



Feras Al-Saleh (Autor)

Thermodynamische Analyse, Modellbildung und Simulation eines automobilen Brennstoff Antriebssystems



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/234>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1 Einleitung

Im letzten Jahrzehnt haben wir die erschreckenden Ergebnisse der globalen Erwärmung deutlich zu spüren bekommen. Tsunamis, Hurrikans und Überflutung haben unzähligen Menschen das Leben gekostet. Laut Klimaforschern wird es selbst bei der Halbierung der Treibhausgasemissionen bis 2050 zu noch schwereren Umweltschäden kommen [1]. Jedoch scheinen diese Tatsachen die weltweit steigende Nachfrage nach mehr Energie nicht im Geringsten zu beeinträchtigen. Die Verbrennung fossiler Energieträger gehört nach wie vor zu den einflussreichsten Ursachen für diesen fatalen Anstieg der Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre, wodurch der Treibhauseffekt aus seinem natürlichen Gleichgewicht gebracht wird. Das Automobil mit Verbrennungsmotor ist eines der Hauptverursacher dieses Kohlenstoffdioxid-Überschusses [2]. Die Erforschung von innovativen Antrieben könnte die irreparablen Schäden wohl nicht mehr rückgängig machen aber durchaus zu einer weniger düsteren Zukunftsaussicht beitragen.

Ein ebenso wichtiger Grund für die Förderung alternativer Antriebsquellen sind nachweisliche Studien, die zeigen, dass die Reserven unserer meist genutzten Primärquelle Rohöl sich voraussichtlich bis zum Jahr 2050 erschöpfen werden (Abb. 1). Der Zusammenbruch der weltweiten Energieversorgung würde der Menschheit bevorstehen, wenn wir keine vergleichbare Primärenergiequelle finden und dies würde ernstzunehmende wirtschaftliche, politische sowie gesellschaftliche Folgen nach sich ziehen. Eine effiziente Möglichkeit, die die Abhängig vom Öl reduziert und gleichzeitig für unsere Umwelt schonend ist, muss daher gefunden werden.

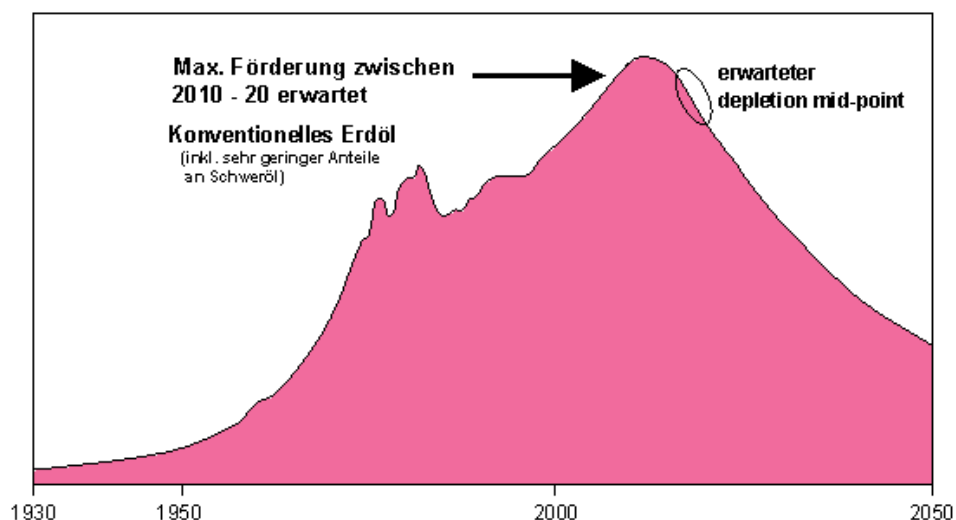


Abbildung 1 Die weltweite Erdölförderung von 1930 bis 2050 [3]

Durch ihre Fähigkeit, die vorhandenen Verbrennungsmotoren auf eine emissionsparende Weise antreiben zu können, scheinen die so genannten „Synfuels und Sunfuels“ auf den ersten Blick die optimale Alternative zu den herkömmlich hergestellten, fossilen Kraftstoffen darzustellen. Jedoch haben diese synthetisch hergestellten Kraftstoffe einen erheblichen Nachteil anderen alternativen Antrieben gegenüber. Selbst wenn sich eine kostspielige Umrüstung vermeiden ließe, wären sie nicht in der Lage, ein großflächiges Energienetz zu versorgen. Ihre begrenzte Verfügbarkeit würde das nicht bewerkstelligen können. Darüber hinaus sollte man noch in Erwägung ziehen, dass diese biologischen Kraftstoffe allein bei einem zu 100% geschlossenen CO₂-Kreislauf weiterhin als emissionsfrei zu betrachten sind. Somit kann die steigende globale Erwärmung zwar deutlich reduziert werden, aber letztendlich auf langfristige Sicht nicht aufgehoben, sondern nur eine Weile hinausgeschoben werden.

Eine weitere, vielversprechende und alternative Antriebsmöglichkeit stellt der Elektromotor dar. Es kann entweder die Batterie als Energieträger oder die Brennstoffzelle als Energiewandler in Frage kommen. Anhand ihrer niedrigen Leistungsdichte hat die Batterie bislang nur dementsprechende Reichweiten erzielen können. Das Zurücklegen größerer Entfernungen ist mit einem batterieangetriebenen Fahrzeug daher nicht ohne weiteres möglich. Zudem stellen das Gewicht und die hohe Aufladezeit der Batterie zusätzliche Nachteile dar.

Brennstoffzellen bieten durch die direkte Umwandlung von chemischer in elektrische Energie ein höheres Wirkungsgradpotential von etwa 40 – 65 % und liegen somit über dem von Ottomotoren (10-20 %), Dieselmotoren (20-35 %) und Gasturbinen (15-40%). Darüber hinaus sind sie sehr geräuscharm, können emissionsfrei betrieben werden und haben den Vorteil, nicht nachgeladen werden zu müssen. Stattdessen muss Wasserstoff getankt werden. Zudem hat die Brennstoffzelle eine höhere Leistungsdichte und demzufolge auch eine höhere Reichweite und weniger Bauvolumen, was vorteilhafte Grundeigenschaften für die Entwicklung eines Fahrzeuges sind.

Obwohl es heute bereits möglich ist, Autos mit Brennstoffzellen anzutreiben, gibt es noch einige Hürden zu überwinden, bis sich ein solches Antriebskonzept am Markt durchsetzen wird. Beispielsweise ist der Transport von Wasserstoff aufwendig und stellt ein gewisses Risiko dar, da Wasserstoff ein brennbares Gas ist. Darüber hinaus hat die Brennstoffzelle eine geringe Lebensdauer. Außerdem stellen die hohen Investitionen auch ein Problem dar, da kein vorhandenes Versorgungsnetz existiert. Auch vermag die Brennstoffzelle nicht all unsere Energieversorgungsprobleme zu lösen, da sie keine Primärquelle darstellt. Trotz dieser Nachteile, würde sie mit der richtigen Förderung in Verbindung mit innovativ hergestelltem Wasserstoff, der durch Strom aus regenerativen Energiequellen wie Solar-, Wind- und Wasserkraft mittels Elektrolyse gewonnen wird, einen sehr zuverlässigen und effizienten

Energieumwandler abgeben und würden im Einklang mit dieser regenerativen Energiequelle eine überaus effiziente Lösung für all unsere Energie- und Emissionsprobleme bieten.

Wilhelm Ostwald, Direktor des ersten Lehrstuhls für physikalische Chemie in Leipzig, hat bereits im Jahr 1887 das Potential der Brennstoffzelle erkannt: *„Haben wir ein galvanisches Element, welches aus Kohle und dem Sauerstoff der Luft unmittelbar elektrische Energie liefert [...], dann stehen wir vor einer technischen Umwälzung, gegen welche die bei der Erfindung der Dampfmaschine verschwinden muss. Denken wir nur, wie [...] sich das Aussehen unserer Industrieorte ändern wird! Kein Rauch, kein Ruß, keine Dampfmaschine, ja kein Feuer mehr...“* [4]

Aus diesem Grund wendete sich die Forschung in den letzten zehn Jahren der Brennstoffzelle immer mehr zu. Um Brennstoffzellen optimal betreiben zu können, werden Wasserstoff und Luft (Sauerstoff) überstöchiometrisch zugeführt, sodass immer ausreichende Leistungsreserven vorhanden sind, um plötzlichen Lastanforderungen möglichst schnell folgen zu können. Die überstöchiometrische Gasversorgung der Brennstoffzelle bewirkt weiterhin eine Leistungssteigerung aufgrund der erhöhten Gaskonzentration [5]. Der zugeführte Wasserstoff wird somit nicht vollständig umgesetzt und verlässt das Brennstoffzellensystem teilweise ohne abzureagieren. Dieser nicht umgesetzte Wasserstoff hat eine negative Auswirkung auf den Systemwirkungsgrad.

Um dieses Problem lösen zu können, kommen einige Lösungsmöglichkeiten in Frage. Zum einen wird im stationären [6] sowie im mobilen [7] Betrieb häufig ein Nachbrenner in Kombination mit einer Gasturbine verwendet, die die Energie des Restwasserstoffes zum Teil in Nutzarbeit umwandelt.

Zum anderen stellt die Anodenabgasrezirkulation mit einer elektrochemischen PEM Wasserstoffpumpe eine weitere Lösungsmöglichkeit dar, die zur gleichen Zeit den Wasserstoff aus dem Anodenabgas selektiv abtrennt und wieder in das Brennstoffzellensystem zurückführt [8, 9].

Eine andere Lösung wäre die Benutzung von reinem Wasser- und Sauerstoff als Eduktgase. Hier stellt die Stickstoffaufkonzentration auf der Anodenseite kein Problem dar. Das im Anodenrezirkulationskreislauf anfallende Wasser kann mittels eines Wasserabscheiders entfernt werden. Dieses Verfahren wird bei dem Wasserstoff-Sauerstoff-Regenerative-PEM-Brennstoffzellen-Energie-Speicher-System verwendet. Hier wird das abgeschiedene Wasser zusammen mit dem Produktwasser auf der Kathodenseite mittels Hydrolyse in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten und in das System zurückgeführt. Damit entsteht ein geschlossenes System, das die benötigte Energie aus photovoltaischen Zellen gewinnt [10].

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein HT-PEMFC-System für den mobilen Einsatz zu entwickeln, dass den bestmöglichen Systemwirkungsgrad erlangt (Abb. 2), und zugleich geringen Verbrauch und somit eine hohe Reichweite ermöglicht. Weiterhin soll das System die optimale Funktionsfähigkeit aller Teilkomponenten in einem verfügbaren Bauraum und mit einem von herkömmlichen Fahrzeugen tragbaren Gewicht, sowie den geringstmöglichen Kostenaufwand gewährleisten.

Eine Sensitivitätsanalyse des Systems wird durchgeführt, um das Potential der Systemwirkungsgradverbesserung aufzuzeigen. Es wird eine neu entwickelte Strategie zur Reinigung des Anodenkreislaufs von Inertgasen vorgestellt (LPS \equiv Lastabhängige PurgeStrategie), die eine Methode zur lastabhängigen Berechnung des Purge-Zeitintervalls beschreibt. Weiterhin werden neue geeignete Aufladesysteme ausgewählt und untersucht, sowie die Interaktion der Wasserstoffversorgung und der Luftversorgung mit dem Gesamtsystem betrachtet. Als Verdichter werden verschiedene elektrisch angetriebene Schrauben- und Radialturboverdichter eingesetzt. Zur Wirkungsgradsteigerung des Systems wird die Einsatzmöglichkeit von Abgasturboladern (ATL) betrachtet, die durch Entspannung der Kathodenabgase Druckenergie zurückgewinnen.

Um auf den Wasserstoffzirkulationskreislauf zu verzichten und damit das System so einfach wie möglich halten zu können, werden einige Systemkonfigurationen ausgewählt, in der Simulation umgesetzt und hinsichtlich ihres statischen sowie dynamischen Verhaltens untersucht.

Als erstes werden die Anodenabgase in einem Wasserstoffbrenner verbrannt und thermisch wieder ins System eingekoppelt. Das heiße Abgas wird dazu an einen Wärmeübertrager zur Systemerwärmung beim Kaltstart oder den Abgasturbolader zur Enthalpierückgewinnung weitergeleitet.

Als nächstes werden die Anoden- und Kathodenabgase der primären Brennstoffzelle zur weiteren Energiegewinnung genutzt, indem sie in einem kleineren nachgeschalteten Sekundär-Brennstoffzellenstapel weitergeleitet werden (Stapelkaskade).

Des Weiteren werden die thermische Boost- und die Stapelkaskadenvariante miteinander kombiniert (Kombivariante). Für optimale Betriebsbedingungen wird hier der sekundäre Stapel mit Frischluft über ein Massenstromregelventil versorgt. Die Kathodenabgasströme beider Brennstoffzellenstapel werden über einen Mixer an die Expandereinheit des Abgasturboladers zur Enthalpierückgewinnung weitergeleitet.

Die numerische Simulation des Systems ermöglicht die Durchführung detaillierter Untersuchungen und die Erarbeitung geeigneter Optimierungskriterien unterschiedlicher Systemkonfigurationen. Hierfür wird ein Systemsimulationsmodell mit geeigneter Simulationsumgebung

angewendet, das auch für weitere Untersuchungen eingesetzt werden kann. Als Datenbasis stehen Messungen und Messergebnisse der Volkswagen AG und einige der FEV-Motorentechnik zur Verfügung. Die Simulationsberechnungen bilden die Basis für die Auslegung und den Aufbau eines HT-PEMFC-Systems für den mobilen Einsatz.