

## **SCHLUSSBERICHT 2004**

Über die Arbeiten gemäss Auftrag: **1005**

**Titel des Projektes: Demonstration eines Metallhydrid Speichers in einem mit Wasserstoff angetriebenen Pistenfahrzeug**

**Zusammenfassung:**

Im vorliegenden Projekt wurde ein Metallhydrid Speicher für ein Pistenfahrzeug entwickelt und gebaut. Der Speicher besteht aus 10 zylindrischen Modulen mit je 10 Liter Volumen. Insgesamt wurden 300 kg AB<sub>2</sub>-Legierung eingesetzt, welche ca. 5 kg Wasserstoff speichern können. Für den Wärmeaustausch werden die Module seriell mit dem Kühlwasser des Motors beheizt.

Der Speicher bleibt nach Abschluss des Projektes Eigentum des Bundesamtes für Energie (BFE).

**Dauer des Projektes: 1. August 2003 - 31. Januar 2004**

Beitragsempfänger: Andreas Züttel, Prof. Dr.

Berichterstatter: Andreas Züttel

Adresse: Universität Fribourg, Physik Departement,  
Forschungsgruppe Festkörperphysik, Pérolles,  
CH-1700 Fribourg

Telephon: (+41) (26) 300 9086, Fax. (+41) (26) 300 9747

## **1. Projektziele**

### **1.1. Bau eines Hybridspeichers**

Im vorliegenden Projekt soll der Metallhydrid Speicher für das Pistenfahrzeug an der Universität Fribourg entwickelt und gebaut werden. Der geplante Speicher besteht aus drei in Serie geschalteten Modulen mit je 25 Litern Volumen. Die Module enthalten insgesamt 7 kg Wasserstoff, womit das Pistenfahrzeug 1h bis 1.5h Stunden lang betrieben werden kann, was für eine medienwirksame Demonstration ausreichend ist.

Der Speicher bleibt Eigentum des Bundesamtes für Energie (BFE).

### **1.2. Montage des Hybridspeichers auf einem Pistenfahrzeug**

Der Metallhydrid Speicher wird auf der Ladefläche des Pistenfahrzeugs montiert und mit dem Kühlwassersystem des Motors verbunden. Der Wasserstoff wird über ein Magnetventil dem Saugrohr-Einspritzsystem zugeführt.

### **1.3. Demonstration des Pistenfahrzeuges**

Das gesamte Projekt wird durch den Verein „Swiss Alps 3000“ durchgeführt mit dem Ziel im Berner Oberland ein emissionsfreies Pistenfahrzeug zu demonstrieren. Anfang 2004 wird das Pistenfahrzeuge im Jungfraugebiet z.B. Mürren vorgeführt und an diversen Wintersport Anlässen demonstriert. Dabei soll das Publikum den emissionsfreien Antrieb hautnah miterleben können und mit Informationsmaterial versorgt werden. Wir werden die grosse Publizität der Skirennen nutzen um unser Projekt vorzustellen und auch international zu verbreiten.

## 2. AUSGEFÜHRTE ARBEITEN UND RESULTATE

### 2.1. Speicherlegierung

Wasserstoff wird heute vorwiegend in Druckgasflaschen gespeichert. Die Wasserstoffdichte beträgt bei 200 bar  $14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Geht man zu viel höherem Druck, so kann bei 700 bar eine volumetrische Dichte von  $33 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  erreicht werden. Nachteil der Druckgasflaschen aus Stahl ist deren Eigengewicht und der hohe Druck stellt ein Sicherheitsrisiko dar. Deshalb soll im vorliegenden Projekt der Wasserstoff in einem Metallhydrid gespeichert werden. Metallhydride können Wasserstoffdichten von  $150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  erreichen, also mehr als doppelt so dicht wie im flüssigen Wasserstoff bei  $-252^\circ\text{C}$ . Die folgende Abbildung zeigt schematisch das Prinzip der Hydridbildung.

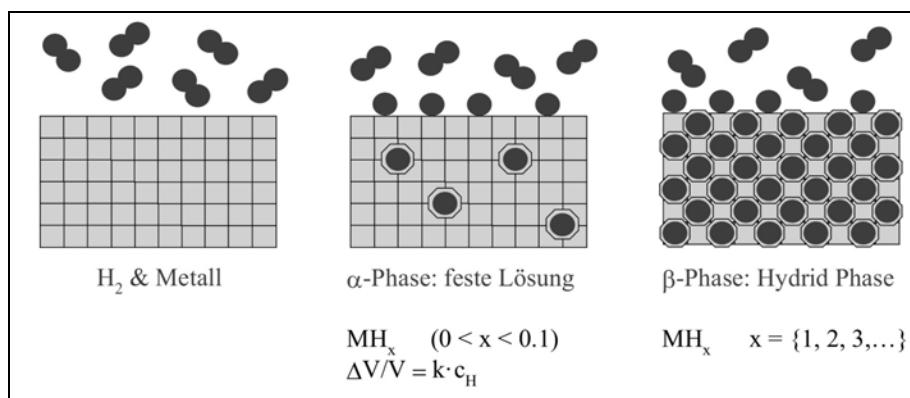


Abb. 1. Schematische Darstellung der Hydridbildung. Metall und Wasserstoffgas (links) feste Lösung von atomarem Wasserstoff (Mitte) und Metallhydridphase (rechts).

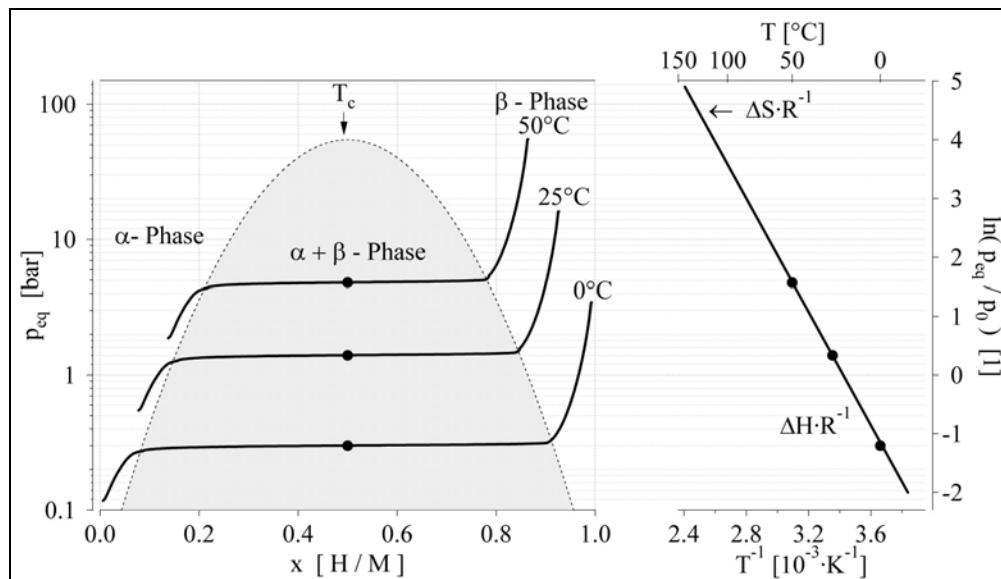


Abb. 2. links: Druck-Konzentrations-Isothermen für die Festkörperlösung des Wasserstoffs ( $\alpha$ -Phase) und die Hydridbildung ( $\beta$ -Phase). Der zwei-Phasen-Bereich ist durch das flache Plateau charakterisiert, mit Gleichgewichtsdruck  $p_{\text{eq}}$  ( $T$ ) und er endet bei  $T_c$ , rechts: Van't Hoff Plot: Gleichgewichtsdruck in Funktion der inversen Temperatur.

Geeignete Metallhydride absorbieren den Wasserstoff bei Raumtemperatur und geben ihn bei leichter Temperaturerhöhung wieder ab. Zudem zeigen Metallhydride durch den Phasenübergang die besondere Eigenschaft, dass der Wasserstoff bei konstantem niedrigem Druck absorbiert und desorbiert wird. Der Zusammenhang zwischen Druck und Temperatur wird durch die Van't Hoff Gleichung beschrieben.

$$\ln\left(\frac{p_{\text{eq}}}{p_0}\right) = \frac{\Delta H_f}{R} \cdot \frac{1}{T} - \frac{\Delta S}{R} \quad \text{Van't Hoff Gleichung}$$

Bringt man ein festes Metall und Wasserstoffgas in Kontakt, so werden Wasserstoffmoleküle an der Oberfläche des Metalls adsorbiert. Die Wasserstoffmoleküle können dissozieren und atomarer Wasserstoff kann in das Metall diffundieren; dieser Zustand wird als feste Lösung ( $\alpha$ -Phase) bezeichnet. Ist die Wasserstoff- Konzentration im Metall klein (stark verdünnte Lösung), so findet keine wesentliche Wechselwirkung zwischen den Wasserstoffatomen, welche sich auf Zwischengitterplätzen einlagern, statt. Durch den Einbau der Wasserstoffatome wird das Metallgitter gedehnt; für kleine Wasserstoff Konzentrationen ist die relative Volumenänderung proportional zur Menge an gelöstem Wasserstoff. Wird die Konzentration erhöht so kommt es zur Bildung der sog. Hydridphase ( $\beta$ -Phase). Diese ist dadurch charakterisiert, dass das Wasserstoff / Metall - Verhältnis einen festen Wert annimmt.

Die Speicherlegierung wurde bei HERA Hydrogen Storage Systems GmbH, Höfener Strasse 45, D-90431 Nürnberg, Deutschland zum Preis von 23.90 €/kg gekauft.

Die Wasserstoffspeicher Legierung trägt die Bezeichnung "Hydralloy C5, Art. Nr. 2004733, Lot Nummer 34502" und hat folgende Zusammensetzung:

Element	m [%]	M [g/mol]	x [mol/100g]	x [AB2]
Ti	28.00	47.9000	0.585	0.93
Al	0.23	26.9815	0.009	0.01
V	14.05	50.9415	0.276	0.44
Mn	50.75	54.9380	0.924	1.46
N	0.07	14.0067	0.005	0.01
Si	0.08	28.0855	0.003	0.00
Fe	2.99	55.8470	0.054	0.08
Zr	3.04	91.2200	0.033	0.05
O	0.10	15.9994	0.006	0.01
Summe	99.31		1.894	

Tab. 1. Zusammensetzung gemäss Abnahmeprüfzeugnis EN 10 204-3.1.B (GfE)

Somit lautet die chemische Zusammensetzung der Legierung  $\text{Ti}_{0.93}\text{Zr}_{0.05}(\text{Mn}_{0.73}\text{V}_{0.22}\text{Fe}_{0.04})_2$  mit der Molmasse  $M = 158.39 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ . Die gravimetrische Dichte ist gemäss Hersteller Angaben  $\rho = 6.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  und die Schüttdichte beträgt  $\rho_s = 3.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

Die Legierung Hydralloy C5 absorbiert 1.88 wt% bei 45.8°C und desorbiert 1.84 wt% bei 45.2°C aus Datenblatt GfE 1407EA01.119. Die Desorptionskapazität entspricht 9.2 mol H<sub>2</sub> bzw. 206 l H<sub>2</sub> / kg Hydralloy C5 bei  $p = 1.013 \cdot 10^5$  Pa und T = 0°C.

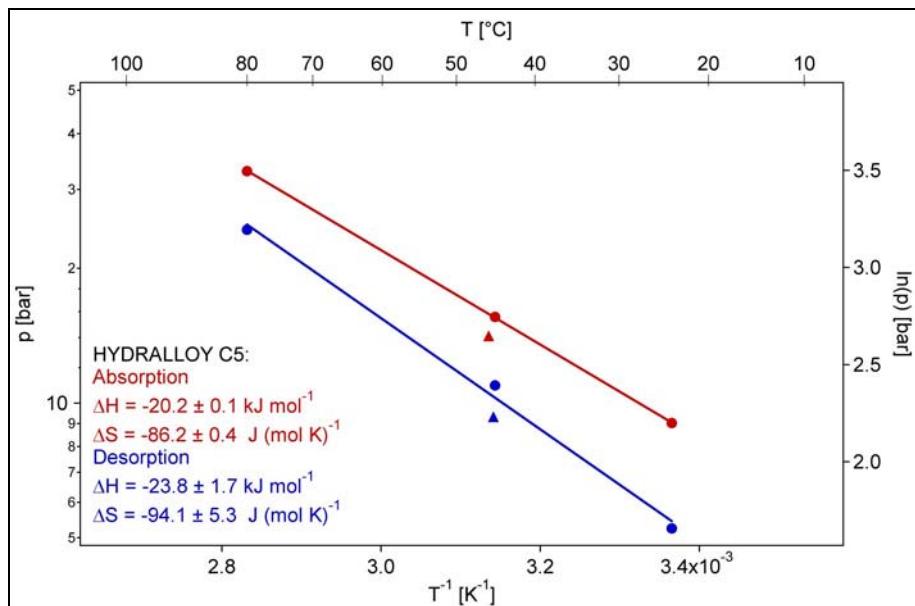


Abb. 3. Van't Hoff plot für die Wasserstoff Absorption und Desorption mit Hydralloy C5, runde Marker: unsere Messung, dreieckige Marker: Hersteller Angaben.

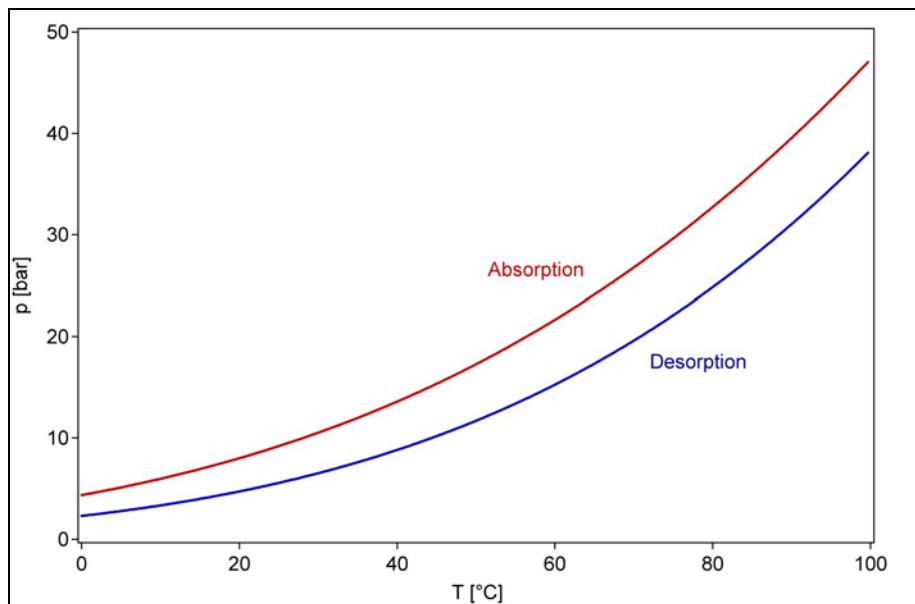


Abb. 4. Berechneter Gleichgewichtsdruck für die Wasserstoff Absorption und Desorption mit Hydralloy C5, unsere Messung.

#### Thermodynamische Daten der Hydralloy C5:

$\Delta H = -20.2 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \text{H}_2$  und  $\Delta S = -86.2 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \text{H}_2$  für die Absorption

$\Delta H = 23.8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \text{H}_2$  und  $\Delta S = 94.1 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \text{H}_2$  für die Desorption

Bei der Absorption ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ ,  $p = 15 \text{ bar}$ ) wird die Wärme  $\Delta H = 270 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  Legierung bzw.  $15.15 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}\text{H}_2$  frei (Wasserstoff macht einen Gas-Festkörper Übergang), welche bei der Desorption wieder aus der Umgebung bzw. mit der Abwärme der Verbrennung ( $\Delta H_v = 142 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}\text{H}_2$ ) zugeführt wird.

Während der Absorption des Wasserstoffs in Hydralloy C5 nimmt das Volumen um ca. 19% (unsere Messung) zu, dies wird bei der Bestückung des Speichers berücksichtigt.

Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Druck [p]	Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Druck [p]
-20	1.0	40	8.8
-15	1.3	45	10.2
-10	1.6	50	11.7
-5	1.9	55	13.4
0	2.3	60	15.3
5	2.8	65	17.3
10	3.3	70	19.6
15	4.0	75	22.1
20	4.7	80	24.8
25	5.6	85	27.8
30	6.5	90	31.0
35	7.6	95	34.6

Tab. 2. Desorptionsdruck als Funktion der Temperatur

## 2.2. Speichertank

Der Hydridtank wird aus 10 Modulen aufgebaut. Jedes Modul besteht aus 7 zylindrischen Rohren aus AISI 316 L Edelstahl AISI 304 Fe/Cr18/Ni10Mo3 (Zugfestigkeit  $>460 \text{ MPa}$ , Dichte  $7.96 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) mit einer Länge von 1200 mm, einem Innendurchmesser von 40 mm (Aussendurchmesser 44.2 mm) und einer Wandstärke von 2 mm und somit einem Volumen von 1.507 Liter.

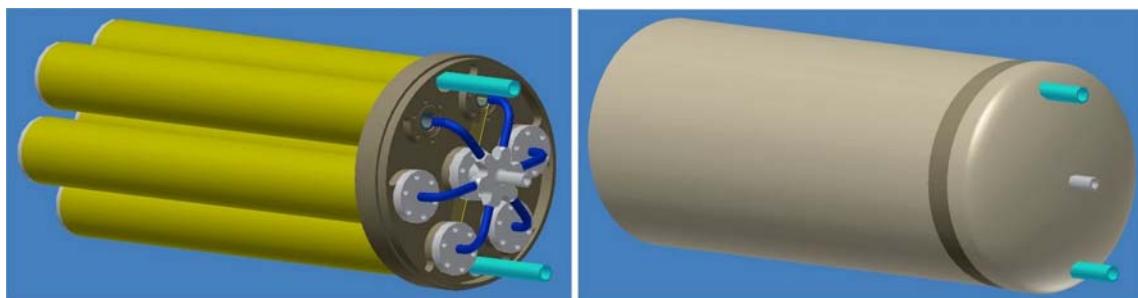


Abb. 5. Seiten und Frontansicht eines Moduls des Druckbehälters.

Die minimale Wandstärke  $d_w$  ist mit den Sicherheitsfaktoren  $f_1 = 0.5$  und  $f_2 = 0.1 \text{ mm}$  durch folgende Gleichung gegeben:

$$d_w = \frac{\Delta p}{2 \cdot \sigma_v \cdot f_1 + \Delta p} \cdot d_a + f_2 \quad \text{Minimale Wandstärke für Zylinder}$$

Die Druckfestigkeit der oben beschriebenen Rohre ist somit  $\Delta p = 210$  bar was 5 mal dem maximal zu erwartenden Druck von 40 bar bei 100°C (Siedepunkt des Kühlwassers) entspricht.

Ausgehend von einem Füllgrad von 80% und der Schüttdichte von 3.5 g·cm<sup>-3</sup> wird jedes Rohr mit 4.22 kg Legierung gefüllt. Insgesamt enthält jeder Tank (7 Rohre) 29.56 kg Legierung. Somit kann pro Tank 0.544 kg Wasserstoff gespeichert werden.

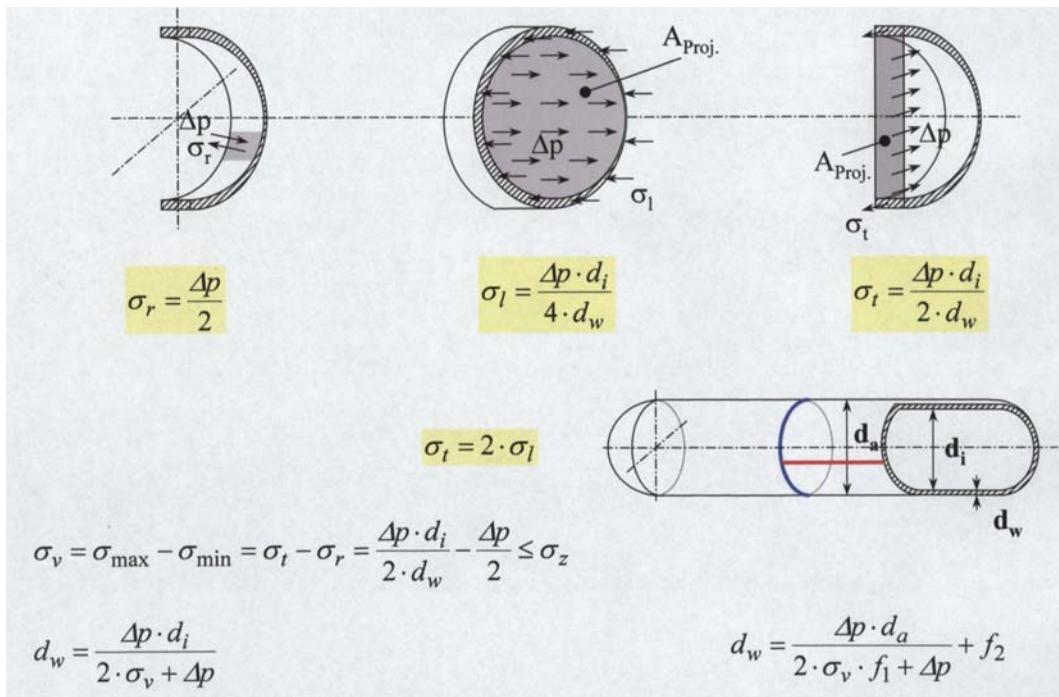


Abb. 6. Zur Berechnung der Wandstärke eines Druckbehälters. Radialkraft, Längskraft und Tangentialkraft (oben). Die Tangentialkraft ist doppelt so gross wie die Radialkraft.



Abb. 7. Photo des fertigen Tankstapels.

Die Legierung wurde auf eine Partikelgrösse von <1 mm gemahlen. Jedes Rohr wurde mit 4.2 kg Legierung befüllt. Somit enthält jeder Tank (Leergewicht 27.6 kg) 29.4 kg Legierung. Die Füllhöhe ist 80 cm, was einem Füllvolumen von 66% entspricht. Alle 10 Tanks wurden mit Druckwasser (50 bar) für mind. 1 Stunde auf Dichtheit geprüft.

Der Stapel wurde auf einen Restdruck von <0.01 mbar abgepumpt und mit He-Lecktester auf Leckagen geprüft. Es konnten keine Lecks gefunden werden.

### 2.3. Montage des Hybridspeichers

Der Metallhydridtank wird so ausgelegt, dass der ideale Desorptionsdruck von 15 bar bei 60°C erreicht wird (ca. 5 bar bei 20°C). Der Tank wird direkt mit dem Kühlwassersystem des Motors verbunden und so beheizt. Mit Hilfe eines Ventils wird im Fahrzeug sichergestellt, dass das Kühlwasser beim Eintritt in den Hydridtank eine maximale Temperatur von 60°C (Tank Innendruck  $p < 20$  bar) erreicht.

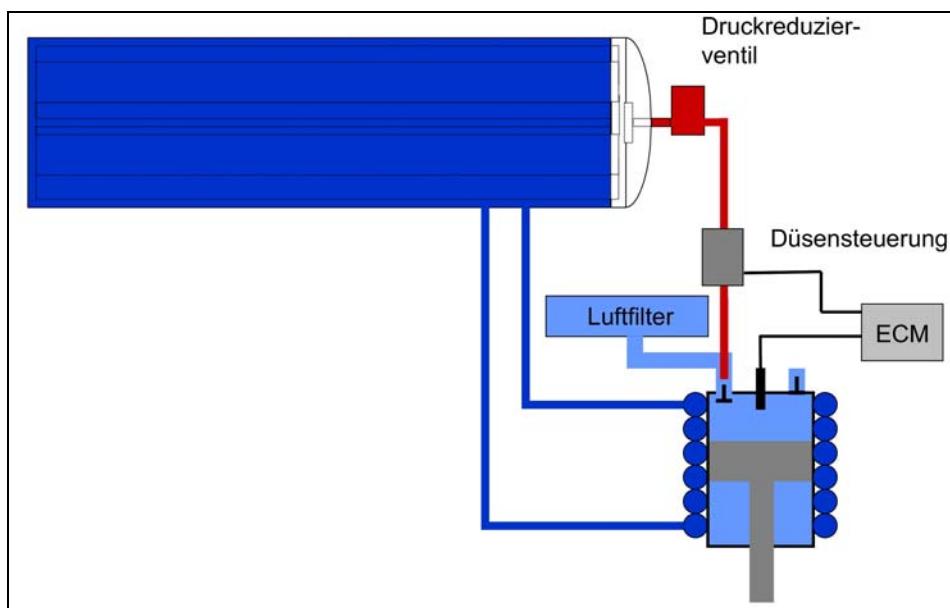


Abb.8. Prinzip des saugenden Benzinmotors (oben) und des Wasserstoffmotors mit Einspritzung (unten).

Verbrennungskraftmaschinen mit innerer Verbrennung sind grundsätzlich für den Betrieb mit Wasserstoff geeignet, stellen einen sehr guten Kompromiss zwischen Herstellungskosten, Kraftstoffökonomie, Leistungsgewicht und Lebensdauer dar und besitzen darüber hinaus noch ein grosses Entwicklungspotential [2, 3, 4].

Ottomotoren können bei Betrieb mit Wasserstoff im Teillastbereich etwa die Wirkungsgrade konventioneller Dieselmotoren erreichen. Wasserstoff ermöglicht dabei im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen [4, 5] eine weitgehende Reduzierung der schädlichen Motoremissionen [6, 7, 8, 9, 10]. Im Abgas sind kein Kohlendioxid, Schwefeldioxid, Kohlenwasserstoffe oder Bleiverbindungen enthalten.

Infolge des grossen Zündbereichs von 5 bis 75 Vol.-% ist bei Wasserstoff ein Motorbetrieb mit sehr hohem Luftüberschuss, d.h. unter Verwendung eines sehr mageren

Gemischs, unter entsprechend reduzierter Stickoxidemission möglich (Abb. 9.). Im Gegensatz zu Benzin mit einem Zündbereich von 2 bis 8 Vol.-% kann ein Ottomotor mit Wasserstoff sowohl im sehr mageren wie auch extrem fetten Mischungsbereich betrieben werden, was Qualitätsregelung, wie beim konventionellen Dieselmotor, über den Kraftstoffanteil des Gemischs ermöglicht.

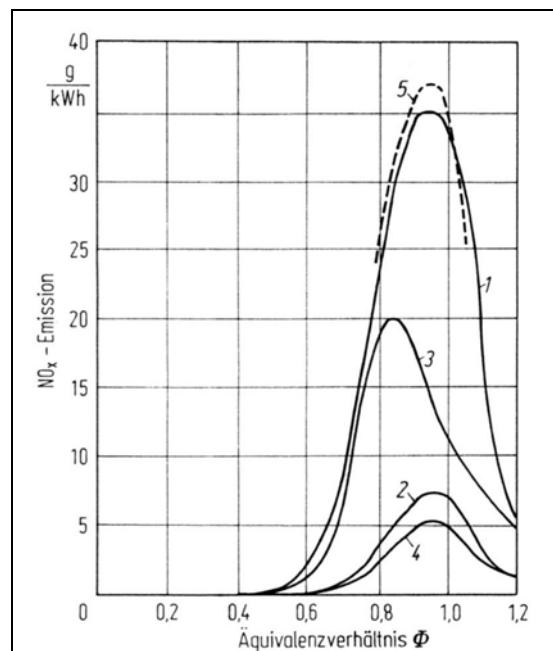


Abb. 9. Typische Werte der Stickoxidemission von Wasserstoffmotoren als Funktion des Äquivalenzverhältnisses  $\phi$ . 1 äussere Gemischnbildung, Füllungsregelung (nach [2]), 2 äussere Gemischnbildung, Qualitätsregelung, Wassereinspritzung (nach [2]), 3 innere Gemischnbildung (nach [3]), 4 innere Gemischnbildung (nach [10]) bzw. günstigste zu erreichende Werte, 5 typische Werte für konventionelle Otto- und Dieselmotoren. Man erkennt deutlich die erhebliche Verringerung der NO<sub>x</sub>-Emission für den bei Wasserstoff möglichen Betriebsbereich von  $\phi < 0.7$ .

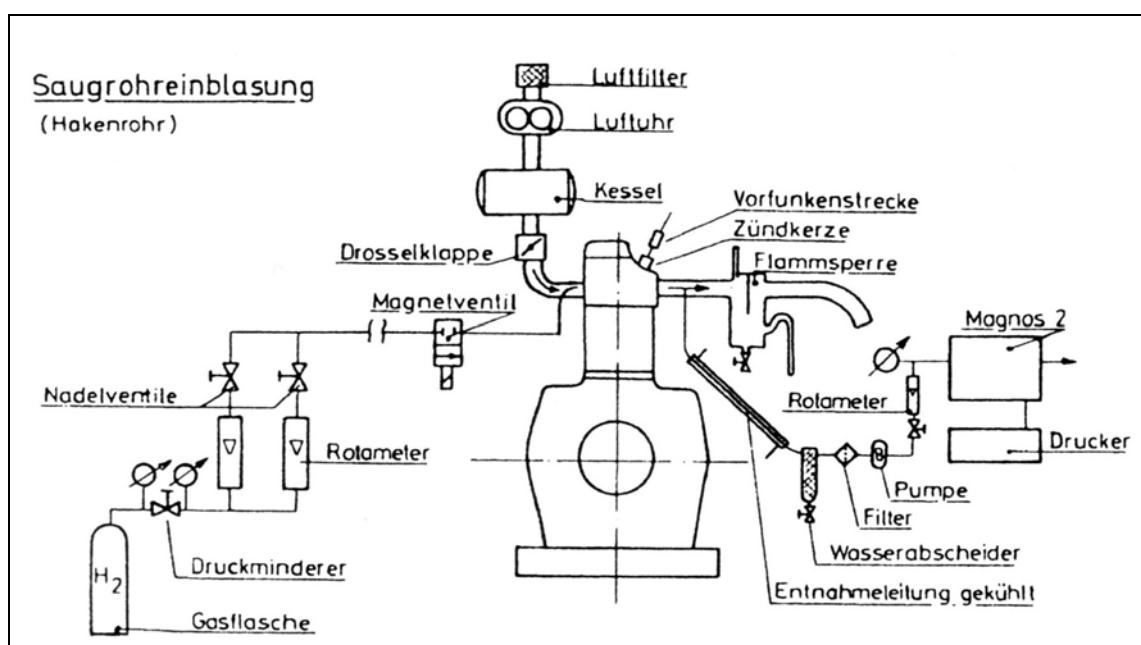


Abb. 10. Wasserstoffmotor mit äußerer Gemischnbildung, Saugrohreinblasung (Schema)

Neben der äusseren Gemischbildung ist vor allem innere Gemischbildung, also Hochdruckeinblasung des Wasserstoffs direkt in den Brennraum von Bedeutung, weil damit erhebliche Verbesserungen der Motorleistung zu erwarten sind [10]. Laufende Entwicklungsarbeiten befassen sich mit der Erhöhung des Einblasdrucks auf über 100 bar, wofür praktisch nur Kolbenhochdruckpumpen für flüssigen Wasserstoff in Betracht kommen [11, 12].

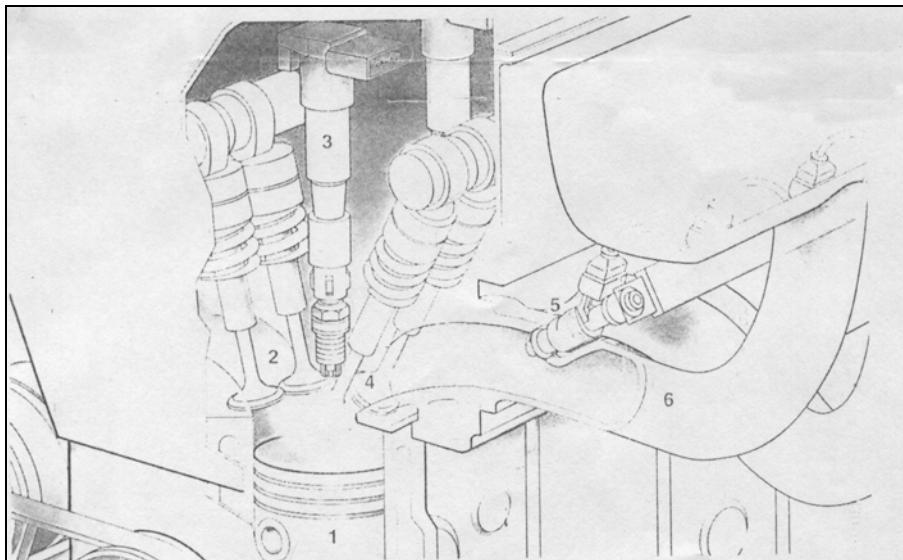


Abb. 11. Detailansicht der Saugrohreinblasung: 1. Kolben, 2. Auslassventil, 3. Kerze, 4. Einlassventil, 5. Einspritzdüse, 6. Saugrohr

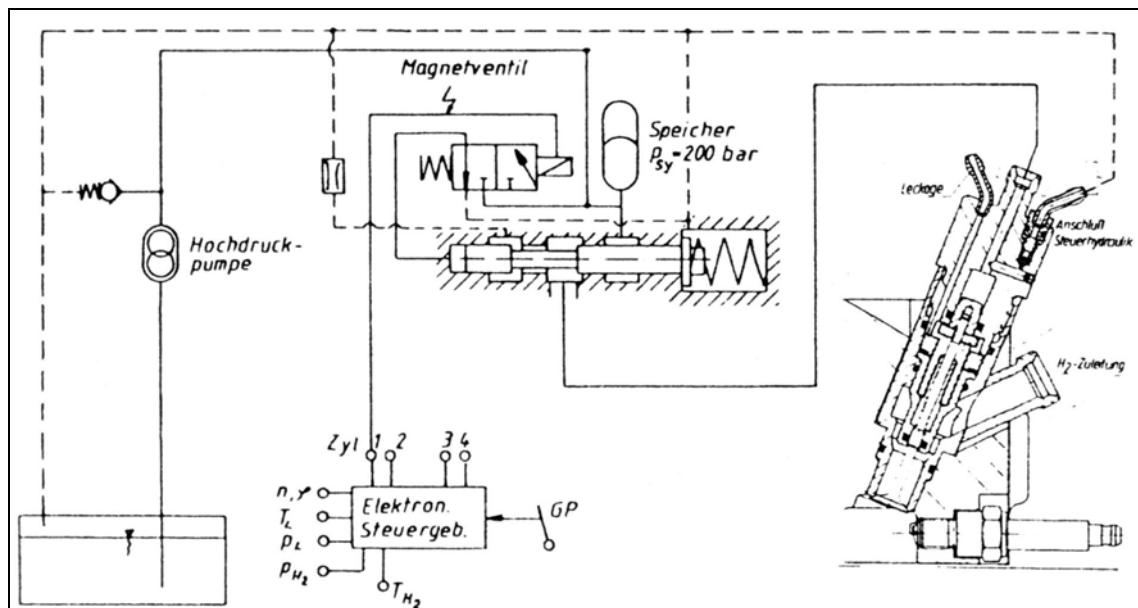


Abb 12. Einzylinderaggregat mit innerer Gemischbildung (Schema)

Bestehende stationäre Gasmotoren für Erdgas können grundsätzlich mit Erdgas-Wasserstoff-Gemischen bis zu einem Wasserstoffanteil von etwa 50 Vol.-% ohne zusätzliche Massnahmen betrieben werden. Bei Betrieb mit reinem Wasserstoff sind Massnahmen in erheblichem Umfang zur Anpassung der Motoren an die Eigenschaften von Wasserstoff durchzuführen [4, 11]. Besonders Zweitaktmotoren, welche wegen ihrer

ventillosen, einfachen Bauweise und der damit verbundenen hohen Lebensdauer und Zuverlässigkeit vorzuziehen wären, können mit reinem Wasserstoff nur bei innerer Gemischbildung, also Direkteinblasung des Wasserstoffs in den Brennraum, betrieben werden. Neben Motoren mit innerer Verbrennung besitzen solche mit äusserer Verbrennung, insbesondere Stirling-Motoren, als Folge ihrer Laufkultur, ihres hohen Wirkungsgrades, kontinuierlicher Verbrennung und grosser Lebensdauer durchaus Anwendungsmöglichkeiten. Die Nachteile des Stirling-Motors, wie relativ niedrige Drehzahlen ( $1500 \text{ min}^{-1}$ ), optimale Leistungsabgabe in einem relativ engen Drehzahlbereich sowie eingeschränkte Regelbarkeit, welche seiner Anwendung als Fahrzeugmotor entgegenstehen, bedeuten im Falle stationärer Anwendung keine Einschränkungen. Allerdings sind für grosse Wartungsintervalle die technischen Probleme der Abdichtung des Arbeitsraums gegenüber Schmieröl zur Vermeidung von Verölung der Regeneratoren noch nicht befriedigend gelöst.

Benzin Motoren (4-Takt Otto-Motoren) lassen sich im Prinzip, auf Wasserstoff als Brennstoff umbauen, indem man den Vergaser durch eine Gasmischzelle für Wasserstoff und Luft ersetzt. Nachteil dieser einfachen Umbaumethode sind mögliche Fehlzündungen, welche das explosive Gemisch im Mischer zur Detonation bringen können. Die bessere, wenn auch etwas aufwendigere Methode ist die Saugrohreinspritzung (äussere Gemischbildung) oder die Direkteinspritzung des Wasserstoffs in den Brennraum (innere Gemischbildung) in die komprimierte Luft kurz bevor die Kerze im Zylinder das Gemisch entzündet. Dabei entsteht das zündfähige Gemisch erst im Moment der Zündung. Der Mehraufwand des Umbaus wird durch die gute Einstellbarkeit des Motors und die sichere und ideale Verbrennung kompensiert.

Die Verbrennungswärme von Wasserstoff ist mit 33.3 kWh/kg verglichen mit Benzin 12.4 kWh/kg fast dreimal so gross. Dies bedeutend, dass der Brennstoffverbrauch des Motors, bezogen auf die Masse, mit Wasserstoff ein Drittel des Verbrauches mit Benzin beträgt.

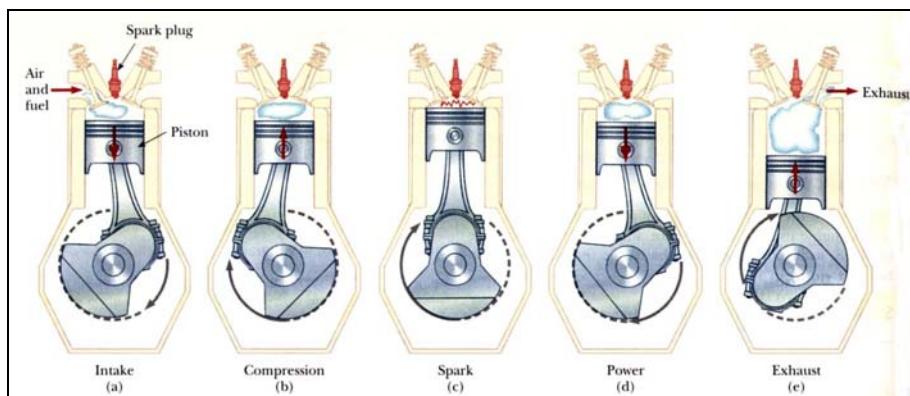


Abb. 13. Die vier Takte des Otto-Motors: a) Ansaugen, b) Kompression, "c) Zündung", d) Arbeitstakt, e) Abgas Ausstoss

Die einwandfreie Funktion der Regelung der Wasserstoff Einspritzung und der Zündung sind essentiell für einen ruhigen und sicheren Betrieb des Motors. Um die Stromversorgung der Regelung sicherzustellen, wird die Lichtmaschine durch einen Alternator ersetzt. Der Benzinverbrauch des Pistenfahrzeugs liegt bei ca. 10 Liter pro Stunde. Dies entspricht 2.7 kg Wasserstoff pro Stunde.

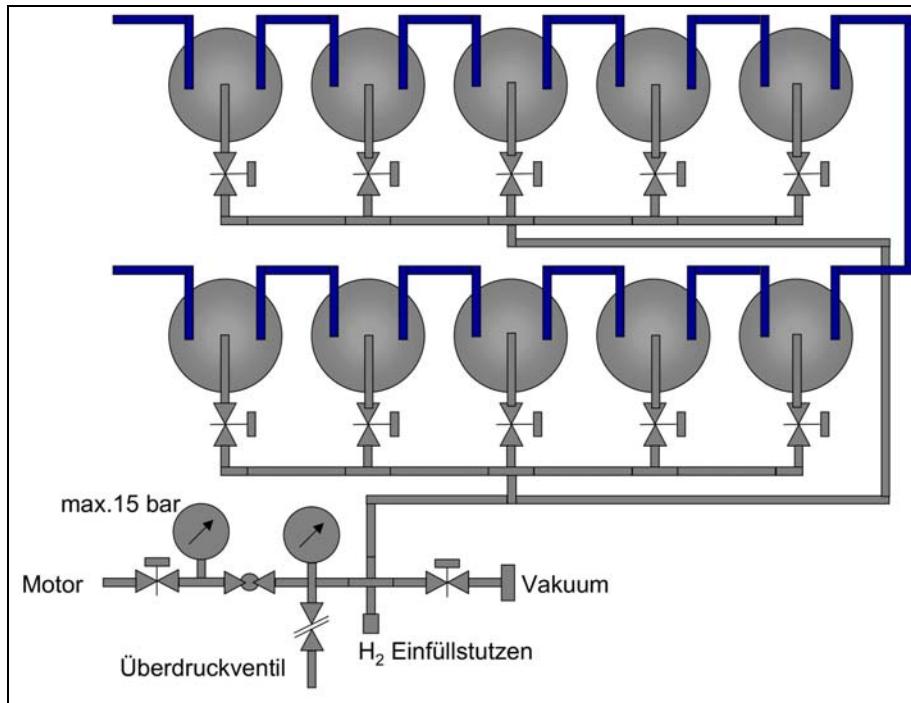


Abb. 14. Verbindung der Druckbehälter.

Die Wasserstoff Sorptionskinetik des Speichers ist durch den Wärmeaustausch limitiert. Die Kapazität des Speichers ist 5.29 kg Wasserstoff ( $59.3 \text{ m}^3$  Wasserstoff bei Normaldruck, 296 l bei 200 bar). Der Energieinhalt des Tanks ist somit: oberer Heizwert = 206 kWh und unterer Heizwert = 176 kWh. Dem Hybridspeicher muss die Wärme  $\Delta Q = T \cdot \Delta S \cdot m(H_2)$  zur Desorption des Wasserstoffs zugeführt werden. Geht man davon aus, dass das Kühlwasser vom Motor mit 60°C in den Speicher eintritt und mit 30°C den Speicher verlässt

Leistung [kW]	Entladezeit [h]	Wärmezufuhr [kW]	Fluss [l/min.]
500	0.35	65.5	31.3
450	0.39	58.9	28.2
400	0.44	52.4	25.1
350	0.50	45.8	21.9
300	0.59	39.3	18.8
250	0.70	32.7	15.7
200	0.88	26.2	12.5
150	1.17	19.6	9.4
100	1.76	13.1	6.3
50	3.52	6.5	3.1
20	8.80	2.6	1.3
10	17.60	1.3	0.6

Tab. 3. Die Leistung ist die thermische Leistung des Motors, basierend auf dem unteren Heizwert. Die Wärmezufuhr entspricht der Entropieänderung bei der Entladetemperatur von 60°C. Der Heisswasserfluss ist gegeben durch die Wärmezufuhr (Wärmekapazität  $4.127 \text{ Ws kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) und der Differenztemperatur von 30°C (60°C Heisswasser, 30°C Auslass). Alle Angaben ohne Berücksichtigung der Aufwärmphase des Speichers.

## 2.4. Demonstration

Am 15. März 2004 wurde das Pistenfahrzeug auf der Kleine Scheidegg anlässlich einer Medienkonferenz demonstriert. Nach der Begrüssung der Teilnehmer wurden die Ziele des Projektes, das Prinzip der Wasserstofftechnologie und die Bedeutung des Projektes für die Region in 5 kurzen Referaten dargestellt.



Abb. 15. Talfahrt des Wasserstoff angetriebenen Pistenfahrzeugs.



Abb. 16. Der Vorstand des Vereins Swiss Alps 3000 vor dem Pistenfahrzeug.

Anschliessend wurde das Wasserstoff angetriebene Pistenfahrzeug auf der Skipiste durch eine kurze (ca. 200 m) lange Fahrt demonstriert und abgestellt um den den Teilnehmern die Besichtigung aus der Nähe zu ermöglichen.

## **2.5. Schlussfolgerungen und Ausblick**

Mit dem vorliegenden Projekt konnte ein Metallhydrid-Speicher gebaut und mit dem Kühlwassersystem eines Verbrennungsmotors beheizt werden. Der Speicher, welcher aus 10 identischen Modulen aufgebaut wurde hat eine Kapazität von 5 kg Wasserstoff. Die Speicherlegierung konnte bei einem Wasserstoff-Druck von 15 bar problemlos aktiviert werden. Im vorliegenden Projekt wurden die 10 Module thermisch in Serie geschaltet um die Module sequentiell zu entladen. Es hat sich gezeigt, dass die Sicherstellung eines genügend grossen Kühlwasserflusses problematisch ist. Zukünftige Speicher sollten deshalb besser thermisch parallel geschaltet werden, was zwar die Vorwärmzeit signifikant erhöht, aber bei erreichen der Arbeitstemperatur den Wärmeaustausch viel besser ist. Der Speicher hat einwandfrei gearbeitet und die Demonstration war erfolgreich. In diesem Sinne wurde das Ziel des Projektes erreicht. Nachteilig ist, dass bisher keinerlei Messungen über den Wärmeaustausch, Leistungsverhalten des Motors usw. gemacht wurden.

## **3. ZUSAMMENARBEIT MIT ANDERN INSTITUTIONEN, INDUSTRIE UND INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEITEN**

### **3.1. HERA (Deutschland)**

HERA hat uns 400 kg Legierung zum Preis von 23.9 €/kg verkauft.

### **3.2. TREIBACHER INDUSTRIE AG (Österreich)**

Ist interessiert am Informationsaustausch bezüglich Speicherbau.

### **3.3. RUAG Landsystems (Thun, Schweiz)**

Bereitschaft für Test des Pistenfahrzeuges auf einem Prüfstand für Raupenfahrzeuge

## **4. TRANSFER VON ERGEBNISSEN IN DIE PRAXIS**

Der Transfer der Ergebnisse fand in Form von zwei kleineren Speichermodulen analoger Bauart, welche für den SAM an der Fachhochschule Biel gebaut wurden, statt. Das Brennstoffzellen Fahrzeug wird mit Strassenzulassung im Verkehr unter realen Bedingungen betrieben werden. In einem weiteren Projekt sollen die Speichermodule auch auf dem Brennstoffzellen Boot der Ecole d'ingenieurs Yverdon getestet werden.

## **5. REFERENZEN**

- [1] Wilhelm Matek, Dieter Muhs, Herbert Wittel and Manfred Becker, "Roloff/Matek Maschinenelemente", Viewegs Fachbücher der Technik (1994), 690 pages, ISBN: 3-528-74028-0
- [2] Adt, R.R. Jr.; Swain, M.R.; Pappas, J.M.: Hydrogen engine performance project. U.S. Dept. of Energy (DOE), Second Annual Rep. Contr. No. EC-77C03-1212 (1980).
- [3] De Boer, P.C.T.; MC. Lean, W.J.; Homann, H.S.: Int. J. Hydrogen Energy 1 (1976) 153.
- [4] Varde, K.S.; Frame, G.A: Int. J. Hydrogen Energy 8 (1983) 549-555.; Leiker, M.: Die Verbrennungskraftmaschine, Bd. 5, Wien: Springer 1953.
- [5] Christoph, K.; Cartellieri, W.; Pfeifer, U.: MTZ 33, Heft 10 (1972) 391.
- [6] Li Jing-ding; Lu Ying-ging; Du Tian-Shen: Adv. in Hydrogen Energy 4, Vol. 4 (1984) 1579-1594.
- [7] Ishigohka, T.: Adv. in Hydrogen Energy 3, Vol. 3, (1982) 1095 -1104.
- [8] Swain, M.R.; Adt, R.; Pappas, J.M.: Hydroge engine performance analysis project. DOE, Contract No. E (04-3)-1212, 2nd Annual Rep. (1980).
- [9] Lynch, F.E.: Adv. in Hydrogen Energy 3, Vol. 3 (1982) 1033-1051.
- [10] Furuhamama, S.; Kobayashi, Y.: Proc. 4th World Hydrogen Energy Conf. Vol. 3, New York: Pergamon Press 1982, pp. 1009-1020.
- [11] Peschka, W. Flüssiger Wasserstoff als Energieträger. Wien, New York: Springer 1984.
- [12] Peschka, W. Int. J. Hydrogen Energy 9 (1984) 515-524.

## **6. PUBLIKATIONSLISTE**

Wissenschaftliche Publikationen wurden bisher keine verfasst. Das Demonstrationsprojekt wurde auf der Internetseite <http://www.swissalps3000.ch> dokumentiert und veröffentlicht. Zudem wurde in der Presse und Fernsehen durch Dritte intensiv über das Projekt berichtet.

Fribourg, 15. 4. 2004



Andreas Züttel

## 7. ANHANG

### 7.1. Spezifikation der Legierung durch den Hersteller HERA (GfE)



GfE Metalle und  
Materialien GmbH



Höfener Strasse 45  
D-90431 Nürnberg



Telefon 0911 93 15-92  
Telefax 0911 93 15-429

Q 25.30.3



GfE Metalle und Materialien GmbH Postfach 2746 D-90012 Nürnberg

HERA  
Höfener Str. 45  
90431 Nürnberg

LieferscheinNr.: 0202/L00010652  
Kunden-Nr. : 1230843  
Lieferanten-Nr.:  
Bearbeiter : Fr. Schinkel  
Telefon : +49 911/9315 435  
Telefax : +49 911/93151435

Telefax: 0911 9315 702

Datum: 25.09.03

#### ABNAHMEPRÜFZEUGNIS EN 10 204-3.1.B

Ihre Bestellung GE0058/03 vom 2.09.2003  
Frau Müller

Die folgenden Analysenergebnisse stammen aus Proben,  
die der Lieferung entnommen wurden.

Pos.	Bezeichnung	Liefermenge			
<b>Ihre Bestellung : GE0058/03</b>					
Unser Auftrag : 00009028					
0010		400.000 kg			
Artikelnr.: 2004733					
Wasserstoffspeicher-Legierung Hydralloy C5					
Lot Nummer: 34502					
Zusammensetzung:					
Ti	28.00 %	Mn	50.75 %	Fe	2.99 %
Al	0.23 %	N	0.07 %	Zr	3.04 %
V	14.05 %	Si	0.08 %	O	0.10 %
KDI-Messung Desorption :					
Kapazität	1.84 wt%				
Druck	9.30 bar				
Absorption:					
Kapazität:	1.88 wt%				
Druck:	14.10 bar				
Korngrösse:	0 - 10 mm	100.0 %			

L00010652

Seite 1+

Geschäftsführer:  
Dr. T. Jobsky

USt-IdNr.: DE 811 930 665  
Nürnberg, HRB 13685

contact@gfe-online.de  
www.gfe-online.de

St.-Nr. 241115/50529

1407EA01.119

**PCI measurement (absorption)**  
initial file: 1407\_A01.119

version: 15.4.94

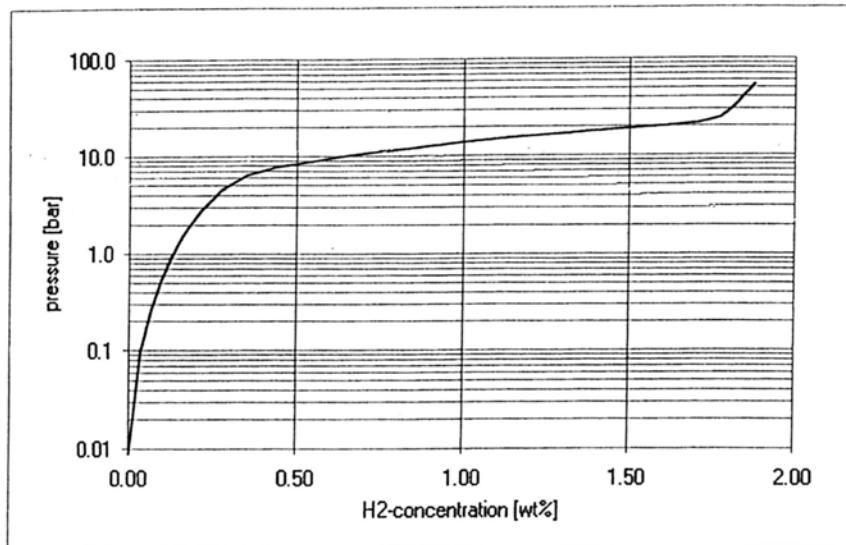


evaluation date: 15.7.03  
consec. PCI-no.: 119  
measurement-no.: 1  
sample name: Hydralloy C5 Endleg,  
sample code: Ch. Nr. 25280

measurement  
from: 14.07. 19:40  
to: 00:16  
parameter set: Recipe 1  
monitor-status: End of Measurement

sample weight: 25.50 g density: 6.40 g/cm<sup>3</sup>  
volume cold: 0.042 l autoclave-vol.: 0.016 l volume hot: 0.012 l  
absorption vol.: 0.039 l  
HT-discharge: sum HT-pressure:

measurement-temp.: 45.8 °C



maximum capacity: 1.88 Gew%      half-capacity-pressure: 14.10 bar

reversible capacity: 1.88 Gew%      slope factor: 0.8

page 1

1507ED01.120

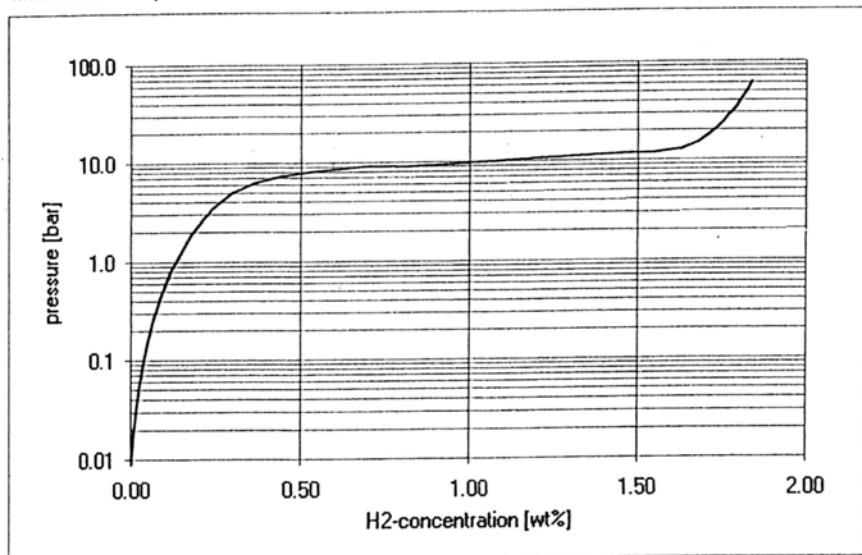
PCI measurement (desorption)  
initial-file: 1507\_D01.120

version: 15.4.94



evaluation date: 15.7.03 measurement  
consec. PCI-no.: 120 from: 15.07. 00:20  
measurement-no.: 1 to: 05:11  
sample name: Hydralloy C5 Endleg, parameter set: Recipe 1  
sample code: Ch. Nr. 25280 monitor-status: End of Measurement  
  
sample weight: 25.50 g density: 6.40 g/cm<sup>3</sup>  
volume cold: 0.073 l autoclave-vol.: 0.016 l volume hot: 0.012 l  
volume vac.: 0.323 l leak-index: 0.002 bar  
HT-discharge: sum HT-pressure:

measurement-temp.: 45.2 °C



maximum capacity: 1.84 wt%

half-capacity-pressure: 9.30 bar

reversible capacity: 1.84 wt%

slope factor: 0.9

page 1

## 2. Technische Zeichnung des Tankmoduls

