

## BESTIMMUNG DES INTEGRALEN ZEITMASSES IN EINER TURBULENTEN STRÖMUNG AUS LDA-MESSUNGEN

### DETERMINATION OF INTEGRAL TURBULENT TIME SCALES FROM LDV-MEASUREMENTS

**Dipl.-Ing. M. Odinius, Dipl.-Ing. P. Fokaides, Dipl.-Ing. M. Weiß,**

**Prof. Dr.-Ing. N. Zarzalis, Prof. Dr.-Ing. H. Bockhorn**

Engler-Bunte-Institut, Lehrstuhl und Bereich Verbrennungstechnik, Universität Karlsruhe (TH)

Engler-Bunte-Ring 1

D-76131 Karlsruhe

Schlagworte: LDA, Autokorrelation, Energiedichtespektrum, Zeitmaß, Längenmaß

Key words: LDV, Autocorrelation, Power Spectral Density, Time Scales, Length Scales

#### Zusammenfassung

Basierend auf LDA Messungen im isothermen Strömungsfeld eines Airblast Zerstäubers werden mittels einer „Refined Sample and Hold“-Methode und der Fuzzy-Slotting Technik mit lokaler Normierung die integralen turbulenten Zeitmaße bestimmt. Es wird gezeigt, dass die Voraussagesicherheit der Abschätzung der Autokorrelationsfunktion bei beiden Verfahren nicht wie erwartet unabhängig von der Blockdauer ist, sondern von der blockdauerabhängigen Anzahl der Messdatenpaare im Intervall und somit von der Datenrate abhängig ist und mit steigender Datenrate besser wird. Die „Refined Sample and Hold“-Methode ist in der untersuchten Strömung besser zur Abschätzung der gesuchten Größen geeignet. Das integrale turbulente Zeitmaß nimmt in ähnlichen Strömungsfeldern mit steigendem Durchsatz ab. In der Strahlmitte weist es ein Minimum auf, während es an den Strahlrändern und in der Rückströmzone deutlich größer ist.

#### Einleitung

Die Laser Doppler Anemometrie (LDA) hat die Hitzdrahtanemometrie (HDA) insbesondere wegen der Möglichkeit zur nicht intrusiven, richtungsempfindlichen und kalibrationsfreien Messung bei der Charakterisierung von Strömungsfeldern in weiten Bereichen verdrängt. Die Bestimmung von turbulenten Längenmaßen und Energiedichtespektren aus LDA Messungen ist jedoch mit vielen Schwierigkeiten verbunden. Dies ist im Vergleich mit der Hitzdrahtmessung insbesondere darauf zurückzuführen, dass das Messsignal bei der HDA kontinuierlich ist und zu äquidistanten Zeiten abgetastet werden kann, während die Messsignale bei der LDA stochastisch verteilt aufgenommen werden und somit eine direkte Anwendung der FFT zur Bestimmung des Energiedichtespektrums (EDS) nicht möglich ist. In den letzten Jahren haben sich durch ständige Weiterentwicklung zwei Methoden als zur Abschätzung von Autokorrelationsfunktionen (AKF) und EDS aus LDA-Messungen besonders geeignet herauskristallisiert. Hierbei handelt es sich einerseits um die Slotverfahren, die auf Mayo 1974 zurückgehen und deren Varianz durch die Weiterentwicklung in eine Fuzzy-Slotting Technik mit lokaler Normierung durch Nobach et al. 1998a und Trummers und Passchier 1996 deutlich reduziert wurde. Des Weiteren waren Rekonstruktionsmethoden mit Polynomen, insbesondere die „Sample and Hold“ Methode, das Objekt intensiver Forschung. Adri-

## 4.2

an und Yao 1987 haben gezeigt, dass die Rekonstruktionsmethoden auf die Abschätzung der EDS wie ein Tiefpass-Filter mit einer Cut-Off Frequenz von  $\dot{n}/2\pi$  wirken und somit sehr große Datenraten nötig sind, um die Dissipation in hochturbulenten Strömungen zu erfassen. Durch die Einführung eines FIR-Filters gelang es Nobach et al. 1998b diese Filterwirkung bei der „Sample and Hold“ Methode aufzuheben und somit den Informationsgehalt der EDS auf Frequenzen in Höhe der Datenrate zu erweitern.

In dieser Arbeit wird die Anwendung dieser beiden Verfahren auf die Bestimmung des integralen turbulenten Zeitmasses im isothermen Strömungsfeld eines Airblast Zerstäubers untersucht. Da die turbulenten Strukturen am Austritt aus dem Zerstäuber sehr klein sind, wird zusätzlich zum Einfluss der Methode der Abschätzung auch der der Wahl des Zeitschrittes  $\Delta\tau$  und der Anzahl der Intervalle  $K$  auf die AKF (und das EDS) und deren Varianz untersucht.

Mittels der Rekonstruktionstechnik wird dann der Einfluss des Durchsatzes auf das integrale turbulente Zeitmaß ermittelt und die Turbulenzstruktur an verschiedenen Orten im Strömungsfeld analysiert.

### Theorie zur Bestimmung der AKF und EDS aus LDA Messungen

Bei der Abschätzung der AKF und der EDS aus LDA Messungen wird nach einem von Benedict et al. 2000 vorgeschlagenen Schema vorgegangen. Hierbei werden die LDA Daten zunächst einer vorbereitenden Filterung unterzogen, um die mittlere Geschwindigkeit und großskalige Geschwindigkeitsschwankungen aus den Messdaten zu entfernen. Hierzu wird zunächst eine lokale mittlere Geschwindigkeit über  $2M+1$  Messpunkte unter Berücksichtigung der „Transit-Time“ Wichtung zur Reduzierung des Geschwindigkeits-Bias ermittelt:

$$\mu_i = \frac{\sum_{j=i-M}^{i+M} u_j \omega_j}{\sum_{j=i-M}^{i+M} \omega_j} \quad \text{mit } \omega_i = \tau_i \quad \text{und } M \approx K(1 + \dot{n} \Delta\tau) \quad (1)$$

Hierin sind die  $\tau_i$  die „Transit times“ durch das LDA-Messvolumen und  $M$  die von der Datenrate, dem Zeitschritt und der Anzahl der Intervalle abhängige Größe des Bereichs der Mittelung. Die gefilterte Geschwindigkeit ergibt sich dann zu:

$$u'_i = u_i - \mu_i \quad (2)$$

Danach wird das Messdatenfeld in Blöcke aufgeteilt. Diese Aufteilung ist bei Verwendung der beiden hier betrachteten Methoden nicht zwingend nötig, wird jedoch durchgeführt, um einerseits die maximale Zeit der AKF und die Frequenzauflösung des EDS über die Blockdauer  $T_B$  kontrollieren zu können und andererseits, um eine statistische Auswertung der AKF und EDS über die Bestimmung derer Varianzen zu ermöglichen. Zur Reduzierung von Kanteneffekten muss  $T_B \geq 2 K \Delta\tau$  gewählt werden.

Für jeden Block wird dann die Autokorrelationsfunktion bestimmt, aus der durch Integration das integrale turbulente Längenmaß ermittelt wird. Bei der Verwendung der Slotverfahren wird die maximale Zeitdauer der AKF in  $K$  Intervalle der Dauer  $\Delta\tau$  aufgeteilt. Zur Abschätzung des Wertes der Autokorrelationsfunktion für ein bestimmtes Intervall werden die Geschwindigkeitsprodukte aller Messdatenpaare, deren Zeitdifferenz in dieses Intervall fällt, addiert und durch die Summe der Produkte im Intervall geteilt. Selbstprodukte werden dabei zur Reduzierung des Einflusses des Signalrauschens auf die Auswertung unterdrückt. Die Varianz der mit diesem Verfahren abgeschätzten AKF ist sehr hoch. Eine deutliche Reduzierung der Varianz kann durch lokale Normierung nach Trummers und Passchier 1996 erreicht werden. Hierbei wird in jedem Intervall mit einer lokalen Varianz der Geschwindigkeiten normiert. Dies führt insbesondere für kurze Zeiten und große Werte der AKF zu einer deutlichen Reduzierung der Varianz der AKF:

$$\hat{R}_k = \frac{\hat{\sigma}_u^2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N u_i u_j \omega_i \omega_j b_k(t_j - t_i)}{\sqrt{\left( \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N u_i^2 \omega_i \omega_j b_k(t_j - t_i) \right) \left( \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N u_j^2 \omega_i \omega_j b_k(t_j - t_i) \right)}} \quad (3)$$

$$\text{mit der Abschätzung für die Varianz der Geschwindigkeit: } \hat{\sigma}_u^2 = \frac{\sum_{i=1}^N u_i^2 \omega_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i} \quad (4)$$

und dem Wichtungschema der Fuzzy-Slotting Technik:

$$b_k(t_j - t_i) = \begin{cases} 1 - \left| (t_j - t_i) / \Delta\tau - k \right| & \text{für } \left| (t_j - t_i) / \Delta\tau - k \right| < 1 \\ 0 & \text{für alle anderen Fälle} \end{cases} \quad (5)$$

Bei Verwendung der Fuzzy-Slotting Technik nach Nobach et al. 1998a wird die starre Zuordnung der Geschwindigkeitsprodukte in die einzelnen Intervalle aufgehoben. Jedes Geschwindigkeitsprodukt kann nun zu zwei Intervallen gleichzeitig, gewichtet mit dem zeitlichen Abstand der Zeitdifferenz der Messungen zur Mitte des Intervalls, beitragen.

Bei Verwendung der Rekonstruktionstechniken wird das Geschwindigkeitssignal in konstanten Zeitabständen  $\Delta\tau$  rekonstruiert. Bei der „Sample and Hold“ Methode wird der zum jeweiligen Zeitpunkt  $k\Delta\tau$  aktuelle Wert der Geschwindigkeit über das gesamte Zeitintervall als konstant angenommen:

$$u(k\Delta\tau) = u(t_i) \quad \text{für } t_i \leq k\Delta\tau < t_{i+1}. \quad (6)$$

Somit entsteht ein Stufensignal, das nicht alle Informationen des ursprünglichen Signals enthält. Nach Adrian und Yao, 1987 kann dies durch eine „Step-Noise“, die umgekehrt proportional zum Produkt aus dem Quadrat des Taylor-Zeitmaßes und der dritten Potenz der Datenrate ist und die sich bei der Abschätzung des EDS additiv zur tatsächlichen EDS verhält, wiedergegeben werden. Durch die Anwendung eines FIR-Filters auf die aus dem rekonstruierten Geschwindigkeitssignal gewonnene AKF wird bei der Methode des „Refined Sample and Hold“ nach Nobach et al. 1998b die Tiefpassfilterung des Signals durch die Rekonstruktion unterdrückt und die tatsächliche AKF bestimmt:

$$\hat{R}_{m,k} = \begin{cases} \hat{R}'_{r,0} & \text{für } k = 0 \\ (2c + 1)\hat{R}'_{r,k} - c(\hat{R}'_{r,k-1} + \hat{R}'_{r,k+1}) & \text{für } k = 1, \dots, K - 2 \end{cases} \quad (7)$$

mit dem nur von der Datenrate abhängigen Filterparameter  $c$ :

$$c = \frac{\exp(-\dot{n})}{(1 - \exp(-\dot{n}))^2} \quad (8)$$

und der Anzahl der betrachteten Intervalle  $K$ .

Unabhängig von der gewählten Methode zur Bestimmung der AKF ist der Wert  $R_0$  durch Signalrauschen und die Prozessortzeit fehlerbehaftet. Um für diesen Wert eine bessere Abschätzung zu gewinnen, wird die AKF mittels der einfachen Funktion

$$\hat{R}_k = a \exp(-bk^c); \hat{R}_0 = a, \quad (9)$$

deren Parameter mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt werden, modelliert. Da in der AKF auch periodische Anteile enthalten sein können, die durch die Funktion (9) nicht wiedergegeben werden, ist eine Wichtung, zum Beispiel mit  $1/k$ , nötig.

Aus der so erhaltenen AKF wird nun mittels einer Kosinustransformation für jeden Block ein einseitiges Energiedichtespektrum bestimmt:

$$\hat{S}_j = \hat{S}(f_j) = \hat{S}\left(\frac{j}{2K\Delta\tau}\right) = 2\Delta\tau \left( \hat{R}_0 + 2 \sum_{k=1}^{K-1} \hat{R}_k \cos(\pi f_j k \Delta\tau) + (-1)^j \hat{R}_K \right) \quad (10)$$

Hierbei ist  $\Delta\tau$  der gewählte Zeitschritt und  $K$  die Anzahl der Intervalle.

## 4.4

Jeder Block des LDA Messdatenfeldes liefert unabhängige Abschätzungen für die AKF und das EDS. Für  $N_B$  Blocks können die Mittelwerte und die Varianz der AKF und des EDS für jedes Intervall bestimmt werden:

$$\langle \bar{R} \rangle = \frac{1}{N_B} \sum_{i=1}^{N_B} \hat{R}^{(i)} \quad \text{bzw.} \quad \langle \bar{S} \rangle = \frac{1}{N_B} \sum_{i=1}^{N_B} \hat{S}^{(i)} \quad (11)$$

$$\hat{\sigma}_R^2 = \frac{1}{N_B - 1} \sum_{i=1}^{N_B} (\hat{R}^{(i)} - \langle \bar{R} \rangle)^2 \quad \text{bzw.} \quad \hat{\sigma}_S^2 = \frac{1}{N_B - 1} \sum_{i=1}^{N_B} (\hat{S}^{(i)} - \langle \bar{S} \rangle)^2 \quad (12)$$

Die Varianz der gemittelten AKF und des EDS ergibt sich zu:

$$\hat{\sigma}_R^2 = \frac{1}{N_B} \hat{\sigma}_R^2 \quad \text{bzw.} \quad \hat{\sigma}_S^2 = \frac{1}{N_B} \hat{\sigma}_S^2 \quad (13)$$

### Versuchsaufbau

Bei der untersuchten Düse handelt es sich um eine Baueinheit, die auf dem Airblast-Konzept beruht (Abb. 1). Der eingesetzte Aufbau gehört zur Art der Filmleger, bei denen sich die Flüssigkeit zunächst mittels eines Ringspalts (1) in einer dünnen, zusammenhängenden Schicht verteilt und dann in den Zerstäubungsprozess eintritt. Zwei einzelne, konzentrisch verdrallte Luftströmungen (2, 3) strömen durch eine Anzahl abstandsgleicher Tangentialkanäle (4, 5). Diese ermöglichen es der Luft, auf beiden Seiten der Brennstoffschicht aufzutreffen und gewährleisten die vollständige Vermischung von Luft und Brennstoff. In den zu Grunde liegenden Experimenten wurde eine zylindrische Brennkammer unter atmosphärischen Bedingungen eingesetzt und die Düse wurde isotherm betrieben. Der Durchmesser der Brennkammer beträgt  $D_{CC}=4D_0$ , ihre Länge  $L_{CC}=4.5D_{CC}$  und der Durchmesser  $D_0$  des Zerstäubers 25 mm.

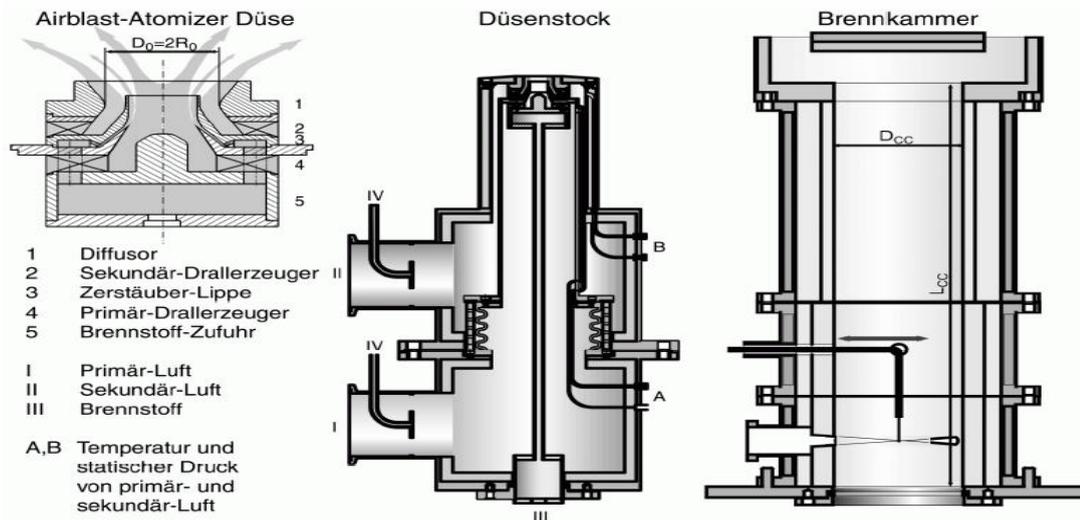


Abb. 1.: Experimenteller Aufbau

Die Messungen wurden mit einer 3-D LDA der Firma Dantec Dynamics durchgeführt. Zur Bestimmung der Abhängigkeit des integralen Längenmaßes von der Position im Strömungsfeld wurde die Radialposition bei  $z=10\text{mm}$  variiert. Die Datenrate hat dabei zwischen 1000Hz und 12000Hz variiert und es wurden jeweils circa 10000 Messpunkte aufgenommen. Für die Bestimmung der Anhängigkeit des integralen turbulenten Längenmaßes vom Durchsatz wurde das Experiment ohne Brennkammer durchgeführt, um eine höhere Datenrate zu erreichen. Gemessen wurde am Ort der höchsten Datenrate (34 kHz) bei  $x=8\text{mm}$  und  $z=10\text{mm}$ .

Dabei wurden jeweils circa 480000 Messpunkte aufgenommen. Der Druckverlust an der Düse wurde dabei in Schritten von  $\Delta p=5\text{mbar}$  von  $\Delta p=15\text{mbar}$  auf  $\Delta p=40\text{mbar}$  erhöht.

## Ergebnisse

Zunächst wurde bei einem Druckverlust von  $\Delta p=35\text{mbar}$  die Abhängigkeit der Varianz der mittels der Fuzzy-Slotting Technik mit lokaler Normierung (FSLN) bestimmten AKF von der Wahl der Parameter  $K$  und  $\Delta\tau$  untersucht. Die Varianz der AKF wurde hierbei als Mittelwert der Varianzen der nicht normierten AKF aller Intervalle in den ersten 0,25 ms definiert. Es zeigte sich, dass die Varianz proportional  $\Delta\tau^{-1,8}$  und  $K^{-1}$  ist. Da sowohl die Variation von  $K$  als auch von  $\Delta\tau$  zu einer Änderung der Blockdauer  $T_B$  führt, verändert sich auch

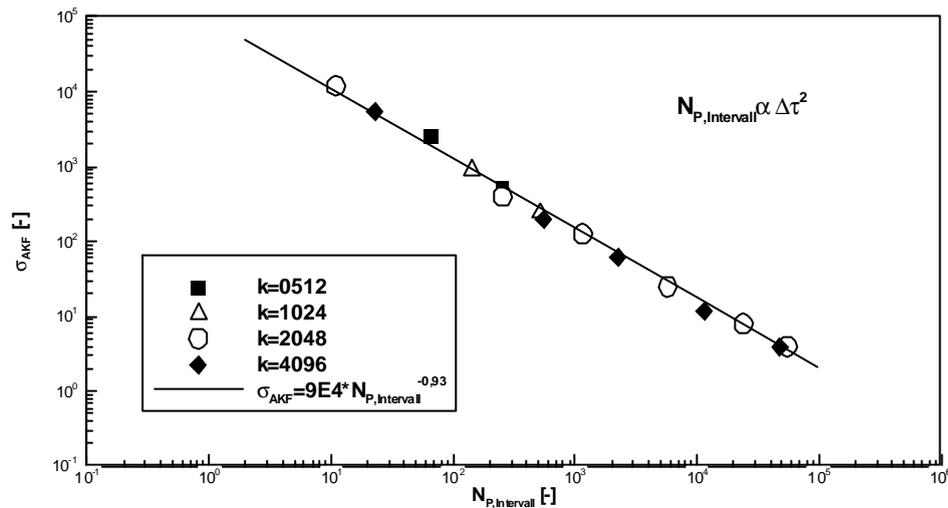


Abbildung 2: Abhängigkeit der Varianz von der Anzahl der Messdatenpaare im Intervall

die Anzahl der Messpunkte und somit der für die Bestimmung der AKF verwendeten Messdatenpaare. Diese ist proportional  $\Delta\tau^2$  und  $K^{-1,1}$ . Die Varianz der AKF wird somit von der Anzahl der Messdatenpaare im Intervall ( $N_P$ ) bestimmt und ist proportional  $N_P^{-0,93}$  (Abb. 2). Für den Fall einer variablen Datenrate bei konstanter Dauer der Messung  $T$  und konstanten Werten von  $K$  und  $\Delta\tau$  ergibt sich somit eine starke Abhängigkeit der Varianz von der Datenrate und eine Minderung der Vorhersagesicherheit der AKF mit fallender Datenrate. Die

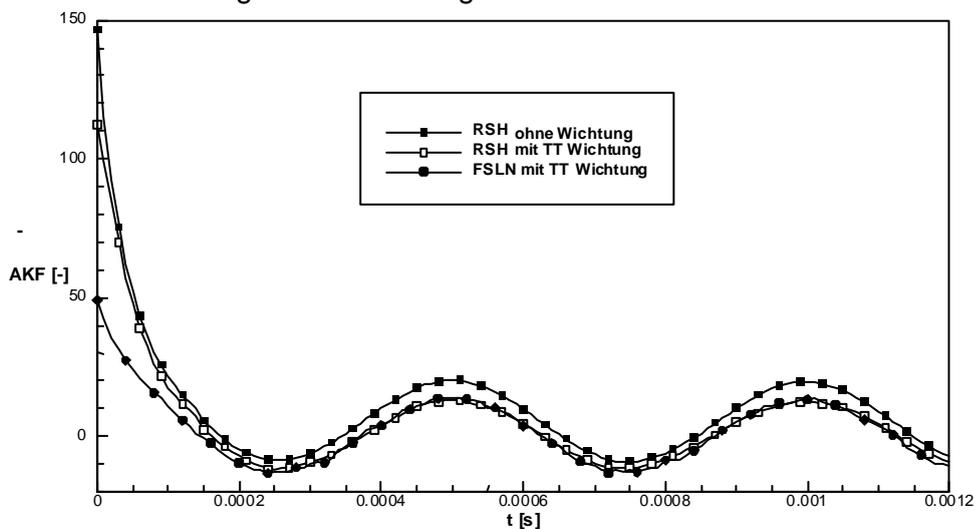


Abbildung 3: Abschätzungen der AKF für  $\Delta p=35\text{mbar}$

## 4.6

mit der „Refined Sample and Hold“-Methode (RSH) durchgeführte Analyse lieferte vergleichbare Resultate. Der Vergleich der FSLN mit der RSH - Methode zeigt für den hier untersuchten Fall sehr kurzer integraler Längenmaße ( $T_L=5,8E-5s$ ) in Verbindung mit hochfrequenten (2000Hz) periodischen Schwankungen deutlich bessere Ergebnisse bei der Verwendung der RSH. Die Abschätzung der AKF mit der FSLN hat eine deutlich größere Varianz als die mit der RSH abgeschätzte AKF und insbesondere für kleine Zeiten sind die Werte der AKF zu klein (Abb.3). Die mit der RSH abgeschätzte AKF weist jedoch über den gesamten Bereich

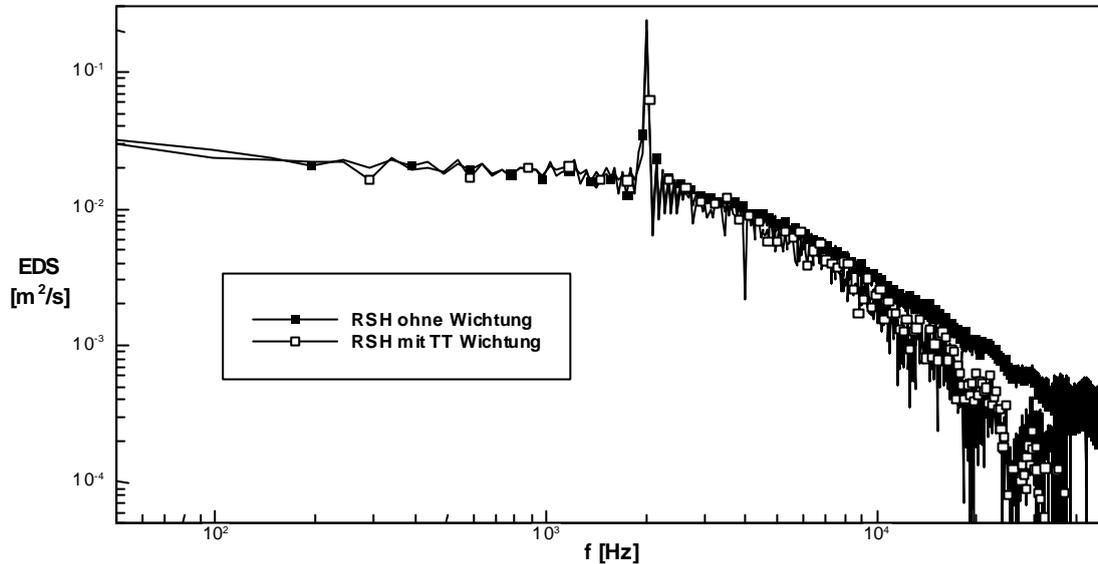


Abbildung 4: Abschätzung des EDS mit der „Refined Sample and Hold“ Methode

höhere Werte auf, da hier bei der Bestimmung des Korrelationskoeffizienten aus dem rekonstruierten Geschwindigkeitssignal keine Wichtung berücksichtigt wurde. Bei der FSLN wurde bei der Bestimmung der Korrelationskoeffizienten eine „Transit Time“ Wichtung durchgeführt. Da die großen Geschwindigkeitswerte hierbei weniger gewichtet werden, sind auch die Werte der AKF kleiner. Wird bei der RSH ebenfalls eine „Transit Time“ Wichtung durchgeführt, liegt die resultierende AKF für große Zeiten auf der mit der FSLN – Methode bestimmten.  $R_0$  ist jedoch größer und entspricht etwa der mit der „Transit Time“ Wichtung nach (4) ermittelten Varianz der Geschwindigkeit. Die Varianz der mit der RSH ermittelten AKF steigt durch die Wichtung deutlich an und ist vergleichbar mit der der FSLN. Das Energiedichtespektrum der RSH ohne Wichtung hat für große Frequenzen die geringste Streuung in den Datenpunkten. Die Wichtung führt für hohe Frequenzen zur Zunahme der Streuung, während die Energiedichte mit zunehmender Frequenz steiler abfällt (Abb. 4). Im Bereich zwischen 2000Hz und 7000Hz, entsprechend dem „inertial subrange“ können beide EDS gut durch das Komolgorov (-5/3) Gesetz angenähert werden.

Für die Bestimmung des integralen turbulenten Zeitmaßes wurde die RSH mit „Transit Time“ Wichtung verwendet, da diese die AKF insbesondere bei  $R_0$  am besten wiedergibt. Abbildung 5 zeigt die für variablen Durchsatz bestimmten integralen Zeitmaße und die nach der Taylor-Hypothese bestimmten integralen Längenmaße. Das integrale Zeitmaß nimmt mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit ab, da die Dissipation zunimmt. Für große Geschwindigkeiten wird der Gradient jedoch kleiner. Die errechneten Längenmaße haben die nach Ebersohl et al 1998 und Schneider et al. 2005 zu erwartenden Größe, steigen jedoch mit zunehmender Geschwindigkeit leicht an, was die Gültigkeit der Taylor-Hypothese in Frage stellt, da für das integrale Längenmaß nach Hinze 1959

$$L_f = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon} \quad (14)$$

mit der turbulenten kinetischen Energie  $k$  und der Dissipation  $\varepsilon$  gilt. In ähnlichen Strömungsfeldern sollte  $L_t$  somit nur von der Geometrie abhängen. Weiterhin ist gemäß Gleichung (14) in den Zonen der Strömung mit hoher Dissipation ein kleines Längenmaß zu erwarten, während in den Scherzonen ein großes turbulentes Längenmaß zu erwarten ist, da hier die turbulente kinetische Energie groß und die Dissipation klein ist.

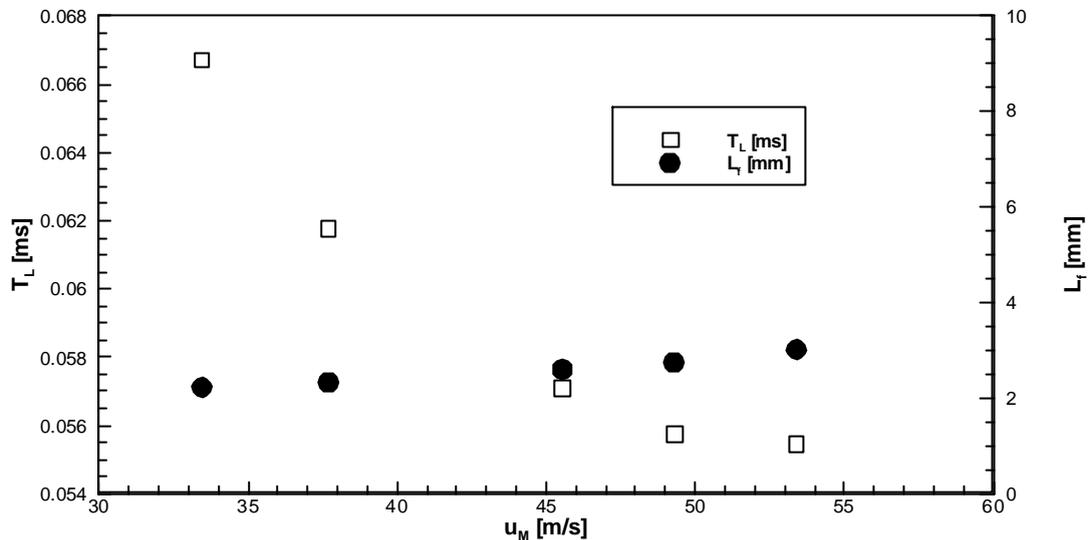


Abbildung 5: Integrale turbulente Längen und Zeitmaße bei Durchsatzvariation

Die radiale Verteilung des integralen turbulenten Zeitmasses wurde für die eingeschlossene Strömung ermittelt (Abb. 6). Die mittlere Geschwindigkeit und turbulenten Schwankungsgrößen in diesem Strömungsfeld wurden von Fokaides 2007 untersucht. Das turbulente Zeitmaß hat in der Strahlmitte ein Minimum, während es in den Scherzonen größer wird und in der inneren und äußeren Rückströmzone ein Maximum hat. Besonders deutlich wird die Struktur der Turbulenz, wenn man die nach der Taylor-Hypothese berechneten integralen Längenmaße betrachtet. Hier zeigt sich, dass die Wirbel in der Scherzone, wo die Turbulenzenergie der Strömung entzogen wird, deutlich größer sind als in der Strahlmitte, wo diese Energie dissipiert wird.

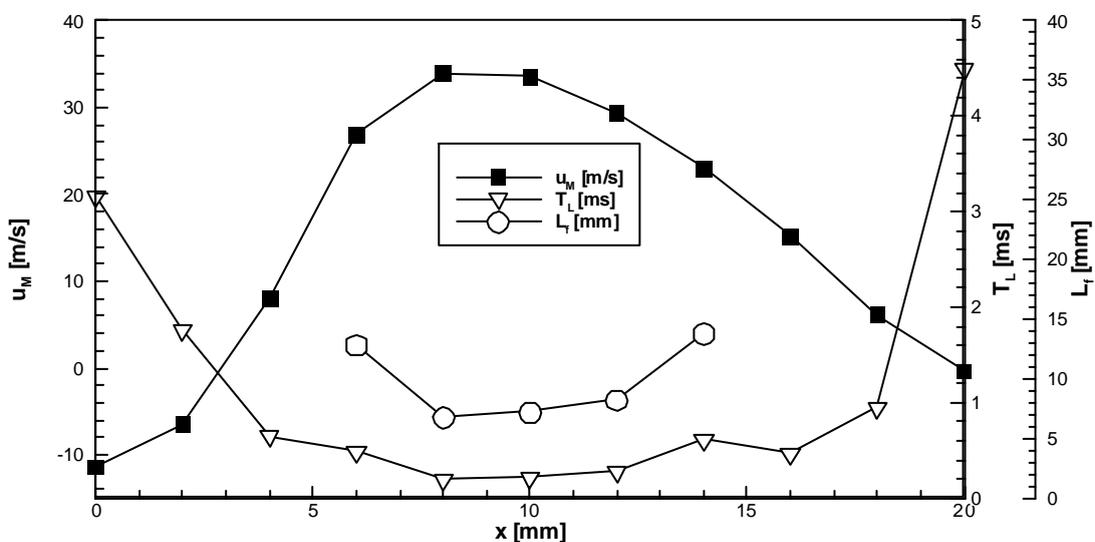


Abbildung 6: Radiales Profil der Integrale turbulente Längen und Zeitmaße bei  $z=10\text{mm}$

## Zusammenfassung

Basierend auf LDA Messungen im isothermen Strömungsfeld eines Airblast Zerstäubers wurden mittels einer „Refined Sample and Hold“ –Methode und der Fuzzy-Slotting Technik mit lokaler Normierung die integralen turbulenten Zeitmaße bestimmt. Es wird gezeigt, dass die Voraussagesicherheit der Abschätzung der Autokorrelationsfunktion bei beiden Verfahren nicht wie erwartet unabhängig von der Blockdauer ist, sondern von der blockdauerabhängigen Anzahl der Messdatenpaare im Intervall und somit von der Datenrate abhängig ist und mit steigender Datenrate besser wird. Die „Refined Sample and Hold“ ist in der untersuchten Strömung besser zur Abschätzung der gesuchten Größen geeignet. Mit dieser Methode wird das integrale turbulente Zeitmaß bei variablem Durchsatz in ähnlichen Strömungsfeldern bestimmt. Dieses nimmt wie erwartet mit steigendem Durchsatz ab. Die Bestimmung eines radialen Profils des turbulenten Zeitmaßes zeigt den erwarteten Verlauf. Es weist in der Strahlmitte, wo die meiste Turbulenzenergie dissipiert wird, ein Minimum auf, während es an den Strahlrändern, wo die Turbulenzenergie aus der Strömung entnommen wird, und in den Rückströmzonen anwächst.

## Literatur

- Adrian, R.J., Yao, C.S., 1987: Power spectra of fluid velocities measured by laser Doppler velocimetry, *Exp.Fluids*, Vol. 5, pp. 17-28
- Benedict, L.H., Nobach, H., Tropea, C., 2000: Estimation of turbulent velocity spectra from laser Doppler data, *Meas.Sci.Technol.*, Vol. 11, pp. 1089-1104
- Ebersohl, N., Klos, T., Suntz, R., Bockhorn, H., 1998: One-dimensional Raman scattering for determination of multipoint joint scalar probability density functions in turbulent flows, 27<sup>th</sup> Symposium (Int.) on Combustion / The Combustion Institute, 1998, pp.997-1005
- Fokaides P.A., Kasabov, P., Zarzalis, N., 2007: Experimental Investigation of the Stability Mechanism and Emissions of a Lifted Swirl Non-Premixed Flame, ASME Turbo Expo 2007, vol. GT2007-27126, 2007
- Hinze, O.J., 1959: *Turbulence*, McGraw-Hill, New York
- Mayo, W.T.Jr., Shay, M.T., Ritter S., 1974: Digital estimation of turbulence power spectra from burst counter LDV data, Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Workshop on Laser Velocimetry (Purdue University, 1974), pp. 16-26
- Nobach, H., Müller, E., Tropea, C., 1998a: Correlation estimator for two-channel, non-coincidence laser-doppler anemometer, Proc. 9<sup>th</sup> Int.Symp. on Applications of Laser Technology to Fluid Mechanics (Lisbon), paper 32.1
- Nobach, H., Müller, E., Tropea, C., 1998b: Efficient estimation of power spectral density from laser Doppler anemometer data, *Exp.Fluids*, Vol. 24, pp. 499-509
- Schneider, C., Dreizler, A., Janicka, J., 2005: Fluid dynamical analysis of atmospheric reacting and isothermal swirling flows, *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 74, pp. 103-127
- Trummers, M.J., Passchier, D.M., 1996: Spectral estimation using a variable window and the slotting technique with local normalization, *Meas.Sci.Technol.*, Vol. 7, pp. 1541-1546