

Der Wasserstoffverbrennungsmotor als nachhaltige Alternative im stationären Anwendungsfall

Daniel Koch¹, Dominik Bertram¹

¹ KEYOU GmbH, München

Abstract

Der Verbrennungsmotor ist die mit am weitesten entwickelte Energieumwandlungsmaschine unserer Zeit. Anwendungen davon sind in dem mobilen und stationären Bereich zu finden und aus dem alltäglichen Leben ohne Komforteinbußen nicht mehr wegzudenken. In den vergangenen Jahrzehnten war der bevorzugte Kraftstoff für Verbrennungsmotoren Diesel oder Benzin. Der Klimawandel mit der Ursache der menschengemachten hohen Treibhausgasemissionen zwingt uns jedoch zu einem Umdenken bei der Nutzung kohlenstoffhaltiger Kraftstoffe. Viele Stimmen verlangen nach alternativen Technologien wie Batterien oder Brennstoffzellen. Erstere ist jedoch nur eine Speichermöglichkeit, letztere steckt noch in den Kinderschuhen. KEYOU verändert die altbewährte Technologie soweit, dass die Vorteile des Verbrennungsmotors in Einklang mit den immer neuen hohen Umweltaforderungen weiter genutzt werden können, sowohl in der Mobilität, als auch in der stationären Energiewandlung. In dieser Abhandlung wird gezeigt, dass ein Wasserstoffverbrennungsmotor effizient bei gleichzeitig hohen Leistungsdichten und niedrigen Emissionswerten stationär betrieben werden kann.

1. KEYOU und Wasserstoff

Der Klimawandel ist längst bei uns angekommen. Der erneut ungewöhnlich heiße und trockene Sommer 2018 macht es schwer, eine Veränderung des Klimas zu leugnen. Schuld daran sind unter anderem das von Menschenhand in die Atmosphäre gebrachte Treibhausgas Kohlendioxid (CO₂). CO₂ entsteht bei der Verbrennung von konventionellen Kraftstoffen wie Diesel, Benzin oder Erdgas. Die Verbrennungskraftmaschine ist die dominierende Antriebsform unserer heutigen individuellen Mobilität. Neben dem klimaschädlichen Treibhausgas CO₂ werden ebenfalls gesundheitsschädliche Abgase wie Stickoxide (NO_x), Kohlenmonoxide (CO) und Kohlenwasserstoffe (HC) emittiert. Um die Belastung der Emissionen auf ein mögliches Minimum zu reduzieren, werden immer striktere Emissionsrichtlinien durch die weltweiten Regierungen (EU, USA, Japan usw.) vorgegeben. Doch aufgrund der weiter zunehmenden Anzahl von „benötigter Mobilität“ rund um den Globus steigen, trotz immer effizienterer Verbrennungskraftmaschinen, die auf die Mobilität bezogenen Emissionen. Es bedarf deshalb entweder einer Veränderung in der Antriebsart oder des genutzten Kraftstoffes. Als alternative Antriebsart kommen sowohl Batteriefahrzeuge als auch Brennstoffzellenfahrzeuge in Frage. Jedoch ist eine schnelle Marktdurchdringung der beiden genannten Technologien durch noch offene Fragestellungen weiterhin ungewiss. Die Veränderung des Kraftstoffes, von kohlenstoffbasierten Energieträgern hin zu Wasserstoff, im altbekannten System des Verbrennungsmotors, scheint eine ernsthafte, bisher viel zu wenig beachtete, Alternative zu sein. Der Verbrennungsmotor ist eine der ausgereiftesten entwickelten Maschinen unserer Zeit. Somit erscheint es als nahezu logischer nächster Schritt, den Verbrennungsmotor mit einem kohlenstofffreien Kraftstoff, wie dem Wasserstoff, zu kombinieren.

Der Einsatz von Wasserstoff in Verbrennungsmotoren ist nicht neu. Die ersten Gasmotoren wurden mit einem Gemisch, das teilweise aus Wasserstoff bestand, angetrieben. Schon in den 70er Jahren gab es erste erfolgreiche Versuche, Motoren für den Einsatz mit Wasserstoff umzubauen. Auch in Japan hat sich Mazda mit dem Wankelmotor ausführlich mit dem Thema beschäftigt und brachte in Folge seiner Arbeit mehrere Testfahrzeuge mit einem Wasserstoffverbrennungsmotor auf die Straße. In Deutschland haben sich sowohl BMW - mit dem Hydrogen 7 - und MAN - mit Wasserstoffmotoren in der Lion's City Serie - beschäftigt und die Machbarkeit bzw. den serientauglichen Einsatz des

Wasserstoffverbrennungsmotors bewiesen.

Das Ziel der KEYOU GmbH (nachfolgend als KEYOU bezeichnet) ist es, mit innovativen Wasserstoff-technologien Motorenhersteller in die Lage zu versetzen, nach der Definition der EU, „Zero-Emission“-Antriebssysteme anbieten zu können. Die strategische Ausrichtung auf den Nutzfahrzeubereich gibt den Dieselmotor als Basismotor für die weitere Entwicklung vor. KEYOU hat hierzu einen spezifischen 4-Komponenten-Ansatz entwickelt, um ehemals mit Diesel betriebene Motoren zu Wasserstoffmotoren zu modifizieren. Besonders im Nutzfahrzeubereich ist es sinnvoll, ehemalige Dieselmotoren für den Betrieb mit Wasserstoff weiterzuentwickeln, da vor allem im Schwerlastbereich die derzeitigen alternativen Technologieansätze noch keine erfolgsversprechenden Lösungen anbieten. Der Bedarf an sauberen Motoren geht allerdings weit über den Nutzfahrzeubereich hinaus. So hat KEYOU erkannt, dass auch in der Energiebranche, speziell in der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und der Strombereitstellung im kleineren Maßstab, hohes Potential besteht. Auch hier können mit Wasserstoff betriebene Verbrennungsmotoren einen Beitrag zum Klimaschutz und zur lokalen Luftreinhaltung liefern. Erste Versuche zur Machbarkeit eines Wasserstoffverbrennungsmotors im Stationärbetrieb sind bereits erfolgt.

Die Nutzung von Wasserstoff als Brennstoff hat gegenüber konventionellen Kraftstoffen den hauptsächlichen Vorteil, dass in diesem keine Kohlenstoffe enthalten sind. Somit können aus der reinen Verbrennung keine kohlenstoffhaltigen Emissionen entstehen, es entsteht ausschließlich Wasser. Dies ist der Verbrennungsgleichung von Wasserstoff mit Sauerstoff zu entnehmen:



Aufgrund seiner physikalischen wie auch chemischen Eigenschaften wird die Verbrennungscharakteristik positiv beeinflusst. Durch die weiten Zündgrenzen des Luft-Kraftstoffgemischs zwischen 4-75 %-Vol. kann ein mageres Brennverfahren angewendet werden. Dadurch können die maximalen Verbrennungsspitzen Temperaturen, die nach dem Zeldovich-Mechanismus¹ hauptverantwortlich für die Stickoxidbildung in der Verbrennung mit Wasserstoff sind, reduziert werden. Die thermische Stickoxidbildung liegt bei ca. > 2000 K [1]. Durch die intelligente Nutzung des Magerbrennverfahrens lassen sich die Stickoxidemissionen bis an die Nachweisbarkeitsgrenze reduzieren. Je nach Lastpunkt kann jedoch nicht immer zu 100 % sichergestellt werden, dass keine Stickoxide entstehen. Der 4-Komponentenansatz zeigt einen einfachen Weg zur Minimierung von Stickoxidemissionen.

Weiterhin verbrennt Wasserstoff deutlich schneller als Diesel. Die laminare Flammgeschwindigkeit beträgt 230 cm/s. Damit nähert sich der Verbrennungskreisprozess von Wasserstoff mehr dem Optimum, dem Gleichraumprozess, als der des Diesels (laminare Flammgeschwindigkeit: 40 cm/s), an. Infolgedessen sind mit Wasserstoff als Brennstoff höhere Wirkungsgrade in der Verbrennung bei vergleichbaren Verdichtungsverhältnissen möglich.

Die niedrige Zündenergie von Wasserstoff von 0,02 mJ² ist Vor- und Nachteil zugleich. Sie fördert das abnormale Verbrennungsverhalten, wie z.B. sogenannte Rückzündungen. Neben Rückzündungen ist die Herausforderung im Umgang mit Wasserstoff in der Verbrennungskraftmaschine u.a. die Klopfanfälligkeit. Im Vergleich zu CNG mit einer Methanzahl > 80 (entspricht klopfunanfällig), weist Wasserstoff eine Methanzahl von 0 auf [2]. Jedoch kann durch die hohe Zündwilligkeit ein sehr mageres Gemisch robust entflammt werden.

¹ Die 3 NOx-Entstehungsprinzipien nach Zeldovich: 1. Prompt-NO; 2. Kraftstoff-NO; 3. Thermisches-NO

² Vgl.: Zündenergie von Methan: 0,29 mJ

2. KEYOU H2 Motorenkonzept

2.1 Hardware Adaptionen

Das innovative KEYOU-Konzept basiert darauf, konventionelle Dieselmotoren aus dem Nutzfahrzeugsektor so weiter zu entwickeln, dass diese mit Wasserstoff betrieben werden können. Eine der größten Aufgabenstellungen ist hierbei die Umstellung des eigentlichen Brennverfahrens vom Gleichdruck- bzw. Seiliger-Prozess (Diesel) in einen Gleichraumprozess (Otto) zu überführen. Das Brennverfahren nach dem Ottoprinzip benötigt eine externe Energiezuführung zur Entflammung des Luft-Kraftstoffgemischs im Brennraum. Es ist demnach essentiell ein Zündsystem durch den bestehenden Zylinderkopf hin zum Brennraum einzubringen.

Neben der Unterbringung des Zündsystems ist ein innovatives 4-Komponenten Konzept von KEYOU entwickelt worden. Die vier Komponenten bestehen aus einem Magerbrennverfahren, einer Turboaufladung, einer sequentiellen Einblasung und einem H₂-SCR Katalysator, siehe Abbildung 1.



Abbildung 1: KEYOU – Vier-Komponenten Konzept

Um einen Wasserstoffverbrennungsmotor mit hohen Wirkungsgraden zu erreichen, ist das auszuwählende Brennverfahren entscheidend. Durch die Nutzung des Magerbrennverfahrens können hohe thermische Wirkungsgrade erreicht werden - bei gleichzeitiger Reduktion der NO_x-Rohemissionen, weit unter dem heutigen Euro VI Grenzwert. Jedoch führt ein Magerbrennverfahren unweigerlich zu Leistungsdefiziten, die mit einer Anpassung der Aufladegruppe ausgeglichen werden. Zu berücksichtigen sind hierbei die wesentlich niedrigeren Abgastemperaturen bei der Wasserstoffverbrennung, die zu niedrigeren Abgasenthalpien führen. Durch eine geschickte Auslegung der Turbinen- und Verdichtergeometrien wird eine optimale Auslegung erreicht. Somit ist eine für den Wasserstoffverbrennungsmotor noch nie dagewesene Leistungsdichte zu erreichen, verglichen zu den früheren Konzepten von MAN und BMW. Eine weitere Komponente ist die sequentielle Kraftstoffeinspritzung mit dem MPI-Verfahren. Hier sitzen die speziellen Wasserstoffinjektoren, direkt vor den Brennräumen, und blasen den Wasserstoff im Ansaugtakt in die Zylinder. Dies erlaubt eine exakte Dosierung der Wasserstoffmenge und die Gemischbildung kann - je nach Betriebspunkt - optimal ausgelegt werden. Trotz des ausgewählten Magerbrennverfahrens kann es - je nach Betriebspunkt - zur Entstehung von geringen NO_x-Emissionen kommen. Hierzu wird seitens KEYOU ein speziell auf die Wasserstoffverbrennung ausgelegter H₂-SCR-Katalysator entwickelt, welcher die restlich verbleibenden NO_x-Emissionen bis auf die Nachweisbarkeitsgrenze reduziert. Ergebnis: ein neuartiger Wasserstoffverbrennungsmotor, der nahezu

emissionsfrei ist und eine hohe Leistungsdichte aufweist.

Zu dem dargestellten 4-Komponenten Konzept müssen – für ein robustes Brennverfahren- weitere Änderungen am Basismotor vorgenommen werden. Die folgende Auflistung zeigt die notwendigen Änderungsmaßnahmen:

- Brennverfahren (Diesel→Otto)
- Kolbengeometrie
- Motorsteuerung (ECU)
- Ventilsteuerzeiten (Nockenwelle)
- Verdichtungsverhältnis
- Zündpfad
- Kraftstoffpfad
- Abgasturbolader
- Abgasrückführung
- Wärmemanagement
- Drosselklappe
- Führung der Einlasskanäle

2.2 Simulationsgestützte Motorentwicklung

Wie beschrieben, ist eine Vielzahl von Anpassungen für die Umrüstung auf den Betrieb mit Wasserstoff notwendig. Aufgrund dessen sind für die Auslegung der Komponenten und des Brennverfahrens im ersten Entwicklungsschritt 1D und 3D-CFD Simulationen durchgeführt worden, um die einzelnen Komponenten optimal in das Gesamtsystem zu integrieren [3].

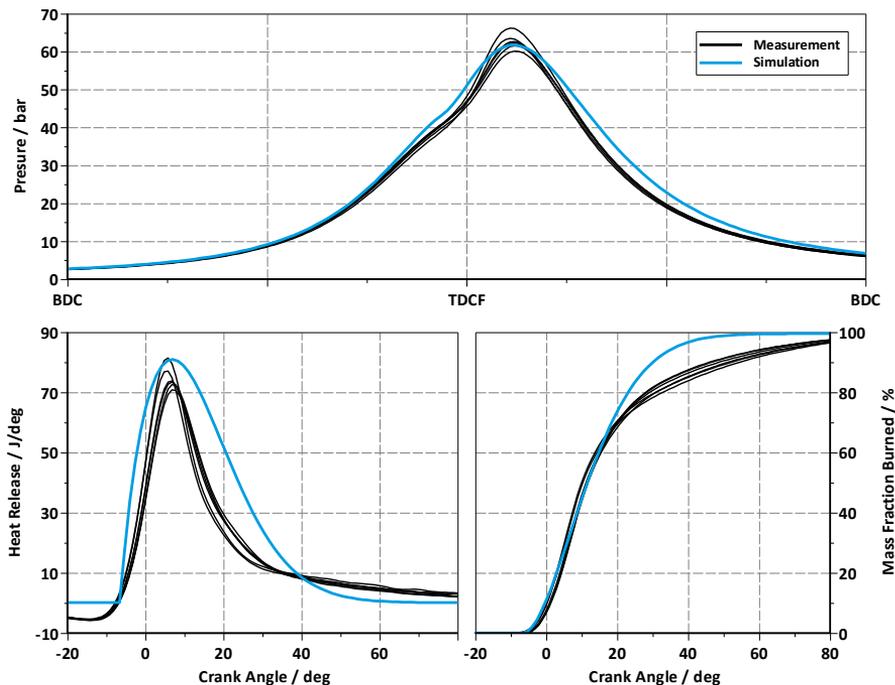


Abbildung 2: Simulierter und gemessener Verbrennungsdruckverlauf [3]

Hierbei bestand die besondere Herausforderung, ein prädiktives Verbrennungsmodell speziell für den Wasserstoff zu erstellen. Eine hinreichende Validierung von Verbrennungsmodellen wie beim Otto- oder Dieselmotorenverfahren, ist in den gegebenen Simulationswerkzeugen (GT-Power) derzeit nicht implementiert. Aus der Arbeit von Dr. Fouquet [4] wurde für die erste Auslegung des Verbrennungsmodells die angegebenen Berechnungen für die Vibe-Koeffizienten herangezogen. Eine spätere Validierung der Vibe-Koeffizienten mit den Messdaten vom Motorenprüfstand hat eine ausreichend gute Übereinstimmung des Verbrennungsmodells dargestellt, siehe Abbildung 2.

Die dargestellte Abbildung 2 zeigt den Verbrennungsdruckverlauf, die Wärmefreisetzung und die Brennrate. In der Simulation des Verbrennungsdruckverlaufs kann man sehr gut die deutliche Übereinstimmung der gemessenen und simulierten Zylinderdrücke sehen. Die simulierten Zylinderdrücke sind auf dem gleichen Niveau wie die der gemessenen, sodass eine hinreichende Abschätzung der Spitzendrücke in der Nennlast berechnet werden kann und die mechanische Belastung der im Brennraum befindlichen Bauteile für den Kolben und die Kolbenringpakete identifiziert wird.

Bei der Darstellung der Wärmefreisetzung ist erkennbar, dass die bereitgestellte Wärme der Simulation über den gemessenen Werten liegt. Hierbei ist vor allem zu berücksichtigen, dass die hinterlegten Wandwärmemodelle für die Wasserstoffverbrennung keine ausreichende Güte besitzen. Hierdurch sind die Abweichungen zu erklären, die dazu führen, dass der simulierte Zylinderdruck beim späteren Verbrennungsverlauf über den gemessenen liegt.

2.3 Die neue Generation von H₂-Verbrennungsmotoren

Der erste von KEYOU umgerüstete Verbrennungsmotor ist der TCD 7.8 Liter Industriemotor der Deutz AG. Hierbei handelt es sich um einen aufgeladenen Reihensechszylinder mit 7.8 Liter Hubraum und einer Abgasrückführung (AGR). Die spezifischen Motordaten des entwickelten Wasserstoffverbrennungsmotors, basierend auf der Deutz Plattform, sind der nachfolgenden Abbildung 3 und zu entnehmen.



Zylinder	6
Hubraum [l]	7.8
Hub x Bohrung [mm]	136/110
Verdichtung	12:1
Nennleistung [kW]	180
Nenndrehzahl [1/min]	1900
Max. Drehmoment [Nm]	950

Abbildung 3: KEYOU-Motor TCG 7.8l H₂

Die Entwicklung einer robusten Wasserstoffverbrennung ist aufgrund von Verbrennungsanomalien eine komplexe Aufgabenstellung. Bei der integrierten sequentiellen Saugrohrenblasung können Rückzündungsphänomene auftreten. Dies bedeutet, dass sich das Gemisch im Brennraum entzündet, bevor die Einlassventile geschlossen sind. Die Druckwelle tritt mit Schallgeschwindigkeit aus dem Brennraum in die Ansaugführung und kann dazu führen, dass einzelne Bauteile beschädigt werden. Hierzu ist es notwendig, das Brennverfahren exakt abzustimmen, sodass Rückzündungen vermieden werden. Eine Minderung der Rückzündungsneigung wird durch eine Abmagerung in Kombination mit AGR erreicht.

Nach Anpassung der Einblasezeitpunkte und einer gezielte Abmagerung inkl. AGR konnten die gewünschten Leistungs- und Drehmomentkurven mit dem ersten von KEYOU entwickelten Wasserstoffverbrennungsmotor erreicht werden.

Abbildung 4 zeigt den Drehmoment- & Leistungsverlauf über die Motordrehzahl. Schon bei einer Drehzahl von 1000 1/min ist das maximale Drehmoment von 950 Nm erreicht und bis zu einer Drehzahl von 1700 1/min konstant. Eine maximale Leistung wird bei einer Drehzahl von 1900 1/min mit 180 kW erreicht. Weiterhin ist die maximale effektive Leistung für eine stationäre Anwendung bei 1500 1/min (50 Hz) mit 150 kW abzuleiten.

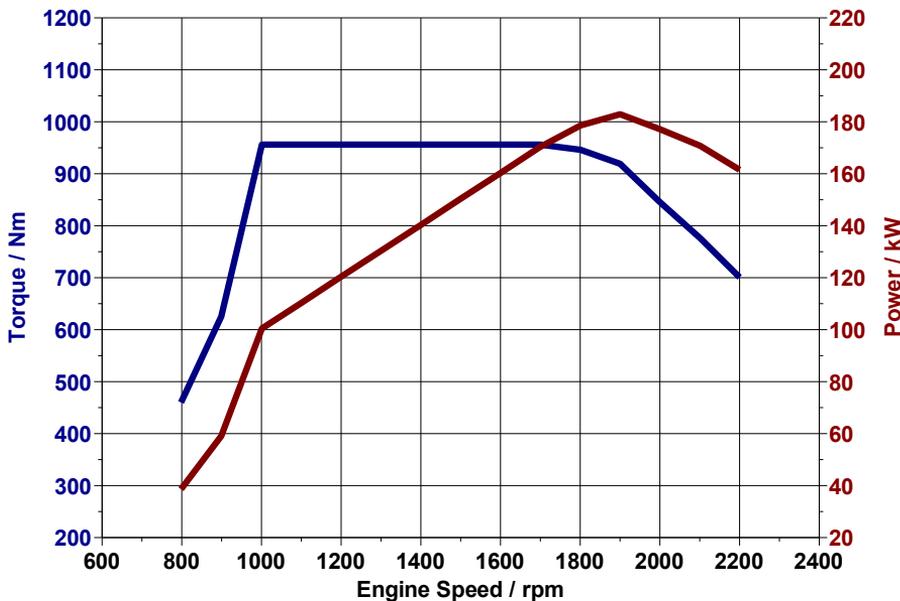


Abbildung 4: Drehmoment- & Leistungskurve über die Drehzahl

3. Prüfstandsuntersuchungen für den stationären Anwendungsfall bei 1500 1/min

Der stationäre Betrieb von Verbrennungsmaschinen bzw. auch Dampf- und Gasturbinen ist meist durch die konstante Drehzahl von 1500 1/min realisiert. Dies ist auf die in Europa vorherrschende Frequenz des Stromnetzes von 50 Hz zurückzuführen. Eine Verdopplung der Polzahl des Generators ermöglicht z.B. auch den stationären Betrieb bei einer Drehzahl von 750 1/min. Dies ist besonders für große Anlagen (Dieselmotoren oder Dampfturbinen) interessant. Ebenso ist es möglich, die Frequenz von 50 Hz direkt über 3000 1/min zu erreichen.

In einer speziell für den stationären Betrieb ausgelegten Versuchsreihe wird der bestehende umgerüstete Wasserstoffmotor, ein Deutz TCD 7,8l – Reihensechszylinder, auf Emissionen, Wirkungsgrade, Leistungen und Verbrennungsstabilität hinsichtlich der Variation des Zündwinkels und des Luftkraftstoffgemischs untersucht. Ziel ist es, hierbei eine spezifische Betriebsstrategie zu skizzieren und - unter besonderer Betrachtung der Wärmebilanz und Emissionen - Potentiale zur Anpassung der Komponenten für einen stationären Betrieb aufzuzeigen,

3.1 Parametervariation zur Optimierung der Verbrennung

In der Versuchsreihe am KEYOU-Prototypmotor wird der stationäre Anwendungsfall mittels einer konstanten Drehzahl von 1500 1/min dargestellt. Hierbei werden vier verschiedene Lastpunkte mit den Leistungen von 75, 100, 125 und 150 kW untersucht, sowie eine Verstellung des Zündwinkels zur Verschiebung des Verbrennungsschwerpunkts bei 100 kW.

3.1.1 Lambdavariation

In der ersten Messreihe wird jeweils eine Lambdavariation zwischen Lambda 2,2 bis 2,8 mit konstantem Verbrennungsschwerpunkt (bei 14 °KW n. OT.) zur Evaluierung des Verhaltens hinsichtlich des effektiven Wirkungsgrades, der spezifischen Stickoxidemissionen, des Ladedrucks, des Verbrennungsschwerpunkts, der Brenndauer und der Verbrennungsstabilität untersucht. Die hier dargelegten Untersuchungen sind ohne AGR durchgeführt worden. Die Brenndauer beschreibt die Dauer der Verbrennung von 10 % bis 90 % der Masse des Gemischs in °KW.

Abbildung 5 zeigt die Lambdavariation bei den vier verschiedenen Lastpunkten 75-150 kW in 25 kW Schritten. Bei der Messreihe mit 150 kW konnte aufgrund von Klopferscheinungen die Verbrennungsschwerpunktlage nicht konstant auf 14°KW n. OT gehalten werden.

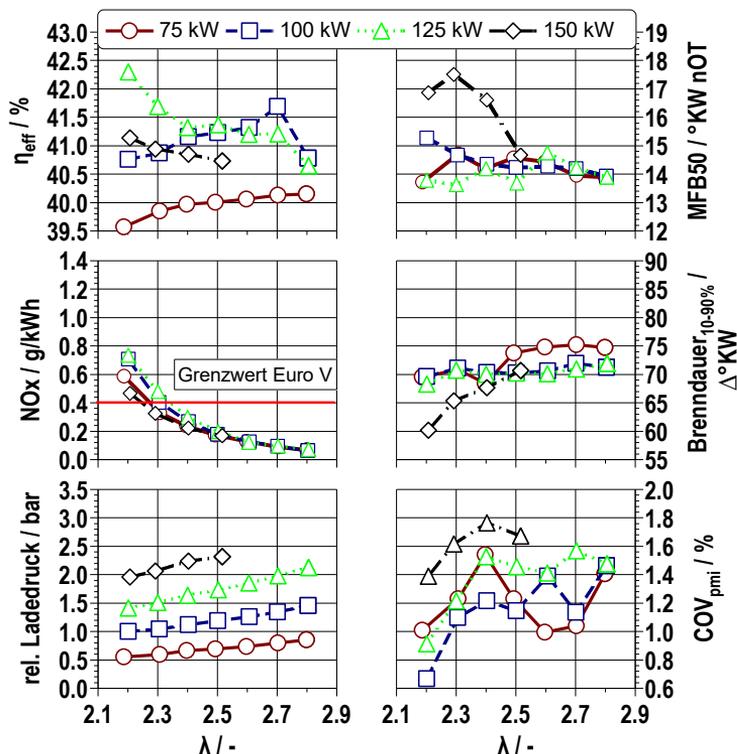


Abbildung 5: Einfluss der Lambdavariation auf den effektiven Wirkungsgrad, die spez. NOx-Emissionen, den Ladedruck, die Verbrennungsschwerpunktlage, die Brenndauer und die Verbrennungsstabilität (COV)

Die dargestellten Messreihen zeigen, dass bei den beiden niedrigeren Leistungen mit 75 und 100 kW der effektive Wirkungsgrad mit einer Abmagerung zunimmt. Konträr zu diesem Verhalten zeigt der

Trend des effektiven Wirkungsgrades bei höheren Lasten mit 125 und 150 kW eine Verschlechterung des Wirkungsgrades bei einer Abmagerung. Es zeigt sich somit ein Umkehrpunkt des Verhaltens in Abhängigkeit der Last. Hinsichtlich der Rohemissionen der Stickoxide ist ein klarer Trend einer Reduzierung mit magerem Gemisch zu identifizieren. Infolge der Abmagerung reduziert sich die Verbrennungstemperatur, sodass die thermische Stickoxidbildung nach Zeldovich gehemmt wird. Die derzeitigen EURO V Grenzwerte (Kapitel 3.3) können bei einem Luft-Kraftstoffgemisch > 2.3 unterschritten werden und ab > 2.5 unter 0.2 g/kWh liegen. Um bei einer Abmagerung die Leistung konstant halten zu können, muss der Ladedruck angehoben werden. Die Anhebung des Ladedrucks ist linear zu einem mageren Luft-Kraftstoffgemisch. Eine Fortführung der Messreihe bei 150 kW war nicht möglich, aufgrund der Erreichung des maximal zulässigen Ladedrucks von 2.3 bar relativ. Weiterhin hat eine Abmagerung zur Folge, dass die Brenndauer zunimmt, da die Flammgeschwindigkeit mit einem mageren Gemisch abnimmt. Zudem ist erkennbar, dass sich die Verbrennungsstabilität (COV) mit zunehmendem Lambda zunehmend verschlechtert. In den Messungen sind zwar größere Schwankungen erkennbar, jedoch ist der Trend hin zu einer größeren Varianz der Verbrennung zu sehen. Für den hier dargestellten Wasserstoffverbrennungsmotor mit einem externen Zündsystem wird ein Wert des COV's kleiner 2% als hinreichende Güte erachtet.

Die Messreihe der Lambdavariation zeigt deutlich, dass durch eine gezielte Abmagerung die spezifischen Stickoxidemissionen unter den Euro Stage V Grenzwert gesetzt werden können - ohne die Verwendung einer externen Abgasbehandlung. Bei kleineren Lasten kann dabei sogar der Wirkungsgrad angehoben werden. Ein inverses Verhalten dazu ist bei den höheren Lastpunkten festzustellen. Jedoch führt die Abmagerung hier zu einer Verschlechterung der Wirkungsgrade. Nichtsdestotrotz konnte gezeigt werden, dass für alle Lastpunkt Wirkungsgrade $> 40 \%$ bei Stickoxidemissionen $< 0.4 \text{ g/kWh}$ erreichbar sind.

3.1.2 Einfluss des Zündwinkels

Eine zweite angelegte Untersuchung betrifft die Variation der Lage des Zündwinkels. Eine Verschiebung des Zündwinkels führt gleichzeitig zu einer Verschiebung der Verbrennungsschwerlage (MFB50).

Die Untersuchung der Zündwinkelvariation wurde bei einer konstanten Last von 100 kW und drei verschiedene Luft-Kraftstoffgemische, Lambda 2.3, 2.4 und 2.5, durchgeführt. Diese Messreihe wird, wie in der zuvor beschriebenen Lambdavariation, hinsichtlich des effektiven Wirkungsgrades, der spezifischen Stickoxidemissionen, dem Ladedruck, der Brenndauer und der Verbrennungsstabilität untersucht, siehe hierzu auch Abbildung 6.

Bei allen drei Messreihen ist eine Verschlechterung des effektiven Wirkungsgrads von bis zu 1,5 % Punkten bei einer späteren Zündung zu erkennen. Dieses Verhalten ist damit zu begründen, dass mit einer Verschiebung des Zündwinkels die Verbrennung sich immer weiter vom optimalen Gleichraumprozess entfernt. Jedoch führt eine Verschiebung des Zündwinkels in Richtung ‚spät‘ gleichzeitig zu einer Reduzierung der spezifischen Stickoxidemissionen. Ab einer Verbrennungsschwerpunktlage nach $14^\circ \text{KW n. OT.}$ kann bei der Messreihe mit $\lambda = 2.3$ der Grenzwert von Euro V unterschritten werden. Aufgrund der mageren Gemische der anderen beiden Messreihen findet die Unterschreitung des Grenzwertes wesentlich früher statt. Gleichzeitig führt ein späterer Zündwinkel dazu, dass der Ladedruck bei konstanter Leistung angehoben werden muss, da der Wirkungsgrad sinkt. Die Brenndauer reduziert sich, entgegen der Erwartung einer zunehmenden Brenndauer, aufgrund eines größeren Volumens im Brennraum, mit späterem Zündwinkel. Zudem ist eine deutliche Verschlechterung der Verbrennungsstabilität für alle drei Messreihen auszumachen. Der COV kann zwar noch unter dem geforderten Wert von 2 % gehalten werden, liegt jedoch nahe an der zulässigen Grenze.

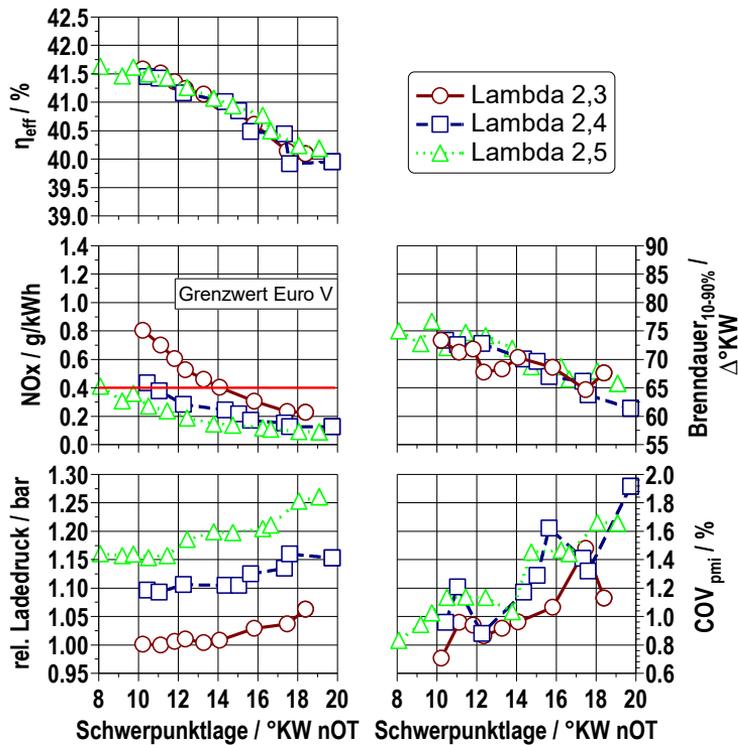


Abbildung 6: Einfluss der Zündwinkelvariation auf den effektiven Wirkungsgrad, die spez. NOx-Emissionen, der Ladedruck, die Brenndauer und die Verbrennungsstabilität

Die Zündwinkelvariation zeigt deutlich, dass ein früher Zündwinkel (entspricht einer frühen Schwerpunkt-lage) eine Optimierung der Verbrennungsparameter zur Folge hat. Der Wirkungsgrad wird angehoben, bei niedrigerem Ladedruck und einer wesentlich besseren Verbrennungsstabilität. Jedoch führt ein früher Zündzeitpunkt zu einer erheblichen Stickoxidbildung, die den Grenzwert von 0.4 g/kWh überschreitet. Hier ist ein deutlicher Trade-Off zwischen optimaler Verbrennung und den spezifischen Stickoxidemission zu identifizieren.

Schlussfolgernd haben beide Versuchsreihen gezeigt, dass der Wasserstoffverbrennungsmotor im stationären Betrieb bei 50 Hz, mit einer intelligenten Wahl der Verbrennungsparameter (Zündwinkel & Luft-Kraftstoffgemisch), optimal hinsichtlich Leistung, Wirkungsgrad und Stickoxidbildung ausgelegt werden kann.

3.2 Wärmebilanz des Wasserstoffmotors

Die oben gezeigte Betriebsstrategie, die Schwerpunkt-lage früh und Lambda niedrig einzustellen, lässt sich bei der thermischen Betrachtung fortführen. Allerdings gilt es zu beachten, dass bei einer stationären Anwendung nicht immer der elektrische und damit der mechanische Wirkungsgrad im Vordergrund stehen. Stromgeführte oder wärmegeführte Betriebsweisen sind z.B. Möglichkeiten zur Auslegung. Eine jahreszeitenabhängige Auslegung für einen kommunalen Betrieb könnte wie folgt skizziert werden:

- Sommer: Teillastbetrieb und stromgeführt (Erfüllung Stromanforderung)
- Winter: Vollastbetrieb und wärmegeführt (Erfüllung Wärmeeanforderung)
- Übergangszeit: Börsenpreisgeführt oder Mischbetrieb

Ein modernes BHKW sollte in seiner Betriebsweise flexibel sein. Dies wäre mit dem KEYOU-Motor über eine Variable Lambda und Zündwinkelverstellung möglich. Die Auswirkungen der Lambdaverstellung auf die Abgastemperaturen und die im Abgas enthaltene nutzbare thermische Leistung zeigt Abbildung 7. Bei der Nutzung des Wärmestroms wird von einer Abkühlung des Abgases auf 120°C ausgegangen.

Bei der Betrachtung des Wärmestroms fällt auf, dass trotz sinkender Temperaturen über Lambda die Leistung eine proportionale Auswirkung auf die thermische Energie hat. Dies ist mit dem erhöhten Abgasmassenstrom bei erhöhter Leistung zu erklären. Der Einfluss der niedrigeren Temperaturen bei hohen Leistungen fällt damit nicht so stark ins Gewicht. Weiterhin auffällig ist, dass die thermische Leistung von Lambda abhängig ist und mit erhöhtem Luftkraftstoffverhältnis bei konstanter Leistung sinkt.

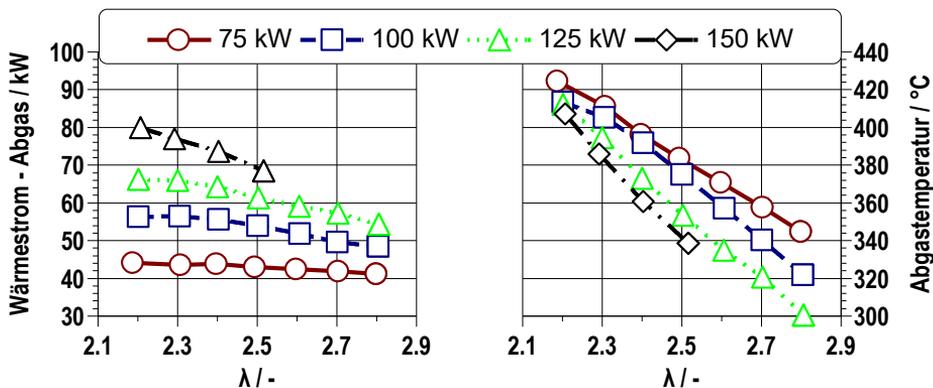


Abbildung 7: Abgaswärmestrom (bis 120°C) und Abgastemperatur über Lambda

Die Abhängigkeit der Abgastemperatur von Lambda ist ebenfalls deutlich erkennbar. Je höher der Luftüberschuss ist, umso geringer ist auch die Abgastemperatur bei gleicher Leistung. Gleiche Leistung bedeutet auch gleicher Einsatz von Kraftstoff, bei Vernachlässigung von Wirkungsgradänderungen über Lambda. Damit kommt bei einem höheren Luftüberschuss mehr Luftmasse auf die gleiche freigesetzte Wärme aus dem Kraftstoff und reduziert die Verbrennungstemperatur. Ebenfalls auffällig ist der Zusammenhang zwischen höherer Leistung und niedrigerer Abgastemperatur. Die höchsten Abgastemperaturen werden bei der geringsten Leistung erzielt und andersherum. Dies ist mit der erhöhten Arbeit des Verdichters bei höheren Leistungen zu erklären. Um das Luftverhältnis zu gewährleisten, muss bei hohen Lasten aufgrund der höheren Kraftstoffmenge mehr Luft in den Brennraum befördert werden. Bei dem KEYOU-Konzept wird das schon bei relativ geringen Lasten über den Verdichter sichergestellt. Der Verdichter wird wiederum über eine sich im Abgasstrom befindende Turbine angetrieben. Benötigt der Verdichter mehr Leistung, wird über ein Wastegate der Abgasmassenstrom über die Turbine erhöht. In Folge der Entspannung stellt sich auch eine Temperaturdifferenz über der Turbine ein. Bei höheren Abgasmassenströmen in der Turbine kühlt sich somit das Gesamtabgas auf ein niedrigeres Temperaturniveau ab, als bei geringeren Massenströmen über die Turbine.

Neben der Stromerzeugung ist bei der BHKW-Anwendung die mögliche Nutzwärme elementarer Bestandteil im Betrieb. Verschiedene Anwendungen der Wärmenutzung, z.B. Nahwärmenetze oder Industrieprozesse, stellen unterschiedliche Anforderungen an die Abwärme. So werden Nahwärmenetze häufig in einem Temperaturbereich um 100 °C betrieben, Industrieprozesse erfordern teilweise auch höhere Temperaturen zur Erzeugung von z.B. Niederdruckdampf.

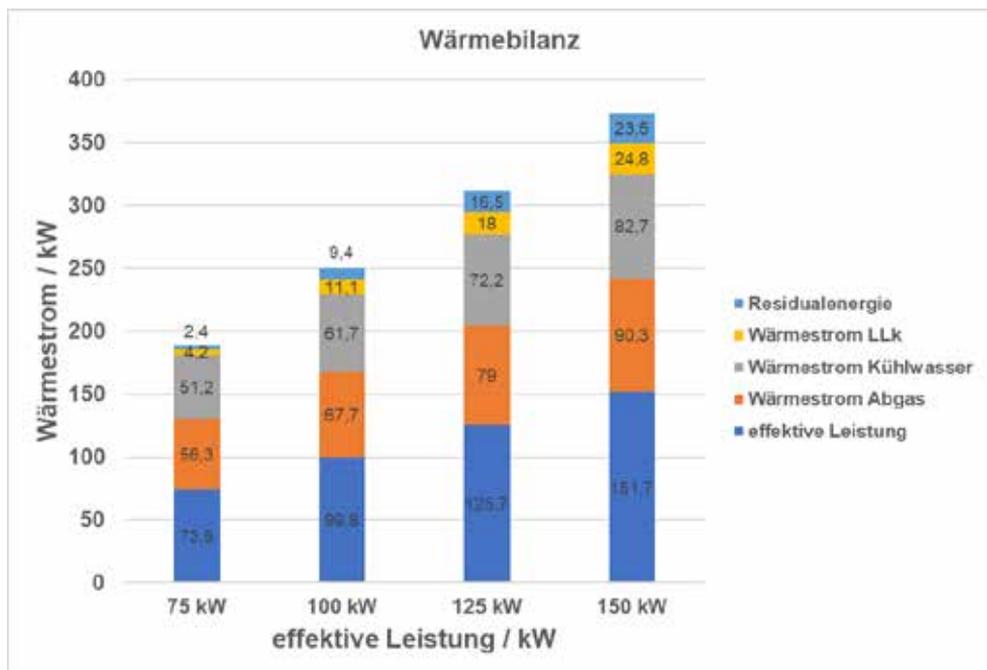


Abbildung 8: Wärmeströme des Wasserstoffverbrennungsmotors bei 75, 100, 125 und 150 kW

Nutzbar sind bei dem Wasserstoffmotor Abgasenergie und Kühlwasserenergie (Motor- und Ladeluftkühlung). Die Abgastemperaturen schwanken zwischen 420 und 300 °C im stationären Betrieb und sind damit etwas geringer als vergleichbare Gas- oder Dieselmotoren, jedoch auch hinsichtlich Materialauswahl und Haltbarkeit, einfacher zu beherrschen. Das Kühlwasser hat eine maximale Temperatur von 80 °C. Die jeweiligen Anteile an der Gesamtenergiebilanz sind in Abbildung 8 dargestellt.

Aus der Energiebilanz geht hervor, dass neben der maximalen effektiven Leistung von 150 kW, 198 kW thermische Energie zur Verfügung stehen. Die Residualenergie beschreibt die nach dem Wärmetauscher im Abgas verbleibende thermische Energie sowie Energieverluste mittels Konvektion und thermischer Abstrahlung des Grundmotors. Die unterschiedlichen Wärmeströme im Abgas zwischen Abbildung 7 und Abbildung 8 ergeben sich aus der niedrigeren gewählten Temperatur von 30°C in Abbildung 8, auf die das Abgas gekühlt werden kann. Hiermit soll gezeigt werden, wie groß der Wärmestrom bei einer maximalen Ausnutzung der im Abgas enthaltenen Energie sein kann.

Die Nutzung der Wärme kann über einen gemeinsamen oder getrennten Kreislauf erfolgen. Im ersten Fall werden die Wärmeströme aus den verschiedenen Bauteilen zusammengeführt. So lassen sich etwa Nahwärmenetze einfach und wirtschaftlich betreiben. Eine getrennte Wärmenutzung kann beispielsweise in einem Szenario mit einer Nachverstromung realisiert werden. Die im Abgas enthaltene Energie wird in dem Fall auf ein Medium mit niedrigem Siedepunkt übertragen, um anschließend in einer Turbine zur Stromerzeugung entspannt zu werden (z.B. ORC), während die Kühlwasserenergie (Motorkühlung und LLK) in einem zweiten Kreislauf zu Heizzwecken genutzt werden kann. Für den aktuellen KEYOU Motor eignet sich – insbesondere aus wirtschaftlichen Gründen - die einfache Zusammenlegung der Wärmeströme.

3.3 Emissionen

Die Emissionen und Immissionen von stationär betriebenen Energiewandlungsanlagen, hier insbesondere Anlagen auf Basis von Verbrennungskraftmaschinen, unterliegen Anforderungen, um schädliche Umwelteinwirkungen möglichst gering zu halten. Für die Inbetriebnahme eines Verbrennungsmotors als Energiewandlungseinheit (oder auch BHKW) in Deutschland muss die Anlage nach Richtlinien der TA Luft zertifiziert bzw. genehmigt werden.¹ Neben der TA Luft schreibt die EU-Kommission mit der European Stage V Grenzwerte für Emissionen und Immissionen vor.

Der mit Wasserstoff betriebene Motor von KEYOU kann, wie im Folgenden gezeigt wird, jeden der geforderten Grenzwerte einhalten. Besonders hervorgehoben wird die strengere Euro Stage V Norm.

3.3.1 EU-Verordnung 2016/1628 - Abgasnorm Euro Stage V – Non-Road emission standard

Die Verordnung (EU) 2016/28 (im weiteren als Euro V bezeichnet) bestimmt über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte für gasförmige Schadstoffe und luftverunreinigende Partikel und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte.

In der Euro V wird zwischen verschiedenen Anwendungsfällen für die Einordnung von Verbrennungsmotoren unterschieden. Diese sind: Generator-Anlagen, Anlagen mit Fremdzündung, Binnenschifffahrt, Schienenverkehr, Schneemobile und Sonstige. Für den Anwendungsfall der stationären Energiewandlung wird also die Kategorie ‚Generator-Anlage‘ (kurz: Genset) angewandt. Um eine aufwändige Typisierung des H2-Motors zu umgehen, werden die strengsten Grenzwerte betrachtet – eine Worst-Case-Betrachtung. Die niedrigsten einzuhaltenden Grenzwerte für die Anwendung im stationären Betrieb sind in der Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Euro Stage V – Non Road: Emissionsgrenzwerte

Anwendungsfälle	Leistungsbereich (kW)	NOx (g/kWh)	PM (g/kWh)	PN (#/kWh)
Sonstige	56<P<560	0,40	0,015	1E+12
Genset	P>560	0,67	0,035	/

Aus Tabelle 1 wird ersichtlich, dass die niedrigsten einzuhaltenden Grenzwerte unter der Kategorie Sonstige zu finden sind. Diese Leistungsklasse entspricht auch der des aktuellen H2-Motors der KEYOU GmbH.

3.3.2 Gemessene Emissionen

Der H2-Motor wurde auf Emissionen mittels des D2-Testzyklusses für stationäre Hilfsantriebe (Genset) untersucht. Dabei werden 5 Betriebspunkte, jeweils 1500 1/min und Variation der Leistung von 100 % bis 10 %, angefahren und jeweils die Emissionen gemessen. Für eine Aussage über die Gesamt-Emissionen des Motors wird jeder Betriebspunkt gewichtet betrachtet. Daraus ergibt sich für jede Emission trotz verschiedener Betriebspunkte nur ein Wert. Tabelle 2 zeigt die jeweiligen Messpunkte des D2 Testzyklus.

¹ Dies, und welche Leistungsklassen betroffen sind, wird in 4.BImSchV geregelt (Bundesimmissionsschutzverordnung)

Tabelle 2: D2-Testzyklus (stationär)

Messpunkt	1	2	3	4	5
Drehzahl / 1/min	1500	1500	1500	1500	1500
Drehmoment / Nm	950	715	475	235	96
Leistung / kW	150	0,75*150	0,5*150	0,25*150	0,1*150
Wirkungsgrad / %	42,5	42,3	41,1	34,6	23,2
Gewichtung	0,05	0,25	0,3	0,3	0,1

Tabelle 3 stellt die Ergebnisse der Rohemissionen (ohne Abgasnachbehandlung) aus dem D2 Testzyklus den Grenzwerten der Euro Stage V Non-Road gegenüber. Besonders hervorzuheben, neben dem eigentlichen Untersuchungsgegenständen PM und NOx, sind die CO2 Emissionen. Die CO2 Emissionen liegen nach der Korrektur um die bereits in der Ansaugluft enthaltenen CO2 Moleküle¹ bei 0,42 g/kWh. Somit ist gezeigt, dass nahezu kein CO2 in der Verbrennung produziert wird. Wie zuvor schon beschrieben, stammt das CO2 aus der Verbrennung von Ölparkeln oder anderen kohlenstoffhaltigen Molekülen im Brennraum. Ganz zu vermeiden sind diese Emissionen nicht, sind jedoch über den Faktor 100 kleiner als bei herkömmlichen Verbrennungsmotoren. Ebenfalls wie CO2 wird die Partikelanzahl (PN) um die in der Ansaugluft enthaltenen Partikel korrigiert.

Tabelle 3: Emissionsergebnisse – D2 Testzyklus

Emissionen	Einheit	Grenzwert Euro Stage V	Messergebnisse	Unterschreiten der Grenzwerte in %
CO	g/kWh	3,5	0,006	100
HC	g/kWh	0,19	0,006	97
NOx	g/kWh	0,4	0,088	78
CO2	g/kWh	-	3,83	-
CO2 korrigiert	g/kWh	-	0,42	-
PM	g/kWh	0,015	0,0034	77
PN	#/kWh	1*10 ¹²	8,33*10 ¹⁰	92
PN korrigiert	#/kWh	1*10 ¹²	7,03*10 ¹⁰	93

Aus der letzten Spalte der Tabelle 3 ist zu entnehmen, dass sämtliche Grenzwerte deutlich unterschritten werden. Besonders deutlich wird dies bei den Emissionen CO, HC und Partikelanzahl. Hier liegen die gemessenen Emissionen deutlich über 90 % unter den geforderten Grenzwerten. Eine Unterschreitung von mehr als 77 % der anderen Emissionen ist bei den geringen Mengen ebenfalls überaus beachtlich und zeigt, dass der Anspruch, einen Motor mit nahezu keinen Emissionen zu betreiben, mit der Nutzung von Wasserstoff als Kraftstoff erfüllt werden kann.

Es ist zu erwähnen, dass der ursprüngliche Motor (Deutz TCD 7,8) im Dieselbetrieb nur Euro Stage IV erreicht hat. Der Betrieb mit Wasserstoff erlaubt es dem Motor, sogar ohne Abgasnachbehandlung die aktuelle Euro V für Nutzfahrzeuge und Non-Road zu erreichen.

¹ Nach eigenen Messungen liegen die CO2 Werte in der Ansaugluft am Prüfstand bei 0,05 %

4. Verbrennungsmotor vs. Brennstoffzelle

Ein Vergleich der beiden Technologien fällt schwer, nachdem weder der Wasserstoffverbrennungsmotor noch die Brennstoffzelle eindeutig definiert und innerhalb der Technologie immer gleich sind. Je nach Bauform, eingesetzten Materialien, Qualitätsansprüchen, Umgebungsbedingungen und Einsatzzweck werden sich die zu vergleichenden Eigenschaften unterscheiden. Aus diesem Grund sind nachfolgend Tendenzen der jeweiligen Technologie aufgeführt. Die Umrüstung hin zu einem Wasserstoffverbrennungsmotor beeinflusst das grundlegende Verhalten des Motors nicht, lediglich die Kosten werden beeinflusst. Deshalb wird im Folgenden allgemein auf den Verbrennungsmotor verwiesen. Beiden Technologien gemein ist, dass Wasserstoff als zu wandelnden Energieträger benutzen.

4.1 Betriebsverhalten

Brennstoffzellensysteme sind für den stationären Anwendungsfall besser geeignet als für den mobilen. Grund dafür ist das dynamische und Teillastverhalten der BZ. Der elektrische Wirkungsgrad einer BZ (ohne Leistungselektronik) wird in [5] mit bis zu 40 % angegeben, der Gesamtsystemwirkungsgrad mit bis zu 90 %. Bei dem Gesamtwirkungsgrad wird die Nutzung der Abwärme mitbetrachtet. Damit unterscheiden sich BZ und Verbrennungsmotor in der Hinsicht wenig, da auch der Verbrennungsmotor in einem BHKW solche Werte erreicht. In der Teillast verringert der hohe Energiebedarf der Peripheriegeräte (Kühler, Umwälzpumpen etc.) den Wirkungsgrad der BZ erheblich. Teilweise sogar soweit, als dass ein Betrieb im Leerlauf nicht bei allen BZ-Typen möglich ist, da die Peripheriegeräte mehr Leistung abrufen, als die BZ bereitstellt. Eine Brennstoffzelle kann nicht die gleichen dynamischen Laständerungen wie ein Verbrennungsmotor nachbilden, da das System deutlich träger reagiert. Für schnelle Laständerungen wird damit eine zusätzliche Speichereinheit inkl. Regeleinheit und Kühlung benötigt. Ebenso benötigen BZ mehr Zeit zum Einschalten/Hochfahren. Ein Einsatz als Notstromaggregat scheint damit für die BZ im Gegensatz zum Verbrennungsmotor nicht sinnvoll.

4.2 Betriebsstunden

Elementar für eine schnelle Amortisation der Investitionskosten sind die Standzeiten der Anlagen. Mobile BZ sind bekannt für kurze Standzeiten (max. 15.000 h). Stationäre BZ haben dagegen deutlich höhere Standzeiten von bis zu 35.000 h [6]. Dies ist unter anderem bedingt durch die geringere Dynamik im Dauerbetrieb und der Möglichkeit, die BZ genauer auf den Anwendungsfall (Leistung und Transienten) auszulegen. Trotzdem liegen die Standzeiten für stationär betriebene Verbrennungsmotoren höher. Die Erfahrungswerte pendeln sich hier bei bis zu 60.000 h für Verbrennungsmotoren in BHKWs ein, welche auch für Wasserstoffverbrennungsmotoren angenommen werden.

Wartungsintervalle sind bei stationären Anwendungen üblich. So müssen sowohl beim Verbrennungsmotor als auch bei der BZ Wartungen durchgeführt werden. Die Aufwände für Kosten und Zeit der jeweiligen Wartung hängen von den verwendeten Materialien (z.B. bei der Brennstoffzelle PEM oder AEL) und Auslegung der Komponenten ab. Grundsätzlich kann beim Verbrennungsmotor von geringeren Wartungskosten ausgegangen werden, da alle Komponenten in Massen produziert werden und die Verfügbarkeit entsprechend hoch ist. Durchschnittliche empfohlene Wartungsintervalle für BZ werden in [5] mit 2.000 bis 4.000 h angegeben. Die Wartungsintervalle sind äquivalent zu den heutigen Verbrennungsmotoren.

4.3 Kosten

Mit etwa 5.000 €/kW [5] Gesamtkosten des Systems ist eine Variante eines BHKWs mit einer Brennstoffzelle deutlich teurer als mit einem Wasserstoffverbrennungsmotor, welcher, ebenfalls inkl. Peripherie, bei ca. 1.100 €/kW liegt. Obwohl die Brennstoffzelle inzwischen kommerziell verfügbar ist und als technisch fortgeschritten gilt, werden bei den Kosten die spezifischen Probleme der Technologie bemerkbar. In den meisten Brennstoffzellentypen kommen Seltene Erden und teure Metalle zum Einsatz, welche in der Summe die Kosten für das Produkt deutlich steigern. Skaleneffekte und Weiterentwicklungen hin zu anderen Materialien können die Kosten drücken, ein Trend ist schon erkennbar. Es ist jedoch zu bezweifeln, ob dieser in kürzester Zeit gesteigert werden kann, um die BZ ohne Subventionen zu einem ernstzunehmenden massentauglichen Energiewandler zu führen.

5. Zusammenfassung

Wasserstoff hat gegenüber konventionellen Energieträgern für Verbrennungsmotoren den Vorteil, dass dieser nahezu emissionsfrei betrieben werden kann. Im Hinblick auf das Pariser Klimaabkommen und er Einhaltung der Klimaziele sowie zukünftiger CO₂-Vermeidung stellt der Wasserstoffmotor eine mehr als wirksame Alternative dar und hat im Vergleich zur Brennstoffzelle die beste CO₂-Bilanz über die Lebensdauer. Nicht nur in der Mobilität besteht Bedarf an emissionsarmen Antrieben, auch im Energiesektor werden diese immer stärker nachgefragt, in dem bislang vor allem Gas- und Dieselmotoren kleinere Strom- und Wärmekraftwerke antreiben.

Gegenstand der hier vorliegenden Arbeit war die Frage, inwiefern ein Wasserstoffmotor für den stationären Einsatz – beispielsweise als BHKW – eignet. Um diese Frage beantworten zu können, wurde eine Lambdavarisation durchgeführt und der Einfluss der Schwerpunktlage durchgeführt. Es zeigte sich, dass sowohl die Verstellung des Luftkraftstoffverhältnisses, als auch die Verstellung des Zündwinkels einen großen Einfluss auf das Emissionsverhalten von Stickoxiden haben. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass sich eine frühe Zündung positiv auf den Wirkungsgrad und die Verbrennung auswirkt. Bei einem stationären Betrieb des auf Wasserstoff umgebauten Deutz TCD 7,8 l sind bis zu 150 kW_{mech} und 196 kW_{th} bei einem effektiven Wirkungsgrad von > 42% möglich. Die thermische Leistung setzt sich dabei aus den einzelnen Wärmeströmen des Abgases, der Motorkühlung und der Ladeluftkühlung zusammen. Eine weitere Betrachtung der Rohemissionen hat gezeigt, dass die Grenzwerte der Euro V (Non-Road) in dem D2 Testzyklus um mindestens 77 % unterschritten werden, bei der Emission von CO und HC sogar um mehr als 99%. Ein Vergleich mit der Brennstoffzelle hat gezeigt, dass der mit Wasserstoff betriebene Verbrennungsmotor sowohl wirtschaftlicher, als auch nachhaltiger sein kann. Die beiden für stationäre Anwendungen wichtigen Punkte „Effizienz“ und „Wartung“ zeigten ähnliche Ergebnisse. Es ist in jedem spezifischen Anwendungsfall abzuwägen welche Technologie den Vorzug erhalten sollte. In jedem Fall führt der Einsatz von Wasserstoffmotoren nachweislich zu einer deutlichen lokalen Emissionsreduktion.

Abkürzungsverzeichnis

°KW n. OT	Grad Kurbelwinkel nach oberem Totpunkt
AEL	Alkalischer Elektrolyseur
AGR	Abgasrückführung
BHKW	Blockheizkraftwerk
BZ	Brennstoffzelle
CFD	Computational Fluid Dynamics
CO	Kohlenmonoxid

CO ₂	Kohlendioxid
COV	Coefficient of Variation, empirischer Variationskoeffizient
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
HC	Kohlenwasserstoffe
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LLK	Ladeluftkühler
MFB50	Kurbelwinkel, bei dem 50% des eingesetzten Brennstoffs in einem Zyklus verbrannt ist
MPI	Multi Point Injection
NO _x	Stickoxide
ORC	Organic Rankine Cycle
OT	Oberer Totpunkt
PEM	Proton Exchange Membran
PFI	Saugrohreinblasung
PN	Particle number
SCR	Selektive catalytic Reduction
η_{eff}	Wirkungsgrad
λ	Luftkraftstoffverhältnis

Literaturverzeichnis

- [1] Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik - Erzeugung, Speicherung, Anwendung. s.l. (Manfred Klell, Helmut Eichseder, Alexander Trattner): SpringerVieweg, 2018.
- [2] DIN 51624, 2008-02. Automotive fuels - Compressed natural gas - Requirements and test methods. s.l. Beuth Verlag
- [3] Sustainable Mobility with Hydrogen - The Combustion Engine gets 'Green': Description of the Simulative Development of an innovative Hydrogen Propulsion (S.C. Zeinlinga, D.T. Koch, H. Rottengruber, F.W. Prümm, et al.): 12. Tagung Gasfahrzeuge: Eine nachhaltige Alternative. 2017.
- [4] Niedrigstmissionskonzept für einen wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotor (Fouquet, Marcel Christian Thomas): Technische Universität München : Dissertation, 2012.
- [5] Catalog of CHP Technologies, Section 6. Technology, Characterization - Fuel Cells. s.l. (Ken Darrow, Rick Tidball, James Wang, Anne Hampson): U.S. Environmental Protection Agency, Combined Heat and Power Partnership, 2015.
- [6] Stationäre Brennstoffzellen. BWK (Wendt, Prof. a.D. Dr. Hartmut): 2006, Vol. 58, 10, pp. 46 - 50.