

Lucas Konstantinoff / Thomas Dornauer / Dominik Mairegger / Lukas Möltner

Einfluss einer gezielten einlasskanalerzeugten Ladungsbewegung auf die Verbrennung in SI- Gasmotoren

121- LEP - Low Emission Powertrains

Abstract

Das Ziel der Optimierung von Brennverfahren für Blockheizkraftwerke (BHKW) ist es, die Ladungsbewegung im Brennraum so zu gestalten, dass eine maximale Umsetzung der durch das Brennstoff-Luft-Gemisch zugeführten Energie erzielt werden kann. Im Sinne einer optimalen Brennstoffausnutzung ist es daher von großer Bedeutung, strömungscharakteristische Eigenschaften von Zylinderköpfen zu analysieren und einen kausalen Zusammenhang zu eingesetztem Brennstoff und Motorbetriebsweise (auch Teillastbetrieb) zu finden, um zielgerichtete Zylinderkopfoptimierung für variierende Anforderungen zu ermöglichen. Dazu ist es notwendig, Zylinderköpfe (ZK) auf einem präzisen, für diesen Zweck konstruierten Prüfstand zu vermessen und nach definierten Kennzahlen zu bewerten. Der Zylinderkopf wird dafür über den gesamten Ventilhubbereich mit Luft durchströmt, sodass ein Strömungsgleichrichter den resultierenden Drall über das Drehmoment der Luftbewegung erfassen kann. Mit der Erfassung des Luftmassenstroms und des Dralls können Durchfluss- und Strömungskennzahlen berechnet werden. Über eine vollständige Motorindizierung werden alle motorspezifischen Kennwerte bei Einsatz eines bestimmten Zylinderkopfes ermittelt. Die Variation der Brennstoffqualität, eingestellt über den CO₂-Gehalt, und der Betrieb im Teillastbereich simulieren möglichst reale Bedingungen. Die gewonnenen Kenntnisse über die Zusammenhänge zwischen Zylinderströmung und Motorwirkungsgrad sollen anschließend mit Hilfe einer Zylinderkopfvermessung mittels Particle Image Velocimetry (PIV) verifiziert und verfestigt werden.

Keywords:

Gasmotor, Zylinderkopfströmung, BHKW

1. Einleitung

Gasmotoren repräsentieren die zurzeit effektivste und zuverlässigste Methode, um aus brennbarem Gas Strom und Wärme zu produzieren. Dabei haben sich zuletzt neben Erdgas vor allem Biogas und Synthese- bzw. andere Produktgase als neue brennbare Gase auf dem Markt etabliert, da neben höherer Klopfestigkeit auch unter dem Aspekt der Reduktion von CO₂-Emissionen große Vorteile gegenüber konventionellen, flüssigen Kraftstoffen bestehen. Das Potential einer gezielten Beeinflussung der Ladungsbewegung an einem dem Stand der Technik entsprechenden Gasmotor soll im Zuge eines Forschungsprojektes gezeigt werden. Im Rahmen eines Kooperationsprojektes

zwischen dem Management Center Innsbruck (MCI) und IndustriepartnerInnen wurde ein geeigneter Versuchsmotor in Betrieb genommen, an dem Motorkomponenten und Betriebsstrategien ausgearbeitet werden. Die Installation eines Zylinderdruck-Indiziersystems ermöglicht die Schaffung einer Datenbasis für die angestrebten Optimierungen. Parallel zur Inbetriebnahme des Versuchsmotors wurde ein Strömungsprüfstand zur Bewertung der Ladungsbewegung von Zylinderköpfen konstruiert. Neben der Verfügbarkeit von Biogas aus dem Faulturm der Kläranlage und Erdgas ist auch Treibgas aus der Pilotanlage zur Biomassevergasung für den Betrieb des Motors vorhanden. Das ermöglicht auch Untersuchungen des realen Motorenbetriebs bei variierender Brennstoffqualität. Das Ziel der Forschungsarbeiten ist es, eine deutliche Wirkungsgradsteigerung des für die Größenordnung < 500 KW als repräsentativ angenommenen Gasmotors zu erreichen und ein auf andere Motoren derselben Größenordnung übertragbares Know-how zu generieren. Die Verbesserung der Effizienz soll primär durch die zielgerichtete Optimierung der Ladungsbewegung innerhalb des Brennraumes erreicht werden.

2. Forschungsstand

Im Sinne eines maximalen Wirkungsgrades sollte die Verbrennung innerhalb eines SI-Motors unendlich schnell stattfinden, um die gesamte Wärmemenge für die Erhöhung der Arbeitstemperatur zu nutzen. Je länger die motorische Verbrennung dauert, desto größer wird die Volumenänderungsarbeit des sich abwärts bewegenden Kolbens, was die maximal erreichbare Arbeitstemperatur reduziert. Ein möglichst geringes Volumensteigerungsverhältnis ψ ist erstrebenswert, wobei im realen Motorbetrieb der Verbrennungsoptimierung Emissionsgrenzwerte, Klopf- und Aussetzgrenzen, Wärmeverluste und der zulässige Zylinderspitzenruck gegenüberstehen (Mairegger 2015; Pischinger et al. 2009). Abbildung 1 zeigt das thermodynamische Potential, das sich aus einer beschleunigten Verbrennung bei entsprechender Prozessführung ergibt.

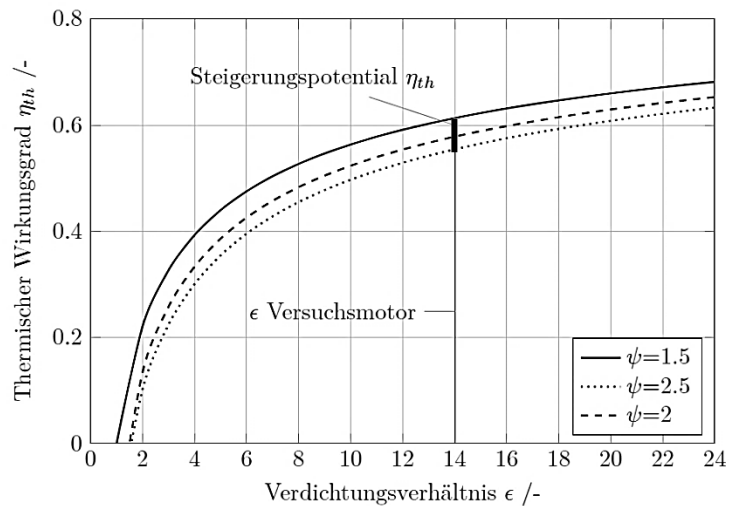


Abbildung 1: Thermischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit des Volumensteigerungsverhältnisses bzw. in Abhängigkeit der Verbrennungsgeschwindigkeit [eigene Grafik].

Eine gezielte Ladungsbewegung zur verbesserten Gemischbildung und schnelleren Verbrennung ist die Voraussetzung für eine Reihe moderner Verbrennungsverfahren wie der Magerverbrennung. Damit sind ein geringerer Schadstoffausstoß und höhere thermische Wirkungsgrade erreichbar (Lee et al. 2007; Pischinger et al. 2009). Voraussetzung ist eine homogene Verbrennung zur Vermeidung von Hot Spots und Bildung von thermischen NO_x . Dem Magerbetrieb sind durch sinkende Verbrennungsgeschwindigkeit und eine verzögerte Wärmefreisetzung über die Magerlaufgrenze Grenzen gesetzt (siehe auch Abbildung 4). Neben einer Aufladung des Brennstoffgemisches und der Anpassung des Zündzeitpunktes kommt folglich der Optimierung der Ladungsbewegung eine bedeutsame Rolle zu. Es tritt hier jedoch ein Zielkonflikt auf. Ein gewünschter hoher thermischer Wirkungsgrad ergibt sich aus hohen Verbrennungsgeschwindigkeiten und damit hohen Arbeitstemperaturen. Diese erhöhten Arbeitstemperaturen bedeuten jedoch auch zusätzliche thermische Bildung von NO_x . Im Hinblick auf die gesetzlichen Emissionsgrenzwerte der TA-Luft von NO_x 500 mg m^{-3} (so wie Novelle der TA-Luft im Jahr 2017) ist eine weitreichende Kenntnis über die Ladeluftbewegung im Brennraum von großer Bedeutung.

Grundsätzlich kann bei der Ladungsbewegung zwischen der Grundströmung infolge der Kolbenbewegung im Brennraum, der Quetschströmung sowie zwischen Drall- und Tumbleströmung unterschieden werden. Während die Quetschströmung nur im Bereich des oberen Totpunktes (OT) von Bedeutung ist und Tumble nur in der frühen Phase des Hubs stabil ist, bleibt die Drall-Strömung wesentlich länger erhalten und bildet mit fortschreitendem Hub eine homogene Strömung und Durchmischung aus (Li et al. 2001; Heywood 1988). Gemeinsames Merkmal der genannten Strömungen ist eine Erhöhung der Turbulenz mit einer einhergehenden beschleunigten Verbrennung (mit gewissen Einschränkungen bei sehr hohem Drall) (Dehong/Hill 1996). Ein resultierender verkürzter Brennverlauf führt bei Ottomotoren wie schon erwähnt zu erhöhter Arbeitstemperatur,

höheren Arbeitsdrücken, höheren Wirkungsgraden und erhöhten Magerlaufgrenzen (Porpatham et al. 2013). Da der Drall abhängig von der angesaugten Luftmenge und damit abhängig von der Motordrehzahl ist, sind Vermessungen im Teillastbetrieb ebenfalls notwendig.

Die für diese Forschungstätigkeit durchgeführten Untersuchungen fokussieren sich auf den Vergleich der Formen der Einlasskanäle, der Anordnungen der Ventile und der strömungsbeeinflussenden Geometrien in der Ventilsitzgegend. Eine Neuheit stellt in diesem Zusammenhang die Betrachtung des Motors im Teillastbetrieb bei Verwendung unterschiedlicher Brenngase dar.

3. Methodische Vorgehensweise

Bei der Drallmessung werden Durchströmversuche an Zylinderköpfen bei unterschiedlichen Ventilhuben der Einlassventile durchgeführt und repräsentative Kenngrößen für Durchfluss und Drall ermittelt. Dafür kommen sowohl bewährte integrative als auch moderne differentielle Methoden zum Einsatz. Es wurde am MCI ein Prüfstand zur Durchführung stationärer Durchströmversuche errichtet (Dornauer 2015). Mithilfe dieses Prüfstandes werden speziell die Strömungscharakteristika neu entwickelter Zylinderköpfe untersucht, bevor sie im Motorbetrieb Anwendung finden. Am Prüfstand wird die integrative Messmethode nach Tippelmann (mittels Momenten-Messung) angewandt, da sich diese Messmethode durch eine vollständige Erfassung des Strömungsfeldes auszeichnet (Heywood 1988).

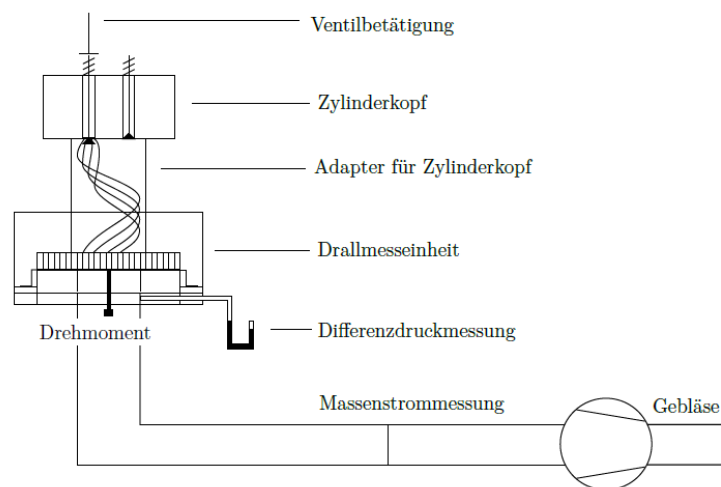


Abbildung 2: Funktionsschema des Strömungsprüfstandes zur Ermittlung der Strömungskennzahlen (Dornauer 2015).

Bei dieser Methode werden auch Strömungsstrukturen in der Zylindermitte und die axiale Strömungsverteilung berücksichtigt. Abbildung 2 zeigt das Messprinzip des Strömungsprüfstandes. Die sich in Bewegung befindliche Ladung übt auf den drehbar gelagerten Wabenkörper eine Kraft aus und das daraus resultierende Drehmoment repräsentiert die Messgröße zur weiteren Bestimmung der dimensionslosen Drall-Zahl K_S nach Tippelmann (Tippelmann 1977). Es wird von einer verlustfreien Lagerung und einer vollständigen Gleichrichtung der Strömung ausgegangen, weshalb das Moment M

dem Drehimpuls \dot{I} entspricht. Nach Tippelmann ist das Moment proportional zum Volumenstromquadrat und der Dichte.

$$M = \dot{I} = D^* \cdot \dot{V}^2 \cdot \rho \quad \text{und} \quad D^* = \frac{2 \cdot K_S}{d_{\text{Zyl}}} \quad (1), (2)$$

Der Proportionalitätsfaktor D^* beschreibt den Zusammenhang zwischen Drallzahl K_S und Zylinderdurchmesser d_{Zyl} . Durch Einsetzen von Gleichung (2) in Gleichung (1) ergibt sich durch Umformen die Drallzahl K_S (3).

$$K_S = \frac{M \cdot \rho \cdot d_{\text{Zyl}}}{2 \cdot \dot{m}^2} \quad (3)$$

Mit der thermische Zustandsgleichung für die Dichte der durchströmenden trockenen Luft

$$\rho = \frac{p}{R_S \cdot T} \quad (4)$$

und der Beschreibung des Druckverlustes durch den Einlasskanal aus Differenz zwischen Umgebungsdruck p_0 und statischem Druck im Zylinderinneren ergibt sich die Drallzahl wie folgt:

$$K_S = \frac{M \cdot (p_0 - \Delta p) \cdot d_{\text{Zyl}}}{2 \cdot \dot{m}^2 \cdot R_S \cdot T} \quad (5)$$

Neben dem Drehmoment des Wabenkörpers wird auch der Massenstrom der Luft ermittelt, die den Zylinderkopf bei jeweiligem Ventilhub durchströmt. Um eine Vergleichbarkeit verschiedener Größenordnungen zu erreichen werden die Durchflusskennzahlen $\mu\sigma$ und α_k ebenfalls aus den Messgrößen ermittelt. Die Durchflusskennzahl $\mu\sigma$ beschreibt einen Ventilsitzdurchmesser bezogenen Wert, der Rückschlüsse über die Einlasskanalgüte zulässt. Die Durchflusskennzahl α_k ist ein Bohrungsdurchmesser bezogener Kennwert, der analog zum Durchflusskennwert $\mu\sigma$ berechnet wird. Der Durchflusskennwert ist das Verhältnis aus gemessenem Massenstrom zu theoretischem Massenstrom.

$$\mu\sigma = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{\text{th,Ventil}}} \quad \text{bzw.} \quad \alpha_k = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{\text{th,Bohrung}}} \quad (6), (7)$$

mit

$$\dot{m}_{\text{th,Ventil}}/\dot{m}_{\text{th,Bohrung}} = A_{\text{Ventil}}/A_{\text{Bohrung}} \cdot \rho_{\text{Luft,f}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p_0}{\rho_{\text{Luft,f}}}} \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{(\kappa - 1)}} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(1 - \frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}} \quad (8)$$

und

$$A_{\text{Ventil}} = N_{\text{Ventil}} \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{Ventil}}^2}{4} \quad (9)$$

Da ein höherer Drall zu Lasten des Brennstoffdurchsatzes gehen kann, sind beide Kenngrößen zu untersuchen. Es ist weiters zu unterscheiden, ob sich der Durchfluss auf Grund der Einlasskanalgeometrie oder Ventilsitzgeometrie verändert und in wie weit eine geringere Kanalgüte durch andere Ventilanordnung- oder Anzahl kompensiert werden kann.

4. Diskussion der Ergebnisse

Abbildung 3 zeigt beispielhafte Ergebnisse erster ZK-Untersuchungen am Prüfstand, wobei ein zwei- (ZK2) und ein vier- (ZK1) Ventil-ZK verglichen werden. Ein Einlasskanal, der über zwei Ventile in den Brennraum leitet, verursacht bei kleineren und mittleren Ventilhuben einen leicht höheren Drall als nur bei einem Einlassventil, da die Aufteilung der Ladung auf zwei Kanäle die Möglichkeit bietet, die Einlasskanalgeometrie entsprechend so anzuordnen, dass der Drall durch die Wechselwirkung zwischen Tangential- und Spiralkanal einen hohen Drall erzeugt. Bei zwei Einlassventilen ist bei gleichem Hub des Weiteren ein größerer Durchfluss zu erkennen. Bei nur einem Einlassventil ist der Drall nur über den Sichelschliff nahe dem Ventilsitzring beeinflussbar, was den Bereich eines hohen Dralls auf kleine Ventilhube beschränkt. Deutlich erkennbar ist, dass bei geringer Ventilöffnung sehr große Drall-Zahlen bedingt durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten am gering geöffneten Einlassventil auftreten und mit zunehmender Öffnung des Ventils der Einfluss des Zylindersitzschliffs sinkt, wodurch die Drallzahl nur mehr durch den Einfluss der Einlasskanalgeometrie generiert wird.

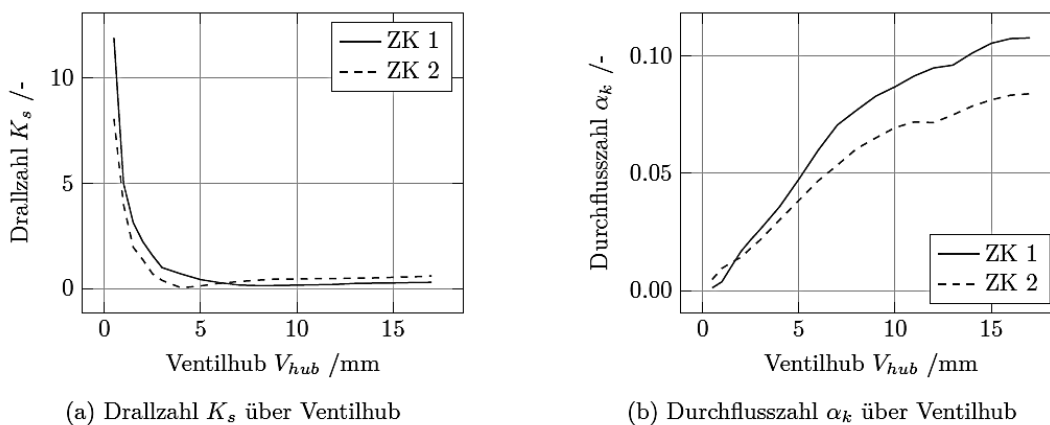


Abbildung 3: Vergleich von Strömungskennzahlen zweier Zylinderköpfe aus Vorversuchen.

Der Verbrennungsverlauf im Motor wird über Zündverzug, Verbrennungsschwerpunkt und Verbrennungsende bewertet. Werden unterschiedliche biogene Brennstoffe eingesetzt oder wird der Motor bei Teillast betrieben, verändern sich Zylinderinnendruck und Verbrennungsverlauf. Zur experimentellen Analyse des Einflusses schwankender Brenngase wird der CO_2 -Gehalt im Brennstoff variiert. In Abbildung 4 ist der Einfluss variierender CO_2 -Anteile auf den Brennverlauf dargestellt. Ein erhöhter CO_2 -Gehalt führt zu einer langsameren Verbrennung, sodass durch die Einstellung eines früheren ZZP oder durch höhere Turbulenz der Zylinderinnenströmung die Flammgeschwindigkeit wieder erhöht werden muss.

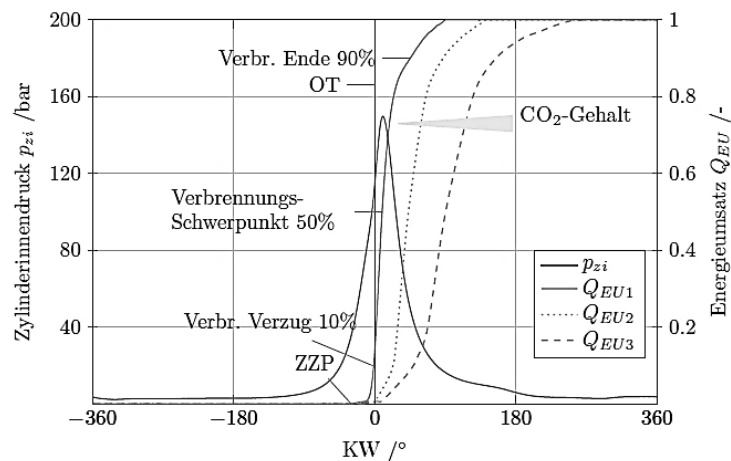


Abbildung 4: Zylinderinnendruckverlauf und Energieumsatz über KW und Darstellung des Einflusses von CO₂ im Brenngas.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Verbrennungsoptimierung bei kleineren BHKW sind Kenntnisse über Zylinderinnenströmung eine wesentliche Grundlage für den Erfolg einer Wirkungsgradsteigerung. Eine geplante Validierung der ermittelten Strömungskennzahlen erfolgt mittels PIV. In weiterer Folge soll die Möglichkeit geschaffen werden, die Wirkung der Zylinderkopfströmung auf den Brennverlauf rein anhand der statisch ermittelten Kennzahlen voraussagen zu können. Über die vollständige Indizierung des Versuchsmotors sind kurbelwinkelaufgelöste Informationen über Zylinderinnendrucke und Energieumsätze bei unterschiedlichen Betriebsparametern innerhalb kurzer Zeit generierbar. Eine möglichst vollständige, thermodynamische Untersuchung der Verbrennung bei Verwendung vielversprechender ZK-Prototypen lässt Schlüsse auf den gesuchten Zusammenhang zwischen ZK-Strömungs- und Motorkennzahlen zu. Für unterschiedliche Einsatzzwecke oder Lastprofile von BHKW können ZK mit unterschiedlichen Strömungseigenschaften geeignet sein. Die Erwartung ist, dass mit der korrekten Auswahl bzw. einem spezifischen Design ein durchschnittlich signifikant besserer Gesamtwirkungsgrad bei gleichen Motorkosten erreicht werden kann.

Literaturliste/ Quellenverzeichnis:

Dehong, Zhang; Hill, Philip G. (1996): Effect of swirl on combustion in a short cylindrical chamber. In: Combustion and Flame 106 (3), S. 318–332. DOI: 10.1016/0010-2180(95)00256-1.

Dornauer, Thomas (2015): Entwicklung eines Prüfstandes zur Durchführung von Durchströmversuchen an Zylinderköpfen. Management Center Innsbruck GmbH. Innsbruck.

Heywood, John (1988): Internal Combustion Engine Fundamentals. 1. Aufl.: McGraw-Hill Science/Engineering/Math.

Lee, Kihyung; Bae, Choongsik; Kang, Kernyong (2007): The effects of tumble and swirl flows on flame propagation in a four-valve S.I. engine. In: Applied Thermal Engineering 27 (11-12), S. 2122–2130. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2006.11.011.

Li, Yufeng; Zhao, Hua; Peng, Zhijun; Ladommatos, Nicos (2001): Analysis of Tumble and Swirl Motions in a Four-Valve SI Engine. In: SAE Technical Paper Series, zuletzt geprüft am 22.12.2015.

Mairegger, Dominik (2015): Theoretische Untersuchung zur Wirkungsgradsteigerung eines gasbetriebenen Otto-Verbrennungsmotors. Management Center Innsbruck GmbH. Innsbruck.

Pischinger, Rudolf; Klell, Manfred; Sams, Theodor (2009): Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine. 3. Aufl. Wien, New York, NY: Springer (Der Fahrzeugantrieb).

Porpatham, E.; Ramesh, A.; Nagalingam, B. (2013): Effect of swirl on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine. In: Energy Conversion and Management 76, S. 463–471. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.07.071.

Tippelmann, Götz (1977): A New Method of Investigation of Swirl Ports. In: SAE Technical Paper Series. DOI: 10.4271/770404.