

Wasserstoffverbrennungsmotoren – eine Brückentechnologie?

Rebecca Bamberger, B. Sc., 31.08.2022

Kurzfassung — Diese wissenschaftliche Publikation befasst sich mit dem Aufbau und der Funktionsweise der alternativen Antriebstechnologie Wasserstoffverbrennungsmotor. Es wird das Potential dieses Motors hinsichtlich der Klimaziele als Antrieb für PKW und schwere Nutzfahrzeuge untersucht. Dazu wird dieser bezüglich des Wirkungsgrads und der CO₂-Bilanz mit den herkömmlichen Antrieben Otto- und Dieselmotor sowie den weiteren alternativen Antrieben Batterie und Brennstoffzelle verglichen.

I. EINLEITUNG

Im Juni 2022 wurde vom Europäischen Rat beschlossen, dass ab 2035 in der Europäischen Union als Teil des Legislativvorschlags im „Fit für 55“-Klima- und Energiepaket nur noch Neuwagen auf den Markt gebracht werden dürfen, die in der Nutzung CO₂-emissionsfrei sind. [1] Die sogenannten Flottengrenzwerte für Autos sollen bis dahin also auf null gesenkt werden, was das Aus für Autos mit herkömmlich betriebenen Verbrennungsmotor bedeuten würde. [2] Ausnahmen für Fahrzeuge, die mit e-Fuels betrieben werden, sind noch in Verhandlung. Bis Ende des Jahres soll das Gesetzgebungsverfahren abgeschlossen werden. [3]

Aktuell erfüllen diese Anforderung batterieelektrische Fahrzeuge und Fahrzeuge, die mit Wasserstoff betankt werden, also entweder über Brennstoffzellenantrieb in Kombination mit einem Elektromotor oder als Wasserstoffverbrenner. Bei Brennstoffzellen wird die im gasförmigen Wasserstoff gespeicherte Energie durch chemische Reaktion mit Sauerstoff als Strom freigegeben, welcher dann einen Elektromotor antreibt. Bei Wasserstoffverbrennern wird meist gasförmiger Wasserstoff in einem Wasserstoffhubkolbenmotor verbrannt, alternativ könnte dies auch mit flüssigem, kryogenen Wasserstoff erfolgen. [4,5]

Bislang hat nahezu jeder Automobilhersteller ein E-Auto in seinem Portfolio, allerdings kaum einer einen Wasserstoffverbrenner. Nach der Kritik an E-Autos bezüglich der Akku-Herstellung, Reichweite und Ladeinfrastruktur, lohnt sich ein Blick auf die Technologie der Wasserstoffverbrennungsmotoren. Dabei wird zunächst deren Funktionsprinzip dargestellt. Anschließend findet ein Vergleich mit der aktuell dominanten Alternative E-Motor, der Brennstoffzelle sowie den herkömmlichen Verbrennern statt.

II. AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE EINES WASSERSTOFF-VERBRENNUNGSMOTORS

A. Wasserstoff als Kraftstoff

Seit Beginn der Verbrennungsmotoren kommen flüssige Kraftstoffe wie Benzin oder Diesel zum Einsatz. In den 1950er Jahren kamen gasförmige Kraftstoffe wie Methan und Erdgas dazu, die man seit den 1990er Jahren als LPG (Liquefied Petroleum Gas) und CNG (Compressed Natural Gas) an Tankstellen findet. Sie basieren auf Kohlenwasserstoffverbindungen, die beim Verbrennen aufgespalten und oxidiert werden.

Die thermischen und chemischen Eigenschaften von reinem Wasserstoff unterscheiden sich von denen konventioneller Kraftstoffe und anderer gasförmiger Kraftstoffe. [6] In Abbildung 1 sind die für die Verbrennung relevanten Eigenschaften der verschiedenen Kraftstoffe im Vergleich aufgelistet.

Eigenschaft	Einheit	Super Plus	Diesel	Wasserstoff
Dichte (flüssig)	kg/m ³	750 – 770	820 – 845	70,8
bei Temperatur	°C	15	15	-253
Siedepunkt /-bereich	°C	30 - 190	210 - 355	-252,8
Stöchiometrischer Luftbedarf	kg _{Luft} /kg _{Kst}	14	14,7	34,3
Zündgrenze	Vol%	1,0 – 7,6	0,60 – 5,5	4,0 – 76
	λ -Bereich	1,4 – 0,4	1,35 – 0,48	10 – 0,13
Entzündungstemperatur	°C	230 – 450	250	585
Zündenergie (min.)	mJ	0,24	0,24	0,017
Laminare Flammgeschwindigkeit	cm/s	~ 40	~ 40	~ 230
Diffusionskoeffizient	cm ² /s	0,05	–	0,61

Abbildung 1: Stoffeigenschaften von Wasserstoff im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen [Vgl. 6]

Der auffälligste Unterschied ist der, im Gegensatz zu Benzin oder Diesel, gasförmige Aggregatzustand bei Umgebungstemperatur. Als kleinstes chemisches Element weist Wasserstoff eine sehr geringe Dichte und einen niedrigen Siedepunkt auf. Durch diese Eigenschaften werden deutlich größere Kraftstoffspeicher benötigt oder es muss erheblich mehr Energie zur Flüssigspeicherung aufgewendet werden. [6]

Der massenspezifische Energieinhalt von Wasserstoff ist hoch, der volumetrische Energieinhalt allerdings gering. So kann je nach Verbrennungskonzept ein höherer oder niedrigerer Gemischheizwert als bei konventionellen Kraftstoffen erreicht werden. [7] Die unterschiedlichen Verbrennungskonzepte werden in Abschnitt D erläutert. Bei äußerer Gemischbildung ergibt sich aufgrund der geringen Dichte ein niedrigerer Gemischheizwert, da die Luftverdrängung beim Wasserstoff größer ist. Bei Direkteinblasung ist jedoch ein Gemischheizwert oberhalb dem von konventionellen Kraftstoffen möglich. [6]

Wasserstoff weist zudem weite Zündgrenzen auf, was eine Qualitätsregelung im gesamten Betriebsbereich des Motors ermöglicht. So ist theoretisch eine homogene Verbrennung von Wasserstoff bis zu einem Luftverhältnis von $\lambda = 10$ möglich, d.h. Wasserstoff kann in sehr mageren Gemischen mit hohem Luftüberschuss verbrannt werden. Eine schnelle homogene Gemischbildung wird durch die hohe Diffusionsgeschwindigkeit begünstigt. Allerdings wird, wie auch bei konventionellen Kraftstoffen, mit zunehmendem Luftverhältnis eine größere Zündenergie benötigt. Bei einem optimalen, stöchiometrischen Wasserstoff-Luft-Gemisch reicht jedoch bereits ein Zehntel der Energie zur Entzündung aus, die für ein Benzin-Luft-Gemisch nötig wäre. Dadurch ist einerseits eine einfache und schnelle Zündung möglich, andererseits birgt dies das Risiko einer Rückzündung in den Ansaugtakt oder einer Frühzündung. [6,7]

Die Selbstentzündungstemperatur von Wasserstoff liegt

deutlich über der von konventionellen flüssigen Kraftstoffen, was zwar Vorteile beim Klopfverhalten einer vorgemischten Verbrennung hat, jedoch sehr hohe Verdichtungsverhältnisse sowie andere Maßnahmen zur Erhöhung der Ladungstemperatur erforderlich macht. [7]

Durch die hohe laminare Flammgeschwindigkeit können mit Wasserstoff extrem kurze, wirkungsgünstige Brenndauern realisiert werden können. Selbst magere Wasserstoff-Gemische haben im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen eine höhere laminare Brenngeschwindigkeit. Ein Nachteil der vorgemischten Verbrennung von stöchiometrischen Gemischen ist eine stärkere Belastung der Triebwerke durch den schnellen und höheren Druckanstieg, wodurch zudem lautere Verbrennungsgeräusche entstehen. [6,7]

B. Schematischer Aufbau

Der Grundmotor, bestehend aus Kurbel- und Schwunradgehäuse, Kurbel- und Nockenwellen, Kolben und Pleuel, Steuertrieb, Zylinderkopf und Zylinderkopfhäube (inklusive Kipphebeln, Ventilen usw.) und Ölkreislauf kann für die Wasserstoffverbrennung aus den bekannten Verbrennungsmotortechnologien übernommen werden. Die Komponenten Kolben bzw. Kolbenringe und Ventile sowie Ventilsitzringe müssen angepasst werden. Im PKW-Bereich wird meist auf Otto-Motoren zurückgegriffen, im Nutzfahrzeugsbereich eher auf Dieselmotoren. [6]

Neben Änderungen am Brennverfahren und Gemischbildungssystem muss außerdem sichergestellt werden, dass alle verwendeten Materialien und Komponenten, die mit Wasserstoff in Kontakt kommen, dafür überhaupt einsetzbar sind (z.B. Wasserstoffversprödung). [7] Abbildung 2 zeigt den Systemaufbau eines Wasserstoffmotors.

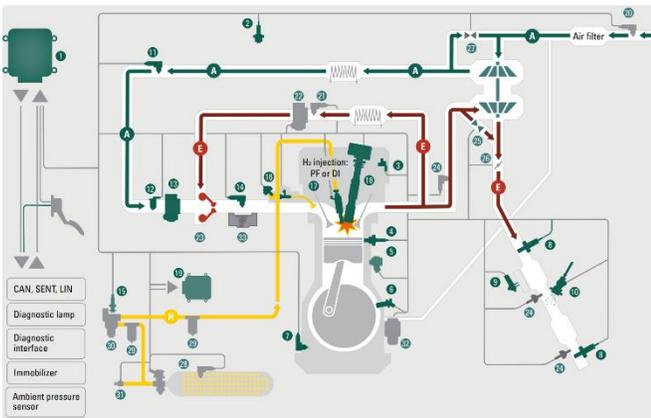


Abbildung 2: Systemaufbau eines Wasserstoffmotors [6]

Der Grundmotor ist mittig in grau dargestellt. Die Frischluftzufuhr (grün) und die Abgasabfuhr (rot) sind über einen Abgasturbolader verbunden. Das in Gelb abgebildete Tanksystem stellt getrennt davon ein eigenes System dar.

Im Vergleich zu Otto- oder Dieselmotoren muss die Kolbengeometrie angepasst werden, da das Verdichtungsverhältnis wegen der hohen Klopfneigung von Wasserstoff niedriger ist. Zur Minimierung des Gasübertritts in das Kurbelgehäuse (Ölraum), müssen auch die Kolbenringe angepasst werden. Da Wasserstoff eine geringe Dichte

aufweist und Schmiereigenschaften fehlen, muss die Dichte der Ventilsitze verbessert werden sowie deren Verschleiß reduziert. [6]

C. Brennverfahren

Die Brennverfahren unterscheidet man grundsätzlich in Fremdzündung (Otto-Brennverfahren) und Selbstzündung (Diesel-Brennverfahren).

Zur Fremdzündung des Luft-kraftstoff-Gemischs wird eine in den Brennraum ragende Zündkerze eingesetzt. Die Verbrennung kann so unabhängig von der Verdichtung und dem Zeitpunkt der Kraftstoffeinblasung initiiert werden. Der Vorteil daran ist eine bessere, homogene Gemischbildung sowie eine lastunabhängige Steuerung der Verbrennung. Wasserstoff weist eine minimale, um Faktor 10 kleinere Zündenergie auf als Benzin, daher kann das Wasserstoff-Luftgemisch mittels Standardzündkerze, wie sie aus Benzinmotoren bekannt ist, in jedem Betriebspunkt sicher gezündet werden. [6]

Auch selbstgezündete Brennverfahren sind durch die geringe, minimal notwendige Zündenergie und die weiten Zündgrenzen von Wasserstoff für den Einsatz in Wasserstoffverbrennungsmotoren möglich. Hinderlich ist jedoch die, im Vergleich zu konventionellen flüssigen Kraftstoffen, hohe Selbstzündungstemperatur von 585 °C. [7,8] Diese erfordert sehr hohe Verdichtungsverhältnisse sowie eine starke Erwärmung der Ansaugluft. Für den Automotiven Einsatz ist dieses Verfahren daher ungeeignet. Hier kommen bisher meistens fremdgezündete Verfahren zum Einsatz. [6]

D. Gemischbildung

Die Einteilung der Gemischbildungsverfahren mit weiterer Unterteilung nach Arbeitsweisen der Einblassysteme ist in Abbildung 3 dargestellt. Sie erfolgt anhand des Ortes oder Zeitpunkts der Zuführung des Kraftstoffs zur Frischluft. Dabei wird unterschieden zwischen äußerer, innerer und kombinierter Gemischbildung.

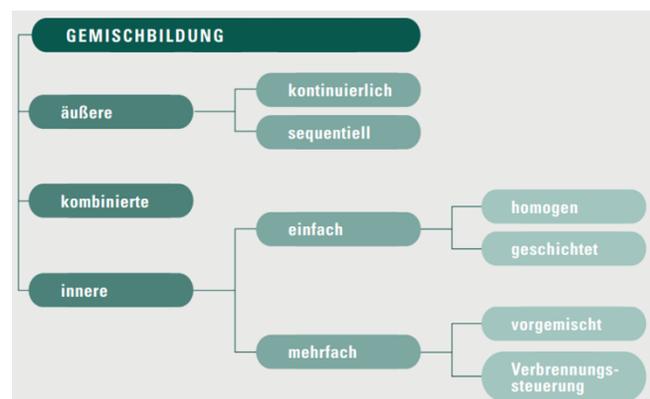


Abbildung 3: Gemischbildungskonzepte im Wasserstoffbetrieb [6]

Bei der äußeren Gemischbildung (kurz: H₂-AGB) erfolgt die Einbringung des Wasserstoffs in den Motor über Saugrohreinblasung, auch als Port Fuel Injection (PI) bezeichnet. Hingegen bei der inneren Gemischbildung (kurz: H₂-DI) der Wasserstoff mittels Direkteinblasung, auch Direct Injection (DI) genannt, direkt in den Brennraum des Motors eingebracht wird. Auch eine Kombination der beiden, zuvor

genannten Verfahren ist möglich.

Die äußere Gemischbildung kann weiterhin in kontinuierliche und sequentielle Arbeitssysteme unterteilt werden. Kontinuierlich arbeitende Systeme führen den Wasserstoff in die angesaugte Luft für den gesamten Motor zu. Sequentielle jedoch zeichnen sich durch eine bedarfsgerechte Zuführung des Kraftstoffs pro Zylinder aus.

Bei der inneren Gemischbildung bzw. Direkteinblasung gibt es die Möglichkeit den Kraftstoff mit einem oder mehreren Pulsen pro Arbeitsspiel zuzuführen. Dadurch können signifikante Unterschiede in der Ladungszusammensetzung realisiert werden, wie beispielsweise die Einblasung eines Teils des Kraftstoffs während der laufenden Verbrennung (sog. Verbrennungssteuerung).

Bei Wasserstoff-Motoren gibt es je nach Gemischbildungsverfahren große Unterschiede im Leistungspotential. Da gasförmiger Wasserstoff eine geringe Dichte von $0,090 \text{ kg/m}^3$ aufweist und dadurch einen großen Teil Frischluft verdrängt, kann mit einer konventionellen äußeren Gemischbildung nur ein niedriger Gemischheizwert von $2,97 \text{ MJ/m}^3$ erreicht werden (Vgl. Benzin $3,59 \text{ MJ/m}^3$). Wird allerdings ein Flüssigspeicher verwendet und tiefkalter, kryogener Wasserstoff vor dem Zylinder eingeblasen, lassen sich im Vergleich zur Einbringung von Wasserstoff mit Umgebungstemperatur deutliche Verbesserungen erreichen. Durch die Einbringung des kalten Wasserstoffs in das Saugrohr kühlt die gesamte Ladungsmasse ab, was zu einem Anstieg der Gemischdichte und des Gemischheizwerts auf $4,14 \text{ MJ/m}^3$ führt.

Derartige Maßnahmen ermöglichen es, die Leistungsdichte des Wasserstoffmotors an die von herkömmlichen Otto- oder Dieselmotoren anzugleichen bzw. sogar zu übertreffen. Mit kryogener äußerer Gemischbildung erreicht das Leistungspotential das gleiche Niveau wie bei Wasserstoff- Direkteinblasung und liegt damit auch noch etwa 15 % höher als im Benzinbetrieb. Zugleich führt die Abkühlung zu einer günstigen Beeinflussung des Auftretens von Verbrennungsanomalien, wie Rück- oder Frühzündungen. [6,7]

E. Emissionen

Bei der Verbrennung von Wasserstoff im Verbrennungsmotor entsteht nur Wasser, der Prozess ist also völlig schadstofffrei. Zumindest theoretisch ist eine motorische Verbrennung von Wasserstoff ohne Ausstoß von Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoff möglich, da er der einzige Kohlenstofffreie Kraftstoff ist. In der Realität werden jedoch Spuren dieser Schadstoffe beispielsweise durch im Brennraum vorhandenes Schmieröl mit dem Abgas ausgeschieden. Die Menge ist allerdings kaum nachweisbar, die einzig relevanten Emissionen beim Wasserstoffbetrieb sind Stickoxide. Diese entstehen durch Oxidation des mit der Luft angesaugten Stickstoffs und des vorhandenen Sauerstoffs während der Verbrennung bei sehr hohen Temperaturen. Mit zunehmendem Wasserstoffgehalt steigen auch die NO_x -Emissionen. Diese können jedoch durch geeignete innermotorische Gegenmaßnahmen wie beispielsweise einer Abmagerung des Gemisches ($\lambda > 1,5$), Absenkung der Verbrennungstemperatur unter die NO_x -

Bildungsschwelle oder Abgasrückführung durch Erhöhung des Inertgasanteils der Ladung recht einfach reduziert werden. [7]

III. VERGLEICH MIT ANDEREN ANTRIEBSARTEN

A. Aufbau und Prinzip der unterschiedlichen Antriebe

Die mechanischen Antriebskomponenten sind bei einem konventionellen und bei einem wasserstoffmotorischen Antriebsstrang die gleichen, lediglich der Verbrennungsmotor und das Tanksystem sind verschieden (Vgl. Abbildung 4). Auch der Energietransfer ist derselbe: Zuerst fließt chemische Energie vom Tanksystem zum Motor, die von diesem in mechanische Energie umgewandelt wird. Mittels Getriebe und Differential wird diese anschließend angepasst und an die Räder weitergegeben.

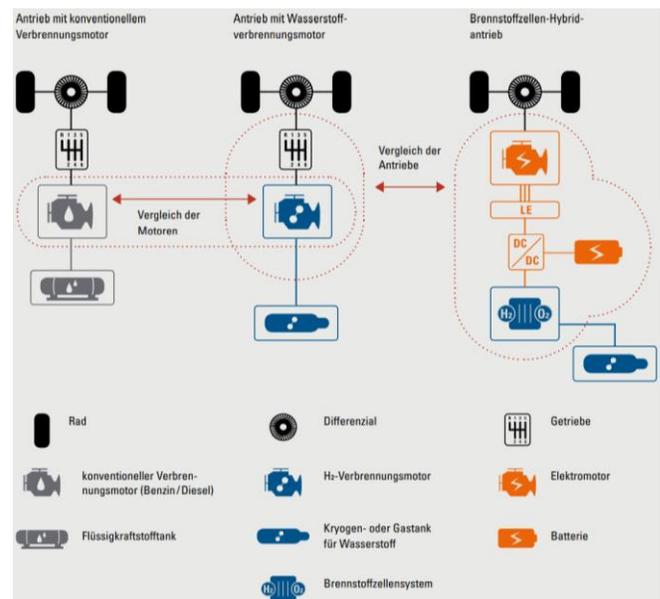


Abbildung 4: Schematischer Aufbau der unterschiedlichen Antriebsarten im Vergleich [6]

Der Aufbau eines Brennstoffzellenantriebs unterscheidet sich grundsätzlich von dem der Verbrenner. Zusätzlich zum Brennstoffzellensystem befindet sich noch ein Elektromotor, ein Spannungswandler sowie eine Batterie im Antriebsstrang. Chemische Energie wird vom Wasserstofftank zum Brennstoffzellensystem geführt, wo diese in elektrische Energie umgewandelt und an einen Spannungswandler (DC/DC) abgegeben wird. Ebenfalls über einen Spannungswandler angeschlossen ist eine Hochvoltbatterie vorhanden, die als zweiter Energiespeicher dient. Elektrische Energie kann somit entweder aus dem Brennstoffzellensystem zum Motor oder zur Batterie geleitet werden oder der Motor kann aus beiden Quellen versorgt werden. Der Elektromotor, welcher über eine Leistungselektronik angesteuert wird, ist schließlich für die Umwandlung der elektrischen in mechanische Energie zuständig. Wie bei den Verbrennern auch, werden die Räder im Normalfall über ein Differential angetrieben. [6]

Reine Elektroautos werden von einem Elektromotor angetrieben, der elektrische Energie aus einer Batterie bezieht. Die elektrische Energie erzeugt im Motor wechselnde

Magnetfelder und damit mechanische Energie, durch die das Fahrzeug bewegt wird. Das Besondere daran ist, dass bereits ab dem Start das volle Drehmoment bereitsteht. [9]

B. Wirkungsgrad

Um die alternativen Antriebe miteinander zu vergleichen und eine Bewertung vorzunehmen, ist eine Betrachtung der Systemwirkungsgrade sinnvoll. In Abbildung 5 sind die Verläufe der jeweiligen Wirkungsgrade über die Leistung des Antriebssystems für batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FC-System bzw. FC-Stack), Fahrzeuge mit Wasserstoffverbrennungsmotor (HICE) und mit einem konventionellen Verbrennungsmotor mit fossilen Kraftstoffen (ICE) dargestellt.

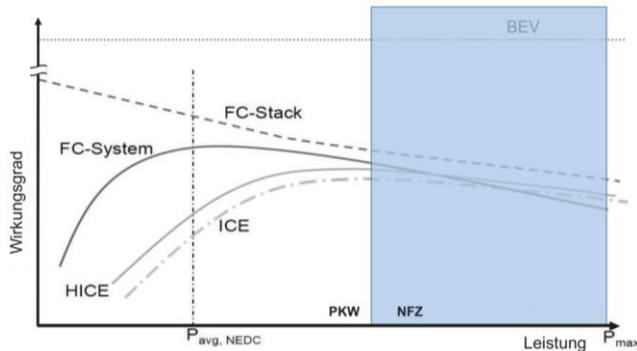


Abbildung 5: Wirkungsgrade über die Leistung im Vergleich [10]

Besonders auffällig ist dabei der hohe Wirkungsgrad der batterieelektrischen Fahrzeuge, dadurch, dass diese elektrische Energie effizient und direkt in mechanische Energie umwandeln. Die Brennstoffzelle als elektrochemischer Energiewandler hat einen geringeren Wirkungsgrad aufgrund von verschiedenen Verlustformen. Man unterscheidet zwischen Brennstoffzellen-Stack und dem Gesamtsystem, wobei mit steigender Leistung die Wirkungsgradifferenz von Stack und System abnimmt. Beim Vergleich der Wirkungsgrade von verbrennungsmotorischen Antrieben, die auf dem Prinzip der thermischen Energieumwandlung beruhen, liegt der Wasserstoffverbrennungsmotor vorne. Im Bereich mit geringerer Leistung (PKW) unterscheidet sich der Wirkungsgradverlauf von Verbrennungsmotoren stark von dem der Brennstoffzelle. Bei hohen Leistungen (Nutzfahrzeuge, kurz: NFZ) haben sie jedoch sehr ähnliche Wirkungsgrade. [10]

C. CO₂-Bilanz

Auch eine Betrachtung der Wertschöpfungskette der Energieträgerherstellung und -bereitstellung ist für die Bewertung der verschiedenen Antriebstechnologien erforderlich. Dazu gehört zum einen die Wandlung des Primärenergieträgers in den Sekundärenergieträger, also die Erzeugung von der Quelle (engl. „Well“) bis zur Speicherung („Tank“), zum anderen die Wandlung des Sekundärenergieträgers in die Antriebsenergie am Rad (engl. „Wheel“). Die gesamte Wertschöpfungskette wird dementsprechend in der Well-to-Wheel Analyse betrachtet. Eine solche Analyse zeigt Abbildung 6.

Die Balken stellen jeweils die freiwerdenden CO₂-Emissionen in g/MJ dar. Dabei steht der blaue Teil der Balken für die Emissionen während der Energieträgerherstellung und

-bereitstellung und der rote Teil der Balken für die lokalen Emissionen während der Nutzung des Energieträgers im Fahrzeug.

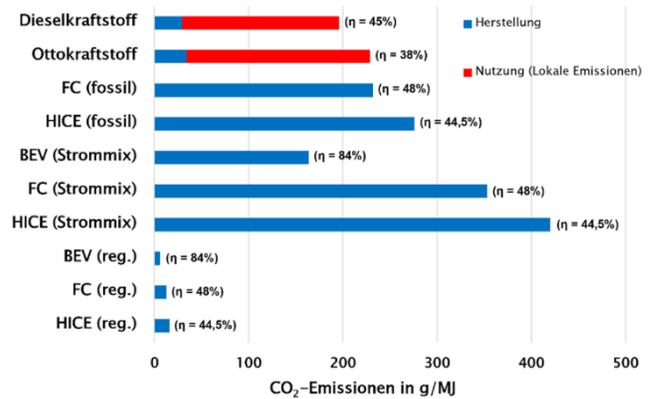


Abbildung 6: CO₂-Bilanz Herstellung, Bereitstellung und Nutzung der einzelnen Kraftstoffe im Vergleich [10]

Bei Fahrzeugen mit Diesel- und Ottomotor wird der Großteil der CO₂-Emissionen lokal emittiert. Nur ein kleiner Anteil fällt bei der Herstellung an, was auf die ausgereiften Herstellungsverfahren zurückzuführen ist.

Im Gegensatz dazu ist bei wasserstoffbasierten Antrieben das Herstellungsverfahren des Wasserstoffs entscheidend für die CO₂-Emissionen. Da keine natürlichen Wasserstoffvorkommen existieren (Sekundärenergieträger), muss Wasserstoff erst erzeugt werden. Dies kann in verschiedenen Produktionsverfahren geschehen, wobei man zwischen „grauem“ und „grünem“ Wasserstoff unterscheidet. Primär findet heutzutage die Form der grauen Wasserstoffherstellung Anwendung. Der Wasserstoff wird dabei aus fossilen Energieträgern und industriell meist aus Dampfreformierung hergestellt. Im Gegensatz dazu wird grüner Wasserstoff mit Hilfe elektrischer Energie bei der Wasserstoffelektrolyse erzeugt. Bei diesem Prozess bestimmt die genutzte Primärenergie die Menge der CO₂-Emissionen. [10,11]

Dabei fällt auf, dass in Summe die CO₂-Emissionen von wasserstoffbasierten Antrieben unter den derzeitigen Bedingungen in der Wasserstoffherstellung höher ausfallen als bei konventionellen Fahrzeugen. Würde man ausschließlich regenerativ erzeugten Strom aus Wind- und Solarkraft für die Wasserstoffherstellung nutzen, könnten die CO₂-Emissionen jedoch drastisch reduziert werden.

Batterieelektrische Antriebe weisen im Vergleich den geringsten Anteil an CO₂-Emissionen in der Well-to-Wheel Analyse auf, da die Energie direkt genutzt und mit einer Effizienz von 95 % gespeichert wird. [10]

Um die Antriebe ganzheitlich bewerten zu können, müssen neben den Emissionen der Treibstoffe auch die Emissionen, die bei der Produktion der jeweiligen Antriebsarten anfallen beachtet werden. In Abbildung 7 ist das CO₂-Äquivalent in Tonnen über die verbrauchte Energie während des Lebenszyklus dargestellt. Den Anfangspunkt der Kurven bilden die Emissionen für den Materialabbau und die Produktion der Antriebe abzüglich Vorteile durch Verwendung von recyceltem Material. Die durchgezogenen Linien repräsentieren die heute zur Verfügung stehenden

Energieträger, die gestrichelten Linien zeigen das zukünftige Potential bei Verwendung von regenerativen Energien.

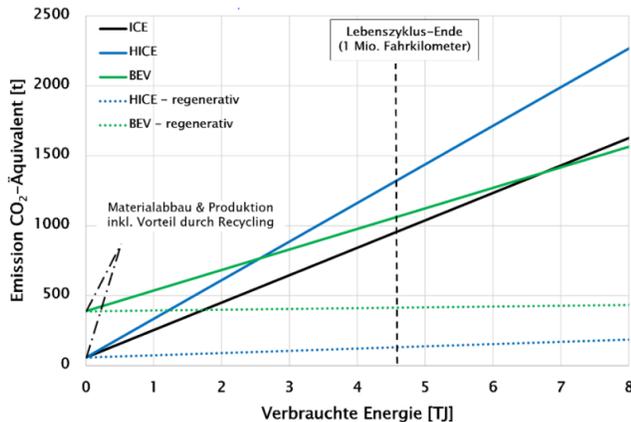


Abbildung 7: CO₂-Äquivalent zur Produktion der Antriebe und über den Lebenszyklus im Vergleich [10]

Dabei fällt auf, dass unter den heutigen Bedingungen in der Wasserstoffherstellung bzw. mit dem derzeitigen Strommix bis zum Lebenszyklusende der konventionelle Verbrennungsmotor eine bessere CO₂-Bilanz aufweist. Bezogen auf den in Zukunft steigenden Anteil regenerativ produzierten Stroms, haben Wasserstoffantriebe aufgrund der hohen CO₂-Emissionen bei der Batterieherstellung das größere Potential die Klimaziele zu verfolgen als E-Autos. [10]

IV. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Nach Betrachtung des Aufbaus und Funktionsprinzips eines Wasserstoffverbrennungsmotors sowie dessen Vergleich mit konventionellen und alternativen Antriebsarten lässt sich festhalten, dass dieser das Potential hat, mehr als nur eine Brückentechnologie zu sein.

Der aktuell dominante batterieelektrische Antrieb hat einen erheblichen Nachteil in den hohen CO₂-Emissionen in der heutigen Herstellung batterieelektrischer Systeme. Daher ist es nicht sinnvoll, konventionelle Verbrenner durch einen alternativen Antrieb zu ersetzen, der über seine Lebensdauer eine schlechtere CO₂-Bilanz aufweist. Zusätzlich sind die Reichweite und Zuladung durch Leistung und Gewicht der Batterie beschränkt. Zur flächendeckenden Nutzung müsste zudem eine komplette Ladeinfrastruktur bzw. ein komplett neues Stromnetz aufgebaut werden, was sehr kostenintensiv und aufwändig wäre.

Die Produktion von Brennstoffzellensystemen ist weniger kritisch als eine E-Auto-Batterie, jedoch aufgrund des seltenen Katalysatormaterials Platin deutlich teurer als bei Wasserstoffverbrennungsmotoren. [10]

Fahrzeuge mit Wasserstoffverbrennungsmotoren jedoch können die bereits vorhandene Tankinfrastruktur nach kleinen Anpassungen nutzen. Da heutige Otto- oder Dieselmotoren mit geringem Aufwand für die Nutzung mit Wasserstoff anpassbar sind und die Motoren auf bestehenden Fertigungsstraßen produziert werden können, halten sich die Kosten ebenfalls in Grenzen. Zudem können sie die vorhandene Tankinfrastruktur nach einem vergleichsweise kosten- und aufwandsgünstigen Umbau nutzen. Damit

Wasserstoffverbrennungsmotoren tatsächlich zum Klimaschutz beitragen kann, muss der benötigte Wasserstoff allerdings mit regenerativen Energiequellen erzeugt werden.

Welcher Alternative Antrieb sich letztendlich durchsetzen wird, kommt auch auf die Förderung der Politik an. Eine Mischung der verschiedenen Antriebe ist ebenfalls denkbar, da jeder seine Vor- und Nachteile hat. So ist es beispielsweise denkbar, ein energieeffizientes E-Auto für den Stadt- und Nahverkehr zusätzlich mit einer Brennstoffzelle oder einem Wasserstoffmotor für längere Fahrten auszustatten. Schwere Nutzfahrzeuge mit Batterieantrieb zeigen aufgrund der begrenzten Reichweite und der Zuladungsbeschränkung praktikable Nachteile auf. Hierfür ist der Wasserstoffverbrennungsmotor eine umweltfreundlichere und leistungsfähigere Alternative. [12] Die Firma Deutz plant bereits die Serienproduktion eines Wasserstoff-Motors für 2024. [13]

V. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] <https://www.consilium.europa.eu/de/infographics/fit-for-55-emissions-cars-and-vans/> (Stand 31.07.2022)
- [2] <https://www.tagesschau.de/ausland/europa/verbrenner-verbot-eu-107.html> (Stand 31.07.2022)
- [3] <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/europa/verbrennermotoren-2058450> (Stand 31.07.2022)
- [4] https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobilBW-Studie_H2-System-vergleich.pdf (Stand 31.07.2022)
- [5] <https://www.enbw.com/energie-entdecken/mobilitaet/brennstoffzellenantrieb/> (Stand 31.07.2022)
- [6] M. Schrank, V. Langer, B. Jacobsen. *Wasserstoffverbrennungsmotor als alternativer Antrieb*. Metastudie. Berlin: NOW GmbH, 2021
- [7] M. Klell, H. Eichseder, A. Trattner. *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung*. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018
- [8] J. Liebl, C. Beidl, W. Maus (Hrsg.). *Internationaler Motorenkongress 2021*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021
- [9] <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/alternative-antriebe-uebersicht/> (Stand 15.08.2022)
- [10] K. Klepatz et al. „Systemvergleich CO₂-freier Nutzfahrzeugantriebe.“ In *Commercial Vehicle Technology 2020/2021. Proceedings of the 6th Commercial Vehicle Technology Symposium*, K. Berns et al. Ed. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021
- [11] J. Töpler, J. Lehmann. *Wasserstoff und Brennstoffzelle. Technologien und Marktperspektiven*. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage, Berlin: Springer Vieweg, 2017
- [12] <https://www.ka-news.de/wirtschaft/regional/bye-bye-e-auto-kit-professor-erklart-ist-wasserstoff-der-antrieb-der-zukunft-art-2770103> (Stand 24.08.2022)
- [13] <https://www.deutz.com/media/pressemitteilungen/der-wasserstoffmotor-von-deutz-ist-reif-fuer-den-markt> (Stand 24.08.2022)