

# Visualisierung der Strömung im Inneren von Zylindern für kleine Zweitaktmotoren

**Peter Stücke**

Westsächsische Hochschule Zwickau (FH), Zwickau

**Christoph Egbers**

Brandenburgische Technische Universität, Cottbus

**Werner Geyer**

Andreas Stihl AG & Co., Waiblingen

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Verschärfung der Abgasgesetzgebung, die mittlerweile auch das Segment der handgeführten Arbeitsgeräte mit Verbrennungsmotor erfasst hat, zwingt die Hersteller den Entwicklungsaufwand zu intensivieren, um niedrigere Abgasgrenzwerte einzuhalten und gleichzeitig für den Betrieb und die Arbeitssicherheit wichtige Kriterien wie Leistung, Leistungsgewicht und Betriebstemperaturen weiter zu verbessern.

In jüngster Vergangenheit kommen hier zusehends numerische Verfahren zum Einsatz, deren Ergebnisse mit geeigneten experimentellen Methoden abgesichert und überprüft werden müssen. In dieser Arbeit wird ein Prüfstand zur Visualisierung der inneren Durchströmung des Zweitaktzylinders vorgestellt, an dem Experimente zur Überprüfung numerisch gewonnener Daten durchgeführt werden können. Durch ihre enorme Anschaulichkeit liefern die Versuchsergebnisse zudem einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis der Strömung und ermöglichen damit eine effiziente Interpretation der umfangreichen numerischen Daten.

Ausgehend von der Reynolds-Analogie gelingt es bei geeignetem geometrischen Maßstab einen gedehnten Zeitmaßstab einzustellen, der die Anwendung klassischer Visualisierungsverfahren erlaubt. Zudem können mit der Laserlichtschnitttechnik gezielt einzelne Querschnitte untersucht werden, was den unmittelbaren Vergleich mit numerischen Daten erlaubt, die in den korrespondierenden Ebenen berechnet wurden. Als Beispiel ist die Verdrängungsströmung im Hubraum dargestellt. Wegen der hohen Auflösung kann auch die Durchströmung der Überströmkanäle untersucht werden, womit ein entscheidender Beitrag zur Entwicklung abgasarmer und zugleich leistungsstarker Zweitaktmotoren erbracht wird.

## EINFÜHRUNG

Abgasgesetze für kleine Verbrennungsmotoren in handgeführte Arbeitsgeräten gibt es seit 1990 und müssen seit 1995 für die in Kalifornien verkauften Geräte eingehalten werden. Ab 2004 müssen auch Maschinen, die in der EU in den Verkehr gebracht

## 51.2

werden, entsprechende Grenzwerte einhalten [1]. Damit ergeben sich für die Hersteller für den überwiegenden Anteil ihrer Produkte nunmehr weltweit einzuhaltende Grenzwerte, deren Verschärfung dem Beispiel der Automobilindustrie folgend sukzessive umgesetzt werden wird. In der Regel werden handgeführte Arbeitsgeräte wegen des Gewichtsvorteils und der Einfachheit des Aufbaus von luftgekühlten Zweitaktmotoren angetrieben. Daraus entsteht eine Vorgabe für den Motorenentwickler das Spülverfahren [2] zu verbessern, insbesondere deshalb, weil es sich meistens um ventillose Motoren handelt, in denen die Durchströmung durch die Formgebung von Kolben und Spülkanälen bestimmt wird, der sog. Schlitzsteuerung.

Es gibt eine Reihe von Arbeiten und Methoden die sich mit der Untersuchung und insbesondere mit der Visualisierung der Spülströmung in Zweitaktmotoren befassen. [3] gibt im Kapitel "Scavenging (Spülung)" einen Überblick. In der Regel werden solche Untersuchungen am Originalzylinder vorgenommen, wobei einerseits die Visualisierung schwierig ist, wenn es sich um Luft (Gas) als Fluid handelt. Andererseits kann es bei der Verwendung von Flüssigkeiten wegen des Zähigkeitseinflusses zu einer Änderung der Strömungsform kommen, wenn die Reynoldszahl dem kritischen Wert nahe kommt oder ihn gar unterschreitet.

Eine Arbeit, die sich besonders mit der Ähnlichkeitstheorie auseinandersetzt und quantitative Zusammenhänge zwischen Kennzahlen und Motorkenngrößen liefert, ist [4]. Als Haupteinflussparameter werden die Strouhalzahl, die Eulerzahl und das Dichteverhältnis zwischen Frischgas und Verbranntem ermittelt. Der Einfluss der Reynoldszahl wird als eher unbedeutend beschrieben, sofern die Strömung ihren Charakter nicht ändert und im Versuch oberhalb von  $10^5$ , d.h. turbulent bleibt.

Eine Arbeit neueren Datums, die sich aus gegebenem (s.o.) Anlass mit der Untersuchung der Spülströmung von kleinen Zweitaktmotoren befasst, wurde von [5] im vergangenen Jahr auf der Small Engine Technology Conference vorgestellt. Auch hier werden Originalzylinder im Experiment eingesetzt, was bei der Verwendung von Flüssigkeiten als Strömungsmedien einen erheblichen konstruktiven Aufwand bei der Versuchsstandsteuerung erfordert.

Aus den hier gelisteten Bedingungen und dem Eigenanspruch ein Verfahren zu entwickeln, was im Entwicklungsprozess zeitlich parallel zu Konstruktion und Motorabstimmung eingesetzt werden kann und insbesondere ein schnelles und einfaches Modifizieren der Steuergeometrie des Zylinders im Experiment zulässt, entstand das Konzept eines Versuchsaufbaus, der mit maßstäblich vergrößerten Rapid-Prototyping-Teilen aufgebaut und von einer Flüssigkeit durchströmt wird. Die Verwendung von Flüssigkeiten folgt einer Empfehlung von [6] hinsichtlich der Sichtbarkeit, wobei ebenfalls auf die richtige Auftriebskennung (sprich Dichteverhältnis) zwischen den strömenden Medien geachtet wurde.

Ausgehend von den Überlegungen von [4] kann man basierend auf der Ähnlichkeitstheorie die bestimmenden Kennzahlen formulieren. Zunächst die Reynoldszahl:

$$Re = \frac{c \cdot d}{\nu} \quad (1)$$

Die Berücksichtigung der Reynoldszahl ist notwendig, um sicherzustellen, dass der Modellversuch oberhalb der kritischen Reynoldszahl abläuft und somit wie im Original eine turbulente Strömung vorliegt.

$$Sr = \frac{n \cdot d}{c} \quad (2)$$

Nach [4] ergibt sich die Strouhal-Ähnlichkeit als dominanter Faktor. Ersetzt man nun mit Hilfe von Gleichung (2) die Strömungsgeschwindigkeit in (1) erhält man die Ähnlichkeitsbeziehung für den Modellaufbau:

$$\frac{n_1 \cdot d_1^2}{\nu_1} = \frac{n_2 \cdot d_2^2}{\nu_2} \quad (3)$$

Gleichung (3) liefert den Zusammenhang zwischen Drehzahl  $n$ , Zylinderdurchmesser  $d$  und kinematischer Zähigkeit  $\nu$ . Die Indizes bezeichnen Original mit 1 und Modell mit 2. Das Verhältnis der Dichten von Frischgas und Verbranntem kann bei kleinen Zweitaktmotoren vernachlässigt werden, da die Vorverdichtung eher schwach ausfällt und die Temperaturen im Abgas relativ niedrig sind, somit die Dichten der Fluide nahezu gleich sind. Nun muss noch eine Beziehung für das Druckgefälle hergeleitet werden, um die dynamische Ähnlichkeit des Versuchs zum Original festzulegen. Da über die Strouhalzahl der Zeitmaßstab feststeht, ergibt sich mit der Eulerzahl:

$$Eu = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot c^2} \quad (4)$$

die notwendige Bedingung:

$$\frac{\Delta p_1}{\rho_1 \cdot d_1^2 \cdot n_1^2} = \frac{\Delta p_2}{\rho_2 \cdot d_2^2 \cdot n_2^2} \quad (5)$$

## MODELLAUFBAU

Basierend auf diesen Vorüberlegungen würde ein Prüfstands Aufbau entwickelt, der aus Rapid-Prototyping Teilen aufgebaut wird, damit die Untersuchungsergebnisse

## 51.4

unmittelbar in die Entwurfsphase für neue Motoren einfließen können und eine hohe geometrische Ähnlichkeit erreicht wird. Als Medium werden Wasser und gefärbte Flüssigkeiten auf Wasserbasis verwendet. Dadurch und wegen des geometrischen Maßstabs von 1 : 4,75 kann der Zeitmaßstab um etwa 500 gedehnt werden, woraus sich eine sehr gute zeitliche Auflösung ergibt. Bild 1 zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau.

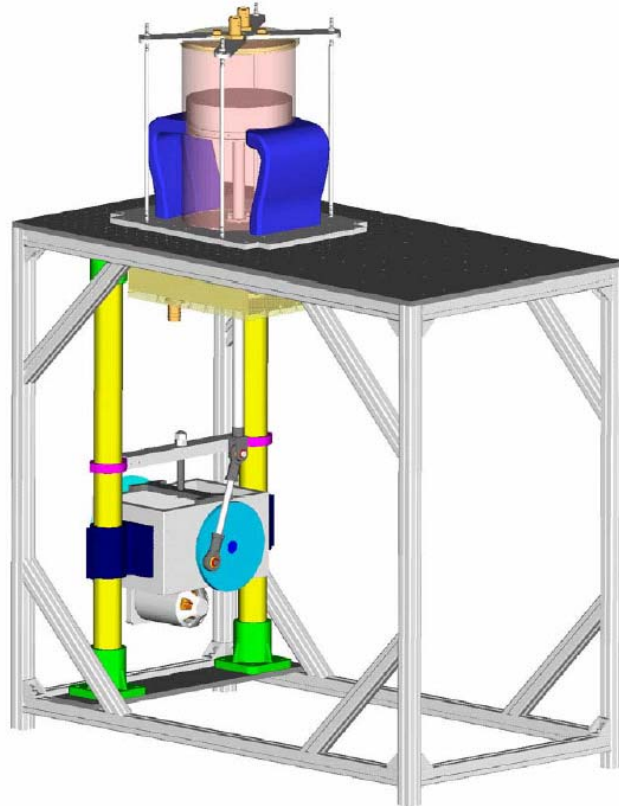


Bild 1: Versuchsaufbau, schematische Darstellung.



Details vom Zylinder und einem seitlichen Überströmkanalpaar zeigt Bild 2. Der durchströmte Innenraum ist mit einer eingefärbten Flüssigkeit gefüllt.

Bild 2: Detailansicht vom Versuchsaufbau, Zylinder mit Überströmkanal

## ERGEBNISSE

Mit dem hier dargestellten Versuchsstand erreicht man nicht nur optische Zugänglichkeit zur Spülströmung im Zylinder, sondern eben wegen des geometrischen Maßstabes von 1 : 4,75 auch zur Strömung innerhalb der Überströmkanäle, deren Höhe statt der üblichen 5 mm nun fast 25 mm beträgt. Nun ist insbesondere die Strömung im Inneren der Kanäle von Bedeutung, wenn es um die Untersuchung von Motoren mit Spülvorlage geht. Bei diesen Motoren werden die Überströmkanäle simultan zum Kurbelgehäuse befüllt, allerdings werden die Kanäle mit Reinluft durchströmt, während das Kurbelgehäuse die übliche Kraftstoff-Luft-Gemischbefüllung erhält. Die Qualität der Reinluftbefüllung bestimmt zu einem erheblichen Teil das Ergebnis der Spülströmung hinsichtlich des Kohlenwasserstoffausstoßes infolge nicht im Zylinder gefangener Anteile des Kraftstoff-Luft-Gemisches. Weiterhin bestimmt die Spülströmung im Zylinder den HC-Ausstoß und zwar durch die Ausbildung der Reinluftzone zwischen Zylinderauslass und kraftstoffbeladener Luft, die aus dem Kurbelgehäuse einströmt.

Zunächst haben sich für den Prüfstand einige Anwendungen zur Visualisierung ergeben, die mit gefärbten wässrigen Flüssigkeiten durchgeführt wurden. Im Bild 3 werden die Ansichten für die nachfolgenden Strömungsbilder erklärt.

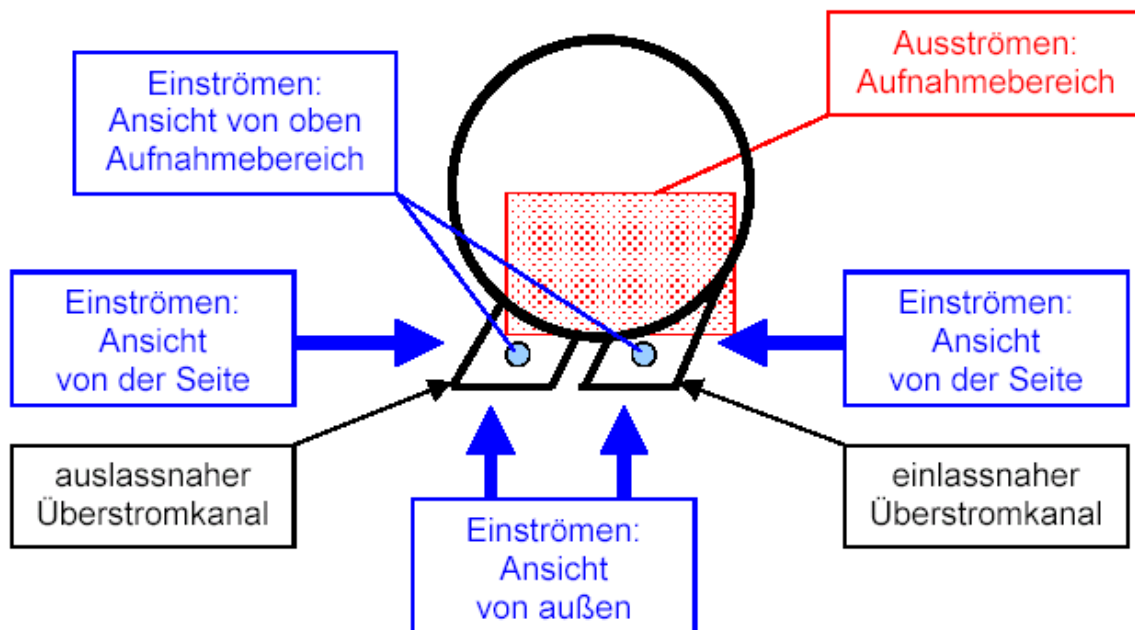


Bild 3: Übersicht der Ansichten für die Visualisierung und Bezeichnung der Überströmkanäle.

Bild 4 und 5 zeigen Ansichten der Strömung in den Überströmkanälen, wenn sie von Reinluft befüllt werden, d.h. dann ist die Strömungsrichtung der des Spülvorgangs entgegengesetzt.

## 51.6



Bild 4: Seitenansicht des auslassnahen Überströmkanals beim Befüllvorgang, d.h. Einströmen von der Zylinderseite

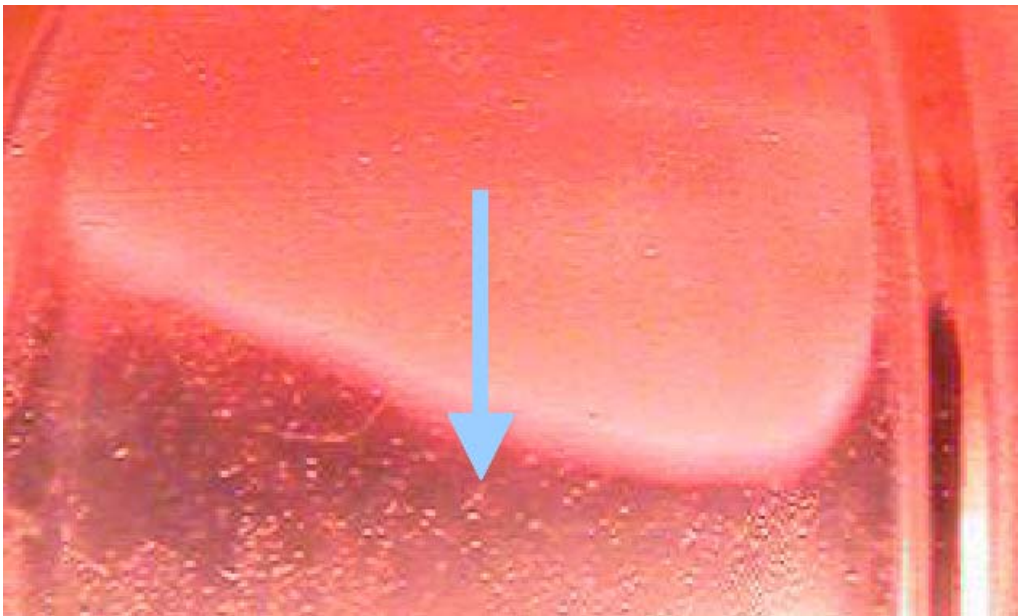


Bild 5: Draufsicht auf den horizontalen Teil des auslassnahen Überströmkanals beim Befüllvorgang, d.h. Einströmen von der Zylinderseite.

Trotz des Streckungsverhältnisses (Höhe zu Breite) des Kanalquerschnitts ist der dreidimensionale Charakter der Befüllungsströmung zu erkennen, der einer sauberen Ladungsschichtung entgegenwirkt.

Eine weitere Stärke der hier vorgestellten Untersuchungsmethode liegt in der Flexibilität, mit der auf Modifikationen reagiert werden kann, die sich naturgemäß während der Entwicklung eines neuen Motors ständig ergeben. Wie solche Eingriffe unmittelbar im Versuchsbetrieb vorgenommen werden können, zeigen die folgenden Bilder. Dargestellt sind Aufnahmen von der Spülströmung im Zylinder, jeweils einer bestimmten Kanalgeometrie zugeordnet.

Die Form der Überströmkanäle wird vom Auftraggeber mitgeteilt. Hier reichen z.B. einfache Skizzen, die dann durch Plastilineinbauten am Versuchsmodell abgebildet werden können. Bild 6 illustriert den Ablauf.

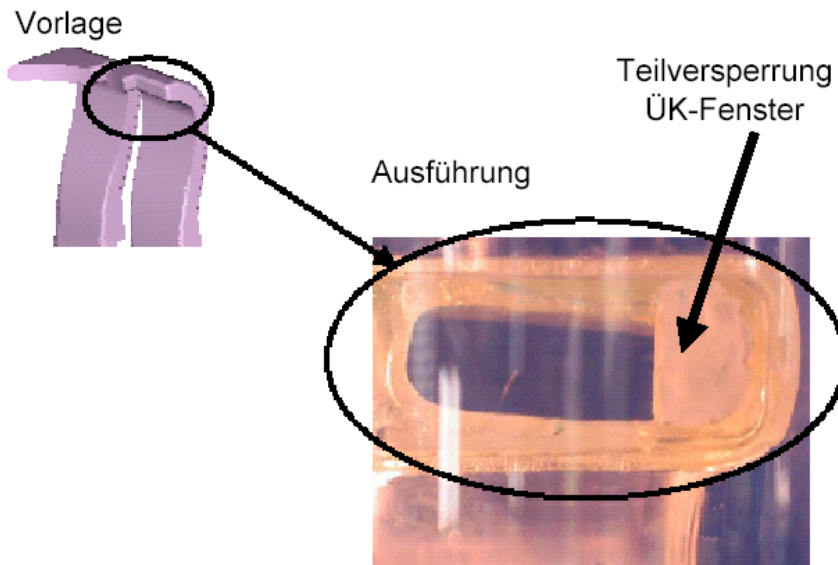


Bild 6: Schematischer Ablauf der Übertragung einer Modifikation von der Skizze zum Versuchstand.

Wie Bild 6 beschreibt, wurde die Fensterbreite des auslassseitigen Überströmkanals zum Zylinder verringert, indem entweder eine einfache Wand oder andere Einbauten eingesetzt wurden. Es stellte sich ein deutlicher Effekt auf das Spülbild ein. Ab einer gewissen Ausführung wurde die wandnahe zum Auslass gerichtete Störströmung vollständig unterdrückt, was den Schluss nahe legt, dass eine solche Konfiguration zu geringen Spülverlusten und damit zu geringeren Kohlenwasserstoffemissionen neigt.

## 51.8

Ergebnis

wandnahe  
Strömung  
Richtung  
Auslass



Bild 7: Blick in den Zylinder, Draufsicht vom Spülvorgang. Der auslassnahe Überströmkanal ist teilweise versperrt.



Bild 8: Blick in den Zylinder, Draufsicht vom Spülvorgang. Der auslassnahe Überströmkanal ist teilweise versperrt, optimierte Kanalgeometrie.

Die vorgelegten Ergebnisse der Visualisierung mit gefärbten Fluiden belegen eindeutig das Potential des Versuchsaufbaus. Interessant für den Vergleich mit numerisch ermittelten Daten sind Lichtschnittaufnahmen von Strömungen, insbesondere wenn die Lichtebene geometrisch analog zur berechneten Ebene durch das Modell gelegt wird. Natürlich bieten sich hier Axialschnitte an, aber auch radiale Ebenen sind möglich.



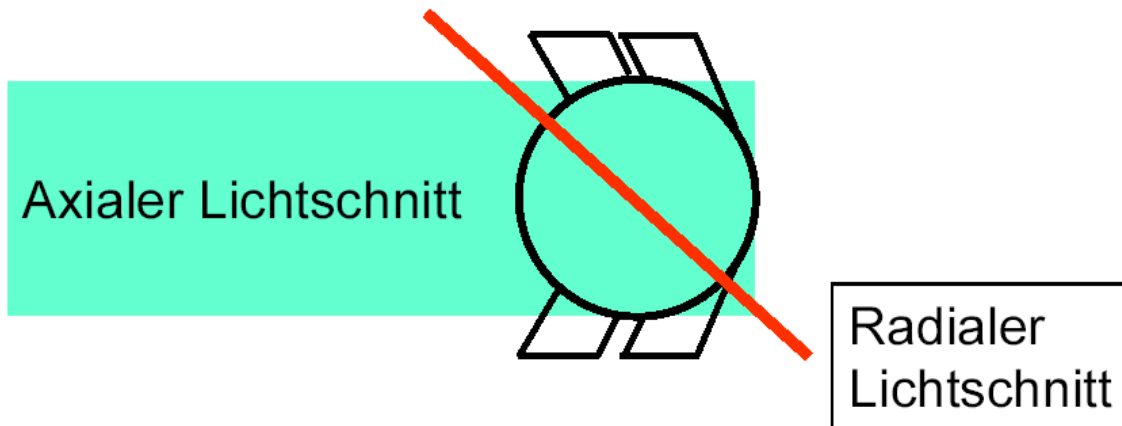


Bild 9: Anordnung der Lichtschnittebenen relativ zum Modellzylinder.

Ähnlich der Anordnung der axialen Lichtebeine lassen sich aufgrund der guten optischen Zugänglichkeit auch quantitative Verfahren wie z. B.: PIV oder DGV anwenden. Letztere wurde bei der Untersuchung von Zylinderköpfen eingesetzt, wobei ein optischer Zugang durch die Zylinderwand für die orthogonal stehenden Lichtschnitte geschaffen wurde. Die Geschwindigkeitsinformation wurde durch eine auf der Zylinderachse angeordnete Kamera aufgezeichnet [7].

## ZUSAMMENFASSUNG

Es wird ein Prüfstand zur Untersuchung der Strömung im Inneren von Zweitakt-Zylindern vorgestellt. Unter Einhaltung der Ähnlichkeitsgesetze ist es möglich die Strömungsvorgänge bei extrem gedehntem Zeitmaßstab und guter räumlicher Auflösung zu beurteilen. Es wird die Anwendung von Visualisierungsmethoden gezeigt und ein Ausblick auf den Einsatz von quantitativen Messverfahren gegeben. Durch das Zusammenspiel von den verschiedenen experimentellen Methoden kann ein detailliertes Bild der Spülströmung und der Strömung in den Überströmkanälen ermittelt werden. Durch geeignete Aufbereitung sind diese Daten hervorragend geeignet, um mit numerisch berechneten Daten vergleichen zu werden. Insgesamt kann diese Untersuchungsmethode unmittelbar bei der Konzeption von neuen Motoren im Entwicklungsprozess eingesetzt werden und kann damit einen entscheidenden Beitrag zur effizienten Entwicklung von abgasarmen Zweitaktmotoren für handgeführte Arbeitsgeräte liefern.

## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Stuecke et al., Development of an Electronically Controlled Carburetion System to Reduce the Exhaust Emissions of Small IC Engines for Handheld Power Tools, SETC 2002, Kyoto; SAE 2002-32-1844.
- [2] Rosskamp et al., Scavenge Loss Mechanisms and Their Driving Forces in Loop-Scavenged High-Performance Two-Stroke Engines, SETC 2001, Pisa; SAE 2001-01-1826/4247
- [3] Blair, Design and Simulation of Two-Stroke Engines, 1996, SAE R-161, Warrendale.
- [4] Dedeoglu, Modelluntersuchungen zur Spülung und Gemischbildung in einem Verbrennungsmotor (Dissertation), ETH Zürich 1968, Blum + Good, Winterthur.
- [5] Benteyin et al., Engine Scavenging Optimization, SETC 2002, Kyoto; SAE 2002-32-1843.
- [6] Merzkirch, Flow Visualization, 2<sup>nd</sup> edition, 1987, Academic Press, London.
- [7] Willert et al, Application of Planar Doppler Velocimetry within Piston Engine Cylinders, 11<sup>th</sup> International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Engines, 2002, Lisbon.

## AUTOREN

### **Prof. Dr.-Ing. Peter Stücke**

Westsächsische Hochschule Zwickau (FH)  
University of Applied Sciences  
Postfach 201037  
08012 Zwickau  
Tel.: 0375 536-2139  
Fax: 0375 536-2102  
e-mail: peter.stuecke@fh-zwickau.de

### **Prof. Dr.-Ing. Christoph Egbers**

Lehrstuhl Aerodynamik und Strömungslehre (LAS)  
Institut für Verkehrstechnik  
Fakultät Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen  
Siemens-Halske-Ring 1  
03044 Cottbus  
Tel.: 0355 355-4868  
Fax: 0355 355-4891  
e-mail: christoph.egbers@tu-cottbus.de

### **Dipl.-Ing. Werner Geyer**

Andreas Stihl AG & Co.  
Postfach 1771  
71307 Waiblingen  
Tel.: 07151 26-2394  
Fax: 07151 268-2394  
e-mail: werner.geyer@stihl.de