

EIN VERBRENNER OHNE DIREKTE CO₂-EMISSIONEN

Grüner Wasserstoff ermöglicht Fahrzeugantriebe ohne Treibhausgas-Emissionen am Auspuff: Hierzu wird Wasserstoff mit einer Brennstoffzelle verstromt und treibt dann einen Elektromotor an. Oder der Wasserstoff wird mit einem Verbrennungsmotor direkt in mechanische Energie umgesetzt. Forscherinnen und Forscher der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa in Dübendorf haben mit deutschen Partnern ein neues Brennverfahren für einen Wasserstoff-Verbrennungsmotor erforscht. Ziel ist der Einsatz in Nutzfahrzeugen.

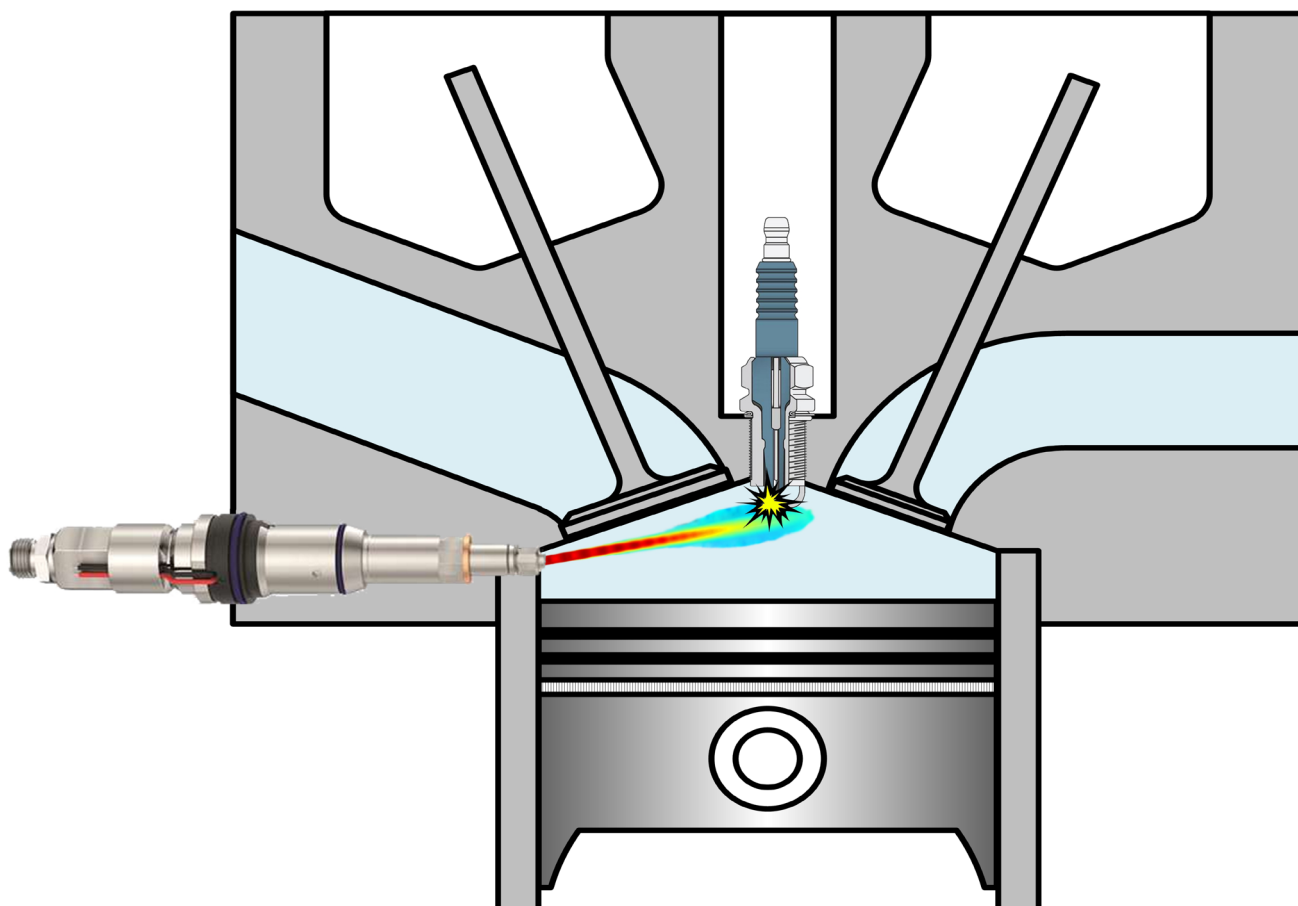
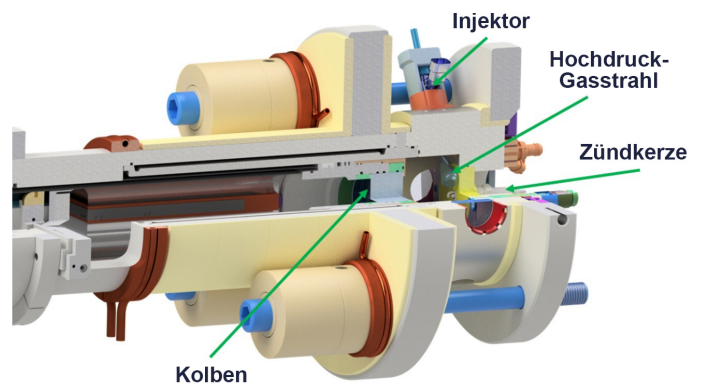


Illustration des neuartigen Brennverfahrens für Wasserstoff: Von links wird Wasserstoff in die Brennkammer mit verdichteter Luft eingespritzt (rot-blauer Strahl) und von einer Kerze gezündet. Durch die verbrennungsbedingte Expansion wird der Kolben nach unten gedrückt, das Verbrennungsgas entweicht über das Ventil oben rechts. Die Illustration dient als Verständnishilfe und hat nicht den Anspruch, die konstruktiven Details eines Wasserstoff-Verbrennungsmotors darzustellen. Illustration: Schlussbericht H2-DI

Werden Elektrofahrzeuge mit erneuerbarem Strom betrieben, ist das eine saubere und effiziente Lösung. Eine Alternative dazu sind Elektroantriebe mit Wasserstoff: Diese Fahrzeuge tanken Wasserstoff und verwandeln diesen mit einer Brennstoffzelle in Strom, der dann den Elektromotor antreibt. Da Wasserstoff eine hohe Energiedichte hat, sind beispielsweise Langstrecken-Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge einige Tonnen leichter als Langstrecken-Batterie-LKWs.

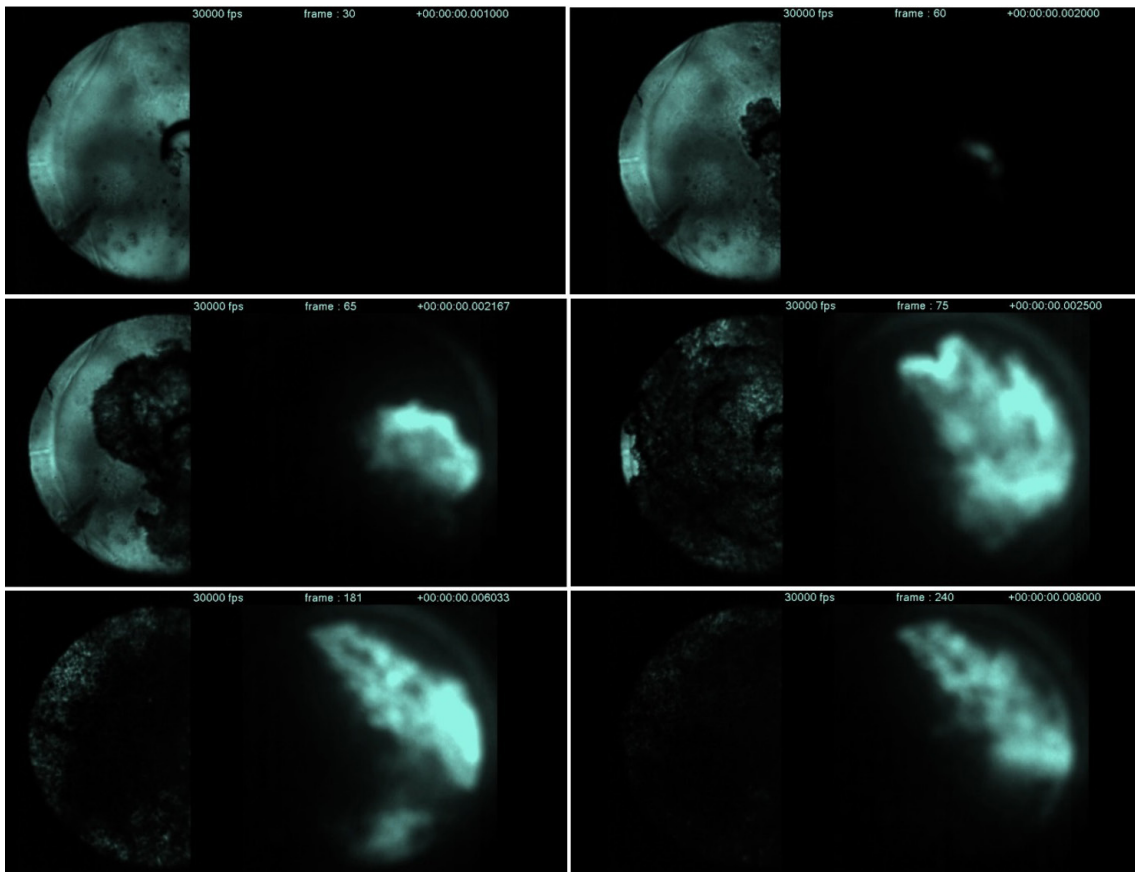
Fahrzeuge mit elektrischen Antrieben werden geschätzt, weil Sie lokal emissionsfrei unterwegs sind. Anders ist das bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Allerdings lassen sich auch hier die Schadstoffemissionen mit modernen Konzepten auf nahezu null bringen. Das ist insbesondere der Fall, wenn der Verbrennungsmotor nicht Diesel oder Benzin, sondern Wasserstoff verbrennt. Dabei entstehen hauptsächlich Wasser, daneben gesundheits- und umweltschädliche Stickoxide, deren Ausstoss man allerdings durch geeignete Massnahmen vermeiden kann. Dieses Antriebssystem ist CO₂-arm, sofern man erneuerbaren Wasserstoff einsetzt – es ermöglicht also eine Reduktion der Treibhausgasemissionen in ähnlichem Umfang wie Brennstoffzellen-Fahrzeuge.



Der optische Versuchsträger, mit dem an der Empa die Verbrennung von Wasserstoff untersucht wurde. Rechts ist die Brennkammer zu sehen. Wird dort der eingespritzte Wasserstoff gezündet, wird der Kolben nach links hinten beschleunigt. Illustration: Schlussbericht H2-DI

Verbrennung statt Brennstoffzellen

Verbrennungsmotoren, die Wasserstoff nutzen, sind heute hauptsächlich bei Herstellern von Nutzfahrzeugen ein Thema. Lkw für kurze Reichweiten können ohne weiteres mit Batterie und Elektromotor betrieben werden. Für grössere Reichweiten werden die Batterien aber schwer und teuer,



Die sechs Bilder zeigen (von oben links nach unten rechts) die ersten 20 Tausendstelsekunden nach der Zündung des Wasserstoffstrahls in der Brennkammer eines Wasserstoff-Verbrennungsmotors. Auf der linken Bildhälfte ist jeweils zu sehen, wie der Wasserstoffstrahl in der Mitte des Brennraums gezündet wird und sich dann radial ausbreitet. Die rechte Bildhälfte zeigt das Wachstum der Flamme. Die Bilder wurden im optischen Versuchsträger der Empa aufgenommen. Quelle: Schlussbericht H2-DI

ZWEI FORMEN DES WASSERSTOFFANTRIEBS

Wasserstoff lässt sich mit einer Brennstoffzelle elektrochemisch in Strom umwandeln, der anschliessend von einem Elektromotor in mechanische Energie umgewandelt wird. Wasserstoff lässt sich aber auch – wie im Forschungsprojekt H2-DI untersucht – in einem Verbrennungsmotor verbrennen (thermochemisch), wobei direkt mechanische Energie entsteht, die das Fahrzeug antreibt.

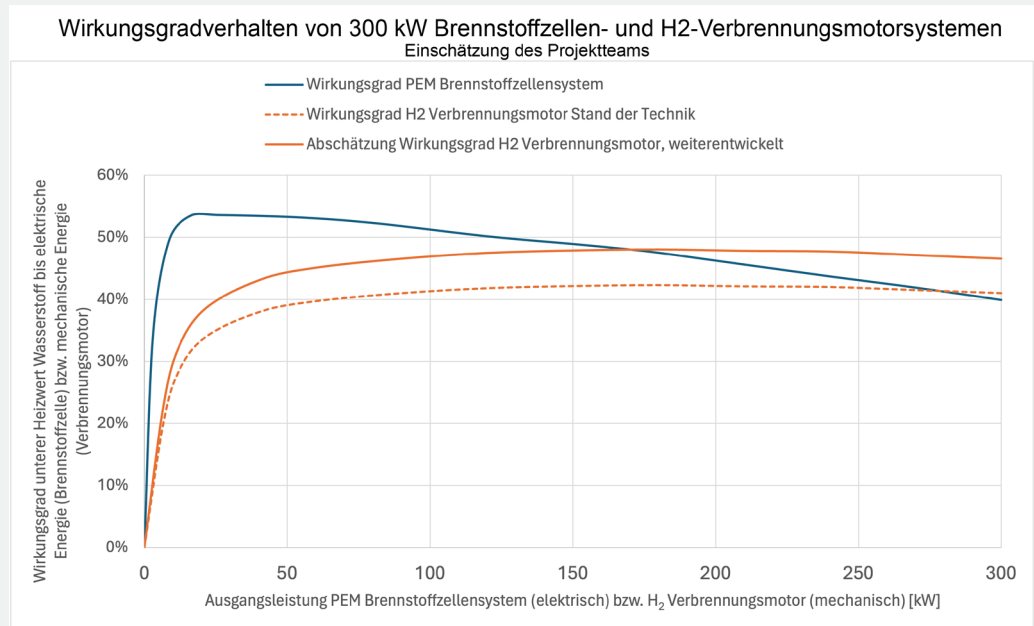
Abschätzungen von Empa-Experten zeigen, dass man von beiden Verfahren künftig einen Wirkungsgrad in der Grössenordnung von 50 % erwarten darf. Das heisst, mit beiden Antriebsarten kann mit einem Kilogramm Wasserstoff ungefähr die gleiche Strecke zurückgelegt werden. Hierbei gibt es einen wichtigen Unterschied: Brennstoffzellen-Antriebe arbeiten bei tieferen Leistungen am effizientesten, während Wasserstoff-Verbrennungsmotoren bei höheren Leistungen die beste Effizienz aufweisen (vgl. Grafik). Wasserstoff-Verbrenner sollten folglich

dort eingesetzt werden, wo ein Fahrzeug hohe Motorenleistungen während eines grossen Teils der Betriebszeit ausschöpft (z.B. in Bau- und Landwirtschaftsmaschinen sowie im Langstreckenverkehr). Brennstoffzellen-Antriebe empfehlen sich demgegenüber bei Anwendungen, wo oft in Teillast gefahren wird und kurze Stillstandszeiten fürs Nachtanken wichtig sind.

Die beiden Wasserstoff-Antriebe unterscheiden sich in weiteren Gesichtspunkten: Brennstoffzellen versprechen nur eine lange Lebensdauer, wenn sie mit extrem reinem Wasserstoff betrieben werden. Verschmutzungen, wie sie bei der Erzeugung, beim Transport oder der Kompression von Wasserstoff entstehen können, werden in Verbrennungsmotoren besser toleriert. Brennstoffzellen haben auch die Eigenheit, dass sie im Vergleich zu Verbrennungsmotoren grössere Kühler brauchen, was konstruktive Nachteile beim Fahrzeugbau nach sich ziehen kann und beispielsweise bei Anwendungen mit wenig Fortbewegung (Baumaschinen) eine kaum lösbare Herausforderung ist. Bei Baumaschinen können zudem extrem hohe mechanische Belastungen auftreten, die für Brennstoffzellen kaum erträglich sind.

zudem braucht es eine leistungsstarke und teure Schnellladeinfrastruktur im MW-Bereich. Hier bieten Brennstoffzellen-Fahrzeuge eine Alternative – oder Verbrennungsmotoren, die Wasserstoff nutzen. Letztere sind besonders robust und empfehlen sich auch für den Einsatz in Baumaschinen und anderen Off-Road-Anwendungen. Dafür sind Brennstoffzellen-Fahrzeuge weniger geeignet, da Brennstoffzellen gegenüber Vibrationen oder Verunreinigungen im Wasserstoff bzw. in der angesaugten Luft sehr empfindlich sind und dann schneller altern.

«Für leistungsstarke Nutzfahrzeuge im On- und Off-Road-Einsatz könnte ein Wasserstoff-Verbrennungsmotor eine gute Lösung sein», sagt Patrik Soltic, Experte für Antriebssysteme an der Empa in Dübendorf. Ein Forscherteam um Soltic hat sich zum Ziel gesetzt, einen neuartigen Wasserstoff-Verbrennungsmotor für schwere Nutzfahrzeuge zu ermöglichen. Dafür wurde ein zweijähriges Forschungsprojekt aufgelegt, gemeinsam mit der Universität Stuttgart. Die Empa wurde im Projekt mit dem Kürzel H2-DI vom BFE sowie durch die industriennahe Forschungsvereinigung FVV finanziell unterstützt.



Hoher Luftüberschuss, tiefe Leistungsdichte

Fahrzeuge mit Wasserstoff-Verbrennungsmotoren gibt es bislang kaum in Serienproduktion. Die Fahrzeughersteller arbeiten aber in diese Richtung. So stellte der niederländische Lkw-Hersteller DAF 2022 einen Lkw mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor vor, entwickelt auf der Grundlage eines Dieselmotors. BMW hatte schon im Jahr 2000 mit einem Wasserstoff-Verbrenner von sich reden gemacht, damals ausgehend von einem Benzinmotor.

Wer einen Benzin- oder Dieselmotor für die Wasserstoff-Verbrennung nutzen will, steht vor einer erheblichen Herausforderung: Der Wasserstoff muss wegen seiner hohen Flammtemperatur sowie der tiefen Zündenergie mit einem grossen Überschuss an (stark verdichteter) Luft verbrannt werden, soll die Verbrennung kontrolliert (kein Klopfen) und umweltschonend (tiefe NO_x-Emissionen) ablaufen. Der hohe Luftbedarf hat den Nachteil einer tiefen Leistungsdichte: Ein Lkw mit einem 13-Liter-Motor hat mit Diesel 300 bis 400 kW Leistung; wird er bei gleichem Hubraumvolumen mit Wasserstoff betrieben, sind es noch rund 200 kW. Will man die Leistungsdichte erhöhen, braucht man neuartige Verfahren, die in der Lage sind, sehr viel komprimierte Luft in den Brennraum zu pressen – oder ein neues Brennverfahren, welches nicht auf diesen enormen Luftüberschuss angewiesen ist.

Einspritzung von Wasserstoff

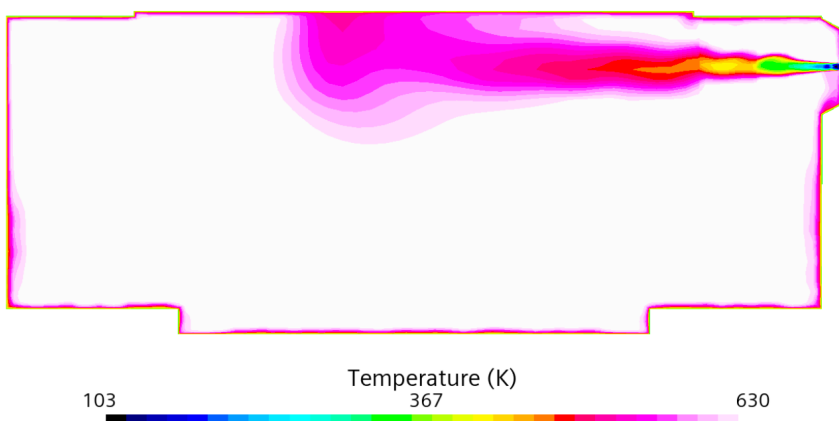
Ein Brennverfahren ohne diesen enormen Luftüberschuss – genau das war das Ziel des H2-DI-Projekts. Für den neuen Ansatz wird auf ein Luft-Treibstoff-Gemisch mit hohem Luftüberschuss verzichtet. Vielmehr wird Luft im Brennraum komprimiert, und in diesen dann der Treibstoff eingespritzt. Man kennt den Vorgang vom Dieselmotor, wo sich der Treibstoffstrahl selber entzündet und die Flamme dann in der

UMWANDLUNGSVERLUSTE

Gegen die Nutzung von Wasserstoff wird gern das Argument angeführt, die Herstellung von grünem Wasserstoff (mittels Elektrolyse aus erneuerbarem Strom) oder die Rückverwandlung in Endenergie habe einen tiefen Wirkungsgrad. Für Patrik Soltic greift diese Betrachtungsweise zu kurz: «Wasserstoff sowie andere erneuerbare Energieträger lassen sich einfacher als Strom über lange Distanzen transportieren und effizient in Gegenden mit günstiger erneuerbarer Energie erzeugen. Entscheidend für die Dekarbonisierung sind die praxisrelevanten und wirtschaftlichen Randbedingungen, und da können sich batterieelektrische und auf nachhaltigen Treibstoffen basierende Ansätze ergänzen.»

komprimierten Luft so lange fortbesteht, wie Diesel eingespritzt wird («Diffusionsverbrennung»). Beim H2-DI-Projekt wird nicht flüssiger Diesel, sondern gasförmiger Wasserstoff in die Brennkammer gespritzt. Da Wasserstoff eine sehr hohe Zündtemperatur hat, entzündet er sich nicht selbst, sondern muss mit einer Zündkerze gezündet werden (wie in einem Benzinmotor). Ist die Flamme einmal da, läuft eine Diffusionsverbrennung ab, solange Wasserstoff eingespritzt wird. Da kein Wasserstoff-Luft Gemisch verdichtet wird, welches zu klopfender Verbrennung führen kann, kann man auf klopfverhindernde Massnahmen (wie den hohen Luftüberschuss) komplett verzichten.

Das H2-DI-Forscherteam konnte zeigen, dass die Diffusionsverbrennung von Wasserstoff im Labormassstab funktioniert und die gleiche Leistungsdichte erreicht wie ein Dieselmotor. Dazu nutzten die deutschen Projektpartner an der Universität Stuttgart einen Ein-Zylinder-Forschungsmotor mit 0.5 Li-



Wasserstoff wird bei Raumtemperatur und 100 bar Druck in den Brennraum gespritzt. Durch die plötzliche Expansion entstehen im Kern des Einspritzstrahls Stosswellen und extrem tiefe Temperaturen um die 100 Kelvin, wie die numerische Simulation zeigt. Abbildung: Schlussbericht H2-DI

ter Hubraum. Auch an der Empa in Dübendorf wurde das Brennverfahren erfolgreich umgesetzt. Hierfür wurde ein spezieller Prüfstand verwendet, der so konzipiert ist, dass sich die im Brennraum ablaufenden Prozesse mit Hochgeschwindigkeitskameras, einem Spektrometer und weiteren optischen Diagnostikwerkzeugen beobachten lassen. «Die Experimente haben uns ermöglicht, numerische Modelle der Wasserstoffverbrennung zu erstellen und zu validieren», sagt Patrik Soltic. «Das ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu einem künftigen Wasserstoff-Verbrennungsmotor. Denn Wasserstoff verbrennt anders als Diesel, und so konnten wir nicht auf herkömmliche Simulationswerkzeuge zurückgreifen, sondern mussten diese von Grund auf neu entwickeln.»

Schritte zu neuartigem Verbrennungsmotor

Bis zu einem kommerziellen Wasserstoffmotor auf der Grundlage des neuen Brennverfahrens ist noch ein weiter Weg. In einem zweijährigen Anschlussprojekt, das Ende 2024 gestartet ist, wollen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Empa die Verbrennung von Wasserstoff optimieren. Dazu gehört die Frage, wie genau der Wasserstoff eingespritzt werden soll und wie der dafür nötige Injektor konstruiert sein muss. Untersucht wird auch, welche Wasserstoffmenge wie lange eingespritzt werden muss, oder wie gross der Abstand zwischen Einspritzdüse und Zündkerze idealerweise sein sollte.

Im Zuge des Anschlussprojekts, an dem neben der Universität Stuttgart auch die TU Berlin beteiligt ist, wird ein Ein-Zylinder-Motor mit zwei Litern Hubraum zum Einsatz kommen. Ferner soll ein Prüfstand mit einbezogen werden, mit dem Wissenschaftler Injektoren optisch vermessen können, was bei der Suche nach einem optimalen Injektordesign hilft. «Bis ein kommerzieller Wasserstoff-Motor verfügbar ist, der mit unserem Brennverfahren arbeitet, dürften noch mehrere Jahre vergehen», schätzt Empa-Wissenschaftler Soltic.

- Der **Schlussbericht** (in englischer Sprache) zum Projekt 'H₂-DI – Hydrogen Direct Injection Combustion Process' ist abrufbar unter:

<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=48410>

- **Auskünfte** zu dem Forschungsprojekt erteilt Stephan Renz (info@renzconsulting.ch), externer Leiter des BFE-Forschungsprogramms Verbrennungsbasierte Energiesysteme.



Diesen Lkw mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor hat der niederländische DAF-Konzern 2022 vorgestellt. Mit dem Prototyp wurden erste Strassentests durchgeführt, er ist aber noch nicht auf dem Markt.
Foto: DAF Trucks

- Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Verbrennung finden Sie unter:

www.bfe.admin.ch/ec-verbrennung.

RENNSPORT

Wasserstoff-Verbrennungsmotoren sind auch im Motorsport ein Thema. So haben beispielsweise Toyota, Bosch und der österreichische Automobilzulieferer AVL entsprechende Motorentechnologien entwickelt. Um den Verbrennungsprozess von Wasserstoff zu kontrollieren, wird Wasser eingespritzt. Es reduziert die Reaktivität des Wasserstoffs und kühlt den Motor. Die Rennwagen müssen also Wasser mitführen, oder das Wasser muss durch Kondensation aus dem Abgasstrom gewonnen werden. Die Wasserzugabe ist auf die speziellen Bedürfnisse des Rennsports zugeschnitten; für eine breite Anwendung in Personen- und Nutzfahrzeugen ist dieses Brennverfahren nicht geeignet.