

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DER SPÜLSTRÖMUNG VON ZWEITAKT-MOTOREN

Peter Stücke

Westfälische Hochschule Zwickau (FH)
Dr. –Friedrichs-Ring 2a
08056 Zwickau

Christoph Egbers

Brandenburgische Technische Universität (BTU)
Siemens-Halske-Ring 1
03044 Cottbus

Abstract

Zum Verständnis von dreidimensionalen instationären Strömungen sind experimentelle Methoden unerlässlich. Insbesondere dann, wenn die Komplexität der untersuchten Problemstellung oder die numerische Modellierung geometrischer Details einen überproportionalen Programmieraufwand erfordern, eröffnen Experimente zusätzliche Möglichkeiten.

Das experimentelle Verfahren zur Untersuchung der Spülströmung in Zweitakt-Motoren, welches hier vorgestellt wird, verwendet einen Prüfstand dessen Abmessungen unter Verwendung von Ähnlichkeitsgesetzen bestimmt wurden und dessen Aufbau maßgeblich durch die Anforderung der optischen Zugänglichkeit vorgegeben wurde. Die dynamische Ähnlichkeit des Modells zum Original erlaubt die Untersuchung der instationären dreidimensionalen Spülströmung in stark vergrößerter und zeitlich gedehnter Form.

Einleitung

Wegen ihres ausgezeichneten Leistungsgewichts und ihrer allgemein anerkannten Robustheit sind Zweitakt-Motoren der meistverwendete Antrieb für handgeführte Arbeitsgeräte. Eine kontinuierliche Entwicklungsarbeit führte zu verbessertem Leistungsangebot, reduziertem Gewicht und erhöhter Zuverlässigkeit. Nun kommen zu diesen alt hergebrachten Entwicklungszielen neue durch verschärfte Umweltauflagen motivierte Ziele für den Entwicklungsingenieur hinzu: Abgasgrenzwerte sind in den wichtigsten Märkte weltweit eingeführt worden [1]. Die neueste Vorschrift tritt am 11. Aug. 2004 in der EU in Kraft [2].

Diese kombinierten Anforderungen zwingen die Hersteller den Entwicklungsprozess für neue Maschinen umzustellen, ohne dabei Zugeständnisse bei Entwicklungskosten oder –zeit zuzulassen. Um abgasarme leistungsstarke Zweitakt-Motoren zu entwickeln, muss dem Spülvorgang dabei eine besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Denn schon mit der Spülung werden die Füllung und damit die Leistung, sowie die Spülverluste und damit die Rohemission des Motors vorbestimmt. Es gibt numerische Methoden, mit denen der Spülvorgang simuliert werden kann. Blair 1999 [3] beschreibt solche Ansätze. In jedem Falle müs-

sen eine Reihe von Annahmen getroffen werden, um die Zylindergeometrie zu beschreiben und den Berechnungsaufwand in annehmbaren Grenzen zu halten.

An dieser Stelle bieten sich experimentelle Methoden an, um einerseits die Vorstellung von der dreidimensionalen Zylinderinnenströmung zu verbessern und andererseits die berechneten Daten zu validieren. Nun ist die experimentelle Simulation der Spülströmung ebenfalls keine triviale Aufgabe und auch hierzu gibt Blair 1999 [3] einen Überblick über die bekannten Ansätze. In der Regel werden die Versuche an angepassten Originalzylindern durchgeführt, die zwar die Geometrie präzise abbilden, optisch aber schlecht zugänglich sind und eine ungünstige zeitliche Auflösung bedingen. Der Schritt zu einer quasistationären Strömung bei konstant gehaltener Kolbenstellung bringt bekanntermaßen keinen Durchbruch. Die Grundidee zu dem hier vorgestellten Versuchsaufbau geht zurück auf die Untersuchungen von Affeld et al 1990 [4] am Modell einer maßstäblich vergrößerten Herzklappe.

Aufbau und Abmessungen des Versuchstandes und die benutzten Ähnlichkeitsgesetze wurden in einem Beitrag zur GALA-Tagung 2003 in Braunschweig beschrieben, siehe Stücke et al. 2003 [5]. Genau wie bei [4] bringt der vergrößerte Maßstab eine hervorragende geometrische Auflösung und eine entsprechende Zeitdehnung, wodurch eine zeitlich kontinuierliche Untersuchung der Spülströmung möglich wird. Seither ist der Prüfstand beständig verbessert worden. Der Flüssigkeitsdruck, der das gespülte Volumen bestimmt, wurde analog zur Druckdifferenz zwischen Kurbelgehäuse und Zylinder am Originalmotor, die sich über dem Kurbelwinkel verändert, modelliert. Der Aufbau des Prüfstands wurde so verändert, dass eine individuelle Beschickung der getrennten Überströmkanäle mit unterschiedlichen Farben oder mit partikeldotierten Flüssigkeiten möglich ist. Für die Strömungsvisualisierung wurden neue Farben benutzt, um den Kontrast der fotografischen Aufnahmen zu erhöhen.

Experimenteller Aufbau

Die Konstruktion des Prüfstandes zur Untersuchung der Spülströmung eines Zweitakt-Motors basiert auf einer maßstäblichen Vergrößerung des Originalzylinders unter Anwendung von Ähnlichkeitsgesetzen. Blair 1999 [3] führt aus, dass Strouhal- und Reynoldszahl die wichtigsten Kennzahlen sind, diese werden in den folgenden Gleichungen erläutert:

$$Sr = \frac{n \cdot d}{u} \quad (1)$$

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} \quad (2)$$

Hierbei sind d der Bohrungsdurchmesser des Zylinders, n die Motordrehzahl, u die mittlere Strömungsgeschwindigkeit und ν die Zähigkeit des Frischgases. Die Multiplikation der beiden Kennzahlen liefert eine kinematische Ähnlichkeitsbeziehung zwischen Original (Index 0) und Modell (Index M):

$$Sr_M \cdot Re_M = Sr_0 \cdot Re_0 \quad (3)$$

Aus Gleichung (3) kann eine Bestimmungsgleichung für die Modelldrehzahl abgeleitet werden:

$$n_M = n_0 \frac{d_0^2}{d_M^2} \frac{\nu_M}{\nu_0} \quad (4)$$

Aus dem Kehrwert von Gleichung (4) erhält man den Zeitmaßstab, der sich zu einem Wert von ca. 500:1 ergibt, wenn man einen geometrischen Maßstab von 4,75:1 und die Zähigkeit von Luft (Frischgas, bei 100°C) und Wasser als Modellfluid zugrunde legt. Um volle strömungsdynamische Ähnlichkeit zu erreichen, muss zusätzlich die Eulerzahl beachtet werden:

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho u^2} \quad (5)$$

Hier sind Δp die Druckdifferenz zwischen Kurbelgehäuse und Zylinder und ρ die Dichte des Frischgases. Durch Kombination mit Gleichung (2) erhält man eine neue Ähnlichkeitsbeziehung:

$$Eu_M \cdot Re_M^2 = Eu_0 \cdot Re_0^2 \quad (6)$$

Woraus sich durch Umformen eine Gleichung für das treibende Druckgefälle im Experiment ergibt:

$$\frac{\Delta p_M}{\rho_M} = \frac{\Delta p_0}{\rho_0} \frac{d_0^2}{d_M^2} \frac{v_M^2}{v_0^2} \quad (7)$$

Der hier vorgestellte Prüfstand arbeitet mit Wasser als Medium und die bestimmende Druckdifferenz Δp_M stellt sich zwischen der Zumesströhre (s. Bild 1) und dem Modellzylinder ein und kann anschaulich auch als Flüssigkeitshöhe h_1 aufgefasst werden.

$$\Delta p_M = \rho_M g h_1 \quad (8)$$

Ersetzt man Δp_M in Gleichung (7) durch h_1 gem. (8) ergibt sich eine Bestimmungsgleichung, die ebenfalls den Zusammenhang zwischen den Zeitverläufen (hier als Funktion des Kurbelwinkels α) des Kurbelgehäusedrucks und der Flüssigkeitshöhe vorgibt:

$$h_1(\alpha) = \frac{\Delta p_0(\alpha)}{\rho_0 \cdot g} \cdot \frac{d_0^2}{d_M^2} \cdot \frac{v_M^2}{v_0^2} \quad (9)$$

Ausgehend von diesen Vorüberlegungen entstand der verbesserte Prüfstand, der in schematischer Form in Bild 1 dargestellt ist.

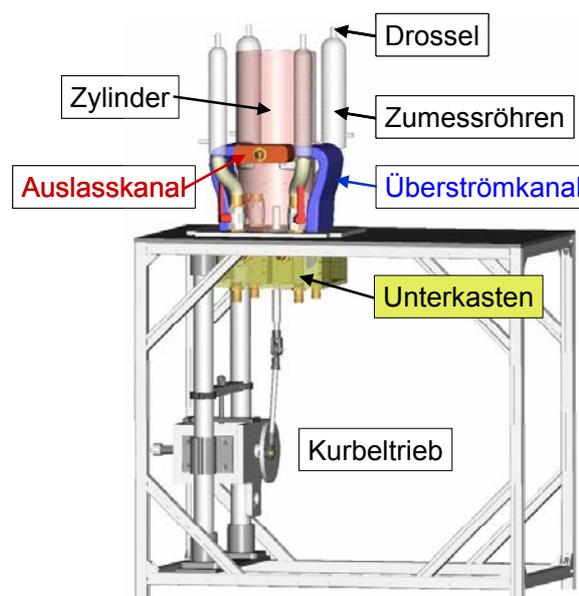


Bild 1: Schematische Darstellung des Prüfstandes zur Untersuchung der Spülströmung von Zweitakt-Zylindern, Ansicht von der Auslassseite

Das zentrale Element des Prüfstandes ist der maßstäbliche Zylinder mit Kolben. Der Antrieb erfolgt über einen ebenfalls maßstäblichen Kurbeltrieb, der unterhalb des Montagetisches angeordnet ist. Das Fluid wird in den Zumesröhren bereitgestellt und über einen Unterkasten, der sich unterhalb des Tisches befindet und das Volumen des Kurbelgehäuses darstellt, den Überströmkanälen zugeführt. Aus diesen tritt das Medium in den Zylinder ein und strömt abschließend durch den Auslass ab.

Zylinder und Überströmkanäle sind aus Plexiglas bzw. Acrylharz gefertigt und weisen exzellente optische Qualität auf, was eine flexible optische Zugänglichkeit ermöglicht. Weiterhin ist der Zylinder oben offen, um einen ungestörten Zugang für die Beobachtung der Strömung mit Kameras zu erlauben.

Die Zumesröhren sind in Länge und Durchmesser auf das Spülvolumen des Originalzylinders abgestimmt, sodass sich die nötige Anfangsdruckdifferenz und ein Druckausgleich am Ende des Spülvorganges ergibt. Die ersten Experimente, siehe Stücke et al 2003 [5], wurden noch mit konstantem Druck, der der mittleren Druckdifferenz entsprach, durchgeführt. Das dynamische Verhalten war entsprechend ungenau. Dennoch reichte die Genauigkeit, um charakteristische Formfaktoren im Strömungspfad zu identifizieren, wie der Vergleich von Messwerten und gerechneten Daten in Bild 2 zeigt.

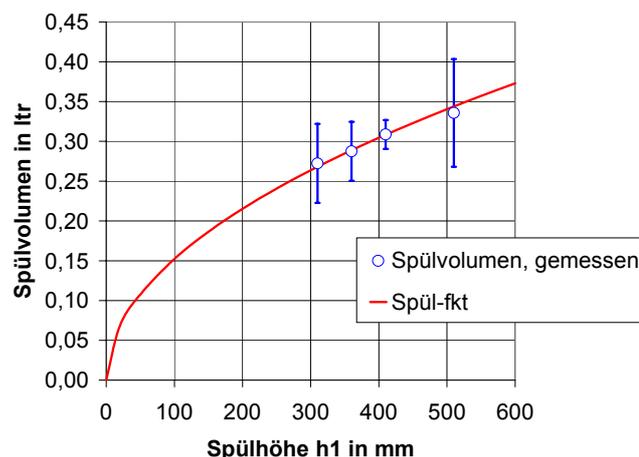


Bild 2: Experimentell bestimmtes und berechnetes Spülvolumen bei konstanter Spülhöhe

Wie schon ausgeführt sind die Drücke jedoch zeitlich veränderlich, bzw. lassen sich als Funktion vom Kurbelwinkel während einer Umdrehung darstellen. Mit der Umstellung auf die abgestimmten Zumesröhren ist das dynamische Verhalten des Prüfstandes erheblich verbessert worden. Im Vergleich zum Originalzylinder, der mit einem Liefergrad (Spülvolumen bezogen auf das Hubvolumen) von ca. 40% betrieben wird, ist der Zeitverlauf des Modellzylinders in Bild 3 dargestellt, wobei zum Verdeutlichen der Fortentwicklung außerdem der Liefergradverlauf des alten Prüfstandsaufbaus (konstante Spülhöhe h_1) gezeigt wird.

Mit der Einführung dieser Maßnahmen steht nun ein verbesserter Prüfstand zur Verfügung, der die Spülströmung von Zweitakt-Motoren maßstäblich mit hoher Genauigkeit abbildet. Im Versuchsansatz sind alle Effekte abgebildet, um dynamische Ähnlichkeit zu erzielen. Die Übertragung auf ein dichtebeständiges Fluid ist insofern zulässig, als dass die Machzahl mit $Ma = 0,1$ beim Überströmvorgang unter der kritischen Grenze von 0,3 bleibt. Als Kritikpunkt bleibt lediglich, dass der Dichteunterschied zwischen Frisch- und Altgas im Zylinder nicht abgebildet wird. Bei kurbelgehäusegespülten Zweitakt-Motoren ohne Aufladung beträgt das Dichteverhältnis zu Beginn des Spülvorganges typisch 1,7 siehe Stücke et al 2003 [5].

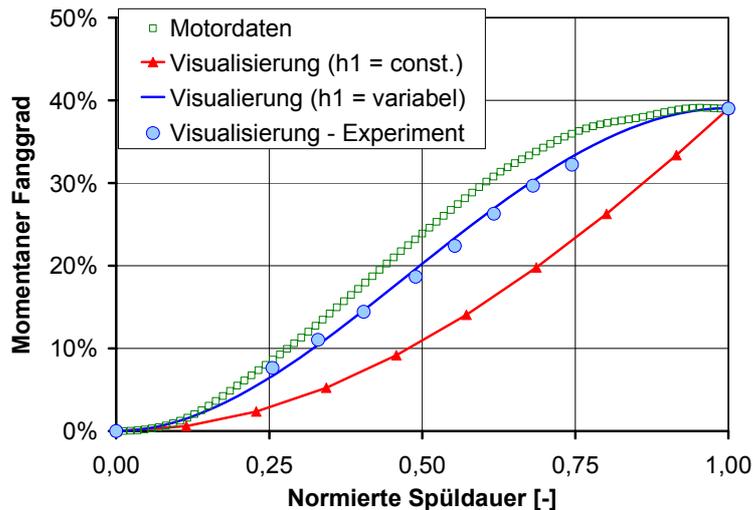


Bild 3: Momentaner Liefergrad über der normierten Spülzeit (Überströmer öffnen = 0; UT = 0,5; Überströmer schließen = 1) Motordaten im Vergleich mit Modellexperiment bei konstanter und zeitlich-veränderlicher Spülhöhe h_1

Die Arbeitsweise des Prüfstandes wird anhand von Strömungsvisualisierung verdeutlicht, die auch als Voruntersuchung zu PIV-Messungen gedacht sind und mit denen es möglich wird, Problemzonen zu identifizieren, die für die Spülgüte interessant sind. Zur Sichtbarmachung der Spülströmung werden neue Farbstoffe eingesetzt. Die Anregung hierzu kam von Gregory 2003 [6], der anlässlich der Colour Conference in London über Farbstoffe für Tintenstrahldrucker berichtete. Diese wasserlöslichen Farbstoffe werden einer Mischung aus Wasser und Milch zugesetzt und erlauben die Abmischung der gesamten Farbpalette. Dabei entsteht eine Lösung mit ca. 1% Fettanteil. Für solche Emulsionen muss die Viskosität gegenüber der Grundflüssigkeit korrigiert werden. Schwark-Werwach 1995 [7] hat eine Übersicht über die bekannten Ansätze zusammengestellt, wobei all diese eine Erweiterung der Gleichung von Einstein 1911 [8] darstellen, der einen Gültigkeitsbereich bis zu einer Konzentration von 1% angibt. Diese Gleichung lautet:

$$\mu_{corr} = \mu_M (1 + 2.5 c) \quad (10)$$

Hier sind c die Konzentration der Beimengung, μ_M die Zähigkeit des Basisfluids (Wasser) und μ_{corr} die Zähigkeit der Farblösung. Für die oben vorgestellte Farblösung ergibt sich ein Korrekturfaktor von 1.025, der mit den eingangs abgeleiteten Ähnlichkeitsbeziehungen verrechnet wird.

Ergebnisse

Visualisierungsexperimente sollen die Funktion des Prüfstandes verdeutlichen und helfen, Problemzonen zu identifizieren, auf die nachfolgende PIV-Messungen konzentriert werden sollen. Betrachtet man den momentanen Fanggrad in Bild 3, so stellt man fest, dass bei halber Spülzeit – also am unteren Totpunkt – 50 bis 60% des gespülten Volumens im Zylinder sein müssen. Um dieses zu verdeutlichen, wurde eine Seitenansicht gewählt, die in Bild 4 näher beschrieben wird.

Die nachfolgende Aufnahme zeigt die Strömung am unteren Totpunkt mit deutlich ausgeprägten Einströmkeulen, die zu diesem Zeitpunkt noch kanalweise separiert sind. Zu beachten ist, dass nur das Fluid auf der rechten Seite eingefärbt ist und von links reines Wasser aus den Überströmern austritt.

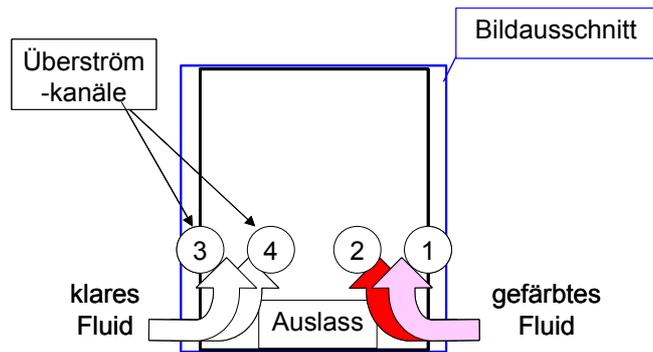


Bild 4: Skizze der Seitenansicht des Zylinders, Blickrichtung der Kamera auf den Auslass, Modellzylinder mit 4 Überströmkanälen, paarweise angeordnet, eingefärbt sind nur die Kanäle auf der rechten Seite, auslassnaher Kanal dunkel, einlassnaher Kanal hell.

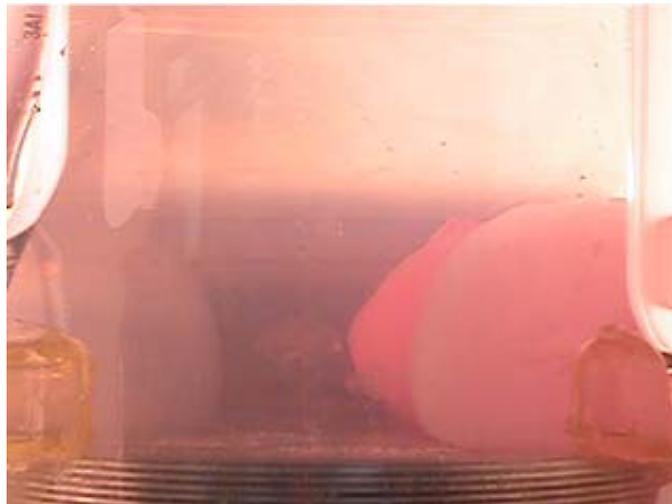


Bild 5: Aufnahme der Seitenansicht des Zylinders, Blickrichtung der Kamera auf den Auslass (im Hintergrund als graue Zone zu erkennen), Modellzylinder mit 4 Überströmkanälen, paarweise angeordnet, eingefärbt sind nur die Kanäle auf der rechten Seite, auslassnaher Kanal dunkel, einlassnaher Kanal hell.

Betrachtet man nur dieselbe Anordnung von oben, lassen sich interessante Details in der Strömung erkennen. Zur Erklärung wird eine Skizze in Bild 6 vorausgeschickt.

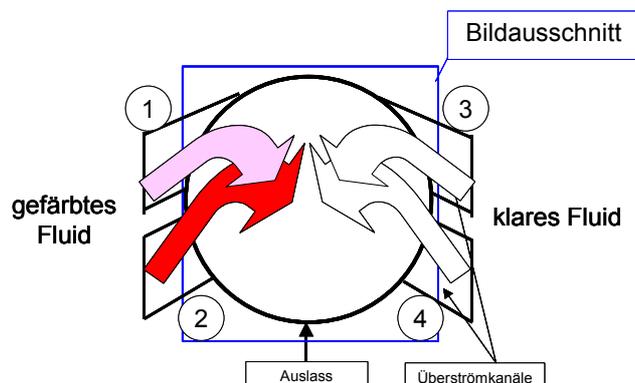


Bild 6: Skizze der Ansicht von oben in den Zylinder, Blickrichtung der Kamera auf den Kolben, Modellzylinder mit 4 Überströmkanälen, paarweise angeordnet, eingefärbt sind nur die Kanäle auf der linken Seite, auslassnaher Kanal dunkel, einlassnaher Kanal hell.

Bild 7 zeigt eine Aufnahme, die ebenfalls am unteren Totpunkt entstanden ist. Zusehen sind die Einströmkeulen wie in Bild 5, diesmal in der Draufsicht, die deutlich eine tumbleartige

Wirbelstruktur aufweisen, welche auf den Abriss der Strömung an der Kanalfensteroberkante zurückzuführen ist. Hier soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass von der rechten Seite des Zylinders klares Wasser eintritt, was ebenfalls voll am Spülvorgang teilnimmt. Detaillierte Analysen des weiteren Spülverlaufs zeigen, dass insbesondere die auslassnahen Kanäle 2 und 4 den Hauptanteil an den Spülverlusten, d.h. ein Strömungskurzschluss zwischen Überströmer und Auslass, haben.

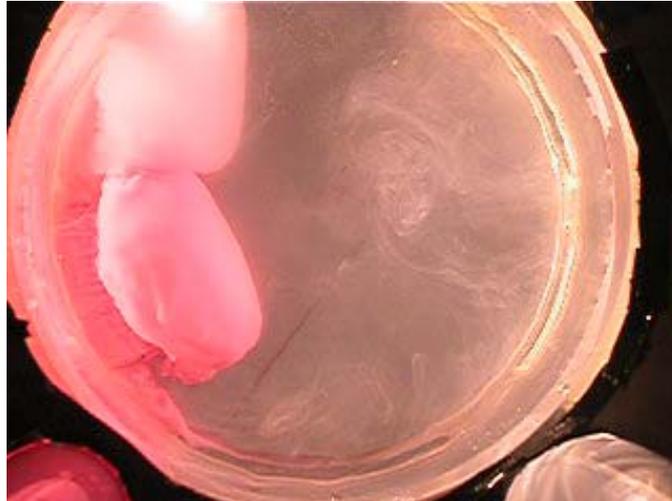


Bild 7: Aufnahme Spülströmung, Ansicht von oben in den Zylinder, Blickrichtung der Kamera auf den Kolben, Modellzylinder mit 4 Überströmkanälen, paarweise angeordnet, eingefärbt sind nur die Kanäle auf der linken Seite.

Eine Visualisierung Teilströmung, die durch die auslassfernen Kanäle 1 und 3 in den Zylinder eintritt, verdeutlicht diese Beobachtung, da gut erkennbar ist, dass das durch die auslassfernen Kanäle eintretende Fluid keine Strömungskomponente Richtung Auslass aufweist, dieses wird in Bild 8 gezeigt. Ebenfalls wird eine interessante Problemzone aufgezeigt. Bedingt durch die Farbwahl wird im Kontaktbereich zwischen den Strömungskeulen der Kanäle 1 und 2 eine konvektive Mischungszone gut hervorgehoben, die sich im Nachlauf der Trennwand zwischen dem linken Kanalpaar ausbildet. Um eine Möglichkeit der Spüloptimierung zu untersuchen, stellt diese Zone einen interessanten Bereich dar und die Frage ist zu klären, wie stark der Stoffaustausch zwischen den benachbarten Kanälen ist.

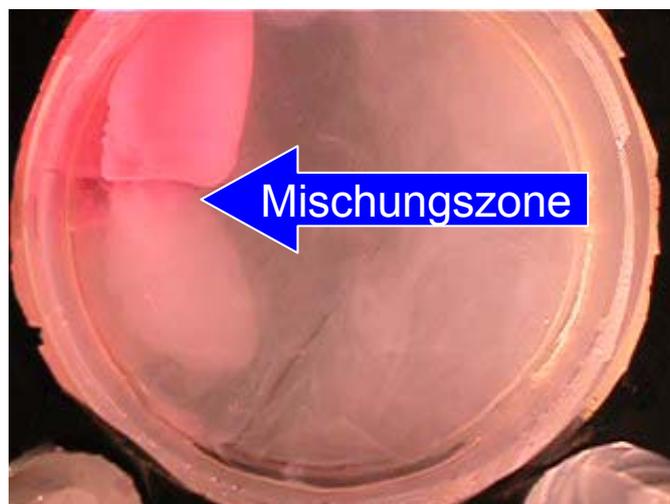


Bild 8: Aufnahme Spülströmung, Ansicht von oben in den Zylinder, Blickrichtung der Kamera auf den Kolben, Modellzylinder mit 4 Überströmkanälen, paarweise angeordnet, eingefärbt ist nur der auslassferne Kanal 1 auf der linken Seite.

Zusammenfassung

Es wird ein Prüfstand vorgestellt, mit dem die Spülströmung eines Zweitakt-Motors vergrößert und dynamisch ähnlich abgebildet wird. Wegen des gedehnten Zeitmaßstabes kann die Strömung im Detail in Echtzeit untersucht werden. Vergleiche des momentanen Liefergrades gemessen am Prüfsand mit Daten vom Realmotor zeigen eine gute Übereinstimmung des zeitlichen Verlaufes des Spülvorganges, sodass insgesamt ein qualitativ richtiges Spülverhalten vorliegt.

Mit Visualisierungsexperimenten wird der Spülvorgang weiter analysiert und ebenfalls die gute Zugänglichkeit des Prüfstands mit optischen Verfahren verdeutlicht. Es werden kritische Zonen ermittelt, die für die Qualität des Spülvorganges von Bedeutung sind und die in der kommenden Projektphase quantitativ mit PIV untersucht werden sollen.

Dankesworte

Das Projekt wird finanziell von der Fa. Andreas Stihl AG & Co. unterstützt.

Die verwendeten Farbstoffe wurden Avecia, Inc. zur Verfügung gestellt.

Literatur

- [1] CFR 40, Title 90 (US) (1997).
- [2] Richtlinie 2002/88/EC (EU) (2002).
- [3] Blair, A.: *Design and Simulation of Two-Stroke Engines*. SAE, Warrendale. R-161, 1996.
- [4] Affeld, K. ; et al.: A ten times enlarged model of artificial heart valve flow. *2nd international symposium on biofluid mechanics and biorheology*. Springer Verlag, 1990.
- [5] Stuecke, P.; et al.: Visualisierung der Strömung im Inneren von Zylindern für kleine Zweitaktmotoren. *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 11. Jahrestagung*. GALA, Braunschweig, 2003.
- [6] Gregory, P.: Colour and Information – Digital Cameras. – Linnean Soc. (org.); IMechE (org.): *Colour and Design Conference* (London 2003).
- [7] Schwark-Werwach, B.: Untersuchung zur Rohrströmung von Suspensionen. *Fortschrittsberichte VDI*, Reihe 7, Nr. 256. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995.
- [8] Einstein, A.: Berichtigung zu meiner Arbeit: "Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen". *Annalen der Physik*, Vol. 34, p. 591 – 592. Leipzig, 1911.