



Education in Hydrogen Technologies Area

WASSERSTOFF FÜR VERBRENNUNGSMOTOREN



Co-funded by
the European Union

Project is supported
within the Erasmus+ programme
2021-1-CZ01-KA220-VET-000028073

Inhalt	2
Einleitung.....	2
1 Geschichte.....	3
2 Das Wasserstoffgas	7
3 Tanken	12
3.1 Tanken bei Ihnen zu Hause	14
3.2 Benzin und Diesel	14
4 Das Viertaktprinzip im Otto- und Dieselmotor.....	17
4.1 Der Ottomotor.....	18
4.1.1 Schlaganfall 1. Der Ansaugtakt.....	18
4.1.2 Schlaganfall 2. Der Kompressionshub	18
4.1.3 Schlaganfall 3. Der Krafttakt.....	18
4.1.4 Schlaganfall 4. Der Auspufftakt	19
4.2 Das Viertaktprinzip des Dieselmotors	19
4.3 Der Dieselmotor	19
4.3.1 Schlaganfall 1. Der Ansaugtakt.....	19
4.3.2 Schlaganfall 2. Der Kompressionshub	20
4.3.3 Schlaganfall 3. Der Krafttakt.....	20
4.3.4 Takt 4 Der Auslasstakt	20
5 Wie funktioniert Wasserstoff in einem Verbrennungsmotor?	20
5.1 Umrüstung eines Verbrennungsmotors auf Wasserstoffbetrieb.....	22
5.1.1 Schritt 1	22
5.1.2 Schritt 2	23
5.1.3 Schritt 3	24
5.2 Zwei verschiedene Möglichkeiten, den Motor mit Wasserstoff zu versorgen	24
5.2.1 Schritt 4	25
6 Die Forschungsphase.....	27
6.1.1 Wasserstoff-Saugrohr-Kraftstoffeinspritzung, PFI	27
6.1.2 Kompressionszündung mit homogener Ladung, HCCI	28
6.1.3 Fremdgezündete Saugrohreinspritzung	28
6.1.4 Pilotkraftstoffzündung mit Saugrohr-Wasserstoffeinspritzung	29
6.1.5 Wasserstoffverbrennung mit Direkteinspritzung.....	30

6.1.6	Glühkerzen-Zündung	30
6.1.7	Zündung mit Zündkerze.....	31
6.1.8	Dual-Fuel-Hochdruck-Selbstzündungsmotor mit Direkteinspritzung	32
6.2	Vor - und Nachteile der verschiedenen Methoden.....	33
6.2.1	Rolle des Injektors	33
6.3	Drei verschiedene Injektionsarten	34
6.3.1	Elektrohydraulisch aktiviert (NTSEL)	34
6.3.2	Magnetventil aktiviert (Westport)	34
6.3.3	Piezo-gesteuert (Westport).....	35
7	Schlüsse	35
7.1	Die Vorteile der Umrüstung bestehender Motoren	36
7.2	Warum Wasserstoff in einem Verbrennungsmotor?.....	36
8	Referenzen	38
9	Bildnachweise.....	40
10	Abkürzungen	42

Gefördert von der Europäischen Union. Die geäußerten Ansichten und Meinungen sind jedoch ausschließlich die der Autoren und spiegeln nicht unbedingt die der Europäischen Union oder der Europäischen Exekutivagentur für Bildung und Kultur (EACEA) wider. Weder die Europäische Union noch die EACEA können dafür verantwortlich gemacht werden.

EINLEITUNG

Die anhaltende Energiedebatte hat aufgrund der Umweltzerstörung, die direkt mit der Nutzung bekannter fossiler Brennstoffe in Verbindung gebracht werden kann, dazu geführt, dass wir gezwungen sind, neue Energiequellen zu finden. Alle fossilen Brennstoffe wie Erdöl und Erdgas, die aus dem Boden kommen, enthalten Kohlenstoff, der sich bei der Verbrennung in Kohlendioxid umwandelt. Alles, was Kohlenstoff enthält, den wir dann auf unterschiedliche Weise verbrennen, führt dazu, dass wir den Kohlendioxidausstoß nicht reduzieren, sondern in den meisten Fällen erhöhen.

Mit einer weltweit wachsenden Bevölkerung wächst der Bedarf an Transportmitteln für Privatpersonen, Nutzfahrzeuge, Schiffe und Flugzeuge. Damit steigt der Treibstoffbedarf für diese wachsende Flotte. Mit anderen Worten: Mit einer größeren Weltbevölkerung steigt auch der Bedarf an Kraftstoff. In jüngster Zeit wird immer deutlicher, dass unsere Lebensweise das Klima beeinflusst. In einigen Teilen der Welt führt der Klimawandel zu Dürren und riesigen Waldbränden, während andere Teile von riesigen Regenfällen heimgesucht werden, die zu Überschwemmungen führen. An mehreren Orten der Welt wird geforscht, und neue Technologien für all diese Verkehrsmittel stehen ganz oben auf der Agenda. Alternative Kraftstoffe wurden erforscht und einige sind bereits im Einsatz, andere befinden sich noch mehr oder weniger in der Projektphase. Die Elektrifizierung verschiedener Fahrzeugtypen ist etwas, das wir immer mehr sehen, diese Fahrzeuge sind immer noch relativ teuer und möglicherweise noch nicht für die gesamte Öffentlichkeit zugänglich, die Reichweite dieser Fahrzeuge ist auch noch nicht ganz so groß wie die herkömmlicher Benzin- und Dieselfahrzeuge. Hinzu kommt, dass auch die Stromerzeugung nicht immer komplett umweltfreundlich gelöst wird. Andere Brennstoffe, die erwähnt werden können, sind Biokraftstoffe, die Restprodukte aus unserem Hausmüll und der Landwirtschaft sind. Alkohol oder Ethanol ist ein Kraftstoff, den es schon seit geraumer Zeit als Ergänzung zu benzinbetriebenen Autos gibt. Rapsöl ist auch eine Alternative zu fossilen Brennstoffen. Keiner dieser alternativen Kraftstoffe erhöht die Kohlendioxidemissionen, sondern hält sie auf einem neutralen Niveau. Sie sind Teil des natürlichen Kreislaufs.

Wasserstoff wurde in verschiedenen Epochen unserer Weltgeschichte erforscht. Eine relevante Frage ist, warum die Forschung zu bestimmten Zeiten vorangeschritten zu sein scheint und sich dann verlangsamt hat, um später wieder anzulaufen. Wasserstofffahrzeuge, die mit sogenannten Brennstoffzellen betrieben werden, tauchen in einigen Teilen der Welt auf, allerdings nicht so verbreitet wie Pkw in Schweden. In öffentlichen Verkehrsmitteln, wie z. B. dem Busverkehr, sieht man sie jedoch hier und da ein wenig auftauchen. Auch heute noch kann man kein Auto oder einen Lkw

mit einem Verbrennungsmotor kaufen, der mit Wasserstoff betrieben wird, aber einige Hersteller stehen kurz vor einem fertigen Fahrzeug.

1 GESCHICHTE

In diesem Kapitel wird kurz die Geschichte des Wasserstoffs vom 18. Jahrhundert bis heute erzählt. Sie lernen einige frühe Erfindungen von Wasserstoffverbrennungsmotoren und Ideen kennen, die auch heute noch in der Wasserstoffentwicklung relevant sind.

SCHLAGWORTE:

Geschichte des Wasserstoffs, Automobil, Rivaz.

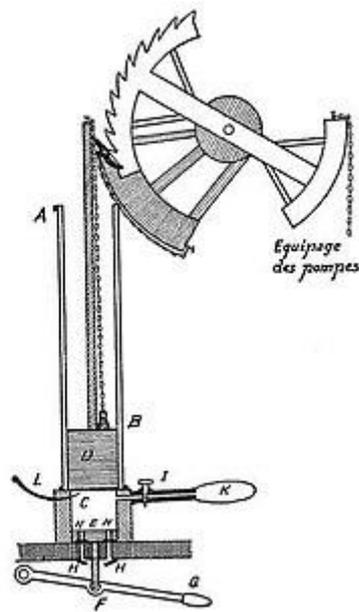
FRAGEN ZUM STUDIUM

1. Wer war der Erste, der einen funktionierenden Verbrennungsmotor hatte?
2. Was erzwang die rasche Änderung des Brennstoffverbrauchs in Leningrad 1941?
3. Inwiefern war 1966 ein erfolgreiches Jahr für die Wasserstoffentwicklung?

Wir wissen, dass es bereits im Jahr 1700 Versuche gab, selbstfahrende Kutschen zu erfinden, ohne ein Pferd als Transportmittel zu verwenden. Der Franzose Cugnot konstruierte eine Kutsche, die von einer Dampfmaschine angetrieben wurde und eine Kanone für die Armee tragen sollte. Diese selbstfahrende Kutsche erhielt den Namen Automobil aus dem griechischen Wort autos, was selbst bedeutet, und dem lateinischen Wort mobilis, das sich bewegt. Leider endete alles sehr abrupt. Cugnots Kutsche fuhr gegen eine Wand und wurde völlig zerstört.

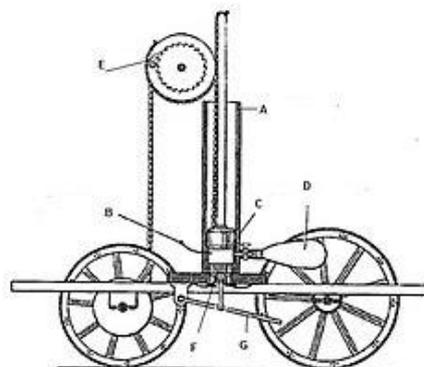
Wenn man die Geschichte über Motoren liest, fällt auf, dass Nicolaus Otto der Erfinder des angeblich ersten Motors mit Verbrennungsraum war. Der Dieselmotor wurde von Rudolf Diesel erfunden; Er nannte auch den Kraftstoff. All dies fand irgendwann in der Mitte der 1800er Jahre statt, leider ist es schwierig, genau zu sein, da die Erfindung patentiert wurde. Otto war 1876 der erste mit dem modernen Brennkammermotor, aber schon vorher erfand Etienne Lenoir um 1860 erfolgreich einen Verbrennungskammermotor für den kommerziellen Einsatz. Vor diesem Hintergrund war ein Herr namens François Isaac de Rivaz noch vor Étienne, Rudolf und Otto tätig. Er wurde 1752 in Frankreich

geboren und zog später in die Schweiz, wo er Erfinder und Politiker wurde. Anfang ¹der 1800er Jahre hatte François einen primitiven Motor parat.



Erste Version des Motors von de Rivaz (Bild 1)

Wenig später besaß er auch eine pferdelose Kutsche, in die er einen weiteren seiner Motoren einbaute, der angeblich der erste Verbrennungskammermotor der Welt war, der ein Automobil antrieb. Und um 1809 reiste er um den Genfersee.



Einer der frühen Wagen von Rivaz (Bild 2)

¹(Wikipedia, 2019)

Aber François war wohl zu früh für seine Zeit, denn er glaubte an ihn und behauptete, dass seine Erfindung niemals mit den Dampfmaschinen konkurrieren könne. Aber was François als Kraftstoff verwendete, war nicht Diesel oder Benzin, er verwendete Wasserstoff.

Wir bewegen uns ein halbes Jahrhundert vorwärts, 1860, und ein anderer Erfinder, ein Franzose namens Etienne Lenoir, entwickelte das dreirädrige Hippomobil. Lenoirs Hippomobil wurde von einem Einzylinder-Zweitaktmotor angetrieben. Der Wasserstoff wurde durch Elektrolyse von Wasser erzeugt und dem Motor zugeführt.

Das nächste Wasserstoffauto in der Reihe wurde 193 in Norwegen erfunden³, als das norwegische Wasserkraftunternehmen Norsk Hydro einen kleinen Lastwagen umbaute. Der Lkw war mit einem Ammoniakreformer ausgestattet, der Wasserstoff produzierte, der dann dem Verbrennungskammermotor zugeführt wurde.



Norwegens erster wasserstoffumgerüsteter Lkw (Bild 3)

Im Jahr 1941, als sich die Welt im Krieg befand, hatte die deutsche Nazi-Armee Leningrad umzingelt, was dazu führte, dass langsam das Benzin für die Militärfahrzeuge ausging. Der Mangel an Benzin zwang zu "neuen" Erfindungen. Daher rüstete der russische Boris Schelischtsch 200 GAZ-AA-Lkw auf Wasserstoffbetrieb um, es zeigte sich, dass sie sauberer brannten und länger liefen als diejenigen, die mit Benzin betrieben wurden. Aus irgendeinem Grund sind alle detaillierten Dokumente über Wasserstoff als Kraftstoffalternative nach dem Zweiten Weltkrieg auf mysteriöse Weise verschwunden und fehlen immer noch.

1959 Harry Karl Ihrig modifizierte einen Allis-Chalmers-Ackerschlepper zum ersten Brennstoffzellenfahrzeug der Geschichte. Brennstoffzellen werden hier nicht beschrieben, sondern

nur darauf hingewiesen, dass es in diesen beiden Pfaden zu diesem frühen Zeitpunkt in der Geschichte eine kontinuierlich parallele Entwicklung von Alternativen für fossile Brennstoffe gab.²



Harry Karls Ihring Brennstoffzellentraktor (Bild 4)

1966 war ein erfolgreiches Jahr für Wasserstoff, sowohl bei Brennkammermotoren als auch bei Wasserstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge. Roger Billings gab dem Wasserstoffkraftstoff neues Licht und rüstete einen normalen Ford Model-A-Lkw um , um mit Wasserstoff in seinem normalen Benzinmotor zu fahren.³

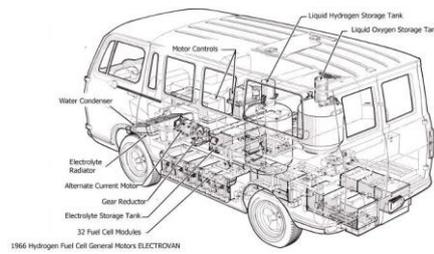


Roger Billings Wasserstoff umgerechnet Modell A, 1966 (Bild 5)

Im selben Jahr entwickelte General Motors das Brennstoffzellenfahrzeug GM Electrovan, das von vielen als das erste Brennstoffzellenfahrzeug anerkannt wird.

²(Nationalmuseum für Amerikanische Geschichte, o.J.)

³Roger Billings (Billings, 2013)



Der erste Brennstoffzellen-Van von GM aus dem Jahr 1966 (Bild 6)

Seitdem ist die Entwicklung sowohl für den Betrieb von Wasserstoff in Brennkammermotoren als auch für Brennstoffzellenfahrzeuge vorangeschritten.

2 DAS WASSERSTOFFGAS

Dieses Kapitel beschreibt kurz Wasserstoffgas und eines der Herstellungsverfahren ohne ökologischen Fußabdruck und stellt verschiedene Arten von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen vor. Die Herstellung von Wasserstoffgas wird in einem anderen Modul näher erläutert.

SCHLÜSSELWÖRTER:

Wasserstoffgasproduktion, Gewichtsverhältnis, wasserstoffbetriebene Schiffe, Elektrokraftstoff.

FRAGEN ZUM STUDIUM

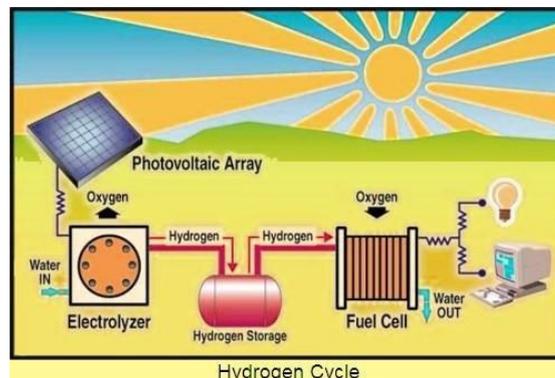
1. Wie ist das Gewichtsverhältnis von Luft zu Wasserstoffgas?
2. Nennen Sie ein Beispiel, wo Wasserstoff raffiniert werden kann?
3. Welche Fahrzeuge/Schiffe könnten für den Einsatz von Wasserstoff in Frage kommen?

Wasserstoffgas ist das leichteste aller Elemente im Universum, es ist etwa 14-mal leichter als Luft und das bedeutet, dass sich der Wasserstoff im Falle eines Lecks sehr schnell ausbreitet. Wasserstoff besteht aus zwei Wasserstoffatomen und hat daher die chemische Bezeichnung H_2 . Es ist farblos, geruchlos, ungiftig und selbst dann leicht entflammbar. Wasserstoff ist die am häufigsten vorkommende chemische Substanz im Universum und macht etwa 75 % aller normalen Materie aus.

Auf der Erde ist es deutlich seltener, nur 0,15% der Masse, es findet sich gebunden in verschiedenen Formen von Materie, zum Beispiel in Wasser, H₂O.

Herstellung von Wasserstoff

Die erste dokumentierte Zeit, in der Wasserstoff künstlich hergestellt wurde, war Anfang des 16. Jahrhunderts mit Säuren, die auf verschiedene Metalle reagierten. Heute gibt es eine Reihe von Möglichkeiten, Wasserstoff herzustellen, die verschiedenen Wege wirken sich mehr oder weniger auf die Umwelt aus, und es wird ständig daran gearbeitet, ihn so umweltfreundlich wie möglich zu produzieren. Was wir heute wissen, was für die Umwelt am besten ist, ist, wenn man Solarenergie oder Windräder nutzen kann, aber auch diese Methoden haben einen gewissen negativen Effekt auf die Umwelt.⁴



Wasserstoff aus Sonnenenergie (Bild 7)

Hier soll nur einer der Wege sehr vereinfacht erklärt werden. Man kann sagen, dass es so gemacht wird, dass man den Sauerstoff und den Wasserstoff voneinander trennt. Dies geschieht, indem das Wasser mit Strom aufgeladen wird. Salzwasser ist von Vorteil, da es den Strom besser leitet, es kann auch als Spaltung des Wassers bezeichnet werden. Was dann passiert, ist, dass Sauerstoff und Wasserstoffgas austreten, aber voneinander getrennt. In diesem Kapitel werden wir nicht zu sehr darauf eingehen, wie die Produktion selbst über die Tatsache hinausgeht, dass sie tatsächlich zu Hause

⁴Kumar (2016)

durchgeführt werden kann, wenn Sie über die richtige Ausrüstung verfügen. Gleichzeitig müssen Sie bedenken, dass es sich um ein sehr brennbares Gas handelt, mit dem Sie es zu tun haben.⁵

Verschiedene Fahrzeugtypen

Die Entwicklung hat einen langen Weg zurückgelegt und der Einsatz von Wasserstoff in allen möglichen Fahrzeugtypen ist heute zu sehen. Die meisten großen Fahrzeughersteller auf der ganzen Welt testen ihre Autos dort, wo sie Motoren entwickelt haben, die nur mit Wasserstoff betrieben werden, oder besser gesagt, sie so modifiziert haben, dass sie nur mit Wasserstoff betrieben werden. Hinzu kommt, dass die Entwicklung so schnell voranschreitet, dass es schwierig ist, auf dem neuesten Stand zu sein, und was heute hier geschrieben wird, kann morgen schon alt sein. Busse werden in verschiedenen Teilen der Welt erfolgreich mit Wasserstoff mit herkömmlichen Verbrennungsmotoren gefahren.



Ein mit Wasserstoff betriebener Bus mit konventionellem Motor, Keyou ist das Unternehmen dahinter (Bild 8)

Eines der Probleme ist, dass es nicht vollständig emissionsfrei ist, da der Kohlenoxidgehalt (CO) und der Kohlendioxidgehalt (CO₂) fast nicht vorhanden sind. Aber auf der anderen Seite kämpft man mit dem Stickoxidgehalt (NO_x) auf unterschiedliche Weise, um ihn auf ein akzeptables Niveau zu bringen. In einem Verbrennungsprozess wird Luft verwendet und der Stickstoff in der Luft dann in Stickoxid umgewandelt, was bedeutet, dass diese Fahrzeuge nicht die Anforderungen erfüllen, um als emissionsfreies Fahrzeug eingestuft zu werden, aber auch hier gelingt der Forschung weiter. Wir werden später darauf zurückkommen und erklären, wie man damit arbeitet. Auch im anderen Bereich der schweren Nutzfahrzeuge wird an der Verwendung von Wasserstoff als Kraftstoff für die bereits

⁵(Büro für Energieeffizienz & Erneuerbare Energien, 2019)

vorhandenen Verbrennungsmotoren geforscht. Fernhändler, die bisher vollständig von fossilen Brennstoffen abhängig waren, müssen es bald nicht mehr sein.

Schon heute kann man theoretisch komplett fossilfrei fahren und nur Wasserstoff als Kraftstoff nutzen. Die Motoren funktionieren nachweislich mindestens genauso gut mit Wasserstoff wie mit Diesel, und die Motorleistung, das Drehmoment und die Kraftstoffeffizienz sind genauso gut wie zuvor, einige Entwicklungsunternehmen im Bereich der Kraftstoffeinspritzung behaupten sogar, dass ihr Produkt sowohl bei der Wirkung als auch beim Drehmoment höhere Werte liefert. Darüber hinaus werden die Probleme, die Besitzer von Elektroautos in Bezug auf Ladestationen und die Ladezeit haben, vollständig vermieden, denn Zeit ist in diesem Verkehrssektor kostbar.

In der Schifffahrt ist es die gleiche Entwicklung, außerdem erreichen Sie hier ein noch größeres Umweltziel, da es keine Einschränkungen für den verwendeten Kraftstoff gibt, es gibt auch keine Reinigung dessen, was herauskommt, mehrere Reedereien testen bereits heute Wasserstoff.

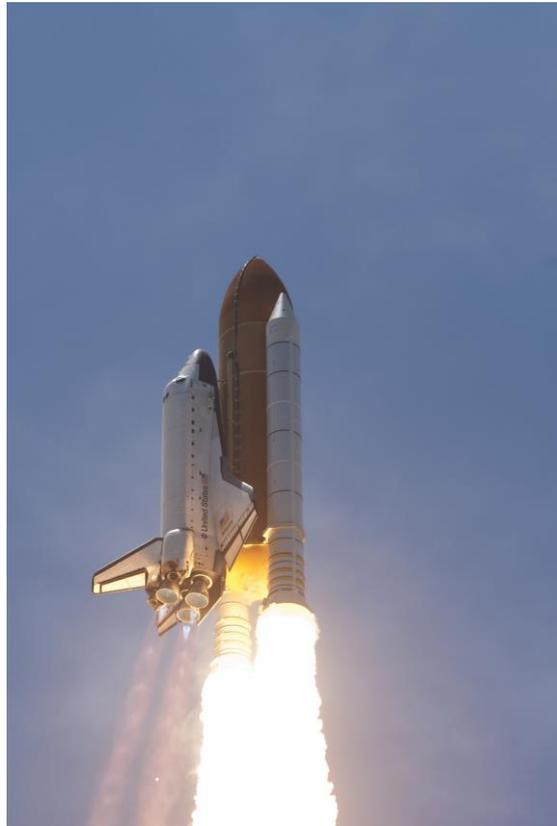
Auch die Luftfahrt entwickelt alternative Antriebsquellen für Flugzeuge, eine Alternative ist Wasserstoff. Es hat kürzlich erfolgreiche Versuche bei Flügen mit Wasserstoff unternommen, in diesem Fall mit einem Gemisch aus einem anderen Kraftstoff, dem sogenannten Elektrokraftstoff. Elektrokraftstoff ist ein Sammelbegriff für kohlenstoffhaltige Kraftstoffe, die durch Strom als Hauptenergiequelle erzeugt werden. Die Kohlenstoffatome im Kraftstoff stammen aus Kohlendioxid, das aus der Luft, dem Meer oder aus Brenngasen aus Kraftwerken gesammelt wird, man kann es eine Form des Kohlendioxid-Recyclings nennen.



Verschiedene Arten von Luftfahrtschiffen werden getestet (Bild 9)

Space Shuttles haben auch Wasserstoff verwendet, dann aber in flüssiger Form, zusammen mit Sauerstoff auch in flüssiger Form. Die Tanks waren 15 Stockwerke hoch und fassten 530.000 Liter

flüssigen Sauerstoff und 1,5 Millionen Liter flüssiges Hydrogen. Diese werden in einer Brennkammer gasiert und sorgen für den Antrieb der Rakete. All diese Menge an Kraftstoff war in 8 Minuten und 20 Sekunden verbraucht.⁶



Ein mit Wasserstoff und Sauerstoff beladenes Space Shuttle (Bild 10)

Kurz gesagt, es kann festgestellt werden, dass der Kraftstoff Wasserstoff definitiv in mehr oder weniger allen Arten von Fahrzeugen und Booten verwendet werden kann. Es scheint jedoch, dass die Entwicklung im Pkw-Bereich nicht wirklich in Schwung gekommen ist, zumindest noch nicht, aber es gibt Prototypen, die hier und da von verschiedenen Herstellern auf der ganzen Welt auftauchen.

⁶(KSC, o.J.)

3 TANKEN

Im folgenden Kapitel erfahren Sie mehr über die Risiken beim Tanken von Wasserstoff. Außerdem erfahren Sie mehr über die Vorteile gegenüber dem Aufladen von Elektrofahrzeugen und die Zukunft von Wasserstoffkraftstoff und -betankung.

SCHLÜSSELWÖRTER:

Tanken, mögliche Risiken, Benzin und Diesel vs. Wasserstoff.

FRAGEN ZUM STUDIUM

1. Inwiefern ist das Tanken mit Wasserstoff im Vergleich zum Laden eines Elektrofahrzeugs von Vorteil?
2. Warum wird das Wasserstoffgas auf so hohe Werte unter Druck gesetzt?
3. Was könnte ein Sicherheitsrisiko beim Tanken von Wasserstoff sein?

Das Tanken kann heute, zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Artikels, Mai 2022, an fünf Standorten in Schweden erfolgen, und in Europa gibt es insgesamt ca. 230 Tankstellen, an denen Sie Wasserstoff tanken können. Spitzenreiter ist Deutschland mit 101 Stationen, gefolgt von Frankreich mit 41 Stationen, Großbritannien mit 19, der Schweiz mit 12 und den Niederlanden mit 11. Der Mangel an Tankstellen kann derzeit nur vermuten, dass er die Entwicklung zum Umstieg auf Wasserstoff behindert, aber auch hier ist die Entwicklung im Gange.⁷

⁷(Autovista SE, n.a.)



Es ist klar, dass es viel mehr Tankstellen geben muss, die Wasserstoff anbieten, um die Entwicklung in einem guten Tempo voranzutreiben (Bild 11).

Der große Vorteil beim Tanken von Wasserstoff gegenüber dem Laden eines Elektroautos ist zeitlich riesig, es dauert nicht länger als das Tanken eines Benzin- oder Dieselaautos, also je nach Tankgröße etwa 2-5 Minuten. Das Aufladen eines Elektroautos zu Hause dauert ca. 8-12 Stunden, an einer Ladestation mit einem sogenannten Schnellladegerät mit höherer Spannung können Sie es auf ca. 20 Minuten verkürzen. Dann haben Sie jedoch keine vollständige Ladung der Batterien erreicht, sondern nur etwa 80%.

Die Betankung des Wasserstoffs erfolgt aus einem Drucktank an der Station in das Auto, wo er auch unter Druck gesetzt wird. Der Druck im LKW-Tank beträgt 350 bar, im PKW 700 bar. Das Gas wird unter Druck gesetzt, um mehr aufzunehmen, aber wie bereits erwähnt, gibt es eine ständige Entwicklung, was bedeutet, dass sich diese Zahlen bereits geändert haben könnten.



Der Gasfüllstutzen ist den Gasfüllstutzen sehr ähnlich, die in anderen Gasen für Fahrzeuge verwendet werden (Bild 12).

Die Risikoeinschätzung, dass beim Tanken ein Unfall passieren könnte, wird in einem anderen Modul dargestellt, das sich genau darauf konzentriert: "Ladestationen". Aufgrund des hohen Drucks in den Tanks besteht jedoch die potenzielle Gefahr von Leckagen, da das Gas um ein Vielfaches leichter ist als Luft. Der Druck steigt, und da das Tanken in der Regel im Freien stattfindet, steigt er schnell an und vermischt sich mit der Luft. Bleibt es hingegen unter einem Dach stecken und es kommt zu einer thermischen Entzündung, ist die Gefahr eines Schnellbrandes groß. Es ist daher von großer Bedeutung, dass Sensoren vorhanden sind, die frühzeitig vor Gaslecks warnen können, und dass die Räumlichkeiten, in denen Leckagen auftreten können, so ausgestattet sind, dass Lüftungsgeräte schnell aktiviert werden können.

3.1 TANKEN BEI IHNEN ZU HAUSE

Tanken am eigenen Wohnort könnte möglich sein, diese Frage ist wirklich das, was sich unsere Entscheider einfallen lassen, aber es wird sicherlich machbar sein. Wir können bereits unser eigenes Elektroauto "betanken", ebenso wie das anderer Leute. Wenn wir also mit der richtigen Ausrüstung umweltfreundlich sein wollen, also Ökostrom, also Solarzellen auf dem Dach oder eine Windkraftanlage, kann man seinen eigenen Wasserstoff produzieren, er muss "nur" komprimiert werden, um ihn in einem Fahrzeug zu haben.



Hier ist eine von Honda entwickelte Tankstelle für den Hausgebrauch, diese hier versorgt den Haushalt auch über eine Brennstoffzelle mit Strom

(Bild 13)

3.2 BENZIN UND DIESEL

Seit fast 150 Jahren sind wir mehr oder weniger auf Benzin und Diesel angewiesen, um unsere Fahrzeuge und Schiffe auf Straßen, im Wasser und in der Luft anzutreiben. Tatsächlich gab es vor über

hundert Jahren auch andere Möglichkeiten, die wahrscheinlich so nah am Erfolg waren. Die Elektrizität zum Beispiel war weit voraus, vor über 100 Jahren gab es alle möglichen Arten von Elektrofahrzeugen. Geschwindigkeitsrekorde von über 200 km/h mit Elektroautos wurden zu Beginn des letzten Jahrhunderts in Amerika auf den Hochgeschwindigkeitsstrecken aufgestellt. Auch dampfbetriebene Fahrzeuge kamen in Frage, nicht nur Züge, sondern auch Personenwagen. Aber was war es dann, das Benzin und Diesel zu denjenigen machte, die das Spiel gewannen? Auf diese Fragen werden Sie keine Antworten erhalten. Eine weitere relevante Frage ist; Wie sähe die Umwelt heute aus, wenn man damals andere Alternativen gefunden hätte?

Hätten wir den globalen Temperaturanstieg, den wir heute haben, erlebt, wenn wir in etwas anderes investiert hätten als in Diesel und Benzin? Tatsache ist jedoch, dass das Auto und der Verbrennungsmotor, als sie zu Beginn des letzten Jahrhunderts auf den Markt kamen, als gute Umweltinvestition galten, die großen Städte auf der ganzen Welt große Probleme mit all den Pferden in den Städten hatten, die Wagen mit Waren und Menschen zogen. Ein großes Problem war, dass die Pferde auch ihre natürlichen Bedürfnisse erfüllen mussten, sowohl Nummer 1 als auch Nummer 2 und das geschah natürlich überall mitten in der Stadt.

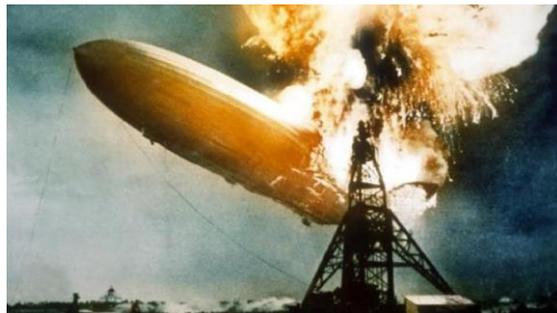


So sahen die Städte zu Beginn des letzten Jahrhunderts aus, der Geruch muss deutlich gewesen sein (Bild 14).

Außerdem war das etwas, was die Pferde 24 Stunden am Tag gemacht haben, unabhängig davon, ob sie im Einsatz waren oder nicht, im Gegensatz zum Auto, wenn es nicht gefahren wurde, hat man es natürlich einfach ausgeschaltet und dann überhaupt kein Benzin oder Diesel verbraucht, es hat dann keine Abgase freigesetzt oder ausgestoßen.

Der Wasserstoff hingegen hatte zu diesem Zeitpunkt noch kein größeres Einsatzgebiet, jedenfalls war er als Antrieb für Fahrzeuge auf der Straße nicht mehr relevant, zumindest nicht für den allgemeinen

Gebrauch, auf der Forschungsebene gab es einen laufenden Prozess. Was sie stattdessen herausfanden, war, dass man das leichte Gas verwenden könnte, um andere Raumschiffe, den Zeppelin, zum Fliegen zu bringen. Eigentlich waren diese für Helium gedacht und wurden für Flüge über den Atlantik verwendet. Ferdinand Adolf Heinrich von Zeppelin, der Anfang des 19. Jahrhunderts in Deutschland geboren wurde, war der Mann hinter diesem Handwerk. Da Amerika zu dieser Zeit weltweit führend in der Heliumproduktion war, aber gleichzeitig keinen Export erlaubte, wurde das Schiff mit Wasserstoff befüllt. Leider wird es zusammen mit Luft oder Sauerstoff sehr leicht entflammbar. 1937 während eines Fluges mit dem Zeppelin Hindenburg in Amerika fing er bei der Landung⁸ plötzlich Feuer. Es wird angenommen, dass es vom Blitz getroffen wurde, aber es ist bis heute nicht klar, ob dies der Auslöser des Unfalls war oder ob es sich um eine Sabotage handelte. Auf jeden Fall wurde das Ganze gefilmt. Das Schiff ging schnell zu Boden und das Feuer ging sehr schnell voran. 35 Menschen an Bord und einer am Boden starben. Ob dieser Unfall zu großer Skepsis gegenüber Wasserstoffgas geführt haben mag oder nicht, darüber kann man nur spekulieren, aber der starke Katastrophenfilm dürfte einen großen Einfluss auf die Nutzung des Gases gehabt haben. Auf jeden Fall markierte die Hindenburg-Katastrophe für die damalige Zeit das Ende der Ära der großen Luftschiffe.⁹



Das luxuriöse Luftschiff Hindenburg, das bei der Katastrophe 1937 mit der Kamera festgehalten wurde, kamen 36 Menschen ums Leben (Bild 15)

Heute ist die Entwicklung im Bereich der großen Luftschiffe wieder aufgenommen, aber ob sie mit Wasserstoff oder Helium aufgeblasen werden, ist noch nicht klar. Der Grund für das erneute Interesse ist, dass Luftschiffe viel besser für die Umwelt sind als normale Flugzeuge.

⁸(Dieser Tag in der Luftfahrt, 2023)

⁹. (SO-Das Zimmer, 2022)

4 DAS VIERTAKTPRINZIP IM OTTO- UND DIESELMOTOR

In diesem Kapitel werden die Prinzipien von zwei Motortypen erläutert, dem Ottomotor und dem Dieselmotor, die mit Wasserstoff als Kraftstoff verwendet werden könnten. Sie erfahren auch mehr über das Viertaktprinzip dieser Motoren.

SCHLÜSSELWÖRTER:

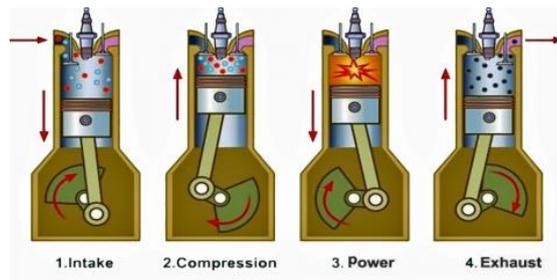
Ottomotor, Dieselmotor, das Viertaktprinzip.

FRAGEN ZUM STUDIUM

1. Was erzeugt den Unterdruck im Zylinder?
2. Was wird in einem Ottomotor verwendet, um den Kraftstoff zu entzünden?
3. Was braucht es, um den Kraftstoff in einem Dieselmotor zu entzünden?

Hier kommt eine kleine Wiederholung im Viertaktmotor, dem Ottomotor sowie dem Dieselmotor, um das Verständnis von Wasserstoff als Kraftstoff in einem Motor auf der Grundlage dieser Prinzipien zu erleichtern. Bei einem Viertaktmotor findet der gesamte Arbeitsprozess in vier Takten statt, ein Hub ist der Kolben, der sich von einem Totpunkt zum anderen bewegt, zum Beispiel vom oberen Totpunkt zum unteren Totpunkt oder umgekehrt. Der Begriff Totpunkt bedeutet, dass der Kolben, wenn er seine untere Position im Zylinder oder oben erreicht, so stark langsamer wird, dass er normalerweise als Stillstand bezeichnet wird, bevor er die Richtung umkehrt und in die andere Richtung geht, seinen Totpunkt erreicht und in den verschiedenen Hübren verschiedene Dinge passieren. Der obere Totpunkt wird manchmal als OT und der untere Totpunkt als BDC abgekürzt. In einem Arbeitsgang dreht sich die Kurbelwelle um zwei Umdrehungen, die Nockenwelle um eine. Für jeden Zylinder ist mindestens ein Einlassventil und ein Auslassventil erforderlich. Zum Entzünden des Kraftstoff-Luft-Gemisches wird eine Zündkerze benötigt.

4.1 DER OTTOMOTOR



Die Viertakte eines Ottomotors (Bild 16)

4.1.1 SCHLAGANFALL 1. DER ANSAUGTAKT

Bei diesem Hub bewegt sich der Kolben nach unten in den Zylinder. Das Einlassventil ist geöffnet und die Luft wird durch den im Zylinder auftretenden Unterdruck angesaugt. Im Einlass, kann auch als Ansaugtakt bezeichnet werden, ist der Kanal ein Einspritzventil, das Benzin zu einem bestimmten Zeitpunkt einspritzt und sich mit der Luft vermischt. Das Auslassventil ist geschlossen. Handelt es sich bei dem Motor um eine sogenannte Direkteinspritzung, wird nur Luft angesaugt und der Kraftstoff zu dem als optimal erachteten Zeitpunkt direkt in den Brennraum eingespritzt. Wird der Motor mit einem Abgasverdichter, Turbolader oder mechanischen Verdichter, der von einem Riemen oder einer Kette angetrieben wird, so aufgeladen, wird das Gemisch mit dem dadurch erzeugten Überdruck eingepresst.

4.1.2 SCHLAGANFALL 2. DER KOMPRESSIIONSHUB

Der Kolben befindet sich nun im unteren Totpunkt und zeigt nach oben. Das Einlassventil schließt, das Auslassventil bleibt geschlossen, bei dieser Geschwindigkeit wird das Kraftstoff-Luft-Gemisch verdichtet. Wenn das Kraftstoff-Luft-Gemisch komprimiert wird, wird die Wirkung auf den Motor erhöht und die Verbrennung effizienter. Kurz bevor der Kolben seine obere Totposition erreicht, wird das Kraftstoff-Luft-Gemisch durch einen Funken aus der Zündkerze gezündet.

4.1.3 SCHLAGANFALL 3. DER KRAFTTAKT

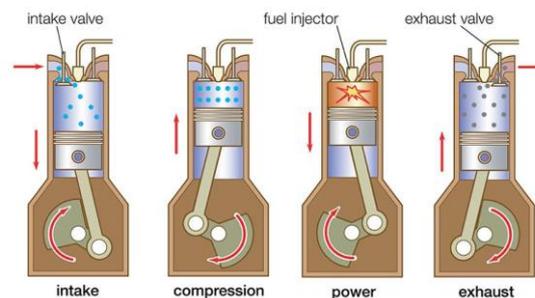
Bei dieser Geschwindigkeit wurde das Kraftstoff-Luft-Gemisch gerade gezündet und dehnt sich mit hoher Geschwindigkeit aus, wodurch der Kolben mit einer sehr großen Kraft nach unten gedrückt wird.

Das Einlassventil ist geschlossen, das Auslassventil ist ebenfalls geschlossen. Dieser Schlag ist der einzige, der die Kraft aller vier Schläge erzeugt.

4.1.4 SCHLAGANFALL 4. DER AUSPUFFTAKT

Bei diesem Hub bewegt sich der Kolben nach oben in den Zylinder. Das Auslassventil ist geöffnet, dadurch können die Abgase, die früher Kraftstoff und Luft waren, an ihm herausgedrückt und weiter durch die Auslassöffnung und weiter durch das Auspuffrohr nach außen gedrückt werden.

4.2 DAS VIERTAKTPRINZIP DES DIESELMOTORS



Die Viertakte in einem Dieselmotor (Bild 17)

Man kann sagen, dass die Funktion eines Ottomotors und eines Dieselmotors sehr ähnlich ist. Vier Takte sind wie beim Ottomotor erforderlich. Außerdem sind für jeden Zylinder mindestens ein Einlassventil und ein Auslassventil erforderlich. Die Kurbelwelle dreht zwei Umdrehungen, um einen Arbeitszyklus abzuschließen, und die Nockenwelle eine Umdrehung. Da sich der Kraftstoff jedoch von Benzin unterscheidet, ist keine Zündkerze erforderlich. Der Diesel wird durch die hohe Hitze im Zylinder entzündet. Die hohe Hitze wird dadurch erreicht, dass ein Dieselmotor eine deutlich höhere Verdichtung hat als ein Ottomotor. Die Verdichtung beträgt ca. 20-30 bar.

4.3 DER DIESELMOTOR

4.3.1 SCHLAGANFALL 1. DER ANSAUGTAKT

Der Kolben bewegt sich den Zylinder nach unten, das Einlassventil ist geöffnet und das Auslassventil ist geschlossen. Der im Zylinder erzeugte Unterdruck hilft, Luft anzusaugen. Wenn der Motor mit

einem Abgaskompressor, einem Turbolader oder einem mechanischen Kompressor aufgeladen ist, der von einem Riemen oder ähnlichem angetrieben wird, drücken sie die Luft in den Zylinder.

4.3.2 SCHLAGANFALL 2. DER KOMPRESSIIONSHUB

Der Kolben bewegt sich nun im Zylinder nach oben. Das Einlassventil ist geschlossen und das Auslassventil bleibt auch während dieses Hubs geschlossen. Die Luft wird nun verdichtet, dann wird auch die Luft durch den hohen Druck warm. Erst am Ende des Verdichtungstaktes wird der Diesel in die heiße Luft eingespritzt und durch die hohe Temperatur entzündet. Bei einem Dieselmotor wird der Diesel immer direkt in den Brennraum eingespritzt, niemals in den Ansaugkrümmer wie bei den meisten Benzinmotoren. Beim Kaltstart muss die Luft erwärmt werden, im Brennraum sitzt eine sogenannte Glühkerze, die dann die Luft auf die Temperatur erwärmt, die der Diesel zum Entzünden benötigt.

4.3.3 SCHLAGANFALL 3. DER KRAFTTAKT

Der gezündete Diesel dehnt sich nun schnell aus und drückt den Kolben nach unten in den Zylinder. Das Einlassventil ist geschlossen, das Auslassventil ist ebenfalls geschlossen. Dies ist der Hub, der den Antriebsstrang mit Kraft versorgt. Der Diesel und die Luft sind nun zu Abgasen geworden.

4.3.4 TAKT 4 DER AUSLASSTAKT

Der Kolben bewegt sich im Zylinder nach oben. Das Einlassventil ist geschlossen. Das Auslassventil wurde geöffnet. Der Kolben drückt nun die Abgase durch das geöffnete Auslassventil weiter durch die Auslassöffnung in das Auspuffrohr.

5 WIE FUNKTIONIERT WASSERSTOFF IN EINEM VERBRENNUNGSMOTOR?

Im folgenden Kapitel erfahren Sie, wie relativ einfach ein Otto- oder Dieselmotor Schritt für Schritt auf den Betrieb mit Wasserstoff umgerüstet werden kann. In diesem Kapitel wird auch erläutert, wie der

Wasserstoffkraftstoff in einem umgebauten Motor auf unterschiedliche Weise eingespritzt und gezündet werden kann und welche Risiken bei Zündaussetzern auftreten können.

SCHLAGWORTE:

Zündung, Zündzeitpunkt, Kraftstoffeinspritzung, Umbau.

FRAGEN ZUR STUDIE:

1. Was verbrennt im schnellsten Verhältnis Wasserstoff oder Benzin?
2. Wie kann die Selbstentzündung ein Risiko für den Motor darstellen?
3. Warum sind platinbeschichtete Zündkerzen keine gute Wahl für Wasserstoffmotoren?

Kann man einen Verbrennungsmotor, Benzinmotor oder Diesel, nur mit Wasserstoff betreiben? -Ja, aber nicht ohne bestimmte Änderungen vorzunehmen. Wie wir bereits erwähnt haben, ist die Verbrennungsgeschwindigkeit bei Wasserstoff viel schneller als bei Benzin und Diesel. Es kann nützlich sein, wenn Sie nur wissen, wie Sie mit dieser Geschwindigkeit umgehen müssen. Wenn Sie einen Benzinmotor betreiben, müssen Sie bei hohen Drehzahlen früher zünden, damit der gesamte Kraftstoff Zeit hat, zu verbrennen, bevor der nächste Takt beginnt, sonst riskieren Sie Leistungsverlust, schlechtere Abgaswerte und höhere Motortemperaturen. Bei Wasserstoff in den Tanks ist es fast umgekehrt, Sie können kein herkömmliches Zündsystem eines Benzinverbrennungsmotors verwenden. Aufgrund der Entflammbarkeit von Wasserstoff besteht die Gefahr einer zu frühen Zündung, die in diesem Fall zu Spitzen führen kann, die wiederum zu schlechteren Abgaswerten führen können. Ein Motor, der auf diese Weise weiter verwendet wird, riskiert in der Folge große Motorschäden, große Schäden an Kolben und Ventilen, im schlimmsten Fall einen Motorcrash. Dieses Problem kann gelöst werden, indem stattdessen eine spätere Zündung durchgeführt wird, kurz bevor der Kolben seine obere tote Position erreicht hat, oder nahe Null. Dies funktioniert gut mit dem Wasserstoffbrennstoff, weil die Verbrennungsrate so hoch ist. Bei niedrigen Drehzahlen ist es hingegen von Vorteil, wenn man eine etwas höhere Zündung hat. Vereinfacht könnte man sagen, dass man eine Zündanlage braucht, die genau das Gegenteil einer Zündanlage funktioniert, die man heute in einem Benzinmotor hat.

5.1 UMRÜSTUNG EINES VERBRENNUNGSMOTORS AUF WASSERSTOFFBETRIEB

Einen Verbrennungsmotor so umzurüsten, dass er nur mit Wasserstoff statt mit Benzin/Diesel betrieben wird, ist prinzipiell sogar möglich. Wir werden hier zwei Möglichkeiten erklären, aber es gibt noch mehr.

Wenn Sie "möglich" sagen, steht es in Anführungszeichen. Immer, wenn Sie konvertieren/neu aufbauen/modifizieren müssen, ist es immer viel mehr, als Sie ursprünglich erwartet hatten. Zum Zeitpunkt des Schreibens dieses Artikels wurden noch keine vorgefertigten Umbausätze auf dem Markt gefunden, vielleicht wird es auch nie welche geben.

Die nächste Frage, die sich stellt, ist, welcher Motortyp und welches Modelljahr umgerechnet werden soll, aber wir werden uns an völlig allgemeine Erklärungen halten, ohne zu tief ins kleinste Detail zu gehen. Es gibt heute Unternehmen, die Umrüstsätze für CNG, komprimiertes Erdgas, LNG und Flüssigerdgas herstellen, und diese Gase sind Wasserstoffgas sehr ähnlich.¹⁰

5.1.1 SCHRITT 1

Das erste, was zu berücksichtigen ist, ist das Kraftstoffsystem. Der Tank muss durch einen ersetzt werden, der dem hohen Druck von 700 bar standhält. Einen solchen Tank zu bekommen, wird eine Frage für sich sein, derzeit sind diese nicht im örtlichen Autozubehörgeschäft erhältlich, aber es gibt Unternehmen, die sich auf die Entwicklung und Herstellung von Tanks für Wasserstoff mit hohem Druck spezialisiert haben, oder möglicherweise erhalten Sie eine Flasche von einem Gaslieferanten.¹¹

¹⁰(Dimitriou und Tsujimura, 2017)

¹¹(Kroyan et al. 2022)



Hier ist ein Beispiel für einen Wasserstofftank, der von der Firma Doosan hergestellt wird (Bild 18).

5.1.2 SCHRITT 2

Der nächste Schritt besteht darin, alle gewöhnlichen Kraftstoffleitungen zu ersetzen, die zuvor Benzin mit relativ niedrigem Druck und relativ geringem Leckagerisiko transportiert haben. Der Wasserstoff wird unter sehr hohem Druck gespeichert und auch durch Leitungen vom Tank zum Motor transportiert, wo an allen Anschlüssen ein hohes Leckagerisiko besteht. Mit anderen Worten, alle Leitungen, die installiert werden, müssen entsprechend dem hohen Druck und Volumen dimensioniert werden.

Gleiches gilt für alle Anschlüsse und Armaturen, auch diese müssen die Anforderungen erfüllen, die Wasserstoff stellt, um ein Auslaufen zu verhindern.¹²



Unterschiedliche Armaturen für Wasserstoff mit hohem Druck (Bild 19).

¹²(Dimitriou und Tsujimura, 2017)

5.1.3 SCHRITT 3

Der Motor erhält dann den Kraftstoff und wie bereits erwähnt, werden wir zwei verschiedene Ansätze verfolgen. Unabhängig von den verschiedenen Ansätzen müssen die bisherigen Einspritzventile, die bisher für Benzin vorgesehen waren, durch Einspritzventile ersetzt werden, die für Gas vorgesehen sind. Es gibt Berichte, dass der Einsatz von Einspritzventilen, die für Gas ausgelegt sind, gut funktioniert hat.¹³

5.2 ZWEI VERSCHIEDENE MÖGLICHKEITEN, DEN MOTOR MIT WASSERSTOFF ZU VERSORGEN

Eine der Möglichkeiten, den Motor mit Wasserstoff zu versorgen, besteht darin, Einspritzventile zu verwenden, die im Ansaugkrümmer an der Außenseite des Einlassventils angebracht sind und so den Wasserstoff bereits außerhalb des Brennraums mit der Luft/dem Sauerstoff vermischen und dann mit Hilfe des Unterdrucks des Motors beim Öffnen des Einlassventils in den Zylinder gesaugt werden. Bei diesem Modell besteht ein gewisses Risiko der Selbstentzündung, da der Kraftstoff eintritt, sobald das Einlassventil geöffnet wird, und dann die Gefahr besteht, dass der Wasserstoff mit Teilen in Kontakt kommt, die eine so hohe Temperatur haben, dass er sich entzündet. Es könnte die Zündkerze sein, die eine zu niedrige Wärmezahl hat und trotzdem glüht, es könnten Restkohlenstoff- und Rußablagerungen des Motors sein, der zuvor vor dem Umbau mit fossilen Brennstoffen betrieben wurde. Oder Ölrückstände, die durch eine etwas minderwertige Kurbelgehäuseentlüftung zwischen Zylinderwand und Kolbenringen nach oben gedrückt werden und im Zylinder glühen können. Es kann auch zu einer Detonation des Kraftstoff-Luft-Gemisches kommen, wenn die Nockenwellen zu stark überlappen und der Kraftstoff dann mit der Auslassöffnung in Kontakt kommt.

Die andere Möglichkeit, dem Motor Wasserstoff zuzuführen, ist die Verwendung eines sogenannten Direkteinspritzmodells des Motors. Das bedeutet, dass das Einspritzventil direkt im Brennraum sitzen muss. Der Vorteil dieser Methode ist, dass Sie genauer steuern können, wann die Injektion erfolgen soll.

¹³(Rorimpandey et al. 2023)

5.2.1 SCHRITT 4

Aufgrund der Verbrennungsnatur des Wasserstoffs muss auch das Zündsystem umgerüstet werden, je nachdem, was Sie als Ausgangspunkt haben, müssen Sie dies auf unterschiedliche Weise tun.¹⁴

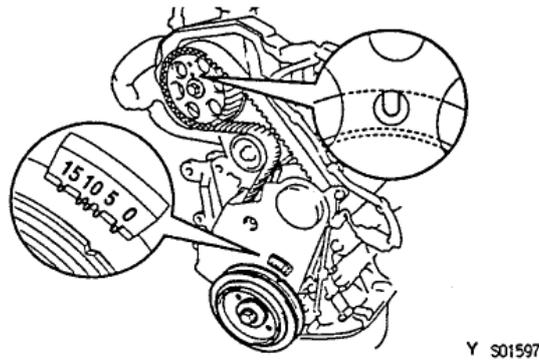


Eine konventionelle Zündkerze wird auch in einigen Arten von Wasserstoffmotoren verwendet (Bild 20).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Zündzeitpunkt bei hohen Drehzahlen mit einem auf Wasserstoff umgerüsteten Verbrennungsmotor später liegen sollte als beispielsweise beim herkömmlichen Benzinbetrieb, bei dem der Zündzeitpunkt etwa 25-35 Grad vor dem oberen Totpunkt liegt. Am Wasserstoffwandler kann der Zündzeitpunkt bei hohen Motordrehzahlen nahe Null liegen, weil die Flammendrehzahl so hoch ist.

Andererseits nimmt die Flammendrehzahl mit einem mageren Gemisch ab, was z.B. bei niedrigen Drehzahlen, beispielsweise im Leerlauf, aber auch bei geringer Last auftritt, beim Benzinmotor liegt der Zündzeitpunkt etwa 10 Grad vor dem oberen Totpunkt, während es stattdessen beim wasserstoffumgewandelten Motor etwas früher sein sollte, um das gesamte Gemisch zu verbrennen.

¹⁴(Verhelst und Wallner, 2009)



Das Timing muss im Vergleich zu einem Benzinmotor verzögert werden (Bild 21).

Diese Modifikation kann durch Modifikation der Software im Steuergerät des Fahrzeugs entsprechend den gewünschten Zündzeitpunkten erfolgen, auf die Sie unter den verschiedenen Bedingungen, denen der Motor ausgesetzt ist, zugreifen möchten.

Bei einem älteren Motor mit einem herkömmlichen Verteiler, der mit der Drehzahl der Nockenwelle läuft, könnten Sie stattdessen einen Verteiler verwenden, der in die entgegengesetzte Richtung zu dem Verteiler zeigt, der dort sein sollte, was dann bedeuten würde, dass der Zündzeitpunkt bei höheren Drehzahlen abgesenkt und bei niedrigeren Drehzahlen, z. B. im Leerlauf, angehoben wird.

Des Weiteren sollten keine Zündkerzen mit einer Platinbeschichtung verwendet werden, da das Platin als Katalysator zwischen Wasserstoff und Sauerstoff wirkt und dann die Gefahr der Selbstentzündung bestehen kann.

Bei der Umrüstung eines regulären Verbrennungsmotors, der bisher mit fossilen Brennstoffen betrieben wurde, ist es äußerst wichtig, alle Teile im und am Motor zu demontieren, die Rußpartikel enthalten können. Der Zylinderkopf muss demontiert werden, um an den Ruß zu gelangen, der normalerweise im Brennraum auftritt. Die Ventile sollten ebenfalls herausgenommen werden, damit auch sie von Ruß gereinigt werden können, auch innerhalb der Anschlüsse, insbesondere auf der Auslassseite, sollten alle Rußpartikel entfernt werden. Oben auf den Kolbenoberseiten befinden sich in der Regel Rußablagerungen, die entfernt werden müssen.

All diese Arbeiten sind wichtig, um einer Selbstentzündung entgegenzuwirken, die entsteht, wenn Restrußpartikel glühen. Aus dem Wasserstoff entstehen später keine Rußablagerungen, da er weder Kohlenstoff noch Sauerstoff enthält.

6 DIE FORSCHUNGSPHASE

Heute sind Forscher auf der ganzen Welt in vollem Gange, um die Technologie für Motoren zu entwickeln und zu verfeinern, die besser mit Wasserstoff betrieben werden können. Sie arbeiten auf unterschiedliche Weise daran, den Wasserstoff dem Motor zuzuführen, dies wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

SCHLAGWORTE:

Zündung, Einspritzung, verschiedene Einspritzsysteme.

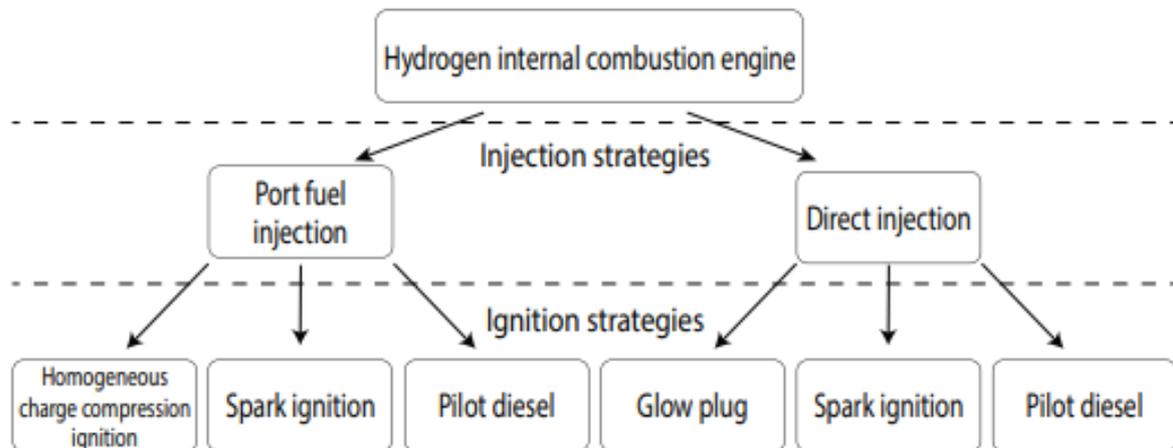
FRAGEN ZUR STUDIE:

1. *Welches System gilt als die einfachste Möglichkeit, den Motor mit Wasserstoff zu versorgen?*
2. *Welches der Abgase hat sich als schwierig erwiesen, um es auf vernünftige Werte zu reduzieren?*
3. *Erklären Sie, warum die Piloteinspritzung in einem Wasserstoffmotor verwendet wird.*

6.1.1 WASSERSTOFF-SAUGROHR-KRAFTSTOFFEINSPRITZUNG, PFI

Einspritzung in die Einlassöffnung im Ansaugkrümmer. Das bedeutet, dass der Kraftstoff außerhalb des Einlassventils, also nicht direkt in den Brennraum, eingespritzt wird. Erst wenn sich das Einlassventil öffnet und sich der Kolben nach unten bewegt, wird der Kraftstoff durch den entstehenden Unterdruck, den Ansaugtakt, in den Zylinder gesaugt. Diese Art der Einspritzung ist bei Ottomotoren am gebräuchlichsten. Die Umstellung dieses Systems auf Wasserstoffbetrieb ist relativ "einfach", wie wir bereits erwähnt haben. Die Einspritzdüsen müssen ausgetauscht werden, um Wasserstoff anstelle von Benzin verarbeiten zu können, und das Zündsystem muss modifiziert werden, wie bereits erwähnt. Aber es gibt Risiken bei diesem System, die wir bereits erwähnt haben, nämlich eine vorzeitige Selbstentzündung, weil der Kraftstoff so früh eintritt. Ein weiteres Problem bei dieser Art von Einspritzsystem besteht darin, dass beim Einspritzen des Kraftstoffs in die Ansaugöffnung die Luft herausgedrückt wird und die Leistung des Motors dann begrenzt wird. Im Folgenden finden Sie

eine einfache Beschreibung der verschiedenen Arten, wie die Verbrennung stattfinden kann, sowie leicht unterschiedliche Arten der Zündung des Kraftstoffs.¹⁵



Die verschiedenen Einspritzarten für Verbrennungsmotoren (Bild 22)

6.1.2 KOMPRESSIONSZÜNDUNG MIT HOMOGENER LADUNG, HCCI

Homogen geladene Druckzündung könnte man übersetzen. Ohne zu sehr in die Tiefe zu gehen, basiert es darauf, dass die Einspritzung von Wasserstoff so erfolgt, wie wir sie im PFI-System beschrieben haben, d.h. in der Einlassöffnung direkt neben dem Einlassventil, aber an der Außenseite des Brennraums. Sie verwenden ein homogenes Gemisch aus Luft und Wasserstoff, das zudem sehr mager ist. Dieses Gemisch wird direkt in den Brennraum eingespritzt und aufgrund seiner Entflammbarkeit durch die hohe Kompression entzündet und entzündet dann den zugeführten Wasserstoff. Als großer Vorteil dieses Systems hat sich erwiesen, dass NO_x als Restprodukt in den Abgasen auf sehr niedrige Werte reduziert werden konnte. Dies zudem bei gleichbleibender Leistung des Motors. NO_x liegt nahe Null. Aber auch dieses System muss weiterentwickelt werden, um zu funktionieren, unter anderem ist eine sehr hohe Kompression erforderlich, um nur einige zu nennen.¹⁶

6.1.3 FREMDGEZÜNDETE SAUGROHREINSPRITZUNG

Dieses System, das im Englischen als PFI SI bezeichnet wird, steht si für Spark Ignition, also eine Zündung des Kraftstoffs mit dem Funken einer Zündkerze. PFI mit SI ist das am besten erforschte

¹⁵(Yip et al., 2019, S. 7)

¹⁶ Ebd., S. 7

System, wenn es um Verbrennungsmotoren geht, die Wasserstoff verbrennen. Wenn Sie ein extrem mageres Kraftstoff-Luft-Gemisch haben, kann dieses System ohne externe Behandlung sehr niedrige NO_x-Werte in den Abgasen von unter 100 ppm erreichen.

Wünschenswert ist es auch, die Menge an unerwünschten Restprodukten im Zusammenhang mit der Verbrennung zu reduzieren. Dies kann durch stöchiometrische Beziehungen erreicht werden.

Stöchiometrische Zusammenhänge könnten vereinfacht so beschrieben werden, dass die exakt richtige Materiemenge zusammen mit einer anderen Materie mit exakt korrekter Menge in einer Verbrennung enthalten ist, in der sich alles entzündet. Dadurch werden auch unerwünschte Rückstände beseitigt. Durch den Einsatz eines AGR-Systems wird der NO_x-Gehalt noch weiter reduziert. AGR steht für Abgasrückführung. Das bedeutet, dass eine geringe Menge an Abgasen in den Verbrennungsprozess zurückgeführt wird, um die Verbrennungstemperatur zu senken und damit die NO_x-Werte, die bei hohen Temperaturen entstehen, zu senken.¹⁷

Außerdem kommt ein Drei-Wege-Katalysator zum Einsatz, der den NO_x-Wert weiter auf Werte nahe Null senkt. Anstelle der AGR wird manchmal stattdessen die Wassereinspritzung in das Saugrohr verwendet, da sie die gleiche Wirkung wie die AGR hat, da bei der Wasserstoffverbrennung nur Wasserdampf als Restprodukt anfällt. Dieses System hat, wie wir bereits erlebt haben, einige Probleme wie eine ungewollte vorzeitige Zündung des Gemischs, aber auch Rückzündungen, die zu Motorleistungsverlusten führen.

6.1.4 PILOTKRAFTSTOFFZÜNDUNG MIT SAUGROHR-WASSERSTOFFEINSPRITZUNG

Dieses System basiert auf der Direkteinspritzung DI und PFI. Die Direkteinspritzung dient der sogenannten "Piloteinspritzung", das heißt, man spritzt eine kleine Menge Diesel direkt in den Brennraum. Der Diesel wird durch die Kompressionswärme entzündet und wenn später Wasserstoff in diesen eingespritzt wird, wird er gezündet. Aber auch dieses System bringt gewisse Nachteile mit sich, wie z.B. eine ungewollte Selbstentzündung. Auch der NO_x-Gehalt ist zu hoch, um diese Methode als emissionsfrei einzustufen, aber in den Labors werden weitere Studien durchgeführt. Aber trotz der Tatsache, dass PFI-Systeme relativ einfach auf Wasserstoffbetrieb umgestellt werden können, sollten sie vielleicht eher als Übergang von unseren üblichen fossil verbrennenden Motoren zu

¹⁷ Ebd., S. 8

fortschrittlicheren Motoren gesehen werden, die hoffentlich nicht mehr allzu weit in der Zukunft liegen.¹⁸

6.1.5 WASSERSTOFFVERBRENNUNG MIT DIREKTEINSPRITZUNG

Den Wasserstoff direkt während des Verdichtungstakts direkt in den Zylinder einzubringen, scheint das vielversprechendste Konzept zu sein, soweit wir heute mit der Entwicklung der Motortypen, die wir haben, gekommen sind. Auf diese Weise können Sie unerwünschte Selbstentzündungen oder Rückzündungen, die im PFI-Motorsystem auftreten, mehr oder weniger verhindern. Denn die Einspritzzeit lässt sich beliebig regulieren. Sie könnten mit der Injektion so spät warten, dass beide Ventile geschlossen sind, wodurch die Exposition heißer Teile minimiert wird.

Das Problem, das Sie mit Wasserstoff haben, ist, dass er viel Platz wegnimmt, wenn er über den Ansaugkrümmer eingespritzt wird und dann auch den Platz der Luftzufuhr einnimmt. Dies wiederum trägt zu Leistungsverlusten bei, die Sie ebenfalls loswerden. Denn nur die Luft wurde bereits über das Einlassventil in den Zylinder gesaugt und der Kraftstoff wird dann bei geschlossenem Einlassventil in den Zylinder geleitet. Wenn Sie jedoch den Kraftstoff im Verdichtungstakt einspritzen, müssen Sie aufgrund des höheren Drucks, der in einem Zylinder herrscht, einen höheren Einspritzdruck vom Injektor haben, als von einem Injektor für das PFI-System benötigt wird. In einem PFI-System gibt es überhaupt keinen Überdruck, sondern meist einen Unterdruck. Es hat sich gezeigt, dass dieses System, das mit so hohen Drücken arbeitet, fast mit dem hohen Wirkungsgrad von Diesel verglichen werden kann. Das System wird oft mit HPDI abgekürzt, was für High Pressure Direct Ignition steht. Dieses System hat viele Vorteile, es kann in vielen verschiedenen Situationen flexibler gestaltet werden, es kann auf eine völlig andere Art und Weise fein abgestimmt werden als ein PFI-System. Sie können den Einspritzdruck einstellen, Sie können den Einspritzzeitpunkt einstellen, Sie können auch das Einspritzdesign einstellen, all dies, um die Motorleistung optimal optimieren zu können. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, den Kraftstoff zu entzünden, und darüber können Sie weiter unten lesen.¹⁹

6.1.6 GLÜHKERZEN-ZÜNDUNG

¹⁸ Ebd., S. 8

¹⁹ Ebd., S. 9

Glühkerzen werden normalerweise für Dieselmotoren verwendet, wenn sie aus dem kalten Zustand starten. Sie leuchten dann kurz vor dem Startmoment auf, um den Brennraum aufzuheizen, und erlöschen dann, wenn der Motor läuft. Aber wenn man sie verwendet, um in einem Verbrennungsmotor mit Direkteinspritzung für Wasserstoffkraftstoff zu arbeiten, ist das anders. Hier muss die Glühkerze die ganze Zeit eingeschaltet sein und eine Temperatur von etwa 900-1100 Grad Celsius ist erforderlich. Aber auch diese Methode zeigt sowohl Vor- als auch Nachteile, wenn man sie zum Beispiel mit dem Dieselmotor vergleicht, verbraucht der Wasserstoffmotor mehr Kraftstoff, aber ein Vorteil in den Studien war, dass er deutlich weniger NOx ausstieß als der Dieselmotor. Ein weiteres Problem bei diesem Typ ist, dass Sie heute keine Glühkerzen haben, die die ganze Zeit eingeschaltet bleiben und leuchten können, aber vielleicht kann dieses Problem in Zukunft gelöst werden.²⁰

6.1.7 ZÜNDUNG MIT ZÜNDKERZE

Das wohl am besten erforschte Modell und auch das am besten dokumentierte, Direkteinspritzung mit Zündkerzenzündung.

In vielerlei Hinsicht ist es dem im vorherigen Absatz beschriebenen Modell, der Zündung mit Glühkerzen, sehr ähnlich. Was weitgehend getan wurde, ist, dass die Glühkerze durch eine Zündkerze ersetzt wurde. Es können mehr als eine Zündkerzen vorhanden sein. Studien an einem Einzylindermotor, der auf Direkteinspritzung umgerüstet ist und den Wasserstoff aus einem Funken einer Zündkerze zündet, zeigen einen thermischen Wirkungsgrad von 40 % bei niedriger bis mittlerer Motorlast, was im Vergleich zu einem gleichwertigen Dieselmotor nur geringfügig geringer ist.

Was bei diesem Modell auch festgestellt wurde, ist, dass der Einspritzzeitpunkt die Gemischhomogenität beeinflusst, was die Motorleistung und die Emissionen erheblich stärker beeinflusst als den Zündzeitpunkt. Durch die Verschiebung des Einspritzzeitpunkts von 120 Grad vor OT auf 65 Grad vor OT wird die Motorleistung weiter erhöht. Leider führt dies zu erhöhten NOx-Emissionen, sie haben dann versucht, mehr Luft einzuspritzen, um den Gehalt zu senken, es hat funktioniert, aber dann wurde der Effekt dadurch verringert. Einen großen Einfluss auf die Motorleistung hat auch der Winkel, in dem der Injektor den Kraftstoff in den Brennraum einspritzt.²¹

²⁰ Ebd., S. 9

²¹ Ebd., S. 10 f.

6.1.8 DUAL-FUEL-HOCHDRUCK-SELBSTZÜNDUNGSMOTOR MIT DIREKTEINSPRITZUNG

Wie wir bereits erwähnt haben, ist es nicht einfach, den Wasserstoff nur mit Kompressionswärme zu entzünden. Hier werden wir relativ vereinfacht beschreiben, wie sie mit dieser Technologie gedacht haben.

Durch den Einsatz einer sogenannten Vorinjektion wurde es auch in den zuvor vorgestellten Modellen aufgegriffen. Es kann auch als Pilotinjektion bezeichnet werden. Das kann zum Beispiel so passieren: Im Brennraum befindet sich ein Injektor, der eine kleine Menge eines Stoffes einspritzt, der sich mit Hilfe von Kompressionswärme entzündet, zum Beispiel Diesel, er zündet sich und kurz darauf wird der Wasserstoff eingespritzt und durch den nun brennenden Diesel im Brennraum gezündet. In dieser Theorie gibt es jedoch keine Informationen, die erklären, wie es in der Realität mit Wasserstoff funktioniert. Auf der anderen Seite wurden Studien mit CNG, Compressed Natural Gas, durchgeführt, das eine ähnliche Entflammbarkeit wie Wasserstoff aufweist.

Es wurden zwei Einspritzdüsen verwendet, eine für den Diesel und eine für das Gas. Unterschiedliche Winkel der Injektoren hatten unterschiedliche Auswirkungen. Selbst unterschiedliche Zwänge hatten unterschiedliche Bedeutungen. Auch bei diesem Modell haben sie versucht, das Gas zu verschiedenen Zeiten während des Kompressionstakts einzuspritzen, und dabei unterschiedliche Ergebnisse erzielt. Es wurde auch mit kombinierten Injektoren versucht, bei denen der Injektor so konstruiert ist, dass sich beide Kraftstoffe in ein und demselben Injektor befinden.²²



Hier ist ein Beispiel beschrieben, dieser Doppelinjektor wird von der Firma West Port entwickelt. (Bild 23)

²²(Dimitriou und Tsujimura, 2017)

Ein Rückschlag, der sich ergeben hat, ist, dass die Piloteinspritzung von Diesel, um die Verbrennung des Gases zu starten, schließlich eine Rußschicht aufbaut, obwohl die Dieselmenge sehr gering ist, aber dieses Problem wird wahrscheinlich reduziert, wenn das CNG durch Wasserstoff ersetzt wird, da CNG Kohlenstoff enthält.

6.2 VOR - UND NACHTEILE DER VERSCHIEDENEN METHODEN

Bei den verschiedenen Methoden der Kraftstoffeinspritzung oder der Art und Weise, wie die Verbrennung stattfindet, kann man sagen, dass es bei allen Vor- und Nachteile gibt. Bei den Injektoren zum Beispiel wurde festgestellt, dass sie aufgrund der fehlenden Schmierwirkung des Wasserstoffs wie Diesel oder Benzin Verschleiß aufweisen, der auf lange Sicht wahrscheinlich ein Problem darstellen wird. Möglicherweise könnte dies mit Hilfe einer Form der Schmierung gelöst werden oder vielleicht durch die Behandlung der Teile, die den Gegenstand berühren, mit einer Oberfläche, die die Reibung zwischen ihnen gewährleistet.²³

6.2.1 ROLLE DES INJEKTORS

Es hat sich gezeigt, dass der Injektor eine große Rolle für die Motorleistung spielt. Die Eigenschaften des Injektors in Bezug auf den Druck, den er verarbeiten kann, und die Größe der Düse stehen in direktem Zusammenhang damit, wie gut die Einspritzung ist und wie sie sich mischt, aber auch, wie die Einspritzmenge gesteuert wird. So beeinflusst die Auslegung der Injektoren, wie groß der Wärmeverlust an den Zylinderwänden ist und wie hoch der Wirkungsgrad damit ist, also auch den Kraftstoffverbrauch.²⁴

Es hat sich auch herausgestellt, dass das Wasserstoffgas bei bestimmten Metalllegierungen eine Versprödungswirkung hat, die bei langfristiger Nutzung zum Problem werden kann.

Weitere Hindernisse, die überwunden werden müssen, sind zum Beispiel der Umgang mit der hohen Diffusionsfähigkeit von Wasserstoff, die es ihm ermöglicht, verschiedene Arten von Materialien zu durchdringen.

²³(Gültekin und Ciniviz, 2022)

²⁴(Verhelst und Wallner, 2009)

So können beispielsweise die Injektoren dem Wasserstoff ausgesetzt sein, was dann dazu führen kann, dass die Funktion beeinträchtigt wird oder gar nicht mehr vorhanden ist.

Voraussetzung für die Entwicklung von Wasserstoff als Kraftstoff in Verbrennungsmotoren ist, dass man sich auf die Probleme konzentriert, die man zum Beispiel mit verschiedenen Materialien hat, die mit den unterschiedlichen Eigenschaften von Wasserstoff umgehen können. Die hohen Drücke, die in einigen der zuvor vorgestellten Systeme verwendet werden. Das Design der Gasleitungen und dass Sie alle Verbindungen zwischen verschiedenen Komponenten sicher abdichten können. Wie Kraftstofftanks konstruiert sind und eine Konstruktion, die absolute Dichtheit gewährleistet. Da die Injektoren speziell für Wasserstoffgas ausgelegt sind, verwenden wir heute viele Injektoren, die eigentlich für andere Gasarten gedacht sind, CNG, LPG oder BIO-Gas. Aber die Entwicklung schreitet ständig voran und was heute geschrieben wird, kann morgen Geschichte sein.

6.3 DREI VERSCHIEDENE INJEKTIONSARTEN

6.3.1 ELEKTROHYDRAULISCH AKTIVIERT (NTSEL)

Diese Art von Injektor benötigt Hydraulikflüssigkeit (normalerweise Diesel) unter hohem Druck.

Der Einspritzdruck ist auf 200 bar begrenzt. Während der eigentlichen Einspritzung wird der Magnet aktiviert, der dann den Druck im Diesel ablässt, der sich im oberen Teil des Injektors befindet, der Wasserstoff, der unter hohem Druck steht, kann dann die Einspritznadel von ihrem Sitz heben und die Einspritzung findet statt. Bei dieser Art von Injektor muss ein so hoher Druck auf den Diesel ausgeübt werden, dass die Nadel in geschlossener Position gegen ihren Sitz abdichtet. Der Diesel sorgt auch dafür, dass bestimmte bewegliche Teile im Injektor geschmiert werden.²⁵

6.3.2 MAGNETVENTIL AKTIVIERT (WESTPORT)

Die Firma Westport hat diesen Injektor entwickelt, es ist ihre erste Generation und er wird vollständig magnetisch für DI- und Wasserstoffkraftstoff angetrieben. Es ist auf 150 bar begrenzt. Es wurden einige Fehlfunktionen gemeldet, darunter einige Bewegungseinschränkungen an der Nadel.

²⁵ (Yip et al., 2019, S. 18)

Die Hoerbiger Valve TEC GmbH hat auch einen ähnlichen Magnetantrieb entwickelt, der ebenfalls für DI- und Wasserstoffkraftstoffe mit einem maximalen Einspritzdruck von 100 bar entwickelt wurde.²⁶

6.3.3 PIEZO-GESTEUERT (WESTPORT)

Dieser ist von der zweiten Generation und hält Drücken bis zu 250 bar stand. Die Nadel wird durch ein Piezoelement aus einer analogen Spannung aktiviert, die die Bewegung der Nadel reguliert und eine sehr schnelle Reaktion ermöglicht. Er hat eine kurze Öffnungszeit von 0,5 ms. Darüber hinaus wird die Lebensdauer durch die flexible Steuerung der Nadelgeschwindigkeit verbessert, wodurch die Schließgeschwindigkeit reduziert und somit der Schließdruck reduziert werden kann.²⁷

7 SCHLÜSSE

Dieses Kapitel beleuchtet die Vorteile der Umrüstung bestehender Motoren und des Fahrzeug- und Schiffstransports und der Produktion der Zukunft. Es nimmt auch einen sentimentaleren Blickwinkel auf die Zukunft von Oldtimern ein. In einer Welt, in der Wissenschaftler ständig neue Lösungen finden und in einer Welt, in der die Menschheit vor neue Herausforderungen mit der Umwelt gestellt wird, sind dies Perspektiven, die wir im Auge behalten müssen.

SCHLÜSSELWÖRTER:

Verlagerung der Motorenproduktion, Umbauvorteile, Rettung von Oldtimern, die Zukunft des Fahrzeug- und Schiffstransports.

FRAGEN ZUM STUDIUM

1. *Zu welchen Herausforderungen der Zukunft kann Wasserstoff beitragen?*
2. *Was sind die Vorteile des Einsatzes von Wasserstoff in einem Verbrennungsmotor gegenüber einer Brennstoffzelle?*

²⁶ Ebd., S. 17

²⁷ Ebd., S. 17

3. *Welche möglichen Vor- und Nachteile der Umstellung auf eine wasserstoffbasierte Zukunft sehen Sie sowohl für den Einzelnen als auch für die Gesellschaft?*

7.1 DIE VORTEILE DER UMRÜSTUNG BESTEHENDER MOTOREN

Ein Vorteil, der beim Betrieb von Verbrennungsmotoren mit Wasserstoff anstelle von Brennstoffzellen festgestellt wurde, ist, dass der Wasserstoff nicht ganz so rein sein muss, um in einem Verbrennungsmotor zu funktionieren, wie in einem mit Brennstoffzellen. Ein weiterer Vorteil, den Sie beim Einsatz von Verbrennungsmotoren sehen, ist die Möglichkeit, zwischen verschiedenen Kraftstoffarten zu wechseln. Darüber hinaus wird der Einsatz bereits bewährter Technologie die Kosten in den Fabriken niedrig halten.

Ob es in Zukunft Umrüstsätze geben wird, kann derzeit noch niemand beantworten, aber es wäre umweltfreundlicher, so schnell wie möglich von fossilen Brennstoffen auf fossilfreie Brennstoffe umzusteigen.

7.2 WARUM WASSERSTOFF IN EINEM VERBRENNUNGSMOTOR?

Schließlich; Vielleicht ist das eine berechtigte Frage; Warum versuchen wir, den Otto- oder Dieselmotor so zu entwickeln, dass er mit Wasserstoff betrieben wird, wenn es den Anschein hat, dass sie bereits auf dem Weg aus der Gesellschaft sind?

Darauf gibt es keine schnelle und einfache Antwort. Es ist absolut so, dass das Fahrzeug mit Brennstoffzellentechnologie einen höheren Wirkungsgrad hat als ein Otto- oder Dieselmotor, der für den Betrieb mit Wasserstoff modifiziert wurde.

Eine Möglichkeit, dies zu sehen, ist, dass wir bereits eine große Anzahl von Ottomotoren und Dieselmotoren auf der ganzen Welt haben. Dennoch dominieren diese Motoren den Markt im Vergleich zu Elektrofahrzeugen weitgehend.

Diese in kurzer Zeit ersetzen zu können, wird ein Ding der Unmöglichkeit sein, und gleichzeitig ist es von größter Bedeutung, sehr bald Maßnahmen zu ergreifen, da die globale Umwelt bedroht ist.

Die Umstellung der Produktion von Verbrennungsmotoren auf Elektromotoren Es wird eine große Herausforderung sein, alle Fabriken, die heute Verbrennungsmotoren für unsere Fahrzeuge herstellen, auf Elektromotoren umzustellen, weil es schnell gehen muss. Gleiches gilt für die

Batterieproduktion und die dafür benötigten Stoffe. Was wir heute wissen, ist, dass diese nur an wenigen Orten der Welt in begrenzten Mengen zu finden sind

In einigen Teilen der Welt ist es finanziell nicht machbar und wird es auch langfristig nicht sein, sein Fahrzeug durch ein Elektro- oder Brennstoffzellenfahrzeug zu ersetzen. Hier könnte die Lösung des Umbaus bestehender Fahrzeuge eine gute Alternative sein.

Gleiches gilt für die Schifffahrt, den Scherverkehr und Flugzeuge, hier könnte die Möglichkeit, bestehende Motoren für den Wasserstoffbetrieb umzubauen, Unternehmen große finanzielle Verluste durch die Verschrottung einer gut funktionierenden Flotte ersparen.

Ein weiterer Bereich, der heute vollständig von fossilen Brennstoffen abhängig ist, ist der Bereich der Enthusiastenfahrzeuge. am Boden, im Wasser oder in der Luft. Innerhalb dieses Bereichs wäre es auch willkommen, diese Fahrzeuge weiterhin nutzen zu können. Gleiches gilt auch für alle Arten von motorsportbezogenen Rennen.

Ein weiterer Aspekt ist eher ein emotionaler oder nostalgischer Aspekt. Manchen Menschen fällt es schwer, ihre alten Verbrennungsmotoren zu verschrotten und einen gewissen Charme darin zu finden, ihren Klang zu hören.

Es könnte sein, dass man die Entwicklung des Wasserstoffkraftstoffs für die Otto- und Dieselmotoren als Übergang betrachten sollte, bis diese Fahrzeuge den Punkt erreicht haben, an dem sie ersetzt werden müssen.

Dieser Ersatz von Neufahrzeugen sollte zumindest in Betracht gezogen werden, wenn wir über gewerbliche und private Nutzfahrzeuge sprechen.

Wo es hingegen keine finanziellen Möglichkeiten gibt, könnte Wasserstoff eine gute Alternative sein, um weiterhin Fahrzeuge nutzen zu können, die heute fossile Brennstoffe, Benzin oder Diesel verbrennen.

8 REFERENZEN

Autovista SE. (o.J.). Mittlerweile ist es in 33 Ländern möglich, Wasserstoff zu tanken. [online] Verfügbar unter: <https://autovista.se/news/eu/mojlighet-till-att-tank-a-vatgas-finns-nu-i-33-lander/> [Zugriff am 19. Jan. 2023].

Billings, (2013). Wasserstoff – Treibstoff für die Zukunft | Dr. Roger Billings. [online] Erhältlich bei: <https://www.rogerebillings.com/hydrogen/>.

Dimitriou, P. und Tsujimura, T. (2017). Ein Überblick über Wasserstoff als Kraftstoff für Selbstzündungsmotoren. Internationale Zeitschrift für Wasserstoffenergie, 42(38), S. 24470–24486. doi:10.1016/j.ijhydene.2017.07.232.

Gültekin, N. und Ciniviz, M. (2022). Untersuchung des Einflusses von Brennraumgeometrie und Mischungsverhältnis auf die Motorleistung und Emissionen in einem Wasserstoff-Diesel-Dual-Fuel-Selbstzündungsmotor. Internationale Zeitschrift für Wasserstoffenergie. doi:10.1016/j.ijhydene.2022.10.155.

Kroyan, Wojciezyk, Kaario, Larmi. (2022). Modellierung der Endverwendungsleistung alternativer Kraftstoffeigenschaften in Flex-Fuel-Fahrzeugen, Energieumwandlung und -management, 269, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116080>.

KSC, S.S. (o.J.). NASA - Anspruchsvolles Design beflügelt Shuttle-Triebwerk. [online] www.nasa.gov. Erhältlich bei: https://www.nasa.gov/mission_pages/shuttle/flyout/ssme.html.

Kumar, A. R. (2016). Schwerpunkt Ausbau von Wasserstoff- und Elektroflotten für den Personen- und Güterverkehr in Großbritannien (Dissertation, College of Physical Sciences, School of Engineering University of Aberdeen, King's College).

Nationalmuseum für Amerikanische Geschichte. (o.J.). Allis-Chalmers Brennstoffzellen-Traktor. [online] Erhältlich bei: https://americanhistory.si.edu/collections/search/object/nmah_687671.

Büro für Energieeffizienz & Erneuerbare Energien (2019). Wasserstoffherzeugung. [online] Energy.gov. Erhältlich bei: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production>.

Rorimpandey, P., Lung Yip, H. Srna, A., Zhai, G., Wehrfritz, A., Kook, S., Hawkes, E.R., Chan, Q.N. (2023). Wasserstoff-Diesel-Dual-Fuel-Direkteinspritzung (H2DDI)-Verbrennung unter Selbstzündungsmotorbedingungen, International Journal of Hydrogen Energy, 2(48), S. 766-783, 0360-3199. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.241>.

SO-rummet. (2022). Luftskeppet Hindenburg. [online] Verfügbar unter: <https://www.sorummet.se/kategorier/luftskeppet-hindenburg#> [Zugriff am 19. Jan. 2023].

Dieser Tag in der Luftfahrt (2023). Ferdinand Adolf Heinrich August Graf von Zeppelin | Dieser Tag in der Luftfahrt. [online] Verfügbar unter: <https://www.thisdayinaviation.com/tag/ferdinand-adolf-heinrich-august-graf-von-zeppelin/> [Zugriff am 19. Jan. 2023].

Verhelst, S. und Wallner, T. (2009). Wasserstoffbetriebene Verbrennungsmotoren. Fortschritte in der Energie- und Verbrennungswissenschaft, 35(6), S. 490–527. doi:10.1016/j.pecs.2009.08.001.

Wikipedia. (2019). De Rivaz-Motor. [online] Erhältlich bei: https://en.wikipedia.org/wiki/De_Rivaz_engine.

Yip, H.L., Srna, A., Yuen, A.C.Y., Kook, S., Taylor, R.A., Yeoh, G.H., Medwell, P.R. und Chan, Q.N. (2019). Ein Überblick über die Wasserstoff-Direkteinspritzung für Verbrennungsmotoren: Auf dem Weg zur kohlenstofffreien Verbrennung. Angewandte Wissenschaften, 9(22), S.4842. doi:10.3390/app9224842.

9 BILDNACHWEISE

Bild 1: Der De Rivaz-Motor im Detail,

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:De_Rivaz_IC_Engine_detail.jpg (Abruf: 19.01.23)

Bild 2: Der de Rivaz-Motor, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rivaz_Engine.jpg (abgerufen am 19.01.23)

Bild 3: Der Wasserstoff-Lkw von Norsk Hydro aus dem Jahr 1933,

<https://www.flickr.com/photos/hydrogencarsnow/8136698514/> (Abruf: 19.01.23)

Bild 4: Harry Karls Ihring Brennstoffzellentraktor, <https://www.rogerebillings.com/hydrogen/> (Abruf: 19.01.23)

Bild 5: Wasserstoffauto von Roger Billings, <https://www.science.edu/acellus/2018/07/first-hydrogen-car/> (Abgerufen: 19.01.23)

Bild 6: GMs Brennstoffzellen-Lieferwagen, http://www.autoconcept-reviews.com/cars_reviews/gm/GM-hydrogen-fuel-cell-ELECTROVAN-and-battery-electric-ELECTROVAIR-1966/cars_reviews-GM-hydrogen-fuel-cell-ELECTROVAN-and-battery-electric-ELECTROVAIR-1966.html (Abruf: 19.01.23)

Bild 7: Schaufenster für Wasserstoff aus Sonnenenergie,

https://www.researchgate.net/figure/Hydrogen-production-from-solar-energy-36_fig17_324719917 (Abruf: 19.01.23)

Bild 8: Wasserstoffbus von Keyou, <https://www.busandcoachbuyer.com/hydrogen-bus-prototype-unveiling-at-iaa/> (Abruf: 19.01.23)

Bild 9: Flugzeug, <https://newatlas.com/energy/infinium-electrofuels-zero-carbon-fuel/> (Abruf: 19.01.23)

Bild 10: Space Shuttle, https://www.nasa.gov/mission_pages/shuttle/flyout/ssme.html (Abruf: 19.01.23)

Bild 11: Karte mit Wasserstofftankstellen, <https://www.h2stations.org/press-release-2022-another-record-number-of-newly-opened-hydrogen-refuelling-stations-in-2021/> (Abruf: 19.01.23)

Bild 12: Wasserstoff-Gasfüllstutzen, <https://www.swagelok.com/en/blog/guofu-hydrogen-refueling-case-study> (Abruf: 19.01.23)

Bild 13: Hondas Wasserstofftankstelle, <https://www.hydrogencarsnow.com/index.php/home-hydrogen-fueling-stations/> (Abruf: 19.01.23)

Bild 14: Verkehr in den frühen 1900er Jahren, <https://blog.greenprojectmanagement.org/index.php/2019/05/13/pollution-why-we-replaced-horses-with-automobiles/> (Abgerufen am 19.01.23)

Bild 15: Das Luftschiffunglück Hindenburg, <https://www.history.com/news/the-hindenburg-disaster-9-surprising-facts> (Abruf: 19.01.23)

Bild 16: Ein Ottomotor in einer Schnittzeichnung, <https://haynes.com/en-us/tips-tutorials/beginners-guide-what-four-stroke-engine> (Abruf: 19.01.23)

Bild 17: Ein Dieselmotor in einer ausgeschnittenen Zeichnung, <https://www.hardwarezone.com.sg/feature-why-you-should-consider-diesel-your-next-car/diesel-vs-petrol-engines> (Abruf: 19.01.23)

Bild 18: Doosans Wasserstofftank, <https://www.doosanmobility.com/en/products/hydrogen-tank/> (Abruf: 19.01.23)

Bild 19: Armaturen für Wasserstoff-Kraftstoffleitungen, <https://www.nvfcl.com/hydrogen-powered-fuel-cell-vehicles/> (Abruf: 19.01.23)

Bild 20: Zündkerze, <https://www.mycar.com.au/car-advice/spark-plugs-in-a-car> (Abruf: 19.01.23)

Bild 21: Zeichnung mit Timing-Einstellungen, <http://www.carnewscafe.com/2015/03/what-are-timing-marks/> (Abruf: 19.01.23)

Bild 22: Abbildung mit verschiedenen Injektionsmethoden, <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/22/4842>, S. 7 (Abruf: 19.01.23)

Bild 23: Privatbild des Doppeleinspritzventils vom Westhafen.

10 ABKÜRZUNGEN

BDC-unterer Totpunkt

BIO Biologisch

CNG-komprimiertes Erdgas

DI-Direkteinspritzung

AGR-Abgasrückführung

HCCI Homogene Ladungs-Selbstzündung

HPDI Hochdruck-Direktzündung

H₂ Wasserstoff

Verbrennungsmotor mit Verbrennungsmotor

LNG Flüssigerdgas