

## Wasserstoff in der Luftfahrt

Die Geschichte der Luftfahrt zeigt Schübe – technische, ökonomische und zeitliche. Die Gebrüder Wright flogen 1903 die Kitty Hawk. Ihre Stringer und Spanten waren aus Holz, die Flügelbeplankung aus Segeltuch, Spanndrähte hielten alles zusammen. Sie hatte ein Propeller-Triebwerk und flog einen Passagier über die Reichweite, die man in Metern maß. Charles Lindbergh legte 1927 die Strecke USA – Paris nonstop in 33 Stunden zurück. Mit dem Anfang der zivilen Luftfahrt kamen die ersten Ganzkonstruktionen aus Aluminium, zwei und mehr Propeller-Antriebe garantierten Reichweite und Geschwindigkeit. Die ersten kommerziellen trans-ozeanischen Flüge verbanden die Kontinente. In den späten 1930/40er Jahren sorgten die ersten Strahltriebwerke für Schub. Der Druckrumpf gewährleistete angenehmes Fliegen auch in großen Höhen (geringeren Widerstands) bei Minus-Außentemperaturen. Boeing führte 1969 mit dem „Jumbo“ Flugreisen für die Massen ein, die Passagierzahlen stiegen auf 400. Heute fliegt der Airbus A380 bis zu 800 Passagiere ohne Zwischenstop rund um die halbe Welt. Eine technische Meisterleistung – wenn auch die wirtschaftliche ausblieb – waren die 1976 eingeführten und 2003 ausgemusterten eleganten englisch-französischen Überschall-Concordes, welche die Flugzeiten London – New York auf wenige Stunden schrumpfen ließen. Heute verwendet die Luftfahrtindustrie tragende Strukturen aus faserverstärktem Kunststoff, die Gewichtseinsparungen sind enorm, Festigkeit und Steifigkeit nehmen zu. Alles zusammengefasst, in mehreren Schüben über nur gut hundert Jahre, eine bemerkenswerte technische und ökonomische Entwicklung zum weltumspannenden Flugverkehr. Mit einem Sicherheitsstandard, der, bezogen auf den Personen x Kilometer, alle anderen Verkehrssysteme bei Weitem übertrifft.

Und was kommt nun? Welcher Schub steht bevor? Denn stehen bleiben wird die Luftfahrt bei dem Erreichten nicht! Hundert Jahre Luftfahrtgeschichte sind nicht abgeschlossen. Graduelle Fortentwicklungen zu besserer Aerodynamik, zu leichteren Strukturen, zu höheren Effizienzen der Triebwerke und damit geringerem Verbrauch, zu weniger Lärm, zu geringeren Kosten der Infrastruktur haben die Luftfahrtentwicklung ständig begleitet. Sie werden sie weiter begleiten, "until something new comes along" (David S. Scott (1)).

"Something new" - wann wird sich der neue Schub einstellen? Ein Schub vom Kaliber der Einführung der Strahltriebwerke oder des Überschallflugs? Stephen Jay Gold(2) nennt die regelmäßigen Schübe aufeinander folgender neuer Entwicklungsergebnisse "punctuated equilibria", getrennt durch Zeiten langsamer, nahezu „glazialer“ Langsamkeit des Fortschritts. Es gibt Tendenzen, auf welche die Luftfahrt reagieren muss - und wird. Immer mehr Flughafenanrainer verlangen drastischere Lärminderungen über den bisherigen Stand hinaus. Der anthropogene Klimawandel bleibt von den Beiträgen der Luftfahrt nicht verschont, die gravierend sind, weil die Fliegerei in großen Höhen der einzige Emittent von Treibhausgasen ist. Wenn auch Flugkraftstoff über einen endlichen Zeitraum kaum auszugehen droht, so kann schon jetzt die kontinuierliche, wirtschaftlich schmerzliche Zunahme des Preises wahrlich nicht mehr negiert werden.

Wasserstoff hat alle Chancen, den nächsten Schub in der Luftfahrtentwicklung zu liefern. Wasserstoff als Flugkraftstoff ist gut vorbereitet. Wasserstoff, mit dem 1988 die Tupolev TU155 flog oder Cryoplane, eine deutsche Studie – unter Mitarbeit russischer Kollegen. Ebenso gab es eine große Zahl von Experimentalflugzeugen mit wasserstoffversorgten Brennstoffzellen an Bord und folglich elektrischem Propellerantrieb. Mit all dem und vielem mehr ist über Jahrzehnte ein Fundus an Wissen und Erfahrung entstanden, der es ganz und gar nicht illusionär erscheinen lässt, mit dem Wasserstoffflugzeug den nächsten Schub in der Luftfahrt zu erwarten.

Wir fragen, warum wir nicht längst auf Wasserstoffflugzeuge umgestiegen sind. Diese tragen zum anthropogenen Klimawandel solange nicht bei, wie sie innerhalb oder unterhalb der Tropopause – je nach Ort in der Atmosphäre circa 10 000 Meter über Boden – fliegen. Dort ist der Wasserdampf aus der Schubdüse im Verhältnis zur natürlichen Wasserdampfhaltigkeit vernachlässigbar. Allerdings ist dort auch der Luftwiderstand höher, der durch die höhere Effizienz des Flugzeugs kompensiert werden muss.

Wasserstoff wird in verflüssigter Form an Bord genommen (LH<sub>2</sub> liquefied hydrogen), er hat eine Temperatur von 20 K. Seine Dichte ist kleiner als diejenige von Kerosin, sodass die Flügel nicht

mehr genügend Raum bieten. Lösungen bieten Vakuum-isolierte kryogene Tanks vor und hinter der Fluggastkabine oder über ihr, dann würde der Rumpfquerschnitt eine 8-Form annehmen. Wasserstoff ist energetischer als Kerosin, folglich ist das Wasserstoff-Flugzeug bei vergleichbarer Mission leichter. Bei adäquatem Auftrieb würde die Flügelfläche kleiner werden, die Länge der Start- und Landebahn kürzer.

Es gibt weitere Vorteile, die dem Gesamtsystem Wasserstoff-Flugzeug zugerechnet werden. Flüssigwasserstoff ist vor Eintritt in die Brennkammer zu vergasen (PGH<sub>2</sub> pressurized gaseous hydrogen). Das geschieht vorzugsweise durch Oberflächenkühlung von Flügeln, Höhen- und Seitenleitwerken, mit dem willkommenen Effekt, den Bereich der verlustärmeren laminaren Umströmung der Flügeloberfläche zu Lasten der verlustreicheren turbulenten Umströmung über der Flügelsehne auszudehnen.

Mit Wasserstoff an Bord wird eine Niedertemperatur-Wasserstoff/Sauerstoff-Brennstoffzelle die Stromversorgung übernehmen, wenn das Flugzeug an der Rampe steht und während des Taxibetriebs die Triebwerke abgeschaltet bleiben. Der Lärm und die Abgase des APUs (auxiliary power unit) entfallen. Bugräder werden elektromotorisch angetrieben, sodass die Rangierfahrzeuge entfallen.

Die Luftfahrt ist in professionellen Händen. Die Handhabung von Wasserstoff bei der Betankung, gegebenenfalls Enttankung, und der Betrieb der gesamten Infrastruktur am Flughafen geschehen professionell. Der Gedanke liegt nahe, die Luftfahrt bei der Einführung der Wasserstoffenergie-wirtschaft vorangehen zu lassen. Das fliegende Personal, die Infrastruktur-Mitarbeiter sind gewohnt, mit Hochtechnologie umzugehen. Sicherheitsbelange sind bei ihnen in erprobten Händen.

Sicherheit ist oberstes Gebot. Wie jede Form von Energie hat Wasserstoff seine spezifischen Risiken. Keine Technologie kennt absolute Sicherheit, die jeweilig relative Sicherheit zählt. Die Affinität von Wasserstoff zu Sauerstoff ist hoch. Kleinste Zündquellen genügen, um zündfähige Wasserstoff/Sauerstoff-Verbindungen zur Reaktion zu bringen. Jedoch, weil Wasserstoff das kleinste Element im Periodensystem der Elemente ist, ist seine Diffusivität in Luft hoch. Etwaige Wasserstoffleckagen entweichen rasch vertikal in die Atmosphäre, ihre Aufenthaltsdauer am Ort ihrer Entstehung ist kurz. Da der Kraftstoff Wasserstoff keinen Kohlenstoff enthält, können Menschen nach Unfällen nicht vergiftet werden oder ersticken.

Wasserstoff ist Sekundärenergie, wie Strom. Beide werden aus allen Formen von Primärenergie hergestellt. Wasserstoff stammt derzeit überwiegend aus der Reformierung von Erdgas oder der Kohlevergasung, Elektrolyse-Wasserstoff steht dagegen zurück. Das wird sich im Zuge der Maßnahmen gegen die anthropogenen Klimawandel ändern, wenn erneuerbare Energien zunehmend an die Stelle der fossilen Primärenergien treten. Die bevorzugten Technologien erneuerbarer Energienutzung – Photovoltaik, Wind, Wasserkraft – produzieren Strom, der in den Elektrolyseuren in Wasserstoff (und Sauerstoff) umgewandelt wird. Für etwaige Rückverstromung sorgen sehr effiziente Brennstoffzellen.

Die Wasserstoff-Luftfahrt ist selbstverständlich nicht allein Veranlassung für den Aufbau der Wasserstoffenergie-wirtschaft. Hinzukommen die Millionen Brennstoffzellenfahrzeuge und die stationären Brennstoffzellen als Ersatz für die heutigen Heizkessel. Beide nutzen Niedertemperaturbrennstoffzellen, die mit Wasserstoff und Luftsauerstoff betrieben werden. Wasserstoff als Kraftstoff an Bord der Automobile verzichtet auf bordeigene Reformer, das spart Gewicht, Volumen – und Kosten.

Wer den Blick gen Himmel richtet, sieht Kondensstreifen. Sie bestehen aus Eiskristallen, die in großen Höhen und niedrigen Temperaturen aus Wassertröpfchen gebildet werden. Diese entstehen hinter der Schubdüse von Flugtriebwerken aus Wasserdampf, dem Verbrennungsprodukt von Wasserstoff und Luftsauerstoff. Heutige Flugzeuge verbrennen Kerosin. Sie emittieren mithin auch Kohlenstoffverbindungen und – unter bestimmten Bedingungen, etwa in der Startphase – geringe Mengen Ruß. Künftige Wasserstoff-Flugzeuge sind davon frei.

Zu guter Letzt wird immer wieder die Frage nach den Kosten gestellt. Hierauf gibt es zwei Antworten. Erstens: 50 Millionen Tonnen Wasserstoff werden weltweit produziert und gehandelt. Hinzukommen die weitaus größeren Mengen Wasserstoff, die in der Wasserstoffchemie und den Raffinerien erzeugt und gleich vor Ort genutzt werden (captive hydrogen). Hier hat sich offenkundig ein wirtschaftliches Preisgefüge entwickelt. Dieses käme der bevorstehenden Wasserstoffenergiewirtschaft zugute, wenn, ja wenn es die Infrastruktur der Verflüssigung sowie des Transports und der Speicherung von Wasserstoff zur Flughafenversorgung schon gäbe. Zwar ist all dies in Industrieländern in Betrieb, aber nicht im Entferntesten so ausgelegt, dass zusätzlich auch die Flughäfen versorgt werden könnten. Hier sind erhebliche Investitionen nötig. Anleihen an Erfahrung gewährt die Luftfahrtschwester, die Raumfahrt, die seit einem halben Jahrhundert Nutzlasten in den Weltraum befördert. Ohne Wasserstoff gäbe es die Raumfahrt in ihrer jetzigen Form gar nicht!

Und die zweite Antwort, erläutert am Beispiel der Wasserstofffahrzeuge am Boden: Der Preisauftrieb bei Benzin und Diesel, etwa an den Tankstellen in Deutschland, hat inzwischen 1,7 Euro/Liter erreicht, entsprechend exorbitanten 10,58 \$/US-gallon ( $\text{€}/\$ = 1,3$ ;  $\text{gallon/Liter} = 4,785$ ). Wissend, dass der energetische Inhalt einer Gallone Benzin (ungefähr gleich einer Gallone Kerosin) demjenigen eines Kilogramms Wasserstoff entspricht, würden 10 \$/kg Wasserstoff die wettbewerbliche Preisschwelle bereits bei weitem überschritten haben! Hinzukommt, dass die Brennstoffzellen an Bord der Autos etwa den doppelten energetischen Wirkungsgrad der Verbrennungskraftmaschinen haben und folglich bei vergleichbarer Mission nur halb so viel Kraftstoffverbrauch! Um die Kosten der Wasserstoffenergiewirtschaft brauchen wir uns mithin keine Sorgen zu machen, wenn, ja erneut, wenn die Infrastruktur des Wasserstofftransports und der Tankstellen bereits errichtet wäre. Bei 15 000 Tankstellen in Deutschland und einer Investition pro Tankstelle von 1 Million Euro müssten 15 Milliarden Euro aufgebracht werden. Nicht auf einmal, sondern – auch hier – in Schüben.

## **Fazit**

Wasserstoff in der Luftfahrt ist durchaus keine Illusion, sondern nach allen Regeln verlässlichen Ingenieurwesens eine realistische Chance für den nächsten Technologieschub. "For something new which comes along", das nicht nur schlicht „neu“ ist, sondern mit einer Fülle von überzeugenden technischen, ökonomischen und ökologischen Vorzügen aufwartet. Im 20. Jahrhundert schafften hundert Jahre die Entwicklung von Kitty Hawk zum Massenluftverkehr mit konkurrenzloser Betriebssicherheit. Dass ein nächster Schub bevorsteht, steht außer Frage. Eine erste Wasserstoffflotte zur Mitte des 21. Jahrhunderts fügte der Sicherheit umwelt- und Klima-ökologische Sauberkeit hinzu.

- (1) David S. Scott, Smelling Land, The Hydrogen Defense against Climate Catastrophe, Published by the Canadian Hydrogen Association [www.h2.ca](http://www.h2.ca), ISBN 978-0-9809674-0-1
- (2) St. J. Gold and N. Eldredge, Punctuated equilibrium comes of age, Nature, 366, 223-27, 1993