



## Green Freighter (Grüne Frachter) - Manfred Richey (Aktualisiert 15.06.2013)

Der "Grüne Frachter" war ein Forschungsverbundvorhaben mit einer Dauer von nominell 3 Jahren. Das Projekt startete am 1. September 2006 und endete am 30. April 2010.

Titel des Forschungsvorhabens

Entwurfsuntersuchungen zu umweltfreundlichen und kosteneffektiven Frachtflugzeugen mit unkonventioneller Konfiguration („Der Grüne Frachter“)

Projektpartner

- Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW) – Federführer
- Institut für Flugzeugbau und Leichtbau (IFL) an der Technischen Universität Braunschweig
- Airbus in Hamburger mit dem Future Project Office (FPO)
- Bishop GmbH

Projektziele

Ziel war, konventionelle und unkonventionelle Frachtflugzeugkonfigurationen zu erforschen. Die Untersuchungen basieren auf einem angenommenen Jahr der Indienstellung um 2025. Im Mittelpunkt standen umweltfreundliche Flugzeuge mit ökonomischem Flugbetrieb. Das schließt folgende technische Aspekte ein:

- geringer Kraftstoffverbrauch
- zukünftige Kraftstoffarten (LH2, LPG, synthetische Kraftstoffe, ...)
- geringer Fluglärm (Nachtflug)
- geringe Emissionen (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, ...)
- geringe Betriebskosten auch durch reduzierte Besatzung (pilotenloser Flug)

Ausgangssituation bei Projektbeginn / praxisrelevante Problemstellung

Aufgabe der Projektpartner war es, konventionelle und unkonventionelle Flugzeuge zu untersuchen, die speziell für den Frachtluftverkehr ausgelegt sind und einen umweltfreundlicheren und preiswerteren Betrieb im Vergleich zu heute eingesetzten Frachtflugzeugen erlauben. Die wissenschaftlich und technisch herausfordernden Themen hierbei waren:

1. Unkonventionelle Flugzeugkonfigurationen (sog. Blended-Wing-Body, BWB)
2. Flugzeugantriebe mit unkonventionellen Kraftstoffen (Wasserstoff)
3. Erstellung bzw. Erweiterung von Entwurfsverfahren und Softwarewerkzeugen für unkonventionelle Flugzeugkonfigurationen und Flugzeugantrieben mit unkonventionellen Kraftstoffen
4. Ein-Mann-Cockpit / unbemannter Frachter
5. Wasserstoff-Kraftstoffsystem

Methoden und Werkzeuge

"Aircraft preliminary sizing" wurde mit einem Tabellenkalkulationsprogramm der HAW durchgeführt. Vertiefte Arbeiten zum Flugzeugentwurf, der Analyse und Optimierung wurden mit dem Programm PrADO (Preliminary Aircraft Design and Optimisation program) des IFL durchgeführt. PrADO wurde im Hinblick auf die neuen Features der Frachtflugzeuge weiter entwickelt. Einige Arbeitspakete des Projektes (Untersuchungen zur Fracht, zum LH<sub>2</sub>-Kraftstoffsystem, zum pilotenlosen Flug, ...) wurden im Wesentlichen mittels Literaturrecherchen und theoretischer Überlegungen durchgeführt. Aus dem Tabellenkalkulationsprogramm der HAW entwickelte sich das Projekt PreSTo (Preliminary Sizing Tool).

(Fortsetzung auf Seite 22)

(Fortsetzung von Seite 21)

#### Mitarbeiter und Finanzen

Der HAW-Anteil am Grünen Frachter wurde mit 234 000 EUR finanziert durch das FH3 Programm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Die finanzielle Abwicklung hatte die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) als Projektträger übernommen. Dipl.-Ing. Kolja Seeckt arbeitete Vollzeit an der HAW Hamburg am GF-Projekt. Die TU Braunschweig arbeitete - finanziert durch Airbus - am Projekt im Umfang von etwa einem Mitarbeiter. Insgesamt waren rechnerisch 2,6 Mitarbeiter am Projekt beteiligt - unterstützt von sehr vielen Studenten. Das Gesamtvolumen des GF Projektes betrug 646 000 EUR.

#### Einfache Erkenntnisse aus dem Projekt

Das Ende fossiler Kraftstoffe bedeutet nicht das Ende des Fliegens. Wasserstoff kann als Energieträger genutzt und in Strahltriebwerken verbrannt werden. Wasserstoff ist sicher und lässt sich durch Elektrolyse einfach herstellen. Mit verschiedene innovative Methoden, die derzeit noch erforscht werden, soll Wasserstoff noch effizienter als durch Elektrolyse hergestellt werden. Die Energie die zur Wasserstoffproduktion erforderlich ist würde idealerweise oder nach dem Ende fossiler Kraftstoffe aus regenerativen Energiequellen kommen. Das große Volumen des Wasserstoffs erfordert eine Speicherung im Flugzeug unter hohem Druck oder in verflüssigtem (extrem kaltem, kryogenem) Zustand. Die Verwendung von flüssigem Wasserstoff (LH2) ist davon bei großen Flugzeugen die praktikablere und sichere Variante.

#### Vorteile von LH2 sind:

1. Fliegen bleibt auch nach dem Ende fossiler Kraftstoffe möglich. Bereits heute ist die LH2-Technologie im Flugzeug bekannt und anwendbar.
2. Die Verbrennung von Wasserstoff ist (nach Abwägung aller Umstände) erheblich umweltfreundlicher als die von Kerosin.
3. Falls zur Erzeugung von Sekundärenergien im Flug (hier: Elektrik) die Brennstoffzelle (aufgrund hoher Wirkungsgrade) zum Einsatz kommt, dann wäre für deren Einsatz der optimale Kraftstoff (Wasserstoff) bereits an Bord verfügbar.

#### Nachteile von LH2 sind:

1. Herkömmliche Flugzeuge können nicht genutzt werden. Um die gleiche Nutzlast über die gleiche Reichweite zu transportieren müssen neue größere Unterbringungsräume für die (nahezu) zylindrischen LH2-Tanks gefunden werden.
2. LH2-Flugzeuge sind aufgrund der großen Tanks größer und zeigen damit einen höheren Nullwiderstand. Positiv wirkt sich jedoch aus, dass der Kraftstoff leichter ist, damit sinkt der induzierte Widerstand. Insgesamt gesehen zeigen alle untersuchten LH2-Konfigurationen (nur) leicht höhere Betriebskosten im Vergleich mit Flugzeugen, die mit Kerosin betrieben werden (bei gleichem Kraftstoffpreis pro Energieeinheit).
3. Es ist eine neue Infrastruktur am Flughafen erforderlich, um LH2 für das Flugzeug bereit zu stellen.
4. Trotz der Isolierung der Tanks erwärmt sich der Wasserstoff und wird teilweise wieder gasförmig. Im Flug kann dieser Wasserstoff verbraucht werden. Am Boden würde der Druck im Tank steigen und Wasserstoff müsste abgelassen werden. Ein betanktes Flugzeug kann also nicht einfach so auf dem Vorfeld stehen gelassen werden. Eine Betankung ist erst kurz vor dem Start sinnvoll. Der Flugbetrieb muss diesen Umstand berücksichtigen und wird damit etwas weniger flexibel.

(Fortsetzung auf Seite 23)

(Fortsetzung von Seite 22)

zu Nachteil 1.)

Zur optimalen LH2-Unterbringung könnte

- a) eine unkonventionelle Flugzeugkonfiguration gewählt werden. Hier bietet sich die voluminöse Blended Wing Body (BWB) Konfiguration an.
- b) eine konventionelle Flugzeugkonfiguration (Flügel-Rumpf) sollte so realisiert werden, dass die Kraftstofftanks vorn und hinten im Rumpf untergebracht werden (siehe Bild). Andere Anordnungen (Tanks über Kabine/Frachtraum, außenliegende Tanks, ...) sind weniger optimal.

Beobachtungen außerhalb des Arbeitsumfangs des Forschungsprojektes

Aufgrund der Nachteile 1 und 3 wären erhebliche Investitionen in Flugzeuge und Flughafeninfrastruktur erforderlich. Daher zeigt die Luftfahrtindustrie eine große Zurückhaltung gegenüber dem Einsatz von Wasserstoff. Hoffnungen werden in Biokraftstoffe gesetzt. Biokraftstoffe können mit herkömmlichem Kerosin gemischt werden (Drop-In-Fuel). Schritt für Schritt könnten Biokraftstoffe Kerosin auch ganz ersetzen. Biokraftstoff soll aus Algen gewonnen werden auf Flächen, die nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen. Jedoch werden die Verfahren zur Kraftstoffproduktion aus Algen heute noch nicht beherrscht. Eine preiswerte Produktion im großen Maßstab ist noch nicht in Sicht (FLIGHT 2011)<sup>1</sup>). Biokraftstoff gewonnen aus einem technisch hergestellten Synthesegas (bestehend aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid) ohne Einsatz von Pflanzen ist ein weiterer Hoffnungsträger. Dies wird z.B. an der ETH Zürich erprobt, wo das Synthesegas in einen Solar-Reaktor bei 1500 °C erzeugt wird. Bisher ist der Wirkungsgrad in der Versuchsanlage noch gering; er beträgt weniger als ein Prozent (Chueh 2010)<sup>2</sup>). Da alles danach aussieht, dass der Einstieg in die Wasserstofftechnologie in der Luftfahrt heute nicht vollzogen wird, bleibt nur zu hoffen, dass die Biokraftstoffe rechtzeitig in großer Menge und effizient bereitgestellt werden können.

Sollte der Biokraftstoff als Drop-In-Fuel für herkömmliche Flugzeuge in absehbarer Zeit nicht zur Verfügung stehen, dann wäre es auch für den rechtzeitigen Einstieg der Luftfahrt in die Wasserstofftechnologie zu spät, weil dies Zeit braucht für die neuen Flugzeuge und Infrastrukturen am Boden. Eine weitgehende Durchdringung der Weltflotte mit LH2-Flugzeugen dauert Jahrzehnte bedingt durch die langen Produktzyklen in der Luftfahrt. Auch der Bau der Infrastruktur für LH2 (Versorgungswege, Tanklager, ...) erfordert viele Jahre. Alles deutet darauf hin, dass wir die Zukunft einfach auf uns zukommen lassen werden. Hinterher sind wir dann klüger, was am besten hätte getan werden müssen.

<sup>1</sup>) FLIGHT 2011:

<http://www.flightglobal.com/articles/2011/04/19/355624/us-air-force-moves-closer-to-greening-its-fleet.html>

<sup>2</sup>) Chueh 2010: <http://www.pre.ethz.ch/publications/journals/full/j236.pdf>

Quelle des vorstehenden Artikels: <http://GF.ProfScholz.de>; mit freundl. Genehmigung von Prof. Dr. Scholz'

## Unkonventionelle Flugzeugkonfiguration

### Blended Wing Body

Im Beitrag 'Grüner Frachter' wird die die voluminöse Blended Wing Body (BWB) Konfiguration als unkonventionelle Flugzeugkonfiguration erwähnt. Die Abbildung zeigt ein Konzept mit (Hybrid) Wasserstofftechnologie.

Die Idee des Blended Wing Body ist so neu nicht. Hier eine kurze Beschreibung, ein kleiner Ausflug in die Vergangenheit und ein Ausblick in die Zukunft. Quelle: <http://de.wikipedia.org/>

Der Blended Wing Body (BWB, in englisch etwa für „übergangslose Flügel-Rumpf-Verbindung“) stellt ein alternatives Flugzeugkonzept dar, das Merkmale herkömmlicher Rohr-mit-Flügel-Konzepte mit denen von Nurflüglern verbindet. Er zeichnet sich durch einen abgeflachten, aerodynamisch geformten

(Fortsetzung auf Seite 24)

(Fortsetzung von Seite 23)

Rumpf aus, der sich zwar von den Flügeln klar abgrenzen lässt, dessen Form jedoch fließend in die Flügelform übergeht. Der Rumpf hat hierbei einen relevanten Anteil am Auftrieb des Flugzeuges.

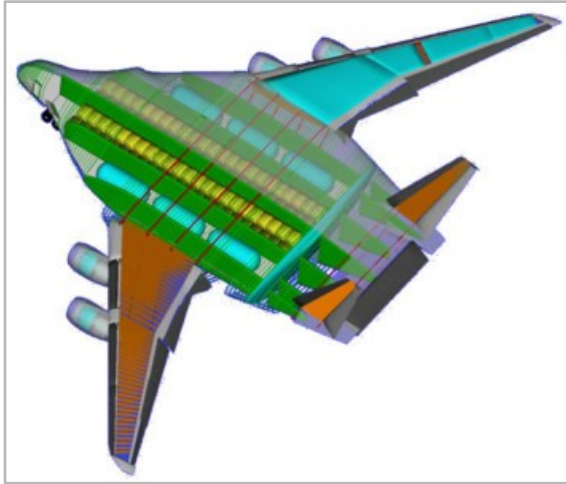


Abb. 1 - Blended Wing Body (BWB) Konzept,  
mit freundl. Genehmigung von Prof. Dr. Scholz  
<http://GF.ProfScholz.de>

### Geschichte

Der Vorläufer für das Konzept Blended Wing Body kann in Hugo Junkers' Nurflügel-Patent von 1910 gesehen werden. Ein frühes Beispiel für ein Flugzeug entsprechend dem BWB-Prinzip stellt die Junkers G 38 dar, in deren „dicken Flügeln“ nicht nur Motoren und Treibstoff sondern auch je sechs Passagiere untergebracht waren.

Anfang der 1920er Jahre wurde mit der Westland Dreadnought auch in Großbritannien ein Passagierflugzeug nach diesem Konzept gebaut und geflogen.

### Aktuelle Anwendung

Aktuell arbeiten **Boeing** und die **NASA** unter der Projektbezeichnung X-48 an der Erforschung eines BWB sowohl für zivile als auch für militärische Zwecke. Hierfür wurden mit der X-48B und X-48C bereits flugfähige 1:12-Modelle zur Erprobung der Flugeigenschaften gebaut.



Abb. 2 – Boeing X-48B vor dem Start

Quelle: <http://en.wikipedia.org>  
Autor: Tony Landis for NASA

(Fortsetzung auf Seite 25)



(Fortsetzung von Seite 24)

### Testflug Prototyp Boeing X-48B



Abb. 3 - Boeing X-48B in der Luft

Quelle: <http://en.wikipedia.org>  
Autor: Carla Thomas/Nasa

Der erste Testflug des unbemannten Prototyps Boeing X-48B im Maßstab 1:12 mit einer Spannweite von 6,4 Metern und einem Gewicht von etwa 250 kg fand am 20. Juli 2007 am Dryden Flight Research Center der US-Weltraumbehörde NASA in Kalifornien statt. Der Erstflug dauerte 31 Minuten. Das ferngesteuerte Modell erreichte dabei eine Geschwindigkeit von 120 kts (222 km/h) und eine Flughöhe von 2.286 Metern (7.500 ft). Ende März beendete die X-48B mit dem achtzigsten Flug erfolgreich das bisher ausführlichste Flugtestprogramm für unbemannte Flugzeuge bei der NASA.

### Testflug Prototyp Boeing X-48C



Abb. 4 - Boeing X-48C vor dem ersten Flug; Quelle: <http://en.wikipedia.org> Autor: Carla Thomas/Nasa

Der erste Testflug des ferngesteuerten Modells X-48C fand am 7. August 2012 in NASA's Dryden Flight Research Center at Edwards Air Force Base in California statt. Dabei stieg das Flugmodell bis auf eine Höhe von 5.500 Fuß (ca. 1.800 m) und landete 9 Minuten später wieder.

(Fortsetzung auf Seite 26)

(Fortsetzung von Seite 25)



Abb. 5 - Boeing X-48C im Flug; Quelle: <http://www.nasa.gov>

Auch das **DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.)** forscht am „Flugzeug der Zukunft - Blended Wing Body“, wie einer Meldung vom 9.9.2011 zu entnehmen ist. Seit 2009 forscht das Team um Björn Nagel und Pier Davide Ciampa von der DLR-Einrichtung für Lufttransportsysteme an der Modellierung von Blended Wing Body-Konfigurationen im Vorentwurf. Erstmals haben die DLR-Wissenschaftler nun Kabinen- und Rumpfgestaltung sowie aerodynamische Auslegung für diese frühe Entwicklungsphase zusammengeführt. Abb. 6 zeigt eine Simulation.



Abb. 6 - Blended Wing Body - Simulation; Quelle: <http://www.dlr.de/> DLR (CC-BY 3.0)

(Fortsetzung auf Seite 27)

(Fortsetzung von Seite 26)

Etwas weiter als die DLR ist die ein **Team der HAW Hamburg**. Seit dem Jahr 2000 findet hier eine intensive Bearbeitung des Themas BWB statt. In dieser Zeit wurden zwei flugfähige Testmodelle gebaut und weitergehende Untersuchungen zur Aufteilung der Kabine in mehrere Klassen unter Berücksichtigung der gültigen Vorschriften in der Luftfahrt (z.B. Evakuierung im Notfall) angestellt. Gedacht wird an die Beförderung von 900 bis 1.000 Personen an Bord eines solchen Flugzeugs. Dabei kann die Spannweite schon einmal bis zu 80 m betragen. Um die vorhandenen Flughäfen nutzen zu können, müsste man dazu allerdings die Flügelenden wie bei einer Maschine auf Flugzeugträgern nach oben klappen können. Bei dem BWB-Konzept trägt der Rumpf neben den Tragflächen mit 30 Prozent zum Auftrieb bei und der Luftwiderstand ist durch die kleinere Oberfläche verringert. Das könnte einschließlich der hohen Passagierzahl und sparsamen Antrieben zu einer erheblichen Verringerung des Energiebedarfs pro Sitzkilometer führen.



Abb. 7 – AC 20.30, nicht flugfähiges Modell auf der AERO 2013 in Friedrichshafen; Bild: Torsten Pörschke

Das erste flugfähige Modell aus Kunststoff im Maßstab von 1:30 hatte als Antrieb zwei E-Fans, die von zwei Elektromotoren im Zusammenwirken mit Hochleistungsbatterien ihre Energie bezogen. Damit war eine Flugzeit von 12 Minuten möglich. Im Windkanal am Flughafen in Dresden-Klotzsche erfolgte im Jahr 2005 die Durchführung eines Flugtestprogramms. Nach einem späteren Absturz und dessen Reparatur wurde im Jahr 2009 ein neues Modell des AC 20.30 gebaut, mit dem die Erprobung nun fortgeführt wird.

Untersuchungen bei Boeing haben zu dem Ergebnis geführt, dass das BWB-Konzept auch zur Entwicklung einer Flugzeugfamilie geeignet ist. In diesem Fall wächst das Flugzeug nicht in der Länge, sondern in der Breite, wenn mehr Beförderungskapazität gewünscht wird. Unter Anwendung von 3 bis 6 Kabinensegmenten lassen sich so Sitzplätze für 200 bis 450 Passagiere unterbringen. Nur die Konstruktion des Druckkörpers (rechteckige Kabine) erfordert gegenüber herkömmlichen Maschinen einen Mehraufwand hinsichtlich des Gewichtes. Außerdem können keine Fenster eingebaut werden. Das Flugerlebnis ist dadurch für die Reisenden natürlich stark eingeschränkt.

(Fortsetzung auf Seite 28)

(Fortsetzung von Seite 27)

### **Vorteile Blended Wing Body**

Mögliche Vorteile dieser Bauart sind:

- eine höhere Effizienz als herkömmliche Bauarten, die durch einen stärkeren Auftrieb (der gesamte Rumpf erzeugt Auftrieb) und eine bessere Aerodynamik erreicht werden soll,
- weniger Lärm für den Fall, dass die Triebwerke oberhalb des Rumpfes angebracht werden,
- ein geringeres Leergewicht

### **Nachteile**

Mögliche Nachteile dieser Bauweise sind:

- die stärkeren vertikalen Kräfte, die auf Passagiere und Fracht wirken, die sich bei dieser Bauweise tendenziell weiter von der Längsachse des Flugzeuges entfernt befinden,
- die fehlende oder zumindest stark eingeschränkte Möglichkeit, Seitenfenster für Passagiere anzubringen,
- ein erhöhtes Gewicht und eine erhöhte Komplexität der Flugzeugstruktur bedingt durch die Schwierigkeit, einen nicht zylinderförmigen Rumpf druckstabil zu konstruieren

### **Konventionelle Flugzeugkonfiguration**

#### **Flügel-Rumpf**

Zu der ebenfalls im Beitrag 'Grüner Frachter' erwähnten konventionellen Flugzeugkonfiguration (Flügel-Rumpf) folgen hier weitere Informationen.

Eine konventionelle Flugzeugkonfiguration (Flügel-Rumpf) sollte so realisiert werden, dass die Kraftstofftanks vorn und hinten im Rumpf untergebracht werden. Andere Anordnungen (Tanks über Kabine/Frachtraum, außenliegende Tanks, ...) werden derzeit als weniger optimal eingeschätzt.

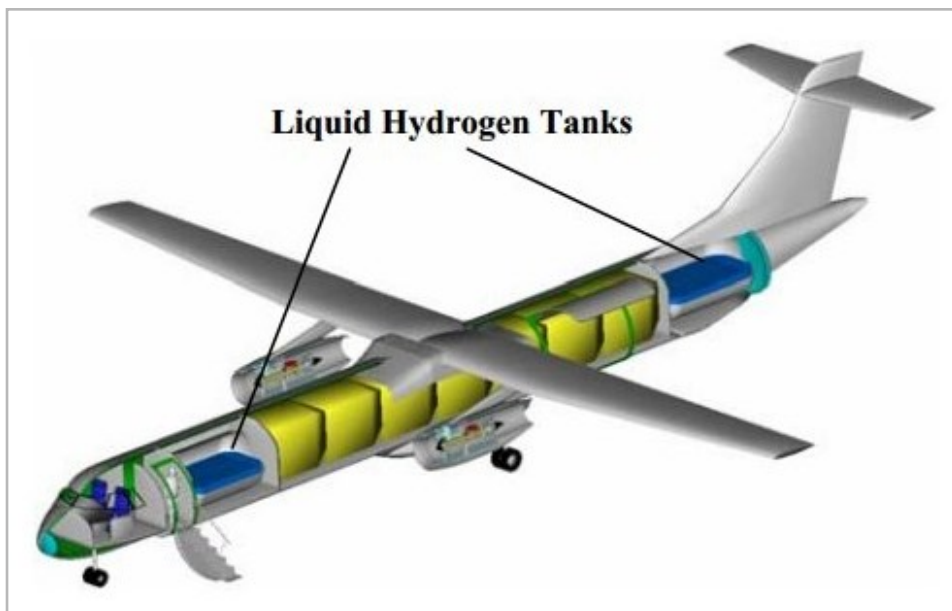


Abb. 8 – Flügel-Rumpf-Modell mit Wasserstoff  
mit freundl. Genehmigung von Prof. Dr. Scholz <http://GF.ProfScholz.de>

(Fortsetzung auf Seite 29)



(Fortsetzung von Seite 28)

Damit der Frachtraum (bzw. Passagierraum bei Linienmaschinen) in gleichem Umfang verfügbar ist wie bei konventionellen Flugzeugen gleicher Bauart, muss der Rumpf entsprechend verlängert werden. Nur so lassen sich dieselbe Anzahl der (normierten) Frachtcontainer befördern.

### Fazit

Es wird geforscht und es gibt gute Ansätze. Die Technologie ist bereits heute vorhanden um Wasserstoff bereit zu stellen und im Flugzeug einzusetzen. Um das größere Tankvolumen aufzunehmen sind neue Flugzeuge erforderlich und Wasserstoff erfordert eine neue Betankungsinfrastruktur.

Allerdings liegen die Probleme in der langfristigen Konzeption sowohl beim Flugzeugbau als auch bei der benötigten Infrastruktur wie Flughäfen und Versorgung mit Wasserstoff. Biokraftstoffe, die heute schon zum Teil in den konventionellen Flugzeugen verwendet werden, können nur eine Übergangslösung darstellen, da nicht absehbar ist, ob und wann diese in erforderlicher Menge verfügbar sind. Ein Umstieg der Luftfahrt in die Wasserstofftechnologie muss eher heute als morgen beginnen, ansonsten werden die fossilen Kraftstoffe verbraucht sein, bevor der Umstieg gelungen ist.

Bilder von <http://en.wikipedia.org> stehen unter der GNU-Lizenz für freie Dokumentation.

Alle Rechte an diesem Artikel liegen bei Manfred Richey, Nürtingen und bei den benannten Quellen. Nutzung bzw. Veröffentlichung nur nach vorheriger schriftlicher Zustimmung durch die Autoren. Anfragen bitte an: [kontakt@bio-wasserstoff.info](mailto:kontakt@bio-wasserstoff.info)