

# Methanolkonvertierung

- 2004 -



Ein Jugend-forscht-Projekt von:

Özlem Kacar  
Felix Delattre  
Arnaud Rumpler

**Inhaltsverzeichnis:**

<b>1. Vorbetrachtungen.....</b>	<b>3</b>
1.1. Einleitung.....	3
1.2. Speicherung von Wasserstoff.....	4
1.2.1. Stationäre Speicherung.....	4
1.2.2. Druckspeicherung.....	4
1.2.3. Flüssiger Wasserstoff.....	4
1.2.4. Metallhydride.....	5
1.2.5. Wasserstoffreiche Moleküle (Methanol).....	5
1.4. Die Brennstoffzelle.....	6
1.4.1. PEM-Brennstoffzelle.....	7
<b>2. (Chemische) Theorie.....</b>	<b>7</b>
2.1. Herstellung von Methanol.....	7
2.2. Methanolreformierung.....	8
2.2.1. Dampfreformierung.....	8
2.2.2. Partielle Oxidation (POX).....	9
2.2.3. Autotherme Reformierung.....	9
2.2.4. Methanolspaltung.....	9
2.3. Katalysatoren.....	9
2.3.1. Anforderungen an einen Mobil-Katalysator.....	9
2.3.2. Entwicklung eines Reformerkatalysators von BASF.....	10
<b>3. Experimenteller Teil.....</b>	<b>10</b>
3.1. Unser Versuchsapparatur.....	10
3.1.1. Funktionsweise der Versuchsapparatur.....	11
<b>4. Versuchsergebnisse.....</b>	<b>14</b>
4.1. Allgemeine Beschreibung.....	14
4.2. Katalysator: Platin-Perl-Katalysator.....	15
4.2.1. Analyse der gasförmigen Produkte.....	16
<b>5. Quellenverzeichnis.....</b>	<b>17</b>

# 1. Vorbetrachtungen

## 1.1. Einleitung

Diese Projektarbeit ist ein Versuch, die zur Zeit in der Entwicklung befindliche Methanol-Reformation, optimalerweise zu Wasserstoff ( $H_2$ ) und Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ), unter einfacheren Bedingungen neu aufzubauen und zu untersuchen.

Wegen des massiven Verbrauchs fossiler Ressourcen und der Umweltverschmutzung durch Abgase,

die erschreckende Ausmaße angenommen hat (vor allem durch Verkehrsabgase), müssen wir über Alternativen nachdenken. Der Elektromotor und die Brennstoffzelle (durch die Entwicklung der PEM (Polymer-Elektrolyt-Membran)-Brennstoffzelle) haben sich inzwischen immens weiterentwickelt. Sie könnten leicht andere Energierzeuger (wie Otto- und Dieselmotor) ablösen. Am interessantesten ist heute die Betrachtung der Konzepte, die flüssige Energieträger, wie Methanol ( $CH_3OH$ ), zur Wasserstoffspeicherung einsetzen. Hieraus wird dann im Auto Wasserstoff hergestellt und dann direkt in der Brennstoffzelle umgesetzt.

Die Automobilindustrie stellte bereits einige Prototypen von Brennstoffzellen-PkWs vor (wie DaimlerChryslers Nekar 3 und Nekar 5), die gute Ergebnisse brachten. Nach dem „California Clean Air Act“ 2003, einem Gesetz, müssen alle Autohersteller ab 2010 mindestens 3% völlig schadstofffreie Autos auf den Markt bringen. Dieses Gesetz wurde mehrfach geändert und zwar immer in Richtung geringer Anteile an Schadstoffarmen PKW.

Wir haben uns auf die Untersuchung der Methanolkonvertierung konzentriert, den Versuch aufgebaut und Gasanalysen angestellt, um herauszufinden, wie wir das Wesen der Reaktion zur besseren Wasserstoffausbeute und zur Minimierung der schädlichen Gase, vor allem Kohlenstoffmonoxid ( $CO$ ), beeinflussen können.



## 1.2. Speicherung von Wasserstoff

Hier wollen wir auf die verschiedenen Arten der Speicherung des Wasserstoffs zur kontrollierten Abgabe eingehen:

### 1.2.1. Stationäre Speicherung

Für die Speicherung von großen Wasserstoffmengen eignet sich nur das Pumpen des flüssigen Wasserstoffs in unterirdische Salz- und Felskavernen, bei Druckverhältnissen, welche hoch genug sind damit der Wasserstoff flüssig vorliegt. Diese Methode würde aber nur erst ab einer Menge von mehreren Millionen Normkubikmetern sinnvoll erscheinen und wird derzeit nicht angewandt.

### 1.2.2. Druckspeicherung



Um eine Nutzung im Fahrzeugbereich zu ermöglichen, wurden um einiges kleinere Druckspeicher entwickelt, in welchen der Wasserstoff mit einem Druck von bis zu 350 bar gelagert wird. In den neueren Vollverbunddruckflaschen geht der Speicherdruck sogar bis 700 bar. Die volumenspezifische Speicherdichte reicht von 0,5 kWh/l bei Stahlflaschen und bis zu 0,8 kWh/l bei leichten Vollverbundflaschen.

### 1.2.3. Flüssiger Wasserstoff

Bei Flüssigwasserstoff besteht das Problem darin, die Verluste durch verdampfte Flüssigkeit einzuschränken. Er lässt sich in stationären und mobilen Tanks, welche eine speziell isoliert wurden, speichern. Diese Tanks werden auch als Kryotanks oder Kryospeicher bezeichnet (von griech. kryos = kalt). Zwar liegt die volumenspezifische Speicherdichte bei 2,13 kWh/l (ca. 33,3 kWh/kg ohne Speicher), doch der Wasserstoff muss dafür zunächst verflüssigt werden. Die Verflüssigung benötigt jedoch eine Energie von 36kJ/g, um Wasserstoff auf eine Temperatur von  $-253^{\circ}\text{C}$  herunterzukühlen, was ungefähr einem Drittel der gespeicherten Energie entspricht. Mittlerweile wird der Wasserstoff in den Tank "eingeregnet", so dass bereits verdampfter Wasserstoff an den

Tröpfchen kondensiert. Diese Tanks sind außerordentlich schwer und sind schon deshalb, vor allem im mobilen Einsatz, ungünstig.

#### **1.2.4. Metallhydride**

Die sicherste Variante, Wasserstoff zu speichern, stellt die Speicherung in Metallhydriden dar, deren Herstellung einen relativ kleinen technischen Aufwand darstellen.

Hydride sind Metalleverbindungen, die Wasserstoff sozusagen wie ein Schwamm absorbieren und desorbieren können. Dieser Wasserstoff kann dann unter niedrigem Druck be- und entladen werden. Hydridspeicher basieren auf einer Legierung, in der Wasserstoff reversibel chemisch gebunden wird. Die Beladung (Wasserstoffaufnahme) verläuft exotherm, so dass dem Speicher Wärme entzogen werden muss, während beim Entladen (Wasserstoffabgabe) Wärme zugeführt werden muss.

Metallhydride werden aus Metallen (wie z.B. Palladium, Titan oder Magnesium) oder intermetallischen Verbindungen (wie z.B.  $ZrMn_2$ ) hergestellt. Durch verschiedene Legierungszusammensetzungen wird das jeweils beste Druck - oder Temperaturniveau angepasst. Für eine Anwendung im Kraftfahrzeug kommt es zum Beispiel auf eine niedrige Desorptionstemperatur und eine schnelle Be- bzw. Entladung an. Problematisch ist beim Kraftfahrzeug jedoch die geringe massenspezifische Speicherdichte der Hydride, was das Eigengewicht der Hydridspeicher um einiges erhöht (mehrere hundert Kilogramm je Hydridspeicher).

Im Vergleich zu Druckgasflaschen und Kryospeichern stellt der Metallhydridspeicher jedoch eine wesentlich sicherere und kompaktere Speichermöglichkeit dar.

#### **1.2.5. Wasserstoffreiche Moleküle (Methanol)**

Kleine wasserstoffreiche Moleküle eignen sich ebenfalls zur Speicherung von Wasserstoff. Sie können direkt vor Ort, wo Wasserstoff benötigt wird zu  $H_2$  und anderen Nebenprodukten (je nach Ausgangsstoff) reagieren.

Also zum Beispiel „on board“ eines Autos könnte man Methanol ( $CH_3OH$ ) konvertieren und den entstandenen Wasserstoff zur Energiegewinnung in einer Brennstoffzelle nutzen. Genial wäre an dieser Lösung des zukünftigen Energielieferanten für Kraftfahrzeuge, das der Umstieg nur mit geringem (finanziellen) Aufwand geschehen könnte. Die Speicherung des Methanols stellt auch kein Wirkliches Problem dar. Normaler Edelstahl ist problemlos geeignet und die Dichtungen können aus Teflon bestehen.

Der Methanol-Tankvorgang wird für den Autofahren gleich verlaufen wie bei einem konventionellen Benzin/Diesel Fahrzeug, da die Tankanlage prinzipiell die gleiche ist wie die bisherigen Zapfsäulen.



Dies stellt einen großen Vorteil dar, weil nur mit geringen Investitionen die gesamte Tankstelleninfrastruktur genutzt werden könnte,

was bei den meisten anderen Plänen zur zukünftigen Energiewende in der Automobilwelt schwieriger und teurer würde.

#### **Vorteile für Methanol als Kraftstoff:**

- Methanol ist eine Flüssigkeit
  - Methanol hat einen hohen Energieinhalt
  - Methanol ist billig und großtechnisch verfügbar
  - Methanol ermöglicht einen schnellen und finanzierbaren Einstieg in die Brennstoffzellentechnologie
  - Direkt-Methanol-Brennstoffzelle als Entwicklungsziel
  - Regenerative Methanol-Herstellung möglich
- ( Quelle: BASF )

### **1.4. Die Brennstoffzelle**

In der Wasserstoffbrennstoffzelle reagieren Wasserstoff ( $H_2$ ) und Sauerstoff ( $O_2$ ) miteinander kontrolliert zu Wasser ( $H_2O$ ). Die beiden Gase sind durch einen Elektrolytmembran voneinander getrennt, der nur positiv geladene  $H^+$ -Ionen durchlässt.

Der elementare Wasserstoff wird an der Katalysator beschichteten Anode geteilt und je H-Atom ein Elektron abgegeben, das über einen elektrische Leiter zu Kathode übergeht. Dies ist der entstehende, elektrische Strom.

Auf der Seite der Kathode teilt sich der elementaren Sauerstoffmoleküle (auch mit Hilfe eines Katalysators) zu zwei Sauerstoffatomen, die jeweils zwei Elektronen aufnehmen und nun zu negativ geladenen Sauerstoffionen ( $O^{2-}$ ) werden, die sich mit jeweils zwei, durch die Elektrolytmembran gewanderten, Wasserstoffionen ( $H^+$ ) zu Wasser ( $H_2O$ ) verbinden. Dieses (warme) Wasser ist Restprodukt der Brennstoffzelle.

### 1.4.1. PEM-Brennstoffzelle

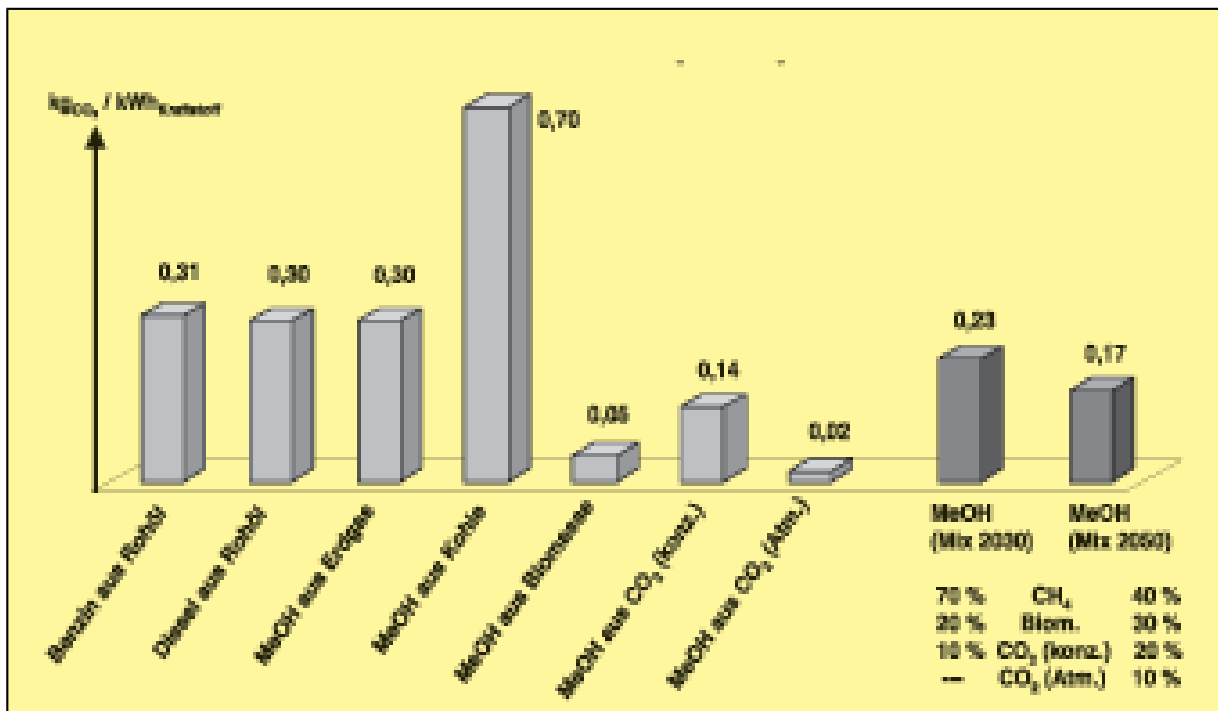
Durch die Entwicklung der **Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle** hat die Brennstoffzellentechnologie einen großen Fortschritt gemacht. Es ist eine Membran mit einem Teflon-Polymergerüst, an dessen Enden der Seitenketten  $-\text{SO}_3\text{H}$  bzw.  $-\text{CO}_2\text{H}$  Gruppen sitzen. Kationen kommen gut durch die Poren der Membran. Anionen können die Membran nicht passieren. Nach dem Prinzip des Grotthus-Effektes werden  $\text{H}^+$ -Ionen besonders schnell durch die Membran geschleust.

## 2. (Chemische) Theorie

### 2.1. Herstellung von Methanol

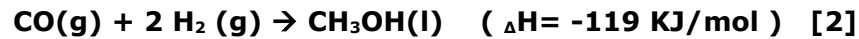
Zur Zeit werden beinahe alle Kraftstoffe aus fossilen Quellen bezogen. In Zukunft wird es, aufgrund der Endlichkeit der fossilen Rohstoffe und der massiven Umweltproblematik, die aus der Nutzung der fossilen „Schätze“ resultiert, immer wichtiger werden, Kraftstoffe zu nutzen, die auch aus nicht-fossilen Quellen zu gewinnen sind.

Methanol wird derzeit zu ca. 90 % aus Erdgas synthetisiert, die restlichen Bestandteile sind hauptsächlich Rückstände aus der Erdölverarbeitung. Methanol lässt sich aber aus praktisch allen kohlenstoffhaltigen Quellen herstellen, wobei je nach Ausgangsmaterial die  $\text{CO}_2$ -Emissionen natürlich drastisch variieren (siehe Abbildung).



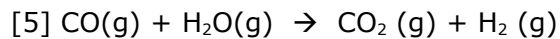
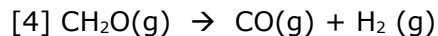
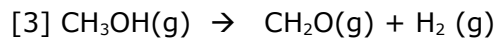
Kurzfristig ist die Gewinnung von Methanol aus Biomasse interessant, da der Preis (ca. 0,06 – 0,10 €/kWh) und die geringe  $\text{CO}_2$ -Emission dafür spricht. Aber langfristig wird das aufgrund des limitierten Vorkommens der biologischen Quellen (z.B. Holz, Naturfasern

usw.) und die doch auch erhebliche ökologische Wichtigkeit der wachsenden Biomasse auf der Erde, nicht funktionieren, stattdessen wird die Erzeugung des Methanols aus Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) und Wasserstoff (H<sub>2</sub>) von Interesse sein. Die Synthese des Methanol erfolgt in einer exothermen Gleichgewichtsreaktion, auf Basis des von Matthias Pier 1923 entwickelten Verfahren, aus Synthesegas (heute bei Bedingungen von 200 - 300° Celsius und 50-90 bar), unter Anwendung eines Cu/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Katalysator:



## 2.2. Methanolreformierung

Methanol spaltet sich theoretisch in folgenden Reaktionsschritten:



[3] Methanol wird zu Formaldehyd gespalten

[4] Formaldehyd wird zu Kohlenstoffmonoxid unter Wasserstoffabgabe

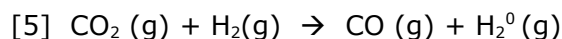
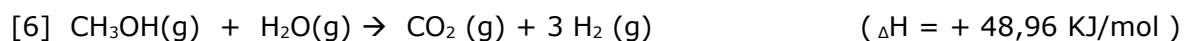
[5] Befreiung des Gases von Katalysatorgift Kohlenmonoxid

Natürlich entstehen noch weitaus mehr Stoffe, als die erwarteten. Deswegen muss das Produktgas noch gereinigt werden.

Man unterscheidet bei der technischen Methanolreformation zwischen drei verschiedenen katalytischen Verfahren:

### 2.2.1. Dampfreformierung

Die Dampfreformierung unterteilt sich in zwei Schritte:



[6] Endotherme katalytische Umsetzung, bei 200-300°C (Cu-Kat).

[5] Der zweite Schritt wird auch „Shiftreaktion“ genannt und ist eine exotherme katalytische Umsetzung des entstandenen Katalysatorgift Kohlenmonoxid mit Wasserdampf. Es gab in den letzten Jahren zahlreiche Forschungsprojekte, die gezeigt haben, dass Methanol und Wasser direkt zu Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid reagieren.

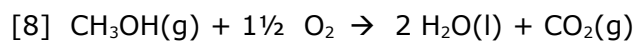
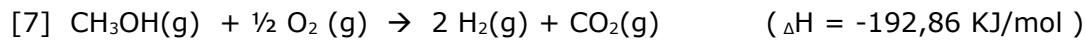


Erst wenn alles Methanol umgesetzt ist, tritt die Wasser-Gas-Shiftreaktion ein und ein Teil des Kohlenstoffdioxids wird in Kohlenstoffmonoxid umgewandelt.

Danach wird das entstandene Gas gereinigt und von CO (g) und anderen Stoffen befreit.

Das Verfahren ist technisch ausgereift. Es gibt's große Reformierungsanlagen mit einer Produktion von bis zu 100.000Nm<sup>3</sup> Wasserstoff pro Stunde.

### 2.2.2. Partielle Oxidation (POX)



[7] POX verläuft eigentlich nach dieser Gleichung.

[8] Bei Sauerstoffüberschuss im Eduktgas überwiegt diese Reaktion

### 2.2.3. Autotherme Reformierung

Die autotherme Reformierung ist eine Kombination der beiden oberen Verfahren. Das Verfahren hat höhere Wirkungsgrade als die partielle Oxidation (POX) alleine aufweist. Aber etwas unter denen der, der Dampfreformierung liegt.

Der Vorteil der Kombination ist, dass die Wasserdampf- und Luftzufuhr so eingestellt wird, dass der exotherme Reaktionsverlauf POX die für die Dampfreformierung notwendige Energie liefert.

### 2.2.4. Methanolspaltung

Ein wenig tritt auch die Methanolspaltung auf. Hierbei wird Methanol lediglich in CO und 2 H<sub>2</sub> gespalten.

## 2.3. Katalysatoren

### 2.3.1. Anforderungen an einen Mobil-Katalysator

- Hohe Belastung des Katalysators durch kompakte Reaktoren
- Hohe Anforderung an Dynamik
- Hohe mechanische Stabilität
- Große Temperaturschwankungen (-20°C – mind. 300°C)
- Vollumsatz der Reaktion (des Methanols)
- Langzeitstabilität muss gewährleistet sein

### 2.3.2. Entwicklung eines Reformerkatalysators von BASF

BASF forscht zusammen mit XCELLSIS, einer Tochtergesellschaft von DaimlerChrysler, Ford und Ballard an der Entwicklung eines Katalysators für genau diese Zwecke der Methanol-Reformation. Bisher wurde ein  $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/+\text{Additive}$ -Katalysator entwickelt, der die notwendigen Voraussetzungen für einen solchen Katalysator haben:

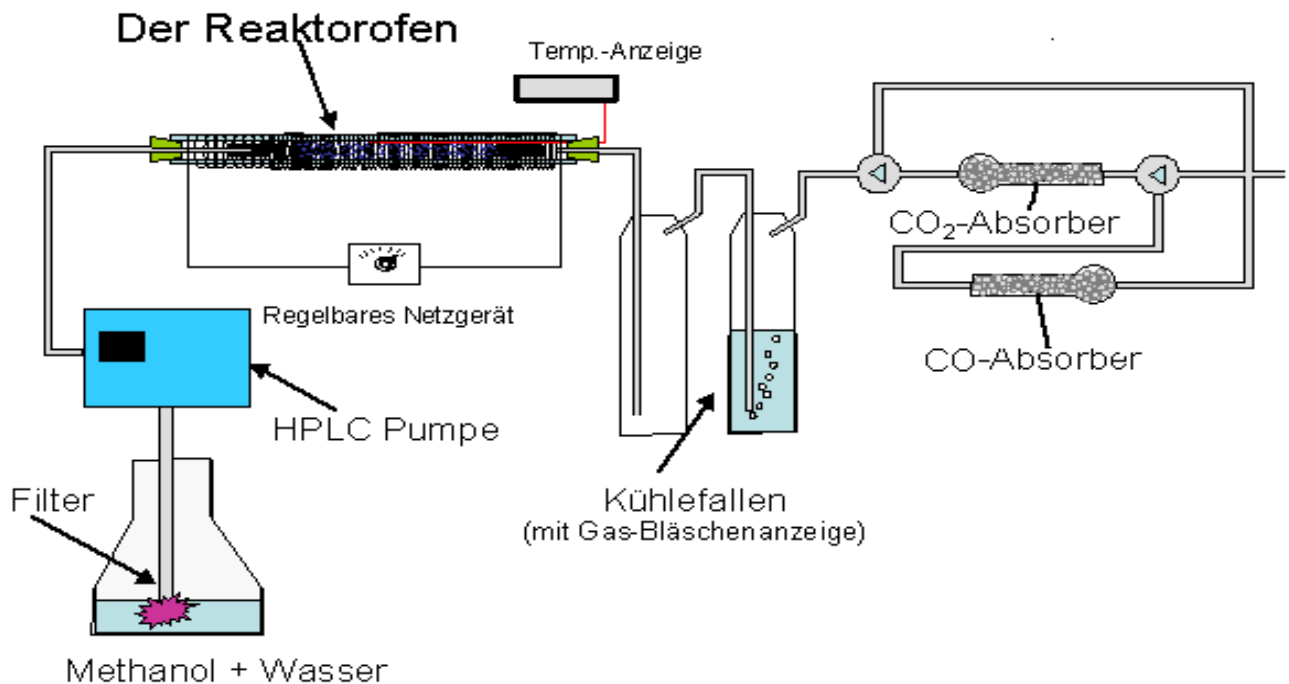
- Aktivität ( Cu )
- Thermische und mechanische Stabilität (  $\text{Al}_2\text{O}_3$  )
- Selbsterhaltende Effizienz ( ZnO )

## 3. Experimenteller Teil

### 3.1. Unser Versuchsapparatur



**ABBILDUNG: (älteres) Foto unseres Versuchsaufbaus:**



**ABBILDUNG:**  
**Computerzeichnung unseres Versuchsaufbaus (ohne Gasmengenmessung):**

### 3.1.1. Funktionsweise der Versuchsanlage

Das Wesen unserer Apparatur lässt sich gut in drei Phasen einteilen:

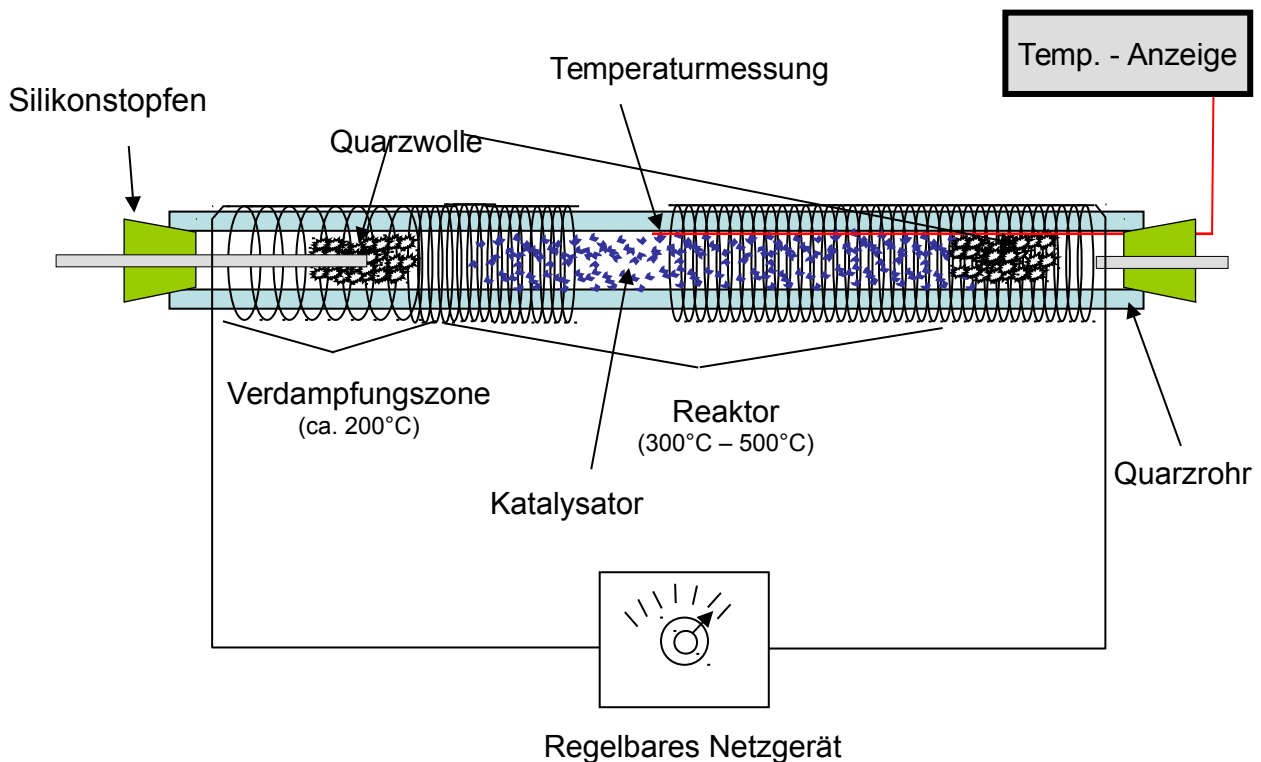
#### 1) Bereitstellungsphase:

Als erstes muss die Apparatur bis auf Reaktionstemperatur vorgeheizt werden. Dies geschieht mit Hilfe eines Widerstanddrahtes (2 Meter) der mit 65 Windungen um ein Quarzrohr gewickelt wurde. Als Heizstrom benutzen wir Wechselstrom.

In der Verdampfungszone ist der Draht weniger eng gewickelt als in der Reaktionszone (siehe ABBILDUNG „Reaktorofen“) da eine Temperatur von 100°C – 220°C ausreicht, weil nur eine Verdampfung aber noch keinerlei Reaktionen gewollt sind. Die Stopfen an den Enden des Quarzrohrs sind aus Silikon, da es den hohen Temperaturen (bis 220°C) standhalten kann.

Die HPLC-Pumpe zieht das Methanol-Wasser-Gemisch aus einer Flasche durch einen Filter an und spritzt es durch die Kapillare in den Reaktor. Die Flussrate ist einstellbar, wir benutzen meistens eine von 0,25ml pro Sekunde.

ABBILDUNG: Der Reaktorofen:



Im Reaktor wird es in der „Verdampfungszone“ schon in der Kapillare auf über 100° C gebracht. Am Ende der Kapillare haben wir einen kleinen Draht hineingesteckt um einen konstanten Gasstrom zu gewährleisten, da sonst durch Tröpfchenbildung und den damit folgenden explosionsartigen Verdampfung ein abgehackter Gasstrom entsteht. Wir haben herausgefunden, dass es günstig ist die Kapillare in der Quarzwolle enden zu lassen. Offensichtlich verdampft der Flüssigkeitsstrom dadurch direkt nach dem Austreten aus der Kapillare.

## 2) Reaktionsphase:

In dieser Phase läuft die eigentliche Reaktion ab. Das gasförmige Gemisch aus Methanol und Wasser wird in einer Temperaturumgebung von 300°C bis 500°C auf den Katalysator treffen und die Reformationsreaktion durchführen. In der Mitte des Reaktors haben wir eine Temperatursensor installiert mit einem Thermoelement Typ K von Phillips mit einem geringen Durchmesser von 0,5 mm. Durch das regelbare Netzgerät ist es möglich stufenlos die Temperatur auf den gewünschten Wert einzustellen.

Der Versuchsapparat ist so gebaut worden, dass man ohne allzu kompliziertes Umbauen verschiedene Reaktoröfen auszutauschen kann. Diese unterschiedlichen Öfen sind mit verschiedenen Katalysatoren ausgefüllt, wie Cu-Späne, Platin-Perl-Katalysator oder ein Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO-Katalysator (wie von BASF entwickelt).

### 3) Reinigungsphase

Nach der Reaktion verlässt das heiße Reaktionsgas den Reaktor und durchströmt zunächst eine Kühlfalle, um ungewünschte Stoffe, die in Nebenreaktionen aufgetreten sind, durch Kühlung zu liquidieren und in der Falle zurück zu lassen. Wir nehmen an, dass das Gasgemisch nach der Reinigung durch die Kühlfalle optimalerweise nur noch  $H_2$ ,  $CO_2$  und  $CO$  enthält. Andere Stoffe, wie Formaldehyd, Ameisensäuremethylester ( $2 C H_2O(g) \rightarrow CHOOCH_3$ ) usw. sind ausgefällt worden.

Durch die folgende Bläschenanzeige ist es möglich einen ungefähren Überblick über die Geschwindigkeit und des Volumens der Gasentwicklung zu bekommen.

### 4) Analysephase

Das entstandene Reaktionsgas analysieren wir klassisch – durch Absorption:

Der  $CO_2$ -Absorber filtert das  $CO_2$  durch heraus, indem folgende Reaktion an Natriumkalk erfolgt:

$$CO_2(g) + NaOH(s) \rightarrow Na_2CO_3(s) \quad [9]$$

Durch die Differenz der Gasvolumina lässt sich der Anteil an Wasserstoff ziemlich genau bestimmen.

Wir sind im Moment noch mitten in der Entwicklung eines  $CO$ -Absorbers und einer gelungeneren Möglichkeit die Differenz-Volumen der Reaktionsgase nach passieren der Absorber zu messen.

### Gasmengenmessung

Zur Gasmessung haben wir einen Aufbau nach unterer Abbildung entwickelt.

Durch den Überdruck, der durch das entstehende Gas in dem geschlossenen System zunimmt wird die gefärbte Flüssigkeit in dem U-Rohr nach oben gedrückt. Sobald die Flüssigkeit den Lichtstrahl auf die Fotodiode unterbricht öffnet unsere Schaltung das Ventil für eine kurze Zeit. Durch die Frequenz, bzw. die Häufigkeit innerhalb einer Zeit, können wir die entstehenden Gasmengen miteinander vergleichen und bestimmt werden.

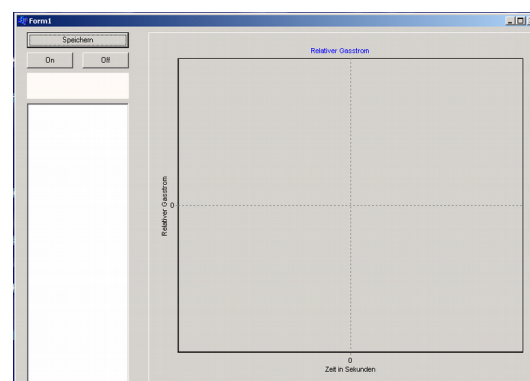


ABB: Screenshot der Software

Die Messung erfolgt über den IO-Port an einem PC mit unserem kleinen Programm. Es kann die zeitlichen Abstände angeben und für den schnellen Überblick es in einer Kurve darstellen.

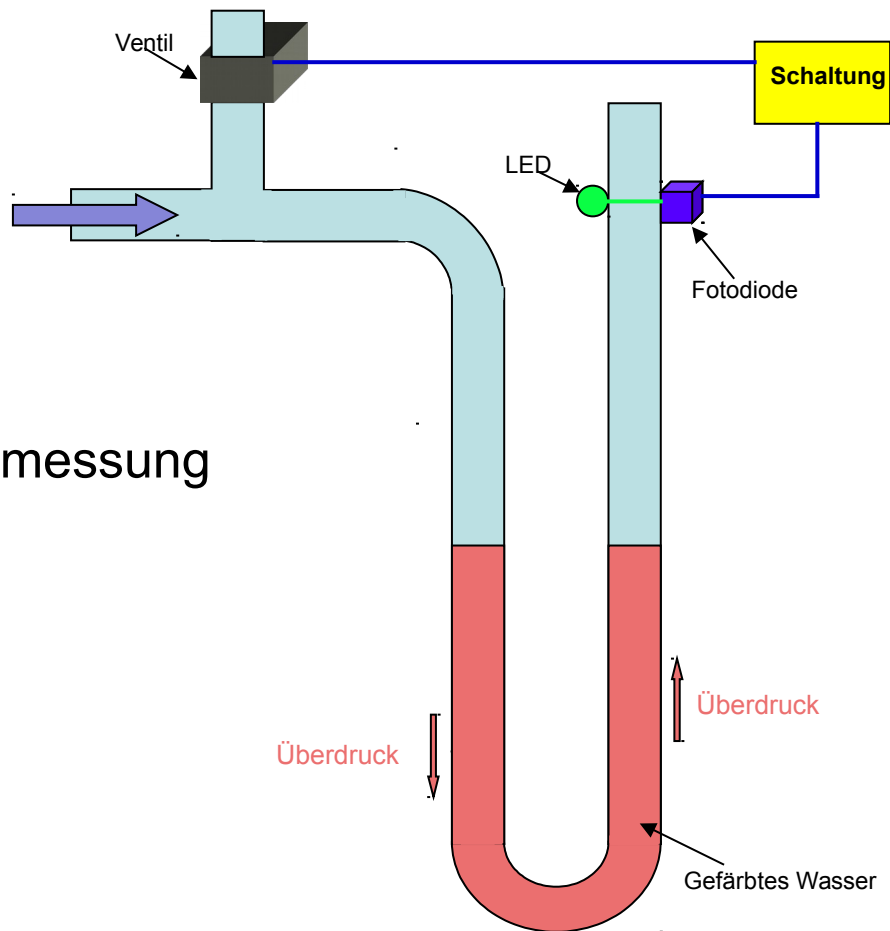


Abbildung:  
Gasmengenmessung

## 4. Versuchsergebnisse

### 4.1. Allgemeine Beschreibung

Methanol und Wasser werden mit einem kleinen Wasserüberschuss im Molverhältnis 1/1,3 – 1/1,5 gemischt und durch eine HPLC-Pumpe in einen Reaktor eingebracht. Die Reaktionsmischung verdampft und durchströmt anschließend den Reaktionsraum. Durch Bestimmung der Gasmengen der Reaktionsprodukte können wir den Wirkungsgrad der Wasserstoffbildung bezogen auf die eingesetzte Menge an Methanol ermitteln, denn wichtigstes Ziel des Konverters ist eine möglichst hohe Ausbeute an Wasserstoff.

Wenn wir annehmen, die Gase reagieren nach der idealen Reaktionsgleichung, dann müsste pro eingesetztes Mol Methanol 3 Mol Wasserstoff entstehen:



Bei einer molaren Masse der Ausgangsstoffe (Mischung) von  $32 + 18 = 48 \text{ g/mol}$  ist ein Milliliter der Mischung circa  $18,4 \text{ mmol}$ . Dabei wurde eine Dichte von  $\rho = 0,883 \text{ g/ml}$  angenommen. Daraus müssten dann  $3 * 18,4 \text{ mmol}$  Wasserstoff entstehen, dieser würde dann ein Volumen von  $V = 25 \text{ l/mol} * 3 * 18,4 \text{ ml}$  besitzen, wenn von durchschnittlichen Tübinger Bedingungen für Luftdruck und Raumtemperatur ausgegangen wird. Eine jeweilige Berücksichtigung des Luftdrucks erscheint hier nicht sinnvoll, da die Fehler bei der eigentlichen Messung um Größenordnungen darüber liegen.

Bei idealer Prozessführung und unter Annahme eines Ablaufs nach der obigen Gleichung würde die Ausbeute an Wasserstoff betragen:

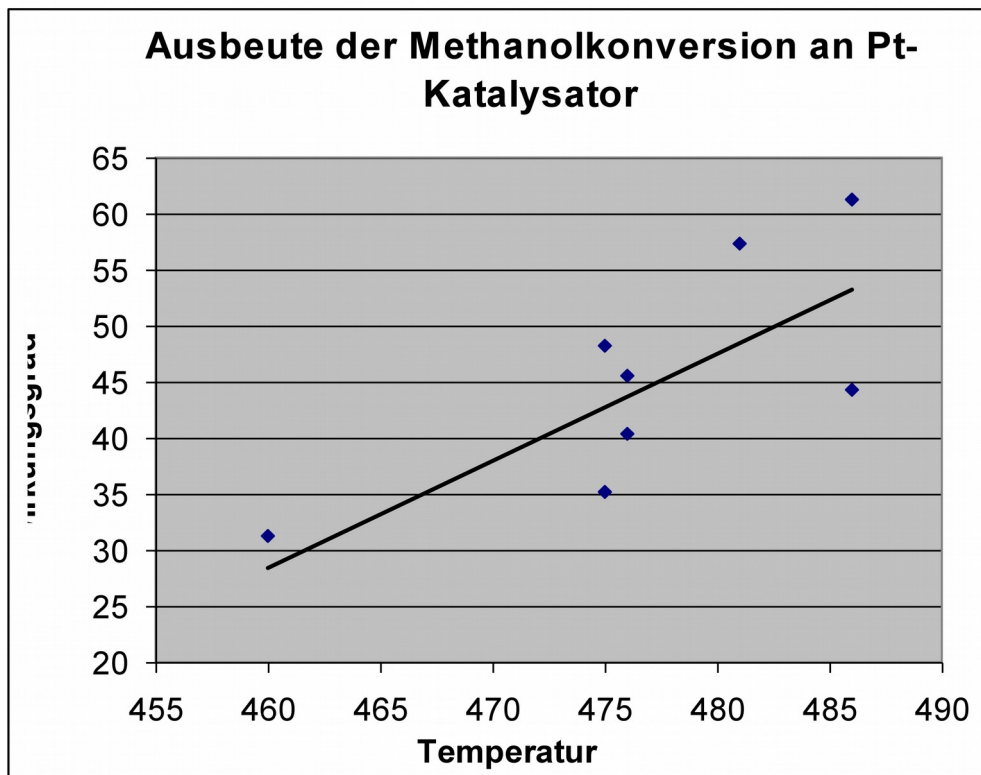
Ausbeute Wasserstoff	= 1380 ml/ml (dimensionslos)
Ausbeute $\text{H}_2 + \text{CO}_2$	= 1840

## 4.2. Katalysator: Platin-Perl-Katalysator

Dieser Katalysator wurde verwendet, um zunächst einmal einen Überblick zu bekommen, wie sich ein typischer allround-Katalysator in dieser Anwendung bewährt. Gleichzeitig wurde versucht, mit diesem Industriekatalysator Erfahrungen zu sammeln und die Versuchsanordnung zu optimieren.

### Messreihe 1:

Flussrate Mischung [ml/s]	Messzeit [s]	Volumen[ml]	Temperatur[°C]	Wirkungsgrad
0,25	10	24	460	31,27
0,25	10	27	475	35,18
0,25	10	34	486	44,3
0,25	10	47	486	61,24
0,25	10	37	475	48,21
0,25	10	31	476	40,39
0,25	10	27	475	35,18
0,25	10	35	476	45,6
0,25	10	44	481	57,33



Man erkennt, dass die Ausbeute mit der Temperatur zunimmt. Die starke Streuung der Messpunkte ist sicher eine Folge der ungleichmäßigen Verdampfung der Ausgangsmischung durch Siedeverzug. Das Versuchsergebnis entspricht der Erwartung aus der Theorie. Die Reaktion selbst ist endotherm und eine Gleichgewichtsreaktion. Im betrachteten Temperaturbereich liegt das Gleichgewicht vollständig auf der Seite der Produkte.

In dieser Grafik sieht man die Zunahme der katalytischen Aktivität mit der Temperatur.

#### 4.2.1. Analyse der gasförmigen Produkte

Die Analyse des Reaktionsgases ergab keine messbare Absorption von Kohlendioxid an Natronkalk. Daraus lässt sich schließen, dass die Reaktion nicht nach der Gleichung [1] verläuft, sondern, dass Methanol hauptsächlich einfach gespalten wird und Nebenreaktionen in großer Anzahl ablaufen, die von uns nicht gewünscht wurden. Unsere weitere Arbeit wird sich im Wesentlichen auf die Optimierung des Aufbaus zu Gunsten einer gut ablaufenden Reaktion nach Gleichung [1] konzentrieren. Wir haben festgestellt, in einer weiteren Messung mit dem Katalysator der BASF, den sie uns freundlicherweise



zur Verfügung gestellt haben, dass es wahrscheinlich an dem Platin-Katalysator liegt, da der Forschungs-Katalysator deutlich andere Ergebnis gebracht hat.

## 5. Quellenverzeichnis

BASF AG (Dr. Markus Hölzle)

<http://www.hydrogen.org/>

<http://www.ruhr-uni-bochum.de/>

<http://www.fz-juelich.de/>

<http://www.refuelnet.de/>

<http://www.umweltbundesamt.de/>

<http://energie1.physik.uni-heidelberg.de/>

<http://www.forum-brennstoffzelle.de/i>

<http://www.diebrennstoffzelle.de>

<http://www.mariengymnasium-jever.de/>

<http://www.vaillant.de>

<http://www.dmfc.com/>