

Methanol – Herstellung und Einsatz als Ener- gieträger für Brennstoffzellen

von Joachim Pasel,
Ralf Peters
und Michael Specht

Überblick

Methanol als möglicher Energieträger für Brennstoffzellen trat in den vergangenen Jahren in den Mittelpunkt vieler Forschungs- und Entwicklungsvorhaben. Die Automobilindustrie als Vorreiter dieses Prozesses präsentiert bereits Prototypen von Brennstoffzellen-Pkw, die unter anderem Methanol als Kraftstoff verwenden. Der Beitrag beschreibt die Methoden der Methanolvergewinnung und erläutert die chemischen Grundlagen sowie die verschiedenen verfahrenstechnischen Möglichkeiten, Methanol in Wasserstoff umzuwandeln. Experimentelle Ergebnisse der Dampfreformierung von Methanol und der Simulation eines Brennstoffzellenautos auf Methanolbasis im europäischen Fahrzyklus ergänzen die Ausführungen.

Lately, research and development activities focused increasingly on methanol as preferred energy carrier for fuel cells. The automotive industry led this process by presenting fuel cell powered passenger cars, some with on-board production of hydrogen from methanol. This contribution describes the various methods of generating methanol and explains the process engineering alternatives for the conversion of methanol into hydrogen as well as the chemical details of this reaction. Furthermore, results will be presented of steam reforming experiments of methanol as well as of the European driving cycle simulation using a fuel-cell-powered passenger car with on-board production of hydrogen from methanol.

1. Herstellung von Methanol

Für den Verkehrsbereich wird gegenwärtig die Einführung verschiedener Alternativkraftstoffe diskutiert. Dies sind Flüssigerdgas (LNG), Druckerdgas (CNG), Flüssigwasserstoff (LH₂), Druckwasserstoff (GCH₂), Methanol (MeOH), Dimethylether (DME) sowie synthetisches Benzin bzw. synthetischer Dieselmotorkraftstoff. Bedingt durch die günstigen Speichereigenschaften und eine Reformierbarkeit bei relativ niedrigen Temperaturen wird erwartet, dass Methanol zukünftig eine wesentliche Rolle als Alternativkraftstoff spielen wird.

Die Bereitstellung von Kraftstoffen erfolgt heute fast ausschließlich auf fossiler Basis. Dies gilt auch für Methanol, das jedoch den großen Vorteil bietet, aus nicht-fossilen Quellen zu-

gänglich zu sein. Da für zukünftige Kraftstoffe neben den Schadstoffemissionen vor allem die klimarelevanten CO₂-Emissionen und die Ressourcenschonung entscheidende Beurteilungskriterien sein werden, werden Wege gesucht, die CO₂-Emissionen des Verkehrsbereichs und den Anteil fossiler Ressourcen zur Kraftstoffherstellung minimieren zu können.

Bei der kommerziellen Erzeugung von Methanol wird zuerst aus Erdgas ein Synthesegas erzeugt und anschließend – nach Einstellung eines geeigneten CO/H₂-Verhältnisses – dieses Gas in einem katalytischen Prozess zu Methanol konvertiert. Für die Versorgung zukünftiger MeOH-Brennstoffzellenfahrzeuge kann zunächst auf die existierende MeOH-Erzeugungskapazität zurückgegriffen werden. Die Auslastung der weltweit betriebenen Anlagen betrug im Jahre 1998 – bei einer Erzeugungskapazität von ca. 33 Mio. Jahrestonnen – nur 79 % [1]. Die Überschusskapazität lag 1998 somit bei ca. 7 Mio. Jahrestonnen. Vor dem Hintergrund, dass zukünftig der zweitgrößte Absatzmarkt für Methanol, die Herstellung des Oktanboosters Methyl-tert.-Butylether (MTBE) stark zurückgehen wird, sind in den nächsten Jahren überschüssige Erzeugungskapazitäten von ca. 10 Mio. Jahrestonnen verfügbar¹. Dies würde – bei einer Fahrleistung eines MeOH-Brennstoffzellenfahrzeuges von 13.500 km/a und einem Energiebedarf von 0,4 kWh/km – zur Versorgung von bis zu 10 Mio. Fahrzeugen ausreichen. Damit erscheint die Versorgung des Verkehrssektors mit Methanol für mindestens 10 Jahre ab dem Einführungszeitpunkt der Fahrzeuge gesichert.

Methanol als alternativer Kraftstoff für den Verkehrsbereich bietet den Vorteil eines erheblichen Substitutionspotenzials für die heute benötigten Kraftstoffe, weil erneuerbare Ressourcen längerfristig eine tragende Rolle für die Methanolverzeugung spielen können. Zur Zeit ist das Ausgangsprodukt für die Methanolsynthese zu ca. 90 % Erdgas, der Rest setzt sich im

Dr. rer. nat. Joachim Pasel ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Dr.-Ing. Ralf Peters ist Leiter der Abteilung Brenngaserzeugung, Bereich Energieverfahrenstechnik, des Instituts für Werkstoffe und Verfahren der Energietechnik (IWW 3) im Forschungszentrum Jülich (FZJ), Jülich.

Dr. rer. nat. Michael Specht ist Fachgebietsleiter der Abteilung Regenerative Energieträger im Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), Stuttgart.

¹ Der Rückgang des MTBE-Marktes ist auf ein wahrscheinliches Verbot des MTBE als Kraftstoffzusatz in den USA ab dem Jahr 2003 zurückzuführen.

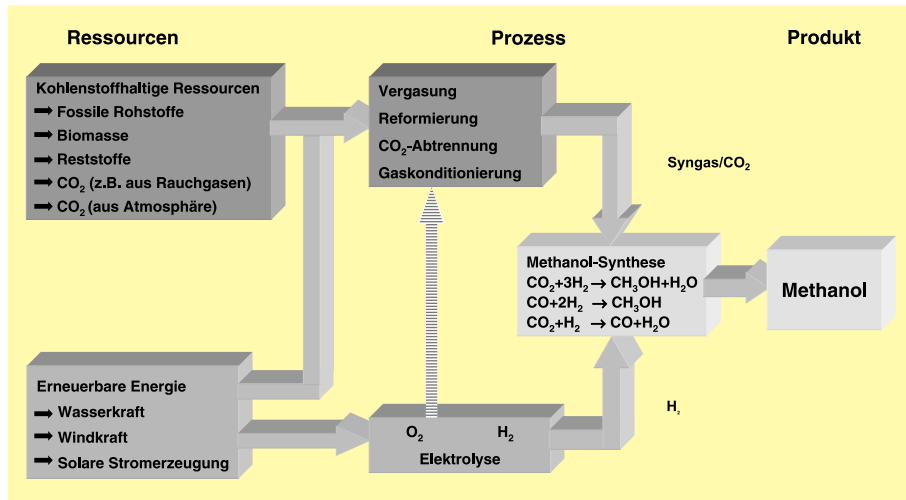
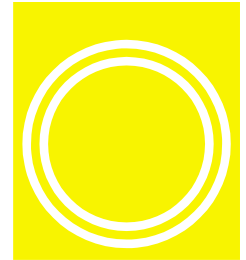


Abbildung 1: Methanolherstellung aus kohlenstoffhaltigen Energieträgern bzw. aus CO₂ und erneuerbarer Elektrizität.

Wesentlichen aus Rückständen der Erdölverarbeitung zusammen. Neben fossilen Rohstoffen ist Methanol aus praktisch allen kohlenstoffhaltigen Ressourcen zugänglich (Abbildung 1). Wird CO₂ als Edukt für die Synthese von Methanol genutzt, so ist zusätzlich Wasserstoff zur Erzeugung eines Synthesegases erforderlich. Die Mischung von Wasserstoff kann jedoch auch zur Einstellung der Stöchiometrie von Synthesegasen aus Vergasungsprozessen von Vorteil sein.

Geschlossene Stoffkreisläufe sind eine Grundvoraussetzung für nachhaltige Energiesysteme. Verschiedene Pfade der Methanolherstellung mit deutlich verminderten CO₂-Emissionen wurden beim ZSW untersucht und in Pilotlinien aufgebaut [2-4]. Die Methanolherzeugung aus CO₂ und H₂ gilt hierbei als weitgehend gelöst. Die erzielten Ergebnisse zeigen bei technisch relevanten Gasbelastungen des Katalysators hohe Produktionsraten für Methanol. Für die Verfahrensvariante mit atmosphärischem CO₂ als Ausgangsprodukt für die Synthese konnte die technische Realisierung und ein erfolgreicher Probetrieb belegt werden. Die experimentellen Ergebnisse finden Eingang in die nachfolgenden CO₂-Emissions- und Kostenbetrachtungen.

Der hier dargestellte Vergleich beschränkt sich auf die resultierenden CO₂-Emissionen sowie die Kosten für die Methanolsynthese aus verschiedenen Ressourcen (Abbildung 2, Tabelle 1). Wirkungsgradbetrachtungen

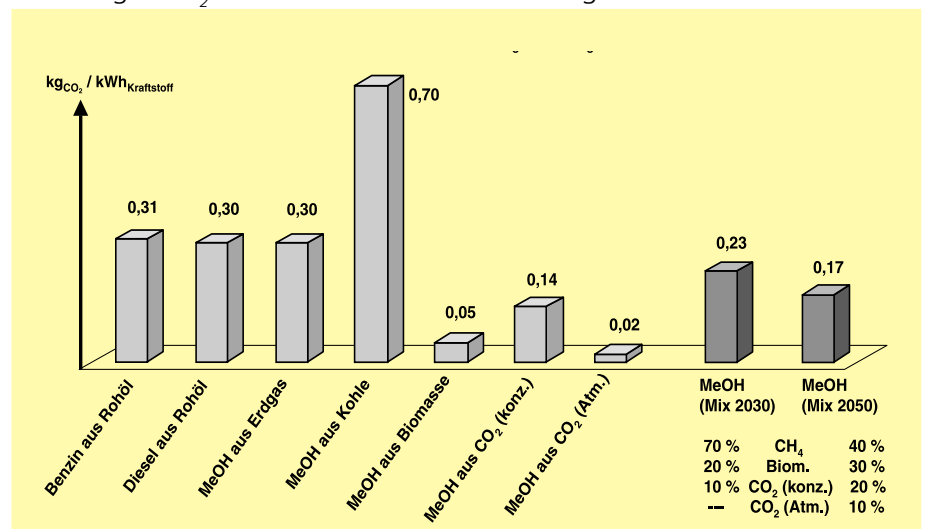
wurden hier nicht berücksichtigt, da sie für den Vergleich fossile/regenerative Erzeugung von untergeordneter Bedeutung sind. Methan hat

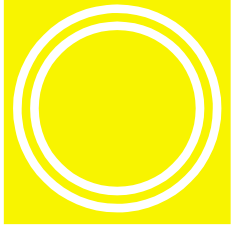
verglichen mit Rohöl zwar einen energiespezifischen CO₂-Vorteil, der jedoch durch die schlechtere Energiebilanz der Methanolherstellung aus Erdgas kompensiert wird. Dieser Pfad weist praktisch die gleichen CO₂-Emissionen auf wie die konventionellen Ketten der Benzin/Diesel-Erzeugung aus Rohöl. Tendenziell werden die CO₂-Emissionen für die Erzeugung von Benzin/Diesel mit höherer Kraftstoffqualität (Entschwefelung etc.) noch steigen, während die der Methanolsynthese aus Erdgas durch eine weitere Effizienzsteigerung weiter sinken werden. Wie aus [Abbildung 2](#) zu ersehen, verbietet sich in Bezug auf die CO₂-Emissionen die Nutzung von Kohle zur Herstellung von Methanol, während die Methanolherzeugung aus CO₂ bzw. aus Biomasse mit deutlich geringeren CO₂-Emissionen verbunden ist. Auch hinsichtlich der spezifischen Kraftstoffkosten von Benzin/Diesel und der momen-

	Euro / kWh _{Kraftstoff}	Bemerkung
Benzin/Diesel	0,02 0,025	Referenz
MeOH aus Erdgas	0,02	Spotmarktpreis Rotterdam, 3. Quartal 1999
MeOH aus Biomasse	0,06 0,10	abhängig von Rohstoffkosten bzw. Erlösen
MeOH aus CO ₂ (konz.)	0,09	regenerativer Strom aus Wasserkraft (0,025 Euro / kWh _e)
MeOH aus CO ₂ (Atm.)	0,14	

Tabelle 1: Kosten für die Erzeugung von Methanol aus verschiedenen Ressourcen. Die Referenz Benzin/Diesel bezieht sich auf die unversteuerten Kraftstoffkosten frei Tankstelle.

Abbildung 2: CO₂-Emissionen von Methanol im Vergleich zu Benzin/Diesel.





tanen Methanolpreise sind keine sehr großen Unterschiede zu verzeichnen. Die Herstellungskosten für Methanol aus Biomasse und aus CO₂ betragen jedoch ein Mehrfaches im Vergleich zu Methanol aus Erdgas, selbst wenn die Strombezugskosten der CO₂-Pfade mit nur 0,025 Euro/kWh_e angesetzt werden.

Aufgrund der Kosten und der vermiedenen CO₂-Emissionen kommt der Biomasse als Ausgangsprodukt für die Methanolsynthese eine besondere Bedeutung zu. Da jedoch einerseits die biogenen Potenziale begrenzt sind und andererseits in Konkurrenz zur Strom- und Wärmeerzeugung stehen, wird unter ökologischen Rahmenbedingungen langfristig die Methanolerzeugung aus CO₂ eine wesentliche Rolle spielen, da sie keiner Ressourcenbegrenzung unterliegt. Die deutlich preiswertere Technologie ist hierbei die Methanolerzeugung aus Rauchgas-CO₂, die jedoch gegenüber dem Erdgas-Pfad ein CO₂-Minde- rungspotential von „nur“ ca. 50% aufweist. Wird CO₂ aus Rauchgasen für die Synthese eingesetzt, so sind zusätzliche CO₂-Emissionen durch den Mehrverbrauch der fossilen Einsatzstoffe für den CO₂-Abtrennprozess zu berücksichtigen (bei gleicher elektrischer Leistungsabgabe eines Kraftwerks) [3]. Der Energiepfad aus atmosphärischem CO₂ ist zwar deutlich teurer, bietet jedoch eine praktisch CO₂-neutrale Methanol-Erzeugung und -Nutzung. In **Abbildung 2** sind für die Jahre 2030 und 2050 zwei Szenarien dargestellt, die einen Mix für die Methanolherstellung aus Erdgas, CO₂ und Biomasse wiedergeben. Pro kWh_{Kraftstoff} ist eine Halbierung der CO₂-Emissionen bei einem entsprechenden Ressourcenmix möglich. Berücksichtigt man zusätzlich den zukünftigen Verbrauchsvorteil der Brennstoffzellenfahrzeuge gegenüber heutigen Fahrzeugen, so erscheint eine Reduzierung der CO₂-Emissionen pro zurückgelegter Fahrstrecke von 75% (selbst bei einem Anteil von 40% Erdgas im Mix) erreichbar.

2. Methanol als Energieträger in Brennstoffzellen

Bei der Verwendung von Methanol als Energieträger für Brennstoffzellen wird zwischen zwei Arten der Brennstoff-

zelle unterschieden. In der DMFC (**D**irect **M**ethanol **F**uel **C**ell) wird das Methanol direkt an der Anode umgesetzt. Die IMFC (**I**ndirect **M**ethanol **F**uel **C**ell) dagegen benötigt eine zusätzliche, vorgeschaltete Systemkomponente, den Reformer, um den Wasserstoff extern aus Methanol zu gewinnen. Der bekannteste Vertreter einer IMFC für den mobilen Bereich ist die **P**olymer **E**lectrolyte **M**embrane **F**uel **C**ell (PEMFC).

3. Verfahren zur Umwandlung von Methanol in Wasserstoff

Bei der Umwandlung von Methanol in ein wasserstoffhaltiges Gasgemisch wird zwischen drei katalytischen Verfahren unterschieden. Die *partielle Oxidation* und die *autotherme Reformierung* werden in sehr ähnlichen verfahrenstechnischen Anordnungen durchgeführt (**Abbildung 3**). Sie unterscheiden sich jedoch bezüglich ihrer chemischen Grundlagen.

Die *partielle Oxidation* von Methanol

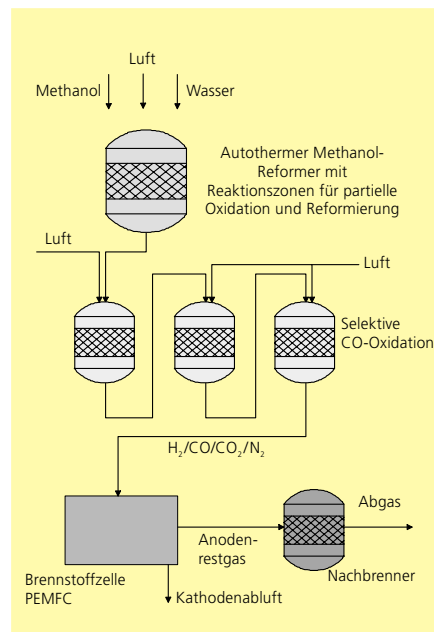


Abbildung 3: Verfahrensfließbild der autothermen Reformierung von Methanol (mit partieller Oxidation)

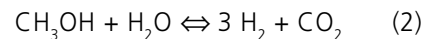
gehört Reaktionsgleichung (1). Sie konkurriert jedoch mit der unten formulierten Totaloxidation des Methanols (siehe Gleichung (3)). Die partielle Oxidation von Kohlenwasserstoffen läuft bevorzugt bei unterstöchiometrischen Sauerstoff/Brennstoff-Verhältnissen ab, während die Totaloxidation bei einem Überschuss an Sauerstoff im

Eduktgas überwiegt [5].

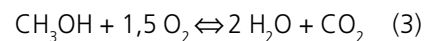


Reaktion (1) ist exotherm ($\Delta H = -192,86 \text{ kJ/mol}$) und kann zum Beispiel von einem Kupferkatalysator aktiviert werden. In den Reaktor in **Abbildung 3** werden dabei nur die Edukte Methanol und Sauerstoff in Form von Luft gegeben.

Bei der *autothermen Reformierung* läuft neben der Reaktion aus Gleichung (1) im selben Reaktionsapparat (siehe **Abbildung 3**) ohne räumliche Trennung die Reformierung des Methanols ab, für die folgende Reaktionsgleichung formuliert werden kann:

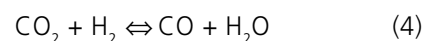


Diese Reaktion ist endotherm mit einer Standardreaktionsenthalpie von $\Delta H = +48,96 \text{ kJ/mol}$ und benötigt, um aufrechterhalten werden zu können, die Reaktionswärme aus Gleichung (1). Außerdem muss zusätzlich Wasser in den Reaktor gegeben werden. Als Katalysatoren können u.a. Kupfer/Zink- oder Palladium-Kontakte dienen. Eine weitere Möglichkeit, die benötigte Reaktionswärme für Gleichung (2) einzukoppeln, ist die Totaloxidation des Methanols, die in Abhängigkeit von der eingesetzten Sauerstoffmenge ebenfalls in dem Reaktor aus **Abbildung 3** ablaufen kann und diese Reaktionsgleichung hat ($\Delta H = -676,49 \text{ kJ/mol}$):

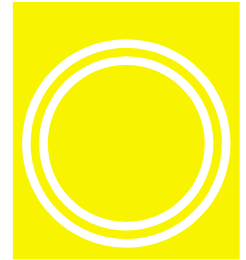


Gleichung (3) wird durch eine große Anzahl von unterschiedlichen Katalysatoren (Edelmetalle, Perowskite, Oxide, Aktivkohlen) aktiviert.

Der Eduktstrom der autothermen Reformierung enthält neben dem gewünschten Wasserstoff noch Kohlendioxid, nicht umgesetzte Reste an Methanol, Wasser, Sauerstoff, Stickstoff sowie Kohlenmonoxid, das nach folgender Reaktionsgleichung, der sogenannten Shift-Reaktion, gebildet wird.



Kohlenmonoxid stellt ein erhebliches Vergiftungspotenzial für die Katalysa-



toren der Brennstoffzelle dar und muss deswegen in einer aufwändigen, mehrstufigen Reinigungseinheit fast vollständig abgetrennt werden (siehe [Abbildung 3](#)). Dazu wird die selektive katalytische CO-Oxidation eingesetzt, die u.a. durch einen Platin/Aluminiumoxid-Katalysator oder durch einen Platin-Zinn-Kontakt katalysiert werden kann. Das Anodenrestgas aus der Brennstoffzelle, das umweltrelevante Komponenten wie Kohlenmonoxid, Methanol und nicht umgesetzten Wasserstoff enthält, muss einer katalytischen Nachverbrennung unterzogen werden, in der diese Stoffe in Wasser und Kohlendioxid umgewandelt werden.

Die dritte Variante, Wasserstoff aus Methanol zu gewinnen ist die *Dampfreformierung*. Diese endotherme Reaktion gehorcht Reaktionsgleichung (2), läuft aber räumlich isoliert von der Wärmeerzeugung z. B. durch die Totaloxidation von Methanol nach Gleichung (3) in einem eigenen Reaktionsapparat ab ([Abbildung 4](#)). Wasser und Methanol werden in den Reaktionsapparat gegeben, die notwendige Reaktionswärme wird durch den Katalytbrenner eingebracht.

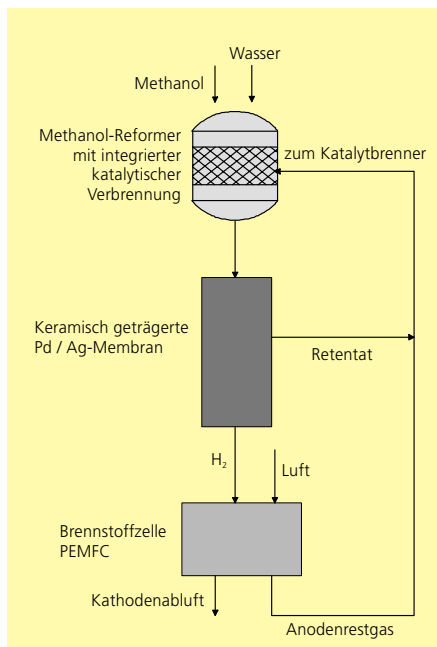


Abbildung 4: Verfahrensfließbild der Dampfreformierung von Methanol

lytbrenner eingebracht. Im Katalytbrenner werden die Abgase der Brennstoffzellenanode (vor allem unverbraucher Wasserstoff) und das Retentat der Membran (nicht umgesetztes Methanol, Kohlenmonoxid, Wasserstoff) zu Kohlendioxid und Wasser um-

gesetzt (siehe Gleichung (3), $\Delta H < 0$). Die Dampfreformierung läuft bei Drücken bis ca. 20 bar ab. Die Abtrennung des Wasserstoffs vom Produktgasstrom des Reformers, der nicht umgesetztes Methanol, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Wasser enthält, kann deshalb mittels einer druckbetriebenen Membran aus einer Palladium-Silber-Legierung erfolgen, die von einer Keramik geträgert wird (siehe [Abbildung 4](#)). Der annähernd reine Wasserstoffstrom wird zur Brennstoffzelle geleitet, das Anodenrestgas wird zum Katalytbrenner geführt.

Der grundlegende Nachteil der autothermen Reformierung (mit partieller Oxidation, POX) ist der schlechtere Systemwirkungsgrad von 33-44 % im Vergleich zu 42-50 % bei der Dampfreformierung ([Abbildung 5](#)). Das vom Reformier erzeugte Brenngas enthält wegen der Einspeisung von Luft nur ca. 45 % Wasserstoff im Vergleich zu ca. 67 % bei der Dampfreformierung, die ohne Luft arbeitet. Die autotherme Reformierung arbeitet bei Normaldruck. Da ein Membrantrennverfahren die Kompression des Reformereduktgases erfordert, würde der Systemwirkungsgrad verschlechtert. Deswegen wird auf die aufwändige, mehrstufige selektive CO-Oxidation ausgewichen. Bei der Dampfreformierung kann wegen des Druckbetriebs und der weit aus geringeren Kompressionsleistung zur Verdichtung der Flüssigkeiten Methanol und Wasser dagegen ein Membrantrennverfahren eingesetzt werden. Ein weiterer Vorteil der Dampf-

reformierung ist, dass Restgase aus der Membrantrennung und Brennstoffzelle zur Versorgung der Reformierung mit Reaktionswärme durch eine katalytische Verbrennung genutzt werden können. Bei der POX-Reformierung ist dies nicht möglich. Herausragende Vorteile der POX-Reformierung sind hingegen die hohe Leistungsdichte und die hohe Dynamik des Verfahrens. Mit der hohen Dynamik einher gehen kurze Aufheizzeiten des Systems.

4. Technische Realisierung der Umwandlung von Methanol in Wasserstoff unter Anwendung der POX- und der Dampfreformierung

Ein Konsortium bestehend aus dem Forschungsinstitut ECN (Niederlande), der Firma Rover (GB), der Loughborough University (GB) und dem Instituto Superior Técnico aus Portugal entwickelt unter der Führung der britischen Firma Wellman CJB im Rahmen eines EU-Projektes einen Kompakt-Methanol-Reformer, der mit dem Prinzip der *Dampfreformierung* arbeitet [6]. Grundlage dieser Entwicklungen ist der Einsatz von kompakten Aluminium-Wärmetauschern, die aus gewellten Platten bestehen. Diese Platten sind auf der einen Seite mit einem Katalysator zur Methanoldampfreformierung und auf der anderen Seite mit einem Katalysator zur Oxidation beschichtet. Der Reformierungskatalysator ist ein kommerzieller Kupfer/Zink-Kontakt, der Oxidationskatalysator eine Mischung

Abbildung 5: Vergleich der Vor- und Nachteile der autothermen Reformierung (mit partieller Oxidation) und der Dampfreformierung

POX-Reformierung	Dampf-Reformierung
Systemwirkungsgrad: ~ 33 - 44 %	~ 42 - 50 %
Hohe Leistungsdichte: 1 kW _{el} /l	0,25 kW _{el} /kg
Hohe Dynamik	90 % < 22 s
Kurze Aufheizzeit: 100 % in 50 s	KV: 400 °C < 80 s
Brenngas: ~ 45 % H ₂ / 20 % CO ₂ / 22 % N ₂	~ 67 % H ₂ / 22 % CO ₂
Kompression von Luft	Druckbetrieb bis ~ 20 bar
Mehrstufige selektive CO-Oxidation	Membrantrennverfahren
Katalytischer Nachbrenner	Direkte energetische Nutzung d. Restgase

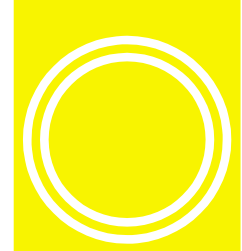
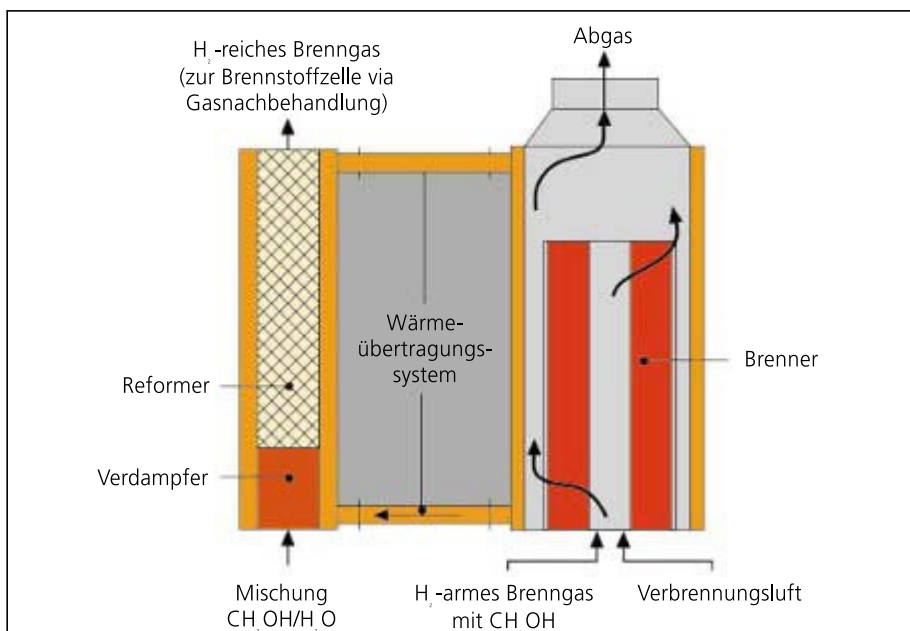


Abbildung 7: Kompakt-Methanol-Reformer, gebaut in einer Zusammenarbeit zwischen Haldor Topsøe und dem IWW 3, Forschungszentrum Jülich

sator (Kupfer-Zinkoxid auf Aluminiumoxid) gefüllt wurden [9]. Es wurden Messungen im stationären und dynamischen Betrieb durchgeführt, von denen nur die stationären an dieser Stelle vorgestellt werden sollen.

Abbildung 9 zeigt den Methanolumsatz als Funktion der spezifischen Wasserstoffbildung für zwei verschiedene Reaktionstemperaturen. Bei einer Reaktionstemperatur von 260 °C sank der Umsatz von 100 % bei einer Wasserstoffbildung von 3 Nm³/(h kg_(Kat)) auf 75 % mit einer Wasserstoffproduktion von 7,5 Nm³/(h kg_(Kat)). Die Kohlenmonoxid-Konzentration im trockenen Eduktgasstrom verringerte sich in diesem Bereich gleichzeitig von 1,5 auf 0,5 %. Wurde die Reaktionstemperatur auf 280 °C erhöht, konnten höhere spezifische Wasserstoffbildungen bei gleichem Umsatz im Vergleich zu den Messungen bei 260 °C gefunden werden. Die Kohlenmonoxid-Konzentration sank wieder mit sinkendem Methanol-Umsatz, woraus sich hohe Kohlenmonoxid-Konzentrationen im Teillastbereich ergaben. Für den oben beschriebenen Kompaktreformer wurden aus diesen Ergebnissen folgende Auslegungsdaten abgeleitet: Unter Vollast sollten bei einer Temperatur von 280 °C 95 % des Methanols umgewandelt werden, was zu einer Wasserstoffbildung von 8,0 Nm³/(h kg_(Kat)) bei einer Kohlenmonoxid-Konzentration von 1,2 % führt.



Die Aktivität des verwendeten Katalysators als Funktion der Reaktionszeit ist in Abbildung 10 dargestellt. Als Maß für die katalytische Aktivität dient dabei die spezifische Wasserstoffbildung. Eine 10 %-ige Katalysatorbeladung bedeutet, dass die ersten 10 % der Länge des Reaktionsrohres mit Katalysator gefüllt waren, bei einer 50 %-igen Beladung waren 50 % der Länge gefüllt. Es wird deutlich, dass auf den ersten 10 % der Reaktorlänge der Verlust der katalytischen Ak-

Abbildung 8: Schematischer Aufbau des Kompaktreformers

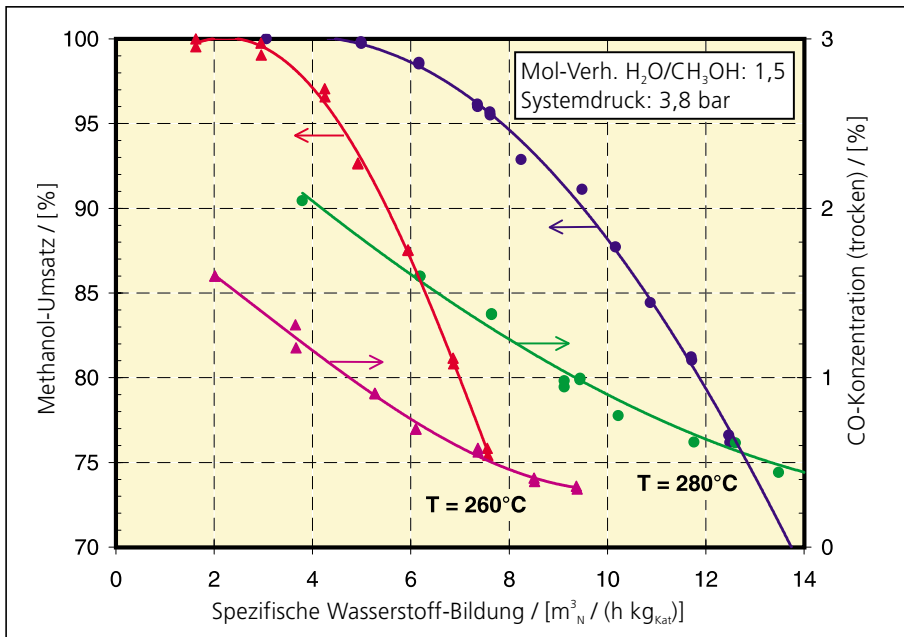
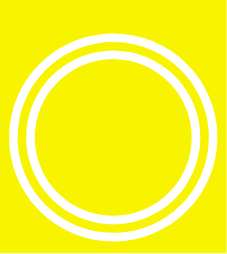
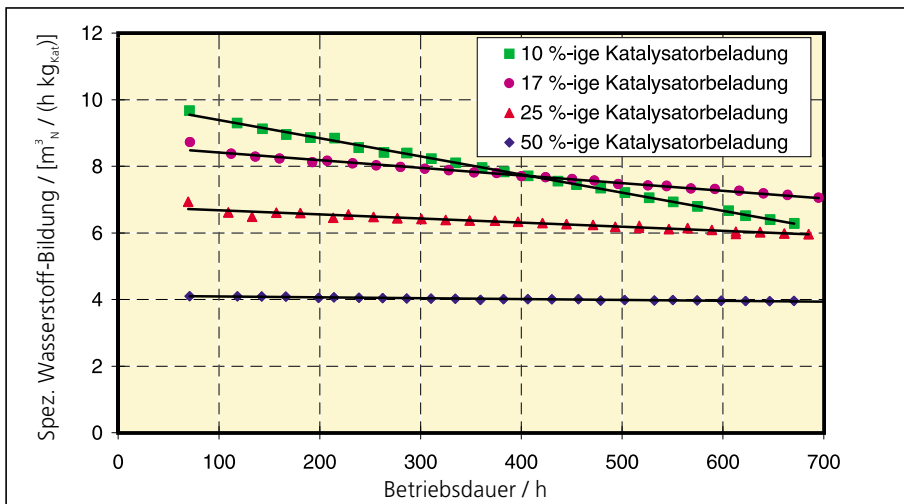


Abbildung 9: Methanol-Umsatz als Funktion der spezifischen Wasserstoffbildung, $T=260^{\circ}\text{C}$ und 280°C , $p=3,8\text{ bar}$, molares Verhältnis Wasser/Methanol=1,5

Abbildung 10: Spezifische Wasserstoffproduktion als Funktion der Betriebsdauer, $T=280^{\circ}\text{C}$



tivität am deutlichsten ausfiel, während keine Desaktivierung mehr bis zu einer Reaktionszeit von 700 h bei einer 50 %-igen Füllung des Reaktors zu beobachten war. Im letzteren Fall wurde die Desaktivierung auf den ersten 25 % durch eine auch nach 700 Betriebsstunden unveränderte katalytische Aktivität auf den zweiten 25 % kompensiert. Die katalytisch aktive Zone wanderte durch das Katalysatorbett. Werden die Ergebnisse der Messung mit der 50 %-igen Beladung extrapoliert unter der Voraussetzung, dass 80 % der ursprünglichen Wasserstoffbildung ausreichen, kann eine Stand-

zeit des Katalysators von ca. 4000 h errechnet werden. Dieser Wert ist ausreichend für eine mobile Anwendung im Auto.

6. Simulation eines Pkw-Fahrzyklus

Im FZJ wurden Simulationsrechnungen für ein Fahrzeug auf Methanol-Basis mit on-board Erzeugung des Wasserstoffs durchgeführt [10]. Sie berücksichtigen den Methanol-Reformer, den katalytischen Brenner, die Gasnachbehandlung, die PEMFC, das elektronische Antriebssystem und einen Energiespeicher. Tabelle 2 gibt die Effizienz

des Antriebsstranges und der Energieumwandlungskette (EUK) eines Autos mit Verbrennungsmotor für Benzin an und vergleicht sie mit der eines Brennstoffzellenautos, das mit unter Druck stehendem Wasserstoff bzw. Methanol angetrieben wird. Eine EUK umfasst zusätzlich zum Antriebsstrang noch die Brennstoffproduktion und den -transport zur Tankstelle. Das Referenzauto mit internem Verbrennungsmotor erfüllt die Auflagen der EU für das Jahr 2005 und verbraucht etwa 5 l Benzin auf 100 km.

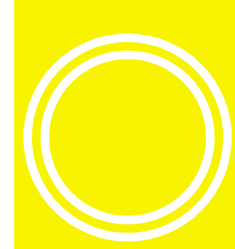
Tabelle 2 macht deutlich, dass die Effizienz des Antriebs eines Brennstoffzellenautos sowohl auf Wasserstoff- als auch auf Methanolfbasis deutlich besser ist als die eines Autos der nächsten Generation mit internem Verbrennungsmotor. Wird die gesamte Energieumwandlungskette betrachtet, sind die Vorteile des Brennstoffzellenautos nicht mehr so deutlich.

Tabelle 3 unterstreicht die Vorteile des Brennstoffzellenautos. Der Kraftstoffverbrauch des Pkw und damit die Kohlendioxid-Emissionen sind deutlich geringer. Vor allem aber im Bereich der umweltrelevanten Emissionen Kohlenmonoxid, Stickoxide und leicht flüchtige, organische Verbindungen zeigt sich das Verbesserungspotential des Brennstoffzellenautos.

Weitere Berechnungen [11] machten jedoch deutlich, dass das Antriebssystem eines Brennstoffzellenautos momentan ein deutlich zu hohes Leistungsgewicht von ca. 15–18 $\text{kg/kW}_{(\text{mech.})}$ aufweist, während ein konventioneller Antriebsstrang ein Leistungsgewicht von nur ca. 5 $\text{kg/kW}_{(\text{mech.})}$ hat. Letzterer Wert muss auch von den Brennstoffzellenautos erreicht werden, wenn sie konkurrenzfähig werden sollen.

7. Ausblick

Um den Anforderungen bezüglich des Leistungsgewichtes gerecht werden zu können, muss der gesamte Antriebsstrang des Brennstoffzellenautos deutlich leichter werden. Ein vielversprechender Ansatzpunkt dabei ist der Methanol-Reformer und der katalytische Brenner. Ziel der zukünftigen Forschung und Entwicklung muss daher



sein, die Einkoppelung der Reaktionswärme für die Reformierung durch die katalytische Verbrennung der Ab- und Restgases des Prozesses schneller und effizienter zu gestalten. Die Wärmeübertragung muss entscheidend verbessert werden. Dafür bedarf es neuer Reaktorkonzepte, die weg vom trägen katalytischen Festbettreaktor und hin zu beschichteten, kleinen und dynamischen Reaktorsystemen gehen. Kleine Reaktorsysteme mit dünnen Katalysatorbeschichtungen haben außerdem den Vorteil, dass Wärme- und Stoffübergangsphänomene, die während des katalytischen Prozesses auftreten und den Katalysatorwirkungsgrad verschlechtern, verringert werden. Die Katalysatoren können effizienter eingesetzt werden, die Kosten für das Katalysatormaterial können gesenkt werden.

Literatur

[1] American Methanol Institute, Internet: www.methanol.org (1999)

[2] Specht, M., Staiss, F., Bandi, A., Weimer, T., „Comparison of the Renewable Transportation Fuels Liquid Hydrogen and Methanol with Gasoline – Energetic and Economic Aspects“ Int. J. Hydrogen Energy 23, (1998) 387

[3] Specht, M., Bandi, A., Elser, M., Staiss F., „Comparison of CO₂ Sources for the Sythesis of Renewable Methanol“ in „Advances in Chemical Conversions for Mitigating Carbon Dioxide“, Inui, T., Anpo, M., Izui, K., Yanagida, S., Yamaguchi, T., (Eds.), Stud. Surf. Sci. Catal. 114 (1998) 363

[4] Specht, M., Bandi, A., Baumgart, F., Murray, C.N., Gretz J., „Synthesis of Methanol from Biomass/ CO₂ Resources“ in „Greenhouse Gas Control Technologies“, Eliasson, B., Riemer, P.W.F., Wokaun, A., (Eds.), Pergamon, Amsterdam (1999) 723

[5] Vesper, G., Schmidt, L. D., „Ignition and Extinction in the Catalytic Oxidation of Hydrocarbons over Platinum“, AIChE J., 42 (1996) 1077

	Gewicht des gesamten Pkw /kg	Effizienz Antriebsstrang /%	Effizienz EUK /%
Auto mit Benzin-Verbrennungsmotor	1130	21-23	19-21
Brennstoffzellenauto auf Basis von Wasserstoff aus Erdgas	1250	32-40	20-25
Brennstoffzellenauto auf Basis von Methanol aus Erdgas	1360	29-36	17-21

Table 2: Vergleich der Effizienz eines Autos mit Verbrennungsmotor mit der eines Wagens mit Brennstoffzelle [12]

Table 3: Vergleich des Energieverbrauchs und der Emissionen eines Brennstoffzellenautos auf Methanolbasis mit den Werten für ein Auto mit Verbrennungsmotor ICE (ICE = 100 %) auf der Basis des Neuen Europäischen Fahrzyklus für das Jahr 2005 [12]

	Antriebsstrang	EUK
Energieverbrauch	70	107
Kohlendioxid	65	78
Kohlenmonoxid	0,1	2
Stickoxide	0,1	34
Flüchtige, organische Verbindungen	1	11

[6] Darms, R. A. J., Hayter, P.R., Moore, S.C., „Advances in Fuel Processing for PEMFC Systems for Transport“, Proc. 1998 Fuel Cell Seminar, Palm Springs, USA, (1998)

[7] Jenkins, J.W., (Erfinder), Johnson Matthey (Anmelder) „Catalytic Hydrogen Generator for Use with Methanol“, Schutzrecht EP 0217 532, 1987

[8] Emonts, B., Bøggild Hansen, J., Løegsgaard Jørgensen, S., Höhlelein, B., Peters, R., „Compact Methanol Reformer Test for Fuel Cell Powered Light Duty Vehicles“, J. Power Sources, 71 (1998) 288-293

[9] Wiese, W., Emonts, B., Peters, R., „Methanol Steam Reforming in a Fuel Cell Drive System“, J. Power Sources, 84 (1999) 187-193

[10] Peters, R., Düsterwald, H. G., Höhlelein, B., „Simulation of Fuel Cell Powered Vehicles“, Proc. 31st ISATA, Düsseldorf, (1998)

[11] Düsterwald, H. G., „Untersuchung eines Methanolreformerkonzeptes unter den besonderen Bedingungen der Dynamik und Langzeitstabilität beim Einsatz im Brennstoffzellen-PKW“, Dissertation, RWTH Aachen (1997)

[12] Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. Abschlussbericht zur Brennstoffzellen-Studie „Ganzheitliche Systemuntersuchung zur Energiewandlung durch Brennstoffzellen“, Frankfurt/ Main, Heft 657 (1998)