

**Linde Kupplung und Betankungssystem**  
**Leistung und Meßergebnisse**

## 1 Linde Kupplung:

Bei diesem zweiflutigem Kryokupplungssystem (Bild 1) sind die Prozessleitungen parallel- und im Bereich der Kupplung koaxial zueinander angeordnet. Das ganze System ist komplett hoch vakuum super isoliert. Die Verbindung für den tiefkalten Wasserstoff zwischen Tankstelle und Fahrzeug wird mittels Kugelhähnen geschaltet, welche per Zahnradantrieb geöffnet und geschlossen werden.

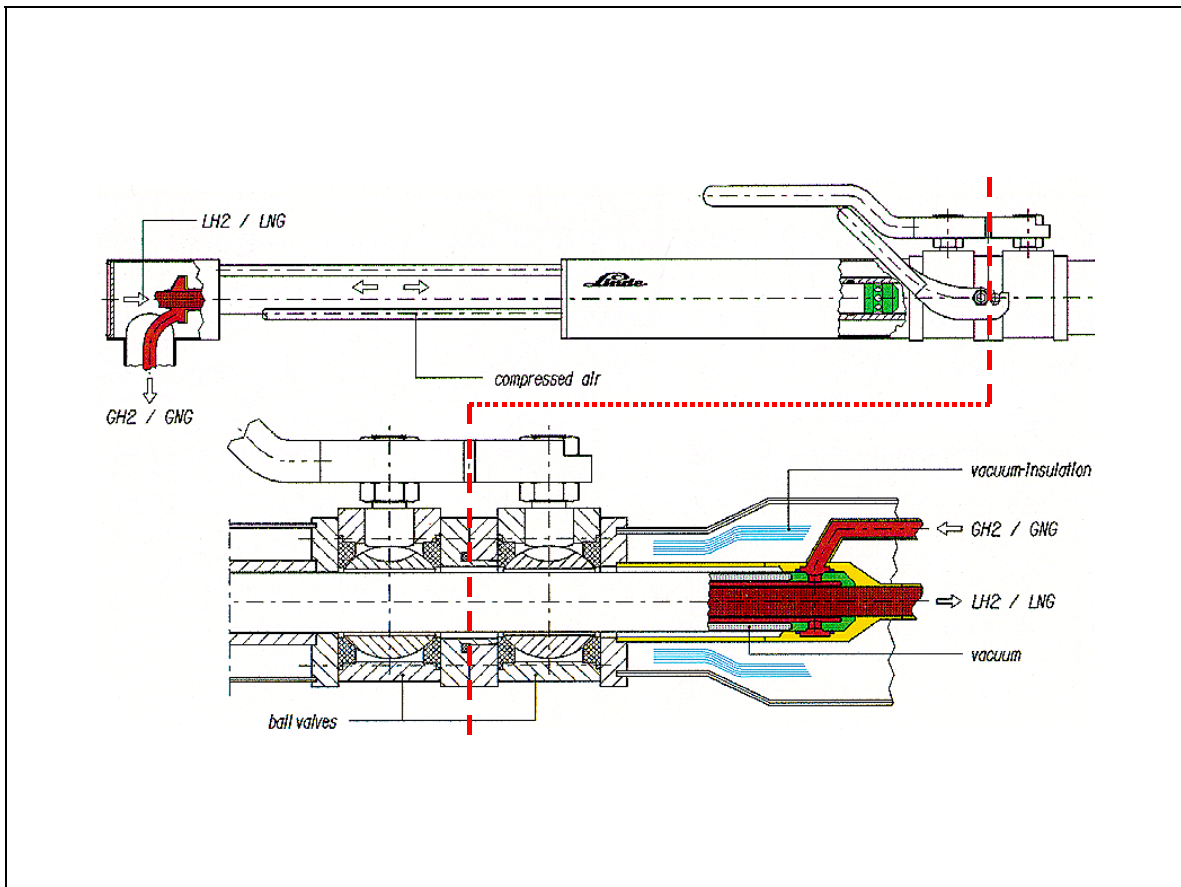


Bild 1: LH2- Kupplung Prinzip, beide Kugelhähne geöffnet



*Bild 2: Erste Generation LH2- Kupplung 1994*

Das Betankungskonzept mit der zweiflutigen kaltziehbaren Linde LH2 –Kupplung wurde bereits 1995 im Rahmen des Solar – Wasserstoff Bayern Projekts in Neunburg vorm Wald (SWB) detailliert geprüft. Das Attribut „kaltziehbar“ wird für diese Art von Kupplung verwendet, weil mit ihr sichere An- und Abkupplungsvorgänge möglich sind, während auf beide Seiten der Kupplung (Tankstelle und Fahrzeug) LH2 ansteht.

Die erste Generation der Kupplung ist in Bild 2 zu sehen.

Die aus den Erkenntnissen konstruierte zweite Generation (Bild 3) hat im Betrieb an ca. 15 nicht öffentlichen Tankstellen weltweit und mit der ersten öffentlichen LH2 - Tankstelle am Flughafen München in mehr als 4000 Betankungsvorgängen seine Alltagstauglichkeit bewiesen. Am Flughafen München wird eine Kupplung der zweiten Generation automatisch bewegt von einem Roboter.

Die Betankungseigenschaften der beiden Generationen sind identisch. Der Unterschied basiert auf einer verbesserten Handhabung und geringere Abmessungen der zweiten Generation.

Außer vor und nach Montagearbeiten sind bei Betankungen mit dem Linde-LH2-Kupplungssystem nach wie vor keinerlei Evakuier- oder Inertisierungsarbeiten erforderlich. Der Helium bedarf der Tankstelle ist im Normalbetrieb gleich null.



*Bild 3: Zweite Generation LH2- Kupplung 1999*

## 2 Flüssig Wasserstoff Betankung

Die Hauptziele einer Betankung liegen in einer kurzen Betankungszeit, guten Bedienbarkeit der Kupplung, geringen Umfüllverlusten und einer anschließenden schnellen Verfügbarkeit des Systems für eine Nachfolgebetankung.

- Kurze Betankungszeit
- Gute Bedienbarkeit der Kupplung
- Keine oder nur geringe Wasserstoff Verluste
- Schnelle Verfügbarkeit für nächste Betankung

Um kurze Betankungszeiten, ohne Wasserstoffverluste zu erreichen, ist eine unterkühlte Flüssigkeit notwendig.

Unterkühlt heißt es wenn die Temperatur des flüssigen Wasserstoffes unterhalb seiner Siedetemperatur liegt.

Eine Unterkühlung kann jedoch nur dann Nutzen bringen, und effektiv sein, bei geringen Druckverlusten in den Prozessleitungen und einer sehr guten thermischen Isolation der Flüssigwasserstoff führenden Leitungen.

Außerdem ist eine Befüllung im Tank durch Einkondensieren des Gaspolsters für eine weitgehend rückgasfreie Betankung unabdingbar.

## 2.1 Messungen im Rahmen des Solarwasserstoff Bayern Projekt

Im Rahmen des Solarwasserstoff Bayern (SWB) Projekts in Neunburg vorm Wald wurde eine Vielzahl von Betankungsmessungen durchgeführt.

Wie sich aus den Versuchen in Neunburg vorm Wald herausstellte, ist eine rückgasfreie und damit verlustfreie Betankung nur dann möglich, wenn das ganze Betankungssystem sich in bereits vorgekühltem Zustand von  $< 50\text{ K}$  befindet. Letzteres ist eine Situation die an realen Tankstellen auch zukünftig nicht haltbar ist, ohne Zusatzkühlung oder Vorkühlung. Serienbetankungen (Kapitel 2.2.) an der öffentlichen LH2- Tankstelle am Flughafen München haben dies bestätigt.

Zusätzlich muß die im Fahrzeug befindliche Leitung, welche bei einem zu betankenden Fahrzeug immer Umgebungstemperatur hat, eine möglichst geringe Masse besitzen und möglichst kurz sein um das Verdampfen von Flüssigwasserstoff durch Abkühlverluste der Leitungen gering zu halten.

Folgendes Beispiel (Bild 4 und 5) zeigt den Betankungsverlauf einer solchen Betankung, bei der alle Voraussetzungen wie oben Beschrieben gegeben waren.

- Betankungssystem (inklusive Fahrzeugtank) vorgekühlt ( $< 50\text{ K}$ )
- Sehr kurze und somit auch leichte Fahrzeugseitige Befüllleitung (ca. 20 cm)
- Unterkühlter Flüssigwasserstoff für Betankung
- Vor Betankung leerer, oder nahezu leerer Fahrzeugtank ( $< 10\%$  des Tankvolumen)



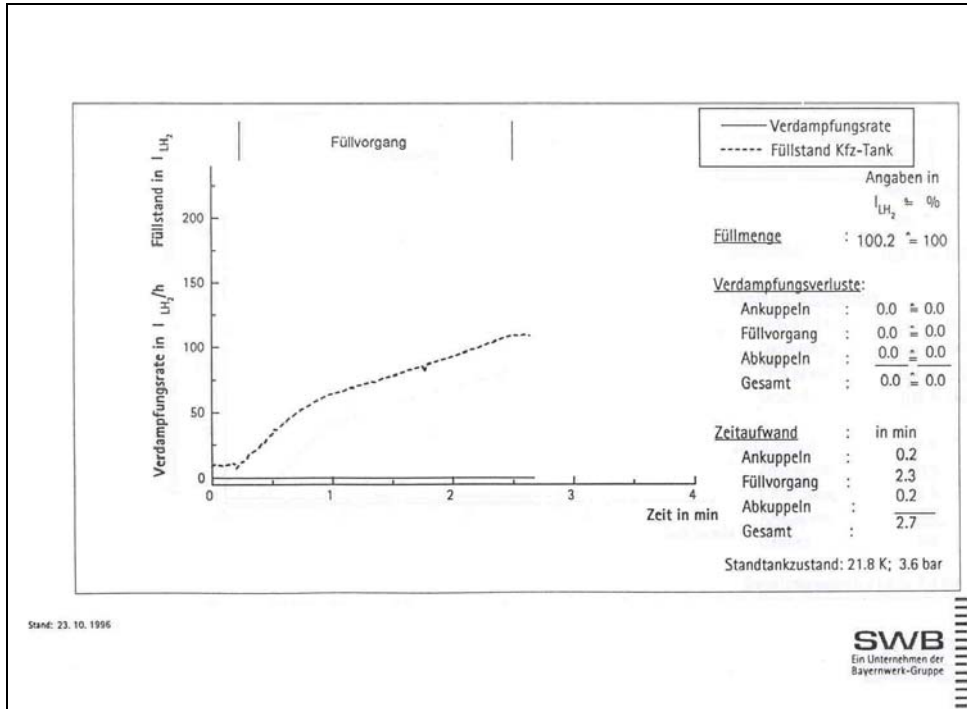


Bild 4: Verlustfreie LH2- Betankung in Neunburg vorm Wald

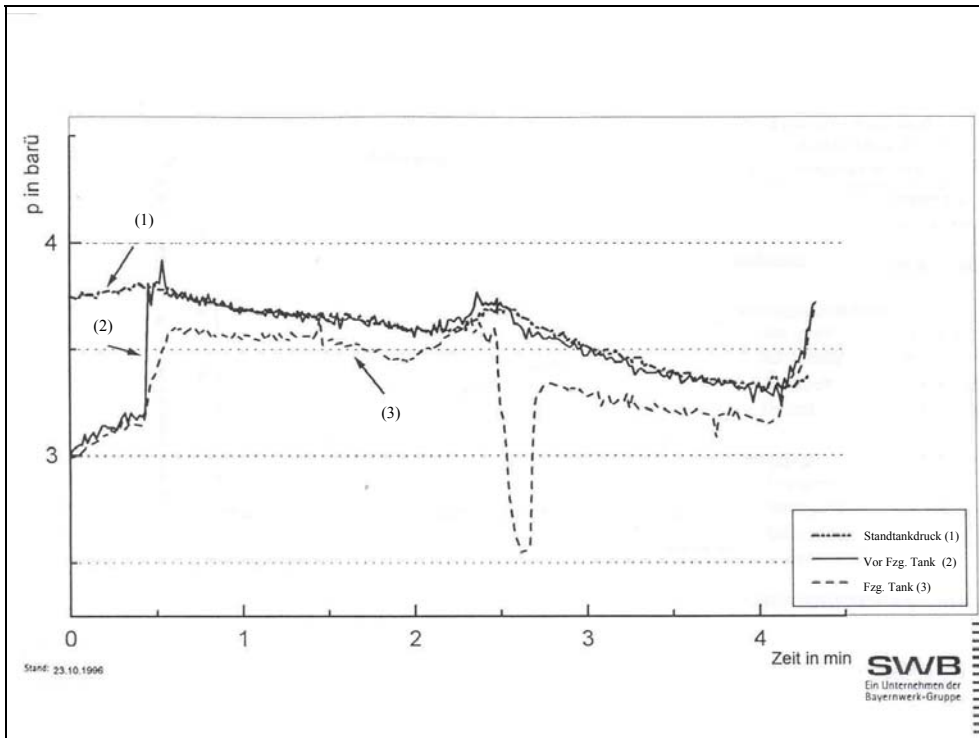


Bild 5: Verlustfreie LH2- Betankung in Neunburg vorm Wald



## Linde LH2-Kupplung

Der Standtank (ca. 3000 l) wurde bei den beschriebenen Versuchen auf ca. 21.8 K und ca. 3.6 bar (Druckpolsterverfahren) konditioniert.

Der vom Standtank zugeführte unterkühlte LH2 wird im Gasraum des Fahrzeugtanks verrieselt. Ein Teil des im Fahrzeugtank vorhandenen Gaspolsters kondensiert an der Oberfläche der durch den Gasraum fliegenden LH2- Tropfen aus, wenn diese kälter als das Gas sind. Durch den daran gekoppelten Druckabbau bleibt zwischen Stand-, und Fahrzeugtank ein für den LH2-Förderprozess ausreichendes Druckgefälle vorhanden. Die verlustfreie Betankung wird ermöglicht.

Die Ergebnisse zeigen, das bei dieser optimierten Betankung mit dem Linde System eine durchschnittliche Durchflußrate von 100,2 Litern in 2.3 Minuten erreicht wurde bei einem Gesamtdruckverlust des Füllsystems von weniger als 300 mbar.

Damit beträgt die durchschnittlich erreichte Füllrate 2600 Liter/ Stunde, Die max. Füllrate beträgt wesentlich mehr (ca. 6000 Liter / Stunde).

Aufgrund dieser sehr positiven Ergebnisse, welche für PKW Tanks von 100 Litern eine ausreichend kurze Betankungszeit von 2-3 Minuten erlauben, ist diese Förderrate minimal als wünschenswert für eine komfortable Betankung zu erachten.

Die Versuche zeigen allerdings auch, daß die optimale Betankung nur bei Übereinstimmung vieler technischer Voraussetzungen möglich ist, welche sich bei der dortigen Versuchsanlage nur bei exakter Abstimmung ermöglichen ließen.

Selbst bei diesen Versuchen mußte, bei einigen Betankungsvorgängen ein Entspannungsvorgang des Tanks vorgenommen werden, wenn trotz aller intensiven Voreinstellungen keine optimale Befüllung zu Stande kam. In Bild 6 ist zu erkennen, wie der bereits zu Stillstand gekommene Füllvorgang durch Entspannung wieder in Gang gesetzt wird. Es wurde bei dieser Betankung einflutig befüllt (Rückgasleitung zu) mit der zweiflutigen Kupplung.



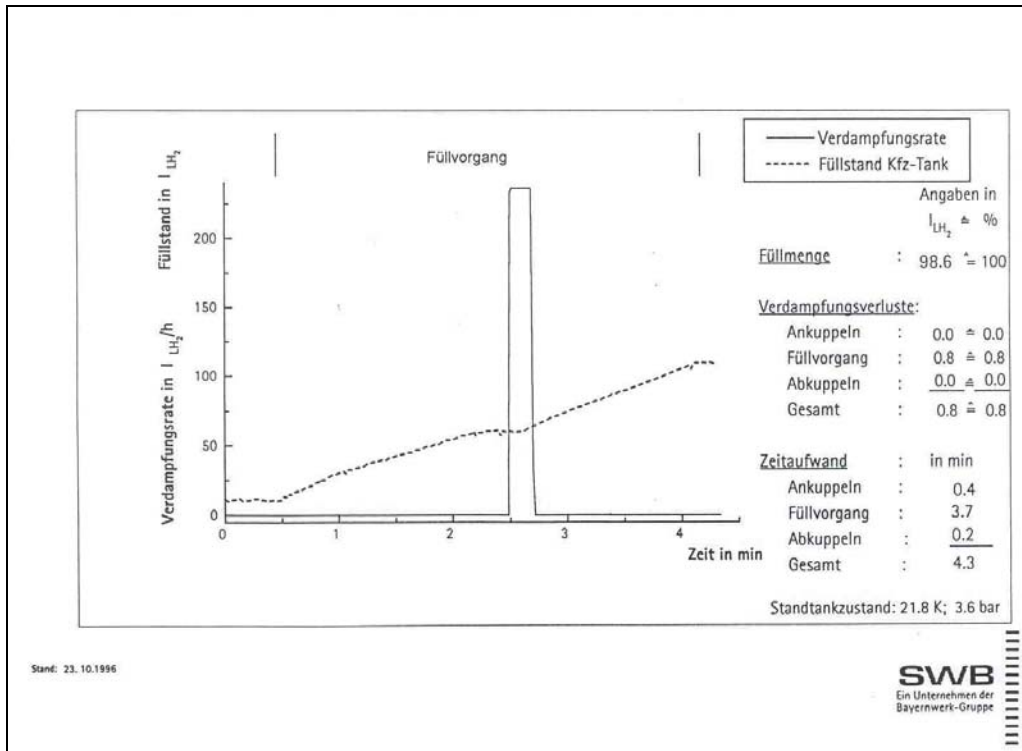


Bild 6: LH2- Betankung in Neunburg vorm Wald mit Entspannung

Eine zweiflutige Konstruktion erlaubt wie aus dem Bild hervor geht, trotz Entspannung geringe Verluste an Zeit und Wasserstoff. Es geht keine Flüssigkeit verloren. Die Förderung kam kurz zum Stillstand, da während dieses Tests keine zeitgleiche Entspannung erlaubt war.

In der Praxis lassen sich diese optimalen Verhältnisse kaum erreichen, da zum Beispiel:

- bei der Betankung kein unterkühlter Wasserstoff zur Verfügung steht;
- die Leitungen zum Beispiel bei einer öffentlichen Tankstelle aufgrund der baulichen Anforderungen wesentlich länger sind;
- der Betankungszyklus (Wartezeit auf ein Folgefahrzeug) zu lang ist, daß eine Anwärmung der Fülleitung erfolgt;
- die Verlegung der Fülleitung im Fahrzeug (zum Beispiel Bus mit Tank auf dem Dach) wesentlich länger ist als bei der Versuchsanordnung.



## Linde LH2-Kupplung

Dieses führt bei einflutiger Befüllung zu einem erheblichen Druckanstieg im Fahrzeugtank, da die verdampfte Flüssigkeit aus der Fülleitung der Tankstellenseite und der Fahrzeugseite in den Gasraum des Tanks gepreßt wird. Es erfolgt ein Druckausgleich und die Betankung kommt zum Stillstand.

Bei einflutiger Befüllung muß der Tank über die einflutige Fülleitung entlastet werden und anschließend ein weiterer Füllvorgang mit Flüssigkeit gestartet werden.

Die Füllflüssigkeit trifft beim nächsten Zyklus auf eine durch das Rückgas angewärmte Leitung, und muß diese erneut kühlen.

Restliche sich in der Fülleitung befindliche Flüssigkeit muß beim Entspannungszyklus mit entspannt werden und geht für die Befüllung verloren.

Je nach Vorkonditionierung und Zustand des Befüllsystems sind mehrere Füllzyklen erforderlich, welche die Befüllzeit verlängern und die Rückgasmenge erhöhen.

Bei der zweiflutigen Befüllung wird die Flüssigkeit in einem Füllzyklus in den Tank gedrückt. Bei nicht optimaler Konditionierung des Gesamtsystems kann, während die Befüllung weiter in Betrieb ist, parallel Gas zur Tankstelle zurückgeführt werden. Der Füllvorgang muß nicht zyklusartig unterbrochen werden, in den Leitungen befindlicher flüssiger Wasserstoff wird nicht zur Tankstelle zurückgefördert. Dieses ist besonders vorteilhaft, wenn die Fülleitungen wie zum Beispiel bei einer öffentlichen Tankstelle größere Längen erreichen.

Wichtige Parameter für effiziente Betankungsvorgänge:

- Grad der Unterkühlung des Eingangs-Wasserstoff
- Länge und Masse der Tankstellenseitigen (Zuführ) Leitungen
- Häufigkeit der Betankungen
- Länge und Masse der Fahrzeugseitigen Befüllleitung

## 2.2 Messungen im Rahmen des ARGEMUC Projekt

Im Rahmen des ARGEMUC Projektes am Flughafen München wurden ebenfalls eine Vielzahl von Messungen durchgeführt. Es ist die weltweit erste öffentliche Tankstelle für flüssigen Wasserstoff.

Auch bei diesen Versuchen wurde der Fahrzeugtank ohne Pumpe mittels Druckausgleich befüllt. Der „Tank“ aus dem befüllt wurde ist ein Zwischenbehälter (Volumen ca. 800 l). Man hat sich für einen Zwischenbehälter entschieden um die nach jeder Speichertank-Entspannung anfallenden Verluste möglichst gering zu halten.

Die für die Bewertung der Meßergebnisse wichtigsten Unterschiede zur dem SWB „Meßaufbau“ sind:

- Zwischenbehälter für Druckaufbau;
- Längere Leitungen (ca. 19 m);
- Roboterbetankung (An-, und Abdockzeiten).

Messungen an der LH2-Tankstelle am Flughafen München haben gezeigt, dass eine rückgasfreie Betankung und der dazu erforderliche Einkondensationseffekt erst nach bis zu drei nacheinander folgenden Betankungen (Serienbetankungen) erstmals zum tragen kommen. Die Begründung für letzteres liegt in der besonderen Länge der Zuführleitungen bei einer öffentlichen Tankstelle wie diese.

Bild 7 zeigt das Verhalten des Befüllsystems und den prinzipiellen Verlauf einer Befüllung bei einer solchen Serienbetankung.

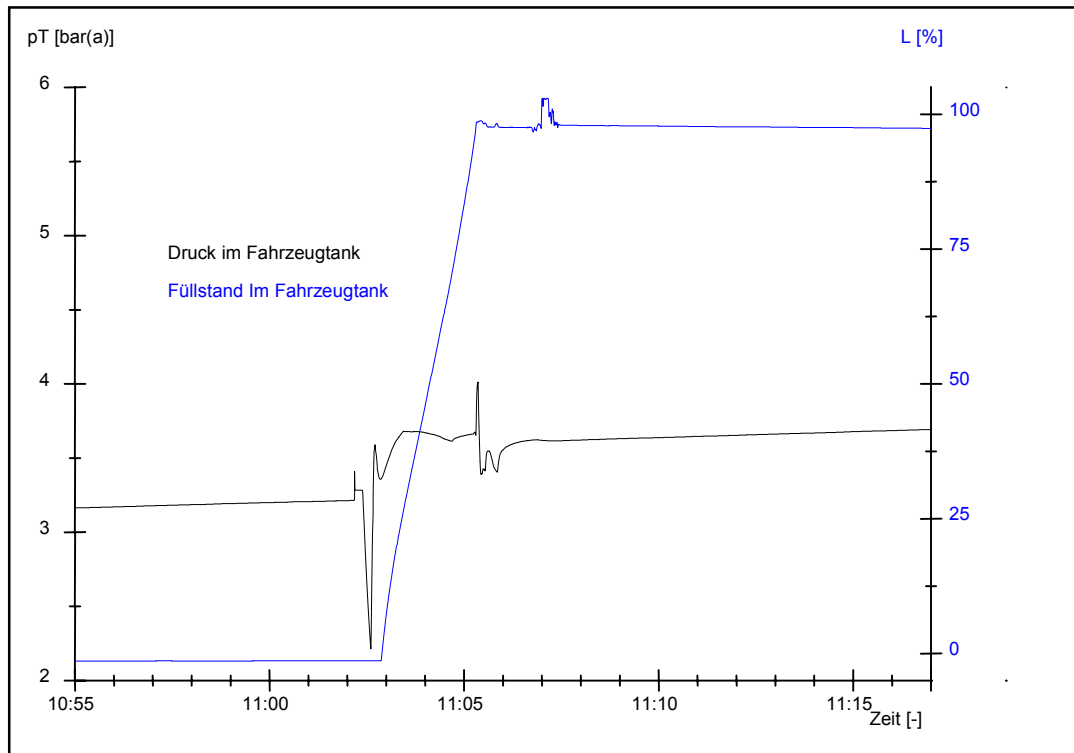


Bild 7: Betankung 3 / 3.Fahrzeug

Die Befüllung erfolgte am Flughafen München ebenfalls wie bei den ersten SWB Testbetankungen mit unterkühltem Wasserstoff, der durch Aufdrücken des bei niedriger Temperatur in einem vakuumisolierten Behälter gespeicherten flüssigen Wasserstoffs.

Aus diesem Behälter sind je nach Befüllmenge bis zu 6 unterkühlte Betankungsvorgänge möglich. Anschließend wird der Zwischenbehälter entspannt und von dem Speicherbehälter wieder mit tiefkalter Flüssigkeit gefüllt.

Das bei der Entspannung entstehende Gas wird rückkomprimiert und weiter verwendet. Der in der Befüllleitung installierte Durchflußmesser zeigt das auch bei einer relativ ungünstigen Konfiguration (lange Leitungen) Durchflußmengen von 3000 Liter / Stunde erreicht werden. Der Druckverlust im System beträgt dabei ca. 400 mbar, bedingt durch die längeren Rohrleitungen.



## Linde LH2-Kupplung

Durch das patentierte Linde Befüllsystem konnte ohne Pause ein Fahrzeug nach dem anderen befüllt werden. Die im Zyklus erkennbaren Stoppzeiten zwischen den Befüllungen von wenigen Minuten sind durch die Abdock und Andockzeiten des Roboters bedingt und sind nicht durch die Kupplung hervorgerufen.

### 2.3 Unterkühlt Befüllen mittels einer Transferpumpe

Um für zukünftige Tankstellen Entspannungs „Verluste“ zu vermeiden und den flüssigen Wasserstoff kontinuierlich zur Verfügung zu stellen wurde inzwischen von Linde eine Flüssigwasserstoff Transferpumpe entwickelt. Diese kann unterkühlten Wasserstoff kontinuierlich zur Verfügung stellen.

Die Pumpe ist innerhalb eines LH2-Behälters (etwa 100 l) angeordnet und erhöht den Druck an der Pumpenausgangsseite. Der Wärmeintrag wird durch eine spezielle Konstruktion minimiert. Die Flüssigkeit an der Ausgangsseite der Pumpe ist immer unterkühlt.

Vorteile der LH2-Pumpe sind:

- Durch den niedrigen Druck des Speicherbehälters steht sehr „kalte“ (21.7 K) Flüssigkeit zur Verfügung.
- Mit der LH2-Pumpe wird der flüssige Wasserstoff, ohne zusätzliche Anwärmung durch bisher benötigte Konditioniermaßnahmen, auf einen höheren Druck gebracht als er im Fahrzeugtank vorhanden ist. Das heißt die Befüllung erfolgt mit unterkühlter Flüssigkeit.
- Es herrschen einphasige Strömungsverhältnisse in den Zuführleitungen, Strömungsverluste werden reduziert, die Betankungszeit wird verkürzt.
- Es erfolgt ein Einkondensationseffekt des Gaspolsters im Fahrzeugtank, welches zu minimalem Rückgas während der Betankung führt, dadurch erfolgt eine Beschleunigung der Betankung.
- Eine Betankung ist jederzeit und in jeder beliebigen Zeitfolge, ohne komplizierte Konditioniermaßnahmen möglich.
- Die Anzahl der nach einander durchzuführenden Betankungen ist nur begrenzt durch die Größe des Hauptspeichers.
- Regelbare Durchflußrate



### 3 Fazit

Eine zweiflutige Kupplung erlaubt effiziente (verlustfreie) schnelle Betankungen ohne Zeitverlust durch Entspannungsvorgänge. Die zweiflutige Betankung erlaubt eine Befüllung während gleichzeitiger Gasrücknahme.

Effiziente Betankungsvorgänge unter nicht konditionierten (realen) Bedingungen erfordern eine zweiflutige Befüllung.

Reale Bedingungen die generell einen negativen Einfluß auf einer verlustfreien Betankung haben (Wenn einer der nachfolgenden Umstände auftreten muß der Tank mit großer Wahrscheinlichkeit entspannt werden):

- LH2- Zuführleitung des Fahrzeugs ist warm (Umgebungstemperatur). Die Zuführleitung innerhalb des Fahrzeugs ist immer warm, und wird während der Befüllung vom flüssigen Wasserstoff abgekühlt. Druckanstieg im Fahrzeugtank durch vorherige Anwärmung des eintretenden Wasserstoffs tritt verstärkt auf bei Fahrzeugen mit langen LH2-Befüllleitungen (>800mm). Ohne Druckausgleich (Gasrücknahme) kommt die Betankung zum Erliegen.
- LH2- Zuführleitung der Tankstelle ist warm (etwa >50 K). Auch bei Serienbetankungen, (ein Fahrzeug nach dem anderen), werden die Leitungen zwischen den Betankungsvorgängen warm. Druckanstieg im Fahrzeugtank durch vorherige Anwärmung des eintretenden Wasserstoffs tritt verstärkt auf bei Tankstellen mit langen LH2-Zuführleitungen. Ohne Druckausgleich (Gasrücknahme) kommt die Betankung zum Erliegen.
- Fahrzeugtank ist warm (Umgebungstemperatur). Druckanstieg im Fahrzeugtank durch sofortige Anwärmung und Verdampfung des eintretenden Wasserstoffs. Ohne Druckausgleich (Gasrücknahme) kommt die Betankung zum Erliegen.



## Linde LH2-Kupplung

- Relativ voller Fahrzeugtank (Füllmenge etwa 70% oder mehr). Das Gaspolster wird nicht genügend einkondensiert (siehe auch Betankungskurven Zum Beispiel Bild 4). Der hohe Flüssigkeitspegel erlaubt keinen ausreichenden Wärmeaustausch zwischen LH2-Tropfen und Gaspolster. Bei einflutiger Betankung reicht das Volumen des Gasraums nicht aus um das vor der Flüssigkeit hinausgeschobene Gas zu beherbergen.

Gegenüber Betankungen mit einflutigen Konzepten gehen bei zweiflutigen Betankungskonzepten weniger Zeit und Wasserstoff verloren.

Bei zweiflutigen Konzepten kann falls notwendig während der Betankung entspannt werden.

Bei einer einflutigen Befüllung muß der Betankungsvorgang unterbrochen werden zum Entspannen des Fahrzeugtanks. LH2 muß durch die Zuführleitung zurück geschickt werden zum entspannen, und geht verloren. Der Entspannungs Vorgang muß möglicherweise mehrmals wiederholt werden, bis die Befüllung wieder startet.