

SCHRIFTENREIHE DER FAKULTÄT FÜR TECHNIK DER DUALEN HOCHSCHULE BADEN-WÜRTTEMBERG RAVENSBURG

2017/02

**PIV- und CFD-Untersuchungen als Methoden zur
Brennverfahrensentwicklung von BHKW-Gasmotoren**

Prof. Dr.-Ing. Martin Freitag, Dipl.-Ing. Mathias Frenzel,
Dipl.-Ing. Peter Harder, M.Eng. Martin Lichtmes

**SCHRIFTENREIHE DER FAKULTÄT FÜR TECHNIK
DER DUALEN HOCHSCHULE BADEN-WÜRTTEMBERG
RAVENSBURG**

2017/02

PIV- und CFD-Untersuchungen als Methoden zur
Brennverfahrensentwicklung von BHKW-Gasmotoren

Prof. Dr.-Ing. Martin Freitag, Dipl.-Ing. Mathias Frenzel,
Dipl.-Ing. Peter Harder, M.Eng. Martin Lichtmes

IMPRESSUM

Schriftenreihe der Fakultät für Technik
der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Ravensburg

Herausgeber

Prof. Dr. Heinz-Leo Dudek
Prorektor und Dekan der Fakultät für Technik

Duale Hochschule Baden-Württemberg Ravensburg

Baden-Wuerttemberg Cooperative State University
Marienplatz 2
88212 Ravensburg
Deutschland

<http://www.ravensburg.dhbw.de>

2017/02, Dezember 2017

ISBN 978-3-945557-04-4

ISSN 2199-238X

DOI 10.12903/DHBW_RV_FN_02_2017_FREITAG_FRENZEL_HARDER_LICHTMES

© Freitag, Frenzel, Harder, Lichtmes, 2017
Alle Rechte vorbehalten.

Der Inhalt der Publikation wurde mit größter Sorgfalt erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität des Inhalts übernimmt der Herausgeber keine Haftung.

Druck und Verarbeitung

Gestaltung

Nicole Stuepp
DHBW Ravensburg
Marienplatz 2, 88212 Ravensburg

Druck

Frick Kreativbüro & Onlinedruckerei e.K.
Brühlstraße 6
86381 Krumbach

PIV- und CFD-Untersuchungen als Methoden zur Brennverfahrensentwicklung von BHKW-Gasmotoren

Prof. Dr.-Ing. Martin Freitag, Dipl.-Ing. Mathias Frenzel,
Dipl.-Ing. Peter Harder, M.Eng. Martin Lichtmes

EINFÜHRUNG

Vor einigen Jahren beinhaltete jede Einleitung zu Verbrennungsmotoren-Fachartikeln immer die Aussage, dass Verbrennungsmotoren das Rückgrat des Transportwesens und zu einem gewissen Teil auch der Erzeugung von Elektroenergie darstellen. Das muss man heute und für die Zukunft relativieren. Diesel- und Ottomotoren werden ihre Dominanz als Antriebe für Personenkraftwagen verlieren. Auch (Erd-)Gasmotoren werden sich (gegenüber mit flüssigen Kraftstoffen betriebenen Motoren) aufgrund

- der schlechteren Handhabbarkeit des Erdgases (Tankvorgang, Speicher-Druckbehälter) und
- des geringen spezifischen Energiegehalts des Brennstoffes Erdgas (auch komprimiert) und
- der dadurch vergleichsweise geringen Reichweite von Erdgas-Fahrzeugen

für Anwendungen im Automotive-Segment des Transportwesens wahrscheinlich nicht durchsetzen. Das gleiche gilt in mobilen Anwendungen für Wasserstoff als Brenngas und auch sehr wahrscheinlich für wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen.

Bei stationär eingesetzten Gasmotoren, bei denen der Brennstoff über das Gas-Rohrleitungsnetz zum Ort der Nutzung geführt wird, spielen die oben genannten Nachteile eine untergeordnete Rolle.

Im Gegenteil: Stationäre Gasmotoren, in der Regel ausgeführt als aufgeladene Magergemisch-Gas-Ottomotoren, bieten in der BHKW-Anwendung¹ entscheidende Vorteile gegenüber der konventionellen zentralen Stromerzeugung in Großkraftwerken und sind ein geeignetes Mittel, den Energiebedarf der Wirtschaft mit geringeren Emissionen des Treibhausgases Kohlendioxid zu decken.

¹ BHKW = Block-Heizkraftwerk, Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage. Verbrennungsmotor und Generator sowie Rückkühlanlage und Komponenten zur Aufladung, Luft- und Abgasführung befinden sich kompakt auf einem Rahmen. Kleinere Anlagen sind haben Abmessungen, dass sie in Normcontainer passen.

1 GASMOTOREN ALS KERNKOMPONENTE VON BLOCKHEIZKRAFTWERKEN

Gasmotoren sind Verbrennungskraftmaschinen. Sie wandeln die chemische Energie von Erdgas (auch Biogas und Deponiegas oder Methan, das CO₂-neutral mit Hilfe eines so genannten Power-to-Gas- Prozesses erzeugt wird) durch einen Verbrennungsprozess in mechanische Energie um. Diese mechanische Energie wird von einem Generator in elektrische Energie umgewandelt und in das öffentliche Netz eingespeist. Das Besondere der Kraft-Wärme-Kopplung im BHKW ist, dass die Abwärme des Motors (Abgas- und Kühlwasserwärme) zur Beheizung von Wohnanlagen, Gewächshäusern, Schwimmbädern oder für industrielle Prozesse genutzt wird. Gut 40 % des Energieinhalts des Brennstoffes wird in Elektroenergie, fast der gesamte Rest in Wärmeenergie umgewandelt. Je nach Größe der Anlage liegt der nicht nutzbare Anteil der Energie des Brennstoffes (Verluste) bei 5...10%; der Ausnutzungsgrad des Brenngases damit bei 90...95% [1]. Die Wirkungsgrade bei der Stromerzeugung mit modernen Großkraftwerken liegen dagegen bei 60 %, bei älteren Kohlekraftwerken bei nur etwa 30 %. Mit dem schlechten Wirkungsgrad dieser Großanlagen geht ein hoher CO₂-Ausstoß einher, speziell bei Braunkohlekraftwerken. Bei zentralen Großkraftwerken ist die Kraft-Wärme-Kopplung kaum möglich bzw. unrentabel. Das bedeutet, dass der Wärmebedarf von Haushalten und Industrie durch Heizungen gedeckt wird, was beim Verbrennen fossiler Brennstoffe weitere CO₂-Emissionen verursacht.

Strom lässt sich mit Blockheizkraftwerken mit einem geringen CO₂-Ausstoß erzeugen, weil der Wirkungsgrad der eingesetzten Gasmotoren vergleichsweise hoch ist. Durch die Nutzung der Abwärme in BHKW gibt es keine weiteren CO₂-Emissionen, da für die Wärmegewinnung keine zusätzlichen Heizungen erforderlich sind, siehe Abbildung 1.

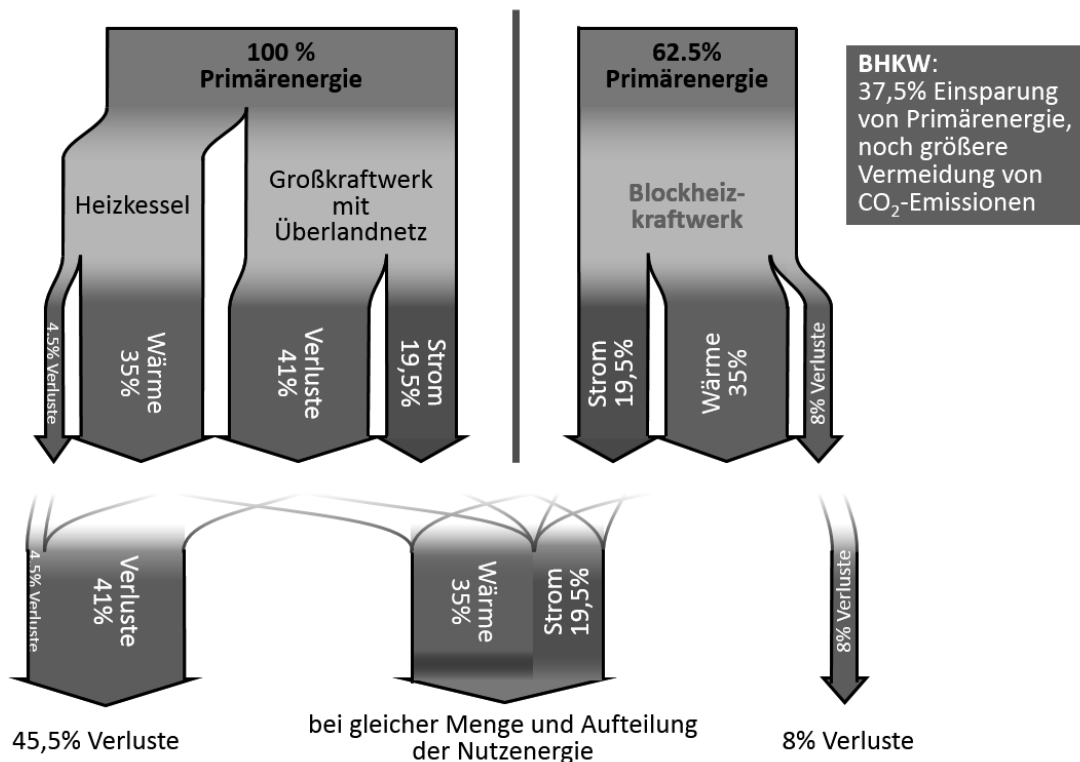


Abbildung 1: Vergleich des Primärenergieaufwandes für die Erzeugung der gleichen Nutzenergie; links zentrales Großkraftwerk, rechts dezentrales Blockheizkraftwerk

Blockheizkraftwerke werden an den Orten aufgestellt, an denen unmittelbar die Elektro- und die Wärmeenergie benötigt werden, so zum Beispiel auf dem Campus Fallenbrunnen in Friedrichshafen. Diese sogenannte dezentrale Energieerzeugung hat den Vorteil, dass die nicht zu unterschätzenden Leitungsverluste beim Transport von Strom (oder von Wärme) von zentralen Großkraftwerken zum Verbraucher nahezu auf null reduziert werden².

Wir sehen also, dass die Kraft-Wärme-Kopplung mit Gasmotoren zumindest eine umweltfreundliche Übergangstechnik darstellt. Bei der Nutzung von Power-to-Gas-Verfahren zum Beispiel an Windanlagen im Norden Deutschlands, lässt sich die Nutzenergie sogar CO₂-neutral darstellen. Dabei wird aus Strom, der mit Windkraftanlagen (Solarstrom wäre ebenso geeignet) gewonnen wird, über Elektrolyse und chemische Syntheseprozesse Methan hergestellt, das in das Gasnetz eingespeist wird. Es kann auf diese Weise sogar die vorhandene Infrastruktur wie Gasleitungen und Kavernenspeicher genutzt werden, was technischen und finanziellen Aufwand sowie langwierige Genehmigungsverfahren erübrigen würde. Damit ist diese Technik eine attraktive Alternative gegenüber Stromautobahnen für den Transport und verschiedene

² Diese Leitungsverluste sind übrigens bei der Kabelführung unter Wasser oder unterirdisch deutlich größer als bei Kabeln in der Luft (an Strommasten). Bei einer Leitung des Stroms in Kabeln unter Wasser (off-shore-Windanlagen) sind die Verluste bei Leitungslängen von wenigen zehn Kilometern nicht mehr tolerierbar. Ähnlich hohe Verluste treten auf, wenn der Strom 200...300 Kilometer durch Freileitungen transportiert wird. [2]

Batteriesysteme für die Speicherung der Elektroenergie. Ganz nebenbei würde die breite Anwendung der Power-to-Gas-Technik die Abhängigkeit der Wirtschaft von Erdgasimporten reduzieren.

Vor diesem Hintergrund sind die Weiterentwicklung und die Optimierung von Gasmotoren durchaus sinnvoll. Im städtischen Nahverkehr, für Pendler und für Ballungsgebiete sowie für Fahrzeuge, die im Depotbetrieb eingesetzt werden (Busse, Postfahrzeuge, Müllfahrzeuge) steht allerdings der Verbrennungsmotor zu Recht vor dem Aus. Die Schadstoffemissionen und der CO₂-Ausstoß dieser mobilen Einheiten sind durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen vermeidbar, wenn die verwendete Energie CO₂-neutral erzeugt wird.

Man darf also nicht alle Verbrennungsmotoren „über einen Kamm scheren“ und verteufeln. Gegenüber den in Automobilen eingesetzten Diesel- und Benzin-Ottomotoren besitzt der aufgeladene Magergemisch-Gas-Ottomotor einen besseren Wirkungsgrad und einen geringeren Schadstoffausstoß. Dies ist im Brennverfahren und im Brennstoff Methan (überwiegende Bestandteil von Erdgas) begründet.

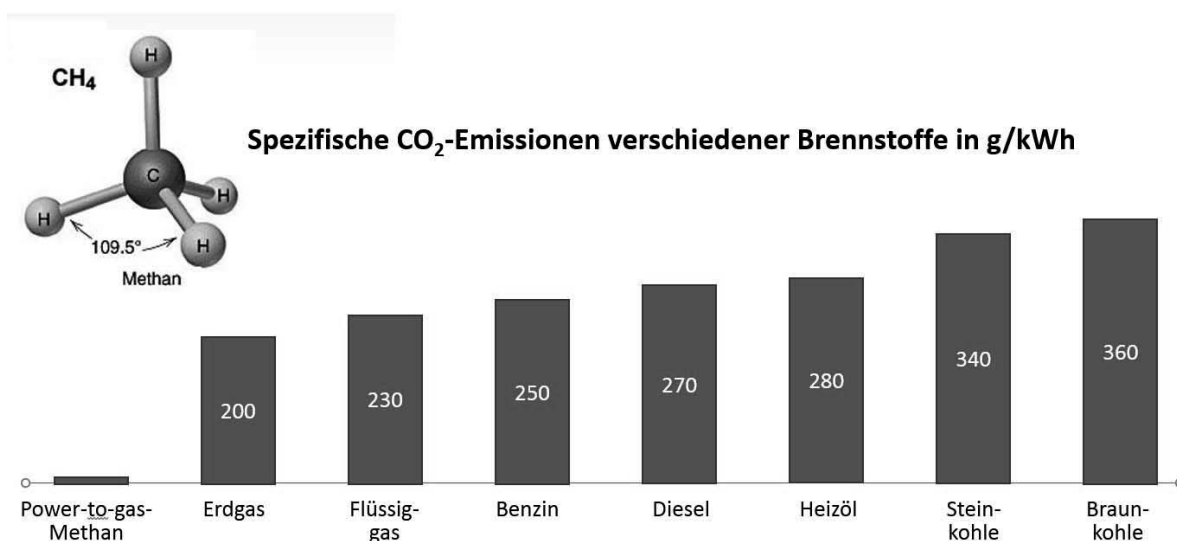


Abbildung 2: Vergleich der spezifischen CO₂-Emissionen verschiedener üblicher Brennstoffe nach [3]

Die Abbildung 2 zeigt, dass bei der Verbrennung von Methan pro Kohlenstoffatom die Energie von vier Wasserstoffverbindungen freigesetzt wird. Dieses Verhältnis ist bei allen Kohlenwasserstoffen mit größerer Anzahl von Kohlenstoffatomen ungünstiger. Für Kohle, wie sie in Großkraftwerken verbrannt wird, ist es am ungünstigsten.

Prinzipbedingt stoßen Ottomotoren immer einen - wenn auch sehr kleinen - Teil unverbrannten Brennstoffs in das Abgas (direkt nach Zylinder) aus. Bei Benzin-Ottomotoren ist das sogar beabsichtigt. Die unverbrannten Kohlenwasserstoffe werden

genutzt, um im geregelten Katalysator die Stickoxide, die beim Verbrennungsprozess entstanden sind, zu reduzieren. Der Gas-Ottomotor wird im Magergemisch-Betrieb gefahren, wodurch nur in geringem Maße Stickoxide entstehen. Aber die unverbrannten Anteile des Brennstoffes - hier Methan - sind auch im Abgas dieses Otto-Motors zu finden.

1.1 BEDEUTUNG DER REDUZIERUNG DER METHANEMISSIONEN VON GASMOTOREN

Studien [4] sagen aus, dass Methan ein 32fach wirksames Treibhausgas als CO₂ ist. Methan entsteht in sehr großen Mengen auf natürlichem Wege z.B.

- durch Reisanbau weltweit und (durch die globale Klimaerwärmung zunehmend) in der Tundra in Moorgebieten (Faulgase)
- bei der Rinderzucht
- vielleicht in naher Zukunft durch die Erhöhung der Wassertemperatur in den Ozeanen auch durch Zerfall von Methanhydrid.

Es ist damit zu rechnen, dass die globalen Methanfreisetzungen mit der zunehmenden Klimaerwärmung größer werden. Ein gefährlicher, sich selbst verstärkender Prozess (positive Rückkopplung), der bereits in vollem Gange ist!

Bei der Nutzung von Methan zur Energieerzeugung ist immer eine möglichst vollständige Verbrennung anzustreben. In der Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzte stationäre Gas-Otto-Motoren haben zurzeit einen sogenannten „Methanschlupf“ von unter 1% bis ca. 3% [5]. Das bedeutet, dass 1...3% des zugeführten Methans im Abgas in die Atmosphäre freigesetzt und als Treibhausgas wirksam wird.

Verständlich, dass eine Zielstellung der Optimierung des Verbrennungsprozesses in Gasmotoren die Reduzierung dieses Methanschlupfes ist.

Im aufgeladenen Magergemisch-Gas-Ottomotor wird das Brenngas Methan möglichst homogen mit Luft vermischt. Durch eine Zündkerze wird die Verbrennung initiiert und eine Flammenfront durchläuft den Brennraum. Diese Flammenfront erreicht jedoch nicht alle Bereiche des Brennraums. Man spricht von einem „Absterben“ der Flamme. Dies tritt insbesondere in engen Spalten (zum Beispiel zwischen Kolben und Zylinderlaufbuchse) und Hohlräumen (in der Nähe der Kerze, der Ventile oder z.B. in einer Dekompressionsbohrung) auf. Methan verbrennt im Vergleich zu Benzin träge. Zudem herrscht ein Luftüberschuss

(Verbrennungsluftverhältnisse³ von 1, 8 bis über 2), was den Ausstoß von Stickoxiden minimiert, aber eben auch die Methanverbrennung verschlechtert.

Auf der 5. Internationalen Gasmotoren Konferenz in Dessau 2009 wurde die Idee einer speziellen Schichtladung vorgetragen, die diese Nachteile des Gasmotors beseitigen soll [6]. Dabei kommt der Gestaltung der Ladungsbewegung während des Einlassvorganges und in der Endphase der Kompression besondere Bedeutung zu.

Dass einströmende Brenngas Methan wird (im Gegensatz zum herkömmlichen (Gas-)Ottomotor) nicht homogen mit der Luft vermischt, sondern in der Mitte des Zylinders konzentriert, durch eine Drallströmung stabilisiert und erst in der Endphase der Kompression in einer Mulde im Kolben gleichmäßig verteilt und gezündet. In dieser abgeschlossenen Mulde kann sich in dem mageren, dann homogenen Gemisch die Flammfront ausbreiten. Es gibt keine Zonen in der Kolbenmulde, in denen die Flamme „abstirbt“ und eine nahezu vollständige Verbrennung des Methans ist gewährleistet.

In einem Forschungsvorhaben gemeinsam mit der Vorentwicklung der MTU Friedrichshafen GmbH und der MTU Reman Technologies GmbH in Magdeburg (beide sind duale Partner der DHBW Ravensburg) wird diese Idee aufgegriffen. Eine Anfangsfinanzierung erfolgte durch das MWK des Landes Baden-Württemberg im Rahmen der Förderlinie der DHBW. Die Stelle eines Doktoranden, der auf dem Campus Friedrichshafen an dem Thema arbeitet, wurde im Rahmen des Innovationsprogramms der DHBW kofinanziert.

Wichtige Voraussetzungen für den Erfolg der Brennverfahrensentwicklung sind

- die Kenntnis und
- die gezielte Beeinflussung

der Ladungsbewegung im Brennraum. Mithilfe von experimentellen Untersuchungen und CFD-Simulationen⁴ ist die zielgerichtete Entwicklung des neuen Brennverfahrens möglich.

Anwendungsoptimierungen der PIV-Messtechnik⁵ werden zurzeit in Magdeburg bei MTU Reman Technologies GmbH in Magdeburg durchgeführt.

³ Das Verbrennungsluftverhältnis ist das Verhältnis der für die Verbrennung vorhandenen Luftmenge zur für die (vollständige) Verbrennung notwendigen Luftmenge. Bei Benzin-Otto-Motoren ist dieses Verhältnis 1, man spricht von einem stöchiometrischen Gemisch.

⁴ CFD = Computational Fluid Dynamics; Simulation von Strömungsvorgängen mit Hilfe von komplexen Simulationsprogrammen. Im vorliegenden Fall wird OpenFoam verwendet.

⁵ PIV = Particle Image Velocimetry; mit Hilfe von Tracer-Material (kleinste Partikel, die der Strömung folgen) werden im Laser-Lichtschnitt Strömungsvorgänge sichtbar gemacht und vermessen, experimentelle Methode.

Da bei Schichtladungs-Verfahren die Ladung nicht homogen ist, muss der Prüfstand gleichzeitig die Möglichkeit bieten, zwischen Luft und einströmendem Brenngas in der experimentellen Simulation zu unterscheiden. In diesem Zusammenhang ist eine definierte Verteilung des so genannten Seedings beim PIV-Verfahren erforderlich.

In der MTU Reman Technologies GmbH in Magdeburg werden Gasmotoren, die eine hohe Betriebsstundenzahl und damit einen gewissen Verschleiß aufweisen, demontiert und aufbereitet und danach kostengünstig und ressourcenschonend einer weiteren (Wieder-)Verwendung zugeführt. Im Rahmen dieses sogenannten Remanufacturing-Prozesses könnten in Zukunft Gasmotoren lediglich durch Tausch der Zylinderköpfe und der Kolben zu Gasmotoren mit niedrigem Methanschlupf umgerüstet werden.

2 EXPERIMENTELLE UND NUMERISCHE METHODEN ZUR BETRACHTUNG VON STRÖMUNGSFELDERN

Um das derzeit angewandte homogene Magergemisch-Brennverfahren in ein inhomogenes Magerbrennverfahren mit reduzierten Methanschlupf umzugestalten, muss zunächst der Ist-Zustand der Zylinderinnenströmung erfasst werden. Das bedeutet, es muss festgestellt werden, wie die verschiedenen Strömungsmechanismen der Ladungsbewegung zusammenwirken und welche Einflüsse (bspw. Geometrie der Einlasskanäle o.ä.) sich besonders stark bemerkbar machen. Dabei kommen, wie bereits erwähnt, die CFD sowie die PIV zum Einsatz. Beide Verfahren liefern bei adäquater Anwendung Bilder von vollständigen Strömungsfeldern in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung, jedoch sind beide Herangehensweisen grundsätzlich unterschiedlicher Natur.

Während der experimentelle Ansatz, die PIV, das Strömungsgeschehen mittels aufwendiger Laser- und Kameratechnik direkt misst, wird bei der CFD die Zylinderinnenströmung in Form eines komplexen mathematischen Modells abstrahiert und anschließend näherungsweise („numerisch“) berechnet. Aufgrund der ungleichen Funktionsweisen von PIV und CFD drängt sich die enge Verknüpfung beider Verfahren geradezu auf. So können durch eine geschickte Zusammenführung ihre jeweiligen Stärken optimal kombiniert bzw. einige ihrer Schwächen gegenseitig kompensiert werden. Im Idealfall liefern PIV und CFD weitestgehend übereinstimmende Ergebnisse. Im Vorfeld der eigentlichen Entwicklungen stehen Optimierungen bezüglich der Messabläufe und -routinen sowie die Erzeugung der für die CFD notwendigen, mathematisch-physikalischen Modelle.

2.1 PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY (PIV)

Die PIV ist ein laserbasiertes Feldmessverfahren für fluidische Strömungen. D.h. sie erfasst nicht, wie viele der konventionellen Strömungsmessverfahren (Hitzdrahtsonde, Laserdoppleranemometrie, etc.), einzelne Punkte im Raum, sondern gleich ganze Ebenen. Das Verfahren ist schematisch in Abbildung 3 gezeigt. Um eine Strömung mittels PIV messbar zu machen, wird ihr ein Tracer-Material, das sog. Seeding, beigemischt. Das Seeding kann je nach Versuch sehr unterschiedlich beschaffen sein. Im vorliegenden Fall wird ein Nebelfluid, welches man in dieser Form bspw. auch aus Diskotheken kennt, verdampft und der Strömung beigemischt. Es hat die Eigenschaften, dass es Luftströmungen i.d.R. sehr genau folgen kann, ohne nennenswert auf diese zurückzuwirken und ist gleichzeitig recht gut mit Laser und Kamera zu beobachten.

Im Strömungsfeld muss nun zunächst die Messebene festgelegt sein, in der die Strömung zu erfassen ist. Auf diese wird das sog. Laser-Sheet (Lichtschnitt) ausgerichtet. Das Sheet ist nichts anderes als der durch eine entsprechende Optik flach aufgefächerte Laserstrahl. Feuert der Laser nun einzelne Pulse ab, so leuchtet das Seeding im Sheet, also in der Messebene, auf und kann von der Kamera erfasst werden. Liegen die Zeitpunkte der Pulse kurz hintereinander, so ist es mittels geeigneter Software möglich, die Bewegung der Partikel über der Messzeit und somit deren Geschwindigkeit über der gesamten Messebene zu ermitteln. Die PIV gibt in erster Instanz Auskunft über die Strömungsgeschwindigkeiten. Verschiedene statistische Analysen ermöglichen aber darüber hinaus auch direkte Aussagen zum Turbulenzgeschehen, welches bspw. für die Gemischbildung im Innern des Zylinders von fundamentaler Bedeutung ist. Wie bei jedem Experiment, sind die Ergebnisse aber natürlich immer nur so gut bzw. vertrauenswürdig, wie es die Genauigkeit der Messtechnik und -ausführung zulässt.

Die PIV verlangt aufgrund ihrer Funktionsweise daher recht ausgeklügelte Prüfstandskonzepte, welche sich von denen für die o.g. konvektionellen Verfahren bspw. durch eine notwendige optische Zugänglichkeit (z.B. transparenter Zylinder) stark unterscheiden. Ein Beispiel für einen derartigen Prüfstand wird nachfolgend vorgestellt. Zum Einsatz kommt hier ein 2D-PIV-System, welches sich zur ebenen Vermessung von Strömungen eignet. Die PIV ist nach dieser Maßgabe nur in der Lage, die beiden Geschwindigkeitskomponenten aufzuzeichnen, die genau in der Messebene (tangential) verlaufen.

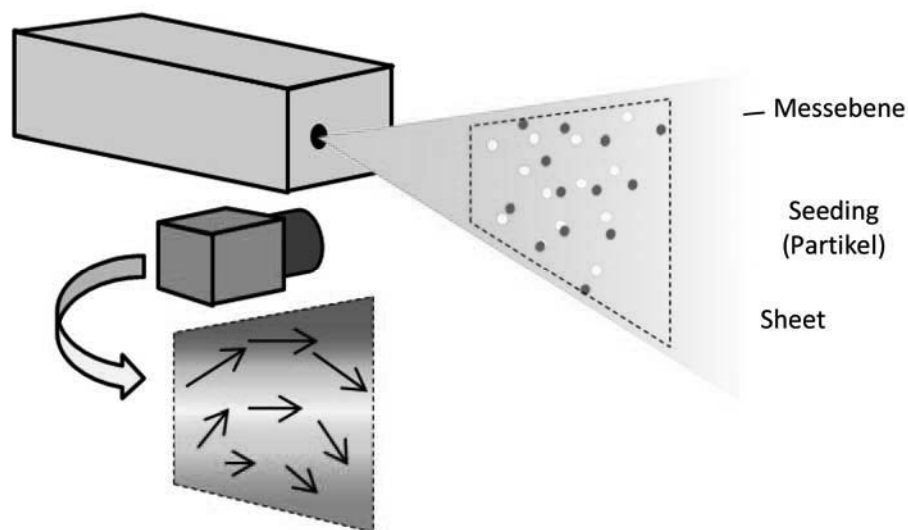


Abbildung 3: Die PIV als Strömungsmessverfahren. Das Sheet macht die Partikel zu verschiedenen Zeitpunkten in der Messebene für die Kamera sichtbar. Aus den zeitversetzten Partikelpositionen (weiß: Partikel - erste Position, grau: gleiches Partikel in zweiter Position) errechnet eine spezielle Software das Geschwindigkeitsfeld in der Messebene.

2.2 COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)

In der CFD versucht man die in der Realität auftretenden Strömungen über mathematische Modelle am Rechner zu simulieren. Sie ermöglicht eine idealisierte und damit auch störungsfreiere Betrachtung von Strömungen als das Experiment. Allerdings führt dies dazu, dass diese „Störungsarmut“ der CFD-Modelle auch immer ein Stück weit zu Abweichungen von der physikalischen Realität führt. Die eigentliche Kunst der CFD ist eine geschickte Modellbildung, d.h. dass ein Problem genau auf die Aspekte reduziert wird, die auch wirklich für die Lösung relevant sind. Zur CFD muss die Geometrie des Zylinderinnern, die sog. „Strömungsdomäne“ mittels eines Gitters nachgebildet werden. Man nennt diesen zur Berechnung notwendigen Vorgang auch „Diskretisierung“, da das eigentlich zusammenhängende, kontinuierliche Strömungsfeld in viele diskrete Einzelteile (Gitterzellen) zerlegt wird. Die Gitterzellen bilden die eigentliche räumliche Berechnungsgrundlage, da auf ihnen die strömungsmechanischen Grundgleichungen (sog. Navier-Stokes-Gleichungen) gelöst werden. Das Gitter selbst verkörpert eine räumliche Annäherung an das exakte Brennluftvolumen und wird nun mit bestimmten Randbedingungen, wie Geschwindigkeiten, Drücken, Temperaturen usw. beaufschlagt.

Aus Gitter, Randbedingungen sowie weiteren physikalischen Modellen bspw. zur Thermodynamik oder Turbulenz wird die 3D-Zylinderinnenströmung berechnet, welche sich mit entsprechenden PIV-Daten vergleichen lässt. Eine solche CFD-Simulation ist beispielhaft in Abbildung 4 zu sehen.

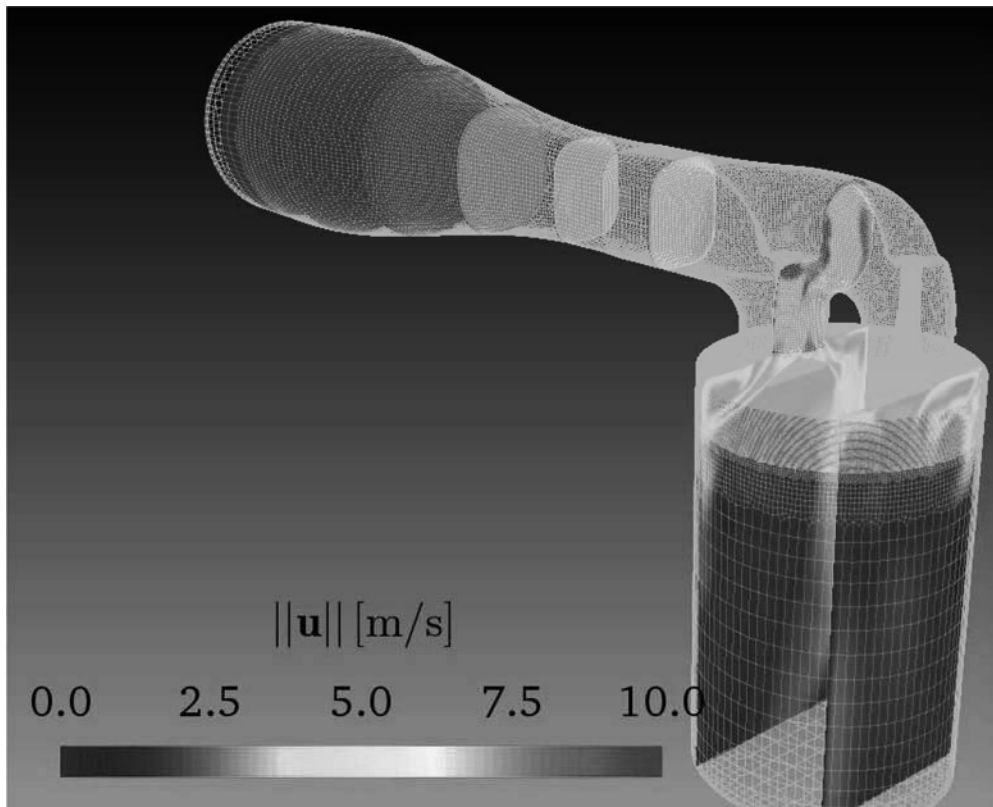


Abbildung 4: Eine 3D-CFD-Simulation (Ergebnis: Strömungsgeschwindigkeit). Die weißen Linien stellen das oberflächliche Gitter dar. CFD-Ergebnisse liegen i.d.R. mit hoher räumlicher Auflösung vor. Die CFD liefert modellhafte Lösungen, welche das Problem eher aus mathematischer Sicht beschreiben.

2.3 DAS ZUSAMMENSPIEL VON PIV UND CFD

Eine besondere Stärke der CFD gegenüber dem Experiment ist, dass es durch sie möglich ist, virtuelle Prototypen zu entwerfen und vergleichenden Simulationen zu unterziehen, ohne bereits in frühen Entwicklungsphasen auf eher ungenaue Schätzungen oder gar den Bau eines real ausgeführten Prototypen angewiesen zu sein. Dabei reduziert die CFD bei guter Anwendung nicht nur Entwicklungskosten, bspw. eines neuen Motorenkonzepts, deutlich. Sie gibt darüber hinaus auch einen sehr viel detaillierten Einblick in viele strömungstechnische Aspekte einer Motorenkonfiguration, als dies mit Experimenten vorstellbar ist.

Ein fundamentales Problem bei der CFD-basierten Simulation von Strömungen ist jedoch die Komplexität der sie beschreibenden Gleichungen. So ist es u.a. aufgrund der begrenzten Rechenkapazitäten heutiger Computer praktisch kaum vorstellbar, die Strömungsvorgänge in Verbrennungsmotoren vollständig mit einem einzigen Modell zu beschreiben. Man ist daher auf starke Vereinfachungen angewiesen, d.h. man muss das reale Problem (z.B. den Motorzyklus) in einfachere Teilprobleme zerlegen und weiter abstrahieren.

Im Gegensatz zur PIV, welche die reale Strömung schlicht genauso betrachtet, wie sie stattfindet, muss eine vergleichbare Strömung bei der CFD über eine gute Modellbildung künstlich erzeugt werden. Dies ist jedoch nur möglich, wenn bereits zum Zeitpunkt der Modellierung eine hinreichend gute Kenntnis des zu erwartenden Strömungsverhaltens gegeben ist. Damit wird bereits eine wichtige Schnittstelle zwischen PIV und CFD erkennbar. Die CFD ist sehr gut in der Prognose quasi beliebiger Strömungen. Das gilt allerdings nur unter der Voraussetzung, dass das zugrundeliegende Problem bereits zu weiten Teilen verstanden und in den ausgewählten CFD-Modellen adäquat beschrieben wurde. Die PIV liefert hingegen im Idealfall viele Aspekte dieses notwendigen Grundverständnisses über geeignete Experimente.

3 ERSTE ÜBERLEGUNGEN ZUR VISUALISIERUNG DER GEMISCHBILDUNG

Wie bereits kurz skizziert wurde, sind besonders Strömungsgeschwindigkeiten oder auch Temperatur- und Turbulenzentwicklung der Zylinderinnenströmung von Interesse. Die Kenntnis der reinen Luftströmung allein ist jedoch bei weitem nicht ausreichend, um verlässliche Aussagen zur Gemischbildungsdynamik im laufenden Motor zu treffen. Es muss u.a. auch das Mischungsverhalten des Kraftstoffes mit der Luft berücksichtigt werden. Sowohl die Numerik als auch das Experiment können zum Studium der Gemischbildung herangezogen werden. Während sich diese Problematik auf der numerischen Seite eher in der Modellbildung niederschlägt, ist die Betrachtung der Gemischbildung auf experimenteller fast immer mit einem erheblichen technischen Aufwand verbunden. So muss zur Betrachtung mehrphasiger Strömungen (bspw. Luft/Kraftstoff) i.d.R. zusätzlich die LIF (Laser-Induzierte Fluoreszenz) zur Anwendung kommen. Dieses Verfahren macht fluoreszierende Tracer in der Strömung erfassbar, wodurch u.a. Konzentrationsverteilungen sichtbar gemacht werden können. Als sehr nachteilig erweist sich jedoch, dass zur LIF nur wenige, oft gesundheitsschädliche und leicht entzündliche Tracerstoffe, bspw. Aceton oder Toluol, verwendbar sind. Zusätzlich ist in diesem Fall sogar ein UV-Laser sowie weitere Hardware vonnöten, wobei im Umgang mit UV-Strahlung verständlicherweise besondere Sicherheitsvorkehrungen einzuhalten sind.

Um derartige Schwierigkeiten zu umgehen, wird an der DHBW auch eine alternative Möglichkeit zur Sichtbarmachung einer simulierten Kraftstoffphase erforscht. Dazu soll lediglich die oben geschilderte PIV-Hardware zur Visualisierung genutzt werden, während die Mess- und Auswerteroutinen selbst erarbeitet werden müssen. Das Seeding dient dabei entweder als Kraftstoffimitat oder man kann versuchen, den Kraftstoff selbst mittels PIV-Hardware zu erfassen. Doch nicht nur die bloße Sichtbarmachung, auch die quantitative Bewertung der räumlichen Partikelverteilung sowie deren zeitliche Entwicklung stehen dabei im Fokus. Am Ende können aus derartigen Daten sogar dreidimensionale Partikelverteilungen rekonstruiert werden. Ergebnisse aus ersten Versuchsreihen zu dieser Methodik sind in Abbildung 5 zur Verdeutlichung des Arbeitsprinzips abgebildet. Hier werden die Seeding-Partikel explizit gezählt und so die mittlere Partikeldichte über einzelne Beobachtungsfenster (Gitterzellen) ermittelt. Neben Aussagen zu Partikelhäufigkeiten erlaubt dies auch die Bewertung bezüglich räumlicher und zeitlicher Homogenität.

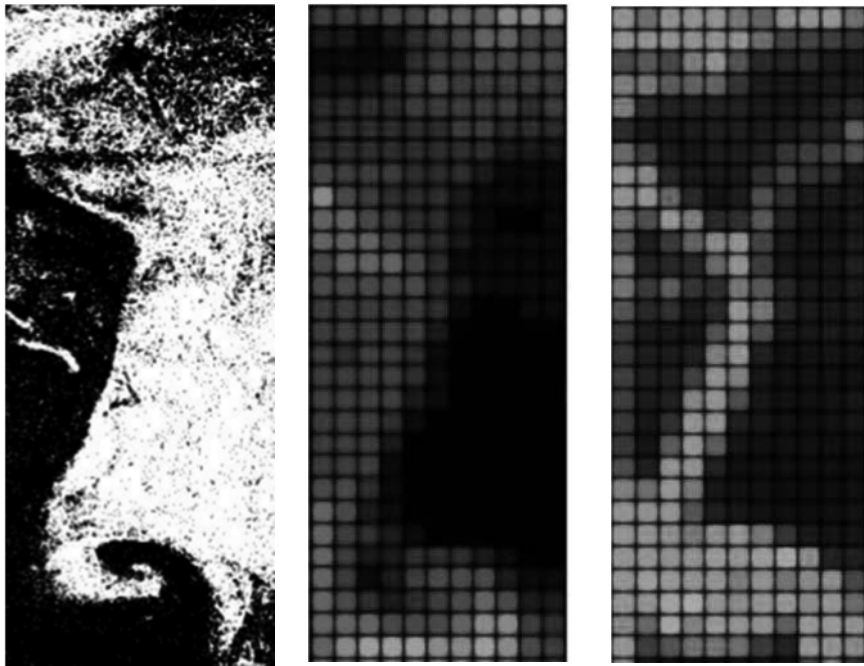


Abbildung 5: Zur Beurteilung von Partikelverteilungen.

Links: Eine Partikelverteilung, wie sie mit der oben beschriebenen PIV-Hardware erfasst wurde. Die Partikel sind schwarz dargestellt.

Mitte: Die zugehörige mittlere Partikeldichteverteilung. Das Gitter bestehend aus den Beobachtungsfenstern ist deutlich zu sehen.

Rechts: Das zugehörige Dichtegradientenfeld (lokale Änderungsrate der Partikeldichte)

4 UNTERSUCHUNGEN MIT EINEM STRÖMUNGSROHR ZUR ERTÜCHTIGUNG DES PIV-VERFAHRENS

4.1 AUFBAU DES STRÖMUNGSROHRES

Die erste Projektphase war der Entwicklung notwendiger Werkzeuge und Schnittstellen (Prüfstände, Software etc.) gewidmet. Mit diesem Handwerkszeug soll es danach möglich sein, die eigentlichen Analysen und Optimierungen der Ladungsbewegung im Zylinder des Gasmotors zu unternehmen.

Zu Voruntersuchungen sowie Machbarkeitsstudien betreffend der PIV- und CFD-Technik wurde ein Strömungsrohr entwickelt und gebaut.

Abbildung 6 zeigt den Versuchsaufbau mit Strömungsrohr in einer Prüfstandsbox der MTU Reman Technologies GmbH in Magdeburg. Im Hintergrund ist das horizontal angeordnete Strömungsrohr mit dem optisch zugänglichen Teil (Quarzglasrohr etwa in der Mitte) zwischen den dunkel eingefärbten Halterungen zu sehen. Im Vordergrund (hell grau) befindet sich der Laser, der auf den optisch zugänglichen Teil des Rohres ausgerichtet ist. Gut zu erkennen sind die Kühlleitungen für den Laser. Am linken Bildrand befindet sich das Equipment zur Steuerung des Lasers und zur Erfassung der Messdaten.

Abbildung 7 stellt in einem vergrößerten Ausschnitt den optisch zugänglichen Teil des Strömungsrohres dar. Die Grau-Färbung entsteht durch das Seeding im strömenden Medium.

Der Versuchsaufbau wird vervollständigt durch die Kamera, die in sehr kurzem zeitlichen Abstand die Bewegung des Seedings im Strömungsrohr erfasst. Sie ist in einem definierten Winkel auf das Strömungsrohr ausgerichtet. Von einem Strömungszustand werden eine ganze Reihe von Strömungsbildern aufgenommen, die von der Auswerteeinheit mit hoher Geschwindigkeit erfasst und verarbeitet (gemittelt) werden. Die Anordnung der Kamera ist in Abbildung 8 zu sehen. Die Kamera ist auf Traversen und Stativkopf um mehrere Achsen verfahr- und drehbar.

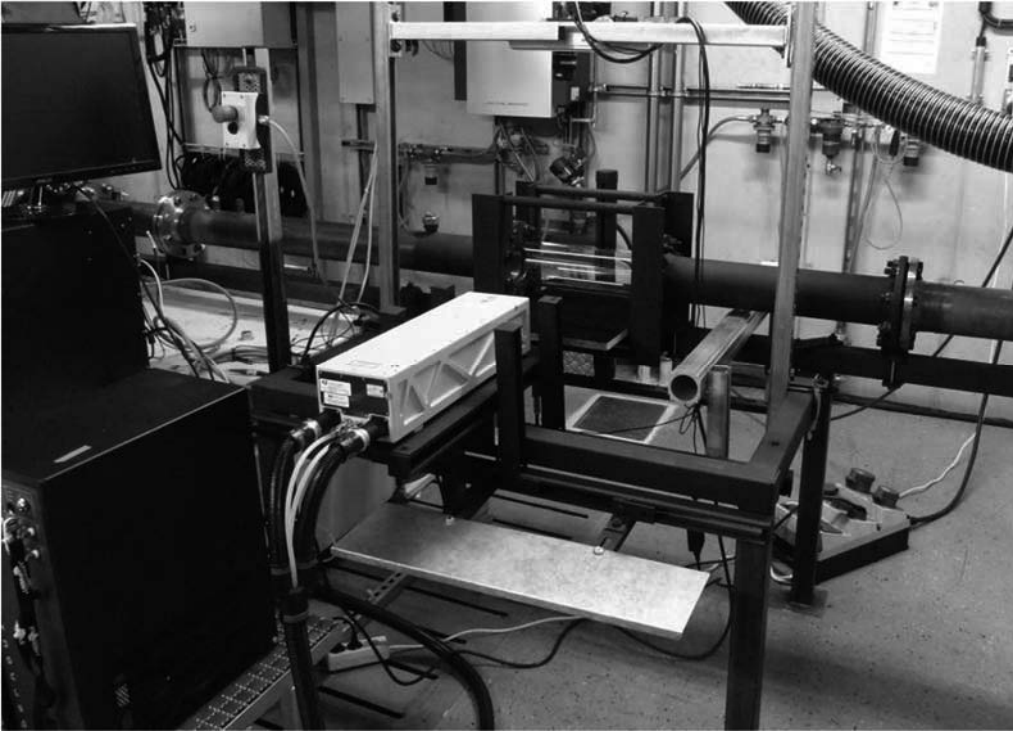


Abbildung 6: Versuchsaufbau mit Strömungsrohr in einer Prüfstandsbox der MTU Reman Technologies GmbH Magdeburg.

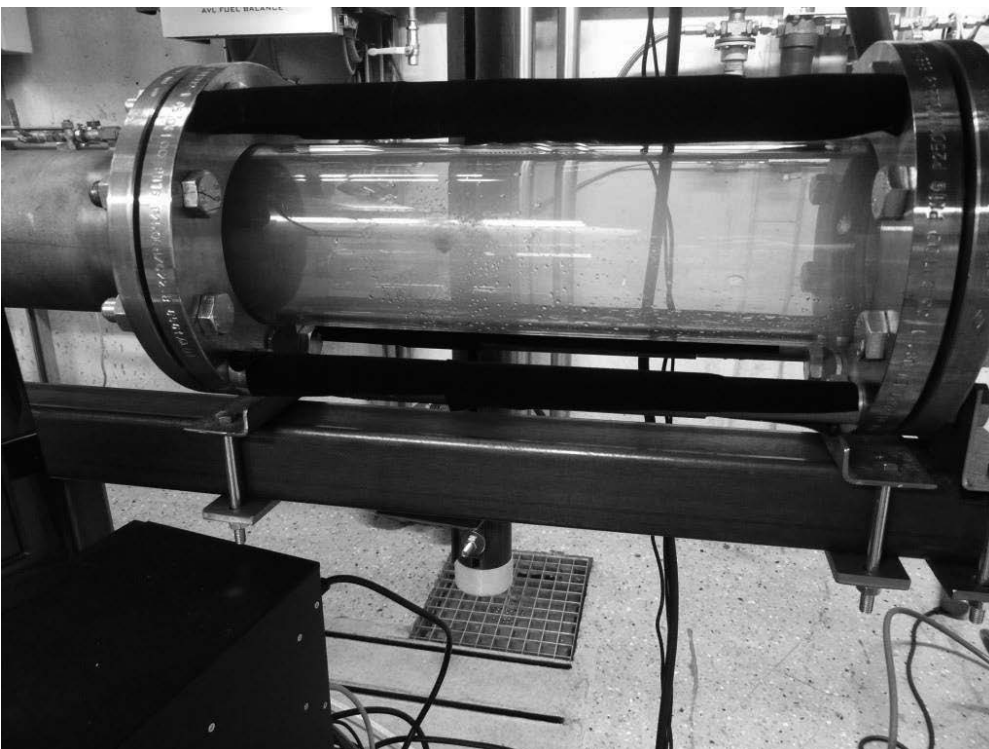


Abbildung 7: Optisch zugänglicher Teil des Strömungsrohres mit Seeding.

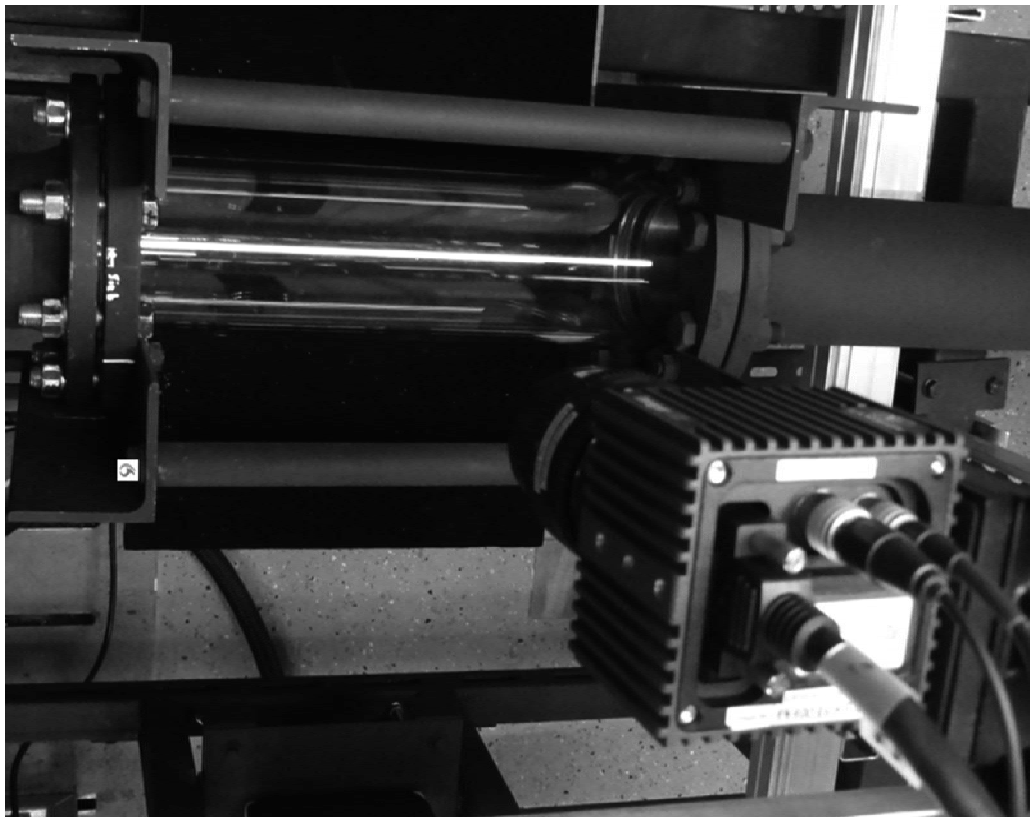


Abbildung 8: Anordnung der Kamera im Versuchsaufbau.

Der Laser feuert auf eine Winkeloptik, welche über eine Längstraverse, die parallel zum Strömungsrohr angeordnet ist, verschoben werden kann. Direkt am Ausgang der Winkeloptik ist die Lichtschnittoptik angebracht, welche den Laserstrahl in Form des gewünschten Sheets (Laserlichtschnittes) auffächert. Das Sheet leuchtet den optisch zugänglichen Teil des Strömungsrohres über dessen gesamten Querschnitt, quer zur Strömung, aus (siehe auch Abbildung 3). In der gleichen Weise wie die Winkeloptik bzw. dem Sheet kann die Kamera über eine Längstraverse entlang der Längsachse des Strömungsrohres verschoben werden. Die Relativpositionen von Lichtschnitt und Kamera bleiben dabei in jeder Messebene unverändert.

Die Kamera kann in diesem Versuchsaufbau auf beiden Seiten des Rohres angebracht werden. Diese Möglichkeit ist der Problematik geschuldet, dass die 2D-PIV (nur eine Kameraposition) dreidimensionale Strömungen nur bedingt abbilden kann. Wie bereits angesprochen, kann die PIV, so wie sie hier zum Einsatz kommt, nur exakt zweidimensionale Strömungen in der Messebene genau erfassen. Verwendet man nur einen Blickwinkel (Kameraposition), verfälschen Geschwindigkeiten, die normal zur Messebene verlaufen, die Ergebnisse sehr umfassend. Der so eingetragene Fehler kann weder in Betrag noch Richtung aus den Messungen herausgefiltert werden und führt damit zu unzulänglichen Messergebnissen. Wie beim binokularen Sehen wird daher ein zweiter Blickwinkel benötigt, um die Information der ebenen-normalen Geschwindigkeiten richtig

zu interpretieren. Da die zu untersuchenden Strömungen hochgradig turbulent sind, unterscheiden sie sich stark über der Zeit. D.h. wiederum, um das momentane 3D-Strömungsgeschehen korrekt einzufangen, wird eine zweite Kamera benötigt, damit die Geschwindigkeiten zu ein und demselben Zeitpunkt aus zwei Blickwinkeln gemessen werden können. Durch die Verarbeitung gemittelter Abbildung der Strömungsstrukturen ist es allerdings möglich, den stationären Anteil der Strömung in verschiedenen Positionen entlang der Längsachse des Strömungsrohres dreidimensional zu erfassen und entsprechende Aussagen über die Strömung zu treffen.

4.2 ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNGEN AM STRÖMUNGSROHR

Die Untersuchungen am Strömungsrohr haben einige Erkenntnisse über das PIV-Verfahren geliefert, die für dessen spätere Anwendung von großer Bedeutung sind.

Das wohl wichtigste Ergebnis ist, dass sich eine kontinuierliche, gleichmäßig mit Seeding versetzte Strömung erzeugen lässt. Der thermodynamische Zustand dieser seedingbehafteten Strömung (statischer Druck und Temperatur) kann so eingestellt werden, dass er von den atmosphärischen Bedingungen deutlich abweicht. Das ist für spätere Untersuchungen wichtig.

Andererseits haben die Untersuchungen aufgezeigt, wie empfindlich das Verfahren ist. Es sind unter allen Umständen Reflexionen, die durch Prüfstandaufbauten und -komponenten erzeugt und von der Kamera erfasst werden, zu vermeiden. Derartige Reflexionen stören die aufgenommenen Bilder und erschweren die Interpretation der Ergebnisse drastisch. In ähnlicher Weise wird die Auswertbarkeit der Ergebnisse durch zu hohe oder zu geringe Seeding-Konzentrationen beeinträchtigt. Eine Modifikation der Laserleistung kann hier teilweise Abhilfe schaffen. Besser ist es, Maßnahmen auf dem Prüfstand (z.B. reflexionsfreie Schwärzung der Komponenten) und bei der Seeding-Zufuhr zu ergreifen, um diese Störungen, die sich direkt auf den aufgenommenen Bildern widerspiegeln, auszuschließen. Die Strömungsbilder, die die Quelle für die Auswertung darstellen, müssen möglichst fehlerfrei sein.

Es entstehen jedoch auch Fehler bei der Auswertung optisch einwandfreier Bilder, die durch eine ungenaue Ausrichtung von Kamera und Laser bedingt sind. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, sind sehr genaue Einstellmöglichkeiten hinsichtlich der Positionierung und Ausrichtung von Kamera und Laser erforderlich. Hier spielen die verschiebbaren Komponenten der Messanlage (Laser und Kamera) und deren Aufnahmen und die weiter oben beschriebenen Traversen eine große Rolle. Zudem muss die Konstruktion steif genug sein, um Verformungen durch das Gewicht insbesondere des Lasers zu vermeiden.

Es hat sich herausgestellt, dass die Messungen auf dem Prüfstand vergleichsweise schnell durchgeführt werden können, dass aber die Auswertung sehr langwierig ist. Um verlässliche Aussagen über den stationären Anteil der Strömung zu treffen, muss eine größere Anzahl von Aufnahmen gemittelt werden. Der Bedarf an Rechenzeit und Rechnerleistung ist erheblich, insbesondere wenn zu dieser Mittelung noch Berechnungen zur Auswertung von Aufnahmen aus verschiedenen Winkeln hinzukommen.

In Hinblick auf die aufwändigen Auswertungen ist eine exakte Versuchsplanung erforderlich, die Voraussetzung für effiziente PIV-Untersuchungen ist.

In der praktischen Anwendung des PIV-Verfahrens hat sich gezeigt, dass auch vermeintlich kleine Änderungen am Prüfstands Aufbau deutlich nachweisbare Auswirkungen auf die Strömung (im optischen zugänglichen Teil des Rohres) haben. Umlenkungen der Strömung vor dem Eintritt über Strömungsrohr wirken sich auf das gemessene Strömungsprofil aus, auch wenn sich die Umlenkung in einiger Entfernung von der Messstelle befindet. Das ist unbedingt zu berücksichtigen, wenn für strömungstechnische Untersuchungen reproduzierbare Randbedingungen - z.B. ein exakt rotationssymmetrisches Strömungsprofil - benötigt wird.

Die Anwendung der Lasertechnik erfordert auch im Blick auf Sicherheitsmaßnahmen signifikante Umgestaltungen an Prüfstandsboxen, die normalerweise für Untersuchungen an Verbrennungsmotoren verwendet werden. Es muss abgesichert werden, dass beim Lesen Betrieb der Zugang in die Box für das Personal unmöglich gemacht wird. Das bedeutet wiederum, dass ein Remotebetrieb der Laseranlage von außen möglich sein muss. Das Personal muss geschult sein und auf die Gefahren des Laserbetriebs hingewiesen werden. Das gilt auch für Mitarbeiter, die nicht unmittelbar an den PIV-Messungen beteiligt sind.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Blockheizkraftwerke (BHKW) sind eine sinnvolle Alternative für konventionelle Anlagen zur Erzeugung von Wärme und von Elektroenergie. Bei ihrer Anwendung wird der Energiegehalt des Brennstoffes mit minimalen Verlusten nahezu vollständig in nutzbare Energieformen umgesetzt. Beim Einsatz von fossilen Brennstoffen (Erdgas) werden auf diese Weise die CO₂-Emissionen minimiert; verwendet man aus regenerativen Energiequellen hergestelltes Methan, gibt es überhaupt keine CO₂-Emissionen.

Energiewandler in modernen Blockheizkraftwerken sind Magergemisch-Gas-Ottomotoren. Ihr Einsatz verursacht im Vergleich zu anderen Verbrennungsmotoren kaum NO_x-und CO-Emissionen und so gut wie keine Partikelemissionen.

Einen Nachteil heute eingesetzter Gas-Ottomotoren ist ihr Methanschluß, so dass das Abgas eine geringe Menge Methan enthält. Diese Methanemissionen sind zu minimieren, weil Methan ein Treibhausgas ist. Dazu muss in den Verbrennungsprozess eingegriffen werden, um eine möglichst vollständige Verbrennung des Brennstoffes Methan bzw. Erdgas zu erzielen.

Die Optimierung der Ladungsbewegung beim Einlass, kurz vor und während der Verbrennung scheint ein geeignetes Mittel zur Erreichung dieses Ziels zu sein. Dazu ist allerdings die Kenntnis der Ladungsbewegung erforderlich und es muss der Einfluss von Optimierungsmaßnahmen (an den Einlasskanälen, am Ventil und am Kolben) gemessen und nachgewiesen werden können.

Das PIV-Verfahren verbunden mit CFD-Untersuchungen sind geeignete Werkzeuge um diese Aufgabe zu bearbeiten. Erste Erfahrungen wurden vorgestellt.

Beide Methoden sind weiterzuentwickeln, um an geeigneten Prüfständen bzw. später auch am laufenden Motor eingesetzt zu werden bzw. Vorausoptimierungen durch Simulationen vornehmen zu können.

LITERATUR

- [1] BVT-Merkblatt für Großfeuerungsanlagen, Entwurfsfassung Stand 10/2015; Umweltbundesamt, Kraftwerksdatenbank, Stand 04/2016; Bundesverband Kraftwärmekopplung e.V., 2012; Dielmann, Kuperjans: Kennzahlen von KWK-Anlagen, 2008
- [2] <https://de.wikipedia.org/wiki/Hochspannungs-Gleichstrom-%C3%9Cbertragung> aufgerufen am 20.11.17
- [3] Quaschnig, Volker: „Regenerative Energiesysteme“, Carl Hanser Verlag München, 2015
- [4] Deutscher Bundestag (Hrsg.): „Schutz der Erdatmosphäre. Eine internationale Herausforderung“ Zwischenbericht der Enquête-Kommission des 11. Deutschen Bundestages „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“; (Zur Sache 5/88), Bonn, 1988
- [5] R. Paschotta, Artikel 'Methanschlupf' im RP-Energie-Lexikon, aufgerufen am 28.11.2017; <https://www.energie-lexikon.info/methanschlupf.html>
- [6] Freitag, Martin; Westermann, Bernd: „Brennverfahrensentwicklung für einen Schichtladungs-Gasmotor für ein Mikro-BHKW“; Vortrag auf der 5. Internationalen Gasmotorenkonferenz 2009, Dessau 2009

Herausgeber

Prof. Dr. Heinz-Leo Dudek
Prorektor und Dekan der Fakultät für Technik

Duale Hochschule Baden-Württemberg Ravensburg

Baden-Wuerttemberg Cooperative State University
Marienplatz 2
88212 Ravensburg

ISBN 978-3-945557-04-4

ISSN 2199-238X

DOI 10.12903/DHBW_RV_FN_02_2017_FREITAG_FRENZEL_HARDER_LICHTMES