



TECHNIK IM FOKUS

DATEN FAKTEN HINTERGRÜNDE

Jochen Lehmann
Thomas Lushtinetz

Wasserstoff und Brennstoffzellen

Unterwegs mit dem saubersten Kraftstoff



Springer Vieweg

Technik im Fokus

Konzeption der Energie-Bände in der Reihe Technik im Fokus: Prof. Dr.-Ing. Viktor Wesselak, Institut für Regenerative Energiesysteme, Fachhochschule Nordhausen

Technik im Fokus

Photovoltaik – Wie Sonne zu Strom wird

Wesselak, Viktor; Voswinckel, Sebastian, ISBN 978-3-642-24296-0

Komplexität – Warum die Bahn nie pünktlich ist

Dittes, Frank-Michael, ISBN 978-3-642-23976-2

Kernenergie – Eine Technik für die Zukunft?

Neles, Julia Mareike; Pistner, Christoph (Hrsg.), ISBN 978-3-642-24328-8

Energie – Die Zukunft wird erneuerbar

Schabbach, Thomas; Wesselak, Viktor, ISBN 978-3-642-24346-2

Werkstoffe – Unsichtbar, aber unverzichtbar

Weitze, Marc-Denis; Berger, Christina, ISBN 978-3-642-29540-9

Werkstoff Glas – Alter Werkstoff mit großer Zukunft

Schaeffer, Helmut; Langfeld, Roland, ISBN 978-3-642-37230-8

3D-Drucken – Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert

Fastermann, Petra, ISBN 978-3-642-40963-9

Wasserstoff und Brennstoffzellen – Unterwegs mit dem saubersten Kraftstoff

Lehmann, Jochen; Luschtinetz, Thomas, ISBN 978-3-642-34667-5

Weitere Bände zur Reihe finden Sie unter

<http://www.springer.com/series/8887>

Jochen Lehmann · Thomas Luschtinetz

Wasserstoff und Brennstoffzellen

Unterwegs mit dem saubersten
Kraftstoff



Springer

Jochen Lehmann
FB Elektrotechnik und Informatik, Institut für Energie und Umwelt IFEU
e.V
Fachhochschule Stralsund
Stralsund, Deutschland

Thomas Luschtinetz
FB Elektrotechnik und Informatik, Institut für Regenerative EnergieSysteme
IRES
Fachhochschule Stralsund
Stralsund, Deutschland

ISSN 2194-0770

ISBN 978-3-642-34667-5

ISBN 978-3-642-34668-2 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-34668-2

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer.com

Vorwort

Im Jahre 2002 veröffentlichte der Deutsche Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e. V. eine Broschüre über Wasserstoff und Brennstoffzellen. Basiswissen, Historie und die Angabe von weiterführender Literatur waren für jedermann gedacht, denn, wie es im Geleitwort hieß, die kommenden notwendigen Änderungen in der Energiewirtschaft würden einen jeden betreffen.

Nur zwölf Jahre später steht unsere Gesellschaft inmitten der Diskussion um die Energiewende. Nicht etwa ein Ob und Wenn stehen zur Debatte, sondern das Wie wird besprochen. Die allgemeine Betroffenheit ist offenbar, der eine oder andere orientiert sich beruflich, Lehrpläne werden angepasst, Konzerne ändern ihre Entwicklungsziele, allerwenigstens aber ist es die Sorge um die Bezahlbarkeit, die immer wieder aufkommt. Mit der Behauptung, regenerative Energien bewirkten höhere Preise, werden die Tatsachen verbrämt, dass es die Umstellung ist, die Investitionen erfordert, und dass die Verknappung der konventionellen fossilen Energieträger deren Verteuerung bewirkt.

Um sich in diesem Prozess zu orientieren und positionieren zu können, braucht man Wissen. An dieser Stelle will das vorliegende Bändchen in der Reihe „Technik im Fokus“ helfen. Es will und kann nicht jeder Fachmann werden. Aber jeder sollte wissen, worum es geht.

Dem Verlag sei gedankt, dass entsprechend der Konzeption der Reihe auch der Laie angesprochen wird, sich einen Überblick zu verschaffen wie auch die Hinweise zur vertieften Beschäftigung mit der Thematik zu nutzen. Ein jeder sollte sich bewusst und überzeugt einbeziehen lassen und an der Umsetzung der Energiewende mitwirken.

Inhaltsverzeichnis

1	Der Energieträger Wasserstoff	1
1.1	Der Energieträger Wasserstoff	2
1.2	Wasserstoff in der Technikentwicklung	5
1.3	Wasserstoff und Elektrizität	9
	Literatur	11
2	Sicherung der Mobilität mit regenerativen Energien	13
2.1	Wieviel Energie benötigen wir zur Fortbewegung?	13
2.2	Grenzen der Verbrennungsmotoren	17
2.3	Einsatz regenerativer Energien im Verkehr	18
	Literatur	23
3	Brennstoffzellen als effiziente Energiewandler	25
3.1	Was sind Brennstoffzellen?	25
3.2	Wie funktioniert eine PEM-Brennstoffzelle?	30
3.3	Kennlinie und Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle	34
3.4	Das Brennstoffzellensystem	37
3.5	Weitere Brennstoffzellentypen und ihre Anwendungen	43
	Literatur	49
4	Antriebe mit Brennstoffzellen	51
4.1	E-Mobilität mit vielen Gesichtern – von BEV bis FCEV	52
4.2	Elektrische Speicher für Hybridfahrzeuge	56
4.3	E-Motore in Hybridantrieben	60
4.4	Stromversorgungssysteme (APU)	69
	Literatur	70

5	Wasserstoff als Kraftstoff	73
5.1	Energiedichte	73
5.2	Eigenschaften von Wasserstoff	76
5.3	Herstellung von Wasserstoff	79
5.4	Speicherung und Verteilung	88
5.5	Sicherheit und Handhabung	95
	Literatur	101
6	Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge	103
6.1	Wasserstoff in klassischen Verbrennungsmaschinen	103
6.2	Hauptantriebe mit Brennstoffzellen	109
	Literatur	125
7	Wege zur Nachhaltigkeit mit Wasserstoff	127
	Literatur	140
	Weiterführende Literatur	141
	Sachverzeichnis	145

... Oui, mes amis, je crois que l'eau sera un jour employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène, qui la constituent, utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisables et d'une intensité que la houille ne saurait avoir ... L'eau est le charbon de l'avenir.

„Je voudrais voir cela,“ dit le marin. „Tu t'es levé trop tôt, Pencroff,“ répondit Nab, qui n'intervint que par ces mots dans la discussion.

Ja, meine Freunde, ich glaube, dass Wasser eines Tages als Brennstoff genutzt werden wird, dass seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff, gemeinsam oder separat eingesetzt, eine unerschöpfliche Quelle von Wärme und Licht sein werden – mit einer Intensität, wie sie Kohle nicht erreicht ... Das Wasser ist die Kohle der Zukunft (Jules Verne, L'Île mystérieuse, 1874).

Zusammenfassung

Das weitaus häufigste Element unserer Welt ist Wasserstoff. Elementar kommt das Gas in der Natur aber so gut wie nicht vor. Es muss unter Energieaufwand aus Verbindungen herausgelöst werden. Da genau die dazu nötige Energie beim Verbrennen wieder frei wird, stellt Wasserstoff einen Energieträger und Kraftstoff dar. Er kann ohne schädliche Emissionen zu Wasserdampf verbrannt werden. Wasserstoff ist damit ein passendes Speichermedium für grünen Strom.

In diesem Kapitel wird gezeigt, dass wir regenerative Energie in steigendem Maße nutzen und auch speichern müssen, dass Wasserstoff als Kraftstoff im Verkehr (im Zusammenhang mit Brennstoffzellen) oder rückverstromt zur Stabilisierung der elektrischen Netze wie auch als industrieller Rohstoff wichtig werden wird. Beeindruckend ist dabei die bisherige Geschichte des Wasserstoffs und seiner

technischen Anwendung – er wird sicher und erfolgreich seit etwa zweihundert Jahren genutzt.

1.1 Der Energieträger Wasserstoff

Die Erfindung von James Watt (1782) begründete die industrielle Revolution. Seitdem wurden über Jahrmillionen eingelagerte Energiereserven gefördert, um die gewünschte Menge von Energie zu nutzen. Die Sonne als Strahlungsquelle (Licht und Wärme) und der von ihr bewirkte Wind sind für menschliche Begriffe zwar unendlich, die aus ihnen zur Nutzung gewinnbare Energie erweist sich, gemessen an dem in der Technik Üblichen, aber als dürftig.

In Zahlen fassen lässt sich diese Tatsache mit Hilfe der Größe *Leistungsdichte*. Das ist die pro Zeiteinheit und pro Flächenelement umwandelbare Energie, die als Strom oder Wärme genutzt werden kann:

Moderne Wärmekraftwerke, die typisch für die allgemeine Versorgung mit Elektrizität und Wärme und auf die Belieferung der Wirtschaft mit Energie zugeschnitten sind, haben üblicherweise eine Leistungsdichte von 500 kWm^{-2} .

Bei der Nutzung der regenerativen Energiequellen erreichen nur Turbinen in Wasserkraftwerken mit großen Stauhöhen solche Werte, alle anderen Energieumwandlungen liegen bei um Größenordnungen kleineren Leistungsdichten. Beispielsweise ergibt sich für eine Windenergieanlage mit 3 MW Nennleistung und einer Flügellänge von 40 m die Leistungsdichte zu etwa $0,6 \text{ kWm}^{-2}$. Gegenüber dem Kessel im Kraftwerk bedeutet das einen Faktor von 10^{-3} . Für die Nutzung der Sonnenstrahlung liegen die Werte in der gleichen Größenordnung, für Energieumwandlungen auf der Basis von Biomasse ergibt sich ein Faktor von 10^{-5} bis 10^{-6} . (Die Abschätzung des letztgenannten Wertes beruht auf dem Beispiel der Rapsölproduktion in Deutschland im Jahre 2012 mit einer Anbaufläche von 1,45 Millionen Hektar und der Ernte von 3,6 Millionen Tonnen Öl.)

Nun stehen Sonne und Wind tageszeit- und wetterbedingt nicht ständig mit konstanter bzw. planbarer Leistungsdichte an, wie wir es von den fossilen Kraftwerken kennen. Dadurch fehlt bei großem Strombedarf als auch geringem Einspeiseaufkommen Energie im Stromnetz, die mittels Reservekraftwerken oder gespeichertem Sonnen- und Windstrom be-

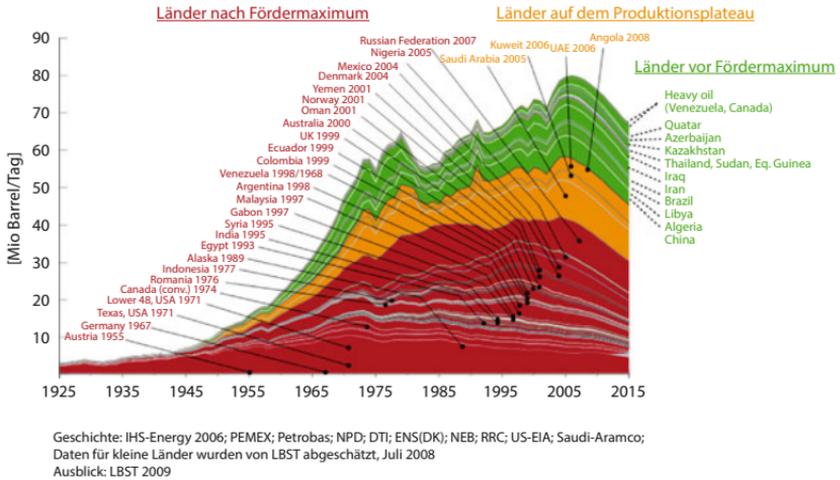


Abb. 1.1 Entwicklung der Erdölförderung nach Ländern [2]

darfsgenau auszugleichen ist, damit das Stromnetz in der Balance von Bereitstellung und Verbrauch bleibt.

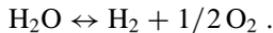
Trotz dieser geringen Leistungsdichte sind wir gezwungen, zukünftig im Wesentlichen regenerative Energie zu verwenden. Bereits 1713 erkannte Hans Carl von Carlowitz, dass Bäume nachgepflanzt werden müssen, wenn man Holz erntet, den Wald aber erhalten will. Damit formulierte er das Prinzip der Nachhaltigkeit. Leider hat es sich noch nicht durchgesetzt. Statt dessen haben die Industriegesellschaften die Vorkommen fossiler Energieträger so weit ausgenutzt, dass z. B. etwa 2005 das Maximum des Welthandelsvolumens von konventionellem Rohöl überschritten worden ist. Seitdem sinkt seine Produktion bei steigendem Bedarf (Abb. 1.1). Recherchen lassen sogar vermuten, dass der Maximalpunkt für alle fossilen Energierohstoffe einschließlich des Kernbrennstoffs um 2015 zu erwarten ist [1].

Es wurde demnach klar gegen das Prinzip der Nachhaltigkeit im ökonomischen Sinne verstoßen und die Wirtschaft nicht so angelegt, dass sie „dauerhaft eine tragfähige Grundlage für Erwerb und Wohlstand bietet“. Auch im ökologischen Sinn wurde keineswegs nachhaltig gehandelt, denn angesichts der auf menschliches Handeln zurückzuführenden

Beeinflussung des atmosphärischen CO₂-Haushalts ist nicht sicher, dass „Natur und Umwelt den nachfolgenden Generationen erhalten“ werden können [3].

In dem Versuch, den sich abzeichnenden Klimawandel noch zu dämpfen, und weil sich die Quellen der fossilen Energierohstoffe erschöpfen, was wir ohne alle Statistik an ihrer Preisentwicklung ablesen können, müssen die regenerativen Energiequellen in steigendem Maße die fossilen Energieträger ersetzen. Um dabei den ja weiter steigenden Energiebedarf hinsichtlich Strom, Wärme und Kraftstoffen zu jedem Zeitpunkt sicher zu decken, ist es notwendig, saubere Speichermöglichkeiten zu erschließen.

In dieser Situation richtet sich unsere Hoffnung auf Wasserstoff. Dieses Element ist das weitaus häufigste der Welt, allerdings kommt es auf der Erde außer in den höchsten Atmosphärenschichten nicht elementar vor. Um Wasserstoff als Element zu gewinnen, z. B. aus Methan, Alkohol oder Wasser, muss Energie aufgewendet werden. Bei diesem Prozess wird das Wasserstoffgas zum Energieträger, denn die eingesetzte Energie wird bei der Verbrennung des Wasserstoffs zu Wasser wieder frei, und ist z. B. als Kraftstoff nutzbar. Die chemische Gleichung verdeutlicht die Reaktionen:



Das Wasser wird über beide Prozesse zwar benutzt, aber nicht verbraucht. Kreisläufe wie dieser sind der Inbegriff der Nachhaltigkeit. In der Energiewirtschaft gibt es bislang nur diesen einen.

Wasserstoff wird als Energieträger seit 1808 verwendet. Mit etwa 50 % Anteil im Stadtgas enthalten, haben unsere Vorfahren damit beleuchtet, gekocht, geheizt und auch Verbrennungsmotoren betrieben (Abb. 1.2).

Als Kraftstoff für den Verkehr kam Wasserstoff am Anfang der 1970er Jahre in die Diskussion, als es zu einer vorrangig politisch verursachten Verknappung des Rohöls mit einem Preissprung bei Erdölprodukten kam. Mit der Benutzung von Wasserstoff als Kraftstoff öffnet sich der Pfad, regenerativ erzeugten Strom im großen Stil in den Verkehrssektor zu bringen.

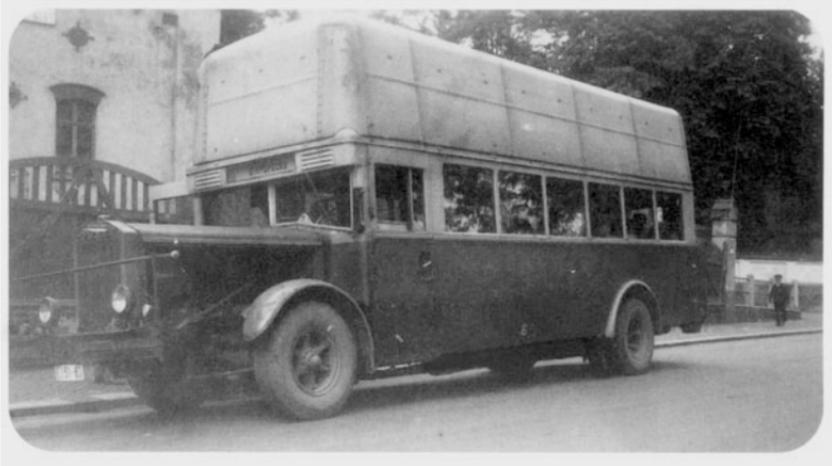


Abb. 1.2 Vomag-Bus mit Gasaufbau 1953 [7] (Quelle: Stadtwerke Zwickau)

1.2 Wasserstoff in der Technikentwicklung

Die antike Vorstellung, unser Lebensraum bestünde aus den vier Elementen Erde, Wasser, Luft und Feuer (Empedokles, 5. Jh.v. Chr.) wurde erst um 1600 durch Helmond um die Idee erweitert, es existierten auch andere „luftartige Stoffe“ oder „Gase“. Cavendish stellte 1766 aus Metall plus Schwefelsäure „brennbare Luft“ her, Scheele und Priestley fanden um 1772 unabhängig voneinander „Feuerluft“. Cavendish verbrannte 1781 beide miteinander und Lavoisier schlug 1787 die Begriffe „hydrogene“ und „oxygene“ vor. Bereits 1783, im Jahre der ersten Ballonfahrt Montgolfiers, demonstrierte A. C. Charles die geringe Dichte des Wasserstoffs, indem er einen 25 m³ fassenden Ballon aufsteigen ließ.

Diese Schritte, über die Wasserstoff als chemisches Element in das Bewusstsein der Menschen trat, hat Rudolf Weber für sein Buch „Der sauberste Brennstoff“ [4] zusammengetragen. Seine frühe Beschreibung einer neuen Technologie ist auch lesenswert, weil sie einen Einblick in die Diskussionen vor mehr als zwanzig Jahren gibt und damit die enormen Fortschritte verdeutlicht, die inzwischen bei der Wasserstofftechnik erreicht wurden.

Der Autor beschreibt, dass Johann Wilhelm Ritter bereits um 1800 Wasserstoff mittels Elektrolyse herstellte. In London erstrahlten im Jahre 1808 Straßenlampen in dem berühmt gewordenen „Gaslight“. Leuchtmittel waren Cer- und Thorium- oder Yttriumoxid imprägnierte „Glühstrümpfe“; verbrannt wurde ein Gemisch aus Luft und Stadtgas – ein Gemisch, das durch Leiten von Wasserdampf über glühenden Koks erzeugt wurde und etwa 50% Wasserstoff enthielt. Erst seit den 1960er Jahren wurde Stadtgas in Deutschland durch Erdgas ersetzt, das nunmehr zum Kochen und Heizen zur Verfügung stand.

Um 1820 erfand der Jenaer Professor Johann Wolfgang Doebereiner das nach ihm benannte und auch von ihm auf den Markt gebrachte Feuerzeug, in dem erstmalig bewusst Platin als Katalysator für die Entzündung eines Wasserstoff-Luft-Gemisches eingesetzt wurde. William Robert Grove stellte 1839 seine „Gas Chain“ als Prinzip der Brennstoffzelle vor. Die „kalte Verbrennung“, eine flammlose Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff, fand in gläsernen Röhren statt, in denen sich von Wasserstoff bzw. Sauerstoff umspülte und teilweise in einen Elektrolyten eintauchende Platinelektroden befanden, zwischen denen sich eine Spannung aufbaute. Ohne Bewegung, laut- und reibungslos wurde Strom erzeugt. Man muss sich fragen, warum es mehr als einhundert Jahre dauerte, bevor diese Erfindung auf das Interesse der Gesellschaft stieß und man begann, brauchbare Geräte aus ihr zu entwickeln.

Eine Antwort liegt in dem 1866 patentierten Generator von Werner von Siemens. Diese phantastische Maschine fand in Windeseile ihren Weg um die Erde, denn im Jahrhundert der Mechanik waren Konstruktion und Materialien dafür kein Problem und man konnte sie mit der Dampfmaschine antreiben. Die Erfindung von Grove dagegen erforderte Verständnis der elektro-chemischen Vorgänge, und zu ihrer effektiven Realisierung brauchte man besondere Materialien. Beispielsweise hat der Engländer Schmid um 1925 die sehr nützliche Gasdiffusionselektrode entwickelt. Und der Erfolg von Chemie und Materialwissenschaft mit Teflon und seinen Derivaten kam erst nach dem zweiten Weltkrieg.

Ebenso war es bei der Elektrolyse. Über 120 Jahre nach Ritters erfolgreichem Experimentieren, erst 1929 wurde die erste industrielle Elektrolyse am Wasserkraftwerk in Rjukan, Norwegen, angefahren. Dort brauchte man den preiswerten Wasserstoff für die Herstellung von Ammoniak für die Kunstdüngerproduktion. Hatte doch Fritz Haber 1909

mit seiner Ammoniaksynthese (1913 als Haber-Bosch-Verfahren) den Wasserstoff auf seinen Weg als Grundstoff für die chemische Industrie gebracht. In Rjukan übrigens wurde neben den Gasen Wasserstoff und Sauerstoff ein drittes Produkt aus den Elektrolyseuren gewonnen, angereichertes schweres Wasser, nutzbar in der Kerntechnik.

Wasserstoff als Energieträger – Historische Entwicklung

- 1783 A.C. Charles: Start eines Wasserstoffballons (25 m³)
- 1789 J.D. Deiman und A.P.van Troostwijk: Elektrolyse-Prinzip
- 1800 W. Nicholson und J. Ritter: Wasserelektrolyse mit Batteriestrom
- 1806 F.I. de Rivaz: Verbrennungsmotor mit Knallgas betrieben
- 1808 Gaslight in London (Stadtgas enthält etwa 50 % Wasserstoff)
- 1823 Doebereinersches Feuerzeug mit Platin als Katalysator
- 1839 C.F. Schönbein publiziert das Prinzip der Brennstoffzelle
- 1839 W.R. Grove: Gas Chain – Urform der Brennstoffzelle
- 1900 F.von Zeppelin startet LZ1 mit Wasserstoff zum Auftrieb
- 1909 F. Haber: Ammoniaksynthese
- 1920 Hydrocracking – Kohleverflüssigung in Leuna
- 1923 Synthetisches Methanol, BASF, Leuna
- 1923 A. Schmid: Gasdiffusionselektrode
- 1929 Industrielle Elektrolyse am Wasserkraftwerk in Rjukan, Norwegen
- 1937 P.von Ohain betreibt Strahltriebwerk mit Wasserstoff, Heinkel, Rostock
- 1940 Wasserstoff-Leitungssystem im Ruhrgebiet, ca.140 km
- 1943 Flüssiger Wasserstoff als Raketentreibstoff erprobt, Ohio State University
- 1955 W.T. Grubb benutzt sulfoniertes Polystyrene als Elektrolyt
- 1958 L. Niedrach lagert Platin in der Membran ein
- 1958 Allis-Chalmers betreibt einen Traktor mit Brennstoffzelle (15 kW)
- 1961 Raketenflug mit flüssigem Wasserstoff