 © K.L.S. Publishing, all rights reserved

Fliegen mit Wasserstoff

eine Bestandsaufnahme

Das Thema Klimawandel und CO_2-Ausstoß ist allgegenwärtig. Zwar hat es sich nach dem Vorstoß von Bundesverkehrsminister Tiefensee („mit Vollgas in die Klimakatastrophe“) und den folgenden üblichen Hyperventilationsübungen von Presse und Medien wieder etwas beruhigt, aber das Thema hat sich nun als Dauerbrenner etabliert. Die Schuldigen waren bekanntlich schnell gefunden: der autofahrende Bürger und der Luftverkehr. Einigen Journalisten aus Presse, Funk und Fernsehen kann man sicher bereits eine pawlowsche Konditionierung nachsagen. Kaum kommt im Zusammenhang eines Themas auch die Luftfahrt zur Sprache, kommen mit ihm die alten, meist ganz oder teilfalschen Behauptungen von genereller Steuerbefreiung und Subventionierung des Luftverkehrs usw.. Kaum jemand in der Medienlandschaft macht sich die Mühe einer differenzierten Darstellung und das gilt übrigens auch für das Thema CO_2-Ausstoß als dem Alleinverantwortlichen für den Klimawandel. Unser Umwelt-Gabriel hat im Fernsehinterview wenigstens die richtigen Zahlen im Kopf und gibt zu, dass der Luftverkehr mit nur 3-4 % zum Gesamtausstoß beiträgt. Auch das Projekt Cryoplane und der aktuelle Status dazu ist ihm bekannt. Immerhin.

Ein paar Tatsachen: Hauptverursacher beim CO_2-Ausstoß sind mit 43,5 % die

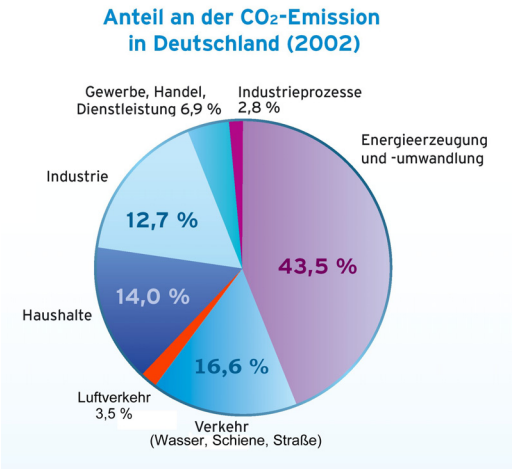


Abbildung 1: CO_2-Ausstoß nach Verursachern (Quellen: BMU, VCD)

Energiewirtschaft, mit 22,4 % Industrie inklusive Handel und Gewerbe usw. und erst an dritter Stelle mit insgesamt 20,1 % rangiert der Verkehr wobei 16,6 % auf jenen auf Straße, Schiene und Wasser entfällt und nur etwa 3,5 % auf den Luftverkehr. Die restlichen 14 % steuern die Haushalte bei.

In den jeweiligen Fernsehbeiträgen kommen stets gebetsmühlenartig die alten Archivbilder zum Einsatz, die etwa ein vierstrahliges Verkehrsflugzeug mit seinen Kondensstreifen als vermeintliche „Dreckschleuder“ zeigt. Vielleicht sollte man gewisse Presse-Mitarbeiter einmal darüber aufklären, dass ein Kondensstreifen (wie der Name schon nahe legt) aus kondensiertem Wasser besteht.

Wir wollen und können es gar nicht wegdiskutieren, Flugzeuge nutzen Kolbentriebwerke oder Gasturbinen und in diesen finden wie in den Fahrzeugen am Boden auch Verbrennungsprozesse statt und eines der Nebenprodukte ist der Ausstoß von CO_2, jedenfalls dann, wenn man Kohlenwasserstoffe verbrennt. Allerdings ist der Luftverkehr schon seit einiger Zeit

 © K.L.S. Publishing, all rights reserved

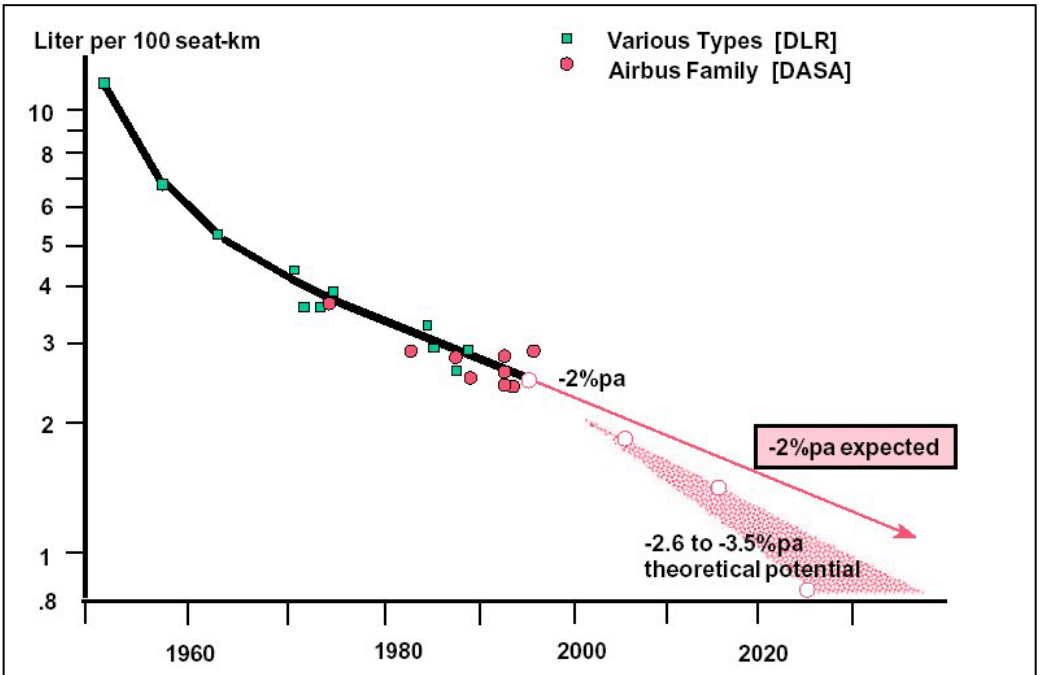


Abbildung 2: Treibstoffverbrauch pro 100 km und Passagier (Quelle: Airbus)

beim 3-Liter-pro-100-Kilometer und Passagier angekommen (siehe Abb. 2) im Unterschied zum Personenautoverkehr, wo man sich eher von einem solchen Wert weiter wegbewegt. Die Flugzeughersteller sind sich einig, dass man den Verbrauch in den nächsten Jahren nur um maximal 2 % p.a. wird senken können, und damit wird bei einem angenommenen Passagierwachstum größer als 2 % p.a. der CO_2-Ausstoß weiter ansteigen. Die Einführung einer CO_2-Steuer – das gilt für Flug- und Autoverkehr gleichermaßen – würde an dieser Tatsache wenig ändern, außer zusätzlichen Steuereinnahmen für den Fiskus. Falls man die Steuereinnahmen dann ausschließlich für den sowieso irgendwann fälligen Umstieg auf Wasserstoffwirtschaft einsetzen würde, wäre dies vielleicht noch vertretbar, ansonsten wäre es eine weitere Steuer aus der scheinbar unendlichen Abgaben- und Umverteilungskiste.

Damit kommen wir zum eigentlichen Thema des Beitrages, dem sauberen Fliegen mit Wasserstoff. Denn nur mit dem technologischen Wechsel auf eine Wasserstoffenergiewirtschaft kann man nach Meinung des Autors die in Kyoto gesetzten Ziele überhaupt erreichen. Dass man hierbei nicht mit einem leeren Blatt Papier anfangen muss, ist allgemein bekannt. Im Folgenden ein kurzer Abriss der Geschichte wasserstoffgetriebener Flugzeugtechnik.

Historie

Dass Wasserstoff in gasförmiger Form im Neunzehnten Jahrhundert als Auftriebsgas für Ballons und später im Zwanzigsten Jahrhundert für die Luftschiffe des Grafen Zeppelin verwendet wurde, ist sicher ebenso bekannt wie das Unglück der Hindenburg 1937 in Lakehurst.

Man schreibt auch das Jahr 1937 als Papst

 © K.L.S. Publishing, all rights reserved

von Ohain in den Labors von Heinkel die weltweit erste Gasturbine mit Wasserstoff testet.

Es dauert bis 1955, als ein Forschungsbericht von Silverstein und Hall im damaligen NACA-Lewis Flight Propulsion Laboratory das Potenzial von flüssigem Wasserstoff (liquid Hydrogen, abgekürzt LH2) erneut ins Bewusstsein bringt. Als Folge der Studie wird ein Praxisprogramm aufgelegt, um die Nutzbarkeit von LH2 in einem Turbojet-Triebwerk in großer Höhe zu testen.

Es wird kurzerhand ein B-57 Bomber der US Air Force umgebaut. Der Bomber erhält

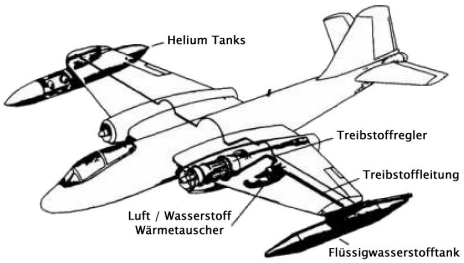


Abbildung 3a: B-57 Bomber mit LH2 Antrieb

am rechten Flügelende einen Heliumtank, der den Druck für die Förderung des LH2 lieferte und am linken Flügelende einen LH2-Tank, dessen Wasserstoff über einen Wärmetauscher in gasförmigen Wasserstoff (GH2) umgewandelt und über einen besonderen Treibstoffregler dem Standard J65 Turbojet-Triebwerk zugeführt wird. Die Flussrate wird dabei entsprechend dem Brennwertverhältnis (H2 hat einen um den Faktor 2,8 höheren Brennwert) geregelt, d.h., es reicht etwa 36 % der Kerosinmasse pro Zeiteinheit, um die gleiche Triebwerksleistung zu erzielen. Der Bomber wurde dabei zunächst konventionell mittels Kerosin in beiden Triebwerken auf die Testflughöhe von 50.000 ft und 0,75 Mach gebracht. Danach wurde das linke Triebwerk auf LH2-Betrieb umgeschaltet. Etliche Testflüge können ohne Probleme erfolgreich abgeschlossen werden, wobei der Heliumtank später durch eine Pumpe ersetzt wird.

Das Ziel war wohl Konstruktion und Bau eines Spionageflugzeuges, das mit Mach 2,5 in einer Höhe von 100.000 ft operieren sollte. Der legendäre Kelly Johnson zeichnet bei Lockheed auch für den zugehörigen Entwurf namens CL400. Trieb-

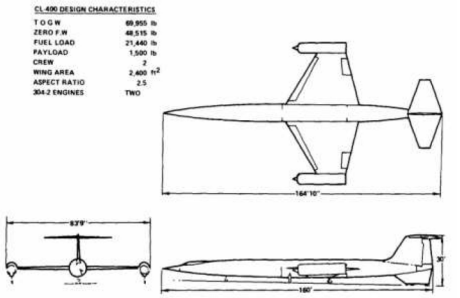


Abbildung 3b: Lockheed CL400

werkslieferant war Pratt & Whitney auf der Basis des Model 304 Turbojets, der in 95.000 ft noch 6.100 lbs Schub liefern soll.

Es wird intensiv an der CL400 gearbeitet und man kommt zu wertvollen Detailerkenntnissen. Am Ende aber wird das Flugzeug doch nicht gebaut, da man erkannt hat, dass das Ziel einfacher mit konventioneller Technik zu erreichen ist (U2). Die CL-400 verschwindet in den Schubladen. Unverkennbar ist allerdings, dass Kelly Johnson bei der späteren Konstruktion der SR71 Blackbird die Schubladen der CL400 wieder geöffnet hat.

 © K.L.S. Publishing, all rights reserved

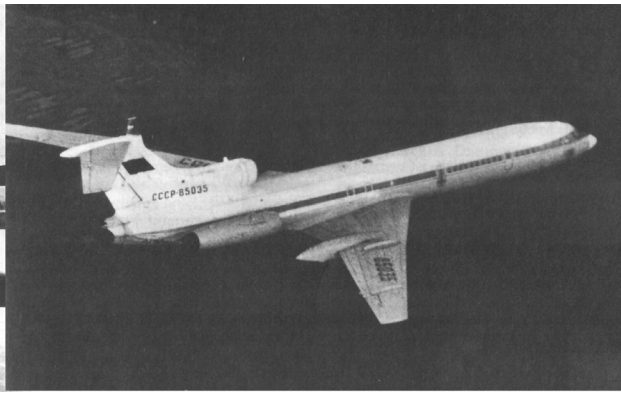


Abbildung 4: Tupolew Tu155 mit LH2 Triebwerk (rechtes Triebwerk)

Der Wasserstoffantrieb gerät in der Folge etwas in Vergessenheit. Er taucht 1988 in der UdSSR wieder auf und zwar als Antrieb einer umgebauten Tupolew 154, der TU155. In der UdSSR ist man zu dieser Zeit am Antrieb durch flüssiges Erdgas (LNG) interessiert und betrachtet die LH2-Experimente nur als Zwischenstufe. Bei der Tu155 ist das Triebwerk hinten rechts auf LH2-Betrieb umgebaut. Das Projekt verläuft ohne Zwischenfälle und beweist damit die Machbarkeit vom Flugzeug mit LH2/LNG-Antrieb. Im Rahmen der wirtschaftlichen Schwierigkeiten der UdSSR im

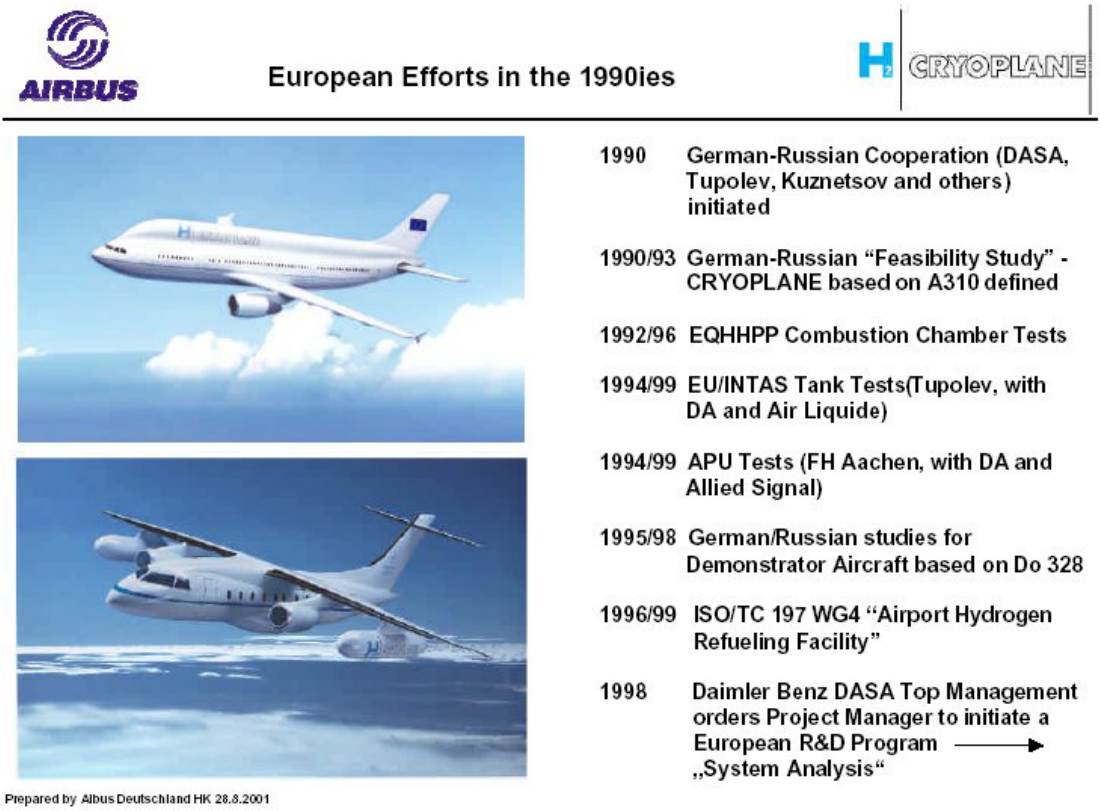


Abbildung 5: Aktivitäten in den 90er Jahren (Quelle Airbus)

 © K.L.S. Publishing, all rights reserved

Umfeld von ‚Perestroika' kann das Projekt aus eigener Kraft nicht mehr weiterverfolgt werden. 1990 entsteht eine deutsch-russische Kooperation, bei der man sich später auf die Erarbeitung einer Machbarkeitsstudie auf der Basis des A310 einigt. Das Projekt läuft ab dieser Zeit unter dem etwas unglücklich gewählten Namen „Cryoplane", den man eher mit einem Kühlflugzeug assoziiert als mit einem Next Generation Airplane. In den 90er Jahren werden eine Reihe von Einzelthemen untersucht, bei Airbus läuft das Ganze unter der Leitung von Dr. Klug (siehe auch die abgebildete Folie Abb. 5).

Im April 2000 wird das Projekt Cryoplane unter dem Mantel und mit Fördermitteln der Europäischen Kommission („Competitive and Sustainable Growth (1998-2002), fünftes Rahmenprogramm") mit einer Laufzeit von 26 Monaten und der Beteiligung von insgesamt 36 Parteien aus Industrie, Forschung und Wissenschaft neu gestartet. Projektleiter wird der Airbus-Mitarbeiter Dr. Andreas Westenberger, der vorher etliche Jahre die Interessen von Airbus Deutschland in Toulouse vertreten hat. Ziel ist die „Systemanalyse" von LH2-Flugzeugen verschiedener Größenklassen. Das Projekt läuft zeitlich bis zum Jahr 2002. Ein Report (Final Technical Report) erscheint am 24. September 2003.

Bevor wir jedoch auf einige der Details der Studie eingehen, wollen wir zunächst ein paar physikalische Grundlagen erklären, damit die Details überhaupt verständlich werden.

Physikalische Grundlagen

Es ist klar, dass man beim Bau eines LH2-Flugzeuges zunächst etwas über die Eigenschaften von Flüssigwasserstoff als Brennstoff kennenlernen muss.

Um Wasserstoff überhaupt in flüssiger Form zu erhalten, benötigt man als Erstes sehr niedrige Temperaturen, da sein Siedepunkt bereits bei -252,8 °C (ca. 20° K) liegt. Die zu verwendenden LH2-Tanks müssen also bestens thermisch isoliert und absolut dicht sein, da sich ansonsten der Treibstoff mit einer hohen Rate verdampfen und entweichen würde. Unterhalb von -259 °C (Schmelzpunkt) erhält man festes Wasserstoffeis (slush).

Die weiteren Eigenschaften von LH2 sind überaus interessant und im Unterschied zum Siedepunkt nicht mehr unbedingt Schulwissen. LH2 ist bei gleichem Volumen etwa 11-mal leichter (genauer: hat die 11-mal geringere Masse) als Kerosin. Bei gleicher Masse hat LH2 den 2,8-fachen Brennwert von Kerosin. Dies klingt nahezu fantastisch: Es ist viel leichter und hat einen viel höheren Brennwert. Doch hier kommt der Pferdefuß: Um die gleiche Energie wie bei Kerosin zu erhalten, benötigt man das 4-fache Raumvolumen! Zahlenwerte und Rechnung können aus Abb. 6 entnommen und nachvollzogen werden.

Zwei Dinge lassen sich aus diesen Tatsachen schlussfolgern. Unterstellt man einmal, dass man mit der gleichen Energiemenge unterwegs sein will, um nicht die Reichweite zu verschlechtern, so muss das LH2-Flugzeug erstens irgendwo dicker und/oder länger sein, um das Raumvolumen der Tanks unterzubringen. Zweitens wird das Flugzeug um einiges leichter sein, da selbst das 4-fache Volumen von LH2 nur 36 % der Masse (des Gewichtes) der äquivalenten Kerosinmasse hat. Dies bedeutet weniger benötigte Auftriebskraft,

 © K.L.S. Publishing, all rights reserved

Masse bei gleichem Volumen (ca. 11:1)					
	Volumen [L]	Dichte [kg/L]	Masse [kg]		
1 m^3 Kerosin wiegt	1.000	0,78	780		
1 m^3 LH2 wiegt	1.000	0,071	71		
Energieinhalt bei gleicher Masse (ca. 1:2,8)					
	Masse [kg]	Brennwert [kcal/kg]	Energie [kcal]		
1.000 kg Kerosin enthält	1.000	10.222	10.222.000		
1.000 kg LH2 enthält	1.000	28.661	28.661.000		
Volumen bei gleicher Energie (ca. 1:4)					
	Volumen [L]	Dichte [kg/L]	Masse [kg]	Brennwert [kcal/kg]	Energie [kcal]
1.000 kg Kerosin enthält	1.000	0,78	780	10.222	7.973.160
3.918 kg LH2 enthält	3.918	0,071	278	28.661	7.973.160

Abbildung 6: Grundlagen zu LH2 im Vergleich zu Kerosin

was kleinere Tragflächen zulässt, oder alternativ höhere Steigleistungen.

Um das Ganze etwas plastischer zu gestalten, wollen wir im Folgenden einige konkrete Überlegungen am Beispiel des Airbus A380 durchspielen. Die Tankkapazität des A380 umfasst 310.000 Liter Kerosin oder anders ausgedrückt 310 m^3. Wollte man den A380 mit LH2 und ohne Änderung der Energiemenge und damit der Reichweite betreiben, würde man nach einfacher Rechnung das gigantische Tankvolumen von 1.215 m^3 benötigen.

Würde man den Tank in Form zweier zylindrischer Tanks vorne und hinten im Bereich des heutigen Passagierbereichs platzieren, so würden auf die Gesamtlänge von 50,7 m ganze 31,6 m auf die Tanks entfallen. Rechnet man die Anzahl der Passagiere auf einer Basis von 555 (Lufthansa-Bestuhlung) proportional um, so könnte dieser LH2-A380 gerade einmal 211 Passagiere befördern. Die Flächentanks sind dabei leer, denn nach Aussage des Untersuchungsberichts sind diese für LH2 bei dieser Betrachtung nicht nutzbar (wir kommen später darauf zurück). In der Tabelle (Abb.8) sind drei verschiedene

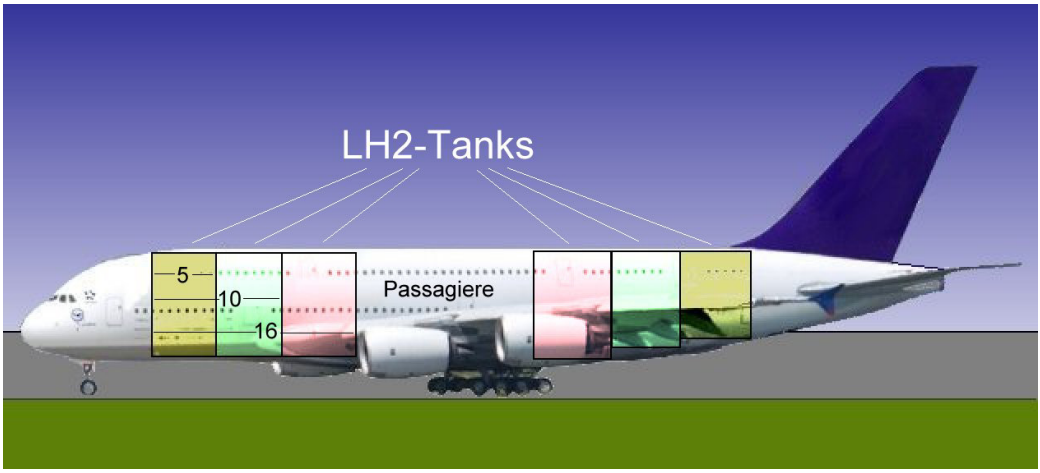


Abbildung 7: A380 mit LH2 Rumpftanks verschiedener Größe (siehe Tabelle)

 © K.L.S. Publishing, all rights reserved

Airbus A380 Tank (310.000 Liter)					
	Volumen [m³]	Dichte [kg/L]	Masse [to]	Delta Masse [to]	
Kerosin	310	0,78	241,8		
LH2	1.215	0,071	86,2	-155,6	ohne Gew. der LH2-Tanks
Benötigte Tanklänge für das äquivalente Tankvolumen					
Restlänge Kabine 50,7 [m]	Tanklänge[m]	Radius [m]	Volumen [m³]	Reichweite [NM]	# Passagiere
40,7	10	3,5	384,8	2.772	450
30,7	20	3,5	769,7	5.543	339
19,1	31,6	3,5	1.215,0	8.750	211

Abbildung 8: Drei verschiedene LH2 Tankkapazitäten

Größen berechnet, wobei die untere (pinkfarben) der momentanen Äquivalenzgröße entspricht. Dies bedeutet eine Gesamttanklänge von 31,6 m (entspricht in der Abb.7 zwei 16 m Tanks jeweils vorne und im Heck, d.h., der jetzige Passagierraum würde zu 62 % durch LH2-Tanks okkupiert). Die mittlere Variante (grün) geht von einer geringeren Tankkapazität aus, nämlich 20 m Länge der Tanks (entspricht in der Abb.7 zwei 10 m Tanks jeweils vorne und im Heck). Hierbei könnte man 339 Passagiere über eine Distanz von 5.543 NM befördern. Die kleinste Variante (gelb) verwendet zwei 5 m lange Tanks vorne und hinten und würde 450 Passagiere über eine Distanz von 2.772 NM befördern können.

Interessant ist ferner die Gewichtsersparnis: Beim Äquivalenzmodell sind dies 155,6 Tonnen weniger Masse natürlich

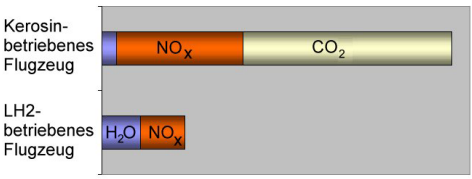


Abbildung 9a: Abgasvergleich

ohne das Strukturgewicht der zusätzlich benötigten LH2-Tanks. Man darf annehmen, dass das Leergewicht der benötigten Tanks und der erforderlichen Struktur (Halterung, Pumpen, Rohre etc.) um Etliches unter 155,6 to bliebe, sodass auf jeden Fall eine Nettogewichtsersparnis entstünde. Das Konzept ließe sich natürlich verfeinern, etwa indem man die zylindrischen Tanks zum Teil durch Unterflurtanks und oder Dachbereichtanks ersetzen würde. Ein 1 m tiefer Tank, 7 m breit und 50 m lang entspricht 350 m³, wodurch 10 m Kabinenlänge gewonnen würde. Aber es geht an dieser Stelle nicht um Details sondern um das Prinzip. Es lässt sich jedenfalls grob ableiten, dass man bei 30 % Reduktion von Passagierzahl und Reichweite einen durchaus brauchbaren LH2-A380 erhält. Durch Feintuning ließe sich das Ergebnis ohne Zweifel noch um Einiges verbessern.

Turbinen im LH2-Betrieb

Ein weiteres Thema bei der Umstellung eines heutigen Flugzeuges wie dem A380 auf LH2-Betrieb betrifft die Triebwerke.

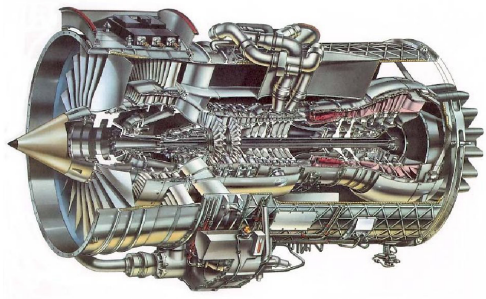


Abbildung 9b: BR710 Fanturbine

 © K.L.S. Publishing, all rights reserved

Lassen sich diese mit LH2 betreiben und wenn ja, was müsste geändert werden?

Die erste Frage kann direkt bejaht werden. Wie bereits in früheren Beiträgen dargestellt, ist jede Gasturbine vom Prinzip her ein Mehrstofftriebwerk, es lassen sich eine ganze Reihe von Treibstoffen nutzen. Das Verbrennen von Wasserstoffgas in der Brennkammer einer Gasturbine kann dabei als eine Art Idealfall angesehen werden, da der Treibstoff an chemischer Reinheit nicht zu überbieten ist, es entstehen keinerlei Verbrennungsrückstände. Der Verbrennungsprozess ist ein geschlossener Prozess, es entsteht als Verbrennungsprodukt ausschließlich Wasserdampf. Es ist richtig, dass zusätzlich – wie bei jeder Verbrennung mit Luft – geringe Mengen Stickoxide (NO_x) entstehen. Dies liegt daran, dass sich der Sauerstoff in den Randbezirken der Verbrennung auch mit dem Stickstoff der Luft verbindet. Die Menge der Stickoxide bei GH_2-Verbrennung ist allerdings kleiner als bei der Kerosinverbrennung und kann zudem durch geeignete Brennkammerdüsen weiter reduziert werden.

Da man bislang die direkte Verbrennung von LH2 nicht beherrscht, muss man allerdings den Flüssigwasserstoff vor der Verbrennung in gasförmigen Wasserstoff (GH2) umwandeln. Dies geschieht durch einen Wärmetauscher, der im einfachsten Fall die Temperatur der Außenluft verwendet. Schließlich sind selbst -56 °C an der Tropopause um fast 200 °C heißer als der Siedepunkt des LH2. Die abgegebene Kälte im Tauschprozess lässt sich dabei vorteilhaft zur Leistungssteigerung der Turbine nutzen, z.B. in Form der Kühlung der Ladeluft oder in einer weiteren Variante zur Kühlung in der Turbinenstufe.

Es wurden einige Forschungsprojekte zur Optimierung von Gasturbinen für den Betrieb mit LH2 durchgeführt (z.B. bei Prof. Koschel, TU Aachen).

Zitat: "Bei einem Unterschalltriebwerk mit mittlerem bis hohem Bypass-Verhältnis wie dem hier untersuchten BR710 ist die Platzierung des Wärmetauschers zwischen Fan und Hochdruckverdichter im inneren Kreis zur Zwischenkühlung des Verdichterluftstroms zu bevorzugen, die Luft sollte vor dem Eintritt in den Hochdruckverdichter so weit wie möglich abgekühlt werden. So wurde eine Reduzierung der Leistungsentnahme in der Turbine um über drei Prozent erreicht."

Um es zusammenzufassen:

1. Die Verbrennung von Wasserstoff ist nahezu perfekt, es entsteht Wasserdampf (H_2O) und geringe Mengen von Stickoxiden (NO_x)
2. Turbinen können problemlos mit gasförmigem Wasserstoff (GH2) betrieben werden (Turbinen lieben Wasserstoff)
3. Man benötigt als einziges neues Bauelement einen Wärmetauscher (LH2-> GH2)
4. Bei geeigneter Konstruktion darf man etwa 3,6 % mehr Leistung der Triebwerke erwarten (Kühlung der Ladeluft) und fast 10 % bei Kühlung der Turbinenstufe

Insbesondere bedeutet es, dass man heutige Triebwerkskonstruktionen beibehalten könnte. Die Triebwerke – beispielsweise das Trent 970 Triebwerk des A380 – ließen sich mit vertretbarem Aufwand auch für den Mischbetrieb einrichten, sodass man es mit Kerosin oder Wasserstoff betreiben könnte. Auf diese Weise

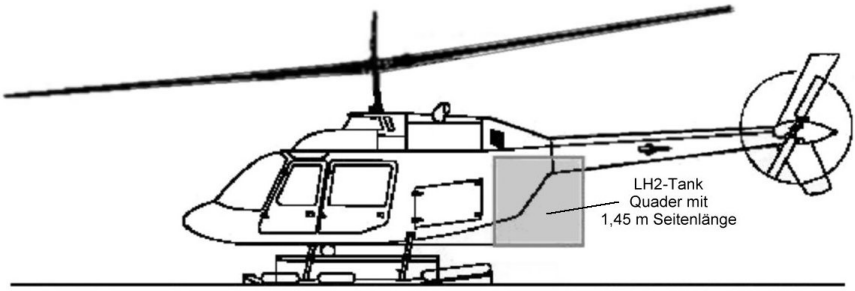
 © K.L.S. Publishing, all rights reserved

wäre auch ein Kerosin-LH2 Hybrid-Flugzeug vorstellbar.

Helicopter betrieben mit LH2

Da beim Helicopter die gesamte Auftriebskraft aus der Leistung des Triebwerks gewonnen wird, spielt das Gewicht eine noch größere Rolle als beim Flugzeug, bei dem bekanntlich der Auftrieb mittelbar über die Tragfläche und ihre Geschwindigkeit erzielt wird. Was liegt also näher, als gerade den Hubschrauber näher in den Anwendungsfokus zu rücken, wenn es um die Nutzung von Wasserstoff geht. Auch hier wollen wir ein einfaches Beispiel betrachten: den legendären Bell Jet Ranger 206, der irgendwann einmal in fast jeder amerikanischen Fernsehserie erscheint. Der Bell 206 ist mit einem Tankvolumen von 91 Gallonen = 344 Liter nicht gerade ein Reichweiten- oder Endurancewunder. Mehr als drei Stunden ist realistisch gesehen nicht machbar.

Betrachtet man einen LH2-Tank mit gleichem Energieinhalt, so wäre dieser um 172,5 kg leichter (ohne Berücksichtigung der LH2-Tankstruktur). Schätzt man das zusätzliche Gewicht für einen doppelwandigen LH2-Tank und den notwendigen Wärmetauscher in der Turbine mit 50 kg ab, so lassen sich bei gleichem Maximalgewicht des Hubschraubers noch 122,5 kg LH2 hinzufügen, wobei die Gesamtenergie auf 228 % steigen würde! Volumenmäßig würde alles in einen quaderförmigen Tank mit der Seitenlänge von 1,45 m passen, der, wie in der Abb. gezeigt, am Rumpfheck wenig aerodynamische Nachteile mit sich brächte. Der LH2-Bell 206 hätte mit der Änderung mehr als die doppelte Reichweite oder Endurance und das alles mit relativ geringem Aufwand. Es sind keinerlei Technologiesprünge erforderlich. Nein, man erreicht das Ziel allein durch die Verwendung und ggf. Anpassung von Technologien, wie sie bereits seit Jahren in vielen praktischen Automobilprojekten erfolgreich getestet wurden.



Beispielrechnung Bell Jet Ranger B3

	Liter	m^3	Masse[kg]	Energiemenge [kcal]	Seitenlänge Quader [m]
Tankvolumen Kerosin (91 Gal)	344	0,344	268,3	2.742.767	0,70
Tankvolumen LH2 (äq. Energie)	1.348	1,348	95,7	2.742.767	1,10
Gewichtsersparnis			-172,6		
Zusatzgewicht Tankstruktur LH2			50,0		
Tankvolumen LH2 (äq. Masse)	3.075	3,075	218,3	6.112.400	1,45
Ergebnis				223%	> doppelte Reichweite

Abbildung 10: Gewichtsvorteil beim Bell 206 durch LH2-Antrieb

 © K.L.S. Publishing, all rights reserved

Obwohl die Vorteile auf der Hand liegen, sind ernsthafte Entwicklungsaktivitäten in Sachen LH2-Hubschrauber (zumindest dem Autor) bislang nicht bekannt.

LH2 in Kleinflugzeugen

Prinzipiell ließen sich ähnliche Experimente, wie sie z.B. von BMW, Mercedes und den meisten anderen Autoherstellern mit LH2-Antrieb durchgeführt wurden, auch in der Luftfahrt versuchen. Schließlich lässt sich jeder Ottomotor mit relativ wenigen Änderungen auch mit Wasserstoffgas betreiben. Allerdings sind bis heute solche Aktivitäten nicht bekannt geworden und die Gründe hierfür lassen sich problemlos nachvollziehen, sie sind wirtschaftlicher Art. Warum sollte sich jemand ein Wasserstofflugzeug kaufen mit einem noch einmal um einen gewaltigen Faktor gesteigerten Treibstoffpreis, wo der aktuelle bereits über der Schmerzgrenze liegt? Von der Versorgung einmal ganz zu schweigen.

Projekte mit LH2 und Kleinflugzeugen werden daher zurzeit nur in Grundlagenprojekten durchgeführt, die meistens dann eine wirtschaftliche Förderung aus dem Staatshaushalt oder von großen Konzernen oder beidem erfahren.

So plant die europäische Forschungsabteilung von Boeing dieses Jahr noch bemannte Testflüge eines durch Brennstoffzellen und leichte Batterien angetriebenen Kleinflugzeugs. Die Testflüge sollen in Spanien stattfinden. Als Testflugzeug dient ein stark modifizierter Dimona Motorsegler von Diamond Aircraft. Bei einer Spannweite von 16,3 m soll das Flugzeug eine Reisegeschwindigkeit von 54 Knoten erreichen.

Das Hybridsystem aus Brennstoffzelle und Lithium-Ionen-Batterien treibt dabei einen Elektromotor an, der wiederum direkt einen konventionellen Propeller dreht. Für Start- und Steigphase liefert die Lithium-Ionen Batterie zusätzliche Energie. Wegen des wesentlich besseren Wirkungsgrades der Kombination Brennstoffzelle/Elektromotor wiegt übrigens der Volumennachteil von LH2 weit weniger schwer. Bei einem theoretisch möglichen Gesamtwirkungsgrad von 75 % bräuchte man nur noch ca. das doppelte LH2-Volumen ggü. einem turbinengetriebenen Flugzeug mit 35 % Wirkungsgrad.

Boeing ist bei seinen Aktivitäten nicht primär am breiten Einsatz von Brennstoffzellen in der Luftfahrt interessiert, sondern denkt eher an spezielle Anwendungen, z.B. Brennstoffzellen als Ersatz für die APU in Verkehrsflugzeugen oder den Einsatz in unbemannten Kleinflugzeugen für militärische Zwecke (UCAVs).

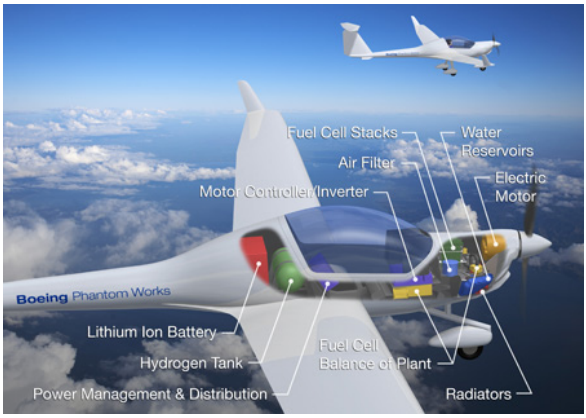


Abbildung 11: Boeing Fuel Cell Glider

 © K.L.S. Publishing, all rights reserved

Die Frage der Sicherheit

Leider hat sich durch das weltweit bekannt gewordene Unglück des Luftschiffs Hindenburg in Lakehurst 1937 allgemein ein falsches Bild bezüglich der Gefahr bei der Nutzung von Wasserstoff eingeprägt, das fast nicht mehr korrigierbar scheint.

Wenn man die reinen Fakten betrachtet, wird man schnell erkennen, dass die Nutzung von Benzin oder Kerosin weitaus gefährlicher ist.

Hier sind einige Tatsachen:

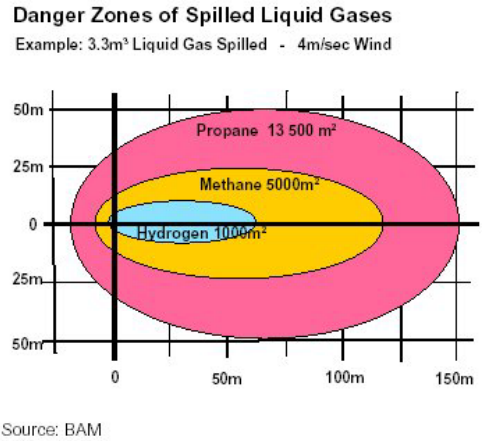


Abbildung 13: Gefahrenzonen von Flüssiggasen

- LH2 verflüchtigt sich (GH2 ist superleichtes Gas) bei einem Leck sehr schnell nach oben und bildet daher nur eine sehr kleine Gefahrenzone
- Wasserstoff verbrennt deutlich unterhalb der Konzentration für seine Explosionsgrenze d.h. es gibt in der freien Atmosphäre keine Knallgasexplosion
- Wasserstoff bildet keinen Feuerteppich und initiiert daher kaum Sekundärbrände
- Wasserstoff verbrennt rasend schnell mit geringer Hitzeabstrahlung in die Umgebung (konzentrierte Flamme)
- Wasserstoff und seine Verbrennungsprodukte sind allesamt nicht giftig.

Was die Seite der praktischen Erfahrungen angeht, so ist die Hindenburg das einzig negative Beispiel und auch das wird allgemein falsch bewertet. Es gab keinerlei Explosion sondern "nur" einen Brand des Wasserstoffgases, der nach nur wenigen Minuten vorbei war. Von den 97 Menschen an Bord überlebten immerhin 62 das Unglück.

Auf der positiven Seite der Praxis ist zu nennen:

- positive Erfahrung mit Stadtgas über Jahrzehnte (enthält 50 % Wasserstoff)
- Worst-case-tests mit Autotanks waren ausnahmslos positiv (Bundesamt für Materialforschung (BAM), BMW)
- Jahrelange Tests mit Wasserstoffautos (Taxi, Bus) in europäischen Städten und als Großversuche im Nahverkehr wie z.B. auf Island verliefen überaus positiv (Projekt CUTE)
- Exzellenter Safety-Record der LH2-Tankinstallationen und der Transportfahrzeuge für Flüssiggase
- Nach Untersuchungen der Universität von Miami gibt es einen klaren Sicherheitsvorteil von Wasserstoff im Vergleich zu Benzin

Zum letzten Punkt betrachte man die abgebildete Fotosequenz zweier Autos (eins mit Wasserstofftank, eins mit Benzintank), die beide zur gleichen Zeit zur Entzündung gebracht werden. Das Wasserstoffgas verbrennt sehr schnell ohne einen Sekundärbrand zu erzeugen, wohingegen das Benzin bedingt durch den Brandteppich das gesamte Fahrzeug in Brand setzt. Im Unterschied zu Benzin hat

 © K.L.S. Publishing, all rights reserved

Photo 1: Zeit 00:00. Wasserstoffbetriebenes Fahrzeug links. Benzinbetriebenes Fahrzeug rechts

Photo 3: Zeit 01:00. Brand im Wasserstoffauto versiegt bereits. Der Brand im Benzinauto verstärkt sich erst.

Photo 2: Zeit 00:03. Zündung beider Treibstoffe.

Photo 4: Zeit 02:20. Schneller Abbrand des gesamten Innenraums.

Abbildung 14: Wasserstoff- und Benzintank im Vergleich (Quelle: University of Miami)

das petroleumverwandte Kerosin als "Öl" noch mehr die Tendenz, einen Brandteppich zu bilden und großflächig zu verbrennen.

LH2 Herstellung

Wir wollen hier nur ganz kurz auf das Thema Herstellung von LH2 eingehen, eine umfassende Darstellung würde den Rahmen des Beitrags sprengen. Klar ist, dass man für die Herstellung, egal welches Verfahren man verwendet, Energie braucht. Bezieht man diese Energie aus konventionellen Kraftwerken, entsteht dabei CO_2 und damit wäre die Gesamtbilanz nicht CO_2-frei. Man unterscheidet allgemein zwischen konventionellen Verfahren, die nicht CO_2-frei sind, und Verfahren mittels erneuerbarer Energie, die CO_2-frei sind.

Unter den konventionellen Verfahren favorisiert man heute die sogenannte Dampfreformierung wobei als Ausgangsprodukt Methan(ol), Äthan(ol) oder Erdgas eingesetzt wird. Hierbei entsteht CO_2 nicht nur durch die verwendete Energie sondern auch als Nebenprodukt des Prozesses.

Weitaus klimaschonender ist die Verwendung erneuerbarer Energien wie Sonnen- oder Windenergie sowie Wasserkraft oder Biomasse. Wasserstoff kann z.B. durch Sonnenenergie über Fotovoltaik durch Elektrolyse hergestellt werden. Die notwendige Verflüssigung müsste dann energetisch ebenfalls aus Sonnenenergie stattfinden. Man könnte sich, die politische Frage einmal außer acht gelassen, eine entsprechende Großanlage in der Sahara vorstellen, wobei Erdgaspipelines von Tunis bis nach Mitteleuropa bereits vor-

 © K.L.S. Publishing, all rights reserved

handen sind. Eine Erweiterung dieser Infrastruktur ist sicher vorstellbar.

LH2 Preisbildung

Zur Frage des Preises von LH2 gibt es eine ganze Reihe von Studien, wobei die Aussagen je nach getroffenen Annahmen höchst unterschiedlich sind.

Eine der ersten Preisaussagen zu Endverbraucherpreisen bei großen Abnahmemengen findet man in der EQHHPP Studie 1992 (Teilprojekt von Cryoplane). Dort ging man von einer Großproduktion in Kanada aus und errechnete aus dem Szenario den Abnahmepreis in Hamburg. Die einzelnen Komponenten, aus denen sich der Preis zusammensetzt, lassen sich der Abbildung entnehmen. Errechnet wurde damals ein Preis von ca. 16 ct/kWh. Um dies in eine luftfahrtbrauchbare Vergleichsgröße umzurechnen, ist in der unteren Tabelle der Wert "€ pro Äq.EM" berechnet, das ist der €-Betrag für die äquivalente Energiemenge von 1 kg Kerosin. Dieser würde 1,92 € betragen gegenüber 1,07 € für Kerosin in heutiger Kaufkraft. Da sich die 1,92 € wahrscheinlich auf die Kaufkraft 1992 (?) beziehen, ist der Wert eigentlich noch etwa zu verdoppeln. Andere Preisaussagen sind in der Tabelle zu finden, so etwa die aus dem automobilen Bereich: BMW mit 1,14 € pro Äq.EM und Dr.Dotys (Preisvorhersage aufgrund der Verbreitung von Fuel Cell Cars) Prognose für 2025 liegt bei 2,91 € pro Äq.EM, alles ohne Steuern versteht sich.

Die TU Dresden 2006 gibt einen aktuellen Bruttopreis von 2,07 € pro Liter LH2 an, die Umrechnungwerte finden sich in der Tabelle. Von BMW stammt der geringste Preis im Rahmen der genannten Quellen: 0,80 € pro einem Äquivalent von 1 Liter Benzin.

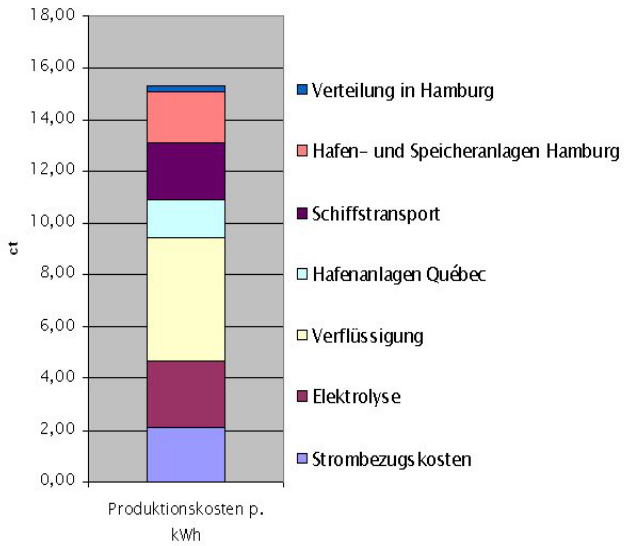


Abbildung 15: Komponenten LH2-Preis (EQHHPP)

Preiskalkulationen (in heutiger Kaufkraft)

Preis im	Jahr	€/L	€/kWh	$/kg	€/kg	€/Äq.EM	€/Äq.EM	Quelle
		o.St.	o.St.	o.St.	o.St.	o.St.	m.St.	
Flüssigg.(LPG)	2007	0,36 €			0,65 €	**0,57 €**	**1,00 €**	aktueller Tagespreis, 2007
Kerosin (A1)	2007	0,83 €			1,07 €	**1,07 €**	**2,27 €**	aktueller Preis, 2007
LH2	2007	2,07€/L brutto					**8,11 €**	TU Dresden, 2006
LH2	2025			$10,50	8,08 €	**2,91 €**	**??**	Dr. Doty, Columbia, USA, 2004
LH2	Zukunft		0,16 €		5,32 €	**1,92 €**	**??**	EQHHPP, 1992
LH2	Zukunft	0,80€ für LH2 aquivalent 1 L Benzin				**1,14 €**	**??**	BMW, 2007

Abbildung 16: LH2 Preislandschaft

 © K.L.S. Publishing, all rights reserved

Über das Preisthema läßt sich sicher endlos diskutieren aber eine Tatsache darf man dabei nicht aus den Augen verlieren: Der Preis von Kerosin (und aller anderer fossiler Brennstoffe) wird in der Zukunft kontinuierlich steigen.
Der Grund: Es wird in naher Zukunft der Gipfel der Jahresproduktion fossiler Brennstoffe erreicht werden. Die Experten streiten sich eigentlich nur noch über den Zeitpunkt. Es ist klar, dass danach die Preise für Kerosin (und vergleichbare Treibstoffe) stark anziehen werden.

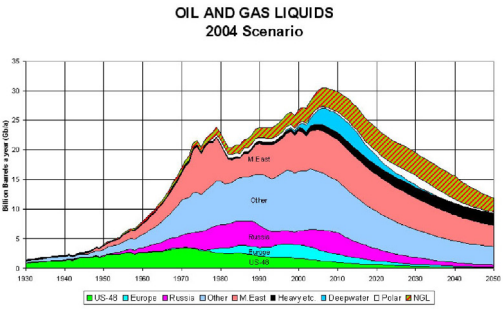


Abbildung 17: Peak bei der Produktion fossiler Brennstoffe (Association for Peak Oil)

Würde man also heute massiv in Produktionsanlagen und Produkte für LH2 investieren, so erscheint es realistisch, daß der LH2-Preis jenen von Kerosin in wenigen Dekaden unterschreiten würde.

Nun, da wir die jetzt die nötigen Grundlagen geschaffen haben, können wir uns nun endlich dem europäischen Ergebnisbericht zum LH2-Flugzeug zuwenden.

Final Technical Report (Sept. 2003)

Das Projekt Cryoplane (Liquid Hydrogen Fuelled Aircraft - System Analysis) wurde von April 2000 bis Mai 2002 mit Fördermillionen der Europäischen Kommission unter Koordination der Airbus Deutschland GmbH (Projektmanager Dr. Westenberger) durchgeführt. Im September 2003 erscheint ein achtzigseitiger Final Technical Report (publishable Version), aus der wir die folgenden Informationen beziehen. Man darf übrigens davon ausgehen, daß auch die früheren Arbeiten und Erkenntnisse (Airbus Dr. Faaß, Dr. Klug), die ja bereits seit 1990 liefen, in den Report eingeflossen sind.
Im Projekt wurde die Konsequenzen der Umänderung von insgesamt 7 verschiedenen Turbofan-Verkehrsflugzeugtypen auf LH2-Betrieb durch Computerberechnungen simuliert. Beim Regional 100-Sitzer wurde zusätzlich eine Turbopropvariante berücksichtigt. Im Bericht werden zwar die Flugzeugtypen nicht genannt, doch man kann sie erraten (Typenzuordnung in Klammern ohne Gewähr)

1. Business and Small Regional Aircraft (Do 328Jet)
2. Regional 100-seater Turbofan (A318)
3. Regional 100-seater Turboprop (Alenia C27)
4. Short Range Aircraft (A320)
5. Medium Range Aircraft (A330)
6. Long Range Aircraft (A340)
7. Very Long Range Aircraft (A380)

Im Report werden drei verschiedene Tankanordnungen favorisiert je nach Flugzeugtyp. Für Klasse 1 empfiehlt man einen großen Einzeltank im hinteren Teil des Rumpfes. Für die Klassen 2+3 kommen zusätzlich weitere Tanks im Dachbereich des Flugzeuges fast über die gesamte Länge hinweg zum Einsatz (siehe Abb.5). Die S/M Aircraft Kategorie 4+5 eignet sich

 © K.L.S. Publishing, all rights reserved

für eine ebensolche Anordnung, wobei ein relativ großer Tank im Heckkonus angeordnet werden kann.

Für die Long Range und Very Long Range Klassen werden konstruktiv zwei Tanks jeweils vorne und hinten im Rumpf vorgesehen, wie bereits bei unserem A380 Beispiel bereits dargestellt. LH2-Tanks in den Tragflächen haben sich bei der Simulation als ungünstig erwiesen, da erstens der Platz nicht vorhanden wäre (doppelte Hülle ggf. mit Vakuum dazwischen) und zweitens auch die thermischen Bedingungen nicht vorteilhaft wären (größeres Risiko der Tragflächenvereisung).

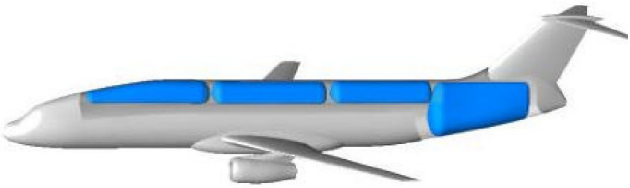


Abbildung 18: LH2-Tanks Mid-Range Aircraft

Interessant sind natürlich die quantitativen Ergebnisse der Computerberechnungen:

- Die Zero Fuel Mass (ZFM, seltsamerweise im Report mit Operating Weight Empty OWE bezeichnet) steigt im Mittel um 23% bedingt durch die Masse der zusätzlichen Tankstruktur und aller Nebenaggregate (Rohre, Pumpen usw.)
- Der Energieverbrauch der LH2-Flugzeuge (bei gleicher Treibstoffenergiemenge) steigen im Mittel um 9-14 % bedingt durch die größere Oberfläche
- Die MTOM variiert zwischen +4,4 % und -14,8 % abhängig vom Flugzeugtyp
- Die direkten Betriebskosten steigen durch den höheren Treibstoffverbrauch allein um 4-5 %

Die Steigerung der ZFM erscheint auf den ersten Blick recht viel zu sein, beachtet man allerdings die berücksichtigten Massen für Doppelwandungen mit Isolation, Rohren, Kryopumpen und Feuerlöschsysteme erscheint der Wert realistisch.

Den höheren Treibstoffverbrauch könnte man durch die im Abschnitt Turbinen beschriebenen Leistungssteigerungen von 3-10 % möglicherweise wettmachen. Betrachtet man allerdings die Größe Energie pro Passagiermeile, so verschlechtert sich dieser Wert im Mittel nach Darstellung im Report um 18 %, da sich im Vergleich zum Kerosinflugzeug die maximale Anzahl der Passagiere reduziert. Man wird also, wie es aussieht, in jedem Fall eine Penalty für das aerodynamisch größere und im Innenraum kleinere Flugzeug zahlen müssen.

Dass die MTOM sich reduziert, ist eine direkte Folge der geringeren Masse des LH2 und nicht etwa prinzipiell bedingt. Der Punkt hat daher eigentlich wenig Aussagekraft.

Die Steigerung der Betriebskosten ist leider im Report nicht weiter ausgeführt (außer dass man von gleichen Preisen bei Kerosin und LH2 im Jahre 2040 ausgeht), sodass dieser Punkt nicht bewertet werden kann.

Der Report beschäftigt sich noch mit einer ganzen Reihe von weiteren Punkten, wie Umwelt und Klima, Herstellung von Wasserstoff, Übergang zu einer Wasserstoffenergiewirtschaft und mehr, wir wollen

 © K.L.S. Publishing, all rights reserved

das hier nicht weiter vertiefen. Wer interessiert ist, findet den Report im Internet (siehe Quellenangaben am Ende). Stattdessen wollen wir direkt die Summary im Original wiedergeben.

Summary (2003):
This CRYOPLANE System Analysis has shown that hydrogen could be a suitable alternative fuel for the future aviation. Nevertheless, due to the missing materials, parts, components and engines further R&D work has to be performed until hydrogen can be used as an aircraft fuel. According to estimations made during this project the earliest implementation of this technology could be expected in 15 to 20 years, provided that research work will continue on an adequate level.
From the operating cost point of view hydrogen remains unattractive under today's condition, with kerosene is much cheaper as hydrogen and production/infrastructure is completely missing.
Assessments based on conservative calculations and today's understanding have confirmed that the use of hydrogen would reduce aircraft emissions to a minimum. It needs to be validated that the water emission of hydrogen-fuelled aircraft has low impact to the atmosphere as predicted.

Jeder mag die Zusammenfassung für sich bewerten. Aus meiner persönlichen Sicht war das damals eine klare Beendigung des Projektes Cryoplane seitens Airbus ohne an weitere Aktivitäten etwa den Bau eines auch in der Studie vorgeschlagenen Demostrator-LH2-Flugzeuges auch nur zu denken. Fördermittel kassiert, Projekt eingestampft. Ein Versuch, das LH2-Demonstratorflugzeug unter dem Projekttitel HYTRAF durch EU-Fördermittel des 6. Rahmenprogramms zu finanzieren, scheiterte. Es deckt sich auch mit dieser Linie, dass man auf der Website von EADS noch nicht mal mehr eine einzige Zeile zum Cryoplane oder dergleichen findet.

Fazit

Es liegt sicherlich nicht an der fliegenden Community, wenn das LH2-Flugzeug noch lange auf sich warten lassen wird. Piloten fliegen ohne Zweifel genauso gerne mit sauberem Wasserstoff. Es liegt sicherlich auch nicht an technologischen Schwierigkeiten. Zur Einführung etwa eines LH2-Airbusses bedürfte es noch nicht einmal eines Technologiesprunges wie etwa bei der Brennstoffzelle. Die wenigen technologischen Probleme liegen eigentlich alle im Bereich der luftfahrttypischen Ausdauer- und Sicherheitstests und ließen sich aus meiner Sicht in einem überschaubaren Zeitfenster bewerkstelligen. Der Report nennt hier das Datum bis 2015, aber es sind schon wieder fünf Jahre untätig verstrichen.
Man kann Airbus bzw. EADS und auch anderen Unternehmen die Untätigkeit auf diesem Feld nicht ernsthaft vorwerfen. Denn solange politisch zumindest auf europäischer Ebene nicht die Entscheidung gefällt wird "wir wollen die Transition zur H2-Energiewirtschaft", wird keines der Luftfahrtunternehmen weltweit in Wasserstoffflugzeuge investieren.
Denn ohne die parallel zügig aufzubauende Infrastruktur wäre es wie mit den Autos im Jahr 1900, als man das Benzin literweise in der Drogerie holen musste. Ein paar Zahlen machen die Situation deutlich: Die

 © K.L.S. Publishing, all rights reserved

Tagesproduktion von LH2 in Europa beträgt 19 to (USA 170 to), der innereuropäische Luftverkehr würde täglich 30.000 to verbrauchen (Zahlen von 2001, Quelle: Airbus)!

Ohne eine drastische, politische Aktion (DRAPOLAK) zumindest auf europäischer Ebene zugunsten der Wasserstoffwirtschaft ist die Umstellung auf LH2-Flugzeuge im Luftverkehr nicht realistisch. Dabei wäre es nicht mit einer bloßen Willenserklärung getan, sondern die Umstellung müsste massiv gefördert werden. Dass dabei direkte Steuermittel meist wenig bringen, zeigt das Cryoplane Projekt. Der wesentlich bessere Weg ist – wie eigentlich immer – Steuern zu erlassen. Eine Methode wäre etwa alle europäischen Steuern (siehe Abb.19 „Empfehlung“) bei der Nutzung von LH2 als Treibstoff für Luftfahrzeuge für die nächsten 50 Jahre vollständig zu erlassen. Dies müsste natürlich EU-weit verfassungsrechtlich garantiert werden, damit es nicht von Parlamentsumbildungen geändert werden kann. Mit einer solchen Maßnahme- so darf man annehmen – könnte der Preis für LH2 relativ zügig unter den von Kerosin fallen, womit sich das Ganze für Luftfahrzeughersteller und Fluggesellschaften relativ schnell rechnen würde. Die aktuell diskutierten Themen einer CO_2-Steuer und möglicherweise noch die Besteuerung von Kerosin auch im internationalen, gewerblichen Flugverkehr sind dagegen kontraproduktiv. Es würgt die Wirtschaft ab und, was noch schwerer wiegt, erzeugt bei den verantwortlichen Politikern das Gefühl, man habe ja etwas getan, was die sowieso notwendige LH2-Transition weiter und weiter verzögern wird.

Parallel zur sicher nicht einfachen DRAPOLAK ließe sich die Transition durchaus an einigen Stellen in der Übergangsphase mit der Förderung von überschaubaren Projekten unterstützen:

- Förderung von Entwicklung und Bau von LH2-betriebenen APUs
- Förderung von Entwicklung und Bau von LH2-Hubschraubern für den Einsatz bei Polizei und Rettungswesen (S&R)
- Einsatz der LH2-Hubschrauber bei Polizei und S&R (sehr geeignet, da meist an eigener Tankstelle energieversorgt)
- gezielte Förderung von praktischen Forschungsprojekten im Bereich LH2-Tanks, Slush-Tanks, Crypopumpen, LH2-Brennkammern, Wärmetauscher etc. im Hinblick auf Zuverlässigkeit und Sicherheit im Langzeiteinsatz
- Untersuchung der Möglichkeiten eines LH2/Kerosin Hybridflugzeuges (mit 50 % LH2-Meilen wäre bereits viel erreicht!)

Die genannten Projekte müssten allesamt in den Kontext der Transition gestellt werden und wären dementsprechend mit Zeitzielen zu verbinden.

Der Erfolg hängt letztlich davon ab, ob man die Ziele zur Verhinderung oder zumindest Dämpfung des Klimawandels durch Reduzierung des CO_2-Ausstoßes wirklich ernst nimmt. Falls ja, so wird nur die Transition zur Wasserstoffwirtschaft es ermöglichen, die Ziele des Kyoto-Protokolls zu erreichen. Auf diesem Wege ist es aus heutiger Sicht mit vertretbarem

 © K.L.S. Publishing, all rights reserved

Aufwand möglich, den Luftverkehr mittel- bis langfristig (15-30 Jahre) auf LH2-Verkehrsflugzeuge umzustellen. Der Weg über eine CO_2-Steuer wäre ein Abweg mit entsprechender Verzögerung.
Der Ruf nach staatlichen Fördergeldern (das Geld aller Bürger) ist schnell in jedermanns Munde aber in diesem Fall wäre der Einsatz ausnahmsweise einmal sinnvoll, da es sich um ein wirkliches Allgemeininteresse handelt. Es lassen sich vielleicht auch noch weitere Geldquellen nutzen wie zum Beispiel die Umverteilung aus dem Galileo-Topf, Milliarden, die nur dazu dienen, dass Europa was Eigenes hat, ein eigenes, europäisches Jodeldiplom eben. Die Milliarden wären sicher besser in Form eines Fotovoltaik-Kraftwerks in der Sahara oder an sonst geeigneter Stelle in der EU zur Herstellung von Wasserstoff genutzt. Vielleicht möchte auch H.Forgeard wegen der größtenteils ihm zugeordnete A380-Misere auf einen Großteil seiner 8,5 Mio € Abfindung verzichten und stiftet es als Anschub für die große Sache z.B. für den Bau eines LH2-Demonstrators?

Wenn man es realistisch sieht, hat Umweltminister Gabriel recht. Wie sagte er doch im Fernsehinterview: "Da passiert ja nichts mehr." Da sind die jetzigen europäischen Regierungen nicht ganz unbeteiligt. Helfen würde ein genereller Steuererlass, doch das scheuen Politiker bekanntlich wie der Teufel das Weihwasser. Und außer dem Steuererlass will mir leider nichts einfallen, was den drastischen Anschub für den nötigen Umbau in Richtung Wasserstoffwirtschaft leisten könnte. Und deshalb wird es so weiterlaufen wie bisher, Klimawandel hin oder her.

Klaus.L.Schulte@klspublishing.de
30. Mai 2007
http://klspublishing.de/

	Nutzung	geo-grafisch	Treib-stoff	€/Liter €/Äq.EM (1L J-A1)	Gesamt-energie-steuer [€]	Preis o.MwSt	MwSt. 19%	Preis m. MwSt	Steuerbe-freiung nach RL92/81/EWG
Kfz	privat	Eu-weit	Benzin	0,51 €	0,6550	1,17 €	0,22 €	1,39 €	nein
Kfz	privat	Eu-weit	Diesel	0,50 €	0,4704	0,97 €	0,18 €	1,15 €	nein
Flugzeug	privat	Eu-weit	Avgas	0,91 €	0,7210	1,63 €	0,31 €	1,94 €	nein
Flugzeug	privat	Eu-weit	Kerosin	0,83 €	0,6550	1,49 €	0,28 €	1,77 €	nein
Flugzeug	gewerblich	national	Avgas	0,92 €	0,7210	1,64 €	0,31 €	1,95 €	nat. Entschdg.
Flugzeug	gewerblich	national	Kerosin	0,83 €	0,00	0,83 €	0,16 €	0,99 €	nur Energiest.
Flugzeug	gewerblich	international	Kerosin	0,83 €	0,00	0,83 €	0,00 €	0,83 €	ja
Flugzeug	privat	Eu-weit	LH2	1,00 €	0,00	1,00 €	0,00 €	1,00 €	Empfehlung
Flugzeug	gewerblich	Eu-weit	LH2	1,00 €	0,00	1,00 €	0,00 €	1,00 €	Empfehlung

Preise Ende Mai 2007 (D), Preis für LH2 von 1€ angenommen bei äquivalenter Energiemenge von 1 Liter Jet A1

Abbildung 19: Aktuelle Besteuerung, mögliche Besteuerung von LH2 in der Zukunft

 © K.L.S. Publishing, all rights reserved

Quellen:

Cryoplane

[1] Liquid Hydrogen Fuelled Aircraft – System Analysis (CRYOPLANE), Final Technical Report 2003 Projekt: GRD1-1999-10014 European Commission, 5th Framework www.aero-net.org/pdf-docs/20040202-final-technical-report-4-pv.pdf

[2] FREDRIK SVENSSON, Potential of Reducing the Environmental Impact of Civil Subsonic Aviation by Using Liquid Hydrogen, Dissertation, 2005

[3] Dr. Faaß, Airbus Deutschland GmbH, Cryoplane Foliensatz 2001

[4] Dr. Westenberger, Airbus Deutschland GmbH, Cryoplane Foliensatz 2003, H2-Expo

Grundlagenforschung

[5] Prof. Dr-Ing. Wolfgang Koschel, Flugantriebsvarianten mit Wasserstoff für Cryoplane, untersucht am Triebwerk BMW-Rolls-Royce BR710, TU Aachen

[6] Prof. Dr.-Ing. Jobst Hapke, Cryoplane, Oder: Kann man mit Wasserstoff fliegen? Im Special Luftfahrtforschung, S.21-23, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2003

LH2-Herstellung

[7] LH2-Herstellung, verschiedene Quellen, Wikipedia, H2ydrogeit, L-B-Systemtechnik GmbH u.a.

[8] Das Flüssigwasserstoff-Versuchsfeld an der TU Dresden, Foliensatz, 2006

[9] Flüssigwasserstoff für Europa – die Linde-Anlage in Ingolstadt, Technik und Wissenschaft 1994

LH2-Preisbildung

[10] Dr. David Doty, A Realistic Look at Hydrogen Price Projections, Doty Scientific Inc. Columbia, SC

[11] Verschiedene Websites, Flüssiggaspreise, BMW, Mercedes u.a.

Klimawandel

[12] CO2-Ausstoß in Deutschland, BMU, 2006

[13] Antwort von Umwelt- und Entwicklungsverbänden auf den Brief der SPD-MdB Ulrich Kelber und Ulrike Mehl zu „Klimaschutz in Deutschland bis 2020“, Germanwatch.de

[14] VCD Materialien, Klimawandel und Verkehr, Informationen und Lösungswege, 2004

Weltölreserven

[15] Dr. Robert L. Hirsch, The Inevitable Peaking of World Oil Production, in The Altlantic Council of the United States, 2005 (Hirsch Report)

[16] Kjell Aleklett, A World addicted to Oil, Uppsala Universität, Schweden, Foliensatz

[17] Websites U.S. Geological Survey USGS, Association of Peak Oil (ASPO)

Bücher

[18] G. Daniel Brewer, Hydrogen Aircraft Technology, 1990, (nur noch antiquarisch erhältlich)

 © K.L.S. Publishing, all rights reserved

Was ist ein e-Journ?

Ein e-Journ ist ähnlich wie ein e-Book eine elektronische Publikation, nur dass es sich dabei wegen der geringeren Größe (minimal 2, maximal 30 Seiten) nicht um vollständige Bücher handelt, sondern um einzelne Bausteine ähnlich einem Kapitel in einem Buch oder einem journalistischen Beitrag in einer Zeitschrift.

K.L.S. Publishing e-Journs sind allesamt als Fachartikel für Luftfahrtmagazine oder als abgeschlossene Kapitel für Luftfahrtbücher entstanden.

K.L.S. Publishing bietet e-Journs als Einzelwerke zum Kauf an. So hat jeder Leser die Möglichkeit, einzelne Bausteine oder einzelne Artikel jeweils frei nach Interesse selbst zusammenzustellen. Hiermit kann der Leser flexibel eine eigene Wissensbibliothek aufbauen. Die Preise der E-Journs werden auf der Basis eines geringen Seitenpreises errechnet und sind damit kostengünstig im Vergleich zu Büchern.

K.L.S. Publishing, Köln
http://klspublishing.de/