

GESCHWINDIGKEITSMESSUNGEN IM NAHBEREICH VON VENTILEN DER BENZINDIREKTEINSPRITZUNG MIT DER LASERKORRELATIONSVELOCIMETRIE UND QUANTIFIZIERUNG DES LUFTEINTRAGS MIT DER PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY

C. Seibel*, **K. Gartung***, **S. Arndt***, **B. Weigand****

* Robert Bosch GmbH, 70049 Stuttgart

** ITLR, Universität Stuttgart

Abstract

Für eine zielgerichtete Entwicklung von Injektoren der Benzindirekteinspritzung (BDE) ist ein vertieftes Verständnis der grundlegenden Strömungsprozesse innerhalb und außerhalb der Einspritzventile erforderlich. In dieser Arbeit wird der Einfluss der Ventilgeometrie auf die Strömungsfelder im ventilt nahen Bereich untersucht. Zur Bestimmung der Spraygeschwindigkeiten wird die Laserkorrelationsvelocimetrie (LCV) erstmals für BDE-Sprays angewandt. Die Geschwindigkeitsfelder in der Gasphase werden mit der Particle Image Velocimetry (PIV) bestimmt.

Die untersuchten Einstrahlventile zeigen deutliche Unterschiede im radialen Profil der Spraygeschwindigkeiten. Diese Asymmetrien finden sich auch im Strömungsfeld der umgebenden Gasphase wieder. Es werden Grenzschichten identifiziert, in denen ein intensiver Impulsaustausch zwischen Tropfen und Gasphase stattfindet. Der Lufteintrag ins Spray wird für die untersuchten Ventile quantifiziert und bestätigt die gefundenen Asymmetrien.

Einleitung

Von den verschiedenen Brennverfahren für die Benzindirekteinspritzung besitzen strahlgeführte Brennverfahren das größte Potenzial zur Verbrauchsminimierung bei gleichzeitiger Leistungssteigerung. Dieses Konzept ist durch eine geometrisch nahe Anordnung von Einspritzventil und Zündkerze gekennzeichnet. Es stellt hohe Ansprüche an den Gemischbildner hinsichtlich definierter Sprayausbildung und schneller Verdampfung, siehe Ortmann et al 2001.

Für die geometrische Auslegung der Einspritzventile ist der Zusammenhang von Ventilgeometrie und Sprayverhalten von großem Interesse. Untersuchungen an Dieselinjektoren zeigen einen signifikanten Einfluss der Ventillinnenströmung auf das Spray, Hiroyasu et al 1991. Das Strömungsfeld im Spritzloch beeinflusst über die Geschwindigkeitsverteilung im Austrittsquerschnitt die Sprayausbildung und über die Turbulenzgenerierung den primären Strahlauflbruch. Durch den Impulsaustausch zwischen den gebildeten Tropfen und der umgebenden Gasphase bildet sich ein Strömungsfeld aus, welches an der Strahlwurzel in das Spray gerichtet ist. Dieser Lufteintrag versorgt das Spray mit ungesättigter Luft und fördert so den Verdampfungsprozess, siehe Arndt et al 2001.

In der vorliegenden Arbeit wird an Einstrahlventilen der Einfluss der Ventilgeometrie auf das Geschwindigkeitsfeld im Spray und in der umgebenden Gasphase, den Strahlzerfall und den Lufteintrag ins Spray untersucht. Zur Bestimmung der Spraygeschwindigkeiten im ventilt nahen Bereich wird die Laserkorrelationsvelocimetrie (Laser-2-Fokus-Verfahren) eingesetzt.

Sie wurde erstmals von Chaves et al 1993 für Dieselsprays angewendet. Mit der Particle Image Velocimetry wird das Strömungsfeld der umgebenden Gasphase im ventilmahen Bereich bestimmt. Für die räumliche Quantifizierung des Lufteintrags wird der Luftmassenstrom über die Sprayoberfläche bilanziert, siehe Seibel et al 2003.

Laserkorrelationsvelocimetrie

Mit der Laserkorrelationsvelocimetrie können orts- und zeitaufgelöst Geschwindigkeitsverläufe in Sprays bestimmt werden. Das Verfahren beruht auf dem Lichtschrankenprinzip, wobei hier die Zeit bestimmt wird, welche Spraystrukturen benötigen, um eine definierte Messstrecke zu durchfliegen. Dafür werden Streulichtsignale von zwei benachbarten Stellen im Spray detektiert. Ist der Abstand der Messpunkte so klein, dass charakteristische Spraystrukturen zwischen den Messpunkten erhalten bleiben, so sind auch die zeitlichen Verläufe der Streulichtsignale ähnlich. Aus dem zeitlichen Versatz der beiden Signale kann daher auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Sprays geschlossen werden.

Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung des Messaufbaus. Ein Helium-Neon-Laser emittiert einen linear polarisierten Laserstrahl der Wellenlänge 632,8 nm. Die Polarisationsrichtung dieses Strahls wird mit einer $\lambda/2$ -Platte so gedreht, dass das nachfolgende Wollaston-Prisma den Strahl in einen horizontal polarisierten und einen vertikal polarisierten Strahl gleicher Intensität zerlegt. Die beiden Teilstrahlen werden nach vorheriger Aufweitung fokussiert. Die Brennpunkte der Teilstrahlen bilden die relevanten Messvolumina, mit der Rayleigh-Länge und dem $1/e^2$ -Radius der Strahlen als deren Ausdehnung. Die gestreuten Signale werden über eine weitere Linse und ein Strahlteilungsprisma, welches die beiden Teilstrahlen geometrisch trennt, mittels Photodioden detektiert. Zur Positionierung der Messvolumina im Spray ist das Ventil translatorisch in drei Achsen und rotatorisch in einer Achse verstellbar. Der Abstand der Messvolumina beträgt bei der verwendeten Konfiguration 106 μm . Der Strahldurchmesser beträgt ca. 15 μm und erlaubt bei typischen Spritzlochdurchmessern in der Größenordnung von 100-200 μm eine ausreichend hohe räumliche Auflösung, selbst im ventilmahen Bereich.

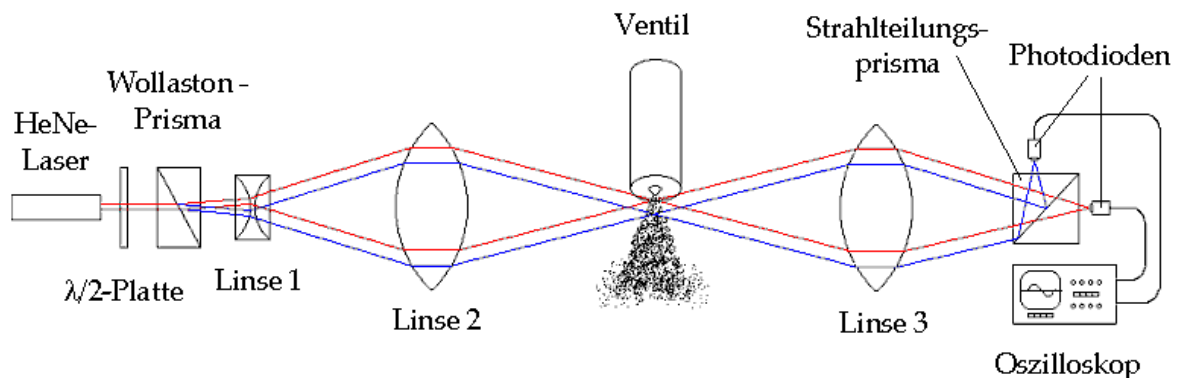


Abb. 1: Schematischer Aufbau der Laserkorrelationsvelocimetrie

In Abbildung 2 sind beispielhaft zwei zeitliche Signalverläufe dargestellt. Man sieht im vergrößerten Ausschnitt, dass die Signale der beiden Messvolumina sehr ähnlich und nur um wenige μs zeitversetzt sind.

Der zeitliche Versatz zwischen den Streulichtsignalen lässt sich durch Berechnung ihrer Kreuzkorrelationsfolge bestimmen, siehe Schüßler 1988. Zur Bestimmung des zeitlichen Verlaufes der Geschwindigkeit wird die Kreuzkorrelationsfolge für zeitliche Segmente der Streulichtsignale, sogenannte Auswertefenster, berechnet. Der ermittelte Zeitversatz ist dann ein Mittelwert aller Einzelereignisse im betrachteten Segment. Als Kriterium für die Eindeutigkeit eines ermittelten Zeitversatzes gilt das Verhältnis von Hauptmaximum zu größtem Nebenmaximum der jeweiligen Kreuzkorrelationsfolge. Für Auswertefenster mit

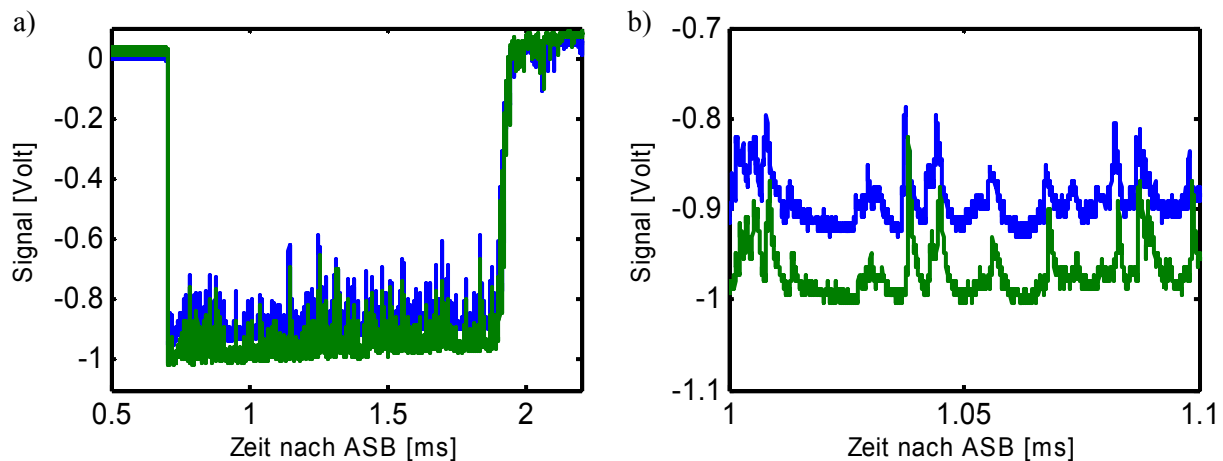


Abb. 2: a) Streulichtintensitätsverläufe der LCV und b) zeitlich vergrößerter Ausschnitt zur Verdeutlichung der Signaleigenschaften.

unkorrelierten Ereignissen oder Signalrauschen geht dieser Qualitätsfaktor gegen eins, siehe Leick et al 2004.

Für diese Arbeit werden Auswertefenster mit einer Länge von $60 \mu\text{s}$ gewählt, welche sich um 66 % überlappen. Vor und nach der Einspritzung enthalten die Streulichtsignale nur Signalrauschen, weshalb die Kreuzkorrelation für Auswertefenster in diesen Bereichen keine eindeutigen Ergebnisse liefern kann. Diese Ergebnisse werden vernachlässigt, da ihre Qualitätsfaktoren den gewählten Schwellwert von 1,5 unterschreiten. Die Geschwindigkeitsverläufe von zehn Messungen werden gemittelt und für jeden mittleren Geschwindigkeitsverlauf wird eine stationäre Geschwindigkeit für den quasi-stationären Bereich der Einspritzung berechnet, siehe Abbildung 4. Das Verhältnis aus gemessener Geschwindigkeit und maximal erreichbarer Bernoulli-Geschwindigkeit ist ein Maß für die Reibungsverluste im Ventil.

Particle Image Velocimetry

Die PIV-Messungen wurden an einer Hochdruck-/Hochtemperaturkammer durchgeführt, an der Drücke bis 20 bar und Temperaturen bis 400°C eingestellt werden können. Als Arbeitsgas wird Stickstoff verwendet. Alkoholtröpfchen mit einer Größe von 1 bis $3 \mu\text{m}$ dienen als Tracer. Als Lichtquelle steht ein frequenzverdoppelter Doppelpuls-Nd:YAG-Laser (532 nm, 50 mJ) zur Verfügung, dessen Strahl in zwei Teilstrahlen gleicher Intensität gespalten wird, die über Optiken als flache Lichtschnitte von beiden Seiten in die Kammer eingekoppelt werden. Eine hochauflösende CCD-Kamera (PCO-Sensicam) nimmt die Doppelbilder (Pulsabstand $20 \mu\text{s}$) auf, die von einer kommerziellen PIV-Software (LaVision) mit Hilfe eines Kreuzkorrelationsalgorithmus ausgewertet werden.

Spraygeschwindigkeiten im Ventalnahbereich

Die verwendeten Einstrahlventile erlauben aufgrund der besseren optischen Zugänglichkeit eine wesentlich bessere Charakterisierung der Einzelstrahlen als dies bei Mehrlochventilen der Fall wäre. Die beiden verwendeten Ventile (Ventil A,B) unterscheiden sich im Anstellwinkel γ der Spritzlöcher zur Sprayachse und damit auch in den Zuströmbedingungen zum Spritzloch. Der Einspritzdruck beträgt 100 bar, die Einspritzdauer 1,2 ms. Die Geschwindigkeitsmessungen werden entlang der radialen Sprayrichtung mit einer hohen räumlichen Auflösung ($<200 \mu\text{m}$) und entlang der axialen Sprayrichtung ($z=2-9 \text{ mm}$) durchgeführt, siehe Abbildung 3. Die positive radiale Richtung zeigt zur Ventilspitze.

Abbildung 4 zeigt beispielhaft für Ventil A Signalverläufe und die entsprechenden mittleren Geschwindigkeitsverläufe aus der Strahlmitte und aus dem Strahlrand. Aufgrund der hohen Tropfendichten und der damit höheren Extinktion der Laserstrahlen sind die Signalintensitäten in der Strahlmitte wesentlich geringer als am Strahlrand. Die gemessenen Streulichtintensitätsverläufe werden für den quasistationären Bereich der Einspritzung gemittelt. Diese Messgröße, die im folgenden als Spraydichte bezeichnet wird, ist ein Maß für die Tropfendichte im betrachteten Messvolumen. Der Geschwindigkeitsverlauf aus der Strahlmitte zeigt

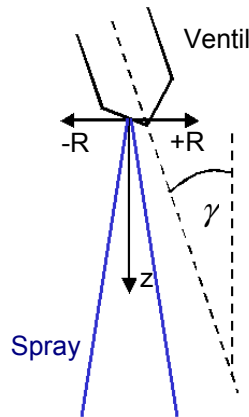


Abb. 3: Geometrische Lage der Messvolumina im Spray.

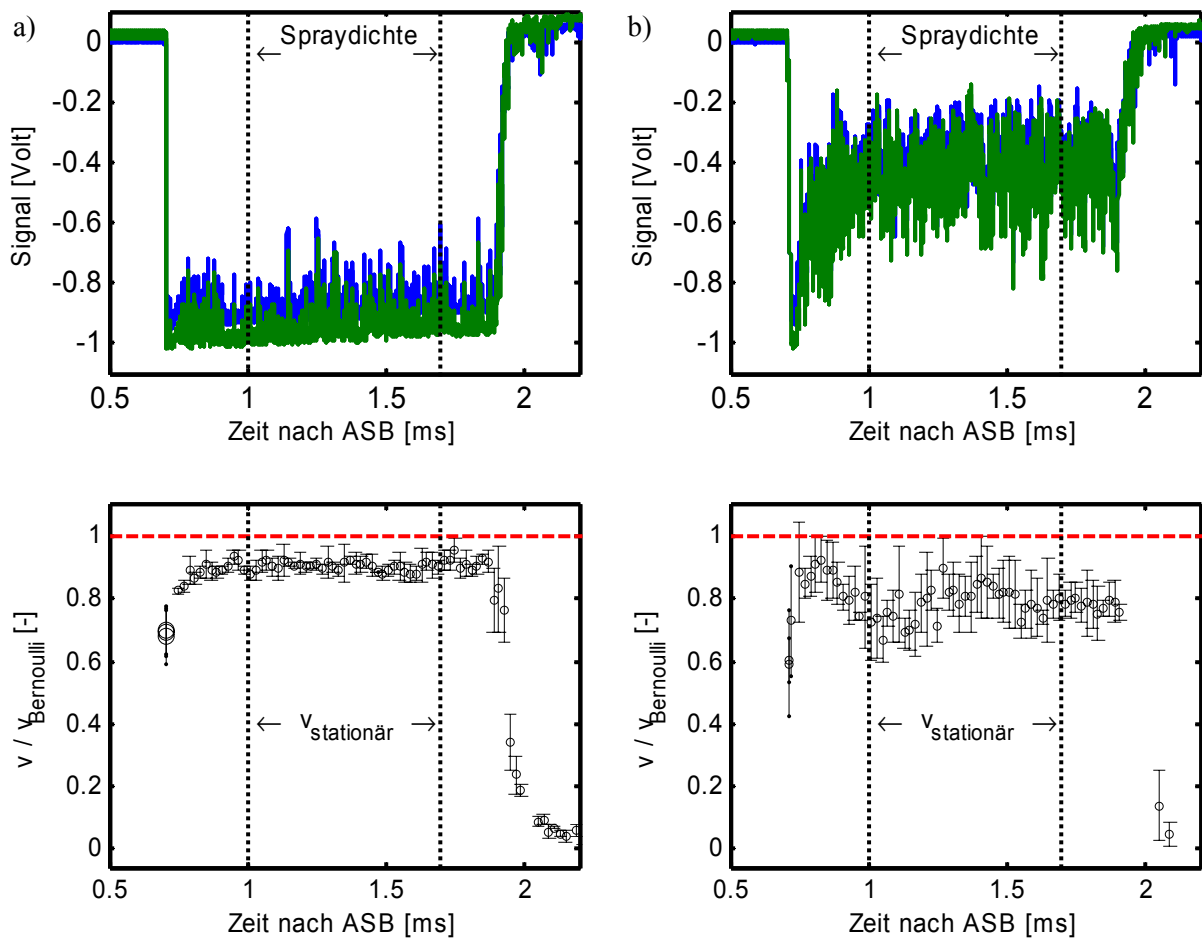


Abb. 4: Signalverläufe und mittlere Geschwindigkeitsverläufe mit Standardabweichungen aus der Strahlmitte (a) und aus dem Strahlrand (b) bei 3mm Ventilabstand für Ventil A.

nur kleine Geschwindigkeitsschwankungen, welche aufgrund von Raildruckschwankungen auftreten. Die Geschwindigkeiten von Einspritzung zu Einspritzung sind sehr gut reproduzierbar. Am Strahlrand nehmen die Geschwindigkeiten leicht ab und größere Geschwindigkeitsschwankungen sind zu erkennen. Die hohen Standardabweichungen zeigen, dass die Geschwindigkeitsverläufe von Einspritzung zu Einspritzung stark variieren. Die starken Schwankungen im Geschwindigkeitsverlauf und die schlechte Reproduzierbarkeit am Strahlrand werden durch die erhöhte Wechselwirkung zwischen Flüssigphase und umgebender Gasphase in diesem Bereich verursacht. Die gemessenen Geschwindigkeiten in der Strahlmitte liegen nahe an der maximal erreichbaren Geschwindigkeit nach Bernoulli.

In Abbildung 5 sind radiale Geschwindigkeitsprofile der stationären Spraygeschwindigkeiten für verschiedene Ventilabstände dargestellt. Man erkennt bei Ventil A erhöhte Geschwindigkeiten an der nach außen gerichteten Strahlseite (-R), während die Geschwindigkeitsprofile bei Ventil B annähernd symmetrisch sind. Dies lässt sich sehr anschaulich darstellen, wenn man Isolinien für konstante Geschwindigkeiten über den axialen und radialen Positionen im Spray aufträgt, Abbildung 5. Die Asymmetrien in den radialen Geschwindigkeitsprofilen, wie sie nahe am Spritzlochaustritt zu sehen sind, setzen sich konsistent mit größerem Ventilabstand fort. Abbildung 5 zeigt weiterhin bei Ventil A einen steilen Geschwindigkeitsgradienten am äußeren Strahlrand (-R) und einen im Vergleich flachen Gradienten am inneren Strahlrand (+R). Bei Ventil B ist diese Asymmetrie weniger stark ausgeprägt.

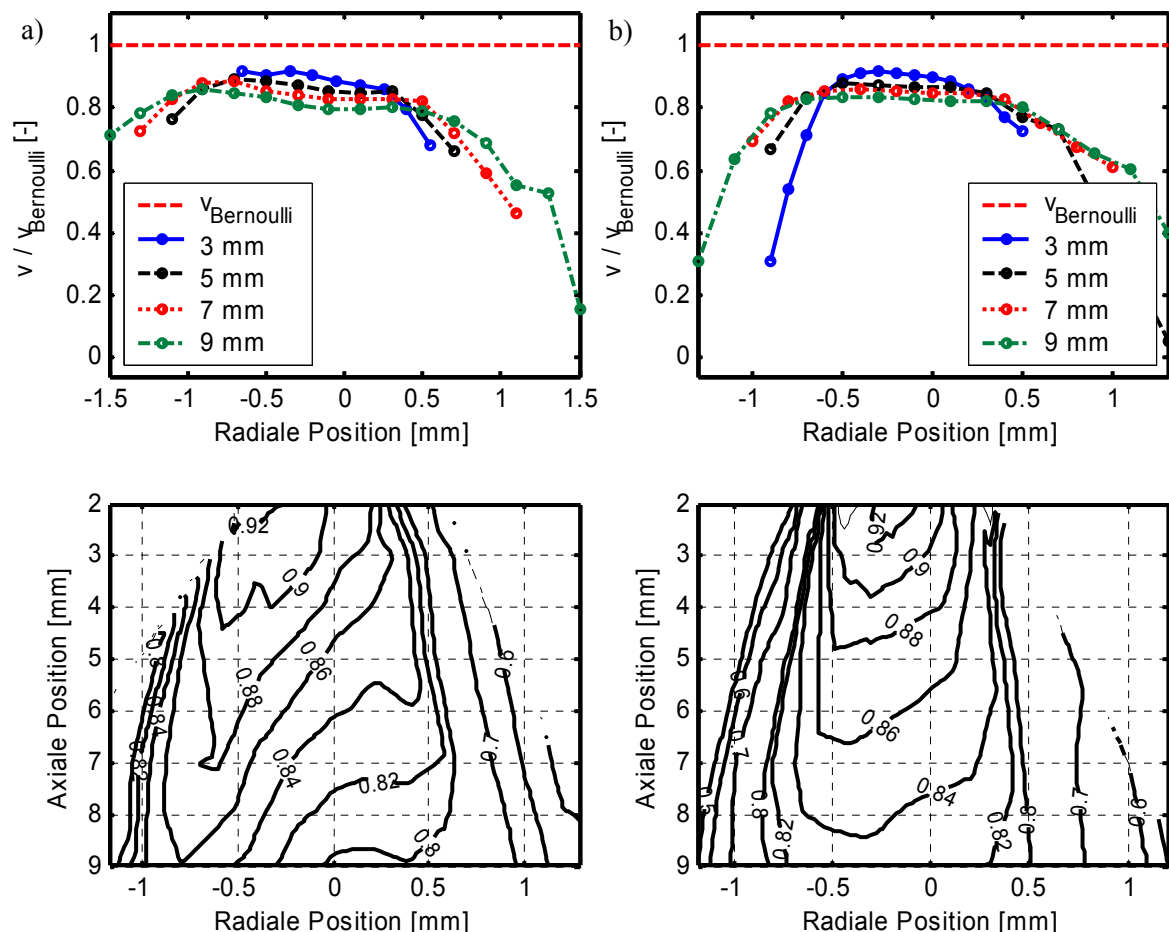


Abb. 5: Radiale Geschwindigkeitsprofile für verschiedene Ventilabstände und Isolinienplot der räumlichen Geschwindigkeitsverteilung für Ventil A (a) und Ventil B (b).

In Abbildung 6 ist die mit ihrem Maximalwert normierte Spraydichte und die Spraygeschwindigkeit als radiales Profil bei 3 mm Ventilabstand dargestellt. Es fällt auf, dass bei Ventil A die gemessenen Spraygeschwindigkeiten zum äußeren Strahlrand (-R) mit abnehmenden Spraydichten nicht abfallen. Die Grenzschicht zwischen Flüssigphase und umgebender Gasphase ist hier sehr dünn. Am inneren Strahlrand (+R) hat man hingegen einen breiten Bereich mit niedrigen Spraydichten, in dem die Tropfengeschwindigkeiten zum Rand hin erwartungsgemäß abfallen. Bei Ventil B sind an beiden Strahlrändern ausgeprägte Grenzschichten mit abfallenden Spraydichten und Geschwindigkeiten zu erkennen, mit etwas breiterer Grenzschicht am äußeren Strahlrand (-R). Das symmetrische Geschwindigkeitsverhalten zeigt sich hier also auch im Verhalten der Spraydichte. Die Ausbildung von Ablösegebieten im Spritzloch aufgrund der unterschiedlichen Zuströmbedingungen in die Spritzlöcher und das Aufbruchverhalten des Strahls können Ursache für die Beobachtung unterschiedlich ausgeprägter Grenzschichten im Ventilhahbereich sein. Das unterschiedlich starke Abfallen der Spraygeschwindigkeiten am Strahlrand deutet auf eine entsprechend unterschiedlich intensive Wechselwirkung zwischen Flüssig- und Gasphase hin. So ist am äußeren Strahlrand (-R) von Ventil A eine nur geringe Wechselwirkung und am äußeren Strahlrand (-R) von Ventil B eine hohe Wechselwirkung zwischen der Flüssig- und Gasphase zu erwarten.

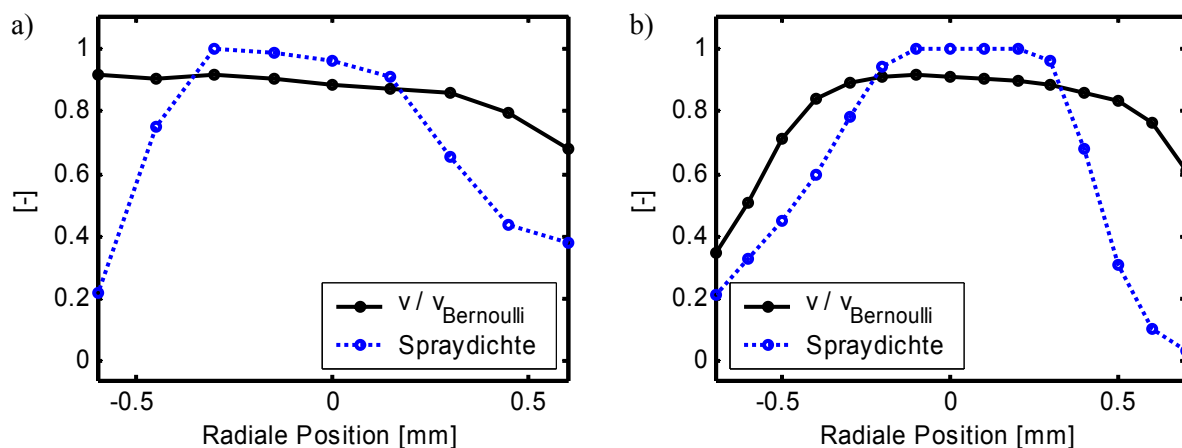


Abb. 6: Radiale Profile der Geschwindigkeit und normierte Spraydichte bei 3 mm Ventilabstand für Ventil A (a) und Ventil B (b).

Quantifizierung des Lufteintrags im Ventilhahbereich

Ein hoher Lufteintrag an der Strahlwurzel versorgt das Spray mit ungesättigter Luft und verbessert so wesentlich die Verdampfungsgeschwindigkeit. Durch den Impulsaustausch zwischen Tropfen und Gasphase wird ein Strömungsfeld in der Umgebung des Sprays induziert, welches den Lufteintrag bestimmt. Dieser Impulsaustausch findet im Ventilhahbereich hauptsächlich in der Grenzschicht zwischen Spray und umgebender Gasphase statt. Je breiter diese Grenzschicht und je kleiner die Tropfengrößen sind, desto intensiver findet der Impulsaustausch statt und desto größer sind die induzierten Spraygeschwindigkeiten und damit der Lufteintrag ins Spray. Um den Einfluss der Ventilgeometrie auf den Lufteintrag zu untersuchen, wurden die Gasgeschwindigkeiten im Ventilhahbereich der Einstrahlventile mit PIV bestimmt und der Lufteintrag ins Spray quantifiziert.

Die Ergebnisse der PIV-Messungen sind in Abbildung 7 dargestellt. Die Bilder links zeigen die Gasgeschwindigkeiten für Ventil A und B 1ms nach Einspritzbeginn. Ihnen überlagert ist die Spraykontur, welche für einen Schwellwert der Streulichtintensitäten aus den entsprechenden Laserlichtschnitten bestimmt wurde. Sowohl das Strömungsfeld, als auch die er-

mittelte Spraykontur sind ein Mittelwert aus 20 Einspritzungen. Die Skalierung der Geschwindigkeitsvektoren ist in beiden Bildern gleich.

Es sind signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten Ventilen zu erkennen. Bestimmt man an der Spraykontur für jede Strahlhälfte einen Spraywinkel im ventilt nahen Bereich, so ist der nach innen gerichtete Spraywinkel (+R) bei Ventil A um 5° größer als der nach außen gerichtete (-R). Wegen dieses größeren Spraywinkels ist der Strahl von Ventil A insgesamt breiter. Dies deckt sich mit der Beobachtung, dass bei diesem Ventil am inneren Strahlrand (+R) eine breite Grenzschicht zwischen Flüssig- und Gasphase existiert, in der offensichtlich Strahlaufbruch und Impulsaustausch zwischen den Phasen stattfindet. Dementsprechend sind die sprayinduzierten Gasgeschwindigkeiten in der Umgebung der inneren Strahlseite (+R) wesentlich größer. Auf der äußeren Strahlseite (-R) werden aufgrund der sehr dünnen Grenzschicht nur kleine Gasgeschwindigkeiten induziert. Ventil B besitzt eine symmetrische Spraykontur. Auch das Strömungsfeld ist im Vergleich zu Ventil A annähernd symmetrisch zur Sprayachse. Auf der äußeren Strahlseite (-R), wo eine breitere Grenzschicht zu beobachten ist, werden etwas höhere Gasgeschwindigkeiten induziert.

Für die Quantifizierung des Lufteintrags ins Spray wird der Luftmassenstrom über die Sprayoberfläche bilanziert. Er berechnet sich mit der senkrechten Komponente der Gasgeschwindigkeit auf der Spraykontur \vec{v}_g , der Dichte ρ_g der Gasphase und der Sprayoberfläche S zu

$$\dot{m} = \iint_S \vec{v}_g \rho_g dS.$$

Die Sprayoberfläche wurde durch Rotation der Spraykontur um die Sprayachse bestimmt. Der Lufteintrag wird wesentlich durch den Betrag der in das Sprayvolumen gerichteten Gasgeschwindigkeit, aber auch durch die Größe der Sprayoberfläche bestimmt. Abbildung 7 zeigt die Normalen der Gasgeschwindigkeit auf der Spraykontur. Die in das Spray gerichteten Gasgeschwindigkeiten sind bei Ventil B wesentlich größer. Dies deutet auf einen insgesamt besseren Strahlaufbruch und damit kleinere Tropfengrößen bei Ventil B hin. Vor allem am äußeren Strahlrand (-R) findet ein intensiver Lufteintrag statt. Bei beiden Ventilen nehmen die Geschwindigkeiten ab 15 mm Ventilabstand ab. Die Bilanzierung des Lufteintrags wurde für Segmente der Sprayoberfläche mit je 1,5 mm Höhe entlang der Sprayachse durchgeführt. Ventil B hat entsprechend den höheren Geschwindigkeiten den größeren auf die Sprayoberfläche bezogenen Lufteintrag. Durch den größeren Spraywinkel und die damit größere Sprayoberfläche ist der Massenstrom in das Spray bei Ventil A hingegen fast gleich groß.

Zusammenfassung

Anhand von Einstrahlventilen wurde der Einfluss der Ventilgeometrie auf das Geschwindigkeitsfeld im Spray und in der umgebenden Gasphase im ventilt nahen Bereich untersucht. Dafür wurde die Laserkorrelationsvelocimetrie erstmals für Sprays der Benzindirekteinspritzung eingesetzt.

Die untersuchten Ventile zeigten deutliche Unterschiede in den radialen Geschwindigkeitsprofilen. Die Signalintensitäten der Laserkorrelationsvelocimetrie wurden als Maß für die Spraydichte verwendet. Damit ließen sich Grenzschichten zwischen Tropfen und Gasphase identifizieren, die durch eine geringe Spraydichte gekennzeichnet sind. Messungen mit der Particle Image Velocimetry zeigten in der Umgebung ausgeprägter Grenzschichten die höchsten Gasgeschwindigkeiten, was auf einen intensiven Impulsaustausch zwischen Tropfen und Gasphase in diesen Bereichen schließen lässt und den Lufteintrag ins Spray erhöht. Die Ergebnisse der Particle Image Velocimetry bestätigen damit in vollem Umfang die mit der Laserkorrelationsvelocimetrie gefundenen Strahleigenschaften. Die vorgestellten Messtechniken eignen sich daher sehr gut zur Charakterisierung von Sprays der Benzindirekteinspritzung.

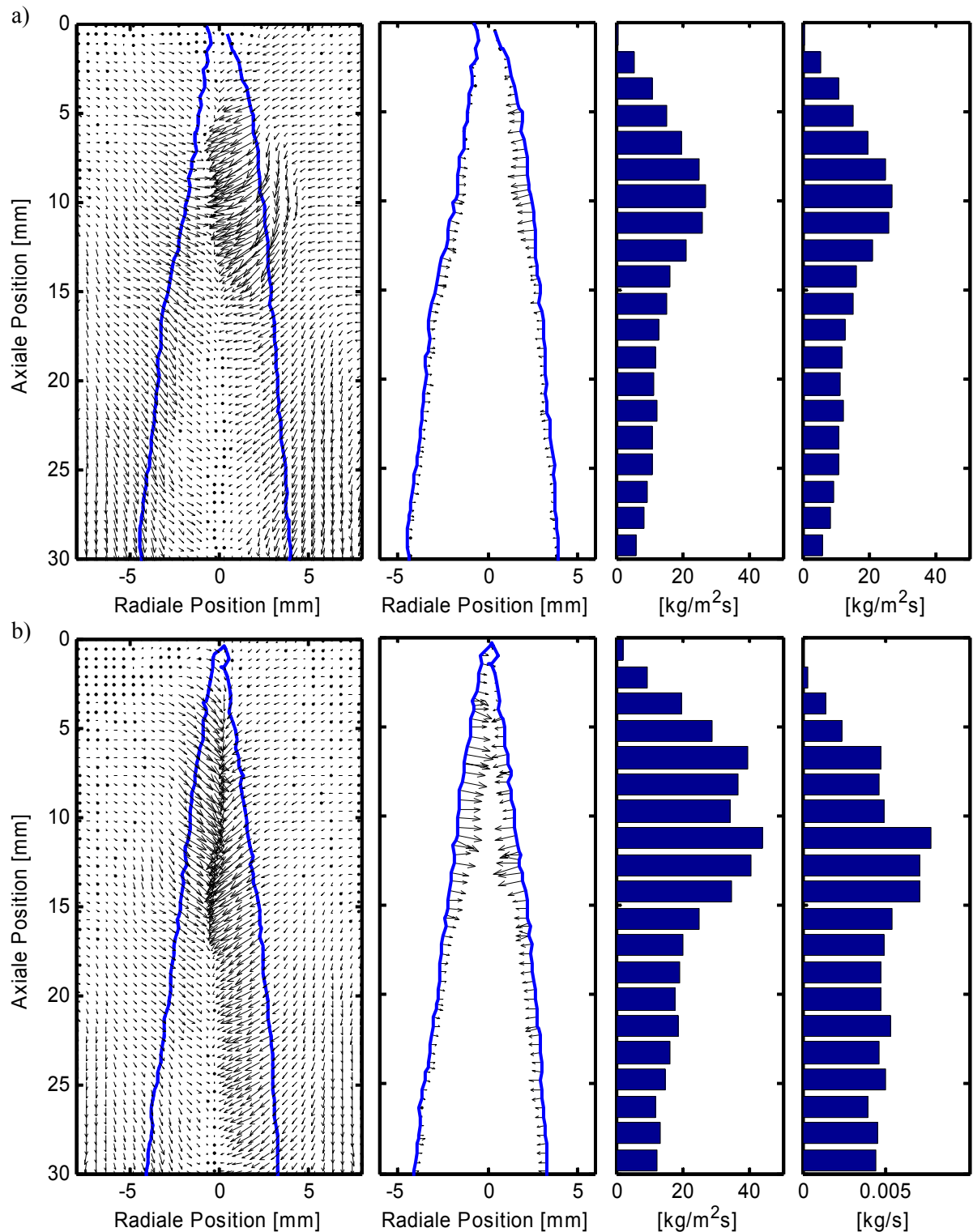


Abb. 7: Geschwindigkeitsfelder der Gasphase und überlagerte Spraykonturen, senkrechte Komponenten der Gasgeschwindigkeiten auf der Spraykontur, auf die Sprayoberfläche bezogener Lufteintrag und Lufteintrag für Ventil A (a) und Ventil B (b).

Literatur

Arndt, S., Gartung, K., Brüggemann, D., 2001: „Spray structure of high pressure gasoline injectors: analysis of transient spray propagation and spray-gas momentum transfer“, Proceedings of the 15th ILASS-Europe Conference, 2001 Sep 2-6, Zürich

Chaves, H., Knapp, M., Kubitzek, A., Obermeier, F., 1993: „High Speed Flow Measurements within an Injection Nozzle“, Laser Anemometry Advances and Applications, SPIE vol. 2052

Hiroyasu, H., Arai, M., Shimzu, M., 1991: „Break-Up Length of a Liquid Jet and Internal Flow in a Nozzle“, In Proc. ICLASS-91, pp 275-282

Leick, Ph., Bittlinger, G., Tropea, C., 2004: „Velocity Measurements in the Primary-Breakup Region of Diesel Sprays at Elevated Back-Pressures“, Proc. FISITA World Automotive Congress, pp. 353

Ortmann, R., Arndt, S., Raimann, J., Grzeszik, R., 2001: „Methods and analysis of fuel injection, mixture preparation and charge stratification in different direct injected spark ignited engine“, SAE-Paper, 2001-01-0970, SP-1584

Schüßler, H. W., 1988: „Digitale Signalverarbeitung (Band 1)“, Springer-Verlag, Berlin

Seibel, C., Gartung, K., Arndt, S., Weigand, B., 2003: „Detailed Analysis of Spray Structure and Air Entrainment in GDI Sprays Using a Tomographic Approach“, In Proc. 9th ICLASS