

1 Einleitung

Die Nutzung von Wasserstoff als Kraftstoff in Verbrennungsmotoren bietet eine vielversprechende Technologie auf dem Weg zu einem klimaneutralen Schwerlastverkehr. Insbesondere für Anwendungen mit hoher Leistungsanforderung und langen Betriebszeiten - wie sie im Nutzfahrzeugbereich typisch sind - stellt der Wasserstoff-Verbrennungsmotor eine etablierte und wirtschaftliche Alternative dar. [41]

Der Betrieb mit Wasserstoff bringt jedoch auch neue technische Herausforderungen mit sich. Dazu zählen unter anderem die hohe Flammgeschwindigkeit, die Neigung zu Vorentflammung sowie die Bildung von Stickoxiden (NO_x) aufgrund der erhöhten Verbrennungstemperaturen. Gleichzeitig muss ein hoher Wirkungsgrad gewährleistet werden, um die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber konventionellen Antrieben zu sichern. [49]

Ein zentraler Aspekt bei der Entwicklung wasserstoffbetriebener Motoren ist die Gemischbildung. Während die Saugrohreninblasung (SRE) eine homogene Gemischverteilung ermöglicht, bietet die Direkteinblasung (DE) Vorteile bezüglich Lastgrenze und Wirkungsgrad. Die Herausforderung besteht darin, die Direkteinblasung so auszulegen, dass sie im Hinblick auf Emissionsverhalten und Verbrennungsstabilität der SRE entspricht oder überlegen ist. [52]

1.1 Motivation

Die Begrenzung der globalen Erwärmung zählt zu den zentralen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Um dies zu erreichen, ist laut dem Weltklimarat (IPCC) eine Reduktion der globalen CO_2 -Emissionen um 45 % bis zum Jahr 2030 gegenüber dem Stand von 2010 erforderlich, mit dem Ziel der Klimaneutralität bis zur Mitte des Jahrhunderts. [94, 95]

Der Verkehrssektor spielt dabei eine zentrale Rolle: In der Europäischen Union ist der Straßenverkehr für etwa 25 % der gesamten Treibhausgas-Emissionen verantwortlich. Besonders der Schwerlastverkehr - also Lkw und Busse - trug im Jahr 2023 mit rund 200 Millionen Tonnen CO_2 etwa 27 % zu den verkehrsbedingten Treibhausgas-Emissionen bei. Eine nachhaltige Transformation dieses Sektors ist daher essenziell für das Erreichen der Klimaziele. [31]

Grüner Wasserstoff, erzeugt aus erneuerbaren Energiequellen, bietet eine vielversprechende Möglichkeit zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Der Einsatz von Wasserstoff in Verbrennungsmotoren stellt eine technisch robuste und wirtschaftlich attraktive Lösung dar - insbesondere für Nutzfahrzeuge mit hohen Leistungsanforderungen. Im Vergleich zur Brennstoffzelle bietet der Wasserstoff-Verbrennungsmotor Vorteile hinsichtlich Systemkomplexität, Kosten, Marktreife und Toleranz gegenüber Wasserstoffverunreinigungen. Zudem ermöglichen bestehende Motorplattformen und Fertigungsinfrastrukturen eine schnelle und kosteneffiziente Umsetzung. [73, 50]

1.2 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, ein wasserstoffbasiertes Brennverfahren für einen Nutzfahrzeug-Dieselmotor mit geringer Ladungsbewegung zu entwickeln und experimentell zu analysieren. Hierzu wird ein konventioneller Dieselmotor für den Betrieb mit Wasserstoff umgerüstet und auf einem Motorenprüfstand untersucht. Der Fokus liegt auf der Optimierung der Gemischbildung und Verbrennung, um sowohl hohe Effizienz als auch niedrige Emissionen zu erreichen.

Es soll ein Brennverfahren realisiert werden, das bei einer Motordrehzahl von 1100 1/min einen indizierten Mitteldruck von 20 bar erreicht und gleichzeitig über das Drehzahlband von 1100 1/min bis 1800 1/min einen sicheren Betrieb gewährleistet. Dabei steht die Minimierung der NO_x -Emissionen im Vordergrund, während gleichzeitig eine ausreichende Verbrennungsstabilität gewährleistet werden soll. Als Grenzwert für die Varianz des Mitteldrucks (COV_{pmi}) wird hierfür ein Maximum von 2 % angestrebt.

Ein zentraler Bestandteil der Arbeit ist der systematische Vergleich zweier Gemischbildungsstrategien: der Saugrohreninblasung (SRE) und der Direkteinblasung (DE). Beide Konzepte werden mit minimalen Hardware-Änderungen gegeneinander getestet. Für die Direkteinblasung kommen verschiedene Strahlformungskappen zur Verbesserung der Gemischbildung zum Einsatz. Die Saugrohreninblasung dient dabei als Referenz für eine möglichst homogene Gemischbildung. Die Intention besteht darin, die Gemischbildung der Direkteinblasung mithilfe von Strahlformungskappen so zu optimieren, dass sie sich hinsichtlich Emissionsverhalten, Wirkungsgrad und Verbrennungsstabilität der SRE annähert oder diese im Idealfall übertrifft.

Zur Analyse des Brennverfahrens werden verschiedene Parameter wie der Einblasezeitpunkt, der Abgasgegendruck, der Einblasedruck, die Verbrennungsschwerpunktlage, das Luft-Kraftstoff-Verhältnis, die Motordrehzahl sowie der indizierte Mitteldruck systematisch variiert. Der Einfluss dieser Parameter auf Wirkungsgrad, Emissionen und Verbrennungscharakteristik wird mit unterschiedlichen Strahlformungskappen untersucht. Die Arbeit adressiert dabei folgende zentrale Forschungsfragen:

- Welchen Einfluss haben die variierten Parameter Einblasezeitpunkt, Abgasgegendruck, Einblasedruck, Verbrennungsschwerpunktlage, Luft-Kraftstoff-Verhältnis und Motordrehzahl auf das Brennverfahren?
- Wie lässt sich ein Wasserstoff-Brennverfahren für Nutzfahrzeug-Dieselmotoren mit geringer Ladungsbewegung optimieren, um NO_x -Emissionen zu minimieren und den indizierten Mitteldruck zu maximieren?
- Welche Auswirkungen haben unterschiedliche Blaskappen-Geometrien auf die erreichbare Last und die NO_x -Emissionen bei einem Wasserstoff-Brennverfahren mit Direkteinblasung?
- Haben der Injektor und die Zündkerze einen relevanten Einfluss auf die Emissionen und die Lastgrenze des Brennverfahrens?

Die Beantwortung dieser Fragen erfolgt auf Basis umfangreicher experimenteller Untersuchungen, ergänzt durch 1D-Simulationen zur Validierung und Verlustberechnung sowie 3D-CFD-Simulationen zur Analyse der Gemischbildung und der turbulenten kinetischen Energie. Es wird angestrebt, ein tiefes Verständnis der Zusammenhänge zwischen Einblasstrategie, Gemischhomogenität, Verbrennungsstabilität und Emissionsverhalten zu gewinnen, um daraus konkrete Handlungsempfehlungen für die Auslegung zukünftiger wasserstoffbetriebener Nutzfahrzeugmotoren abzuleiten.

2 Stand der Technik und ausgewählte Grundlagen

Das folgende Kapitel soll einen Überblick über die wichtigsten Grundlagen sowie den aktuellen Stand der Technik im Bereich der Wasserstoff-Verbrennungsmotoren, mit Fokus auf den Einsatz im schweren Nutzfahrzeug, liefern. Es wird dabei speziell auf Wasserstoff als Kraftstoff und seine Eigenschaften eingegangen sowie auf die relevanten Grundlagen zur Brennverfahrensentwicklung und Emissionsbildung.

2.1 Wasserstoff als Kraftstoff

Wasserstoff kommt weltweit in verschiedensten Bereichen zum Einsatz. Die größten Verbraucher sind zurzeit die Chemie- und Mineralölindustrie. Da Wasserstoff auf der Erde - abgesehen von wenigen Ausnahmen - nicht in natürlicher Form vorkommt, ist seine Herstellung unter Einsatz externer Energiequellen erforderlich. Bei der Verbrennung entsteht im Gegensatz zu fossilen Kraftstoffen kein Kohlenstoffdioxid, weshalb er sich als Speichermedium für regenerativ erzeugte Energie eignet, wenngleich er in Bezug auf Handhabung und Speicherdichte Nachteile gegenüber konventionellen Kraftstoffen aufweist. [73, 68, 50]

2.1.1 Stoffeigenschaften

Wasserstoff (H_2) ist das leichteste und am häufigsten vorkommende chemische Element im Universum und weist außergewöhnliche chemische Eigenschaften auf. Die Stoffwerte unterscheiden sich zum Teil deutlich von denen herkömmlicher Energieträger. Die wichtigsten Stoffwerte sind in Tabelle 2.1 gegenübergestellt. [50, 73]

Wasserstoff ist unter Standardbedingungen ein farb-, geruchs- und geschmackloses Gas mit einer molaren Masse von etwa 2,016 g/mol. Aufgrund seiner geringen Dichte von 0,0899 kg/m³ ist Wasserstoff extrem leicht. Massebezogen ist Wasserstoff mit einem Heizwert von 120 MJ/kg einer der energiereichsten chemischen Stoffe. Seine hohe Diffusionsneigung, die niedrige minimale Zündenergie, die weiten Zündgrenzen sowie die hohe laminare Flammgeschwindigkeit machen ihn zwar anfällig für irreguläre Verbrennung, jedoch auch zu einem sehr attraktiven Kraftstoff für Verbrennungsmotoren. [50, 73, 40]

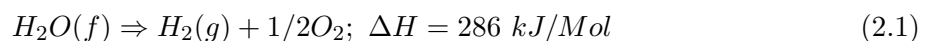
Tabelle 2.1: Stoffdaten verschiedener Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren aus [37, 50] und [40] zitiert nach [25, 90]

Eigenschaft	Einheit	H2	CH4	Benzin	Diesel
Molare Masse M	g/mol	2,016	16,043	≈ 98	≈ 190
Dichte (flüssig) ^a	kg/m ³	70,8	422,4	750-770	820-845
bei	°C	-252,9	-161,5	15	15
Dichte (gasförmig) ρ ^{a,b}	kg/m ³	0,0899	0,716	-	-
Siedepunkt/-bereich ^a	°C	-252,9	-161,5	30-190	210-355
Gravimetrischer Heizwert $H_{U,gr}$	MJ/kg	120	50	41,4	42,9
Volumetrischer Heizwert $H_{U,vol}$ ^{a,b}	MJ/dm ³	0,0108	0,0358	$\approx 31,5$	$\approx 35,7$
Energiedichte (flüssig) ^a	MJ/dm ³	8,5	21	31,7	35,8
Energiedichte (gasförmig) ^c	MJ/dm ³	3	12,6	-	-
Stöchiometrischer Luftbedarf	kg _L /kg _K	34,3	17,2	14,0	14,7
Gemischheizwert (gemischansaugend) ^{a,b,f}	MJ/m ³	3,19	3,40	3,76	-
Gemischheizwert (luftansaugend) ^{a,b,f}	MJ/m ³	4,52	3,76	3,83	3,77
Zündgrenzen (volumetrisch) ^{a,d,e}	Vol-%	4,0-76	4,4-15	1,0-7,6	0,6-5,5
Zündgrenzen (λ) ^{a,d,e}	λ -Bereich	10-0,13	2-0,6	1,4-0,4	1,35-0,5
Selbstzündungstemperatur ^{a,e}	°C	585	595	230-450	250
Minimale Zündenergie ^{e,f}	mJ	0,017	0,29	0,24	0,24
Laminare Flammgeschwindigkeit ^{a,d,e,f}	m/s	$\approx 2,3$	$\approx 0,42$	$\approx 0,4$	$\approx 0,4$
Quenching Distanz ^g	mm	0,64 ^h	2,01 ^h	3,47 ⁱ	2,2 ^j

^a bei 1.013 bar^b bei 0 °C^c bei 280 K und 350 bar^d bei 25 °C^e in Luft^f bei $\lambda = 1$ ^g Elektrodenmethode^h aus [18]ⁱ Wert für Iso-Oktan aus [16]^j Wert für n-Heptan aus [16]

2.1.2 Herstellungsarten von Wasserstoff

Die Reformierung fossiler Kohlenwasserstoffe ist das meistgenutzte Verfahren zur Wasserstoffherstellung, wobei die Dampfreformierung von kurzkettigen Kohlenwasserstoffen das wirtschaftlichste Verfahren darstellt und Wirkungsgrade von bis zu 80 % aufweist. Die Vergasung von kohlenwasserstoffhaltigen Stoffen stellt ein weiteres thermochemisches Verfahren zur Wasserstoffherstellung dar. Diese Methode erfordert jedoch eine aufwändige Reinigung des erzeugten Wasserstoffs. Die thermische Spaltung von fossilen Kohlenwasserstoffen bei sehr hohen Temperaturen benötigt einen sehr hohen Energieeinsatz, die chemische Spaltung von Wasser mithilfe von (Alkali-)Metallen oder Metalloxiden ist ebenfalls sehr aufwändig. Die elektrochemische Wasserspaltung mithilfe der Elektrolyse ist das einzige emissionsfreie Verfahren, solange der genutzte Strom aus erneuerbaren Energien stammt. Die Spaltung von flüssigem Wasser anhand der Gleichung (2.1) erfordert eine große Menge Energie. Der Energieaufwand für die Herstellung von Wasserstoff liegt bei mindestens 286 MJ/kmol. [49, 33]



Wasserstoff wird anhand des angewandten Herstellungsverfahrens in verschiedene Farbgruppen eingeteilt. Die gängigsten Farben und ihre Herstellungsmethoden werden im Folgenden beschrieben: [5, 88, 33]

Grauer Wasserstoff

Grauer Wasserstoff wird aus fossilen Brennstoffen, meist aus Erdgas, gewonnen. Mithilfe von Dampfreformierung entsteht aus Erdgas Wasserstoff und CO₂. Das CO₂ wird im Anschluss in die Atmosphäre abgegeben und trägt dort zum Treibhauseffekt bei.

Blauer Wasserstoff

Blauer Wasserstoff ist grauer Wasserstoff, bei dessen Herstellung das entstehende CO₂ abgeschieden und anschließend gespeichert wird. Dieses Verfahren wird im Englischen Carbon Capture and Storage (CCS) genannt. Das durch die Herstellung entstehende CO₂ gelangt somit nicht in die Atmosphäre und blauer Wasserstoff kann somit bilanziell als CO₂-neutral betrachtet werden. CCS Verfahren sind jedoch noch nicht flächendeckend etabliert.

Türkiser Wasserstoff

Türkiser Wasserstoff wird über die thermische Spaltung von Methan (Methanpyrolyse) hergestellt, wobei fester Kohlenstoff anstatt CO₂ entsteht. Eine Speicherung des festen Kohlenstoffs sowie eine Wärmeversorgung des Hochtemperaturreaktors aus erneuerbaren Energiequellen sind notwendig für die CO₂-Neutralität des Verfahrens.

Grüner Wasserstoff

Grüner Wasserstoff wird unter Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien mittels Elektrolyse aus Wasser hergestellt. Da der genutzte Strom CO₂-neutral ist, erfolgt die Produktion des Wasserstoffs, unabhängig von der genutzten Elektrolysetechnologie, ebenfalls CO₂-neutral. Der entstehende Wasserstoff kann als CO₂-arm betrachtet werden, da die Herstellung der Anlage sowie der nötigen Infrastruktur immer noch einen gewissen CO₂-Abdruck besitzt.

2.1.3 Verfügbarkeit und Infrastruktur

Die Anzahl öffentlicher Wasserstofftankstellen in Deutschland ist zwar noch gering, wächst aber stetig. Ende 2023 waren 105 Stationen in Betrieb, bis Ende 2024 stieg die Zahl auf 113. In Europa insgesamt waren es 265 Stationen Ende 2023, wovon rund 40 % sowohl Pkw als auch leichte und schwere Nutzfahrzeuge betanken können; diese Zahl erhöhte sich 2024 auf 294 Stationen. [56, 74] Eine Erschwernis für den Wasserstoff-Verbrennungsmotor im Speziellen ist die Gesetzgebung bezüglich der Energiebesteuerung. Nach dem EU-Energie-Besteuerungsrahmen (Energy Taxation Directive, 2003/96/EG) sind - im Gegensatz zu Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb - Fahrzeuge mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor beim Tanken nicht von der Energiesteuer ausgenommen. Dies führt zu einer Benachteiligung der Technologie gegenüber der Brennstoffzelle sowie zu einem hohen Bürokratieaufwand bei den Tankstellenbetreibern, da diese bei der abzuführenden Steuer zwischen den Antriebsarten unterscheiden müssen. [100, 91]

2.2 Der Wasserstoff-Verbrennungsmotor

Wasserstoff als Kraftstoff in Verbrennungsmotoren einzusetzen ist keine neue Idee. Bereits seit den 1930er Jahren wird daran geforscht und es gab seither viele Versuchsfahrzeuge. Heute ist der Wasserstoff-Verbrennungsmotor besonders für das schwere Nutzfahrzeug interessant, welches sich schlecht elektrifizieren lässt. [11, 52, 73]

2.2.1 Speicherung von H_2 im Fahrzeug

Der Transport und die Speicherung von Wasserstoff im Fahrzeug stellt aufgrund der geringen volumetrischen Energiedichte eine hohe technische Herausforderung dar. Neben der möglichst hohen spezifischen Energiedichte werden auch viele weitere Anforderungen an mobile Tanksysteme gestellt. Die Sicherheit im Fahrzeug, welche auch die Absicherung gegen eventuell auftretende Beschleunigungskräfte sowie das Betankungshandling umfasst, sind von Bedeutung. Ebenso die Lebensdauer, das Gewicht, die Einbaumaße sowie die Gesamtkosten des Tanksystems. Im Folgenden werden die drei gängigen Verfahren genauer betrachtet. [51, 87, 33]

Gasförmig, verdichtet

Wasserstoff im gasförmigen Zustand wird meist in zylinderförmigen Druckbehältern bei Drücken von 300 bis 700 bar gespeichert. Die Art der Speicherung stellt hohe Anforderungen im Hinblick auf Material, Konstruktion und Sicherheit der Druckbehälter. Für mobile Anwendungen haben sich Druckbehälter mit einem Nenndruck von $p = 350$ bar und $p = 700$ bar etabliert, welche bereits in Demonstratorfahrzeugen und ersten Kleinserien Anwendung finden. [51, 86, 87, 33]

Flüssig tiefkalt

Wasserstoff kann in flüssiger Form bei Temperaturen unter $-252,85\text{ °C}$ in Kryobehältern bei Drücken zwischen 1 und 10 bar gespeichert werden. Der Vorteil dieser Methode liegt in der höheren Dichte des flüssigen Wasserstoffs. Die Werte für die Dichte im flüssigen und gasförmigen Zustand können Tabelle 2.1 entnommen werden. Der Energieaufwand für die Verflüssigung des Wasserstoffs sowie die Komplexität der nötigen technischen Systeme für Transport, Speicherung und Abgabe sind jedoch beträchtlich. Ein zusätzlicher Nachteil sind die Abdampfverluste durch den unvermeidlichen Wärmeeintrag in den Tankbehälter, speziell bei vergleichsweise kleinen Tanks von Fahrzeugen. Im Speicher entsteht ein Dampfdruck, da die Temperatur durch die Verdampfung des Wasserstoffs konstant gehalten wird. [51, 86, 87, 33]

Chemische oder physikalische Verbindungen

Wasserstoff kann ebenfalls in chemischen oder physikalischen Verbindungen gespeichert werden. Diese Verbindungen können in Festkörpern, Gasen oder Flüssigkeiten erfolgen. Die meisten dieser Speichersysteme befinden sich noch im Laborstadium, bieten jedoch ein hohes Potenzial in Bezug auf die volumetrischen und gravimetrischen Speicherdichten. [51, 86, 87, 33]

2.2.2 Aktuelle Fahrzeuge

Die Nutzung von Wasserstoff als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren ist eine lange bekannte Technologie und es wurden bereits seit Jahrzehnten weltweit Versuchsfahrzeuge entwickelt und betrieben. In Japan beispielsweise arbeitete das Musashi Institute of Technology (heute Tokyo City University) gemeinsam mit Mazda an Wasserstofffahrzeugen. In den USA gab es Projekte von Quantum und in Deutschland Initiativen von BMW, Mercedes-Benz und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). [52, 30, 34]

Im Folgenden werden einige aktuelle Fahrzeuge im Bereich leichter und schwerer Nutzfahrzeuge näher betrachtet. Meist handelt es sich bei den genutzten Motoren um Retrofit-Lösungen von bestehenden Benzin- oder Diesel-Motoren. Obwohl diese Motoren nicht explizit für Wasserstoff entwickelt wurden, erzielen sie oft gute Ergebnisse, auch wenn die erreichbare Leistung meist etwas niedriger als beim Ursprungsmotor liegt. [11, 52, 73, 47, 63]

Projekt H2 ICE Democar

Im Rahmen des von 2021 bis 2024 durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekts H2 ICE Democar wurde unter Leitung der Robert Bosch GmbH ein leichtes Nutzfahrzeug mit seriellem Hybridantrieb von Benzin auf Wasserstoff umgerüstet. Verbaut ist ein 1 l Ford EcoBoost Dreizylindermotor, welcher eine Wasserstoff-Direkteinblasung nutzt und eine max. Leistung von 70 kW sowie ein max. Drehmoment von 100 Nm erreicht. [35]

Cummins

Cummins Inc. präsentierte auf der IAA 2022 einen Demonstrator für ein schweres Nutzfahrzeug mit Wasserstoffmotor. Als Basis diente ein Mercedes-Benz Atego 4x2 welcher mit einem 700 bar Wasserstoff-Tanksystem für Reichweiten von bis zu 500 km sowie einem B6.7H Wasserstoffmotor ausgestattet wurde. Beim B6.7H handelt es sich um einen umgebauten Dieselmotor mit einem Hubvolumen von 6.7 l, einer max. Leistung von 216 kW und einem max. Drehmoment von 1200 Nm. Geplant sind auch weitere Wasserstoffmotoren mit Hubräumen bis 15 l. [21]

Projekt WaVe

Im ebenfalls durch das BMWK geförderten Projekt WaVe wurde als Beispiel für eine off-road-fähige Arbeitsmaschine ein UNIMOG U 430-Demonstrator mit Wasserstoffmotor aufgebaut. Ausgerüstet mit einem 700 bar Tanksystem für bis zu 14 kg Wasserstoff erreicht der umgebaute Dieselmotor eine Leistung von 213 kW und ein max. Drehmoment von 1000 Nm. Die erste öffentliche Demonstration des Fahrzeugs fand im März 2023 in Wörth statt. [75, 55]

MAN hTGX

Als erster europäischer Nutzfahrzeughersteller hat MAN Truck & Bus mit dem MAN hTGX einen Truck mit Wasserstoffmotor auf den Markt gebracht. Die ersten Fahrzeuge der 200 Einheiten umfassenden Kleinserie sollen 2025 ausgeliefert werden. Der Truck verfügt über ein 700 bar Tanksystem mit einer Kapazität von 56 kg, welches in den angebotenen Achsvarianten 6x2

und 6x4 Reichweiten von bis zu 600 km ermöglicht. Der eingebaute H45-Wasserstoffmotor mit Direkteinblasung basiert auf dem D38-Dieselmotor und verfügt über eine Leistung von 383 kW sowie ein Drehmoment von 2500 Nm. [45]

2.2.3 Vergleich Verbrennungsmotor und Brennstoffzelle

Für die Nutzung von Wasserstoff als kohlenstofffreiem Energieträger in der Mobilität stehen zwei grundlegende Technologien zur Verfügung. Der Wasserstoff kann sowohl in einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor als auch in einem Fahrzeug mit Brennstoffzelle und Elektroantrieb eingesetzt werden. Beide Technologien bieten einen vielversprechenden Ansatz zur Emissionsminderung und zur Umsetzung einer nachhaltigen Mobilität. Bezüglich der Gesamtkosten sowie der Lebensdauer ist der Verbrennungsmotor gegenüber der Brennstoffzelle im Vorteil. Im Hinblick auf Wirkungsgrad und Emissionen weisen die beiden Technologien unterschiedliche Vor- und Nachteile auf. [54, 73, 52, 87]

Wirkungsgrad

In der Abbildung 2.1 sind die qualitativen Wirkungsgradverläufe mit steigender Leistung dargestellt. Im Vergleich zum Verbrennungsmotor bietet die Brennstoffzelle durch die direkte Umwandlung chemisch gebundener Energie in elektrische Energie und ihre Unabhängigkeit vom Carnot-Prozess einen deutlich höheren Wirkungsgrad im unteren und mittleren Leistungsbereich - also in dem Bereich, der für Pkw-Anwendungen besonders relevant ist. Mit steigender Last nimmt jedoch die Zellspannung der Brennstoffzelle ab, wodurch ihr Wirkungsgrad sinkt. Der Verbrennungsmotor zeigt hier das entgegengesetzte Verhalten: Seine zahlreichen Grund- und Drosselverluste wirken sich bei niedriger Last stark aus, nehmen bei hoher Last jedoch relativ ab, sodass der Wirkungsgrad steigt. Dadurch nähern sich die Wirkungsgrade beider Systeme bei hohen Lasten an und liegen in diesem Bereich auf ähnlichem Niveau. [54, 87]

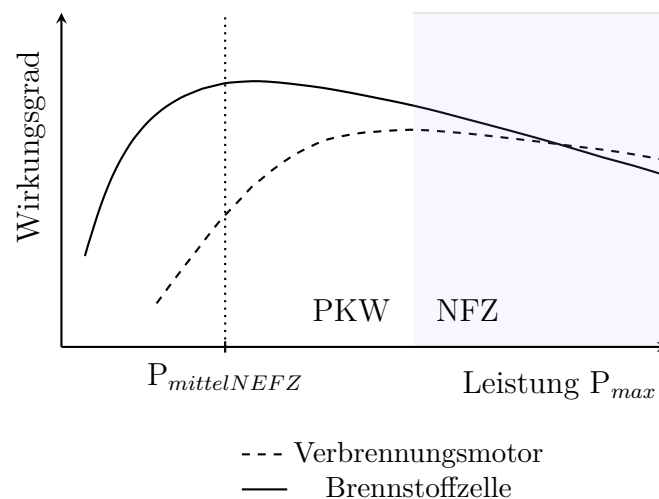


Abbildung 2.1: Qualitativer Wirkungsgradvergleich von Antrieben mit Verbrennungsmotor und Brennstoffzelle bei verschiedenen Leistungen [54]

Emissionen

Die Brennstoffzelle verursacht keine Schadstoff- oder Lärmemission und beim Betrieb mit Wasserstoff auch kein CO_2 . Bei der Nutzung von Wasserstoff im Verbrennungsmotor entfallen die kohlenstoffbasierten Emissionen CO , HC sowie CO_2 fast vollständig. Diese treten nur noch aufgrund von verbranntem Schmieröl auf, befinden sich jedoch im Bereich der Nachweisgrenze. Als Hauptemission entsteht NO_x , welches sich jedoch durch geeignete innermotorische Maßnahmen, wie Magerbetrieb, Abgasrückführung oder durch eine Abgasnachbehandlung wirksam reduzieren lässt. [54, 52, 87]

2.3 Gemischbildungsverfahren für Wasserstoffmotoren

Die Gemischbildungsverfahren, welche in Wasserstoffmotoren zum Einsatz kommen, können anhand des Ortes und Zeitpunktes der Kraftstoffeinbringung eingeteilt werden. Im Fall der äußeren Gemischbildung wird der Wasserstoff in das Saugrohr eingebracht (Saugrohrenblasung), wohingegen die Wasserstoffeinblasung bei innerer Gemischbildung direkt in den Brennraum erfolgt (Direkteinblasung). Konzepte, welche mit beiden Verfahren gleichzeitig arbeiten, werden als kombinierte Gemischbildungsverfahren bezeichnet, vgl. Abbildung 2.2. [52, 15, 99]

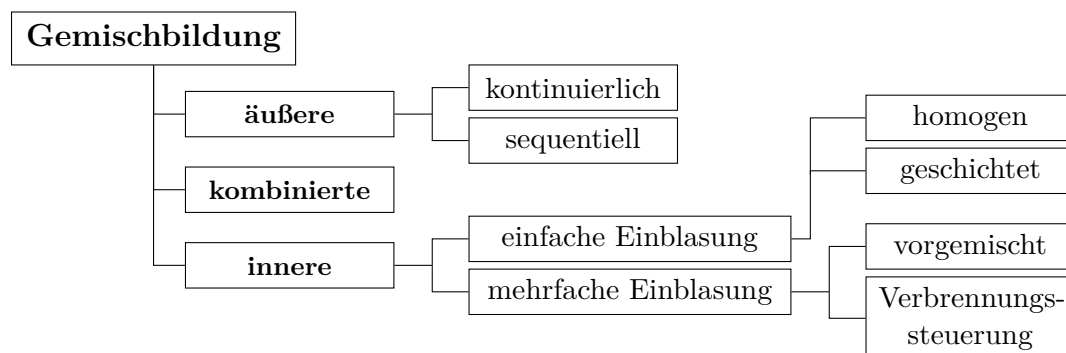


Abbildung 2.2: Gemischbildungskonzept für den Wasserstoff-Verbrennungsmotor [52]

Die äußere Gemischbildung kann anhand des Zeitpunktes in kontinuierliche und sequentielle Systeme unterteilt werden. Bei innerer Gemischbildung kann die Einblasung einfach oder in mehrfachen Pulsen erfolgen, was eine Steuerung der Ladungszusammensetzung ermöglicht. Durch zusätzliche Einblaspulse während der laufenden Verbrennung kann auch eine Verbrennungssteuerung umgesetzt werden. [52, 96, 15, 99] Aus dem grundlegenden Aufbau der Saugrohr- sowie der Direkteinblasung, welcher in Abbildung 2.3 dargestellt ist, ergeben sich systembedingte Unterschiede, welche im Folgenden näher erläutert werden.

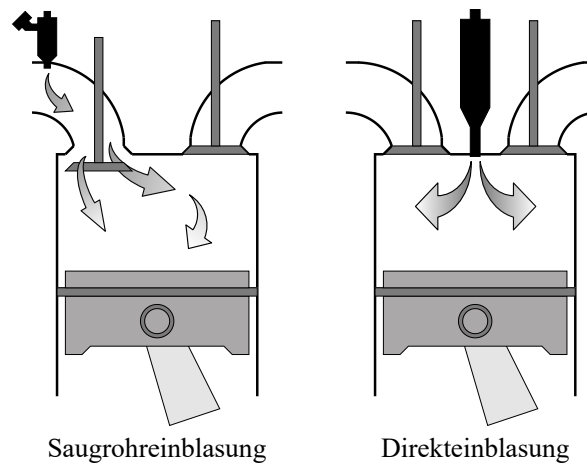


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung von Saugrohr- und Direkteinblasung nach [96]

2.3.1 Äußere Gemischbildung - Saugrohreinspritzung

Die Saugrohreinspritzung wird vor allem in herkömmlichen Ottomotoren eingesetzt. Bei diesem Konzept erfolgt die Einbringung des Kraftstoffs bereits vor dem Eintritt in den Zylinder. In den meisten Anwendungen wird pro Zylinder ein Injektor in der Nähe der Einlassventile angebracht, anstatt eine zentrale Vormischstrategie zu verwenden. Insbesondere bei Nutzfahrzeuganwendungen und bei großvolumigen Forschungsaggregaten kann die Einblasung in das Saugrohr auch mithilfe von mehreren kleinen Injektoren pro Zylinder erfolgen. [96, 52, 47]

Die Einfachheit der Saugrohreinspritzung und die daraus resultierende Kosteneffizienz stellt den Hauptvorteil dieses Verfahrens dar. Die Anforderungen an das Einblasesystem sind im Vergleich zur Direkteinspritzung deutlich geringer, was vor allem an der geringeren Beanspruchung der Injektoren aufgrund der niedrigeren Wasserstoffdrücke sowie an der Einbauposition außerhalb des Brennraums liegt. Darüber hinaus sind bereits Niederdruck-Injektoren für Erdgasanwendungen auf dem Markt verfügbar, was eine schnelle Integration in bestehende Motoren mit nur minimalen Anpassungen ermöglicht. [52]

Ein weiterer, entscheidender Vorteil der Saugrohreinspritzung ist es, ohne zusätzliche Maßnahmen ein annähernd homogenes Gemisch zu erzeugen. Dies wirkt sich durch die vollständige Verbrennung des Kraftstoffes positiv auf den Wirkungsgrad aus und trägt zur Verringerung der Stickoxidemissionen bei. [52, 47]

Nachteilig an der Saugrohreinspritzung ist die Verdrängung der Frischluft durch den Kraftstoff, was aufgrund des geringen volumenbezogenen Heizwertes bei Wasserstoff stark ins Gewicht fällt. Dies kann selbst im stöchiometrischen Betrieb zu einem Leistungsverlust von etwa 17 % führen. Dieses Problem wird durch den Betrieb des Motors mit überstöchiometrischen Luft-Kraftstoff-Verhältnis sowie bei höheren Lasten noch verstärkt. [52]

Ein weiterer, kritischer Aspekt der äußeren Gemischbildung bei Wasserstoffmotoren ist die Anfälligkeit für Rückzündungen. Diese können auftreten, wenn sich das brennbare Luft-Wasserstoffgemisch beim Eintritt in den Brennraum beim Kontakt mit heißen Oberflächen oder heißen Restgasen entzündet und zu einer Verbrennung im Saugrohr führt. Die Neigung zu Rückzündungen steigt mit höherer Motorlast und den damit verbundenen höheren Temperaturen. Geeignete Einblasestrategien sowie ein optimierter Ladungswechsel können das Risiko von Rückzündungen