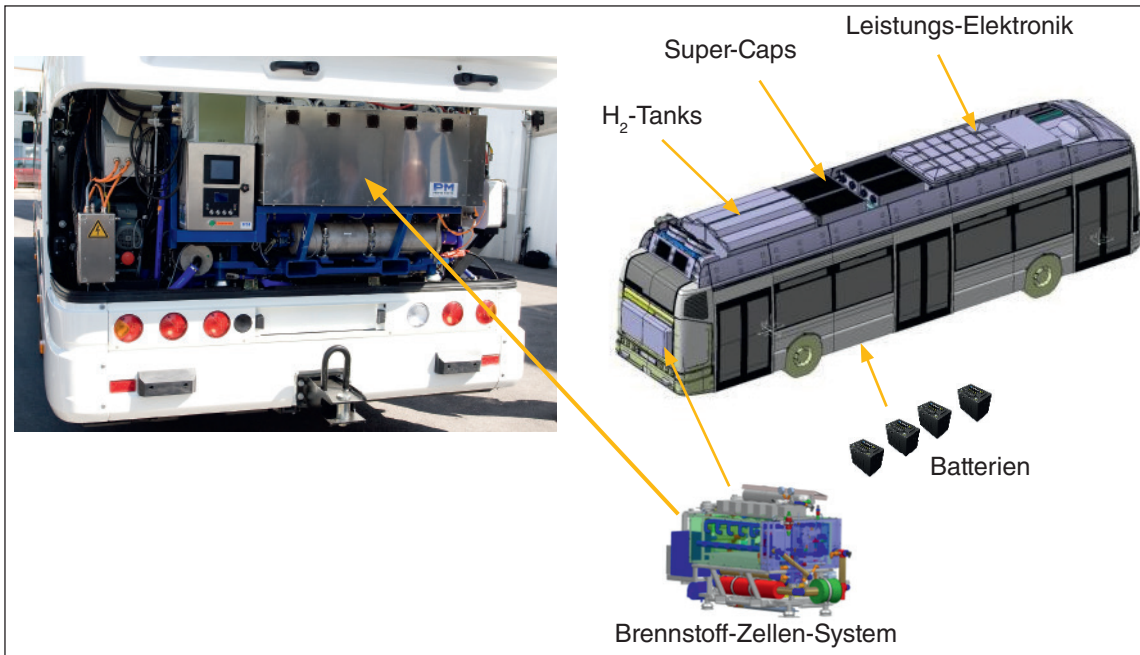


Abb. 5: Das Brennstoff-Zellen-System und seine Anordnung im Bus.

mit Skoda Electric mit einem neuen innovativen Antriebskonzept Triple-Hybrid-Konzept (Patent von Proton Motor), bestehend aus einem Brennstoffzellensystem (45 kW), Li-Ion Batterien (27,4 kWh) und Super-Caps (1 kWh) in Betrieb genommen. Hierbei wurden sogenannte Super-Caps mit nahezu unlimitierter Zyklusstabilität und hoher Leistungsabgabe mit dem Brennstoffzellensystem und den Li-Ion Batterien kombiniert. Gerade für hochdy-

namische Anwendungen könnte dies einen positiven Effekt auf Batterien haben und es zudem erlauben, diese kleiner zu dimensionieren. Dieser Bus ist seitdem in Betrieb und wurde zuletzt auf der Weltwasserstoff-Konferenz in Prag als Shuttle Bus eingesetzt.

Mit Proton Motor's modularem HyRange®-System der vierten Generation, kann in Schritten von 7,4 kW ab einer Leistung von 30 kW bis zu einer Leistung von 75 kW auf Kundenanforderungen flexibel reagiert werden. Das Herzstück des Systems ist das von Proton Motor entwickelte, hochintegrierte Brennstoffzellemodul mit weltweit einzigartigem Wirkungsgrad und Leistungsdichte für Bus- sowie Logistikanwendungen. Das HyRange®-System mit Brennstoffzellenmodul ist für die Lagerung und den Start aus Minusgraden konzipiert, so dass Busse, welche mit diesen Systemen ausgestattet sind, nicht in beheizten Hallen geparkt werden müssen.

Beim Start aus Minustemperaturen wird das HyRange®-System mittels eines von

Proton Motor entwickelten Hochvoltheizers auf Betriebstemperatur gebracht und die Brennstoffzellensteuerung, welche mittels einer CAN Kommunikation mit der Fahrzeugsteuerung verbunden ist, stellt sicher, dass der Busfahrer sofort aus den Batterien losfahren kann, ohne die Aufheizprozedur des HyRange®-Systems abwarten zu müssen.

Bei der Frage nach der richtigen Kombination aus Brennstoffzelle und Batterie unterstützt Proton Motor bei Bedarf bei der Auslegung des elektrischen Antriebsstranges mittels eigens entwickelten Simulationstools. So kann die geeignete Antriebstrangkonfiguration ermittelt und an die Einbausituation des Busses angepasst werden, so dass der Bushersteller/-integrator ein fertig vormontiertes und qualitätsgeprüftes Brennstoffzellensystem erhält, welches als Serienaggregat produziert werden kann. Bei Service und Wartung der Busse, welche mit HyRange®-Systemen ausgestattet sind, werden umfassende Wartungs- und Servicedienstleistungen angeboten.



Abb. 6: Das BZ-Modul.

Zusammenfassung/Summary

Die Kombination macht's

Die Kombination von Brennstoffzellensystemen und Batterien stellt die optimale Lösung für die Betreiberanforderungen nach kostengünstigen, emissionsfreien Antriebslösungen im innerstädtischen Nahverkehr da. Brennstoffzellen-Hybrid-Systeme von Proton Motor, mit mehr als zwanzigjähriger Erfahrung, bieten hier die geeignete Lösung.

The right combo makes it possible

The operator's requirements for economic and emission-free driving solutions in the intra-urban public transport are being fulfilled to the optimum extent by a combination of fuel cell systems and batteries. Having more than 20 years of experience, fuel cell-hybrid systems by Proton Motor offer the optimum solution.