

Betriebserfahrungen mit Schraubenkompressoren zur Aufladung von Brennstoffzellenfahrzeugen

Dr.-Ing. **T. v. Unwerth**, Volkswagen AG, Wolfsburg
Dr.-Ing. **S. Schmitz**, Volkswagen AG, Wolfsburg
Dipl.-Ing. **F. Rudolf**, Volkswagen AG, Wolfsburg
Dipl.-Ing. **F. Al-Saleh**, Volkswagen AG, Wolfsburg
Dipl.-Ing. **K. Schütte**, IAV GmbH, Gifhorn

Zusammenfassung

Elektrotraktion bietet im Rahmen der aktuellen Klimadiskussion eine ökologisch sinnvolle Alternative zu verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen. Unter dieser Technologie werden in der Kraftstoff- und Antriebsstrategie von Volkswagen sowohl der rein batterieelektrische Antrieb als auch der Brennstoffzellenantrieb zusammengefasst, es handelt sich bei beiden um elektromotorische Antriebe, die sich lediglich durch die Art der Energiebereitstellung unterscheiden.

Die in automobilen Anwendungen vorzugsweise eingesetzten Niedertemperatur-PEM-Brennstoffzellen benötigen für die elektrochemische Energiewandlung die Elemente Wasserstoff und Sauerstoff. Letzterer wird dabei aus der Umgebungsluft mit Hilfe eines Aufladeaggregats der Brennstoffzelle zugeführt. In den vergangenen Fahrzeuggenerationen HyMotion1 bis HyMotion3 der Volkswagen AG wurden bisher Schraubenkompressoren zur Bereitstellung des Luftmassenstroms bei den geforderten Druckverhältnissen eingesetzt [1].

Die Betriebserfahrungen mit den Schraubenkompressoren in der HyMotion3-Fahrzeugflotte zeigen als Vorteile ein zuverlässiges Betriebsverhalten und die Abdeckung eines sehr breiten Kennfeldbereiches auf. Demgegenüber stehen die ungünstige Akustik, die relativ hohen Fertigungskosten und die vergleichsweise geringe Dynamik bei wechselnden Lastanforderungen, bedingt durch die Trägheitsmomente der Schraubenrotoren.

Unter diesen Gesichtspunkten ist in der nächsten Fahrzeuggeneration zur Systemoptimierung der Einsatz von Turbomaschinen vorgesehen. Der Artikel stellt im folgenden die Aufladetechnologien gegenüber und beschreibt Betriebserfahrungen, Vor- und Nachteile und die sich daraus ergebenden Aufgabenstellungen, die bearbeitet werden müssen, damit Schraubenmaschinen eine Renaissance als Aufladeaggregate in Brennstoffzellenfahrzeugen erleben.

1 Einleitung

Die Alternative zur Speicherung von elektrischer Energie im Fahrzeug ist die mobile Energiewandlung. Dazu werden bevorzugt Brennstoffzellen als elektrochemische Zellen eingesetzt, die die chemische Energie von Brennstoffen und dem Reaktionspartner Sauerstoff direkt in elektrischen Strom umwandeln. Diese besitzen gegenüber Wärmekraftmaschinen, wie dem Verbrennungsmotor oder der Gasturbine, einen Wirkungsgradvorteil. Im Gegensatz zu der direkten Umwandlung von chemischer in elektrische Energie bei Brennstoffzellen, finden bei Wärmekraftmaschinen Zwischenschritte zur Umwandlung in thermische Energie und mechanische Energie statt. Abbildung 1-1 zeigt einen Vergleich des Carnot-Wirkungsgrades der Wärmekraftmaschine mit dem thermischen Wirkungsgrad der Brennstoffzelle als jeweils theoretische obere Grenze der Energiewandlungsgüte.

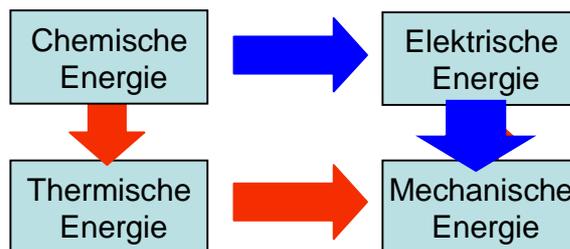
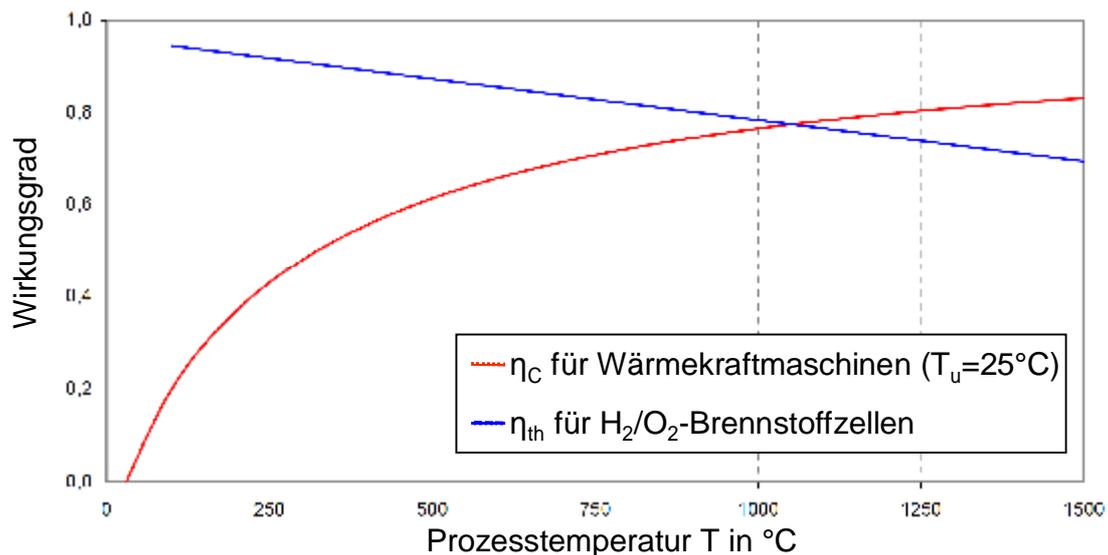


Abb. 1-1: Vergleich von Wärmekraftmaschinen und Brennstoffzellen über den

thermischen Wirkungsgrad
$$h_{th} = \frac{\Delta G^0}{\Delta H^0} = 1 - T \cdot \Delta S^0$$

und den Carnot-Wirkungsgrad
$$h_c = 1 - \frac{T_u}{T}$$

Aus dem Spektrum von verschiedenen Typen von Brennstoffzellen werden im Automobilbereich vorrangig Niedertemperatur-Brennstoffzellen mit Polymerelektrolytmembran (PEM) eingesetzt. Diese wandeln Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) aus der Umgebungsluft in elektrische Energie und Verlustwärme um. Um den Leistungsbedarf eines Antriebssystems durch die PEM-Brennstoffzelle im Fahrzeug zu decken sind drei Systemmodule notwendig. Sie sind in Abbildung 1-2 schematisch dargestellt.

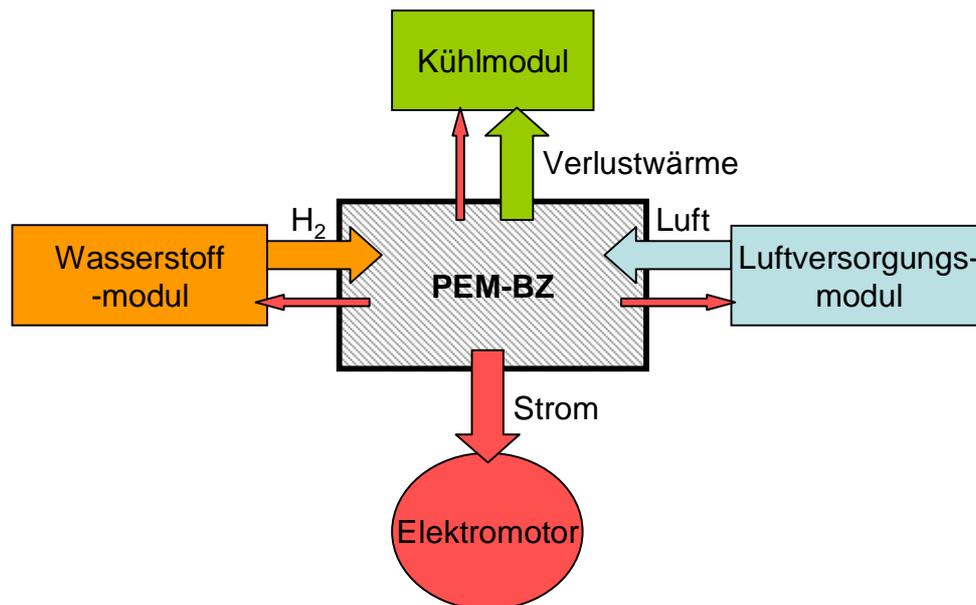


Abb. 1-2: Schematische Darstellung des Gesamtsystems einer PEM-Brennstoffzelle
Schmale rote Pfeile = parasitärer Stromverbrauch der Module

Als Zielsetzung aktueller Forschungsaktivitäten soll ein Gesamtsystem mit hohem Wirkungsgrad und damit verbundener hoher Reichweite des Zielfahrzeuges zu bezahlbaren Kosten definiert werden. Angesichts dieser Zielsetzung ist es nötig, den Energieverbrauch der Hilfsmodule, insbesondere des Luftversorgungsmoduls als größtem parasitären Verbraucher, im Betrieb der Brennstoffzelle zu senken.

2 Brennstoffzellen für mobile Anwendungen

Obwohl die Brennstoffzelle 1839 durch Grove und Schönbein entdeckt wurde, sind erste Anwendungen für Automobile erst um 1960 realisiert worden. Als Hauptgrund für den langsamen Entwicklungsprozess der BZ-Technologie sind vorrangig andere Entdeckungen zu nennen, die zu dem jeweiligen Zeitpunkt vielversprechender erschienen. Zunächst wurde mit der Dynamomaschine von Werner von Siemens 1866 eine weitere einfache Methode zur Stromerzeugung gefunden. Im Bereich der

mobilen Anwendungen konnten Wärmekraftmaschinen in Form von Dampfmaschinen oder Verbrennungsmotoren den Bedarf an Mobilität decken. Einen großen Aufschwung erlebte die Brennstoffzellenforschung nach der Ölkrise 1973. Der Brennstoffzellentyp der derzeit vorrangig in Brennstoffzellenfahrzeugen verbaut wird, die moderne PEM-Brennstoffzelle, ist 1984 von Geoffrey Ballard vorgestellt worden.

Die Konzernforschung für alternative Antriebe konzentriert sich bei der Volkswagen AG in Isenbüttel. Im Technologiezentrum für Elektrotraktion werden seit 2001 Forschungsschwerpunkte im Bereich der Brennstoffzellensysteme untersucht. Abbildung 2-1 zeigt die Fahrzeugentwicklungen der letzten Dekade.

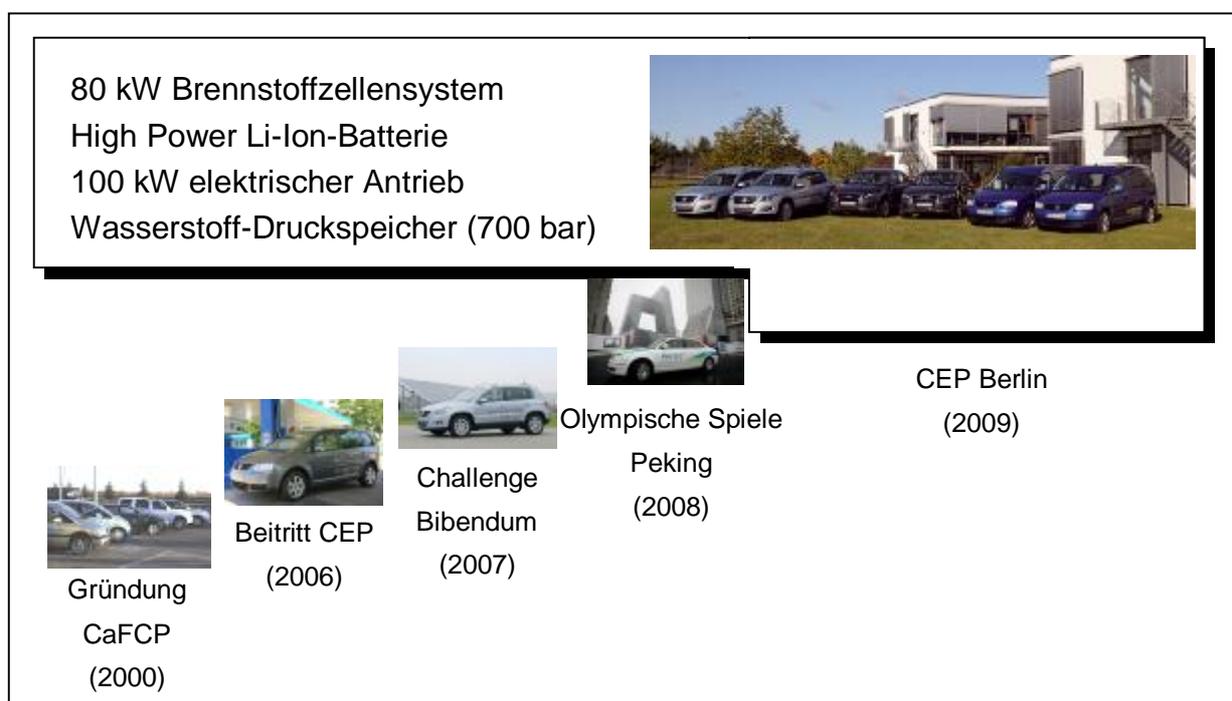


Abb. 2-1: Brennstoffzellenfahrzeugvorstellungen von Volkswagen

Brennstoffzellen sind elektrochemische Zellen, die chemische Energie direkt in elektrische Energie umwandeln. Die für die Umwandlung nötigen Oxidations- und Reduktionsreaktionen laufen räumlich getrennt voneinander an Elektroden ab. Abbildung 2-2 zeigt schematisch die Funktionsweise.

Die Oxidationsreaktion, bei der Elektronen vom Brennstoff abgegeben werden, läuft an der Anode ab. Die Elektronen werden zunächst auf elektrisch leitende Bipolarplatten übertragen und von dort über einen äußeren Stromkreis, in dem ein Verbraucher integriert ist, zur Kathode transportiert. Dort werden sie von einem Oxidans bei der Reduktionsreaktion aufgenommen. Die räumliche Trennung übernimmt ein Elektrolyt. Dieser Elektrolyt erlaubt den für die Reaktionen

notwendigen Austausch von Ionen oder Protonen, verhindert aber einen Stofftransport von Brennstoff und Oxidans. Zum Absenken der für die Reaktionen benötigten Aktivierungsenergien sind auf den Elektroden Katalysatoren aufgebracht.

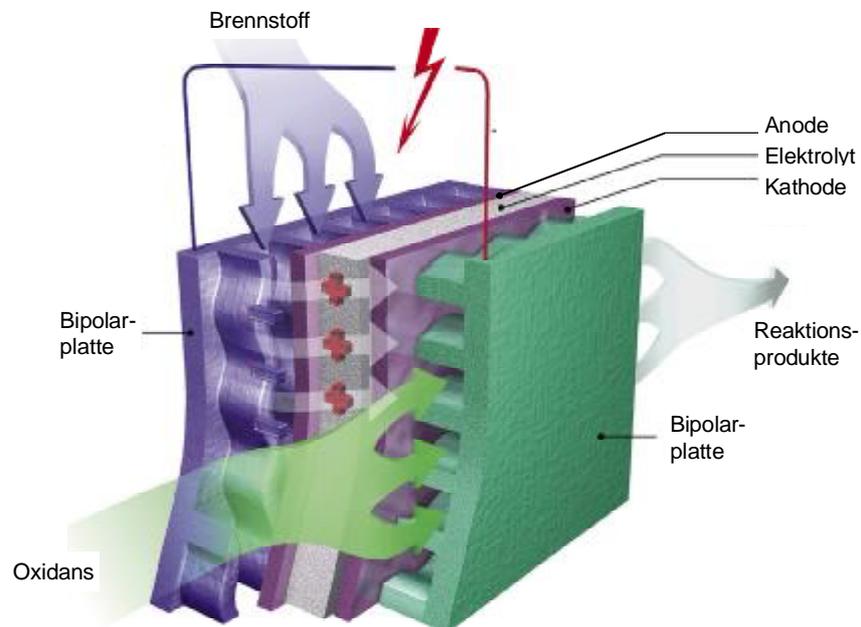


Abb. 2-2: Prinzipieller Aufbau einer Brennstoffzelle

Die PEM-Brennstoffzelle, die im automobilen Bereich vorrangig eingesetzt wird, verwendet als Elektrolyt eine Polymerelektrolytmembran, die Protonen leiten kann. Als Brennstoff wird gasförmiger Wasserstoff eingesetzt, der an der Anode oxidiert wird. Die entstehenden Protonen werden durch die Membran an die Kathode transportiert. Mit den Elektronen, die durch den äußeren Stromkreis geflossen sind und den Protonen findet auf der Kathode die Reduktion von Sauerstoff statt. Neben Sauerstoff befinden sich an der Kathode noch weitere Gase. Hierbei handelt es sich vorrangig um Stickstoff, da Luft zur Versorgung eingesetzt wird. Die Luftbestandteile nehmen jedoch nicht an der Reaktion teil. Da die Betriebstemperatur bei 80 °C liegt entsteht an der Kathode Wasser in flüssiger Form.

Die Leistungsdichte eines Brennstoffzellenstapels kann nun durch eine Erhöhung der Drücke von Brenngas und Oxidans positiv beeinflusst werden. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2-3 dargestellt.

Ein hoher Betriebsdruck bedingt jedoch eine hohe Leistungsaufnahme des Verdichters P_V . Die damit verbundene Steigerung der parasitären Leistung P_{par} verringert so den Wirkungsgrad des Gesamtsystems η_{Sys} . Abbildung 2-4 veranschaulicht beispielhaft den Verlauf des Zell- und Systemwirkungsgrades.

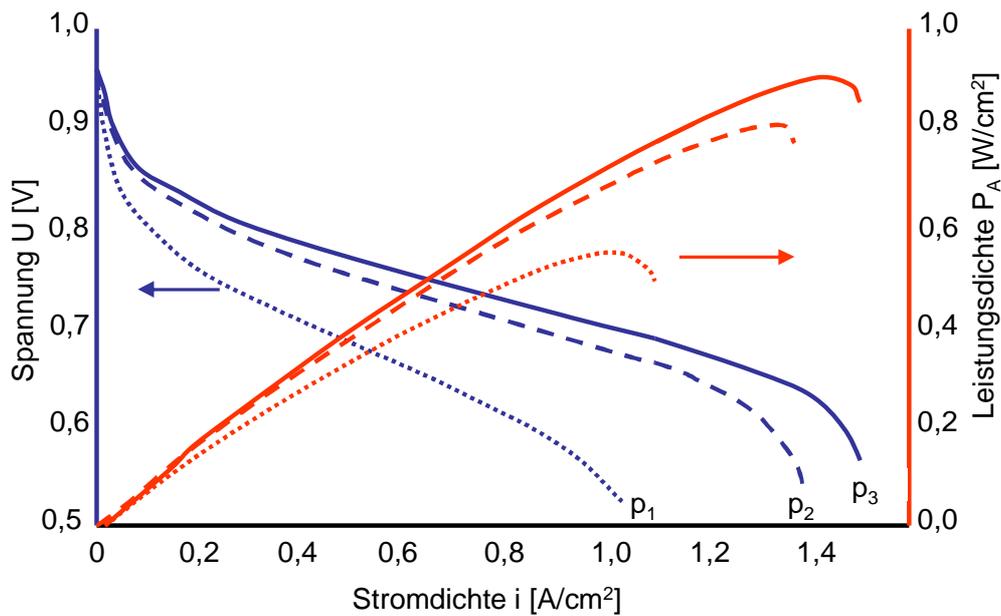


Abb. 2-3: Vergleich von U-I-Kennlinien und Leistungsdichtekurven
 $p_1=1 \text{ bar}$, $p_2=2 \text{ bar}$, $p_3=3 \text{ bar}$ [2]

Bei einer definierten Leistungsanforderung durch einen Elektromotor kann somit eine kleinere und leichtere Brennstoffzelle eingesetzt werden. Nachteilig an der Druckerhöhung ist, dass die erhöhten parasitären Leistungen den Systemwirkungsgrad vor allem im unteren Lastbereich senken

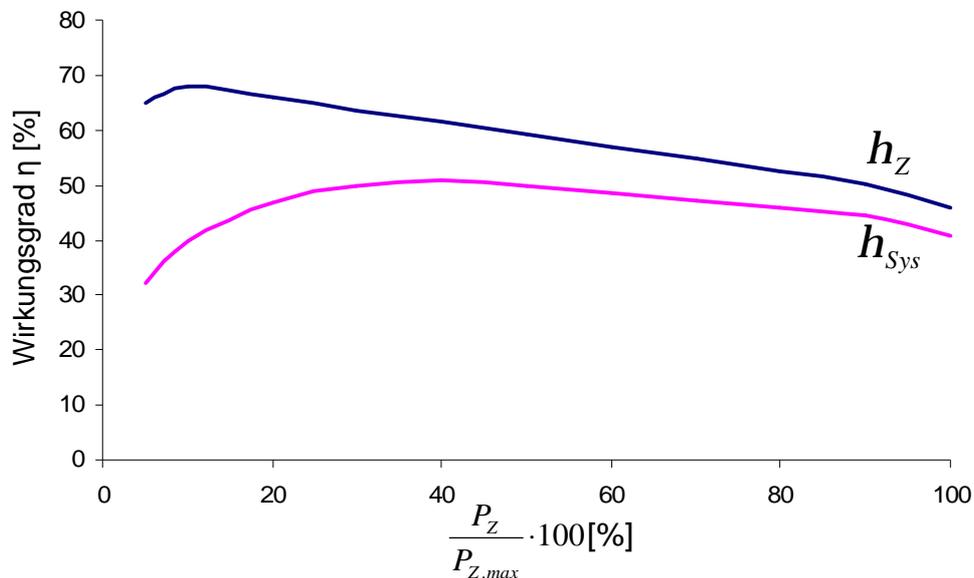


Abb. 2-4: prinzipielle Wirkungsgradverläufe in Abhängigkeit der Brennstoffzellenleistung mit

$$h_{Sys} = \frac{P_{Sys}}{P_{H_2}}, \quad P_{Sys} = P_Z - P_{par}, \quad P_{H_2} = \dot{n}_{H_2} \cdot \Delta H^0 \quad [3]$$

3 Das Luftversorgungssystem für die PEM-BZ

Das Anforderungsprofil für die Luftversorgung der PEM-Brennstoffzellen wird durch die Betriebsbedingungen der Brennstoffzelle und den Voraussetzungen für mobile Anwendungen bestimmt. Die von der Brennstoffzelle vorgegeben Kriterien umfassen:

- Einhaltung von Druck- und Massenstromvorgaben für alle Betriebspunkte: In der Auslegung eines BZ-Systems sind für jeden Lastpunkt Drücke und Massenströme festgelegt. Werden beim Betrieb der BZ nicht der erforderliche Druck oder Massenstrom erreicht, kann die Antriebslast nicht aufgebracht werden.
- Luftreinheit: Zur Leistungserhöhung wird an den Elektroden der BZ Platin als Katalysator aufgebracht. Die Platinbeladung stellt einen wesentlichen Kostenanteil der BZ dar und die Wirkung ist hoch empfindlich gegenüber Verunreinigungen. Daher ist ein Luftfilter erforderlich. Außerdem können aus diesem Grund nur ölfreie Verdichter eingesetzt werden.
- Lufttemperatur: Die Prozesstemperatur für die Reaktionen in der BZ liegt bei 80°C. Weicht die Temperatur der zugeführten Luft davon ab, hat das Beeinträchtigungen der BZ-Leistung zur Folge.
- Befeuchtung: Die Funktion der Polymerelektrolytmembran hängt stark vom korrekten Feuchtigkeitsgehalt ab. Wird das Produktwasser nicht ausreichend abgeführt, werden die Strömungen von Brenngas und Luft behindert und es kommt zu einem Leistungseinbruch. Ist die Befeuchtung geringer als benötigt, so trocknet die Membran aus. Dadurch wird der Transport der Ladungsträger durch die Membran gestört.

Für die Verwendung in Elektro-Fahrzeugen ergeben sich weitere Anforderungen an die Komponenten:

- Hohe Effizienz: Um große Reichweiten mit dem Fahrzeug zu erreichen, sind hohe Wirkungsgrade erforderlich.
- Geringes Gewicht und Volumen: Die Beschleunigung des Fahrzeugs wird durch die Gesamtmasse beeinflusst. Gesamtmasse und Kosten sind wiederum vom Volumen der Aggregate abhängig.
- Geringe Geräusentwicklung: Bei Elektro-Fahrzeugen ist besonders auf die Akustik zu achten, da durch den leisen Elektro-Motor Störgeräusche besonders in den Vordergrund treten.
- Hohe Zuverlässigkeit: Für den Automobilbereich ist eine Lebensdauer von 5000 h erforderlich.

- Schnelles Reaktionsvermögen auf Lastwechsel: Durch den Betrieb im Straßenverkehr muss sich das Luftversorgungssystem innerhalb kurzer Zeit an neue Leistungsniveaus anpassen können.

Die Verschaltung eines entsprechenden Luftversorgungssystem ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

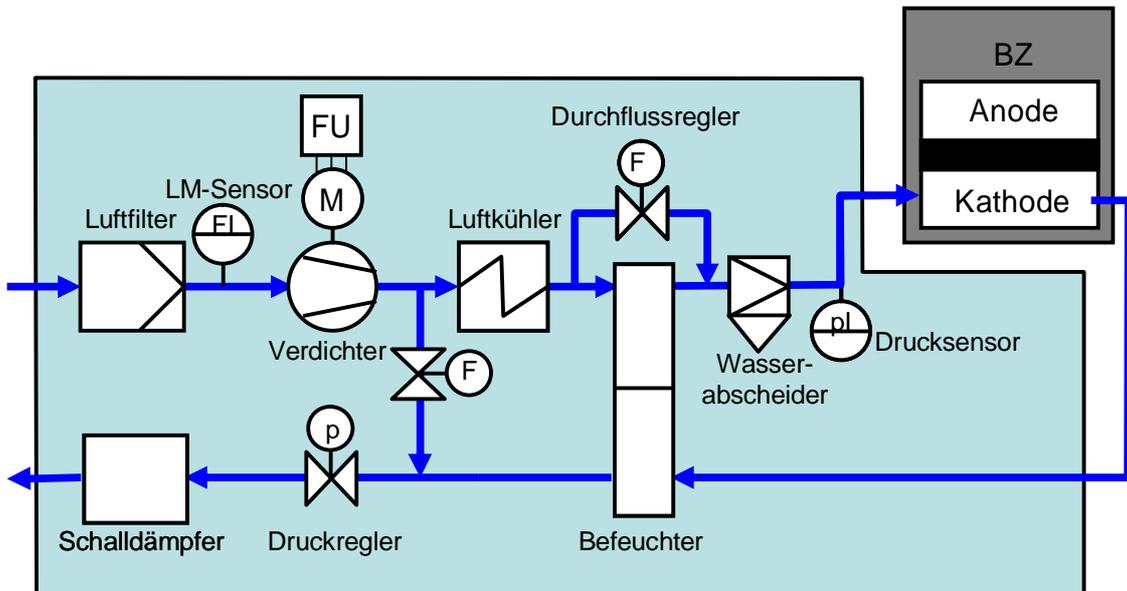


Abb. 3-3: Systemübersicht der Luftversorgung

Abbildung 3-2 zeigt eine typische Betriebskennlinie einer Brennstoffzelle.

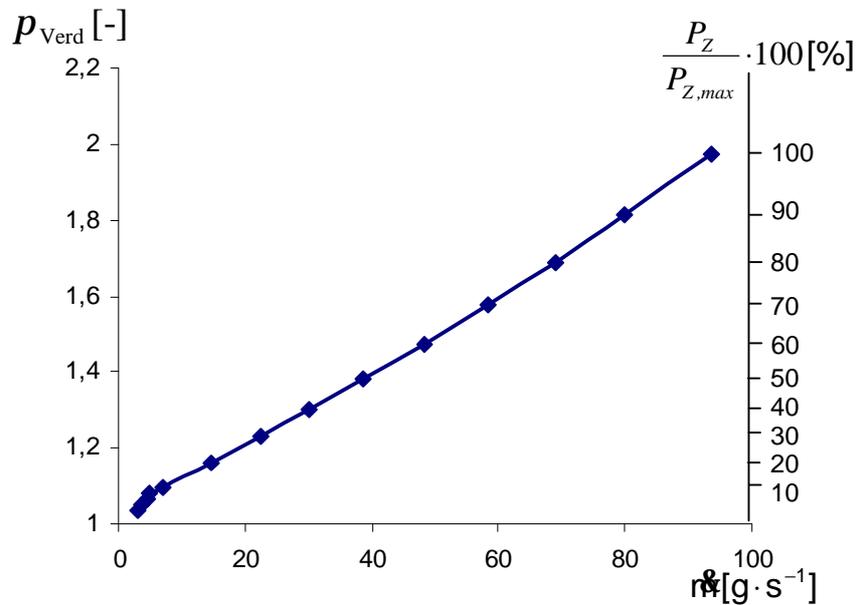


Abb. 3-4: Die Bedarfskennlinie der Brennstoffzelle

Das Anforderungsprofil für die Komponenten der Brennstoffzellen-Luftversorgung ist somit vollständig festgelegt.

4 Vergleich von Schraubenmaschinen- und Turboaufladung

Derzeit wird die Versorgung der BZ mit verdichteter Frischluft über elektrisch angetriebene Verdichter realisiert. Wichtig zu erwähnen ist, dass für die Versorgung der Aggregate ein Drehstrom-Elektromotor notwendig ist. Der Typ des Elektromotors wird hauptsächlich von der Drehzahl und der Regelbarkeit bestimmt. Bei hohen Drehzahlen werden i.d.R. Synchronmaschinen eingesetzt. Diese haben zwar ein höheres Leistungsgewicht, bieten jedoch eine hohe Regelgüte. Für Anwendungen die keine hohen Regelgüten voraussetzen eignen sich Asynchronmaschinen. Beide Antriebsmaschinen benötigen einen Frequenzumrichter zur Drehzahlregelung. Dabei stellen die Masse und das Volumen des Frequenzumrichters Größen dar, die bei der elektrisch angetriebenen Aufladung beachtet werden müssen. Hinzu kommt, dass eine Kühlung der Leistungselektronik notwendig ist.

Derzeit zur Brennstoffzellenaufladung bevorzugt eingesetzte Verdichterarten sind die Schraubenmaschine und elektrisch angetriebene Radialverdichter, Abbildung 4-1.

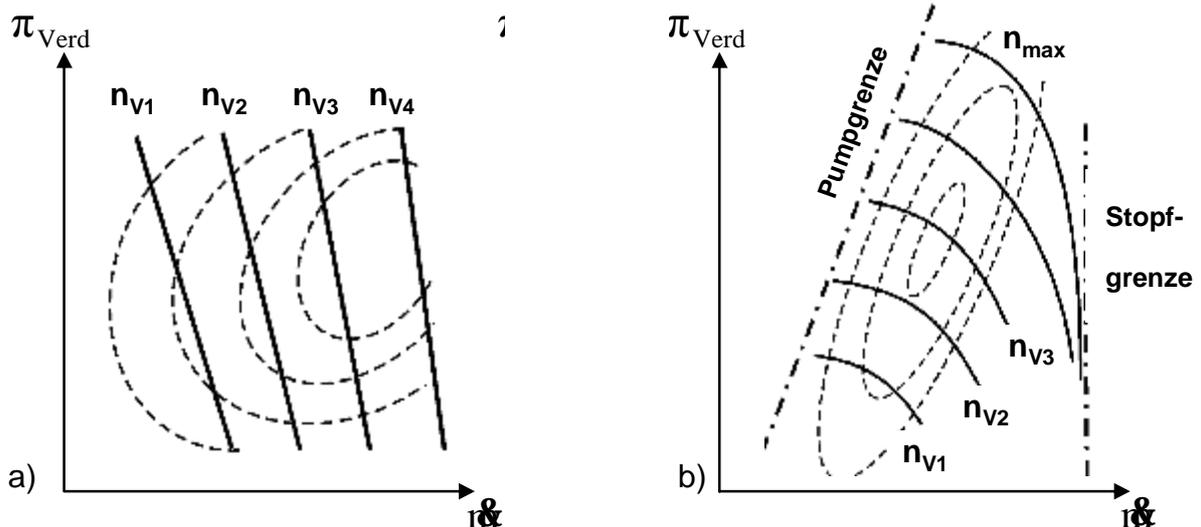


Abb. 4-1: Gegenüberstellung Schraubenverdichter a) und Radialverdichter b) zur Brennstoffzellenaufladung [4]

Nachdem die möglichen Verdichter vorgestellt wurden, wird die Bewertung der Verdichter in der folgenden Tab. 4-1 vorgenommen.

Tab. 4-1: Bewertung der Aufladesysteme

Im Vergleich: -- sehr schlecht – schlecht o keine Bewertung + gut ++ sehr gut

*Bewertung des Temperaturverhaltens über isentropen Wirkungsgrad

**Keine effiziente Befeuchtung im Aggregat möglich

	Schrauben- maschine	Radial- verdichter
Arbeitsbereich	++	-/+
Luftreinheit	+	+
Temperatur*	+	++
Befeuchtung**	o	o
Effizienz	+(+)	+
Gewicht/Volumen	-	++
Akustik	-	+
Zuverlässigkeit	++	+
Ansprechverhalten	-	++

Wie der Tabelle 4-1 zu entnehmen ist, bietet die Verwendung des Radialverdichters Vorteile gegenüber dem Schraubenverdichter. Der Arbeitsbereich ermöglicht hohe Druckverhältnisse, muss jedoch genau an den Bedarf der Brennstoffzelle angepasst sein, was besonders bei niedrigen Massenströmen und bei Lasttransienten zu Problemen aufgrund der Pumpgrenze führt. Abhilfe schafft hierbei ein hinter dem Verdichter angebrachter Bypass, durch den die Betriebskennlinie zu höheren Massenströmen verschoben werden kann. Dadurch wird allerdings die parasitäre Leistung entsprechend der für den Bypassmassenstrom aufgewendeten Verdichterleistung angehoben und der Systemwirkungsgrad verringert.

Diese Vorgehensweise erfordert gerade im repräsentativen Fahrzyklus (z.B. NEDC), in dem lange Zeitintervalle im unteren Teillastbereich gefahren werden, einen großen notwendigen Verlustmassenstrom durch den Bypass, denn hier liegt der Betriebspunkt der Brennstoffzelle deutlich im Bereich jenseits der Pumpgrenze. Vergleicht man somit den Systemwirkungsgrad im gesamten Leistungsbereich, so ergibt sich ein verschobenes Bild, das zugunsten des Schraubenverdichters ausfällt, Abbildung 4-2.

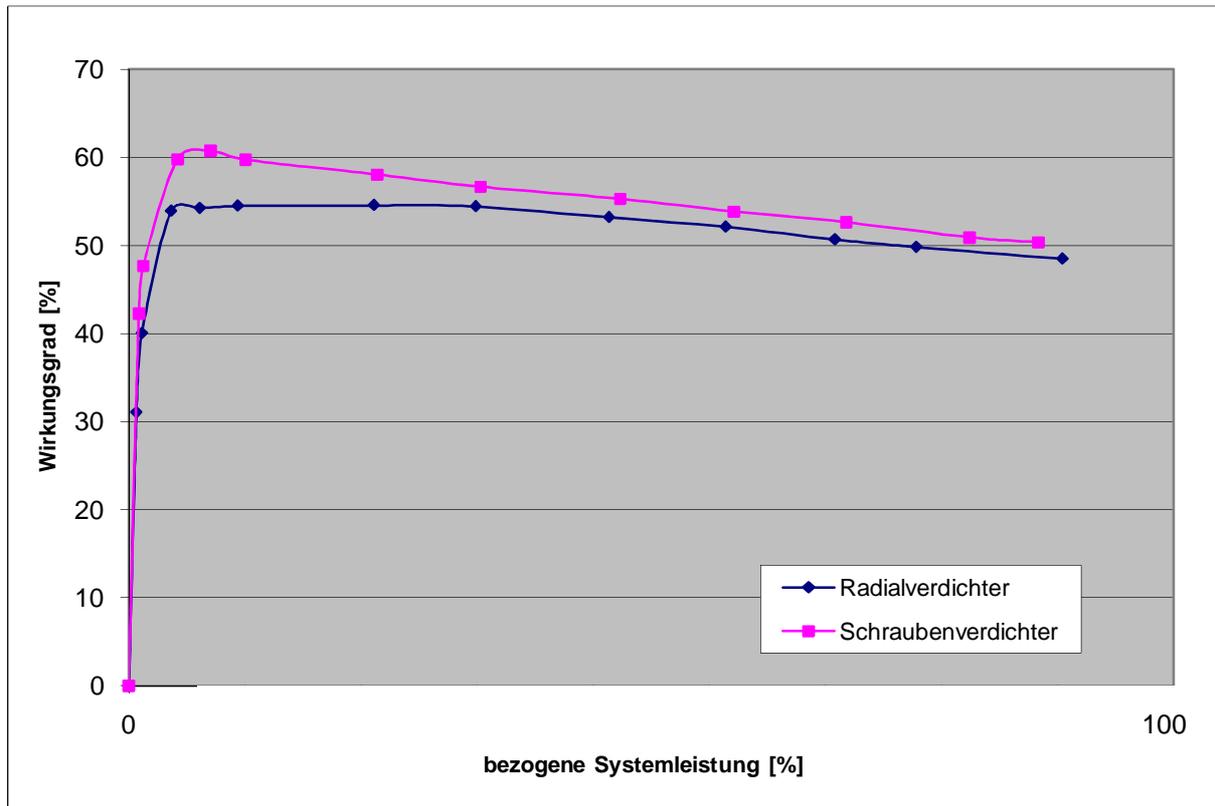


Abb. 4-2: Vergleich der Systemwirkungsgrade im Fahrzeug mit Radialverdichter und Schraubenverdichter

Folglich bleiben in Zukunft Lösungen zu finden, die die genannten Nachteile der Schraubenverdichter gegenüber der Radialverdichter aufheben oder in Vorteile umkehren, darunter fallen:

- Reduzierung der Masse (Gehäuse und Rotoren),
- Reduzierung der Geräuschemissionen,
- Erhöhung der Dynamik (Reduzierung des Rotorträgheitsmomentes),
- Reduzierung des Bauvolumens,
- Reduzierung der Fertigungs- und Materialkosten sowie
- Optimierung des Wirkungsgrades.

Sollte es zukünftig möglich sein, Schraubenverdichter herzustellen, die den genannten Anforderungen für den Einsatz in mobilen Brennstoffzellensystemen genügen, so könnte dies durchaus zu einer Rückkehr zum Einsatz dieser Verdichtertechnologie in Brennstoffzellenfahrzeugen führen.

5 Literaturverzeichnis

- [1] v.Unwerth, T. *Current Trends in automotive fuel cell air management systems.*
Romba, M. In: VDI-Berichte 1932, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2006
- [2] Schönfelder, C. *Optimierung von Luftversorgungseinheiten für Brennstoffzellensysteme in Fahrzeugantrieben.* Dissertation, RWTH Aachen, 2007
- [3] Kordes, K. *Fuel Cells and Their Applications.* VCH
Simader, G. Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1996
- [4] Golloch, R. *Downsizing bei Verbrennungsmotoren.* Springer, Berlin, 2005