



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Department Fahrzeugtechnik- und Flugzeugbau

**Untersuchung des Turbulenzeinflusses auf die
Schallerzeugung an einer Rohrströmungsblende in
einem Rohrleitungssystem einer Flugzeugklimaanlage**

Melanie Kathrin Stoob

09. Februar 2009



Danksagung

Ich möchte mich ganz besonders für die Betreuung von Professor Gleine und Professor Wendt bedanken, die mich bei allen Fragen und Problemen unterstützt haben. Außerdem auch bei Harry Tanger, Herrn Mardt und Professor Wolff, die uns Messgeräte und Werkzeuge zur Verfügung gestellt haben sowie einen Raum im Fahrzeuglabor für unseren ersten Versuchsaufbau.

Ebenso gilt mein Dank den Mitarbeitern der Akustik- und Strömungsmechanikabteilung bei Airbus. Besonders zu erwähnen sind hier Dirk Henny, Adeline Gomet, Torsten Pflaumbaum, Sven Haltermann und Mohammed Bouhaj, die sich Zeit für Ratschläge und Fragen nahmen und mir geholfen haben, die Testutensilien zu beschaffen.

Nicht zu vergessen ist die hervorragende Zusammenarbeit zwischen der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, der Technischen Universität Hamburg-Harburg, Airbus Deutschland GmbH und dem Ingenieurbüro Heinkel Engineering GmbH & Co. KG.

Meine Kollegen von Heinkel, Fawad Bokhari und Nils Helling von der TUHH und Eike Grunau von der HAW waren eine große Unterstützung für mich, ohne die diese Arbeit nicht hätte realisiert werden können. Vielen Dank dafür.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst und nur die in dem Anhang aufgeführten Hilfsmittel und Quellen benutzt habe.

Hamburg, den 09.02.2009

Melanie Stooß



Kurzfassung

Im Rahmen des 2. Hamburger Luftfahrtforschungsprogramms soll ein Simulationsmodell zur akustischen Auslegung von Luftverteilungssystemen in Flugzeugen erstellt werden.

Die Basis für eine theoretische Beschreibung der strömungsakustischen Eigenschaften bilden experimentell gewonnene Daten, die strömungsmechanische Parameter mit gemessenen akustischen Eigenschaften in einen Zusammenhang stellen.

In dieser Arbeit wird der Einfluss der Turbulenz auf die Schallerzeugung an typischen Blendengeometrien (Einlochblende, Mehrlochblende) untersucht, die für die VolumenstromEinstellung bei einem Luftverteilungssystem einer Flugzeugklimaanlage verwendet werden.

Als ein geeignetes Messverfahren zur Erfassung der Strömungsparameter wurde die Laser- Doppler- Anemometrie ausgewählt.

Unter anderem zeigte sich, dass die turbulenzbedingte Schallerzeugung nicht mit dem Turbulenzgrad, sondern mit der Turbulenzenergie in einem direkten Zusammenhang steht.



Inhaltsverzeichnis

<u>Symbolverzeichnis</u>	8
<u>1. Einleitung</u>	11
1.1 Problemstellung	11
1.2 Ziel der Arbeit	12
1.3. Auswahl und Erprobung geeigneter Strömungsmessverfahren zur Bestimmung des Turbulenzgrades in spektraler Auflösung	13
1.4 Stand der Technik	13
<u>2. Theoretische Grundlagen</u>	14
2.1 Strömungsmechanik	14
2.1.1 Vorüberlegung	14
2.1.2 Bernoulli-Gleichung	15
2.1.3 Laminare Strömung	16
2.1.4 Turbulente Strömung	16
2.1.5 Turbulenzgrad	17
2.1.6 Reynoldszahl	17
2.1.7 Strömungsablösung	18
2.1.8 Strouhalzahl	18
2.1.9 Druckabfall an Rohrleitungseinbauten	18
2.2 Akustik	19
2.2.1 Akustik und Schall	19
2.2.2 Schalldruckpegel	19
2.2.3 Schalleistungspegel	20
2.2.4 Frequenzbewertung von Schallpegeln	20
2.2.5 Hallraum und diffuses Schallfeld	21
2.2.6 Aeroakustische Schallquellen	22
2.2.7 Schallausbreitung	23
2.2.8 Impedanz	24
2.2.9 Schallentstehung an Blenden	24
2.2.10 Analyse in Frequenzbändern	25



2.3 Messtechnik	26
2.3.1 Prandtl- Staurohr	26
2.3.2 Wirkdruckverfahren	27
2.3.3 Hitzdrahtanemometrie (HWA: Hot Wire Anemometry)	28
2.3.4 Particle Imaging Velocimetry (PIV)	30
2.3.5 Laser Doppler Anemometrie (LDA)	30
2.3.6 Auswahl eines geeigneten Messverfahrens zur Geschwindigkeits- und Turbulenzgradmessung	31
<u>3. Messaufbau mit Einbausituation der Prüflinge</u>	34
3.1 Gesuchte Parameter	35
3.2 Verwendete Prüflinge	35
3.3 Detaillierte Ansicht der Messprofile	37
3.4 Verwendete Messkonfigurationen in dieser Arbeit	38
<u>4. Versuchsablauf</u>	40
<u>5. Versuche und Ergebnisse</u>	41
5.1 Charakterisierung der eingestellten Rohrströmungen	41
5.1.1 Berechnung der kritischen Strömungsgeschwindigkeit	41
5.1.2 Überprüfung der Rotationssymmetrie des Strömungsgeschwindigkeits- profils	41
5.1.3 Überprüfung der Rotationssymmetrie des Turbulenzgradprofils	44
5.1.4 Untersuchung an der Mehrlochblende	46
5.1.5 Untersuchung am Turbulenzgenerator 1	49
5.1.6 Untersuchung an der Mehrlochblende und am Turbulenzgenerator 1	52
5.2 Akustikmessungen	54
5.2.1 Messung des Schalldruckpegels und des Schalleistungspegels	54
5.2.2 Schallerzeugung in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit	55
5.2.3 Blendenlärm	58
5.2.4 Einfluss der Turbulenzgeneratoren auf den Schalldruckpegel	61



<u>6. Kennlinien</u>	63
6.1 Kennlinien: Gesamtschalleistungspegel / Druckabfall über der Messblende	63
6.2 Kennlinien: Gesamtschalleistungspegel / Turbulenzgrad	66
6.3 Kennlinien: Gesamtschalleistungspegel / Turbulenzenergie	68
6.4 Kennlinien: Schalleistungspegel / Strömungsgeschwindigkeit	70
<u>7. Zusammenfassung</u>	72
<u>Abbildungsverzeichnis</u>	74
<u>Literaturverzeichnis</u>	77
<u>Anhang</u>	81
<hr/>	
<u>A.1</u> Bestandteile des Messstandes	81
<u>B.1</u> Anforderungen an den Messstand	82
<u>C.1</u> Messgeräte	82
<u>D.1</u> Gesamtschalleistungspegel	85
<u>D.2</u> Bewertungskoeffizienten für die A- Bewertung	86
<u>E.1</u> Schalleistungsmessung	87
<u>E.2</u> Übersicht der Werte für die Berechnung des Schalleistungspegels mit Normschallquelle 1818654	88
<u>E.3</u> Hallraum- und Vergleichsverfahren (mit Normschallquelle 181865) Schalleistungspegelberechnung im Vergleich	89
<u>F.1</u> Messkette für die akustischen Messungen	90
<u>G.1</u> Turbulenzgradberechnung mit der LDA- Software	91
<u>H.1</u> Strömungsmechanische Messergebnisse	93
<u>I.1</u> Akustische Messungen	98
<u>J.1</u> Wichtige Messparameter im Überblick	102
<u>K.1</u> Vorteile der Hitzdrahtmesstechnik	104



<u>K.2</u>	Nachteile der Hitzdrahtmesstechnik	104
<u>K.3</u>	Prinzip der Particle Imaging Velocimetry (PIV)	105
<u>K.4</u>	Bestandteile des PIV- Systems	105
<u>K.5</u>	Aufgabe der Kameras bei der PIV	106
<u>K.6</u>	Ablauf der PIV	108
<u>K.7</u>	Auswertung der Daten und Überführung in 3D	109
<u>K.8</u>	Zeitliche Auflösung und dynamischer Bereich	111
<u>K.9</u>	Zusammenfassung der Durchführungsschritte beim PIV- Experiment	112
<u>K.10</u>	Vorteile der PIV	113
<u>K.11</u>	Nachteile der PIV	113
<u>L.1</u>	Bestandteile des LDA- Systems	115
<u>L.2</u>	Messprinzip der LDA	115
<u>L.3</u>	Vorteile der LDA	119
<u>L.4</u>	Nachteile der LDA	119
<u>L.5</u>	Die Bragg-Zelle	119
<u>L.6</u>	Abhängigkeiten der LDA-Messgenauigkeiten	120
<u>L.7</u>	Der Doppler- Burst	120
<u>L.8</u>	Rekonstruktion mit der Fast-Fourier-Transformation (FFT)	121
<u>L.9</u>	Fourier- Reihe	121
<u>L.10</u>	Partikel- Material	123
<u>M.1</u>	Auswirkungen von Parametern auf das LDA- Messergebnis	124



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences



Symbolverzeichnis

Symbol	SI- Einheit	Bedeutung
A	[m ²]	Querschnittsfläche
A_d	[m ²]	Öffnungsquerschnitt der Blende
A_H	[m ²]	Oberfläche des Hallraumes
$\overline{A_{ges}}$	[m ²]	gemittelte Absorptionsfläche
a, b, c	[1]	Index, Variable
B	[bar]	barometrischer Druck
c	[m / s]	Schallgeschwindigkeit
C	[-]	Durchflusskoeffizient
$C(s)$	[-]	Kreuzkorrelation
d, D	[m, mm]	(Innen-) Durchmesser
dIA	[mm]	Seitenlänge der Subsektion
E	[-]	Zulaufgeschwindigkeitsfaktor
e_s, e_r	[1]	Strahl- und Empfängerrichtung
f	[Hz]	Frequenz
f	[%]	relativer Größtfehler
f_0, f_E	[Hz]	Sendefrequenz, Empfängerfrequenz
f_D	[Hz]	Dopplerfrequenz
f_{GR}	[Hz]	Grenzfrequenz
f_{max}	[Hz]	Maximalfrequenz
f_{pos}, f_{neg}	[Hz]	positive und negative Frequenz
f_s	[Hz]	Braggzellen- Frequenz
f_{shift}	[Hz]	Verschiebefrequenz
F	[N]	Kraft
g	[m / s ²]	Erdbeschleunigung
I	[A]	Strom
I	[W / m ²]	Schallintensität
i, j, k, m, o, u, 0	[-]	Index
k	[mm]	Rauhigkeit
K	[dB]	Korrekturfaktor
l, L	[m, mm]	Länge
$\overline{L_H}$	[dB]	räuml. quadr. Mittelwert der Schalldrücke
L_l	[dB]	Schallintensitätspegel
L_p	[dB]	Schalldruckpegel
L_W	[dB]	Schalleistungspegel
\dot{m}	[kg / s]	Massenstrom
Ma	[1]	Mach- Zahl
n	[1]	Anzahl, Brechungsindex
O	[-]	Komplexität der DFT
p	[N / m ²]	Schalldruck
p_{eff}	[N / m ²]	Effektivwert des Zeitverlaufs
p_{dyn}	[N / m ²]	dynamischer Druck
p_{ges}	[N / m ²]	Gesamtdruck



Symbolverzeichnis

Symbol	SI- Einheit	Bedeutung
p_{stat}	[N / m ²]	statischer Druck
r	[m, mm]	Radius
R_s	[Ω]	Widerstand des Drahtes
Re	[-]	Reynoldszahl
s' / s	[-]	Bildvergrößerung
s	[m, mm]	Wegstrecke
s	[%]	Genauigkeit, Güte der Messung
$s_f (f)$	[%]	absoluter Fehler
Sr	[-]	Strouhalzahl
t	[s]	Zeit
t_A, t_E	[s]	Anfangs- und Endzeitpunkt
t_Z	[mm]	Zentrum des Burst- Signals
T_s	[s]	Nachhallzeit
T_S	[° C]	Temperatur des Hitzdrahtes
Tu	[1]	Turbulenzgrad
v	[m / s]	Geschwindigkeit
$\overline{v_x^2}, \overline{v_y^2}, \overline{v_z^2}$	[m / s]	Schwankungsgeschwindigkeit
v_{grenz}	[m / s]	Grenzgeschwindigkeit
\dot{V}	[m ³ / s]	Volumenstrom
V	[m ³]	Volumen
V_H	[m ³]	Volumen des Hallraums
v_{max}, v_{min}	[m / s]	Maximal- und Minimalgeschwindigkeit
v_{pos}, v_{neg}	[m / s]	positive und Negative Geschwindigkeit
W	[W]	akustische Leistung der Schallquelle
\bar{x}	[%]	Mittelwert
x, y, z	[-]	Index
x, y, z	[1]	kartesisches Koordinatensystem
Z	[m, mm]	Höhe
Z_s	[kg / (m ² * s)]	akustische Impedanz



Symbolverzeichnis

Symbol	SI- Einheit	Bedeutung
α	[-]	dimensionslose Durchflusszahl
α	[°]	Winkel zwischen Laserstrahl und Partikel
α_0	[K ⁻¹]	Temperaturkoeffizient bei T ₀
β	[1]	Durchmesserverhältnis
Δp	[N / m ²]	Wirkdruck
Δp_g	[N / m ²]	Druckabfall
Δx	[mm]	Abstand der Interferenzflächen
ε	[-]	dimensionslose Expansionszahl
λ	[nm]	Wellenlänge des Lichts
λ	[1]	Rohrreibungskoeffizient
ν	[m ² / s]	kinetische Viskosität
η	[Pa * s]	dynamische Viskosität
φ	[°]	halber Schnittwinkel der Laserstrahlen
φ_{12}	[J/kg]	spezifische Dissipation
ρ	[kg / m ³]	Dichte
θ	[°]	Schnittwinkel der Laserstrahlen
θ_B	[°]	Beobachtungswinkel des Photodetektors
ω	[rad]	Winkelfrequenz
ζ	[1]	Widerstandsbeiwert eines Einbauelements

1. Einleitung

1.1 Problemstellung

Mit zunehmender Flugdauer nimmt der Komfort der Passagiere in Flugzeugen einen immer wichtigeren Stellenwert ein, da der psychologische Einfluss der Flugzeugkabine auf den Fluggast seine Bewertung des Gesamtfluges bestimmt. Dies ist vor allem bei Langstreckenflügen der Fall, bei denen sich der Diskomfort stärker auswirkt. Unter den Komfort fallen nicht nur die Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsbedingungen, sondern auch die Lautstärke von Lärmquellen inner- und außerhalb der Kabine.

Durch eine Verminderung der Schallemission kann der Komfort des Passagiers also maßgeblich verbessert werden.

Eine leise, sichere Flugzeugkabine ist folglich ein Auswahlaspekt und gleichzeitig ein wichtiges Merkmal für eine Fluggesellschaft.

Zu den dominierenden Lärmquellen außerhalb des Flugzeugs lassen sich der aerodynamische Grenzschichtlärm, erzeugt durch die Umströmung des Rumpfes, sowie die Triebwerke zählen. In der Kabine selbst nimmt man insbesondere diese als auch alle anderen Lärmquellen wahr wie zum Beispiel das Klimaanlageensystem, welches ohne besondere akustische Auslegung die größte innere Lärmquelle darstellt.

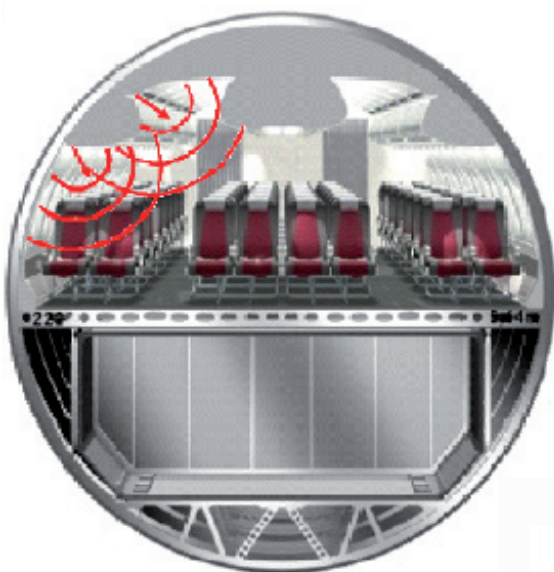


Abb. 1.1 : Schalleintrag in die Flugzeugkabine [19]

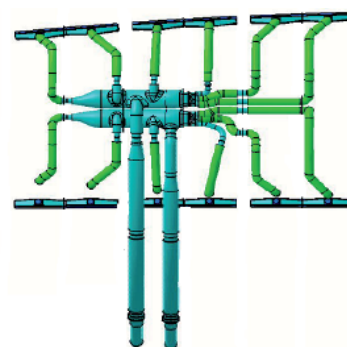


Abb. 1.2 : Beispiel einer Steigleitung einer Flugzeugklimaanlage - Ansicht von oben [21]



Einen Beitrag für die Schallemission der Klimaanlage [s. Abb. 1.1] liefern die kleinen Durchmesser der Rohrleitungen in dem Flugzeug, durch welche die Luft mit einer hohen Geschwindigkeit strömen muss, um die Luft gleichmäßig auf alle Luftauslässe der Kabine verteilen zu können [s. Abb. 1.2].

Die kleinen Durchmesser der Rohre sind unvermeidlich, da auf der einen Seite Gewichtsgründe eine Rolle spielen, auf der anderen Seite aber, als noch wichtigerer Faktor, der Platzmangel im Flugzeug, der eine optimale Verteilung der Rohrleitungen und die Auswahl der Rohrdurchmesser stark begrenzt.

Hauptgründe für die Schallemission sind die hohen Strömungsgeschwindigkeiten im Rohrleitungssystem, die erheblichen Strömungslärm an Rohrbögen, Abzweigern, Luftauslässen und Luftstromregulatoren wie Blenden erzeugen.

Die akustische Auslegung der Klimaanlage erfolgt bisher rein experimentell.

Eine Methode, den Strömungslärm in Abhängigkeit der Turbulenz zu prognostizieren, die an den Komponenten entsteht, würde einen erheblich reduzierten Aufwand bedeuten bei der Auslegung. Ein einfaches Berechnungsschema, das zugleich sehr präzise ist, würde eine deutliche Einsparung an Zeit und auch an Kosten mit sich bringen und im Interesse des Flugzeugbauers liegen. Zudem wäre kein Prototyp für eine Auslegung notwendig, so dass in viel früheren Entwicklungsphasen, die erforderlichen Randbedingungen bestimmt werden können.

Die Messergebnisse und Auswertungen der vorliegenden Arbeit werden an Fawad Bokhari von der technischen Universität Hamburg-Harburg weitergegeben. Er ist ebenfalls als Mitarbeiter und Doktorand im Rahmen des 2. Hamburger Luftfahrtforschungsprojektes tätig.

Mit Hilfe der ausgewerteten Daten soll dann eine Transferfunktion gefunden werden, um den Lärm, der bei Strömungen im Klimaanlage-System entsteht, genau berechnen zu können.

Das Ergebnis des Forschungsprojekts soll nicht nur für den Flugzeugbau sondern auch für den Fahrzeug-, Schienenfahrzeug- und Schiffbau angewendet werden.

1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen Beitrag für eine Datenbasis für die Entwicklung zu liefern, mit der später ein semi-empirisches Rechenmodell ableitbar ist.

Es sollen Kennfelder und makroskopische Parameter aufgestellt werden, mit denen ein neues einfaches Rechenverfahren entwickelt werden kann, so dass sich akurate, reproduzierbare Ergebnisse bestimmen lassen.

Durch die Nutzung der Kennfelder kann der Lärm, der durch Turbulenzen entstanden ist, mit den relevanten Strömungsdaten verknüpft werden.



1.3 Auswahl und Erprobung geeigneter Strömungsmessverfahren zur Bestimmung des Turbulenzgrades in spektraler Auflösung

Im Rahmen dieser Arbeit werden drei verschiedene Verfahren der Strömungsmesstechnik behandelt. Durch Vergleiche untereinander und der Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile soll das Messverfahren ausgesucht werden, das für die spätere Bestimmung des Berechnungsmodells am besten geeignet ist.

Zu bevorzugen ist die Verwendung eines berührungslosen Verfahrens der Strömungsmesstechnik, damit die Strömung nicht verändert wird und um möglichst genaue und realistische Werte aus den Messungen zu erhalten.

Nach Auswahl des geeigneten Messverfahrens soll eine messtechnische Erfassung turbulenter Anströmungsbedingungen und deren Auswirkungen auf die Schallerzeugung an stromabwärts liegenden Luftverteilungskomponenten erfolgen.

1.4 Stand der Technik

Heutzutage erfolgt die akustische Auslegung der Klimaanlage rein experimentell und beruht hauptsächlich auf Erfahrungswissen, das jüngere Ingenieure gegenüber älteren noch nicht ausreichend besitzen können, bedingt durch die geringere Anzahl der Jahre in der Berufspraxis.

Alle bisher zur Verfügung stehenden Verfahren (CAA : Computational Aero Acoustics, CFD : Computational Fluid Dynamics, Navier- Stokes- Gleichungen) zur numerischen Berechnung strömungsakustischer Parameter sind aufgrund der verhältnismäßig aufwendigen Rechenzeiten und der nötigen Rechenleistung von Computern in der Praxis ungeeignet und werden deshalb nur in Forschungsprojekten oder an Universitäten eingesetzt.

Da die Berechnungsmethoden für eine Anwendung in der Industrie zu komplex ausfallen und sie sich zeitlich bis heute nicht rentieren, wird die experimentelle Auslegung der Klimaanlage vorgezogen. Dazu muss zunächst aber immer ein Versuchsmodell gebaut werden, mit dem die Randbedingungen festgelegt werden müssen.



2. Theoretische Grundlagen

2.1 Strömungsmechanik

2.1.1 Vorüberlegung

Da die Aufgabenstellung dieser Arbeit beinhaltet, dass die Schalleistung in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit und dem Turbulenzgrad untersucht werden soll, sind folgende Parameter relevant für die Erstellung der Kennlinien:

Strömungsgeschwindigkeit:

Mit Anstieg der Geschwindigkeit erhöht sich auch der an dem Turbulenzgenerator erzeugte Lärm. Die Geschwindigkeit wird zwischen 0 m/s und 16 m/s variiert.

Druck:

Der Druckabfall an einem Turbulenzgenerator liefert eine wichtige Aussage über den erzeugten Strömungslärm.

Erzeugter Lärm:

Der in der Luftverteilungsstrecke generierte Lärm wird durch den Schalleistungspegel angegeben.

Geometrie:

Mit der Änderung des Abstandes zwischen der Blende und dem Turbulenzgenerator ändert sich auch gleichzeitig der Turbulenzgrad. Je größer der Abstand zwischen beiden gewählt wird, desto größer ist die Wegstrecke, auf der die Turbulenzenergie dissipieren kann.

Turbulenzgrad:

Der Turbulenzgrad wird in dieser Arbeit an einer Rohrströmungsblende untersucht. Fällt eine Strömung turbulenter aus, erhöht sich auch der an einem Hindernis erzeugte Strömungslärm.

2.1.2 Bernoulli-Gleichung

Die Gesamtenergie als Summe aus Lage-, Druck- und kinetischer Energie ist längs einer Stromröhre konstant.

→ kinetische Energie + Druckenergie + Lageenergie = konst.

Da in der Realität keine reibungsfreien Strömungen auftreten, wird hier die Energie-Gleichung mit Reibungsverlust betrachtet. Es muss noch die für die Überwindung von Verwirbelungen und Reibung erforderliche Dissipationsenergie berücksichtigt werden.

$$\frac{1}{2} \cdot v_1^2 + \frac{p_1}{\rho} + g \cdot z_1 = \frac{1}{2} \cdot v_2^2 + \frac{p_2}{\rho} + g \cdot z_2 + \varphi_{12}$$

φ_{12} : spezifische Dissipation

Bei inkompressiblen Strömungen macht sich der Reibungsverlust als Druckabfall Δp_g bemerkbar. Ein Teil dieser Dissipationsenergie wird in Lärm umgesetzt.

Es gilt:
$$\varphi_{12} = \frac{\Delta p_g}{\rho}$$

Bei Vernachlässigung der Höhenkoordinate ergibt sich der Gesamtdruck aus der Summe des statischen und des dynamischen Druckes.

$p_{ges} = p_{stat} + p_{dyn}$ mit $p_{dyn} = \frac{\rho}{2} \cdot v^2$

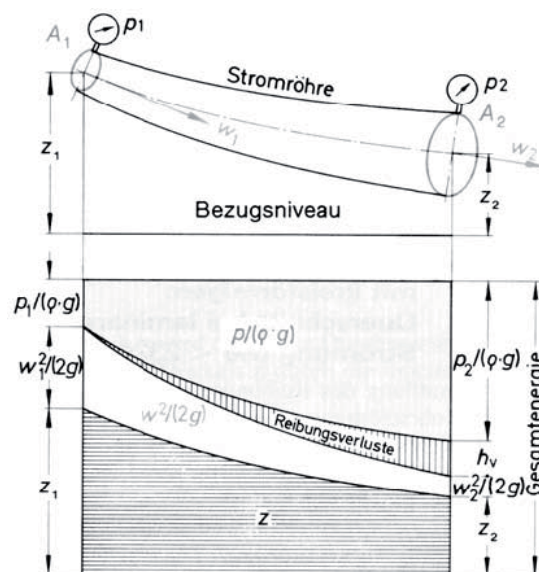


Abb. 2.1 : Bernoulligleichung [17]

2.1.3 Laminare Strömung ($Re < 2300$)

Die laminare Strömung ist schichtenartig, d. h. die Fluidteilchen bewegen sich geordnet in parallelen Schichten zueinander. Es findet keine Querbewegung der Teilchen und somit auch kein Energieaustausch zwischen den Schichten statt. Das Geschwindigkeitsprofil ist parabolisch.

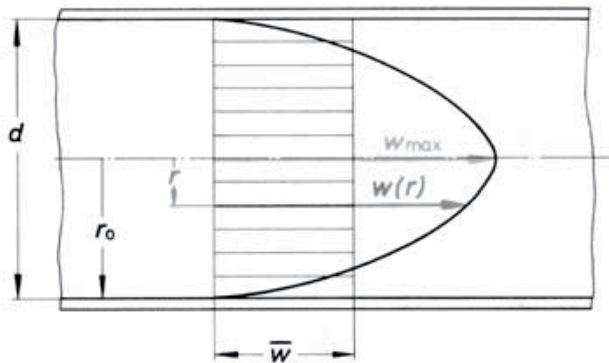


Abb. 2.2 : Verlauf einer laminaren Rohrströmung [17]

2.1.4 Turbulente Strömung ($Re > 2300$)

Bei der turbulenten Strömung hingegen kommt es in der Grundströmung zu zufallsbedingten Schwankungsbewegungen, es tritt also eine Querbewegung der Fluidteilchen auf, welche zu größeren Reibungsverlusten führt.

Das Geschwindigkeitsprofil variiert im Vergleich zur laminaren Strömung im wandnahen Bereich sehr stark.

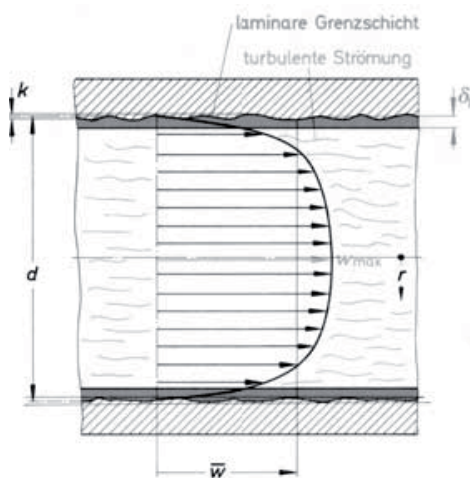


Abb. 2.3 : Verlauf einer turbulenten Rohrströmung [17]



2.1.5 Turbulenzgrad

Der Turbulenzgrad Tu ist ein Maß für die Störung einer Strömung, welche durch Geschwindigkeitsschwankungen charakterisiert ist.

$$Tu = \frac{1}{v} \cdot \sqrt{\frac{1}{3} \cdot (\overline{v_x'^2} + \overline{v_y'^2} + \overline{v_z'^2})}$$

v : Bezugsgeschwindigkeit

Die drei Schwankungsgeschwindigkeiten $\overline{v_x'^2}$, $\overline{v_y'^2}$ und $\overline{v_z'^2}$ werden für die Berechnung des Turbulenzgrades im Rahmen dieser Arbeit mit dem 1D-LDA gemessen.

2.1.6 Reynoldszahl

Der Umschlag von laminarer zu turbulenter Strömung erfolgt bei der sogenannten kritischen Reynoldszahl. Sie ist eine dimensionslose Kenngröße.

Allgemein ist sie definiert als der Quotient aus dem Produkt der Geschwindigkeit mal einer charakteristischen Länge und der kinematischen Viskosität.

Für Rohrströmungen wird anstatt der Länge der Rohrdurchmesser verwendet.

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad \text{bzw.} \quad Re = \frac{v \cdot l}{\nu} \quad \text{mit} \quad \nu = \frac{\eta}{\rho}$$

η : dynamische Viskosität $[Pa \cdot s]$

ν : kinematische Viskosität $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

2.1.7 Strömungsablösung

Wenn der statische Druck in Strömungsrichtung ansteigt, kann es zu einer Strömungsablösung kommen, weil durch den Reibungseffekt ein bedingter kinetischer Energieverlust an der Wand auftritt. Dies ist zum Beispiel der Fall bei Querschnittssprüngen.

Insbesondere kommt es zu periodischen Wirbelablösungen, welche Reibungstöne mit einer Frequenz f erzeugen, wenn die Strömung auf ein Hindernis wie eine Kante oder ein Drosselgerät trifft. Diese Rezirkulationsgebiete sind stromabwärts der Kante oder hinter dem Drosselgerät zu beobachten. Das Strömungsfeld wird als Kármánsche Wirbelstraße bezeichnet. Auch andere spezielle Einbauten oder Störfaktoren in den Rohrleitungen wie Krümmer, Abzweigungen, Querschnittsänderungen, Druckregler o.ä. können zu Kármánschen Wirbelstraßen führen.

2.1.8 Strouhal-Zahl

Die Frequenz, mit der sich die Wirbel ablösen, lässt sich mit der dimensionslosen Kennzahl von Strouhal Sr bestimmen. Sie ist definiert durch den Quotienten aus dem Produkt des Durchmessers des Staukörpers d mal der Wirbelabfolgefrequenz f und der Strömungsgeschwindigkeit v .

$$Sr = \frac{f \cdot d}{v}$$

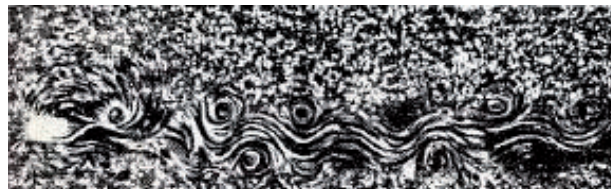


Abb. 2.4 : Kármánsche Wirbelstraße [16]

2.1.9 Druckabfall an Rohrleitungseinbauten

Für die Berechnung des Druckverlustes Δp_g geht man von folgender Formel aus :

$$\Delta p_g = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

Die Geschwindigkeit des Fluids vor der Drosselstelle wird durch v ausgedrückt, ζ ist ein empirischer Widerstandsbeiwert vom jeweiligen Einbauelement. Drosselgeräte finden ihre Anwendung in der Durchflussmesstechnik.

Alle Strömungen in dieser Arbeit werden als inkompressibel betrachtet, da die Machzahl $Ma < 0,1$ % ist.



2.2 Akustik

2.2.1 Akustik und Schall

Physikalisch gesehen, versteht man unter Schall auch die Schwingungen und Wellen in elastischen Medien, deren Frequenzen im Hörbereich des Menschen liegen. Da in Gasen wie Luft keine Schub- und Scherkräfte übertragen werden können, kommt es hierbei nur zu längslaufenden Wellen. Die Welle und die Schwingungen der Teilchen breiten sich in die gleiche Richtung aus (Longitudinal- oder Dichtewellen).

Um Frequenzzusammensetzungen von Signalen zu bestimmen, wird der Schall in Frequenzbänder aufgeteilt, welche durch die unteren und oberen Grenzfrequenzen f_u und f_o definiert sind. Die Messungen erfolgen mit Hilfe von Filtern (elektrische Netzwerke), die eine angelegte Spannung nur in einem ganz bestimmten Frequenzbereich durchlassen.

2.2.2 Schalldruckpegel

Zu den gebräuchlichen Größen in der Akustik gehören der Schalldruck- und der Schallleistungspegel. Alle angegebenen Bezugsgrößen sind international standardisiert.

Der **Schalldruckpegel** ist definiert durch

$$L_p = 10 \lg \left(\frac{p_{eff}}{p_0} \right)^2 \text{ dB} = 20 \lg \left(\frac{p_{eff}}{p_0} \right) \text{ dB}$$

Die Referenzgröße p_0 entspricht der menschlichen Hörschwelle bei einer Frequenz von etwa 1000 Hz , daraus folgt, dass der gerade noch hörbare Schall bei einem Schalldruckpegel von 0 dB bzw. $2 \cdot 10^{-5} \frac{N}{m^2}$ liegt.

Unter p_{eff} versteht man den für die Beschreibung des Schalldrucks relevanten Effektivwert des Zeitverlaufs, er wird auch als RMS-Wert (root mean square) bezeichnet.

Der Effektivwert setzt sich zusammen aus der Wurzel des arithmetischen Mittelwerts der quadrierten Funktion über die Integrationszeit T.

$$p_{eff} = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \right) \cdot \int_0^T p^2(t) dt}$$

2.2.3 Schalleistungspegel

Der Schalleistungspegel ist definiert durch $L_w = 10 \lg \frac{W}{W_0} \text{ dB}$

Er ist ein Maß für die von einer Schallquelle insgesamt nach allen Richtungen abgegebene Leistung. W gibt die akustische Leistung der Schallquelle in Watt an, die Referenzgröße W_0 wird auf $1 \cdot 10^{-12}$ Watt festgelegt.

2.2.4 Frequenzbewertung von Schallpegeln

Es existieren verschiedene Bewertungskurven, die mit den Buchstaben A, B, C und D gekennzeichnet und am Schallpegelmessgerät vor einer Messung einzustellen sind. Diese dienen als Filter, um die Frequenzgänge des menschlichen Gehörs ungefähr nachzubilden. Bei der Frequenzbewertung hat sich inzwischen der Schallpegel in dB (A) nach DIN 45633 als Kriterium für die Zulässigkeit von Schallpegeln durchgesetzt, da die subjektiv empfundene Lautstärke meist

erheblich abweicht von den unbewerteten Schallpegeln.

Ursprünglich wurden mehrere Bewertungskurven entwickelt, die passend zum Pegel benutzt werden sollten, da sich die Hörempfindlichkeit mit den Schallpegeln ändert.

Die Frequenzgänge der Bewertungskurven sind nach DIN EN 60651 genormt und im folgenden Diagramm abgebildet.

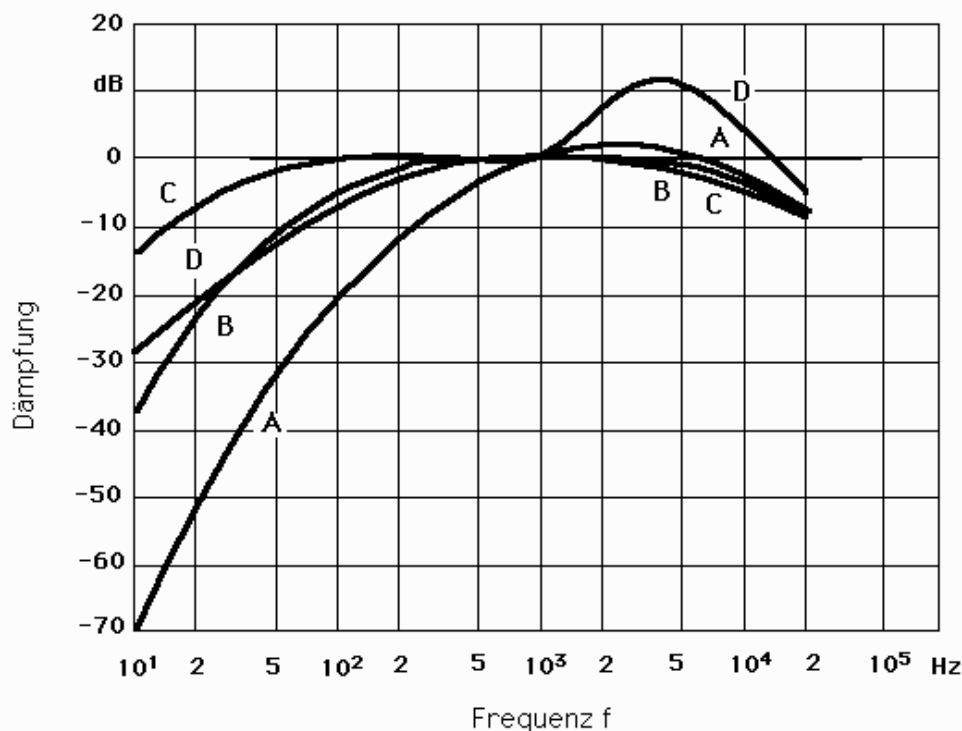


Abb. 2.5 : Bewertungsskalen für den Schallpegel [2]



2.2.5 Hallraum und diffuses Schallfeld

Um ein optimales und gleichmäßiges diffuses Schallfeld zu erzeugen, wird ein Raum gewählt, der starre, harte Wände besitzt. Eine ebenso wichtige Randbedingung ist es, darauf zu achten, dass die Wände nicht parallel zueinander stehen. Nur so können stehende Wellen vermieden werden, unterstützt werden kann dies noch, indem man Diffusoren an der Decke befestigt. Diese bewirken eine Verstärkung der Diffusität.

Beachtet man die oben genannten Voraussetzungen, erreicht man an jedem Punkt außerhalb des Hallradius einen ungefähr gleichen Schalldruckpegel.

Über die Schalldruckmessung kann die Schalleistung bestimmt werden.

Die Messungen zeichnet man mit einem Mikrofon auf, dabei ist darauf zu achten, dass das Mikrofon immer mit einem Mindestabstand von ungefähr 1 m entfernt von den Wänden des Hallraumes positioniert wird, da das diffuse Schallfeld an den Wänden noch von einzelnen abgestrahlten Wellen beeinträchtigt werden kann. Stehende Wellen können vermieden werden, indem man die Seitenwände und die Decke etwas schiefwinklig zueinander anordnet.

Damit in einem annähernd kubischen Hallraum vom Volumen V eine noch genügende Diffusität vorliegt, darf die Grenzfrequenz nicht unterschritten werden.

$$f_{GR} = \frac{1000}{\sqrt[3]{V}}$$

f_{GR} [in Hz] stellt die tiefste zu berücksichtigende Frequenz dar
 V : Volumen des Hallraums [m^3]

Die Grenzfrequenz gibt genau die Frequenz an, ab der ein für Messungen ausreichend diffuses Schallfeld vorliegt.

Für den in dieser Arbeit verwendeten Hallraum ist ein Volumen von $42,9 m^3$ angegeben.

Gemäß [32] ergibt sich als Grenzfrequenz folgender Wert:

$$f_{grenz} = \frac{1000}{\sqrt[3]{42,9 m^3}} = 286 Hz$$

2.2.6 Aeroakustische Schallquellen

Durch Strömung erzeugter Lärm wird als aerodynamischer Lärm bezeichnet. Es werden drei Arten der aeroakustischen Quellen unterschieden [s. Abb. 2.6]. Die Art der Quelle legt die Geschwindigkeitsabhängigkeit fest.

Monopolquelle (Volumenquelle)

ein sich zeitlich ändernder Massenfluß pro Volumen generiert die Schallentstehung

Dipolquelle (Impulsquelle)

ein Feld von Wechselkräften pro Volumen generiert die Schallentstehung

Quadrupolquelle (ungestörte Wirbelquelle)

ein Feld von Wechsel- und Druckspannungen in freien Strömungen generiert die Schallentstehung

Ein Schallfeld, das sich aus mehreren Schallquellen zusammensetzt, bezeichnet man als Multipolquelle.

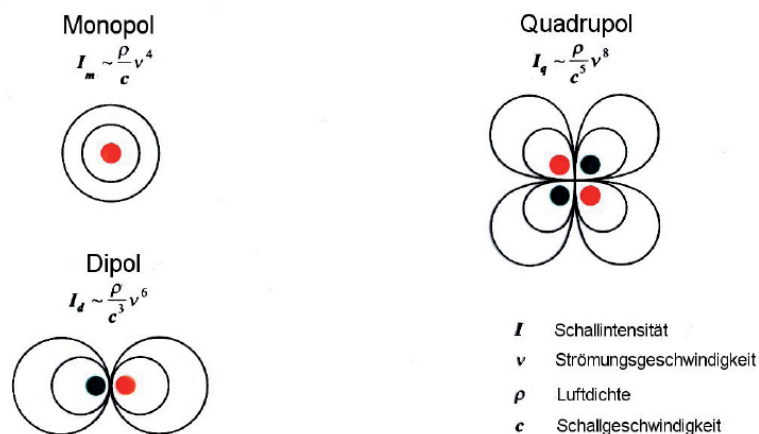


Abb. 2.6 : Aeroakustische Schallquellen [38]

2.2.7 Schallausbreitung

Ausgehend von einer Schallquelle breiten sich die Schallwellen zunächst gleichförmig in alle Richtungen aus, bis sie schließlich auf ein Hindernis treffen. Der reflektierte Anteil, der absorbierte Anteil und der sich weiter ausbreitende Anteil überlagern sich und bilden damit ein sehr komplexes Schallfeld aus.

Bei sich ändernden Querschnitten wird ein Teil der Schallwelle bei der Übergangsstelle reflektiert, der andere Teil durchgelassen. Ist dies nicht gewollt, so ist dabei zu beachten, dass die Querschnittsänderung langsam und stetig erfolgt. Soll eine Schallwelle aus einem Rohrstück in einen Raum reflexionsfrei abgegeben werden, wird am Rohrende ein Trichter aufgesetzt. Der Trichter, auch Impedanzanpasser genannt, passt den Wellenwiderstand der Schallwellen allmählich an. Mit dem Trichter kann gemessen werden, welcher Schall im Rohr ausbreitungsfähig ist und welcher im Hallraum durch den Trichter ankommt.

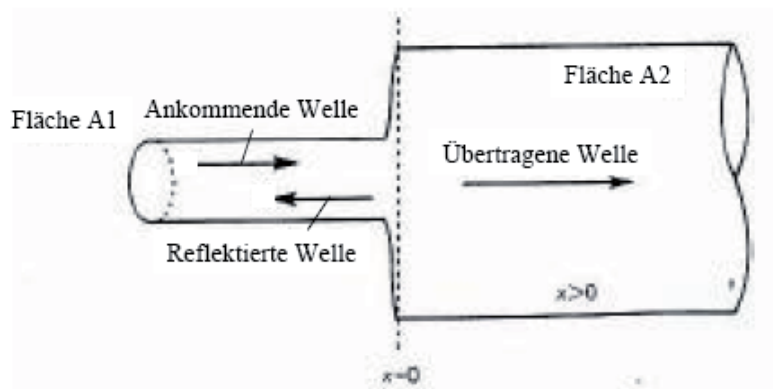


Abb. 2.7 : Strömungsverhalten bei einer Querschnittsänderung [16]

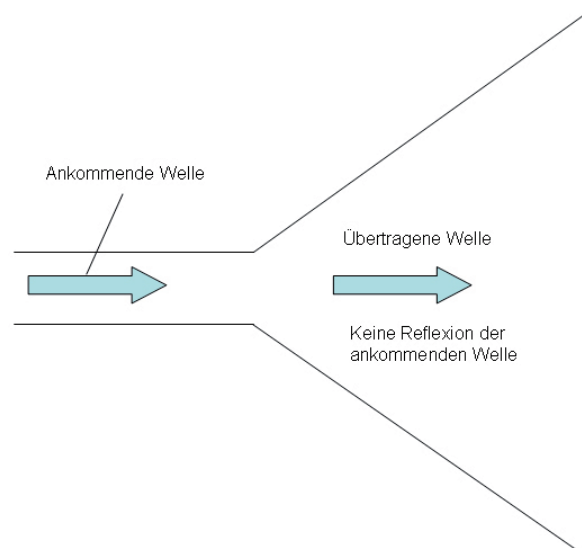


Abb. 2.8 : Strömungsverhalten unter Nutzung eines Impedanzwandlers in der Form eines Trichters



2.2.8 Impedanz

Die akustische Impedanz berechnet sich aus dem Quotienten Druck zu Schallschnelle des Luftschalles.

$$Z_s = \frac{p}{v}$$

p : Druck [N/ m²]

In einer fortlaufenden Welle wird die Impedanz als Feldkenn-Impedanz bezeichnet (spezifische Größe). In einem verlustfreien Medium ist sie reell und wird dann als Wellenwiderstand bezeichnet.

$$Z_0 = \rho \cdot c$$

c: Schallgeschwindigkeit

ρ : Dichte des Mediums

2.2.9 Schallentstehung an Blenden

Strömungen erzeugen Geräusche, wenn sie auf komplizierte Rohreinbauten wie Blenden, Verzweigungen, Querschnittserweiterungen und/oder Krümmer stoßen. Die Energie der Strömung wird dabei teilweise in Schallenergie umgewandelt.

Ein in dem Luftverteilungssystem häufig verwendetes Bauteil ist eine Strömungsblende, die einen Druckverlust und gleichzeitig Strömungslärm erzeugt. Gemäß [3,19] hat der Strömungslärm Dipol- als auch Quadrupolcharakter.

Die Schallentstehung von Blenden ist von vielen Parametern abhängig. Folgende Parameter werden bei Strömungsmessungen mit Blenden betrachtet:

- Turbulenz
- Druckdifferenz
- Anströmgeschwindigkeit
- Geometrie der Blende



2.2.10 Analyse in Frequenzbändern

In der technischen Akustik werden üblicherweise die Oktav- und die Terzanalyse eingesetzt. Um eine feinere Analyse zu erzielen, verwendet man die Terzanalyse. Drei aufeinanderfolgende Terzen ergeben eine Oktave, deshalb wird die Terz in der Literatur oft auch als Drittel-Oktave bezeichnet. Jede dritte Terzmitte ist zugleich auch eine Oktavmitte.

Bei der Oktave stehen die obere und untere Grenzfrequenz in einem Verhältnis 2:1

$$f_o = 2 \cdot f_u$$

Bei der Terz gilt das Verhältnis der Grenzfrequenzen

$$f_u : f_o = 1 : \sqrt[3]{2} = 1 : 1,26$$

Genormt sind die Frequenzen der Oktavmitten und Terzmitten.

$$f_m = \sqrt{f_o \cdot f_u}$$

2.3 Messtechnik

2.3.1 Prandtl- Staurohr

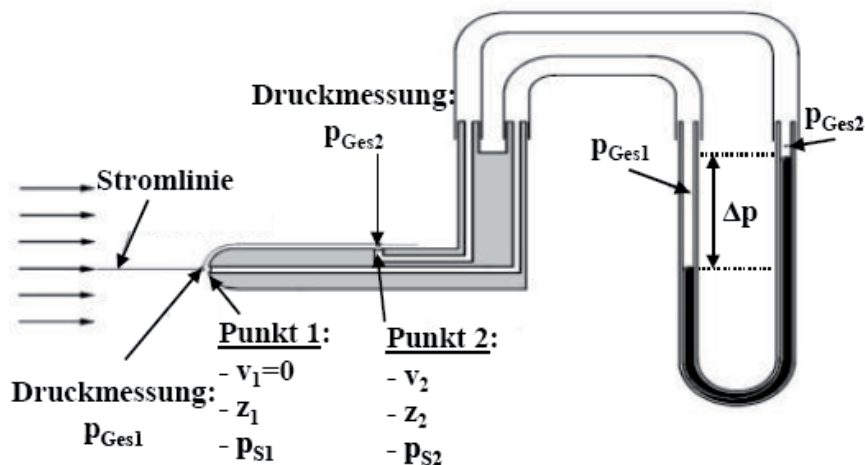


Abb. 2.9 : Prandtl - Staurohr [19]

Das Prinzip des Prandtl- Rohres beruht auf der Differenzdruckmessung zwischen dem statischen Druck und dem Gesamtdruck. Absolutdruckmessungen sind nicht möglich.

Die Messungen basieren auf der Bernoulli- Gleichung.

$$p_{ges} = \sum p_i = p_{stat} + \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

Aus der Druckdifferenz kann somit die Strömungsgeschwindigkeit bestimmt werden :

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_{ges} - p_{stat})}{\rho}}$$

Vorteile des Prandtl- Rohres gegenüber dem Einsatz von Blenden:

- kaum erzeugter Druckverlust
- größtenteils lageunabhängig
- tolerant gegenüber Winkelabweichungen zwischen Strömungsrichtung und Achse des Staurohrkopfes (bei $\pm 15^\circ$)

2.3.2 Wirkdruckverfahren

Das Wirkdruckverfahren ist ein häufig verwendetes Durchflussmessverfahren. Als in die Rohrleitung eingebrachte Drosselgeräte werden genormte Blenden, Düsen und Venturidüsen verwendet. Sie sind robuste, mechanische Bauteile. An bestimmten Stellen, den Extrempunkten der Druckkurve, kann der Wirkdruck $p_1 - p_2$ gemessen werden.

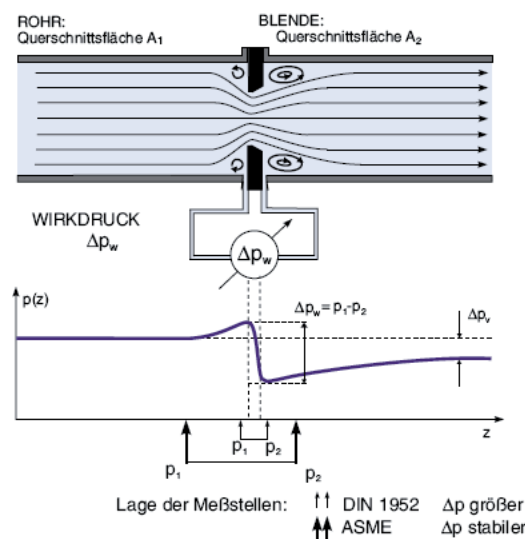


Abb. 2.10 : Druckabfall an einer Blende [16]

Das Prinzip beruht auf der Verengung des Strömungsquerschnittes und der damit an dieser Stelle verursachten Stauung des Fluids. Grund dafür ist die erhöhte Strömungsgeschwindigkeit gegenüber dem weiten Rohr.

Es entstehen unterschiedliche Drücke nahe der Drosselung. Durch die definierten Messstellen vor und hinter der Rohreinschnürung, lassen sich der Volumen- und Massestrom berechnen unter Berücksichtigung der Expansionszahl ε und dem Durchfluskoeffizienten α .

Die Durchflußberechnung beruht auf der Bernoulli- Gleichung und der Kontinuitätsgleichung.

Die beiden Möglichkeiten der Druckentnahme sind die Eckdruckentnahme (größeres Δp) und die Druckentnahme im $D - \frac{D}{2}$ -Abstand (stabilerer Δp -Wert).

Die Druckdifferenz Δp verhält sich proportional zum Quadrat des Volumenstroms, multipliziert mit der Dichte.

Für das Verfahren wird folgende Formel zur Berechnung des Volumenstroms benutzt:

$$\dot{V} = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$

mit

\dot{V} : Volumenstrom

C : Durchflußkoeffizient

Es gilt $C = \frac{\alpha}{E}$ mit $E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}}$ --> Zulaufgeschwindigkeitsfaktor

β : Durchmesser Verhältnis d / D (Blende zu Rohr)

ε : dimensionslose Expansionszahl

A : Kreisquerschnittsfläche mit $A = \frac{\pi}{4} \cdot d^2$

ρ : Dichte des Fluids

Δp : Wirkdruck

2.3.3 Hitzdrahtanemometrie (HWA : Hot Wire Anemometry)

Das Prinzip der Hitzdrahtanemometrie beruht auf der Umströmung eines dünnen beheizten Drahtes, wobei die Änderung der Strömungsgeschwindigkeit auch gleichzeitig eine Änderung der Temperatur des Drahtes mit sich bringt.

Resultierend daraus, kann eine Zu- oder Abnahme des Widerstandes beobachtet werden [s. Abb. 2.11].



Abb. 2.11 : Messprinzip eines Hitzdrahtes [16]

Für die Drähte werden zum Beispiel Materialien wie Wolfram oder Platin verwendet. Hitzdrähte werden in unterschiedlichen Ausführungen angeboten, unter anderem in Miniaturform. Es gibt gerade und schräge Ausführungen. Letztere werden benutzt für Korrelationsmessungen turbulenter Schwankungen, gerade Ausführungen für die Bestimmung der Geschwindigkeitskomponente senkrecht zum Draht. 1D-Hitzdrahtsonden besitzen nur einen Draht, somit kann auch nur eine Geschwindigkeitskomponente gemessen werden. Für die simultane Messung von zwei oder drei Geschwindigkeitskomponenten werden 2D- oder 3D- Hitzdrahtsonden eingesetzt [s. Abb. 2.12].

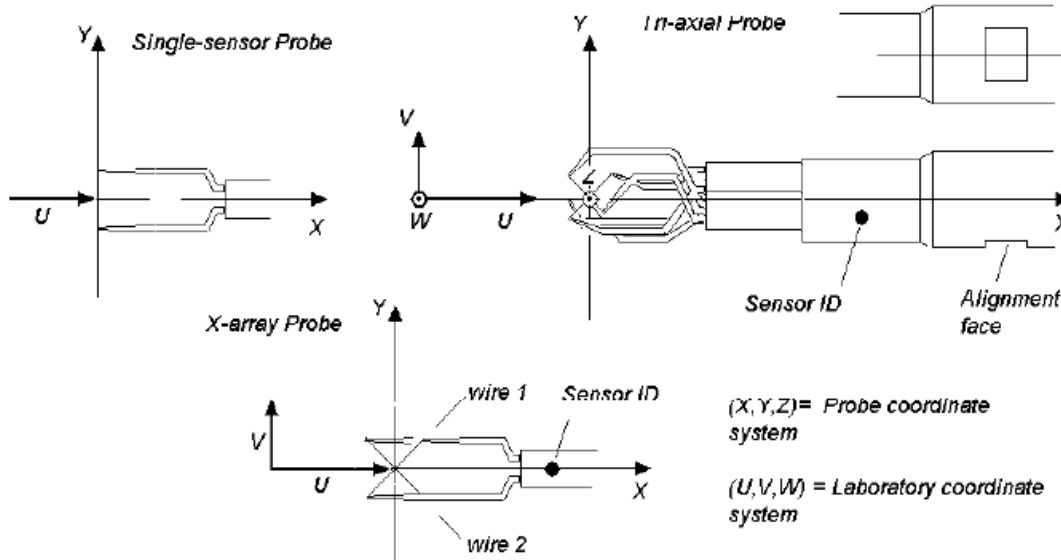


Abb. 2.12 : Koordinatensysteme bei verschiedenen Hitzdrähten [22]

Bei der HWA unterscheidet man zwei verschiedene Verfahren, bei denen Widerstandsbrücken zur Messung der von der Sonde abgegebenen Leistung $I^2 \cdot R_s$ benutzt werden:

Konstant- Strom- Anemometrie (CCA)

Die Einprägung eines konstanten Betriebsstroms [Prinzip s. Abb. 2.13] hat den Nachteil, dass die Messdrahttemperatur je nach Anströmung stark variieren und unter zu geringer Anströmgeschwindigkeit leicht durchbrennen kann.

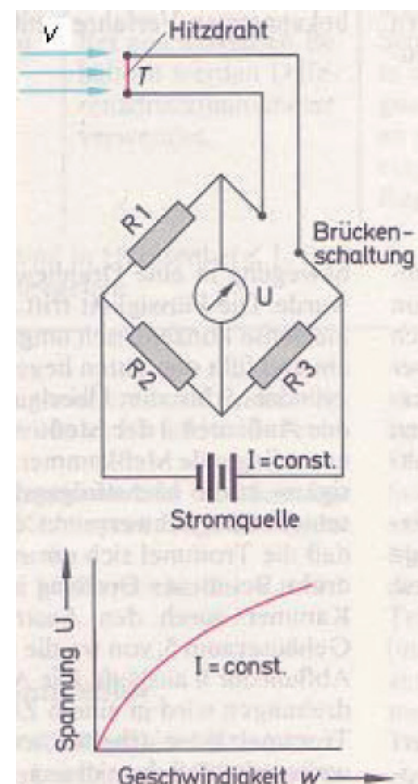


Abb. 2.13 : Konstant- Strom- Anemometer [18]

Konstant-Temperatur-Anemometrie (CTA)

Bei der CTA ist der nachgeführte Speisestrom I zur Konstanthaltung der Drahttemperatur ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit v .
Wegen des Vorteils, dass der Hitzdraht hier mehr geschont wird, wird ausschließlich dieses Verfahren für Strömungsmessungen verwendet [Prinzip s. Abb. 2.14].

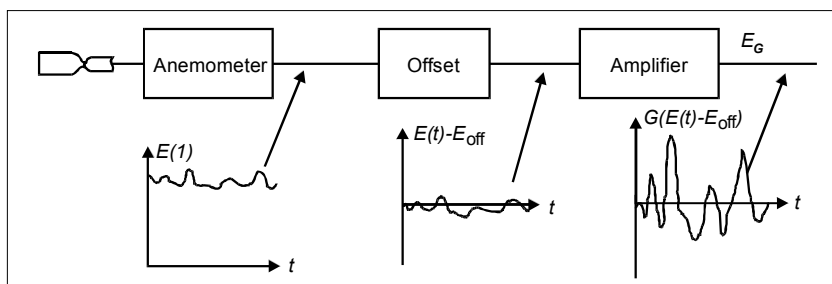


Abb. 2.15 : Prinzip der Signalverarbeitung bei der Hitzdrahtmesstechnik [34]

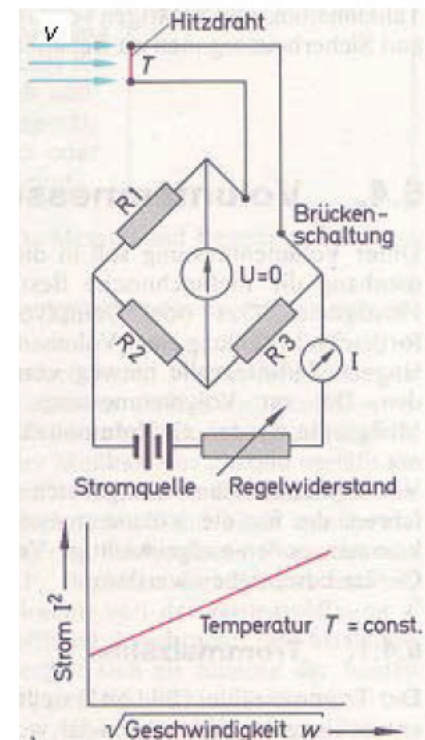


Abb. 2.14 :
Konstant- Temperatur- Anemometer [18]

2.3.4 Particle Imaging Velocimetry (PIV)

Die PIV wird angewendet bei Problemstellungen im Bereich der Dynamik und Mikrofluide.

Eine mit Partikeln versetzte Strömung wird mit einem Laserlichtschnitt beleuchtet. Die Teilchenpositionen werden in kurzen zeitlich aufeinander folgenden Abständen von Kameras erfasst. Anhand der Partikelverschiebung und der Zeitinformation auf den Kameraaufnahmen kann die Geschwindigkeit bestimmt werden (Prinzip s. [12], [22], [27], [28] und Anhang).

2.3.5 Laser- Doppler- Anemometrie (LDA)

Die LDA ist geeignet für die punktförmige Bestimmung mehrdimensionaler Geschwindigkeitsvektoren und Geschwindigkeitsprofile.

Gemessen wird die Dopplerverschiebung des rückgestreuten Lichts der mit einem Laserlicht beleuchteten Partikel, welche im Kreuzungspunkt (Messvolumen) von mindestens 2 Laserstrahlen erfasst wird (Prinzip s. Literaturverzeichnis und Anhang).

Im Rahmen dieser Arbeit kommt ein 1D- LDA zum Einsatz.



2.3.6 Auswahl eines geeigneten Messverfahrens zur Geschwindigkeits- und Turbulenzgradmessung

Eine wichtige Voraussetzung für die Durchführung der Versuche in dieser Arbeit ist die Festlegung auf ein geeignetes Messverfahren.

Aufgrund bestimmter geforderter Kriterien innerhalb dieser Arbeit [s. S. 67; Abb. 2.58] sind dabei die in Kapitel 2 vorgestellten Messverfahren

- Hitzdrahtmesstechnik
- Particle Imaging Velocimetry
- Laser Doppler Anemometrie

in die engere Wahl gekommen.

Die Messanforderungen werden den Eigenschaften der drei Messverfahren gegenübergestellt. Demnach fiel die Auswahl auf die Laser Doppler Anemometrie, da es hier die meisten Übereinstimmungen mit den Anforderungen gab (blau markiert).

Anforderungen	CTA	PIV	LDA
lineare Proportionalität zum Geschwindigkeits signal S(t)	nein	nein, optische Verzerrung durch Plexiglas	ja
sehr gute räumliche Auflösung max. 1mm	ja, Einzelpunktmessung, ca. 5 μm x 1 mm	nein, nur flächenmäßige Darstellung der Geschwindigkeitsvektoren (Multipunkt), Messvolumen variiert abhängig vom Magnetfeld	ja, Einzelpunktmessung, typischerweise 0,16 mm x 27 μm
16 bit Geschwindigkeits auflösung, dynamischer Bereich	abhängig von Analog-Digital- Wandlung, typisch ca. 8- 16 bit	abhängig von der Subpixelauflösung der Partikelverschiebung, 6- 8 bit	16 bit- Digitalisierung der Dopplerfrequenz innerhalb der gewählten Bandbreite
Interferenz mit physikalischem Prozess	ja	nein	nein
kein Einfluss auf andere Variablen	nein	ja	ja
für transparente Rohrstrecke geeignet	ja	ja	ja
unempfindlich gegen Wasser, Schmutz	nein, Sonden schmutz- und nässeempfinlich, oft Beschädigungen	ja, Laser im robusten Gehäuse integriert	ja, Laser im robusten Gehäuse integriert

Abb. 2.16 : CTA, LDA und PIV im Vergleich mit den gestellten Anforderungen in dieser Arbeit [34]

Anforderungen	CTA	PIV	LDA
Messung starker Turbulenzen unkritisch	nein	ja	ja
Ethernetverbindung für einfachen Anschluss am Laptop	ja	ja	ja
hohe Datenraten von 100 kHz/ Sekunde	ja	nein	ja
berührungslose Strömungsmessung	nein	ja	ja
gleichzeitige Messung von Strömungslärm möglich	nein	ja	ja
hohe Messgenauigkeit, Messfehler max. 0,5 %	nein	ja	ja
keine Kalibrierung	nein	nein	ja

Abb. 2.16 : CTA, LDA und PIV im Vergleich mit den gestellten Anforderungen in dieser Arbeit [34]

3. Messaufbau mit Einbausituation der Prüflinge

Um die Zielsetzung dieser Arbeit zu erreichen, wurde folgende Anordnung gewählt:

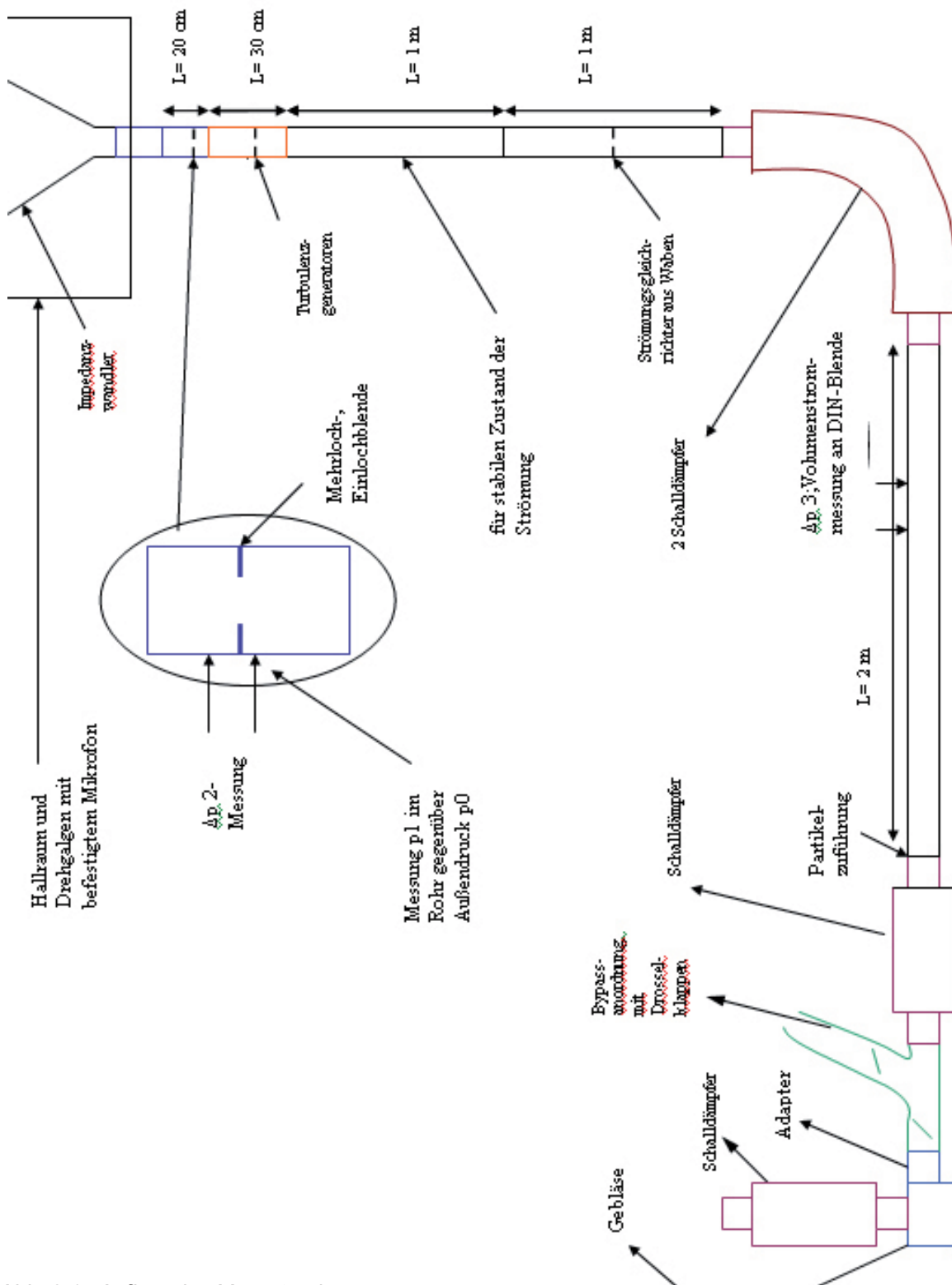


Abb. 3.1 : Aufbau des Messstandes

3.1 Gesuchte Parameter

- Schalldruckpegel
- Schalleistungspegel
- Temperatur in °C
- statischer Druck und Differenzdruck
- Volumenstrom
- Geschwindigkeit des Fluides (Medium Luft)
- Turbulenzgrad
- Dichte des Fluides (aus Tabellen [5] : 1,225 kg/ m³ bei T= 20 °C)

3.2 Verwendete Prüflinge

Folgende Turbulenzgeneratoren kommen zum Einsatz:

- Im Rohr befestigter Turbulenzgenerator 1 (zackenähnlich) aus Schaum [TG1]
- im Rohr befestigter Turbulenzgenerator 2 (plattenähnlich, gebogen) aus Schaum [TG2]

Diese Formen der Turbulenzgeneratoren wurden ausgesucht, aufgrund der Annahme, dass sie wenig Lärm und ein rotationssymmetrisches Profil erzeugen.

Folgende Blenden kommen zum Einsatz:

- Mehrlochblende
- Einlochblende

Diese Formen der Systemblenden wurden ausgesucht, da sie typischerweise in den Luftverteilungsrohren einer Flugzeugklimaanlage zur Durchsatzregulierung vor den Luftauslässen der Flugzeugkabine eingesetzt werden.

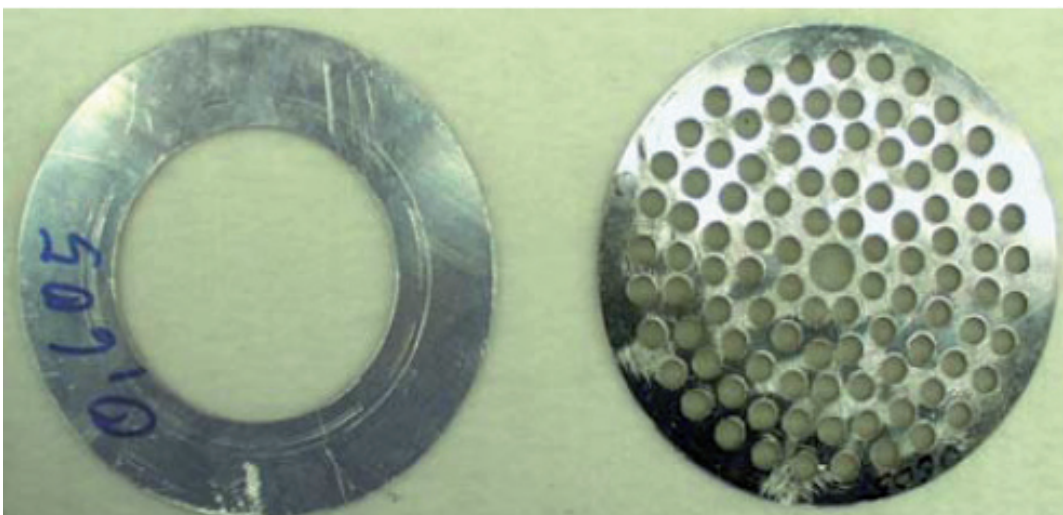


Abb. 3.2 : Typische Blendengeometrien (Einlochblende, Mehrlochblende), die für die Volumeneinstellung bei einem Luftverteilungssystem einer Flugzeugklimaanlage verwendet werden [17]



Maße der verwendeten Systemblenden in dieser Arbeit

Einlochblende:

Dicke = 2 mm

Außendurchmesser = 110 mm

Innendurchmesser = 75 mm

Mehrlochblende:

Dicke = 2 mm

Außendurchmesser = 110 mm

Durchmesser eines Loches = 5 mm

Freie Querschnittsfläche: 72,5 mm

3.3 Detaillierte Ansicht der Messprofile

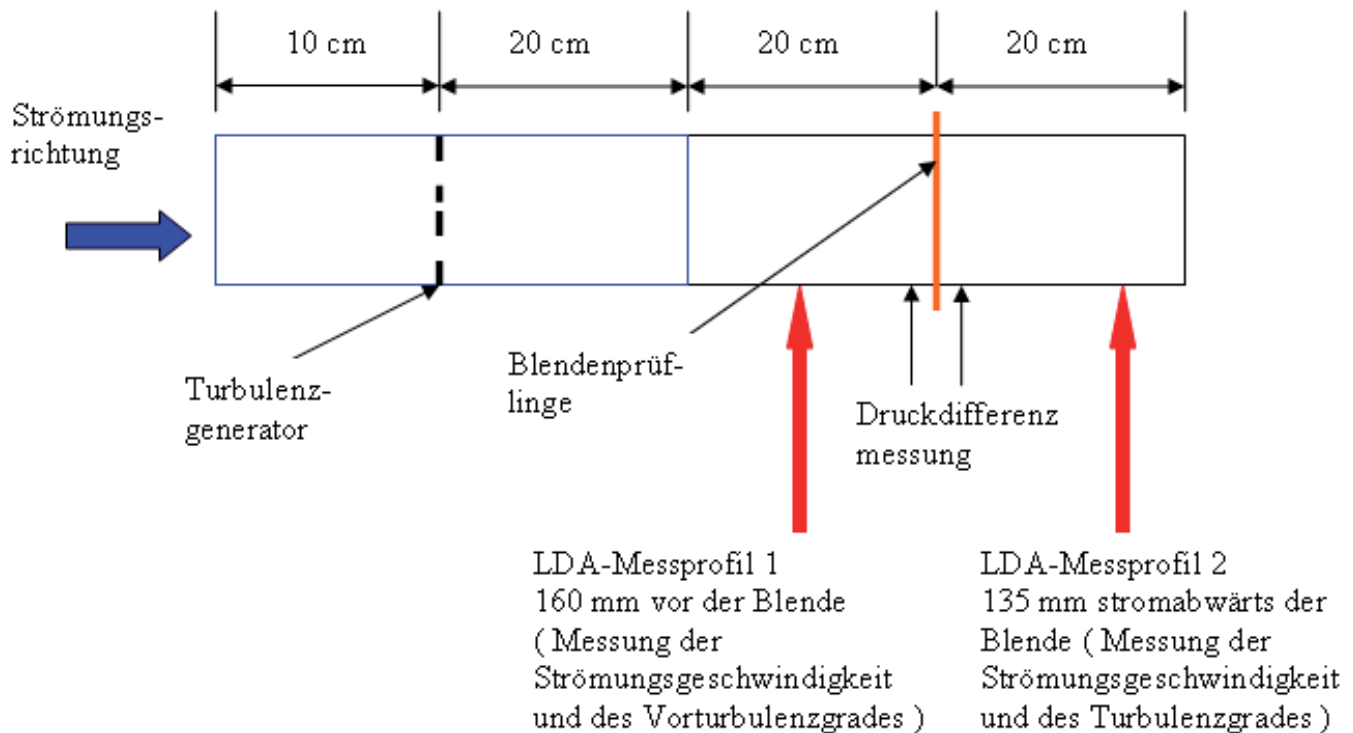


Abb. 3.3 : Detaillierte Ansicht der Messprofile und gewählte Einbaulage der lärm erzeugenden typischen Blenden (Einlochblende, Mehrlochblende), die in einem Luftverteilungssystem einer Flugzeugklimaanlage eingebaut werden

Das obige Bild zeigt eine Detailansicht der Messprofile um die lärm erzeugenden Blenden. Entsprechend der gewünschten Konfiguration (Standardkonfiguration bis Konfiguration 6) kann das 30 cm lange Plexiglasrohr mit dem Turbulenzgenerator ohne Umstände beliebig ein- oder ausgebaut werden. Damit der Ein- und Ausbau der Messblenden und der Plexiglasrohre schnell erfolgen kann, werden die Flansche der Rohre verschraubt.

Der Innendurchmesser der Plexiglasrohre beträgt $d_i = 100$ mm.

Die vom Gebläse erzeugte Strömungsluft trifft auf den Turbulenzgenerator der einen Widerstand verursacht. Durch die Störung des Luftstromes wird eine Turbulenz sowie Strömungslärm hervorgerufen. Am Messprofil 1 wird die Turbulenz vom Laser Doppler Anemometer gemessen.

Wahlweise wird eine repräsentative Systemblende (Einlochblende, Mehrlochblende) eingesetzt. Am Messprofil 2 wird die von der Systemblende generierte Turbulenz vom LDA erfasst. Desweiteren wird unmittelbar vor und unmittelbar hinter der Messblende (im Gegensatz zur Volumenstrommessstelle, bei der sich die beiden Druckmesspunkte im Abstand D vor und $D/2$ hinter der DIN-Blende befinden) der Differenzdruck gemessen .

3.4 Verwendete Messkonfigurationen in dieser Arbeit

Messkonfigurationen der akustischen Messungen

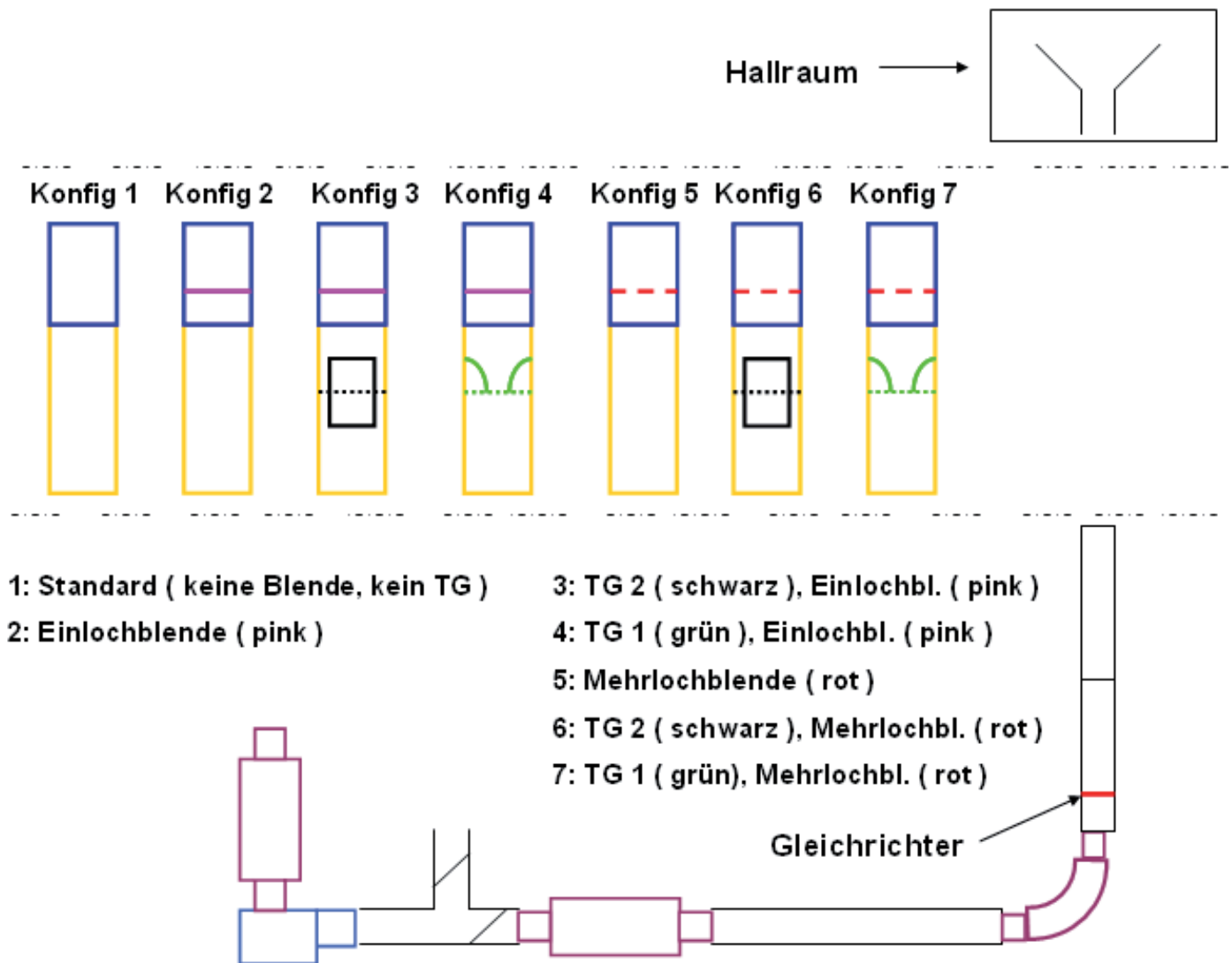


Abb. 3.4 : Übersicht der verwendeten Messkonfigurationen bei den akustischen Messungen, die beliebig und modular ausgetauscht werden können

Messkonfigurationen der strömungsmechanischen Messungen

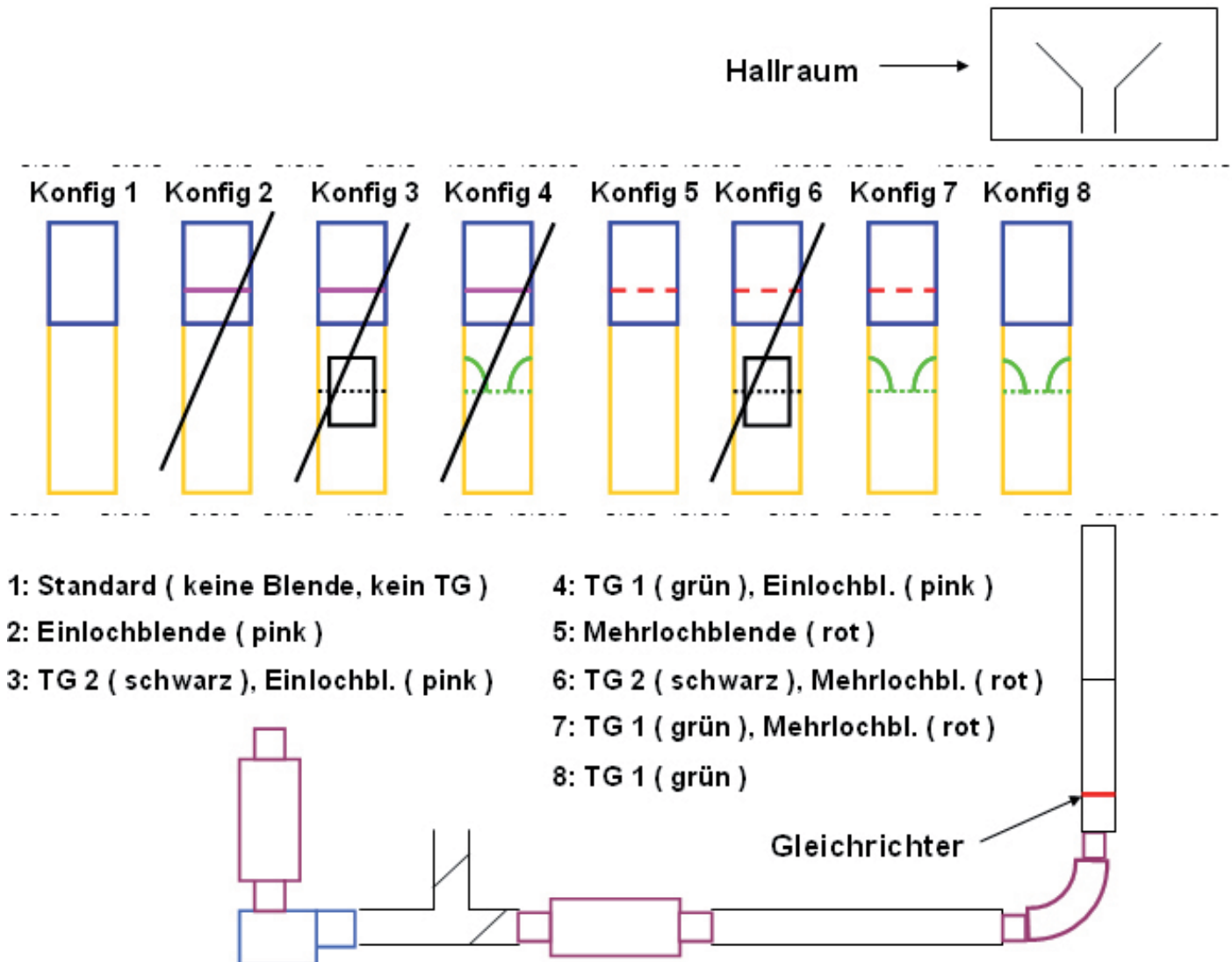


Abb. 3.5 : Übersicht der verwendeten Messkonfigurationen bei den strömungsmechanischen Messungen, die beliebig und modular ausgetauscht werden können



4. Versuchsablauf

Die Strömungsmessungen werden simultan mit den Akustikmessungen durchgeführt, was eine unmittelbare Zuordnung der gemessenen Strömungsparameter mit dem erzeugten Lärm an der Blende erlaubt.

Der Versuch wird über ein durch LabVIEW dargestelltes Bedienfenster gesteuert. Hier sind die gemessenen Strömungsparameter (Differenzdrücke, Volumenstrom sowie die Motorleistung) abgebildet [s. Abb. C.1].

Nach Einstellung der gewünschten Geschwindigkeit des Gebläses werden der Volumenstrom an der DIN-Blende sowie der statische Druck und der Differenzdruck an der Systemblende erfasst. Angezeigt wird gleichzeitig die Leistung des Gebläses. Mit Hilfe des erstellten Bedienfensters in LabVIEW können alle Daten gleichzeitig aufgezeichnet und am Laptop weiterverarbeitet werden. Die Drosselklappe in der Messstrecke und die Drosselklappe im Bypassrohr können über das Bedienfenster zwischen 0° und 90° verstellt werden, um den Volumenstrom in beliebigen Stufen im Intervall von 10 l/s zu ändern.

Die Geschwindigkeit wird in folgenden Stufen variiert (Werte gerundet) :

0 m/s, 4 m/s, 8 m/s, 12 m/s und 16 m/s

Vom LDA-System wird der Turbulenzgrad hinter der Blende erfasst¹, wobei das von den sich zwei kreuzenden Laserstrahlen hervorgerufene Messvolumen quer zum Rohr über die Rohrmittte in 2,5 mm- Abständen traversiert wird. Durch eine Fast Fourier Transformation innerhalb der LDA Software wird der gemessene Turbulenzgrad in ein Frequenzspektrum überführt. Im Hallraum wird gleichzeitig der durch die Blende erzeugte Strömungslärm als Schalldruckpegel von dem an dem Schwenkgalgen befestigten Mikrofon gemessen und die Messwerte auf das Schallpegelmessgerät übertragen. Die mit Hilfe des Schwenkgalgens an verschiedenen Orten im Hallraum gemessenen Schalldruckpegel werden während einer Zeitdauer von 16 s gemittelt und ergeben so einen zu den Strömungsparametern zugehörigen akustischen Messwert. Für die gesuchten Kennlinien ist eine Berechnung des Schalleistungspegels aus dem Schalldruckpegel notwendig.

Wahlweise werden die Messungen zur Erfassung der Turbulenz und des Strömungslärms durchgeführt mit [s. Abb. 3.5]:

- Systemblende
- mit Systemblende und Turbulenzgenerator
- Turbulenzgenerator²

1 Das Geschwindigkeits- und Turbulenzgradprofil wird stets simultan aufgezeichnet.
2 Untersuchung der Turbulenzgeneratoren siehe Diplomarbeit von Eike Grunau



5. Versuche und Ergebnisse

5.1 Charakterisierung der eingestellten Rohrströmungen

Die Zielsetzung in folgendem Abschnitt ist die Erzeugung homogener rotationssymmetrischer mittlerer Strömungseigenschaften. In Kapitel 6 wird untersucht, wie sich die erzeugten Turbulenzgrade auf die Schalleistung auswirken.

5.1.1 Berechnung der kritischen Strömungsgeschwindigkeit

Mit der Berechnung der kritischen Rohrströmungsgeschwindigkeit, oberhalb welcher Rohrströmungen turbulent werden, ergibt sich, dass im Luftverteilungssystem einer Flugzeugklimaanlage immer eine turbulente Strömung herrscht, weil die Rohrströmungsgeschwindigkeiten dort immer sehr viel größer sind.

$$\rightarrow v_{krit} = \frac{Re_{krit} \cdot \nu}{d} = \frac{2320 \cdot 15,13 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}}{0,1 m} = 0,35 \frac{m}{s}$$

Re_{krit} : kritische Reynoldszahl

ν : dynamische Viskosität [m^2/s]

d: Rohrdurchmesser [m]

5.1.2 Überprüfung der Rotationssymmetrie des Strömungsgeschwindigkeitsprofils

Eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse (Schwankungen von max. 5- 10 %) ist eine Voraussetzung für alle darauffolgenden Messungen.

Um grundsätzliche Zusammenhänge zwischen den gewählten Anströmparametern (Turbulenzgrad, Strömungsgeschwindigkeit) und dem an der Blende erzeugten Lärm erkennbar zu machen, wird ein möglichst rotationssymmetrisches Profil dieser Parameter versucht, zu realisieren.

In realen Luftverteilungssystemen ist dieser Zustand sicher sehr oft aufgrund der geometrischen Rohrführung durch inhomogene Verteilungen der Strömungsparameter überlagert. Derartige Betrachtungen sind nicht Gegenstand dieser Arbeit und müssen in späteren Untersuchungen überprüft werden.

Die Anströmparameter sollen mit dem LDA-System überprüft und ein Vergleich mit den Ergebnissen aus der Arbeit von Adeline Gomet [16] gezogen werden.

Zur Erreichung symmetrischer Profile im aktuellen Messaufbau [s. Abb. 3.1] wird zusätzlich ein Wabengleichrichter hinter den gekrümmten Schalldämpfern eingesetzt. Der Wabengleichrichter verhindert den Turbulenzaustausch der Fluidteilchen untereinander.

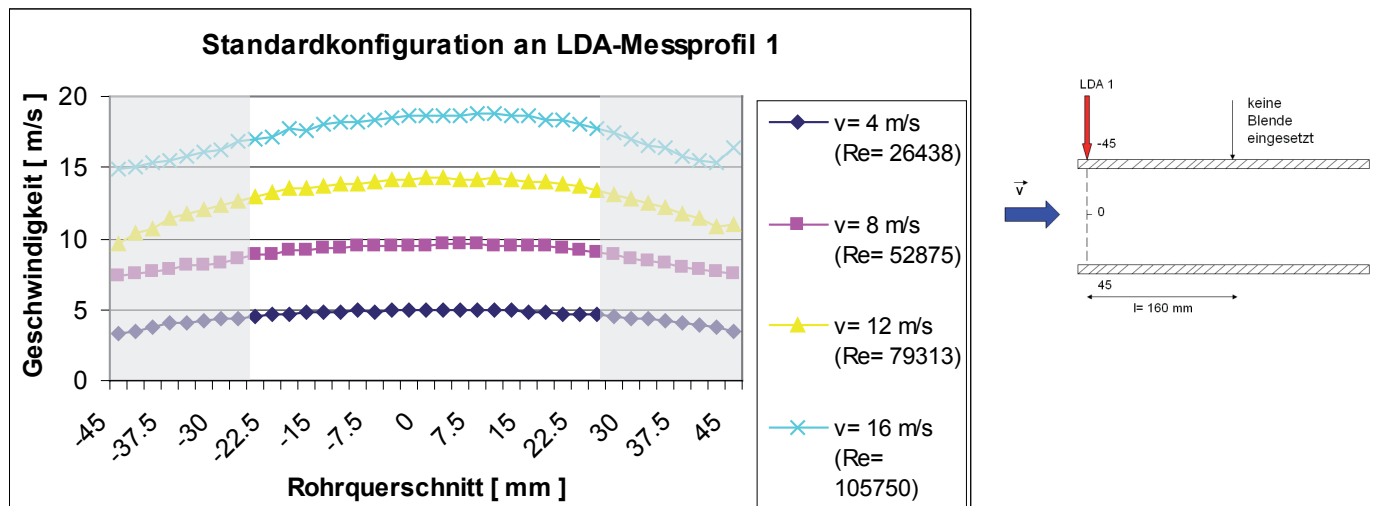


Abb. 5.1 : Überprüfung der Rotationssymmetrie am LDA-Messprofil1

Ferner wird untersucht wie sich das Geschwindigkeitsprofil an einem Messort mit größerem Abstand zu dem Gleichrichter ändert. Dieser Vergleich erfolgt zwischen LDA- Messprofil 1 und LDA- Messprofil 2 [s. Abb. 3.3], da später auch die Prüflinge zwischen diesen Messprofilen eingebaut werden.

Zudem wird damit überprüft, ob die Übergänge zwischen den Flanschen der Plexiglasrohre glatt sind, das heißt dass keine Störkante eine zusätzliche, undefinierte Turbulenz erzeugt, die abhängig von einem spielbedingten seitlichen Versatz zweier Rohrenden sein könnte.

Im Diagramm Abb. 5.1 und in allen folgenden Diagrammen wird nur der Bereich zwischen -22,5 mm und 22,5 mm betrachtet, da dort keine systematischen Messfehler zu erwarten sind. Zudem sind die angegebenen Geschwindigkeitswerte in den Legenden aller Diagramme zu Gunsten eines besseren Überblicks als gerundete Werte angegeben.

Die Ergebnisse oben genannten Messungen sind in den Diagrammen Abb. 5.1 und Abb. 5.2 dargestellt.

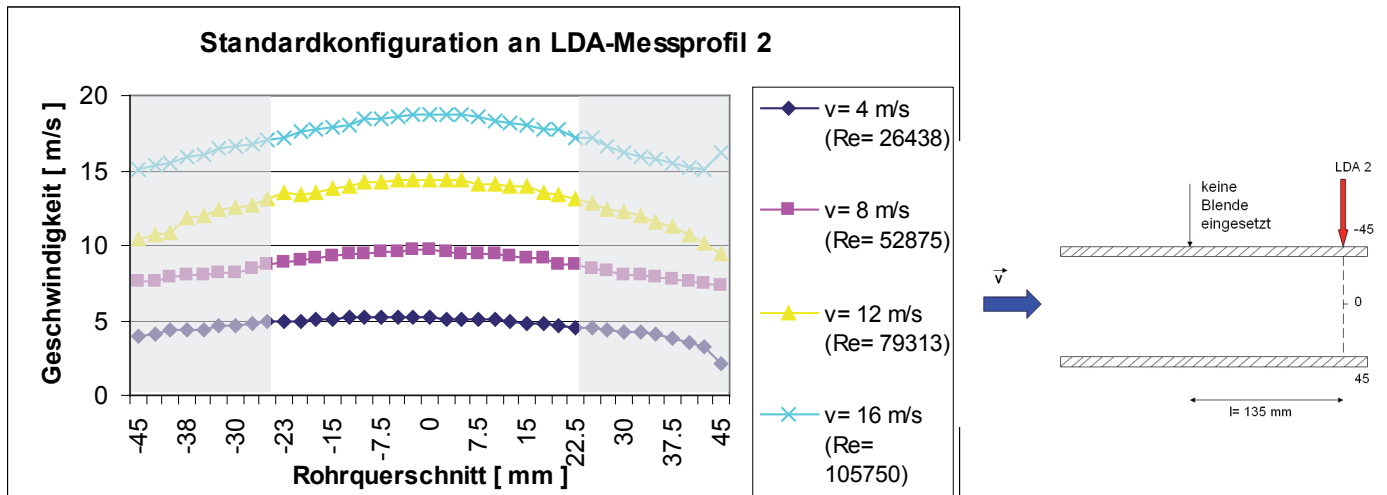


Abb. 5.2 : Überprüfung der Rotationssymmetrie am LDA-Messprofil 2

Bei Analyse der beiden Diagramme fällt sofort auf, dass das Geschwindigkeitsprofil an beiden LDA- Messprofilen nahezu unverändert und rotationssymmetrisch bleibt. Das bedeutet, dass es keine Störkante an der Übergangsstelle der beiden Flansche gibt und dass die Geschwindigkeit über dem Rohrquerschnitt (nach dem Gleichrichter) annähernd homogen ist.

Der Verlauf der Geschwindigkeitskurven ist typisch für eine Rohrströmung. Zur Mitte der Rohrachse nimmt die Geschwindigkeit stetig zu, erreicht ihr Maximum in der Mitte des Rohres und sinkt auf der anderen Seite wieder stetig ab.

Damit ist die Voraussetzung für eine Reproduzierbarkeit der Messergebnisse geschaffen.

5.1.3 Überprüfung der Rotationssymmetrie des Turbulenzgradprofils

Als nächstes wird die Symmetrie des Turbulenzgrades über den Rohrquerschnitt überprüft. Über den Signalprozessor des LDA- Systems wird der Turbulenzgrad simultan während der Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten aus diesen berechnet und auf dem Bildschirm in einem separaten Diagramm angezeigt.

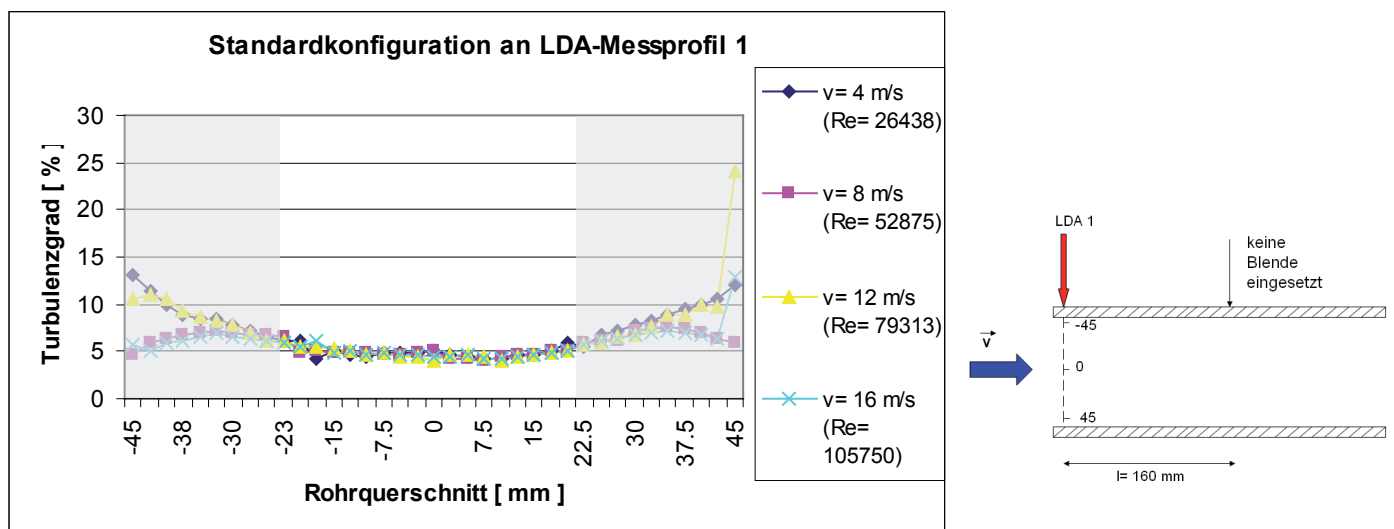


Abb. 5.3 : Überprüfung der Rotationssymmetrie des Turbulenzgrades am LDA- Messprofil 1

Auffällig ist, dass die Turbulenzgradkurven der Geschwindigkeiten von 4 m/s und 12 m/s bei ca. -32 mm und bei 35 mm sehr dicht beieinander liegen, die Turbulenzgradkurven der Geschwindigkeiten 8 m/s und 16 m/s hingegen aber nach unten abfallen, das heißt der Turbulenzgrad nimmt zur Rohrwand hin ab.

Als sinnvoll zu bewerten ist nur der Rohrquerschnitt zwischen -22,5 mm und 22,5 mm, da nahe den Wandbereichen große Abweichungen zwischen den Turbulenzgraden auftreten, was auf systematische Messfehler zurückzuführen ist.

Laut Theorie [22] waren Turbulenzgradprofile zu erwarten, bei denen die Werte zur Rohrmitte hin bis auf ein Minimum sinken. Diese Annahme wird in den Diagrammen Abb. 5.3 und Abb. 5.4 bestätigt.

Der sprunghafte des letzten Traversierpunktes bei 12 m/s und 16 m/s ist mit einer niedrigen Datenrate nahe der Rohrwand zu erklären. Das LDA misst bei sehr niedrigen Datenraten und an der Rohrwand hauptsächlich Rauschen. Dieses Phänomen tritt hauptsächlich an der Rohrwand auf, da der Photomultiplier des Lasers dann zu viele Reflexionen der Plexiglaswand erfasst.

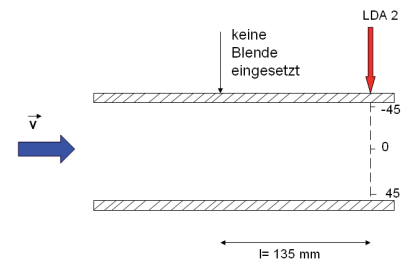
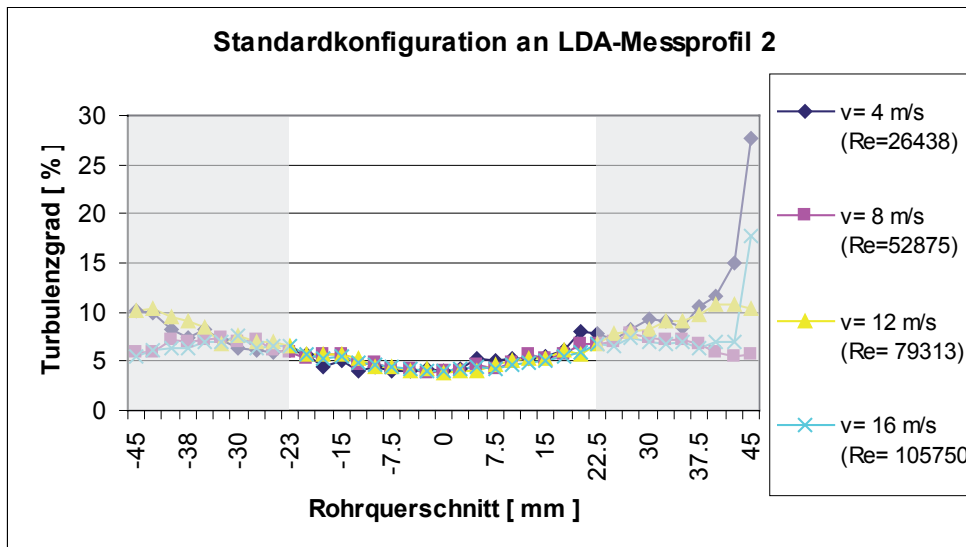


Abb. 5.4 : Überprüfung der Rotationssymmetrie des Turbulenzgrades am LDA- Messprofil 2

Wie zu erwarten, nimmt der Turbulenzgrad allgemein in einem geraden Rohr durch Energiedissipation leicht um 2- 3 % ab. Es kann angenommen werden, dass mit einer längeren Rohrstrecke eine weitere Verringerung des Turbulenzgrades erreicht wird. Unter eine bestimmte minimale Grenze sinkt der Turbulenzgrad nicht, da dieser noch von der Rohrwandrauhigkeit und der Reynoldszahl abhängig ist.

Der Turbulenzgrade aller Geschwindigkeiten verhalten sich annähernd gleich bis zum Traversierpunkt -37.5 mm und 37.5 mm. In Rohrwandnähe sind wieder höhere Fluktuationen der Geschwindigkeit bei 4 m/s und 12 m/s zu erkennen (abgedeckter Bereich). Die genauen Ursachen der Abweichungen sind noch zu untersuchen. Mögliche Einflüsse könnten systematische Messfehler sein.

Die LDA- Messungen beruhen alle auf einer statistischen Messdatenerfassung. Eine Variation der Datenrate kann das Messergebnis ebenso beeinflussen wie die Variation der Validationsrate der gemessenen Partikel, die vom Signalprozessor bestimmt wird.

Der Verlauf aller Kurven kann wieder als annähernd symmetrisch bezeichnet werden. Die sprunghaften Anstiege am Traversierpunkt 45 mm bei den Geschwindigkeiten 4 m/s und 16 m/s beruhen auf einer niedrigen Validationsrate und den vom Photomultiplier erfassten Rauschsignalen.

5.1.4 Untersuchung an der Mehrlochblende

Dargestellt werden die Geschwindigkeits- und Turbulenzgradprofile bei den mittleren Geschwindigkeiten 4 m/s, 8 m/s und 12 m/s an:

- LDA- Messprofil 1 (zur Bestimmung der Geschwindigkeitsänderung vor der Blende und der Vorturbulenz)
- LDA- Messprofil 2 (zur Bestimmung der Geschwindigkeitsänderung nach der Blende und der erzeugten Turbulenz).

Die Messungen ergeben Folgendes:

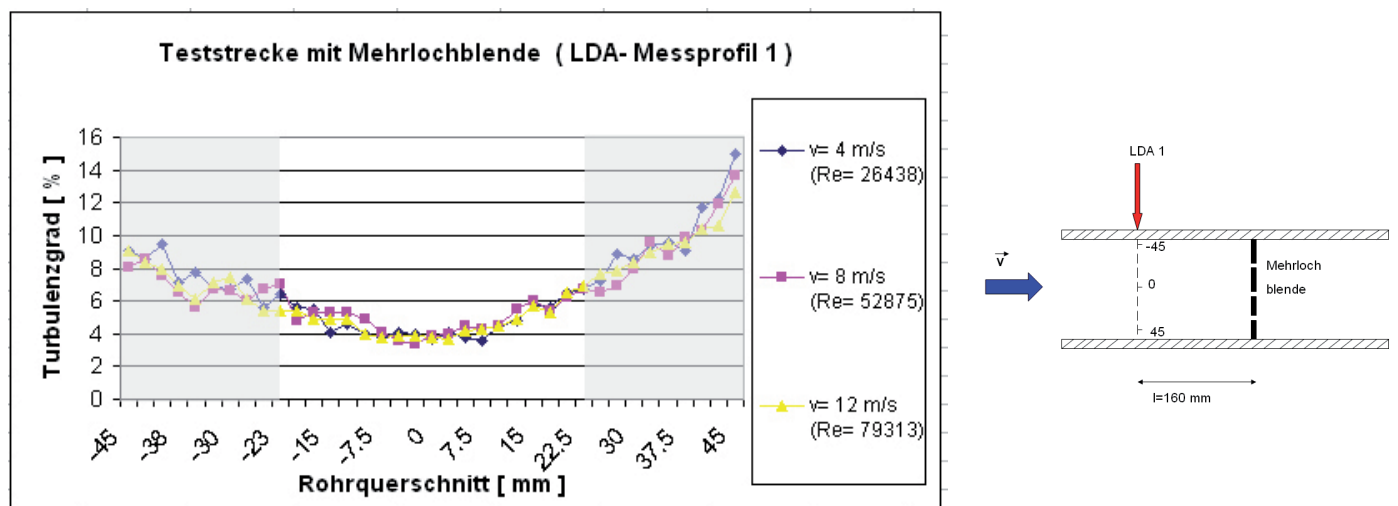


Abb. 5.5 : Geschwindigkeitsprofil am LDA- Messprofil 1 mit eingesetzter Mehrlochblende

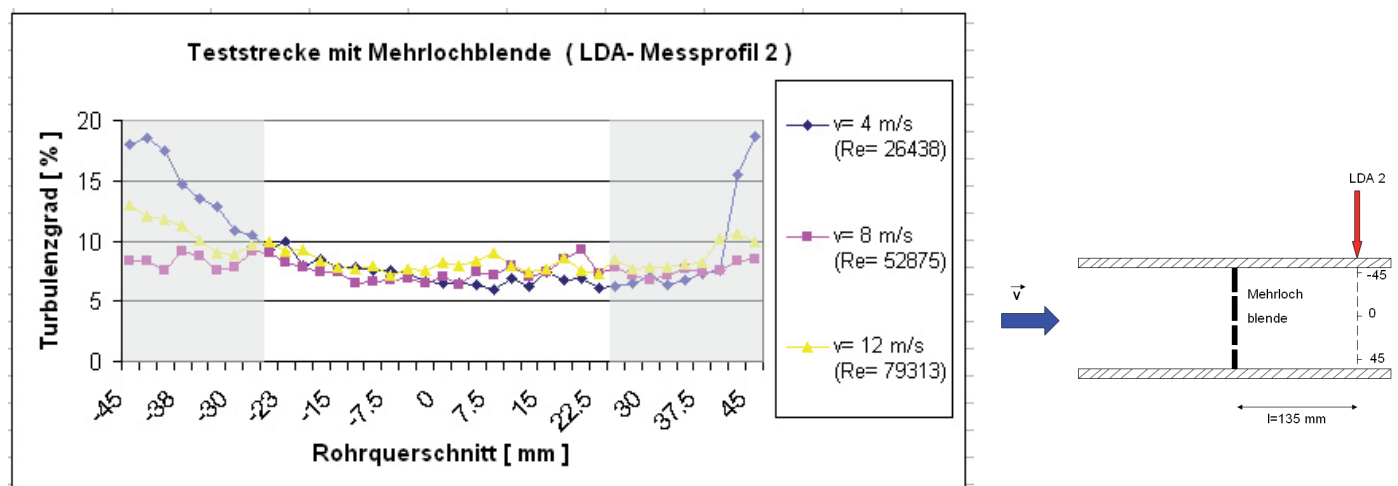


Abb. 5.6 : Geschwindigkeitsprofil am LDA- Messprofil 2 mit eingesetzter Mehrlochblende

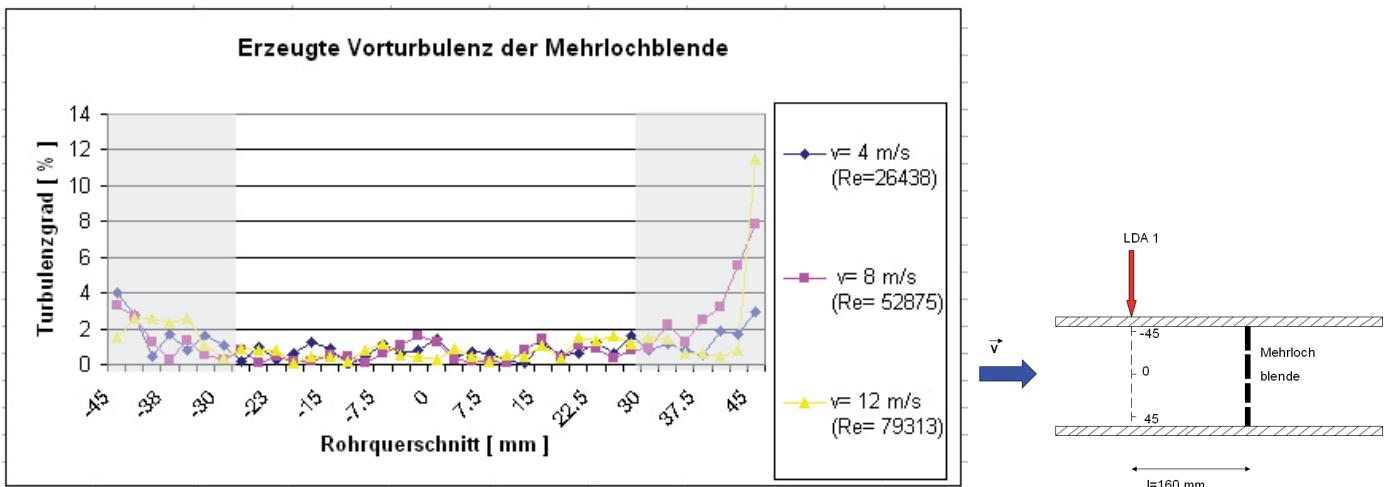


Abb. 5.7 : Vorturbulenz der Mehrlochblende ohne Einbezug der Standardkonfiguration am LDA- Messprofil 1

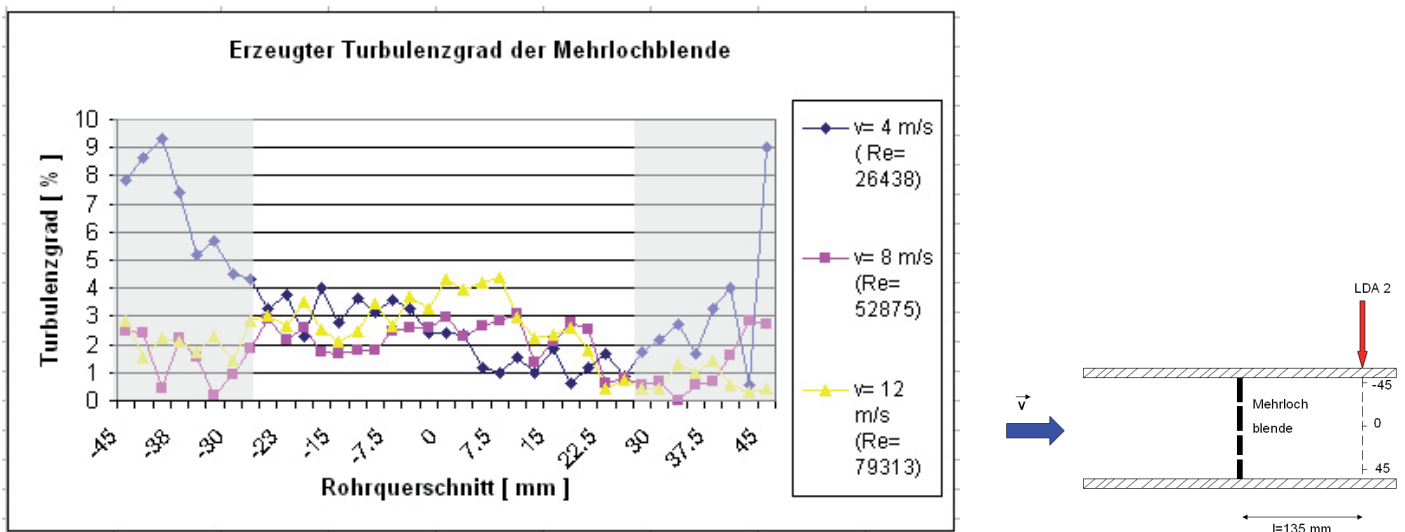


Abb.5.8 : Erzeugter Turbulenzgrad der Mehrlochblende ohne Einbezug der Standardkonfiguration am LDA- Messprofil 2

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Einsatz einer Mehrlochblende eine Abflachung aller Geschwindigkeitsprofile an LDA- Messprofil 2 bewirkt [s. Abb. 5.5, Abb. 5.6]. Die Messblende erzeugt also Profile, die über den Rohrquerschnitt annähernd konstante Geschwindigkeiten aufweisen.

Die von der Mehrlochblende erzeugte Vorturbulenz [s. Abb. 5.7] beläuft sich auf 2% bis maximal 3 %. Der Einfluss der Mehrlochblende auf die Vorturbulenz kann somit als gering betrachtet werden. Nahe den Wandbereichen nimmt der Turbulenzgrad leicht um 1% bis 2 % zu.

Die von der Mehrlochblende erzeugte Turbulenz [s. Abb. 5.8] variiert sehr stark im Bereich der Rohrwand.

Bei einer Geschwindigkeit von 4 m/s erzeugt die Mehrlochblende einen hohen Turbulenzgrad auf dem linken Rohrquerschnitt bis ca. -22,5 mm.

Dort liegt er um 2 % bis 5 % höher als bei den Geschwindigkeiten 8 m/s und 12 m/s.

Auch auf der anderen Rohrseite zwischen 22,5 mm und 42,5 mm liegt der Turbulenzgrad um 1% bis 2 % über den anderen Werten. In der Rohrmitte sind die Turbulenzgradprofile enger beieinander und verhalten sich homogener.

Anhand dieser Ergebnisse kann gesagt werden, dass die Turbulenz gleichmäßiger auffällt , je weiter der von der Blende erzeugte Turbulenzgrad strömabwärts gemessen wird (vgl. Messungen mit Turbulenzgenerator 1).

Aufgrund der starken Schwankungen der verschiedenen eingestellten Geschwindigkeiten in der Rohrmitte kann gesagt werden, dass der gewählte Abstand LDA- Messprofil 2 zu klein gewählt wurde. Spätere Messungen mit einer größer gewählten Entfernung vom erzeugten Turbulenzgrad könnten deutlich homogenere Messprofile erfassen.

Die Begründung für die zur Rohrmitte vergleichsweise hoch ausfallenden Turbulenzgrade an der Rohrwand liegt in der asymmetrischen Verteilung der einzelnen Löcher, welche aus der nicht maschinellen Fertigung der Mehrlochblende hervorgeht [s. Abb. 5.10].

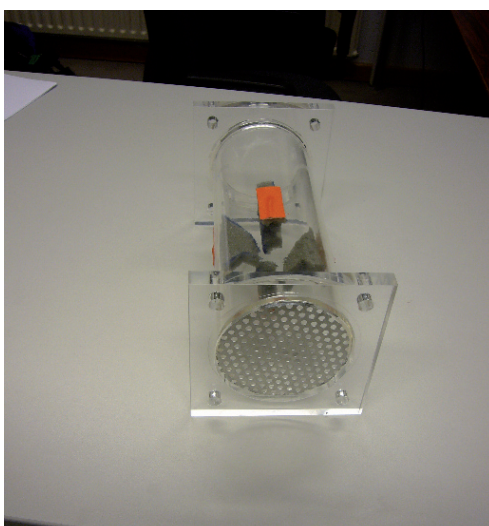


Abb. 5.9 : In dieser Arbeit verwendete Mehrlochblende mit Turbulenzgenerator eingebaut im Plexiglasrohr



Abb. 5.10 : Verwendete Mehrlochblende

5.1.5 Untersuchung am Turbulenzgenerator 1

Es werden die Turbulenzgradprofile dargestellt bei den Geschwindigkeiten:

- 4 m/s
- 8 m/s
- 12 m/s
- 16 m/s

Die zackenförmigen Schaumstücke des Turbulenzgenerators 1 wurden mit Klebeband an der Rohrwand positioniert. Zur Stabilisierung sind die Elemente zusätzlich von außen mit Draht befestigt worden.

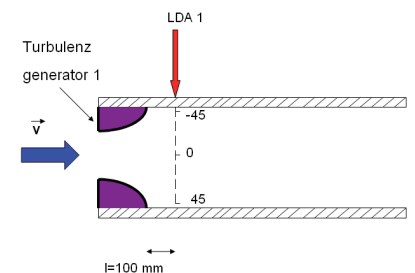
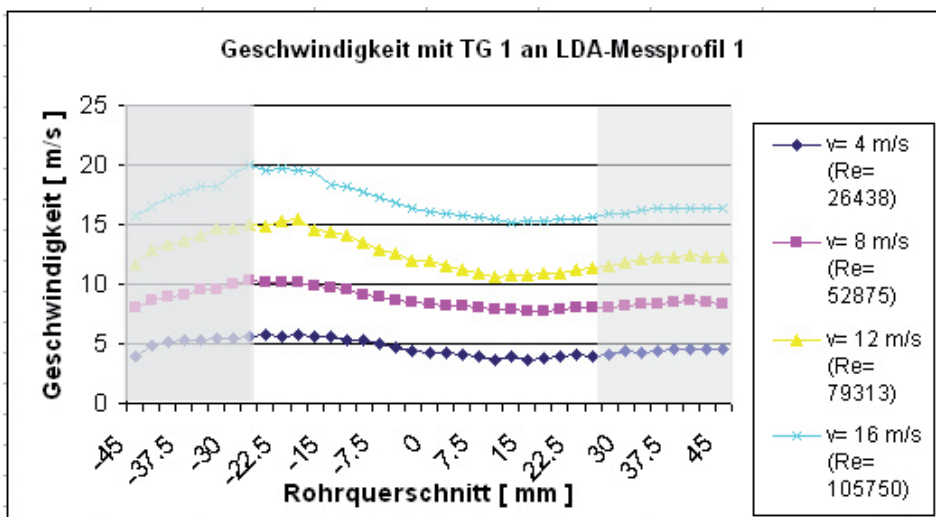


Abb. 5.11 : Geschwindigkeitsprofile mit eingesetztem Turbulenzgenerator am LDA- Messprofil 1

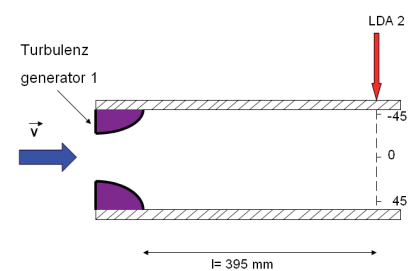
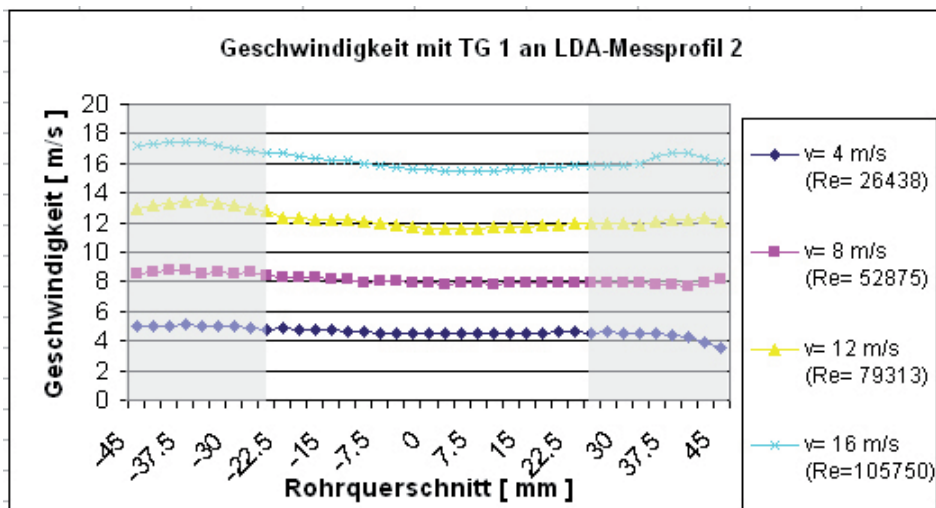


Abb. 5.12 : Geschwindigkeitsprofile mit eingesetztem Turbulenzgenerator am LDA- Messprofil 2

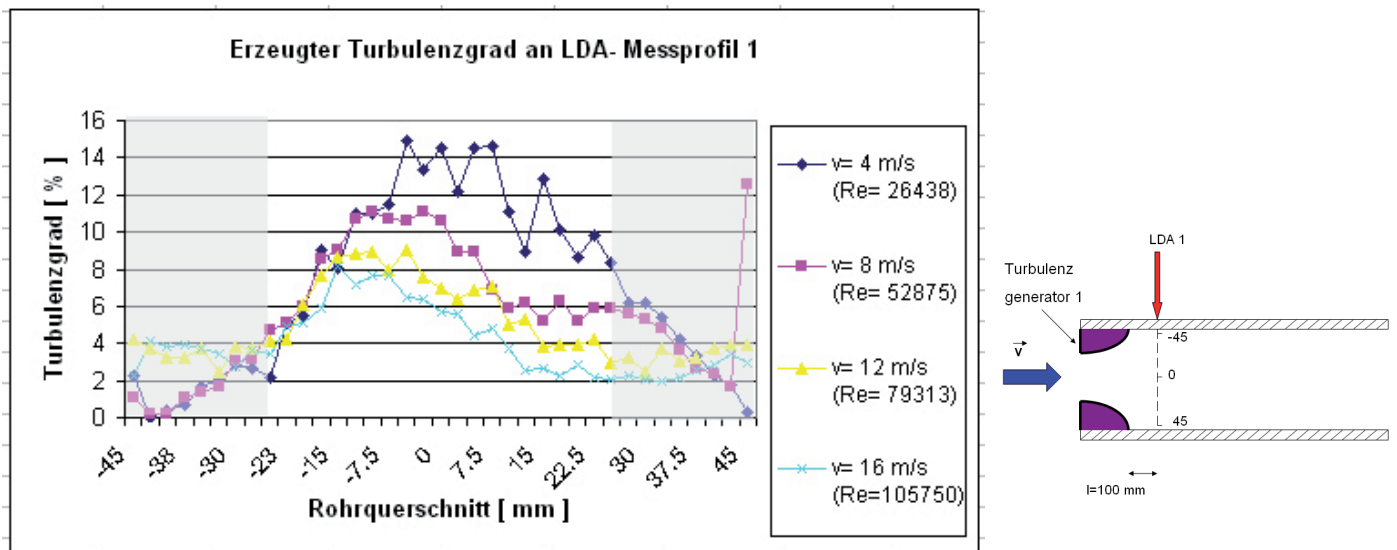


Abb. 5.13 : Erzeugter Turbulenzgrad des Turbulenzgenerators am LDA-Messprofil 1

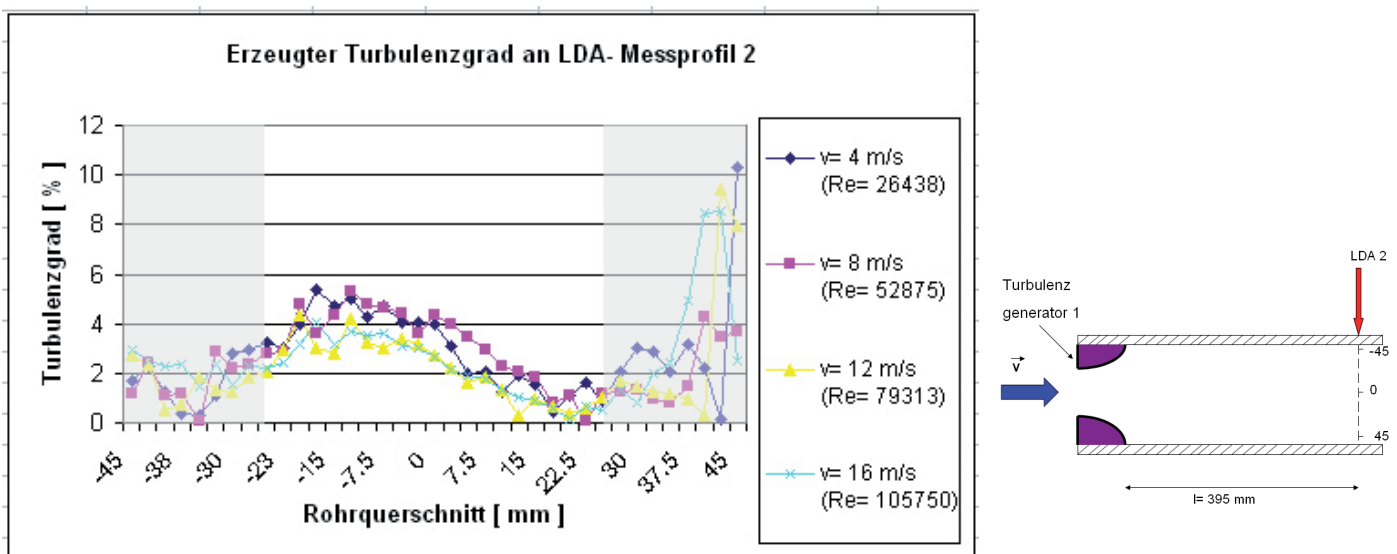


Abb. 5.14 : Erzeugter Turbulenzgrad des Turbulenzgenerators am LDA-Messprofil 2

Die Fluidteilchen erreichen ihr Geschwindigkeitsmaximum bei -22,5 mm, ihr Geschwindigkeits-minimum liegt bei 12,5 mm [s. Abb. 5.11].

Die Geschwindigkeitsprofile in kurzem Abstand (100 mm nach dem Turbulenzgenerator) werden mit zunehmender Geschwindigkeit ungleichmäßiger, weil möglicherweise die Elemente des Turbulenzgenerators keine vollkommen symmetrische Geometrie aufweisen [s. Abb. 5.16].

Allerdings stellt sich bei allen gewählten Geschwindigkeiten mit größerem Abstand (395 mm nach dem Turbulenzgenerator) ein relativ gleichmäßiges Geschwindigkeitsprofil (Schwankung < 5,5 %) ein, was zunächst für ausreichend gehalten wird.

Auffällig ist, dass der Turbulenzgrad in kurzer Entfernung nach dem Turbulenzgenerator (L = 100 mm, s. Abb. 5.13) bei der kleinsten eingestellten Geschwindigkeit deutlich größer im

Vergleich zu den anderen Turbulenzgraden bei höheren Geschwindigkeiten ist, dafür aber bei größerer Entfernung ($L = 395 \text{ mm}$, s. Abb. 5.14) die vergleichsweise größte Abnahme erfährt (vgl. Abb. 5.13 bis 5.15).

Eine Erklärung dafür könnte sein, dass der Turbulenzgrad eine bezogene Größe ist und deshalb bei kleinen Geschwindigkeiten turbulente Geschwindigkeitsschwankungen zu einem höheren Turbulenzgrad führen als gleichartige Schwankungen bei höheren Geschwindigkeiten.

Die stärkere Abnahme des Turbulenzgrades mit zunehmender Entfernung vom Ort der Turbulenzgraderzeugung hängt von der Anfangsenergie der Turbulenz ab, die sich auf dem Weg durch das Rohr infolge von Reibungseffekten umso schneller abbaut, je geringer sie am Ausgangspunkt ist.

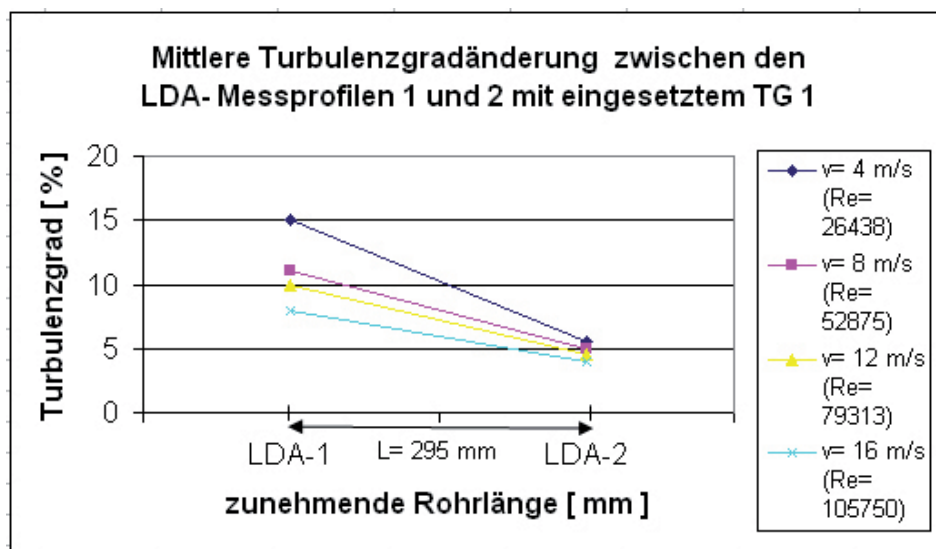


Abb. 5.15 : Mittlere Turbulenzgradänderung zwischen den gemessenen LDA-Messprofilen 1 und 2 in Abhängigkeit der eingestellten Geschwindigkeit bei eingesetztem Turbulenzgenerator 1

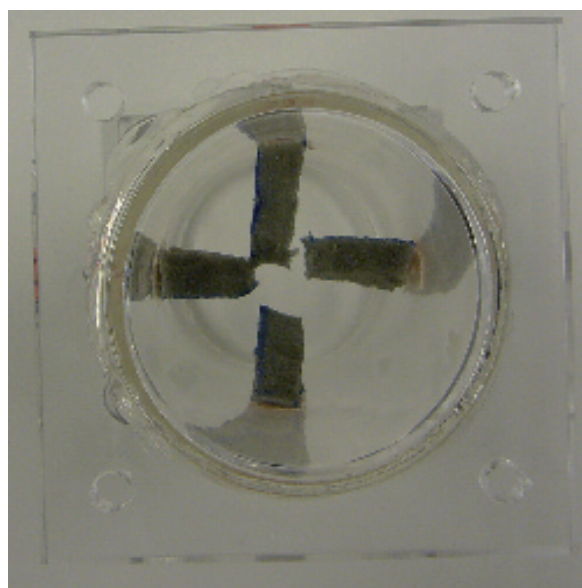


Abb. 5.16 : Geometrie des verwendeten Turbulenzgenerators 1

5.1.6 Untersuchung am Turbulenzgenerator 1 und der Mehrlochblende

Es wurden auch Versuche durchgeführt, bei denen herausgefunden werden sollte, wie sich der Turbulenzgrad verhält, wenn sich die Komponenten Mehrlochblende und Turbulenzgenerator 1 zusammen in der Rohrstrecke befinden und wie sich beide Komponenten gegenseitig beeinflussen.

Die Ergebnisse dieser Messungen sind in den Diagrammen Abb. 5.16 und Abb. 5.17 aufgeführt.

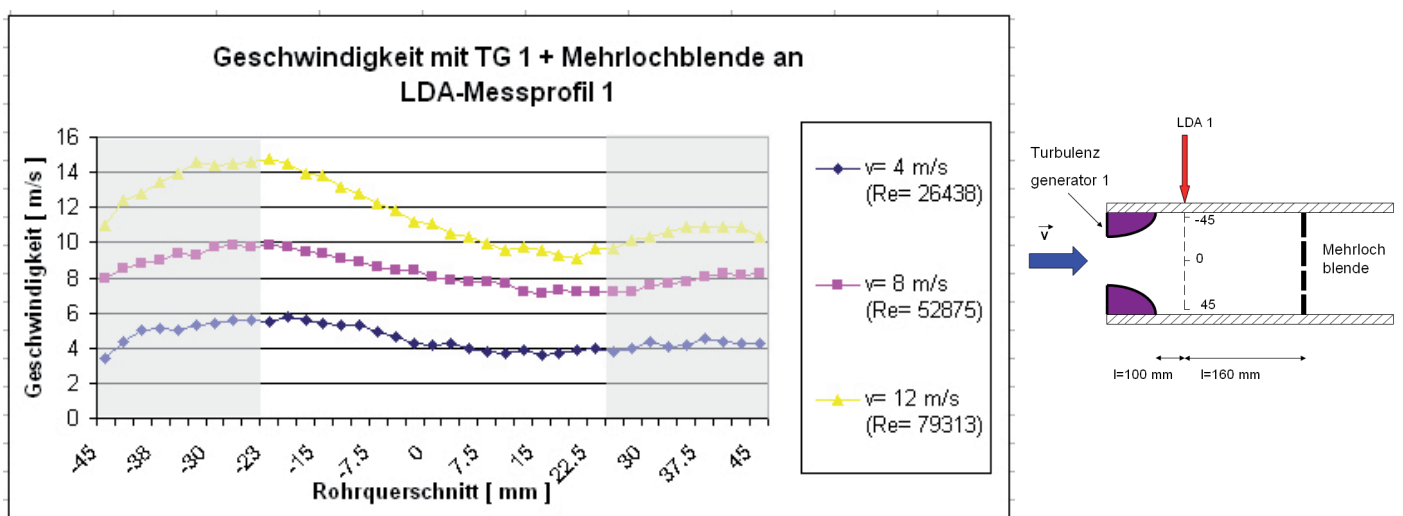


Abb. 5.17 : Geschwindigkeitsprofile am LDA- Messprofil 1 bei unterschiedlich eingestellten Geschwindigkeiten mit eingesetztem Turbulenzgenerator 1 und einer Mehrlochblende

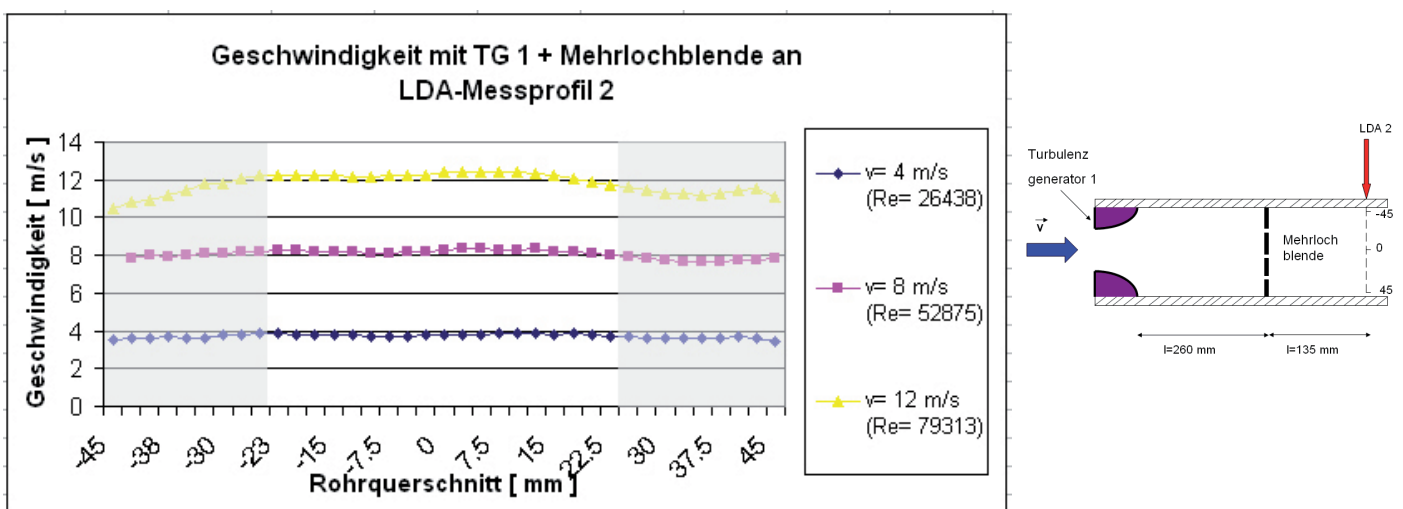


Abb. 5.18 : Geschwindigkeitsprofile am LDA- Messprofil 2 bei unterschiedlich eingestellten Geschwindigkeiten mit eingesetztem Turbulenzgenerator 1 und einer Mehrlochblende

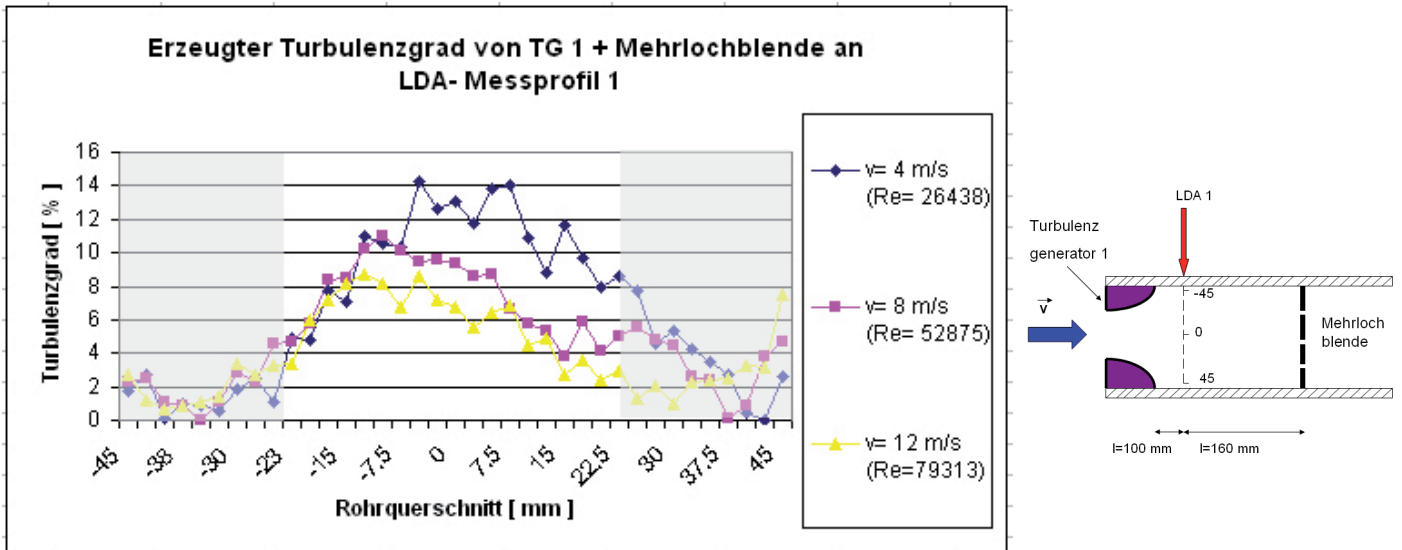


Abb. 5.19 : Erzeugter Turbulenzgrad am LDA- Messprofil 1 mit eingesetztem Turbulenzgenerator 1 und einer Mehrlochblende

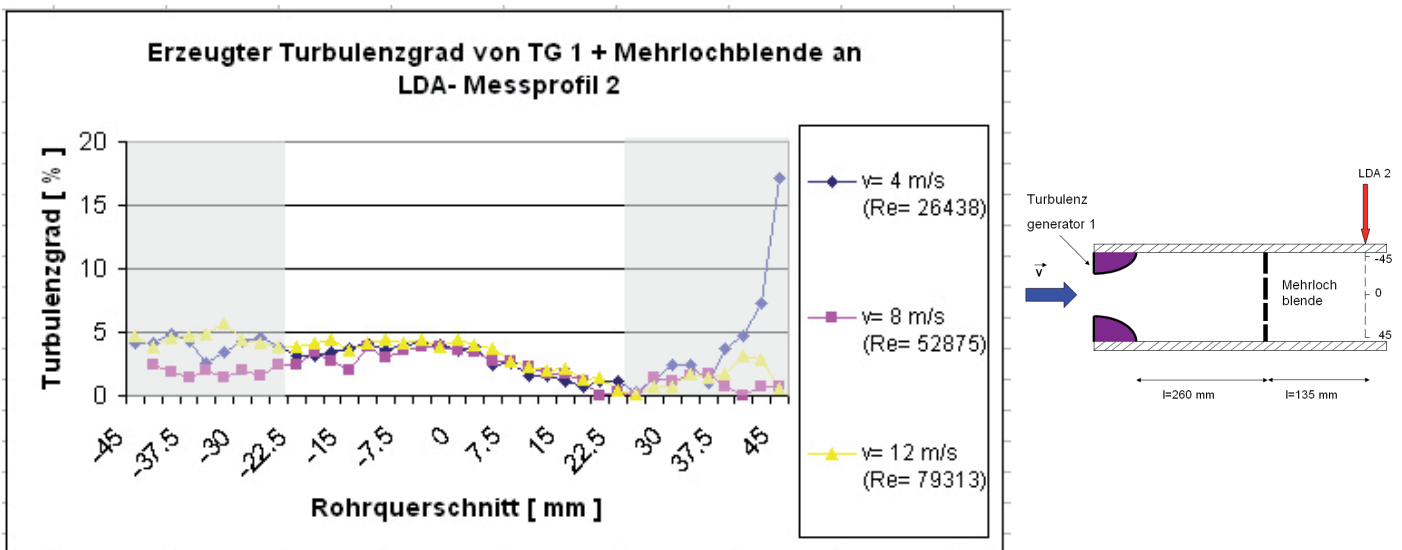


Abb. 5.20 : Erzeugter Turbulenzgrad am LDA- Messprofil 2 mit eingesetztem Turbulenzgenerator 1 und einer Mehrlochblende

In Diagramm Abb. 5.20 lässt sich erkennen , dass eine Kombination aus der Mehrlochblende und dem Turbulenzgenerator 1 eine Verringerung des Turbulenzgrades im Vergleich zu LDA- Messprofil 1 [Diagramm Abb. 5.19] zur Folge hat.

Die erzeugten Turbulenzgrade der Messungen, in welchem einmal separat der Turbulenzgenerator 1 und einmal separat die Mehrlochblende untersucht wurden [Diagramme Abb. 5.7, 5.8, 5.13 und 5.14], fallen insgesamt höher aus als die Turbulenzgrade, die bei einer Kombination beider gemessen wurden.

Die Mehrlochblende scheint die erzeugten Turbulenzgrade des Turbulenzgenerators 1 zu beeinflussen. Vermutlich werden die Querbewegungen der Fluidteilchen reduziert vor der Mehrlochblende, da der Luftstrom gestaut wird und sich dort ein weniger turbulenter Strömungsbereich ausbildet [35]. Eine Kombination aus Turbulenzgenerator und Mehrlochblende

erhöht folglich nicht zwingend den Turbulenzgrad.

5.2 Akustische Messungen

Das Ziel der Versuche in diesem Abschnitt ist die Aussage wie sich Blenden und Turbulenzgeneratoren auf die Schalleistung in Abhängigkeit der eingestellten Strömungsgeschwindigkeit auswirken und welche Bedeutungen das für die spätere Kennlinienerstellung hat.

5.2.1 Messung des Schalldruckpegels und des Schalleistungspegels

Voraussetzung für alle Akustikmessungen ist eine vorherige Messung des Hintergrundlärms im Hallraum ohne Durchströmung der Systemkomponenten, um festzustellen, ob die Lärmpegel an den zu vermessenden Bauteilen deutlich den Hintergrundlärm überragen.

Das Terzspektrum des Hintergrundlärms wird linear gemessen (in LLeq).

Die Ruhemessung wird einmal mit einem eingeschalteten und einmal mit einem ausgeschalteten Schwenkgalgen durchgeführt (beide Messungen bei ausgeschalteter Strömung).

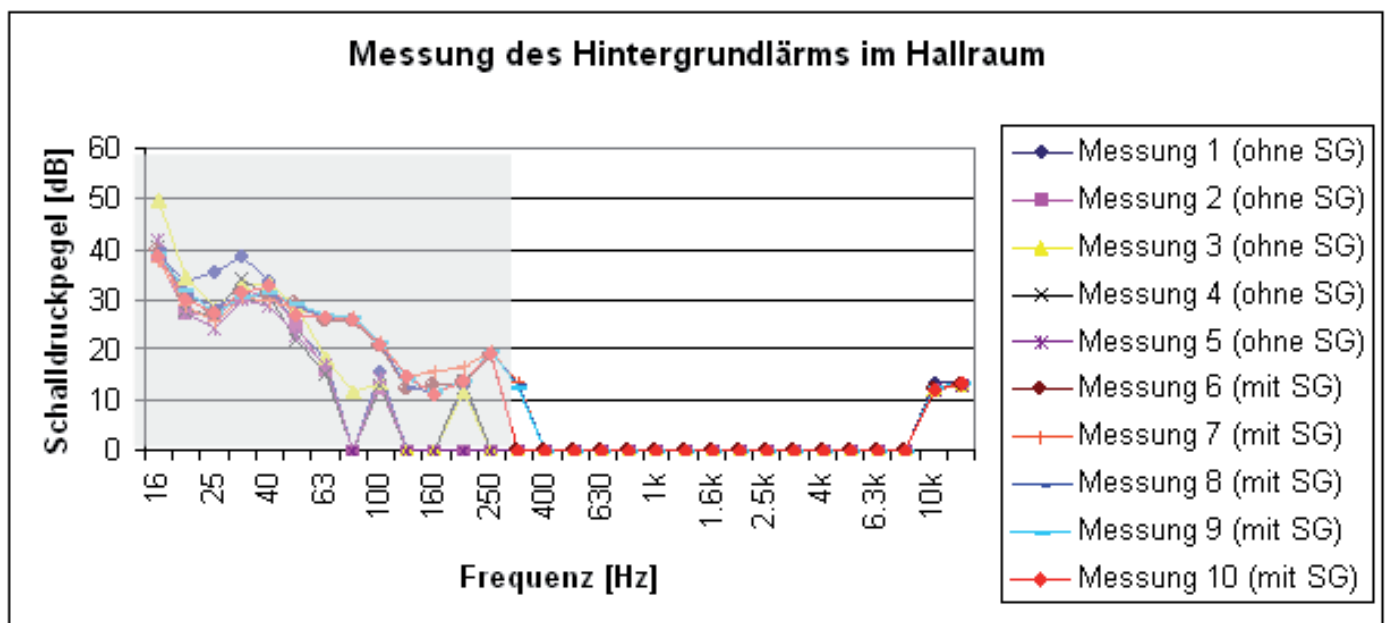


Abb. 5.21 : Lärmpegel im Hallraum während jeweils 5 verschiedener Messungen bei aus- und eingeschaltetem Schwenkgalgen und ausgeschalteter Strömung

Beim direkten Vergleich aller Messungen in Diagramm Abb. 5.21 lässt sich erkennen, dass höhere dB- Werte im Bereich von 63 bis 500 Hz erreicht werden mit eingeschaltetem Schwenkgalgen. Dort wird also ein gewisser Lärm durch die Bewegung des Schwenkgalgens im Hallraum erzeugt. Die mittleren A- bewerteten Schalldruckpegel der Messungen mit ein- und ausgeschaltetem Schwenkgalgen unterscheiden sich um ca. 2,5 dB. Bei laufendem Gebläse hat der Bewegungs-

lärm des Schwenkgalgen also keinen Einfluss auf die Messergebnisse.

Um die Reproduzierbarkeit zu prüfen, wurden die Messungen mit und ohne Schwenkgalgen jeweils fünfmal wiederholt.

Im unteren Frequenzbereich (16 bis 286 Hz) ist das Schalldämmmaß der Hallraumwände nur gering und somit kann Umgebungslärm aus der Versuchshalle in den Hallraum eindringen und ggf. die Messungen verfälschen. Dieser Frequenzbereich kann aber auch wegen einer unzureichenden Diffusität des Schallfeldes im Hallraum ($f_{grenz} = 286$ Hz, vgl. S. 21) nicht für Messausagen genutzt werden (schraffierter Bereich).

Oberhalb f_{grenz} zeigt sich eine gute Reproduzierbarkeit (Abweichungen < 1 dB) der Messergebnisse.

5.2.2 Schallerzeugung in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit

Bei der Variation der Turbulenzgeneratoren und der Messblenden soll der Turbulenzgrad und seine Auswirkung auf die Änderung des Schalldruckpegels und des Schalleistungspegels analysiert werden. Bei der Lärmentwicklung muss ebenso die Länge der Teststrecke in Betracht gezogen werden.

Da der Turbulenzgrad von der Strömungsgeschwindigkeit abhängt, sollen in den folgenden Diagrammen jeweils die Schalleistungskurven der unterschiedlichen Messstandkonfigurationen bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten dargestellt werden.

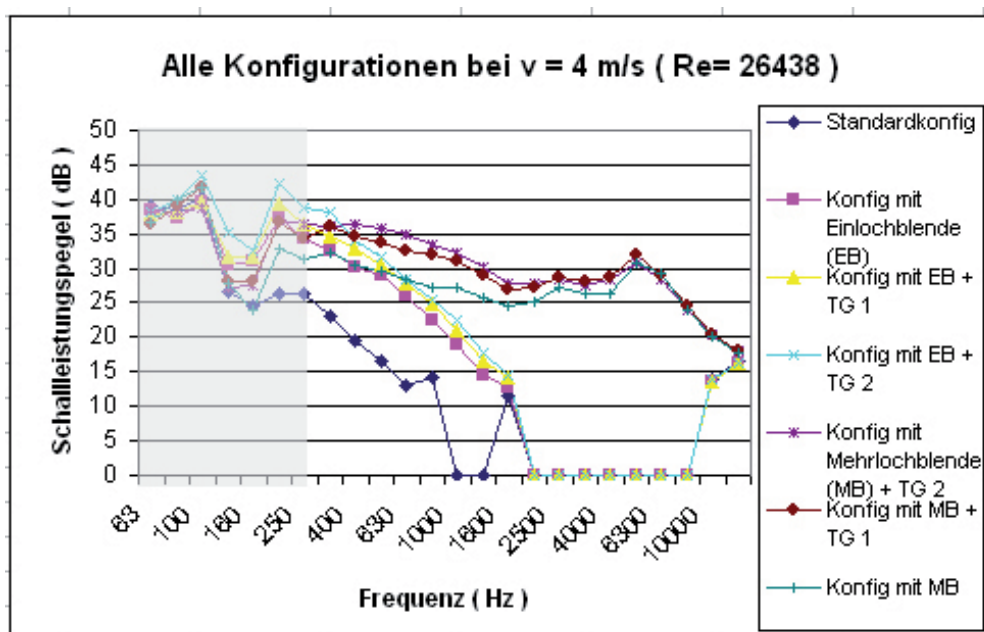


Abb. 5.22 : Frequenzabhängige Schalleistungskurven aller Konfigurationen im Vergleich bei einer eingestellten Strömungsgeschwindigkeit von $v = 4$ m/s

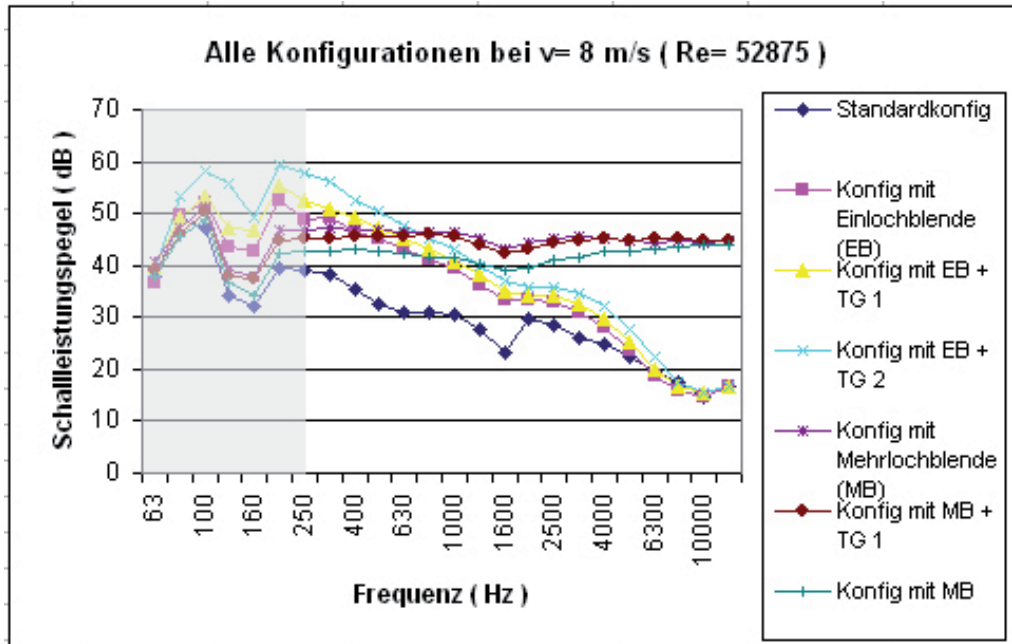


Abb. 5.23 : Frequenzabhängige Schalleistungskurven aller Konfigurationen im Vergleich bei einer eingestellten Strömungsgeschwindigkeit von $v=8\text{ m/s}$

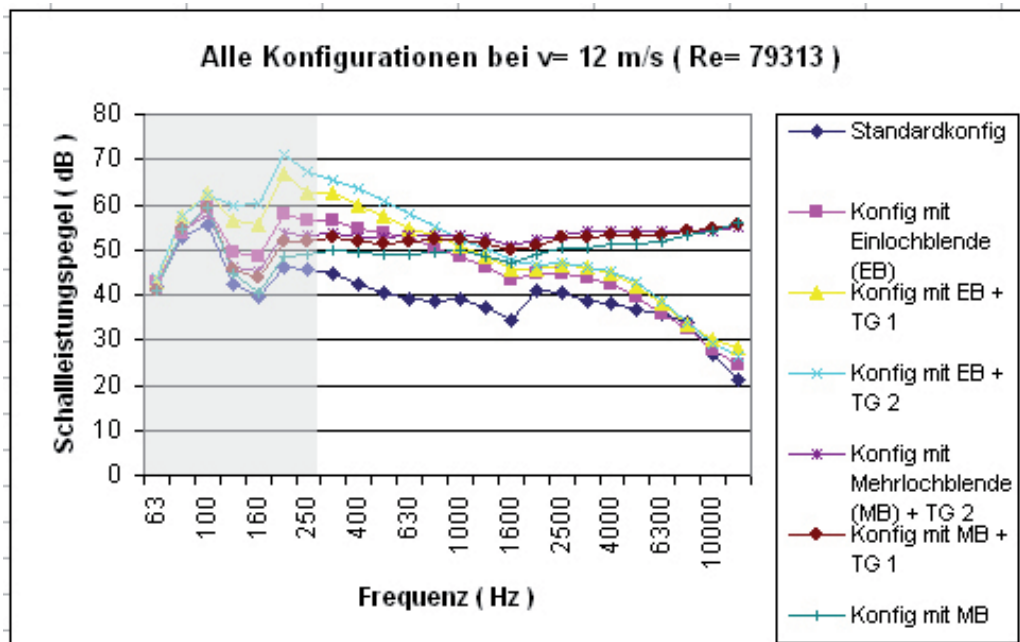


Abb. 5.24 : Frequenzabhängige Schalleistungskurven aller Konfigurationen im Vergleich bei einer eingestellten Strömungsgeschwindigkeit von $v=12\text{ m/s}$

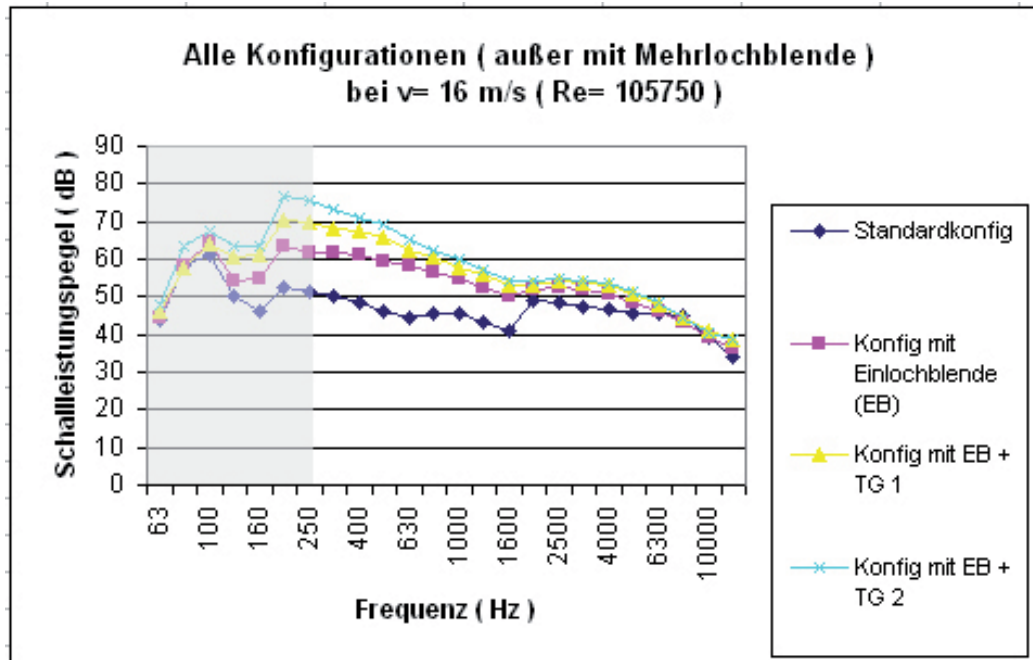


Abb. 5.25: Frequenzabhängige Schalleistungspegelkurven aller Konfigurationen (außer mit Mehrlochblende) im Vergleich bei einer eingestellten Strömungsgeschwindigkeit von $v=16$ m/s

In den Diagrammen Abb. 5.22 bis 5.25 wird ersichtlich, dass mit zunehmender Geschwindigkeit gleichzeitig der Schalleistungspegel ansteigt. Dabei fällt auf, dass die Konfigurationen mit Systemblenden einen vergleichsweise höheren Schalleistungspegel aufweisen als die Standardkonfiguration ohne Systemblende und/ oder Turbulenzgenerator (TG). Die erzeugte Schalleistung der Einlochblende ist niederfrequenter als bei der Mehrlochblende. Mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit bei den Messungen mit Mehrlochblende steigt der Schalleistungspegel im höheren Frequenzbereich an.

Im unteren Frequenzbereich bis 2500 Hz leisten die zwei verwendeten Turbulenzgeneratoren 1 und 2 einen zusätzlichen Beitrag zur Erhöhung des Schalleistungspegels. Im oberen Frequenzbereich machen sie sich kaum bemerkbar.

Die Ergebnisse bestätigen die Annahme, dass die Strömungsgeschwindigkeit ein weiterer Parameter ist, der die Schallerzeugung beeinflusst.

Ebenso scheinen die verschiedenen Geometrien der verwendeten Systemblenden auch einen unterschiedlichen Beitrag zur Schalleistungserhöhung zu liefern.

Diese Ergebnisse sind für eine spätere Erstellung von Kennlinien heranzuziehen.

5.2.3 Blendenlärm

Soll der Strömungslärm betrachtet werden, der allein von einer Systemblende erzeugt wird, muss der Blendenlärm nach folgender energetischer Berechnung bestimmt werden [3]:

$$L_{p,B} = 10 \log (10^{L_{p,B+St}/10} - 10^{L_{p,St}/10})$$

$L_{p,B}$: erzeugter Schalldruckpegel der Blende [dB]

$L_{p,St}$: erzeugter Schalldruckpegel der Standardkonfiguration [dB]

$L_{p,B+St}$: erzeugter Schalldruckpegel der Standardkonfiguration mit Blende [dB]

In den Diagrammen Abb. 5.32 bis 5.35 ist der erzeugte Blendenlärm der Mehrlochblende und der Einlochblende gegenübergestellt. Angegeben sind die energetischen Differenzen zwischen der Konfiguration mit Systemblende zu entsprechender Konfiguration ohne Systemblende.

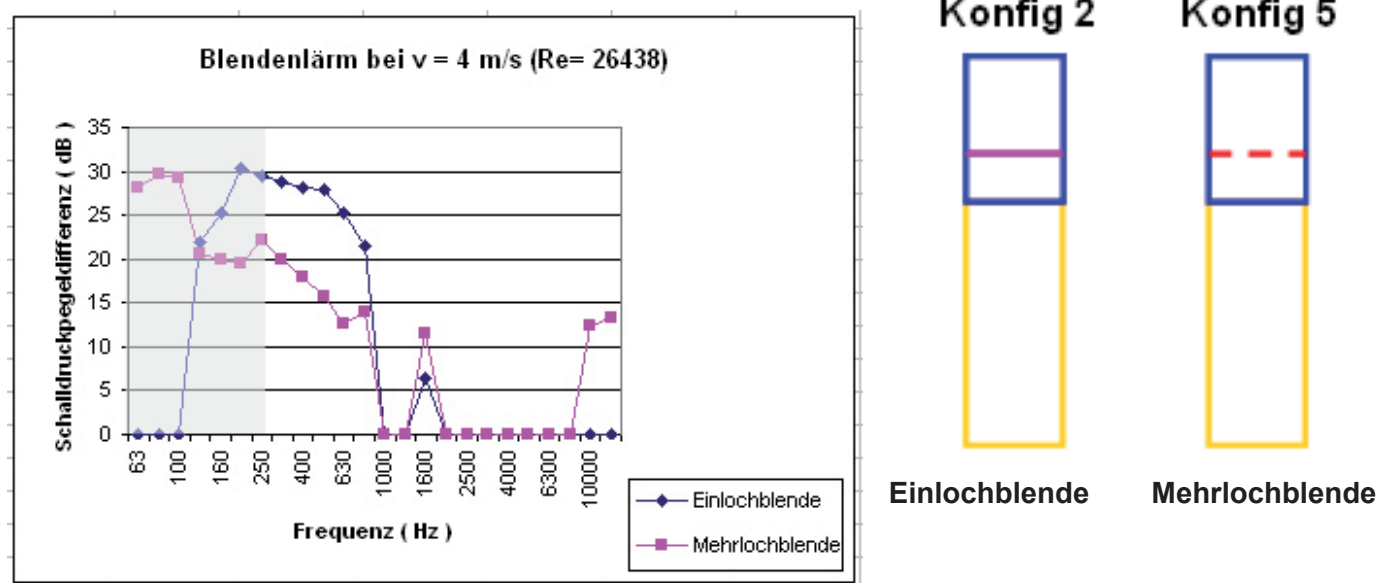
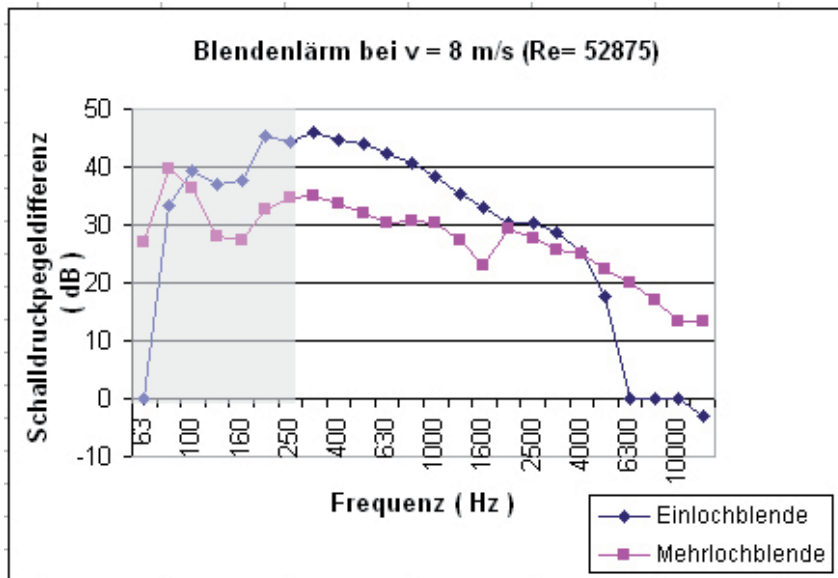


Abb. 5.26 : Spektrum des durch Systemblenden erzeugten Lärms bei $v = 4 \text{ m/s}$ (energetische Differenz zwischen Konfiguration mit Systemblende zu entsprechender Konfiguration ohne Systemblende)



Konfig 2



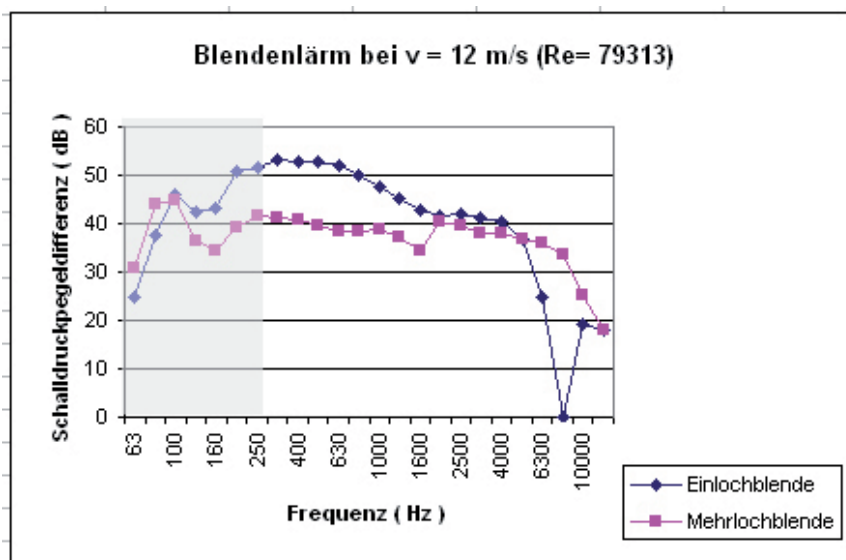
Einlochblende

Konfig 5



Mehrlochblende

Abb. 5.27 : Spektrum des durch Systemblenden erzeugten Lärms bei $v = 8 \text{ m/s}$ (energetische Differenz zwischen Konfiguration mit Systemblende zu entsprechender Konfiguration ohne Systemblende)



Konfig 2



Einlochblende

Konfig 5



Mehrlochblende

Abb. 5.28 : Spektrum des durch Systemblenden erzeugten Lärms bei $v = 12 \text{ m/s}$ (energetische Differenz zwischen Konfiguration mit Systemblende zu entsprechender Konfiguration ohne Systemblende)

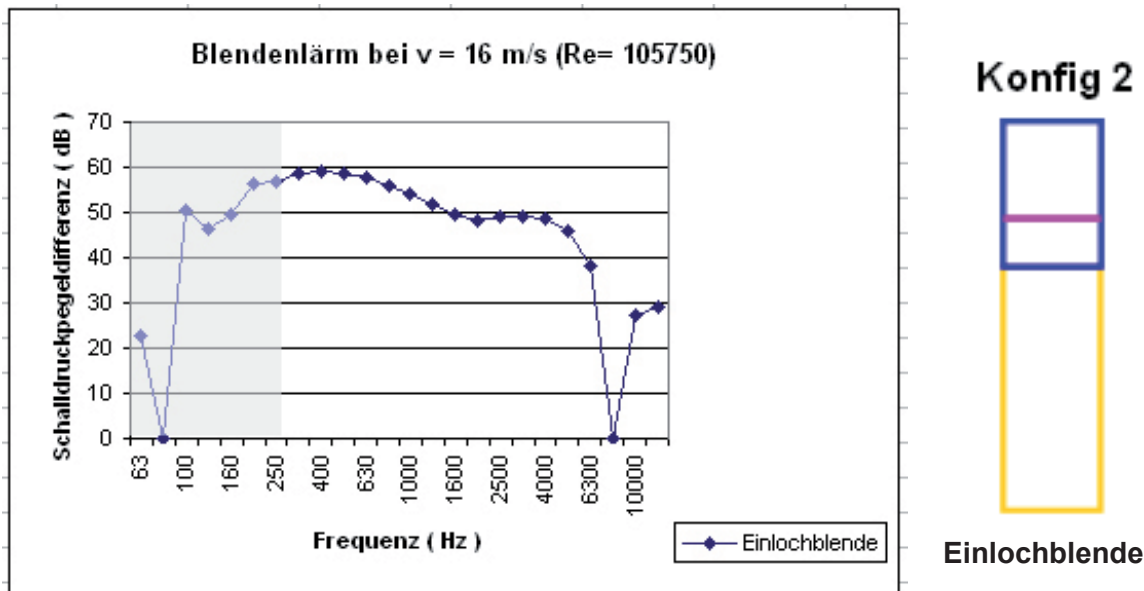


Abb. 5.29 : Spektrum des durch die Einlochblende erzeugten Lärms bei $v = 16 \text{ m/s}$ (energetische Differenz zwischen Konfiguration mit Systemblende zu entsprechender Konfiguration ohne Systemblende)

Die Einlochblende verursacht einen deutlichen Anstieg des Schalldruckpegels im unteren Frequenzbereich bis 1000 Hz.

Die Mehrlochblende erzeugt hingegen größeren Lärm im höherfrequenten Bereich. Hinter den Löchern der Mehrlochblende werden vermutlich viele kleine Einzelwirbel erzeugt, die zu einer Zunahme des Schalldruckpegels führen könnten.

Bei den Versuchen hat sich gezeigt, dass mit der Mehrlochblende nur eine eingestellte Maximalgeschwindigkeit von 12 m/s erreicht werden konnte. Im Vergleich zur Einlochblende scheint die Mehrlochblende bedingt durch ihre Geometrie also einen größeren Druckabfall zu erzeugen, weil sie mehr Luft strömaufwärts staut.

Erfahrene Ingenieure wissen, dass die Erzeugung des Blendenlärms abhängig von dem Druckabfall an der Blende ist.

5.2.4 Einfluss der Turbulenzgeneratoren auf den Schalldruckpegel

Ein zusätzlicher Einsatz von einem Turbulenzgenerator verursacht einen Anstieg des Schalldruckpegels im niedrigfrequenten Bereich wie es in den Diagrammen Abb. 5.36 und 5.37 zu sehen ist.

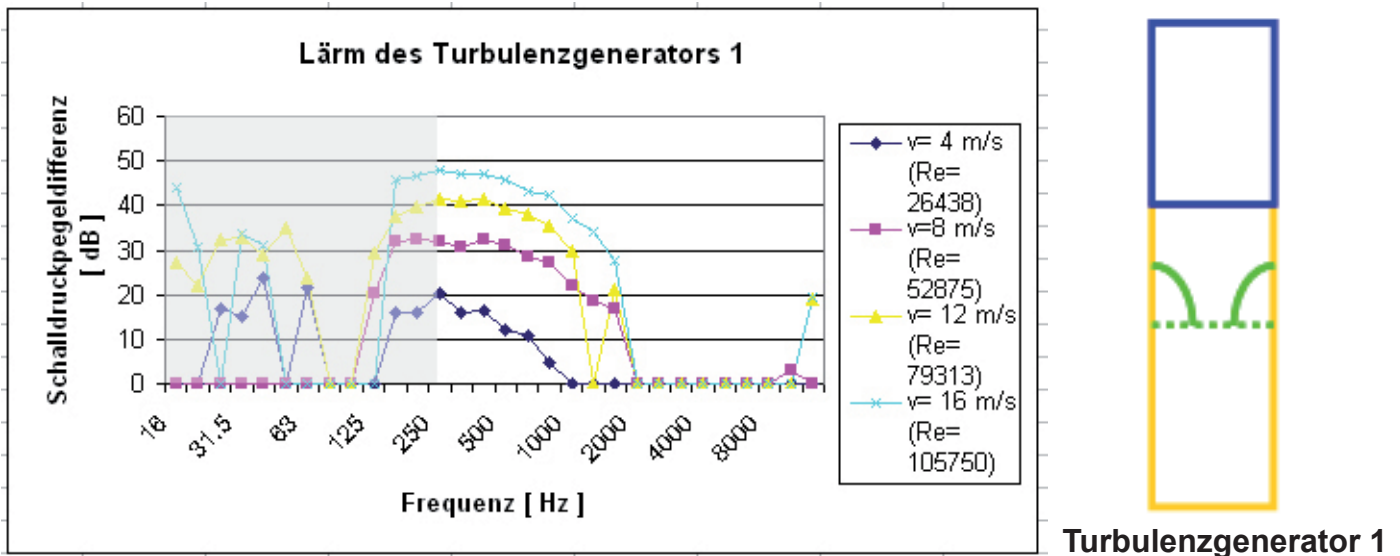


Abb. 5.30 : Spektrum des durch Turbulenzgenerator 1 erzeugten Lärms bei verschiedenen eingestellten Geschwindigkeiten (energetische Differenz zwischen Konfiguration mit Turbulenzgenerator 1 zu entsprechender Konfiguration ohne Turbulenzgenerator)

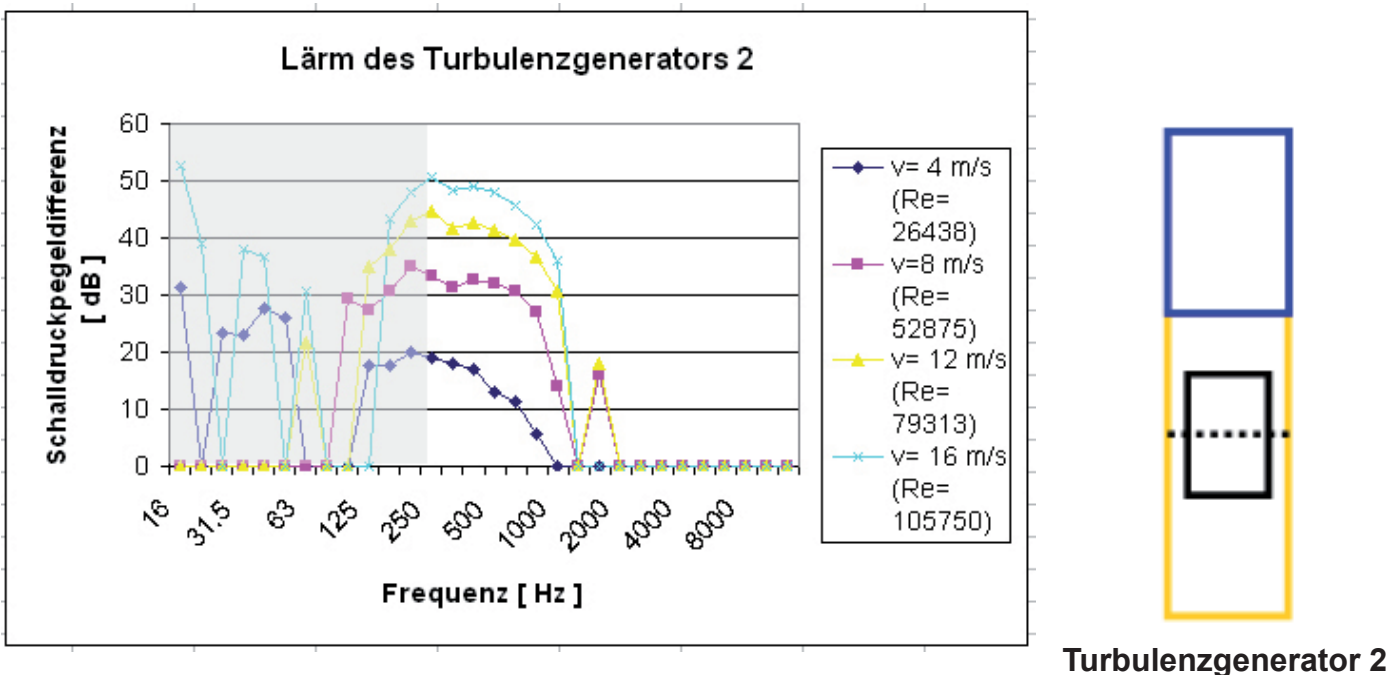


Abb. 5.31 : Spektrum des durch Turbulenzgenerator 2 erzeugten Lärms bei verschiedenen eingestellten Geschwindigkeiten (energetische Differenz zwischen Konfiguration mit Turbulenzgenerator 2 zu entsprechender Konfiguration ohne Turbulenzgenerator)



Ebenfalls ist hier auffällig, dass mit steigender Strömungsgeschwindigkeit auch der Schalldruckpegel ansteigt.

Die beiden Turbulenzgeneratoren unterscheiden sich geringfügig in ihrer Lärmerzeugung. Da die Systemblenden eindeutig als Hauptlärmquelle identifiziert werden können, tragen die Turbulenzgeneratoren nur minimal etwas zu einer zusätzlichen Schallerzeugung bei (ca. 1-2 dB).

6. Kennlinien

Aus den Messungen lassen sich etliche relevante Kennlinien darstellen, welche zur Aufstellung eines Frequenzspektrums herangezogen werden können. Um die erforderlichen Kennlinien bestimmen zu können, müssen die Strömungs- und Akustikmessungen zusammen in Betracht gezogen werden.

Für akustische Aussagen wird zunächst der A-bewertete Gesamtschallleistungspegel benötigt [s. Abb. D.1]. Für strömungsmechanische Aussagen werden die Parameter Strömungsgeschwindigkeit, Turbulenzgrad, Turbulenzenergie und Druck (bzw. der Druckabfall) verwendet.

6.1 Kennlinien: Gesamtschallleistungspegel / Druckabfall über der Messblende

In den Diagrammen Abb. 6.1 und 6.2 sind die A-bewerteten Gesamtschallleistungspegel der Messungen mit Systemblende (ohne und mit Turbulenzgenerator 1) als Funktion des gemessenen Druckverlustes dargestellt. Es erscheint geeigneter, den Druckverlust logarithmisch auf der Abzisse abzutragen.

Erklärung der Legende:

EB = Messung mit Einlochblende

MB = Messung mit Mehrlochblende

EB + TG 1 = Messung mit Einlochblende und Turbulenzgenerator 1

MB + TG 1 = Messung mit Mehrlochblende und Turbulenzgenerator 1

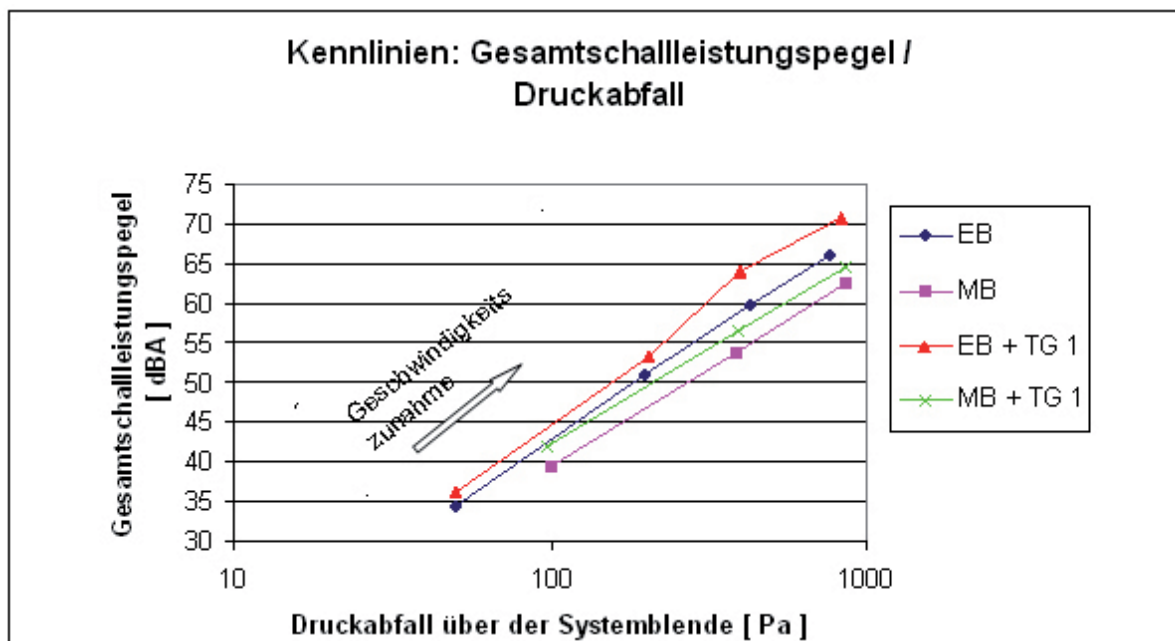


Abb. 6.1 : Vergleich der Gesamtschallleistungspegel der Messungen mit Mehrlochblende, Einlochblende und jeweils der Kombination beider Blenden mit dem Turbulenzgenerator 1 in Abhängigkeit vom erzeugten Druckabfall der Systemblenden (logarithmisch abgetragen)

Aus den Messungen geht hervor, dass der Schalleistungspegel an einer Systemblende mit steigendem Druckabfall an der Blende und zusätzlich mit steigender Turbulenzenergie vor der Blende ansteigt (vgl. in Abb. 6.1 die Kurven EB und EB + TG 1 miteinander bzw. MB und MB + TG 1 miteinander).

Mit zunehmendem Druckabfall und steigender Geschwindigkeit steigt der Schalleistungspegel an. Dabei ist auffällig, dass die Mehrlochblende stets einen höheren Druckabfall als die Einlochblende erzeugt, da dort bedingt durch die Geometrie mehr Luft gestaut wird als bei der Einlochblende. Folglich ist auch die Schallerzeugung an der Mehrlochblende höher. Vermutlich entstehen viele kleine Wirbel hinter der Blende, welche auch als Strömungslärm wahrgenommen werden.

In Kombination mit einer Systemblende trägt der verwendete Turbulenzgenerator 1 um ca. 2- 4 dBA zum erzeugten Schalleistungspegel bei.

Bei der Einlochblende kann die zugehörige Kennlinie jeweils mit einer Geschwindigkeit von 20 m/s aufgetragen werden, da an ihr ein geringerer Druckabfall entsteht als bei den Messungen mit der Mehrlochblende.

Daher ist hier kein Vergleich des entstehenden Schalleistungspegels mit der Mehrlochblende möglich.

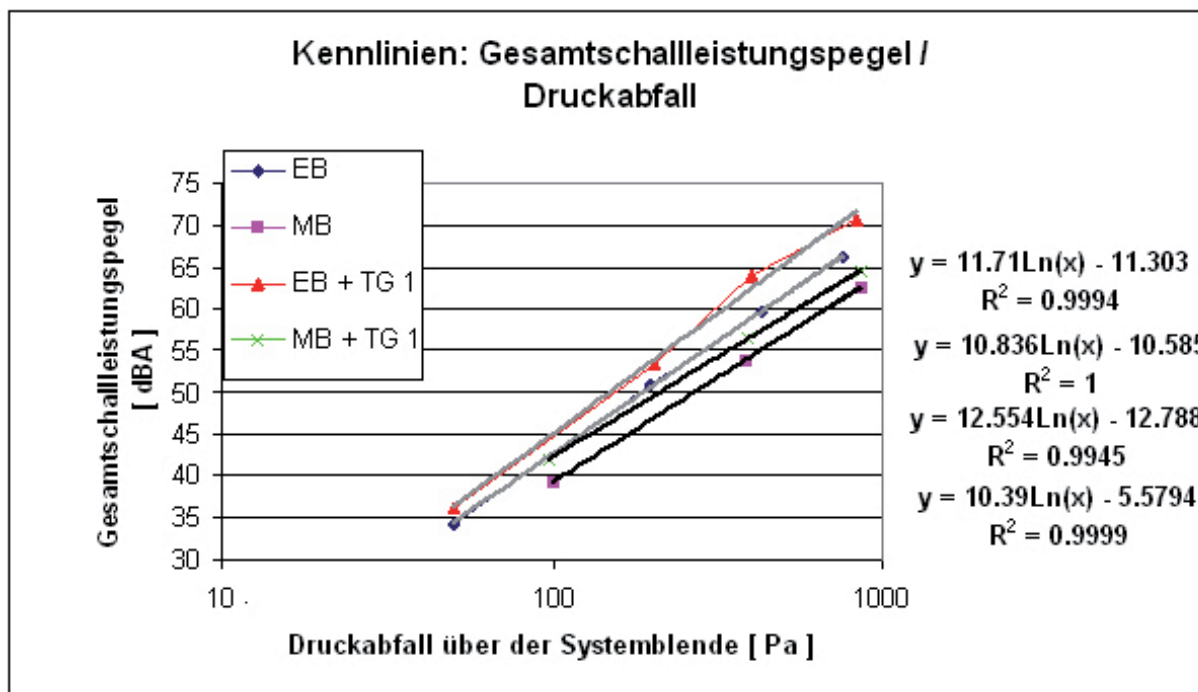


Abb. 6.2 : Kennlinien [Gesamtschalleistungspegel / Druckabfall] der Messungen mit Mehrlochblende, Einlochblende und jeweils der Kombination beider Blenden mit dem Turbulenzgenerator 1 mit logarithmischen Gleichungen und Bestimmtheitsmaß R^2

Jede im oberen Diagramm dargestellte Kennlinie kann nahezu kongruent mit ihrer Trendlinie interpoliert werden. Für jede der vier Konfigurationen kann der Schalleistungspegel annähernd linear über dem logarithmisch skalierten Druckverlust abgetragen werden.



Die logarithmischen Trendlinien der Messungen mit der Einlochblende sind grauhinterlegt, die schwarz hinterlegten Trendlinien gehören zu den Messungen mit der Mehrlochblende. Ebenfalls dargestellt sind die logarithmischen Steigungsgleichungen und ihr zugehöriges Bestimmtheitsmaß.

Die Steigungen sind in etwa gleich und stimmen mit Messaussagen anderer Arbeiten überein [16, 19]:

$$S_{MB} \cong \frac{25 \text{ dBA}}{900 \text{ Pa}} \quad \text{für die Steigung der Messungen mit Mehrlochblende}$$

$$S_{EB} \cong \frac{30 \text{ dBA}}{900 \text{ Pa}} \quad \text{für die Steigung der Messungen mit Einlochblende}$$

Damit sind indirekt der verwendete Messaufbau und das verwendete Messverfahren verifiziert.

6.2 Kennlinien: Gesamtschalleistungspegel / Turbulenzgrad

Für die Darstellung eines Frequenzspektrums sind desweiteren die Kennlinien wichtig, welche aus dem Gesamtschalleistungspegel als Funktion des Turbulenzgrades ermittelt werden. Als Parameter wird hier die Strömungsgeschwindigkeit gewählt.

Der Turbulenzgrad ist zuvor an zwei verschiedenen LDA- Messprofilen erfasst worden [s. Abb. 3.3] :

- vor der Mehrlochblende bzw. hinter dem Turbulenzgenerator 1
- hinter der Mehrlochblende bzw. hinter der Mehrlochblende und dem Turbulenzgenerator 1

Da sich der Turbulenzgrad bedingt durch die statistisch erfassten Geschwindigkeiten der zugeführten Partikel an jedem Traversierpunkt ändert , ist es notwendig, den Turbulenzgrad zu mitteln.

$$\bar{Tu} = \sum_{i=1}^n Tu_i / n$$

\bar{Tu} : Turbulenzgrad

n : Anzahl der Traversierpunkte, an denen der Turbulenzgrad gemessen wurde

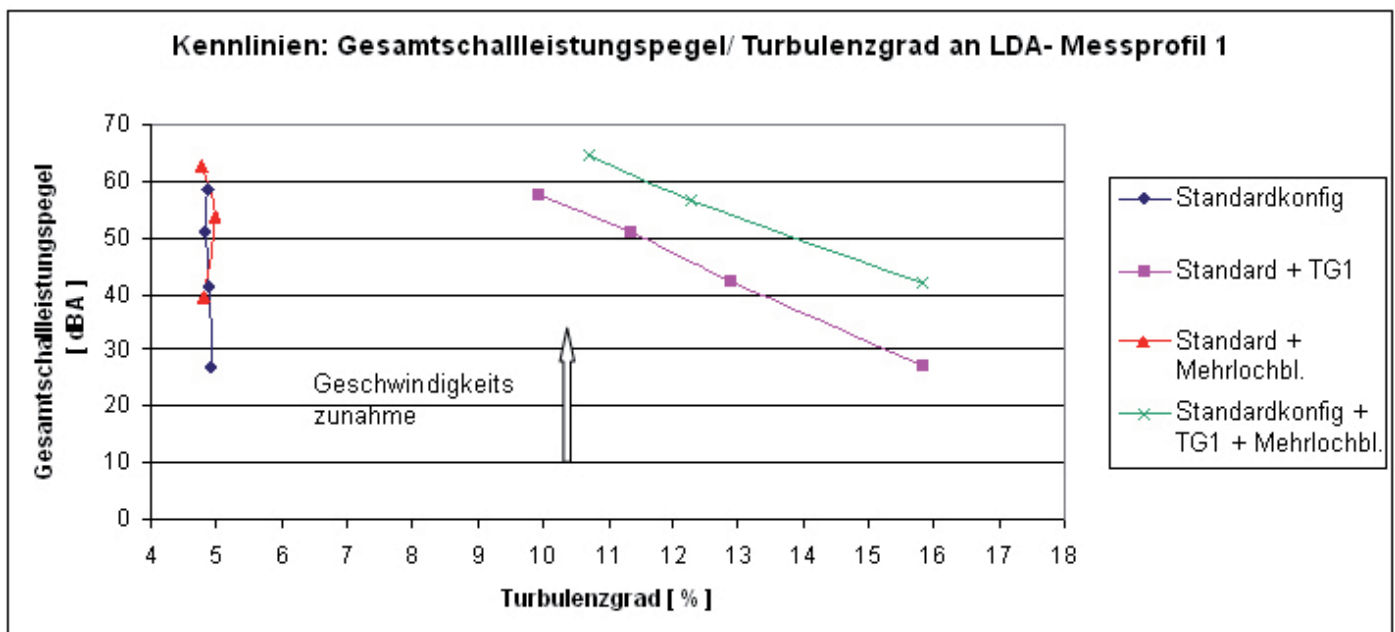


Abb. 6.3 : Vergleich der Gesamtschalleistungspegel der Messungen mit Mehrlochblende, Einlochblende, jeweils der Kombination beider Blenden mit dem Turbulenzgenerator 1 und der Standardkonfiguration in Abhängigkeit vom erzeugten Turbulenzgrad an LDA- Messprofil 1

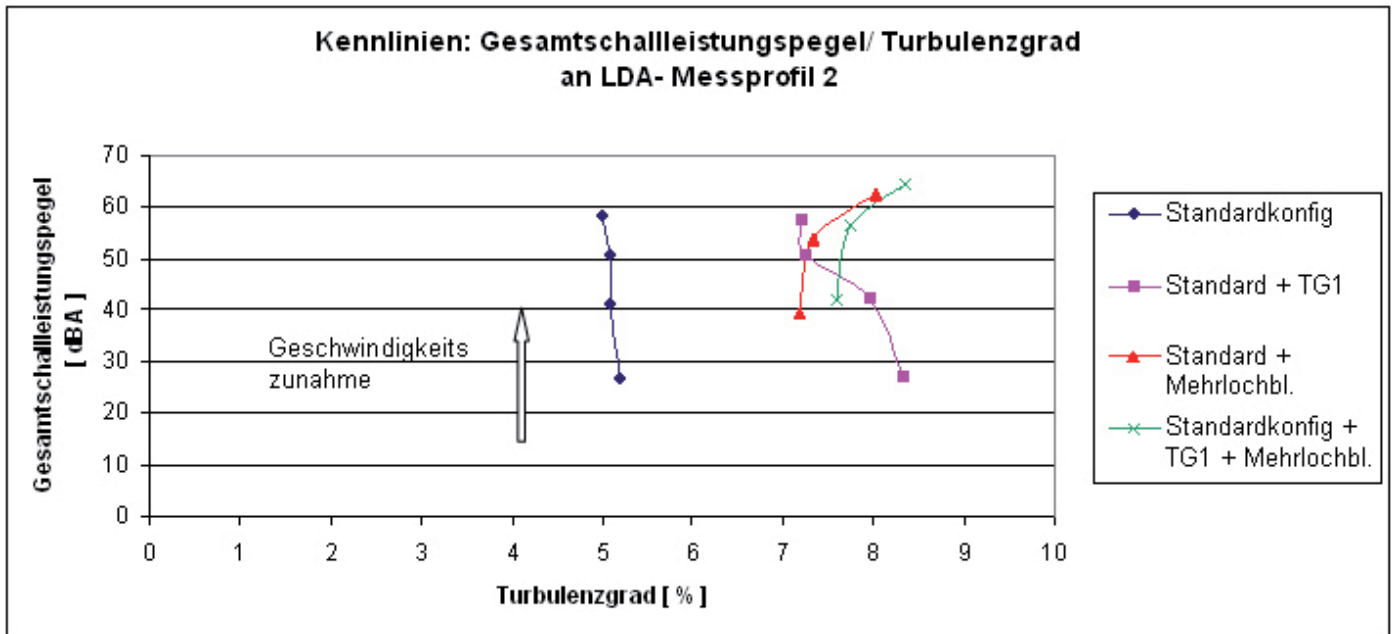


Abb. 6.4 : Vergleich der Gesamtschalleistungspegel der Messungen mit Mehrlochblende, Einlochblende, jeweils der Kombination beider Blenden mit dem Turbulenzgenerator 1 und der Standardkonfiguration in Abhängigkeit vom erzeugten Turbulenzgrad an LDA- Messprofil 2

In Diagramm Abb. 6.3 zeigt sich, dass die Mehrlochblende kaum Vorturbulenz erzeugt. Daher verhält sich der gemessene Turbulenzgrad nahezu konstant im Vergleich zur Standardkonfiguration. Obwohl sich der Turbulenzgrad mit steigender Geschwindigkeit nicht unwesentlich ändert, steigt der Schalleistungspegel an.

Führt man die Versuche zusätzlich mit dem Turbulenzgenerator 1 durch, so sinkt der Turbulenzgrad mit steigender Geschwindigkeit sogar stark ab, der Schalleistungspegel steigt hingegen an.

In Diagramm Abb. 6.4 sind ähnliche Ergebnisse zu beobachten. Eine Ausnahme stellen dort die Kurvenverläufe der Konfigurationen mit Mehrlochblende dar. Der Turbulenzgrad geringfügig an mit einer gleichzeitigen Zunahme des Lärms. In diesem Fall kann der Turbulenzgrad aber nicht als Verursacher des erzeugten Lärms genannt werden. Stattdessen scheint die Geometrie der Mehrlochblende einen Anstieg des Schalleistungspegels zu beeinflussen.

Bei den erzeugten Turbulenzgraden hinter der Blende und dem Turbulenzgenerator kann vermutet werden, dass freie Wirbel (Turbulenzen) im Rohr keinen wesentlichen Anteil an dem Gesamtlärm verursachen.

Es kann somit gesagt werden, dass der Turbulenzgrad als alleiniger Parameter nicht ausschlaggebend für die Lärmerzeugung ist.

Vielmehr scheint vorstellbar, dass die Turbulenzenergie in der Strömung eine steuernde Größe für die Schallerzeugung sein könnte.

6.3 Kennlinien: Gesamtschalleistungspegel / Turbulenzenergie

Da der Turbulenzgrad kein wesentlicher Einflussfaktor für die Lärmerzeugung ist, muss untersucht werden, ob stattdessen die Turbulenzenergie als bestimmender Parameter für eine akustische Auslegung herangezogen werden kann.

Die Turbulenzenergie berechnet sich nach folgender Formel [19]:

$$T_E = \frac{3}{2} \cdot (T_U \cdot v)^2$$

T_E : Turbulenzenergie [m²/s²]

T_U : Turbulenzgrad [-]

v : Geschwindigkeit [m/s]

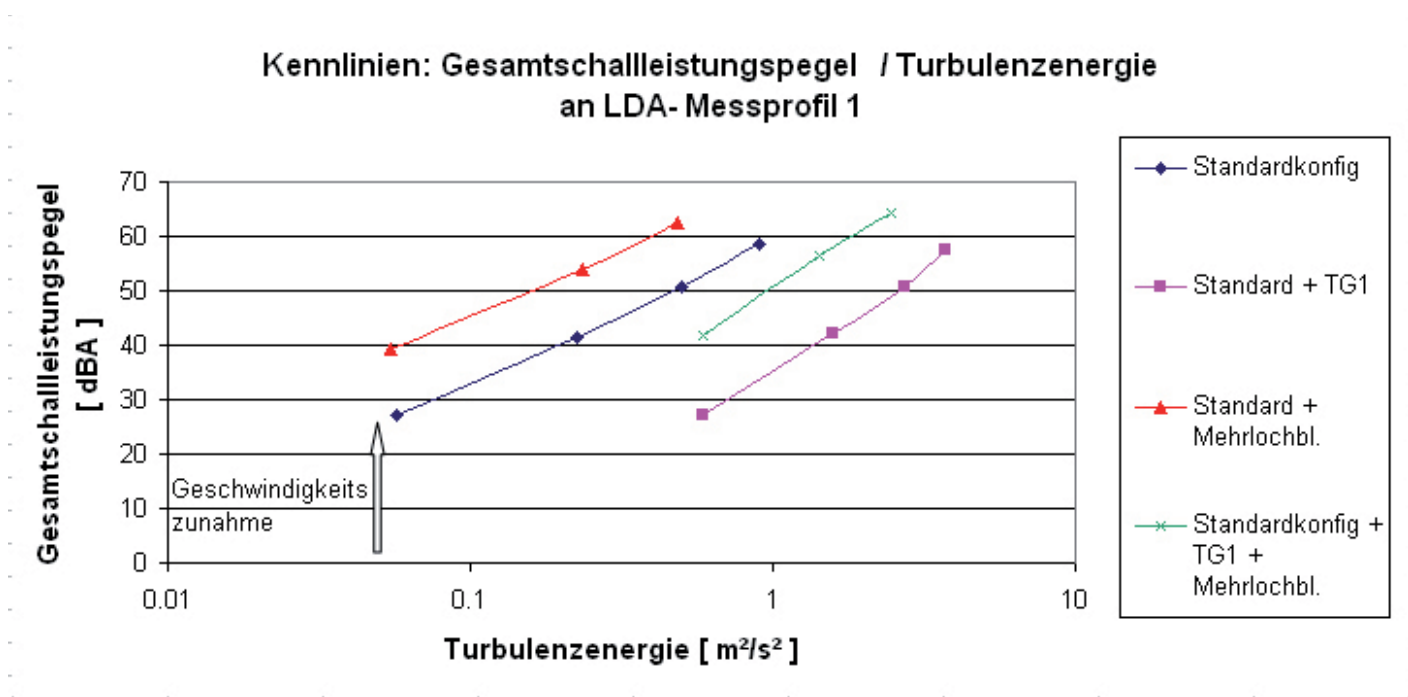


Abb. 6.5 : Vergleich der Gesamtschalleistungspegel der Messungen mit Mehrlochblende, Einlochblende, jeweils der Kombination beider Blenden mit dem Turbulenzgenerator 1 und der Standardkonfiguration in Abhängigkeit von der erzeugten Turbulenzenergie (logarithmisch abgetragen) an LDA- Messprofil 1

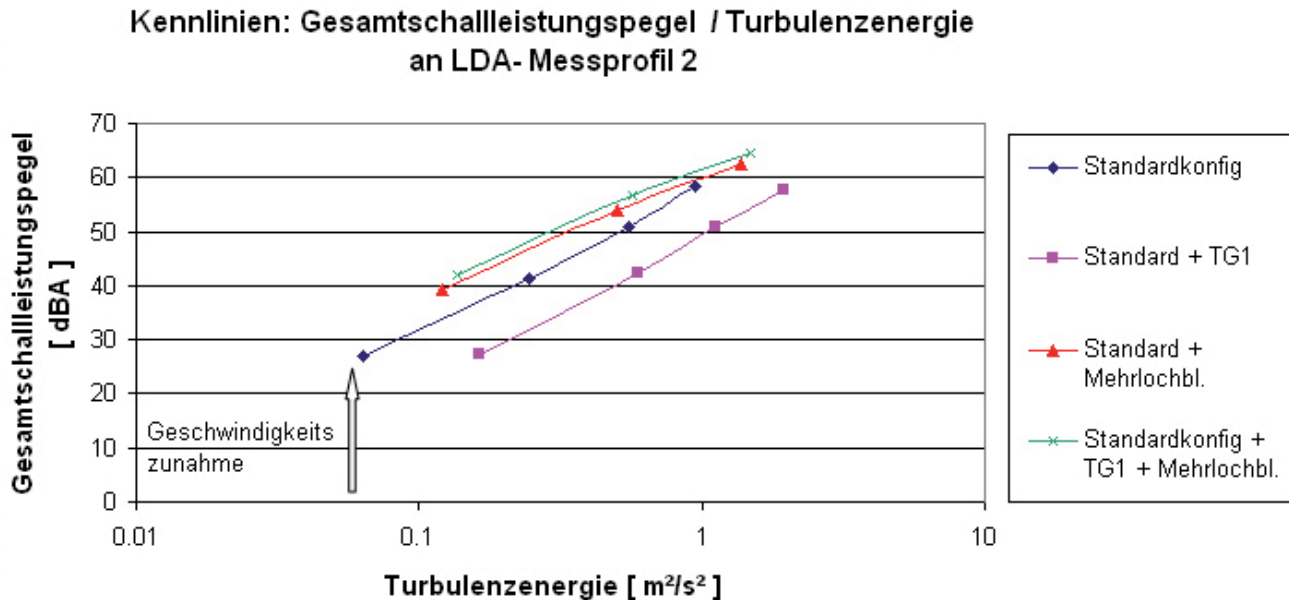


Abb. 6.6 : Vergleich der Gesamtschalleistungspegel der Messungen mit Mehrlochblende, Einlochblende, jeweils der Kombination beider Blenden mit dem Turbulenzgenerator 1 und der Standardkonfiguration in Abhängigkeit von der erzeugten Turbulenzenergie (logarithmisch abgetragen) an LDA- Messprofil 2

Die Diagramme Abb. 6.5 und 6.6 zeigen, dass sich die Kennlinien jeder Konfiguration von LDA- Messprofil 1 zu LDA- Messprofil 2 nach rechts oben verschieben. Das heißt, mit steigender Turbulenzenergie nimmt der Schalleistungspegel zu.

Alle Kennlinien weisen den gleichen Trend auf, wobei die Konfigurationen mit Mehrlochblende stets eine höhere Turbulenzenergie und einen höheren Schalleistungspegel erzeugen als die restlichen aufgeführten Konfigurationen bei vergleichbarer Geschwindigkeit.

In den Diagrammen ist eine Abhängigkeit der Lärmerzeugung von der Turbulenzenergie zu erkennen. Die Turbulenzenergie scheint als relevanter Parameter für aeroakustische Aussagen zu gelten, da in die Berechnung der Turbulenzenergie auch die Strömungsgeschwindigkeit als quadratischer Faktor mit einbezogen wird.

Bei der Lärmerzeugung wird ein Teil der Strömungsenergie in Schallenergie umgesetzt. Die zu Lärm umgewandelte Strömungsenergie scheint aus einem kinetischen Energieanteil mit konstanter mittlerer Strömungsgeschwindigkeit und turbulenter Energie mit fluktuierender Strömungsgeschwindigkeit zusammengesetzt zu sein.

6.4 Kennlinien: Schallleistungspegel / Strömungsgeschwindigkeit

Eine Änderung der Strömungsgeschwindigkeit führt gleichzeitig zu einer Änderung der Turbulenzenergie. Es ist daher notwendig, die Beziehung zwischen Schallleistungspegel und Strömungsgeschwindigkeit darzustellen.

Kennlinien: Gesamtschallleistungspegel/ Geschwindigkeit

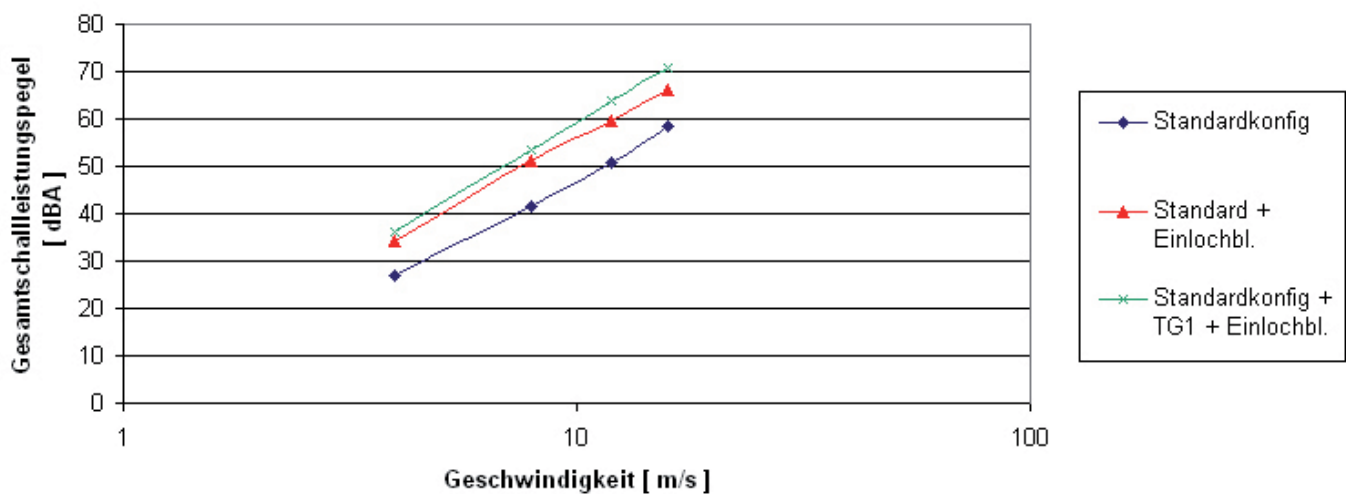


Abb. 6.7 : Vergleich der Gesamtschallleistungspegel der Messungen mit Einlochblende , der Kombination aus Einlochblende und Turbulenzgenerator 1 sowie der Messung ohne Blende in Abhängigkeit von der eingestellten Strömungsgeschwindigkeit (logarithmisch abgetragen)

Kennlinien: Gesamtschalleistungspegel/ Geschwindigkeit

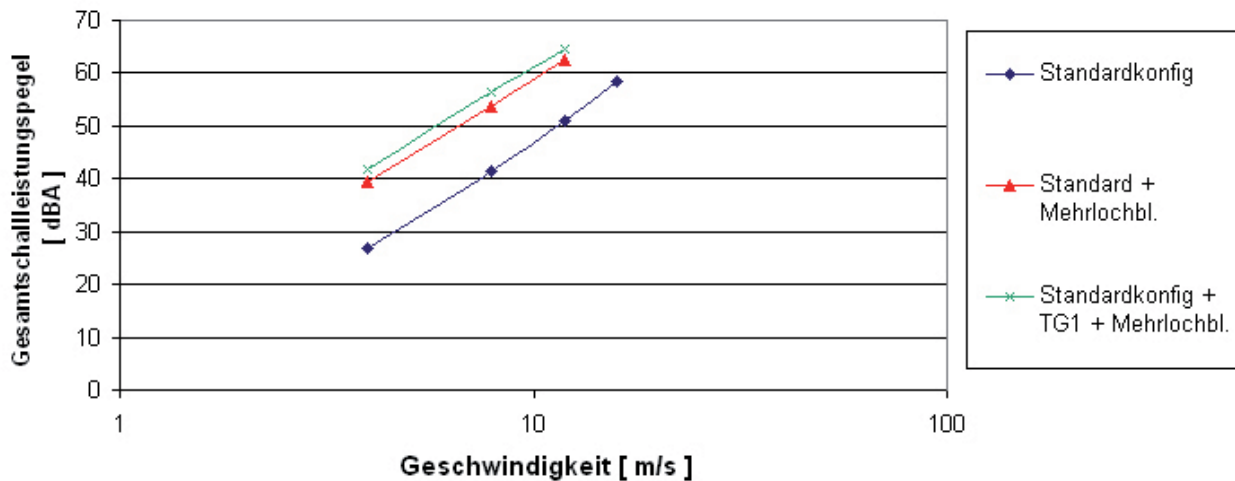


Abb. 6.8 : Vergleich der Gesamtschalleistungspegel der Messungen mit Mehrlochblende , der Kombination aus Mehrlochblende und Turbulenzgenerator 1 sowie der Messung ohne Blende in Abhängigkeit von der eingestellten Strömungsgeschwindigkeit (logarithmisch abgetragen)

Es fällt auf, dass die Mehrlochblende bei vergleichbarer Geschwindigkeit mehr Strömungslärm als die Einlochblende erzeugt. Dies ist im Einklang mit einem höheren Druckabfall an der Mehrblende (vgl. Abb. 6.1 und 6.2). Gemäß Bernoulli wird hier mehr Strömungsenergie umgesetzt.

In Abb. 6.7 und 6.8 kann bestätigt werden, dass eine Geschwindigkeitserhöhung eine Erhöhung des Schalleistungspegels zur Folge hat. Wie in Abb. 6.5 und 6.6 ist ein ähnlicher Verlauf der Kennlinien zu erkennen ist, was zu erwarten war, da die Geschwindigkeit in die Berechnung der Turbulenzenergie eingeht.



7. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss des Turbulenzgrades auf die Schallerzeugung an einer typischen Rohrströmungsblende untersucht, die in einem für eine optische Strömungsmess-technik geeignetem transparenten Plexiglasrohr eingebaut und mit Luft aus einer leisen Luftversorgung bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten durchströmt wurde. Die vorliegenden Messergebnisse sollen für ein semi-empirisches Berechnungsmodell für akustische Auslegungen verwendet werden, was im Rahmen des zweiten Hamburger Luftfahrtforschungsprogramms erstellt werden soll.

Messverfahren:

Als ein geeignetes Messverfahren zur Erfassung der Strömungsparameter wurde die Laser- Doppler- Anemometrie ausgewählt, das als wesentliche Vorteile eine einfache Handhabung, eine hohe Geschwindigkeitsauflösung an definierten Einzelpunkten, eine dauerhafte Gültigkeit einer einmaligen Kalibrierung und auf die Strömung rückwirkungsfreie Strömungsvermessungen aufweist und so in unterschiedlichen Kriterien der Hitzdrahtanemometrie oder der Particle Imaging Velocimetry deutlich überlegen ist.

Ergebnisse:

- Freie Luftströmungswirbel (Turbulenzen) bei unterschiedlichen Turbulenzgraden aber nahezu gleichbleibender Turbulenzenergie im Rohr tragen kaum zu einer zusätzlichen Lärmerhöhung bei.
- Der Schalleistungspegel an einer Systemblende steigt mit steigender Strömungsgeschwindigkeit.
- Der Schalleistungspegel an einer Systemblende steigt mit steigendem Druckabfall an der Blende und zusätzlich mit steigender Turbulenzenergie vor der Blende an.
- Die Turbulenz vor der Blende (Vorturbulenz) erzeugt an der Blende zusätzlichen Lärm, wobei die entstehende Schalleistung nicht vom Turbulenzgrad, sondern von der Turbulenzenergie abhängt.

Modell zur Interpretation der Ergebnisse

Bei der Lärmerzeugung wird ein Teil der Strömungsenergie in Schallenergie umgesetzt. Die zu Lärm umgewandelte Strömungsenergie scheint aus einem kinetischen Energieanteil mit konstanter mittlerer Strömungsgeschwindigkeit und turbulenter Energie mit fluktuierender Strömungsgeschwindigkeit zusammengesetzt zu sein.



Ausblick

Die Messdaten müssen durch weitere Messungen ergänzt werden, um die gefundenen Zusammenhänge zu präzisieren und um Abhängigkeiten der Lärmerzeugung von weiteren hier nicht betrachteten Parametern (z.B. Temperatur, Dichte, Asymmetrie der Anströmung, weitere Geometrien von Blenden) auszuschließen oder zu ergänzen.



Abbildungsverzeichnis

<i>Abb. 1.1 : Schalleintrag in die Flugzeugkabine [19]</i>	11
<i>Abb. 1.2 : Beispiel einer Steigleitung einer Flugzeugklimaanlage - Ansicht von oben [21]</i>	11
<i>Abb. 2.1 : Bernoulligleichung [17]</i>	15
<i>Abb. 2.2 : Verlauf einer laminaren Rohrströmung [17]</i>	16
<i>Abb. 2.3 : Verlauf einer turbulenten Rohrströmung [17]</i>	16
<i>Abb. 2.4 : Kármánsche Wirbelstraße [16]</i>	18
<i>Abb. 2.5 : Bewertungsskalen für den Schallpegel [2]</i>	20
<i>Abb. 2.6 : Aeroakustische Schallquellen [38]</i>	22
<i>Abb. 2.7 : Strömungsverhalten bei einer Querschnittsänderung [16]</i>	23
<i>Abb. 2.8 : Strömungsverhalten unter Nutzung eines Impedanzwandlers in der Form eines Trichters</i>	23
<i>Abb. 2.9 : Prandtl - Staurohr [19]</i>	26
<i>Abb. 2.10 : Druckabfall an einer Blende [16]</i>	27
<i>Abb. 2.11 : Messprinzip eines Hitzdrahtes [16]</i>	28
<i>Abb. 2.12 : Koordinatensysteme bei verschiedenen Hitzdrähten [22]</i>	29
<i>Abb. 2.13 : Konstant- Strom- Anemometer [18]</i>	29
<i>Abb. 2.14 : Konstant- Temperatur- Anemometer [18]</i>	30
<i>Abb. 2.15 : Prinzip der Signalverarbeitung bei der Hitzdrahtmesstechnik [34]</i>	30
<i>Abb. 2.16 : CTA, LDA und PIV im Vergleich mit den gestellten Anforderungen in dieser Arbeit [34]</i>	32
<i>Abb. 3.1 : Aufbau des Messstandes</i>	34
<i>Abb. 3.2 : Typische Blendengeometrien (Einlochblende, Mehrlochblende), die für die VolumenstromEinstellung bei einem Luftverteilungssystem einer Flugzeugklimaanlage verwendet werden [17]</i>	35
<i>Abb. 3.3 : Detaillierte Ansicht der Messprofile und gewählte Einbaulage der lärmErzeugenden typischen Blenden (Einlochblende, Mehrlochblende), die in einem Luftverteilungssystem einer Flugzeugklimaanlage eingebaut werden</i>	37
<i>Abb. 3.4 : Übersicht der verwendeten Messkonfigurationen bei den akustischen Messungen, die beliebig und modular ausgetauscht werden können</i>	38
<i>Abb. 3.5 : Übersicht der verwendeten Messkonfigurationen bei den strömungsmechanischen Messungen, die beliebig und modular ausgetauscht werden können</i>	39
<i>Abb. 5.1 : Überprüfung der Rotationssymmetrie am LDA-Messprofil1</i>	42
<i>Abb. 5.2 : Überprüfung der Rotationssymmetrie am LDA-Messprofil2</i>	43
<i>Abb. 5.3 : Überprüfung der Rotationssymmetrie des Turbulenzgrades am LDA- Messprofil 1</i>	44
<i>Abb. 5.4 : Überprüfung der Rotationssymmetrie des Turbulenzgrades am LDA- Messprofil 2</i>	45
<i>Abb. 5.5 : Geschwindigkeitsprofil am LDA- Messprofil 1 mit eingesetzter Mehrlochblende</i>	46
<i>Abb. 5.6 : Geschwindigkeitsprofil am LDA- Messprofil 2 mit eingesetzter Mehrlochblende</i>	46
<i>Abb. 5.7 : Vorturbulenz der Mehrlochblende ohne Einbezug der Standardkonfiguration am LDA- Messprofil 1</i>	47
<i>Abb. 5.8 : Vorturbulenz der Mehrlochblende ohne Einbezug der Standardkonfiguration am LDA- Messprofil 2</i>	47
<i>Abb. 5.9 : In dieser Arbeit verwendete Mehrlochblende mit Turbulenzgenerator eingebaut im Plexiglasrohr</i>	48
<i>Abb. 5.10 : Verwendete Mehrlochblende</i>	48
<i>Abb. 5.11 : Geschwindigkeitsprofile mit eingesetztem Turbulenzgenerator am LDA- Messprofil 1</i>	49
<i>Abb. 5.12 : Geschwindigkeitsprofile mit eingesetztem Turbulenzgenerator am LDA- Messprofil 2</i>	49
<i>Abb. 5.13 : Erzeugter Turbulenzgrad des Turbulenzgenerators am LDA- Messprofil 1</i>	50
<i>Abb. 5.14 : Erzeugter Turbulenzgrad des Turbulenzgenerators am LDA- Messprofil 2</i>	50
<i>Abb. 5.15 : Mittlere Turbulenzgradänderung zwischen den gemessenen LDA- Messprofilen 1 und 2 in Abhängigkeit der eingestellten Geschwindigkeit bei eingesetztem Turbulenzgenerator 1</i>	51
<i>Abb. 5.16 : Geometrie des verwendeten Turbulenzgenerators 1</i>	51
<i>Abb. 5.17 : Geschwindigkeitsprofile am LDA- Messprofil 1 bei unterschiedlich eingestellten Geschwindigkeiten mit eingesetztem Turbulenzgenerator 1 und einer Mehrlochblende</i>	52



Abbildungsverzeichnis

<i>Abb. 5.18 : Geschwindigkeitsprofile am LDA- Messprofil 2 bei unterschiedlich eingestellten Geschwindigkeiten mit eingesetztem Turbulenzgenerator 1 und einer Mehrlochblende</i>	52
<i>Abb. 5.19 : Erzeugter Turbulenzgrad am LDA- Messprofil 1 mit eingesetztem Turbulenzgenerator 1 und einer Mehrlochblende</i>	53
<i>Abb. 5.20 : Erzeugter Turbulenzgrad am LDA- Messprofil 2 mit eingesetztem Turbulenzgenerator 1 und einer Mehrlochblende</i>	53
<i>Abb. 5.21 : Lärmpegel im Hallraum während jeweils 5 verschiedener Messungen bei aus- und eingeschaltetem Schwenkgalgen und ausgeschalteter Strömung</i>	54
<i>Abb. 5.22 : Frequenzabhängige Schalleistungskurven aller Konfigurationen im Vergleich bei einer eingestellten Strömungsgeschwindigkeit von $v= 4 \text{ m/s}$</i>	55
<i>Abb. 5.23 : Frequenzabhängige Schalleistungskurven aller Konfigurationen im Vergleich bei einer eingestellten Strömungsgeschwindigkeit von $v= 8 \text{ m/s}$</i>	56
<i>Abb. 5.24 : Frequenzabhängige Schalleistungskurven aller Konfigurationen im Vergleich bei einer eingestellten Strömungsgeschwindigkeit von $v= 12 \text{ m/s}$</i>	56
<i>Abb. 5.25: Frequenzabhängige Schalleistungspegelkurven aller Konfigurationen (außer mit Mehrlochblende) im Vergleich bei einer eingestellten Strömungsgeschwindigkeit von $v= 16 \text{ m/s}$</i>	57
<i>Abb. 5.26 : Spektrum des durch Systemblenden erzeugten Lärms bei $v= 4 \text{ m/s}$ (energetische Differenz zwischen Konfiguration mit Systemblende zu entsprechender Konfiguration ohne Systemblende)</i>	58
<i>Abb. 5.27 : Spektrum des durch Systemblenden erzeugten Lärms bei $v= 8 \text{ m/s}$ (energetische Differenz zwischen Konfiguration mit Systemblende zu entsprechender Konfiguration ohne Systemblende)</i>	59
<i>Abb. 5.28 : Spektrum des durch Systemblenden erzeugten Lärms bei $v= 12 \text{ m/s}$ (energetische Differenz zwischen Konfiguration mit Systemblende zu entsprechender Konfiguration ohne Systemblende)</i>	59
<i>Abb. 5.29 : Spektrum des durch die Einlochblende erzeugten Lärms bei $v= 16 \text{ m/s}$ (energetische Differenz zwischen Konfiguration mit Systemblende zu entsprechender Konfiguration ohne Systemblende)</i>	60
<i>Abb. 5.30 : Spektrum des durch Turbulenzgenerator 1 erzeugten Lärms bei verschieden eingestellten Geschwindigkeiten (energetische Differenz zwischen Konfiguration mit Turbulenzgenerator 1 zu entsprechender Konfiguration ohne Turbulenzgenerator)</i>	61
<i>Abb. 5.31 : Spektrum des durch Turbulenzgenerator 2 erzeugten Lärms bei verschieden eingestellten Geschwindigkeiten (energetische Differenz zwischen Konfiguration mit Turbulenzgenerator 1 zu entsprechender Konfiguration ohne Turbulenzgenerator)</i>	61
<i>Abb. 6.1 : Vergleich der Gesamtschalleistungspegel der Messungen mit Mehrlochblende, Einlochblende und jeweils der Kombination beider Blenden mit dem Turbulenzgenerator 1 in Abhängigkeit vom erzeugten Druckabfall der Systemblenden (logarithmisch abgetragen)</i>	63
<i>Abb. 6.2 : Kennlinien [Gesamtschalleistungspegel / Druckabfall] der Messungen mit Mehrlochblende, Einlochblende und jeweils der Kombination beider Blenden mit dem Turbulenzgenerator 1 mit logarithmischen Gleichungen und Bestimmtheitsmaß R^2</i>	64



Abbildungsverzeichnis

<i>Abb. 6.3 : Vergleich der Gesamtschalleistungspegel der Messungen mit Mehrlochblende, Einlochblende, jeweils der Kombination beider Blenden mit dem Turbulenzgenerator 1 und der Standardkonfiguration in Abhängigkeit vom erzeugten Turbulenzgrad an LDA- Messprofil 1</i>	66
<i>Abb. 6.4 : Vergleich der Gesamtschalleistungspegel der Messungen mit Mehrlochblende, Einlochblende, jeweils der Kombination beider Blenden mit dem Turbulenzgenerator 1 und der Standardkonfiguration in Abhängigkeit vom erzeugten Turbulenzgrad an LDA- Messprofil 2</i>	67
<i>Abb. 6.5 : Vergleich der Gesamtschalleistungspegel der Messungen mit Mehrlochblende, Einlochblende, jeweils der Kombination beider Blenden mit dem Turbulenzgenerator 1 und der Standardkonfiguration in Abhängigkeit von der erzeugten Turbulenzenergie (logarithmisch abgetragen) an LDA- Messprofil 1</i>	68
<i>Abb. 6.6 : Vergleich der Gesamtschalleistungspegel der Messungen mit Mehrlochblende, Einlochblende, jeweils der Kombination beider Blenden mit dem Turbulenzgenerator 1 und der Standardkonfiguration in Abhängigkeit von der erzeugten Turbulenzenergie (logarithmisch abgetragen) an LDA- Messprofil 2</i>	69
<i>Abb. 6.7 : Vergleich der Gesamtschalleistungspegel der Messungen mit Einlochblende , der Kombination aus Einlochblende und Turbulenzgenerator 1 sowie der Messung ohne Blende in Abhängigkeit von der eingestellten Strömungsgeschwindigkeit (logarithmisch abgetragen)</i>	70
<i>Abb. 6.8 : Vergleich der Gesamtschalleistungspegel der Messungen mit Mehrlochblende , der Kombination aus Mehrlochblende und Turbulenzgenerator 1 sowie der Messung ohne Blende in Abhängigkeit von der eingestellten Strömungsgeschwindigkeit (logarithmisch abgetragen)</i>	71
<i>Abb. C.1 : Aufbau des LabVIEW -Bedienpanels; Steuerung und Kontrolle der Parameter [20]</i>	86
<i>Abb. D.1 : Bewertungskoeffizienten der A-Bewertung</i>	88
<i>Abb. E.1 : Übersichtstabelle für die Schalldruckpegel- und Schalleistungspegelwerte der Normschallquelle 1818654</i>	90
<i>Abb. E.2 : Vergleich von den nach dem Vergleichsverfahren und dem Hallraumverfahren bestimmten Schalleistungspegelwerten in Abhängigkeit von der Frequenz</i>	91
<i>Abb. F.1 : Ablauf der akustischen Messkette</i>	92
<i>Abb. G.1 : Beispiel einer Geschwindigkeitsmessung mit der LDA- Software</i>	93
<i>Abb. G.2 : Beispiel der Turbulenzgradmessung mit der LDA-Software</i>	94
<i>Abb. H.1 : Vergleich der erzeugten Turbulenzgrade an LDA- Messprofil und LDA- Messprofil 2 der Messungen mit Mehrlochblende bei $v= 4$ m/s</i>	95
<i>Abb. H.2 : Vergleich der erzeugten Turbulenzgrade an LDA- Messprofil und LDA- Messprofil 2 der Messungen mit Mehrlochblende bei $v= 8$ m/s</i>	95
<i>Abb. H.3 : Vergleich der erzeugten Turbulenzgrade an LDA- Messprofil und LDA- Messprofil 2 der Messungen mit Mehrlochblende bei $v= 12$ m/s</i>	95
<i>Abb. H.4 : Turbulenzgradprofile der Messungen mit Mehrlochblende an LDA- Messprofil 1 bei verschiedenen eingestellten Geschwindigkeiten</i>	97
<i>Abb. H.5 : Turbulenzgradprofile der Messungen mit Mehrlochblende an LDA- Messprofil 2 bei verschiedenen eingestellten Geschwindigkeiten</i>	97
<i>Abb. H.6 : Turbulenzgradprofile der Messungen mit Turbulenzgenerator 1 an LDA- Messprofil 1 bei verschiedenen eingestellten Geschwindigkeiten</i>	98



Abbildungsverzeichnis

<i>Abb. H.7 : Turbulenzgradprofile der Messungen mit Turbulenzgenerator 1 an LDA- Messprofil 2 bei verschiedenen eingestellten Geschwindigkeiten</i>	98
<i>Abb. H.8 : Turbulenzgradprofile der Messungen mit Turbulenzgenerator 1 und Mehrlochblende an LDA- Messprofil 2 bei verschiedenen eingestellten Geschwindigkeiten</i>	99
<i>Abb. I.1 Frequenzabhängige Schalleistungspegelkurven der Standardkonfiguration bei verschiedenen eingestellten Geschwindigkeiten</i>	100
<i>Abb. I.2 Frequenzabhängige Schalleistungspegelkurven der Konfiguration mit Einlochblende bei verschiedenen eingestellten Geschwindigkeiten</i>	100
<i>Abb. I.3 Frequenzabhängige Schalleistungspegelkurven der Konfiguration mit Einlochblende und Turbulenzgenerator 2 bei verschiedenen eingestellten Geschwindigkeiten</i>	101
<i>Abb. I.4 Frequenzabhängige Schalleistungspegelkurven der Konfiguration mit Einlochblende und Turbulenzgenerator 1 bei verschiedenen eingestellten Geschwindigkeiten</i>	101
<i>Abb. I.5 Frequenzabhängige Schalleistungspegelkurven der Konfiguration mit Mehrlochblende bei verschiedenen eingestellten Geschwindigkeiten</i>	102
<i>Abb. I.6 Frequenzabhängige Schalleistungspegelkurven der Konfiguration mit Mehrlochblende und Turbulenzgenerator 2 bei verschiedenen eingestellten Geschwindigkeiten</i>	102
<i>Abb. I.7 Frequenzabhängige Schalleistungspegelkurven der Konfiguration mit Mehrlochblende und Turbulenzgenerator 1 bei verschiedenen eingestellten Geschwindigkeiten</i>	103
<i>Abb. J.1 : Messparameter der Messungen mit Mehrlochblende, mit Turbulenzgenerator 1 und der Standardkonfiguration im Vergleich</i>	105
<i>Abb. J.2 : Messparameter der Messungen mit Einlochblende, mit Turbulenzgenerator 1 und der Standardkonfiguration im Vergleich</i>	105
<i>Abb. J.3 : Kennlinienvergleich (Gesamtschalleistungspegel/ Druckabfall) der Messungen mit Einlochblende und der Kombination aus Einlochblende und Turbulenzgenerator 1: Steigender Gesamtschalleistungespegel bei nahezu konstantem Druckabfall und steigender Turbulenzenergie</i>	106
<i>Abb. J.4 : Kennlinienvergleich (Gesamtschalleistungspegel/ Druckabfall) der Messungen mit Mehrlochblende und der Kombination aus Mehrlochblende und Turbulenzgenerator 1: Steigender Gesamtschalleistungespegel bei nahezu konstantem Druckabfall und steigender Turbulenzenergie</i>	106
<i>Abb. J.5 : Kennlinienvergleich (Gesamtschalleistungspegel/ Turbulenzenergie) der Standardkonfiguration an LDA- Messprofil 1 und 2 : Steigender Gesamtschalleistungespegel bei steigender Turbulenzenergie (TE)</i>	107
<i>Abb. J.6 : Kennlinienvergleich (Gesamtschalleistungspegel/ Turbulenzgrad) an LDA- Messprofil 1 zwischen Standardkonfiguration und der Messung mit eingesetztem Turbulenzgenerator : Nahezu gleichbleibender Gesamtschalleistungespegel bei steigendem Turbulenzgrad</i>	107
<i>Abb. K.1 : Ablauf der Hitzdrahtmesstechnik am Beispiel eines Konstant- Temperatur- Anemometers [22]</i>	108
<i>Abb. K.2 : Ablauf der Particle Imaging Velocimetry [22]</i>	110
<i>Abb. K.3 : Prinzip der Stereosichtweise [22]</i>	111
<i>Abb. K.4 : Einstellung der beiden Kameras - Scheimpflugbedingung [22]</i>	111
<i>Abb. K.5 : Kreuzkorrelation einer Kamera bei der PIV [22]</i>	112



Abbildungsverzeichnis

<i>Abb. K.6 : Ablauf der Kreuzkorrelation bei der PIV [22]</i>	113
<i>Abb. K.7 : Ergebnis der Kreuzkorrelation am PC [22]</i>	113
<i>Abb. K.8 : Aufnahme der beiden kalibrierten Kameras [22]</i>	113
<i>Abb. K.9 : Überlappungsbereich der beiden Kameraaufnahmen [22]</i>	114
<i>Abb. K.10 : 3D- Datenrekonstruktion [22]</i>	115
<i>Abb. K.11 : Übersichtsdiagramm der einzelnen Schritte bei der PIV [22]</i>	116
<i>Abb. L.1 : Partikelgenerator [39]</i>	118
<i>Abb. L.2 : LDA- System in Betrieb</i>	118
<i>Abb. L.3 : Interferenzstreifenmuster im Messvolumen [30]</i>	119
<i>Abb. L.4 : Prinzip der Frequenzverschiebung [22]</i>	119
<i>Abb. L.5 : Interferenzstreifenmuster im Kreuzungspunkt zweier Laserstrahlen [22]</i>	120
<i>Abb. L.6 : Vom Photodetektor empfangenes Streulicht [40]</i>	120
<i>Abb. L.7 : Abmaße des Messvolumens [22]</i>	121
<i>Abb. L.8 : Messvolumen im Rohrquerschnitt [22]</i>	121
<i>Abb. L.9 : Messvolumen mit gaußscher Normalverteilung [22]</i>	122
<i>Abb. L.10 : Gaußsche Normalverteilung [40]</i>	122
<i>Abb. L.11 : Messvolumen im Laserstrahlenkreuzungspunkt</i>	122
<i>Abb. L.12 : LDA- Signalentstehung [11]</i>	125
<i>Abb. L.13 : Beispiel eines typischen Doppler- Signals [13]</i>	126
<i>Abb. L.14 : Arbeitsweise der Bragg-Zelle [22]</i>	126
<i>Abb. L.15 : Messprinzip der Laser Doppler Anemometrie [22]</i>	126
<i>Abb. L.16 : Übersicht der möglichen Materialien für die Partikelgenerierung in der Lasertechnik [34]</i>	127



Literaturverzeichnis

- [1] Jörg Hoffmann
Taschenbuch der Messtechnik, 4. Auflage
Fachbuchverlag Leipzig (2004)

- [2] Dieter Maute
Technische Akustik und Lärmschutz
Fachbuchverlag Leipzig (2006)

- [3] Michael Möser
Technische Akustik, 6. Auflage
Springer- Verlag, Berlin Heidelberg (2005)

- [4] Jens Blauert, Ning Xiang
Acoustics for Engineers
Springer- Verlag, Berlin Heidelberg (2008)

- [5] Franz Durst
Grundlagen der Strömungsmechanik : Eine Einführung in die Theorie
der Strömungen von Fluiden
Springer- Verlag, Berlin Heidelberg (2006)

- [6] Otto Fiedler
Strömungs- und Durchflußmeßtechnik
R. Oldenbourg Verlag München Wien (1992)

- [7] Uwe Kiencke, Holger Jäkel
Signale und Systeme, 4. Auflage
Oldenbourg Verlag München (2008)

- [8] Optical velocity measurements
Karman Institute for fluid dynamics (1994)

- [9] F. Durst, A. Melling, J.H. Whitelaw
Principles and practice of Laser Doppler Anemometry, 2. Auflage
(1981)

- [10] L.J.H. Absil
Analysis of the laser doppler measurement technique for application in turbulent flows

- [11] www.optolution.ch



- [12] R.B. Panerai
Spectrum Analysis and Correlation
CRC Press LLC (2002)
www.engnetbase.com
- [13] Rajan K. Menon
Laser Anemometry
CRC Press LLC (2002)
www.engnetbase.com
- [14] Per Rasmussen
Acoustic Measurement
CRC Press LLC (2002)
www.engnetbase.com
- [15] Frank M. White
Fluid Mechanics, fourth edition
WCB McGraw-Hill
- [16] Adeline Gommet
Entwurf einer Meßstrecke zur experimentellen Bestimmung des Stömungslärms
an einer Rohrblende in Abhängigkeit von signifikanten Strömungsparametern
Diplomarbeit an der Technischen Universität Hamburg-Harburg, Hamburg (2005)
- [17] Martin Viertel
Verschiedene Ansätze zur Lärmreduzierung an Blenden in der Klimaanlage von
Airbus- Flugzeugen
Diplomarbeit an der Fachhochschule Wedel, Hamburg (2001)
- [18] Jörg-Christian Wolf
Stömungsakustische Untersuchung von neuartigen Blenden zur Auslegung leiser
Klimaanlagensysteme für Verkehrsflugzeuge
Diplomarbeit an der Fachhochschule Bingen am Rhein, Bingen (2006)
- [19] Thomas Ahlefeldt
Bestimmung von signifikanten Strömungsparametern für die Vorhersage des
Strömungslärms an einer Rohrblende
Diplomarbeit an der Technischen Universität Berlin, Berlin (2007)
- [20] Eike Grunau
Aufbau einer leisen Luftversorgung zur akustischen Vermessung von Komponenten des
Luftverteilungssystems in ihren Betriebspunkten
Diplomarbeit an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg,
Hamburg (2009)



- [21] Prof. Wolfgang Gleine
Vorlesungsskript „ Systemintegration“
Sommersemester 2008
Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg
- [22] www.dantecdynamics.com
- [23] Hermann Henn, Gh. Reza Sinamبارi, Manfred Fallen
Ingenieurakustik, Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele
4. Auflage (2007/08)
Verlag Vieweg + Teubner
- [24] Ivar Veit
Technische Akustik, 5. Auflage (1996)
Vogel Buchverlag
- [25] Wolfgang Demtröder
Laserspektroskopie, Grundlagen und Techniken
5. Auflage (2007)
Springer- Verlag Berlin Heidelberg
- [26] H. Oertel sen., H. Oertel jun.
Optische Strömungsmesstechnik (1989)
G. Braun Verlag Karlsruhe
- [27] K.D. Jensen
Flow Measurements
J. of the Brazilian Soc. of Mech. Sci. & Eng
Oct.-Dec. 2004, Vol. 26, No. 4
Copyright 2004 by ABCM
- [28] A. Melling
Tracer particles and seeding for particle image velocimetry
Meas. Sci. Technol.8 , 1406-1416
IOP publishing (1997)
- [29] C. Bayer, K. Shirai, L. Büttner, J. Czarske
Measurement of acceleration and multiple velocity components using a laser doppler
velocity profile sensor
Meas. Sci. Technol. 19, 055401
IOP Publishing (2008)



- [30] L.H. Bendict, H. Nobach, C. Tropea
Estimation of turbulent velocity spectra from laser doppler data
Meas. Sci. Technol. 11, 1089- 1104
IOP Publishing (2000)
- [31] Jürgen Czarske, Lars Büttner, Thorsten Pfister
Laser- Doppler- Sensoren
Berührungslos messen mit Licht (06/ 2007)
Wiley- VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (Phys. unserer Zeit)
- [32] Dr.R.Boisch
H01 Kundtsches Rohr
Fachhochschule Oldenburg, Ostfriesland, Wilhelmshaven
Fachbereich Technik, Emden
- [33] www.dlr.de
- [34] Nils Helling
Abstract about the choice of sensors for the experimental setup of measuring the influence of turbulence in an airflow regarding the noise in standard pipes (04.10.2008)
Technische Universität Hamburg- Harburg
- [35] Prof. Detlef Schulze
Vorlesungsskript „Strömungslehre“
Wintersemester 2006
Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg
- [36] Prof. Wolfgang Gleine
Vorlesungsskript „Mechanische Kabinensysteme“
Wintersemester 2007
Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg
- [37] www.ni.com
- [38] www.wikipedia.de
- [39] www.ila.de
- [40] www.lawrenz.com

Anhang

A.1 Bestandteile des Messstandes

In der Diplomarbeit von Eike Grunau [20] wird der Aufbau und die Auslegung einer Leiseluftversorgung beschrieben. Der Versuchsstand stellt die Basis für diese Arbeit dar. Ziel war es, die Messtation so leise wie möglich, d. h. zwischen 25 bis 30 dB (A) auszulegen. Ein schneller und modularer Aufbau war ebenso angedacht. Über eine Datenkarte werden die gemessenen Daten schnell erfasst. Desweiteren sind die Bauteile wie Drosselklappen, Sensoren und Gebläse elektrisch ansteuerbar und in LabVIEW eingebunden.

Die Messtation enthält folgende relevante Bauteile:

- Schalldämpfer
- Gebläse
- Drucksensoren (für Messungen des Differenzdruckes und des statischen Druckes)
- Thermoelemente
- höhenverstellbare Stative
- Bypass - System
- elektrisch steuerbare Drosselklappen (über Motoren)
- PWM- Controller (für die Geschwindigkeitsregulierung des Gebläses)
- Datenakquisitionskarte
- Impedanzkonverter
- Hallraum
- Plexiglasrohre (verschiedener Länge)
- Turbulenzgenerator (z. B. Mehrlochblende, Schmirgelpapier, Lüfter)
- Normblende (für die Bestimmung des Volumenstroms)
- Programme LabVIEW, Matlab, BSA Flow Software , Noise Explorer
- Schallpegelmessgerät
- Temperaturmessgerät
- Voltmeter
- Laptop
- Holzplatte (1,50 m x 1,42 m), um eindringenden Lärm in den Hallraum auszuschließen
- Isoliermaterial gegen Schalleintrag (Schaum, Glaswolle und Gummi)
- Schwenkgalgen mit installiertem Mikrofon
- LDA- System mit Traversiereinrichtung und Partikelgenerator
- wabenförmiger Strömungsgleichrichter



B.1 Anforderungen an den Messstand

- Reproduzierbarkeit der Messergebnisse
- elektrische Ansteuerung sämtlicher mechanischer Komponenten in LabVIEW
- Modularität

Anforderung an das Gebläse:

- Volumenstrom von 10 l/s bis 100 l/s
- maximaler Druck von 2000 Pa bei einem Volumenstrom von 100 l/s

Vorgaben für die Plexiglasrohre und den zu erreichenden Schalldruckpegel:

- Innendurchmesser des Plexiglasrohres von 100 mm
- Schalldruckpegel von 25 - 30 dB (A)

C.1 Messgeräte

Die eingesetzten Messgeräte müssen die Größen Strömungsgeschwindigkeit, Differenzdruck, statischen Druck, Turbulenzgrad, den an dem Turbulenzerzeuger generierten Lärm erfassen können.

Thermoelement:

Zur Ermittlung der Temperatur werden Thermoelemente verwendet aus Chrom-Nickel. Durch die vom Seebeck-Effekt hervorgerufene Thermospannung, lässt sich eine Temperaturdifferenz bestimmen.

Die Messungen an unterschiedlichen Stellen der Rohrstrecke ergaben eine gemittelte Temperatur von 20,5 °C.

Schallpegelmessgerät:

Der an dem Turbulenzgenerator erzeugte Lärm wird in Terzbandspektren mit einem Schallpegelmesser der Firma Brüel & Kjaer 2260 (mit Software BZ 7202) gemessen, welches vor jeder Versuchsreihe kalibriert wird.

Ein Mikrofon der Firma Norsonic wird an einem Schwenkgalgen im Hallraum befestigt, so dass über den Raum gemittelte und reproduzierbare Messergebnisse erfolgen können. Der Schwenkgalgen wird hinter dem Impedanzkonverter positioniert. Verwendet wird ein Schwenkgalgen von Norsonic. Das Schallpegelmessgerät ist über einen Adapter mit dem Mikrofon, welches sich innerhalb des Hallraumes befindet, verbunden.

Die gemessenen Daten werden später auf einen Laptop übertragen und dort weiterverarbeitet.



Druckmesser:

Der Differenzdruck an der Messblende wird mit einem Drucksensor von BD Sensors gemessen. Der Differenzdruck am Turbulenzgenerator sowie der statische Druck innerhalb der Teststrecke wird mit Drucksensoren P 26 von Halstrupp & Walcher gemessen. Alle Daten werden von einer Datenakquisitionskarte erfasst und an einen Laptop weitergegeben.

Laser-Doppler-Anemometer:

Zur Geschwindigkeits- und Turbulenzgradmessung wird ein Laser-Doppler-Anemometer von Dantec Dynamics (Flow Explorer mit BSA Flow Software) eingesetzt, das eine strömungsberührungsfreie Messung ermöglicht.

Die gemessene Strömungsgeschwindigkeit des Laser-Doppler-Anemometers kann verglichen werden mit den gemessenen Werten der Drucksensoren, welche ebenfalls die Strömungsgeschwindigkeit erfassen können.

Aus dem an der Blende gemessenen Volumenstrom kann die Geschwindigkeit ermittelt werden.

LabVIEW :

Alle mechanischen Komponenten der Teststation sollen über LabVIEW gesteuert werden.

Die Datenaufzeichnung erfolgt ebenfalls über dieses Programm.

Auf dem Bedienpanel können unterschiedliche Parameter wie Volumenstrom, Geschwindigkeit und Druck eingestellt werden [s. Abb. C.1].

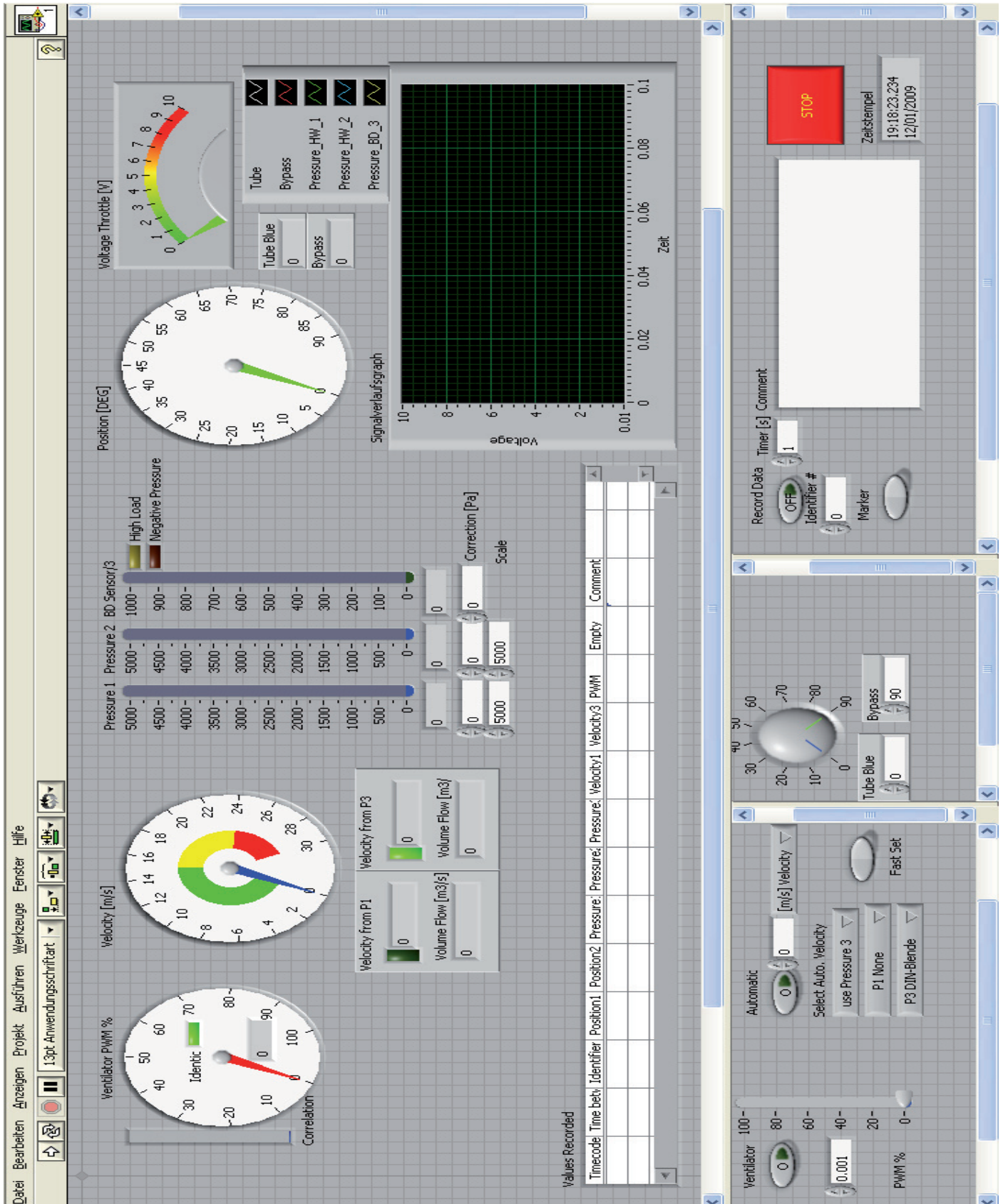


Abb. C.1 : Aufbau des LabVIEW -Bedienpanels; Steuerung und Kontrolle der Parameter [20]



D.1 Gesamtschalleistungspegel

Berechnet wird der Gesamtschalleistungspegel nach folgender Formel [16]:

$$L_{WA} = 10 \log \left[\sum_{i_{\min}}^{i_{\max}} 10^{0,1(L_{Wi} + C_i)} \right]$$

L_{WA} : A-bewerteter Gesamtschalleistungspegel [dBA]

L_{Wi} : gemessener Schalleistungspegel des i-ten Terzbandes [dB]

C_i : Bewertungskoeffizient der A-Bewertung [dB]

i_{\max} : maximaler Terzbandindex

i_{\min} : minimaler Terzbandindex

In der Tabelle Abb. D.1 sind die Bewertungskoeffizienten der A-Bewertung aufgelistet:



D.2 Bewertungskoeffizienten für die A- Bewertung

F [Hz]	A [dB]
10	-70,4
12,5	-63,4
16	-56,7
20	-50,5
25	-44,7
31,5	-39,4
40	-34,6
50	-30,2
63	-26,2
80	-22,5
100	-19,1
125	-16,1
160	-13,4
200	-10,9
250	-8,6
315	-6,6
400	-4,8
500	-3,2
630	-1,9
800	-0,8
1000	0
1250	0,6
1600	1,0
2000	1,2
2500	1,3
3150	1,2
4000	1,0
5000	0,5
6300	-0,1
8000	-1,1
10000	-2,5
12500	-4,3
16000	-6,6
20000	-9,3

Abb. D.1 : Bewertungskoeffizienten der A-Bewertung



E.1 Schalleistungsmessung

Der Schalleistungspegel wird grundsätzlich aus den gemessenen Schalldruckpegeln berechnet.

Er kann auf drei Arten ermittelt werden:

- a) Hüllflächenverfahren
- b) Hallraumverfahren
- c) Vergleichsverfahren

Die Berechnung des Hüllflächenverfahrens und des Hallraumverfahrens ist aufwendig. Zudem ist für letzteres nicht nur die Kenntnis der Nachhallzeit des Hallraumes sondern auch viele andere zu bestimmende Parameter notwendig, um den Schalleistungspegel berechnen zu können.

Am einfachsten erscheint die Berechnung des Schalleistungspegels mit Hilfe des Vergleichsverfahrens. Hierfür wird eine Normschallquelle benötigt, von der die Schalleistungswerte bekannt sind. Sie dient als Referenzquelle für alle späteren Schallmessungen. Soll die Schalleistung einer unbekanntenen Schallquelle ermittelt werden, so muss lediglich ein Korrekturfaktor $K(f)$ zu dem gemessenen Schalldruckpegel addiert werden.

$K(f)$ lässt sich bestimmen aus der Differenz des bekannten Normschalleistungspegels und des gemessenen Schalldruckpegels. In $K(f)$ sind alle raumspezifischen Parameter implizit enthalten.

Der Schalleistungspegel nach dem Vergleichsverfahren errechnet sich aus

$$L_W = L_P + K(f)$$

L_W : Schalleistungspegel der getesteten Schallquelle [dB]

L_P : Schalldruckpegel der getesteten Schallquelle im Hallraum [dB]

$K(f)$: Korrekturfaktor der Normschallquelle (frequenzabhängige Raumkonstante) [dB]



E.2 Übersicht der Werte für die Berechnung des Schallleistungspegels mit Normschallquelle 1818654

Frequenz (Hz)	Korrekturfaktor K (f)	Normschalleistungspegel (dB)	gemessener Schalldruckpegel der Normschallquelle (dB)
63	11.1	76.3	65.2
80	8.9	75.7	66.8
100	10.9	75.8	64.9
125	6	75.3	69.3
160	4.7	75.9	71.2
200	6.6	76	69.4
250	4.2	75.8	71.6
315	3.1	75.9	72.8
400	1.6	76.1	74.5
500	0.8	76.4	75.6
630	0.4	77	76.6
800	0.3	78.6	78.3
1000	0.4	79.6	79.2
1250	0.2	81.3	81.1
1600	0	81.7	81.7
2000	0.5	81.1	80.6
2500	0.8	79.1	78.3
3150	0.6	79.1	78.5
4000	0	78.7	78.7
5000	-0.1	77.8	77.9
6300	-0.4	76.6	77
8000	0.2	75.1	74.9
10000	1.4	73	71.6
12500	3.2	70.9	67.7

Abb. E.1 : Übersichtstabelle für die Schalldruckpegel- und Schalleistungspegelwerte der Normschallquelle 1818654

E.3 Hallraum- und Vergleichsverfahren (mit Normschallquelle 1818654): Schalleistungspegelberechnung im Vergleich

Der Schalleistungspegel wird aus dem Schalldruckpegel berechnet. Zunächst werden die Schalleistungswerte einmal mit dem Hallraumverfahren und einmal mit dem Vergleichsverfahren bestimmt und diese danach miteinander verglichen.

Das Hallraumverfahren bezieht sich auf Idealfälle und ist zeitaufwändiger in der Berechnung als das Vergleichsverfahren, welches hingegen oft in der Praxis angewendet wird, da es alle realen Messbedingungen miteinbezieht.

In Diagramm Abb. E.2 soll gezeigt werden, inwiefern sich die genormten Listenwerte des Vergleichsverfahrens von den aus dem Hallraumverfahren berechneten Werten unterscheiden.

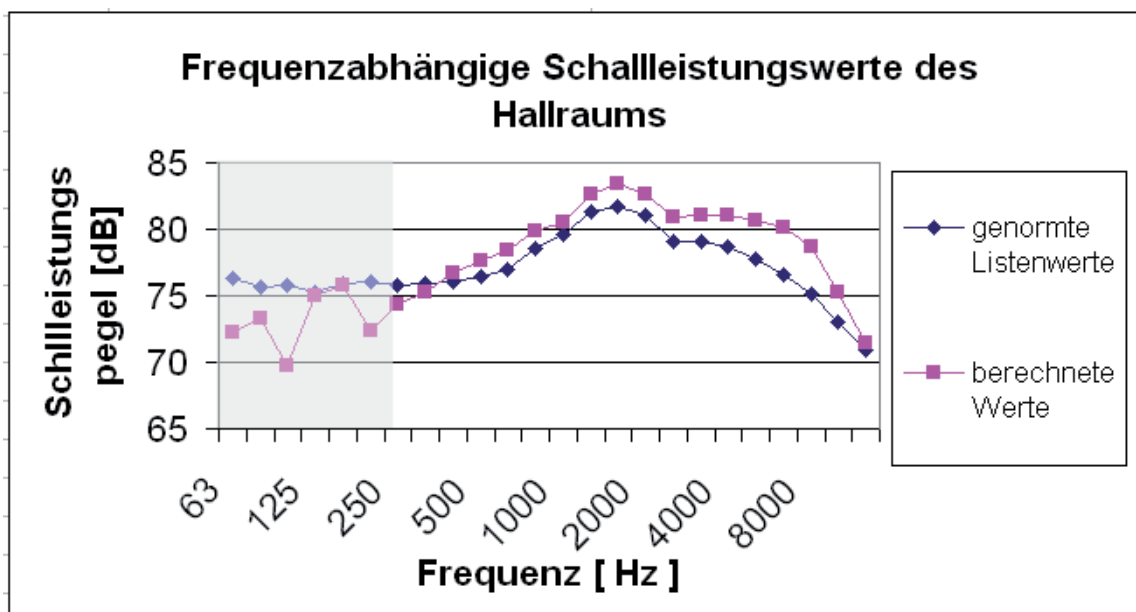


Abb. E.2 : Vergleich von den nach dem Vergleichsverfahren und dem Hallraumverfahren bestimmten Schalleistungspegelwerten in Abhängigkeit von der Frequenz

Beim Vergleich der Schalleistungspegelwerte zeigt sich, dass die mit der erweiterten Sabineschen Formel berechneten Werte weitestgehend oberhalb der genormten Listenwerten liegen. Im höherfrequenten Bereich nimmt die Abweichung zu.

Es kann also daraus der Schluss gezogen werden, dass die mit dem Hallraumverfahren berechneten Werte nur für den Idealfall geeignet sind. In dieser Arbeit wird daher auf die Anwendung des Hallraumverfahrens verzichtet und an Stelle dessen das Vergleichsverfahren benutzt, da es die realen Messbedingungen und Messumgebungen am besten widerspiegeln kann.

Mit Hilfe der Korrekturfaktoren [s. Abb. E.1] können nun die Schalleistungspegelwerte des Terzbandspektrums jeder beliebigen Messung berechnet werden.

F.1 Messkette für die akustischen Messungen

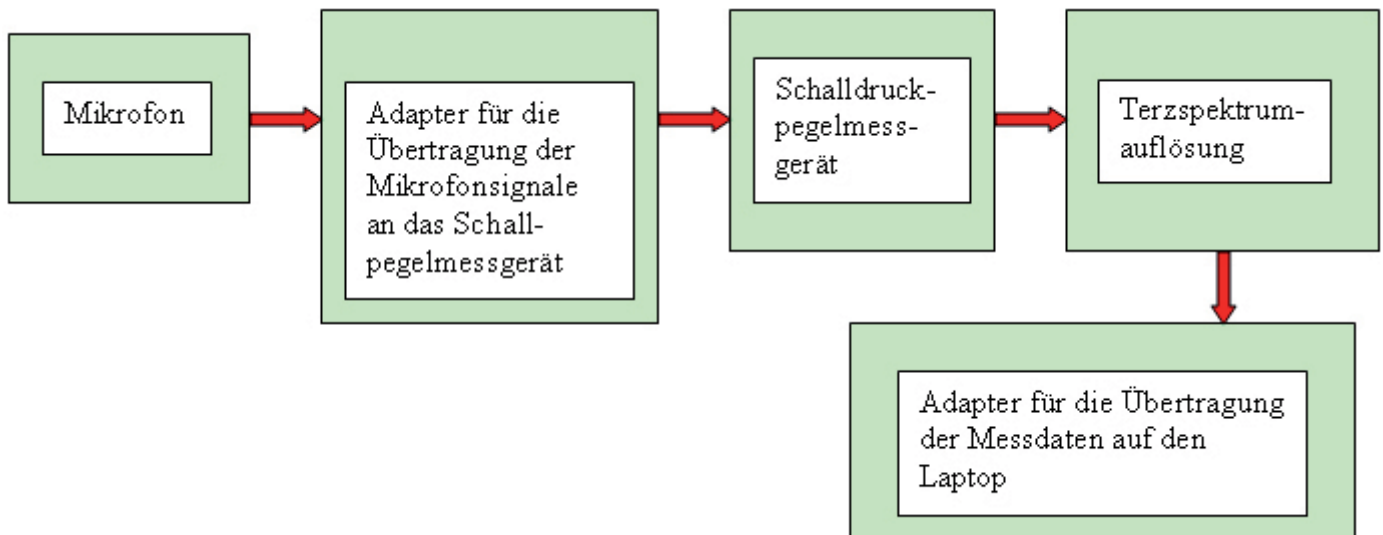


Abb. F.1 : Ablauf der akustischen Messkette

Der Schalldruckpegel wird stets als Terzspektrum gemessen. Die Daten werden auf den Laptop zur weiteren Bearbeitung übertragen (mit Hilfe des Hyperterminals von Windows).

G.1 Turbulenzgradberechnung mit der LDA- Software

Der Turbulenzgrad wird in der LDA- Software mit folgender Formel berechnet:

$$Tu = \frac{v_{RMS}}{v_{mean}} \cdot 100 \%$$

v_{RMS} : quadratischer Mittelwert der Geschwindigkeit [m/s]

v_{mean} : mittlere Geschwindigkeit [m/s]

Der RMS-Wert und der mittlere Geschwindigkeitswert werden simultan erfasst vom LDA. In Abbildung G.1 sind beispielhaft das Geschwindigkeitsprofil der mittleren Geschwindigkeit und des quadratischen Mittelwertes über dem Rohrquerschnitt abgetragen, um den Zusammenhang beider Größen mit dem Turbulenzgrad verständlich darzustellen.

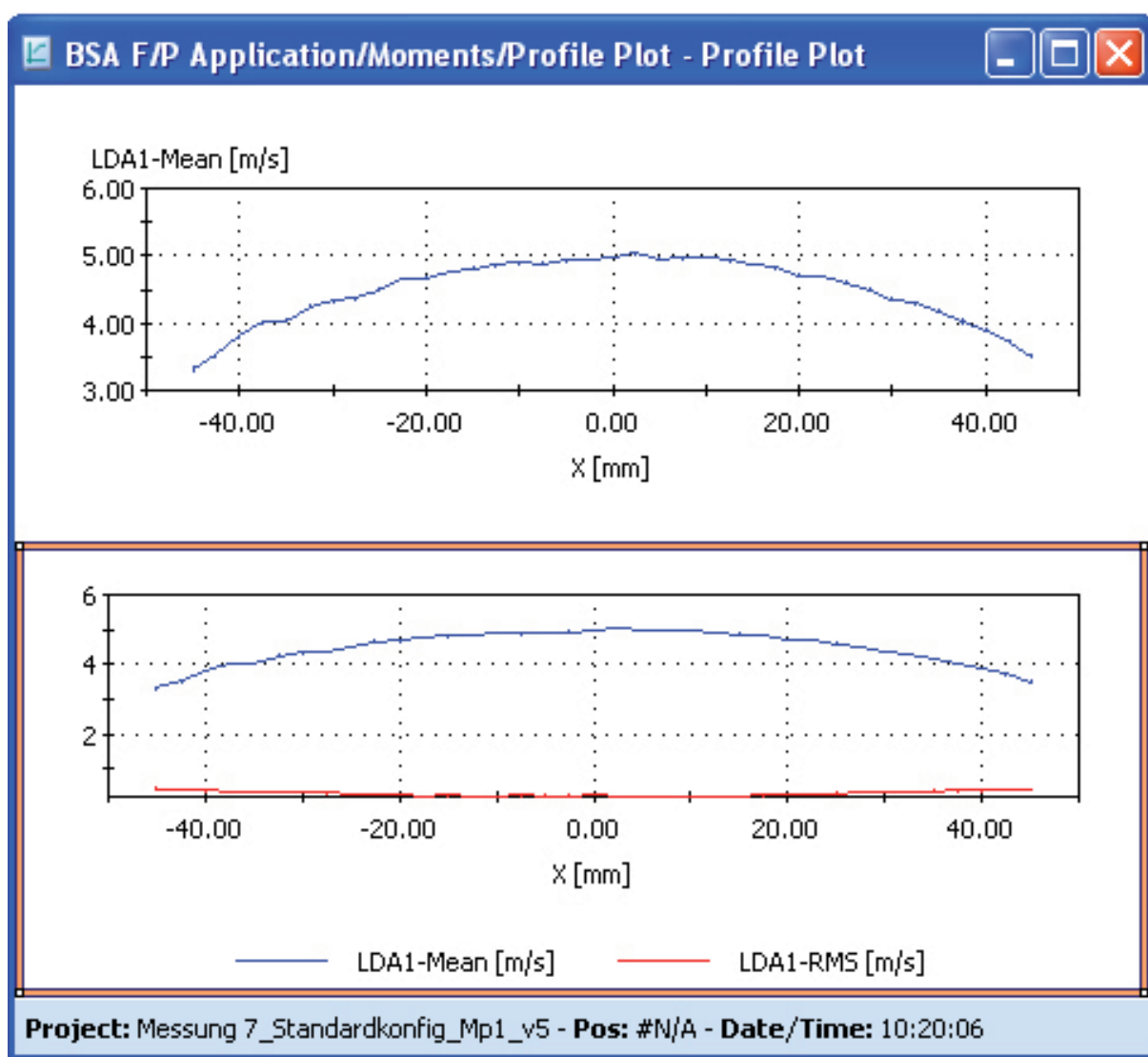


Abb. G.1 : Beispiel einer Geschwindigkeitsmessung mit der LDA- Software

Laut Formel ergibt sich dann das zugehörige Turbulenzgradprofil über den Rohrquerschnitt in Abb. G.2.

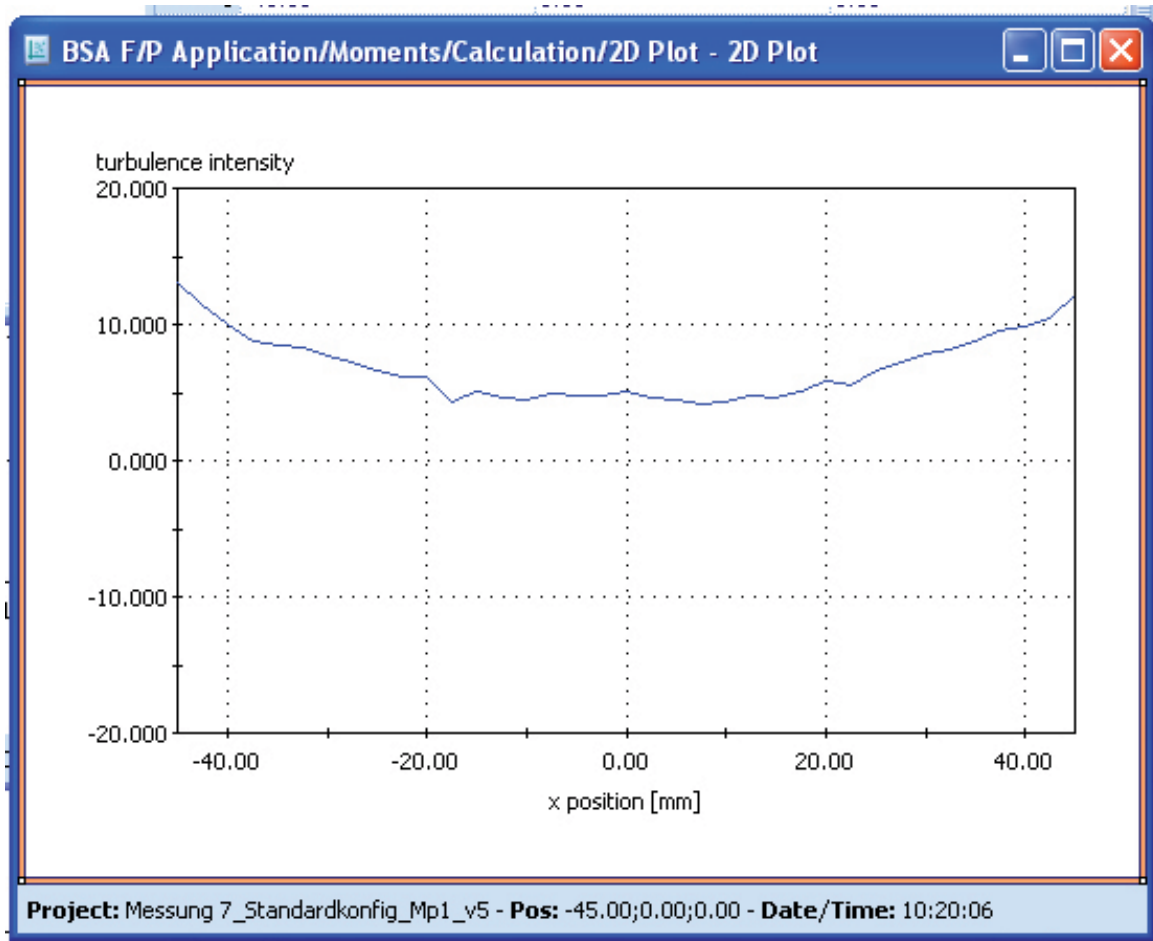


Abb. G.2 : Beispiel der Turbulenzgradmessung mit der LDA-Software

Der mit der LDA-Software berechnete Turbulenzgrad stimmt überein mit dem Turbulenzgrad, der nach der Formel aus der Literatur bestimmt wird [s. S. 17].

H.1 Strömungsmechanische Messergebnisse

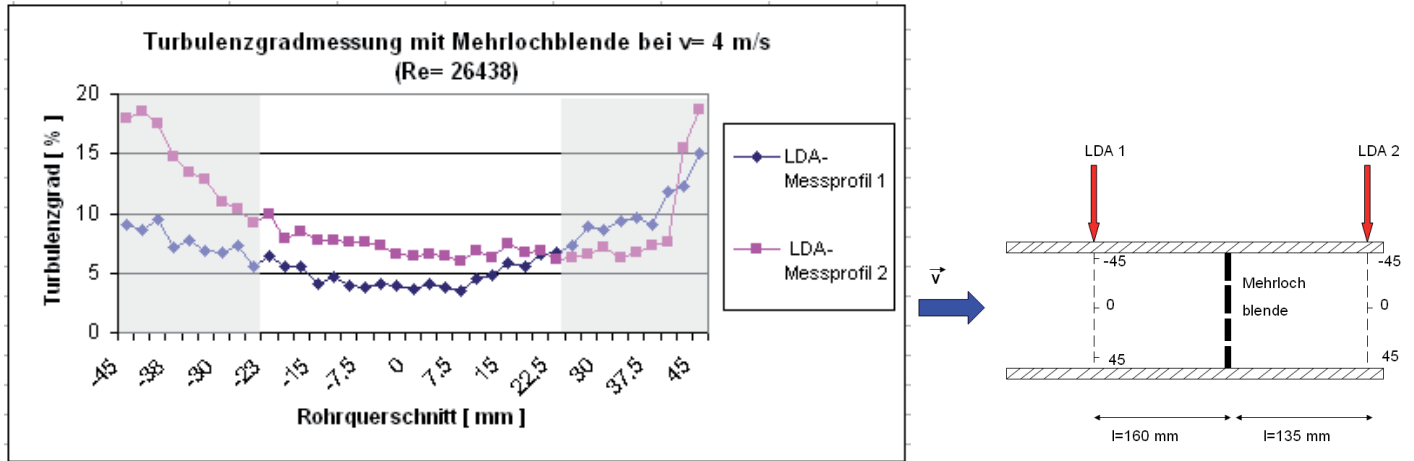


Abb. H.1 : Vergleich der erzeugten Turbulenzgrade an LDA- Messprofil und LDA- Messprofil 2 der Messungen mit Mehrlochblende bei $v=4$ m/s

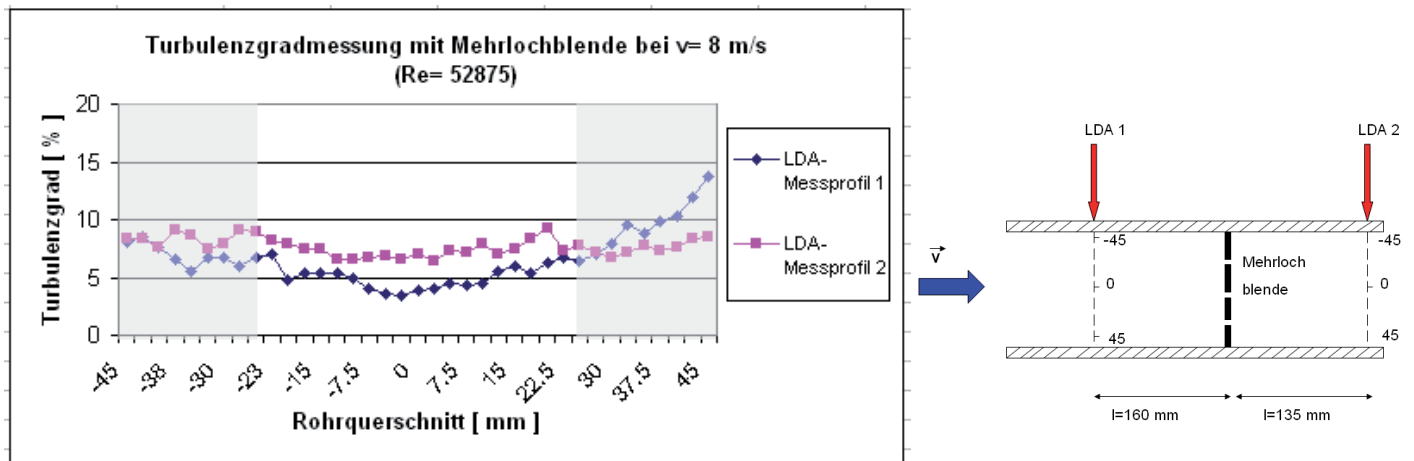


Abb. H.2 : Vergleich der erzeugten Turbulenzgrade an LDA- Messprofil und LDA- Messprofil 2 der Messungen mit Mehrlochblende bei $v=8$ m/s

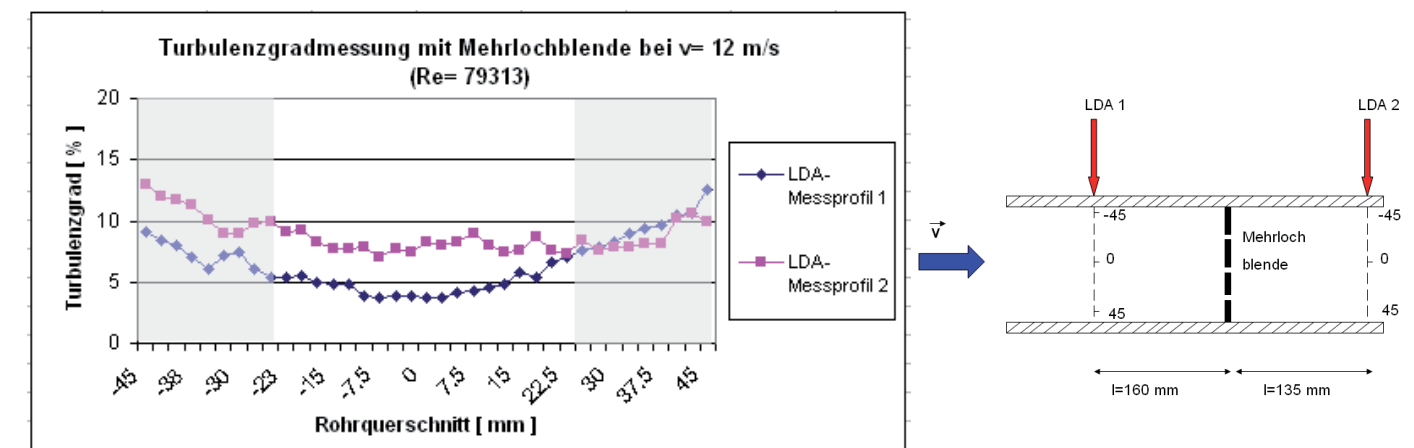


Abb. H.3 : Vergleich der erzeugten Turbulenzgrade an LDA- Messprofil 1 und LDA- Messprofil 2 der Messungen mit Mehrlochblende bei $v=12$ m/s



Für die strömungsmechanischen Messungen ist darauf hinzuweisen, nur die Mehrlochblende und der Turbulenzgenerator 1 untersucht werden in den drei Zusammenstellungen:

- Mehrlochblende
- Turbulenzgenerator 1
- Mehrlochblende und Turbulenzgenerator 1

Bei den akustischen Messungen kommen auch die Konfigurationen

- Einlochblende
- Einlochblende und Turbulenzgenerator 1
- Einlochblende und Turbulenzgenerator 2
- Mehrlochblende und Turbulenzgenerator 2

zum Einsatz.

Die akustische Untersuchung der beiden Turbulenzgeneratoren wird in der Diplomarbeit von Eike Grunau [20] beschrieben. Für diese Arbeit werden die dort aufgeführten Auswertungen und Erklärungen verwendet.

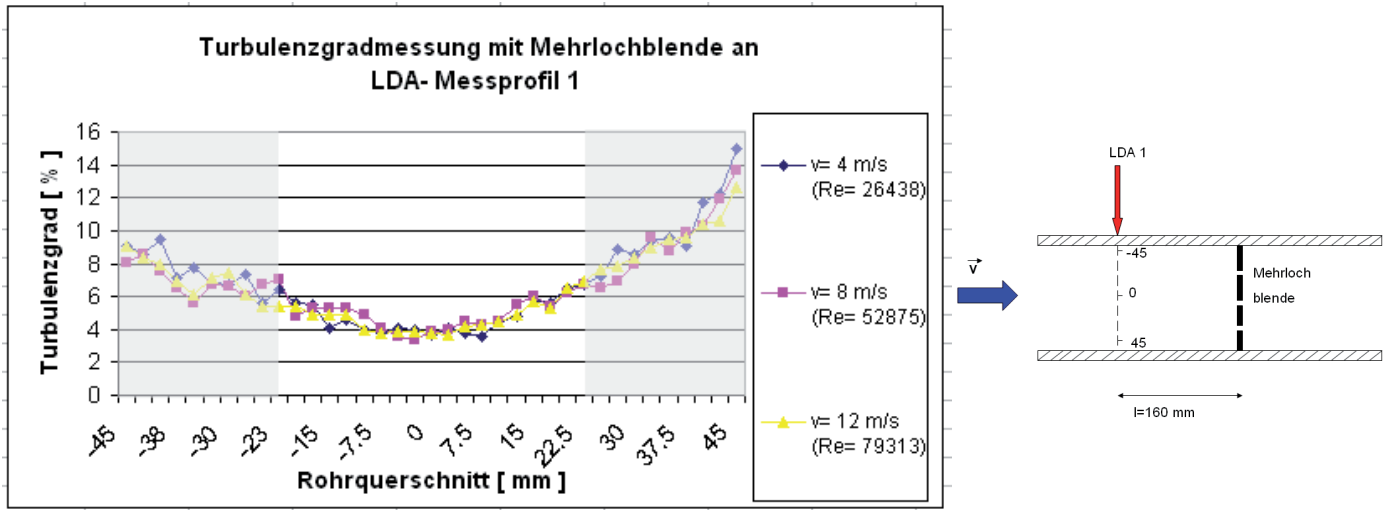


Abb. H.4 : Turbulenzgradprofile der Messungen mit Mehrlochblende an LDA- Messprofil 1 bei verschiedenen eingestellten Geschwindigkeiten

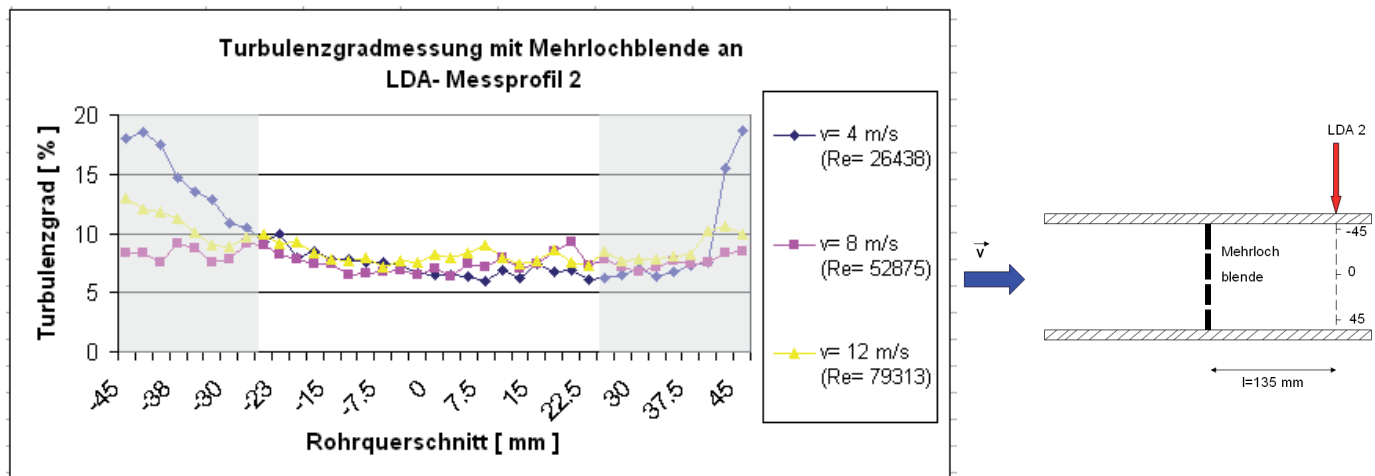


Abb. H.5 : Turbulenzgradprofile der Messungen mit Mehrlochblende an LDA- Messprofil 2 bei verschiedenen eingestellten Geschwindigkeiten

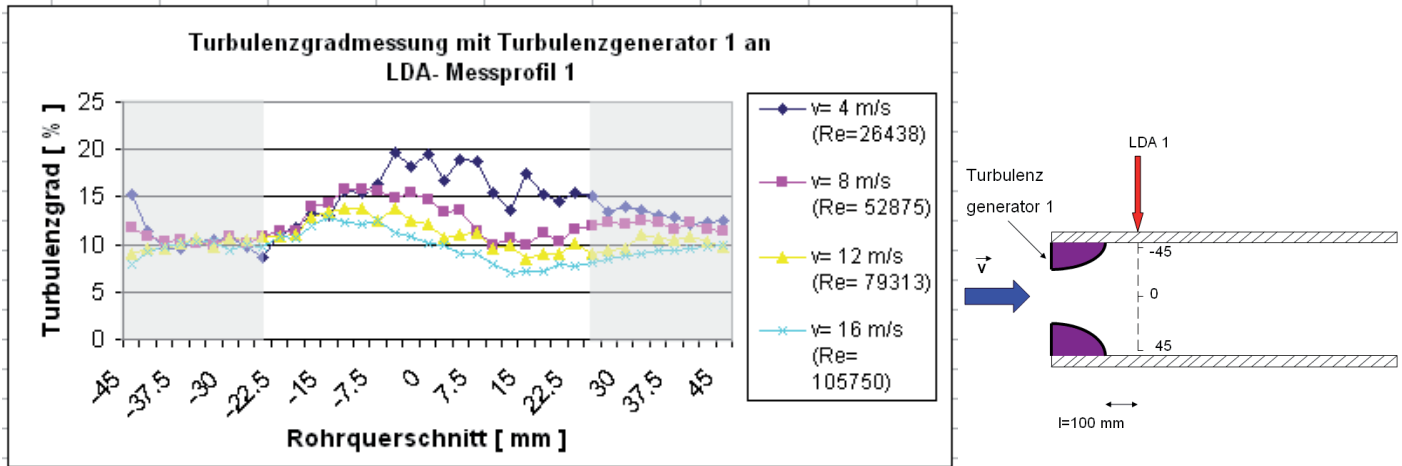


Abb. H.6 : Turbulenzgradprofile der Messungen mit Turbulenzgenerator 1 an LDA- Messprofil 1 bei verschiedenen eingestellten Geschwindigkeiten

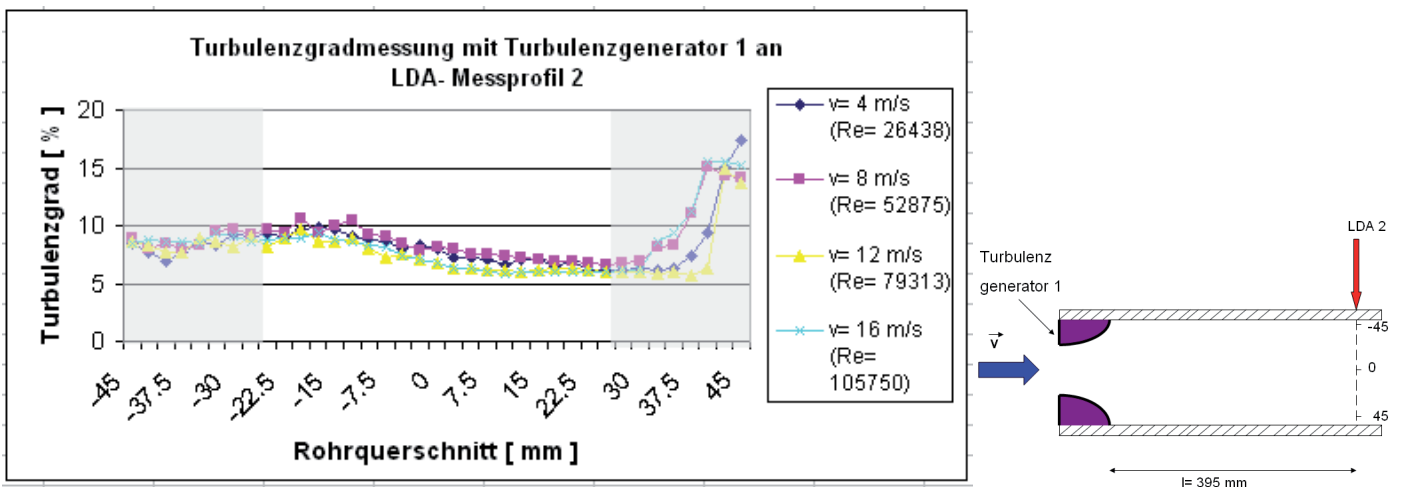


Abb. H.7 : Turbulenzgradprofile der Messungen mit Turbulenzgenerator 1 an LDA- Messprofil 2 bei verschiedenen eingestellten Geschwindigkeiten

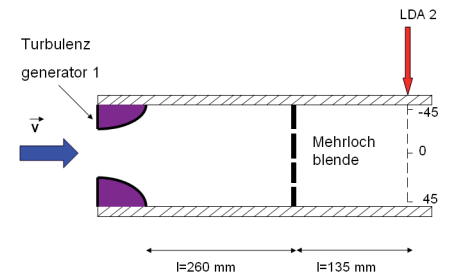
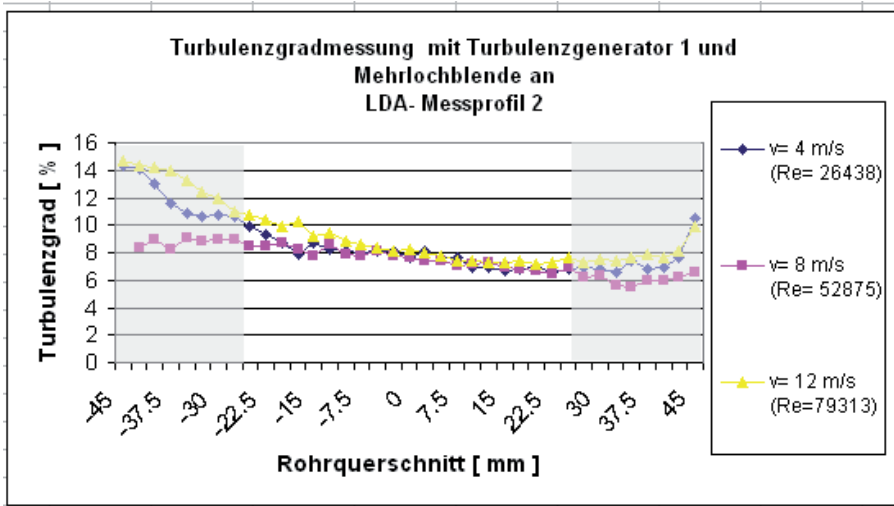
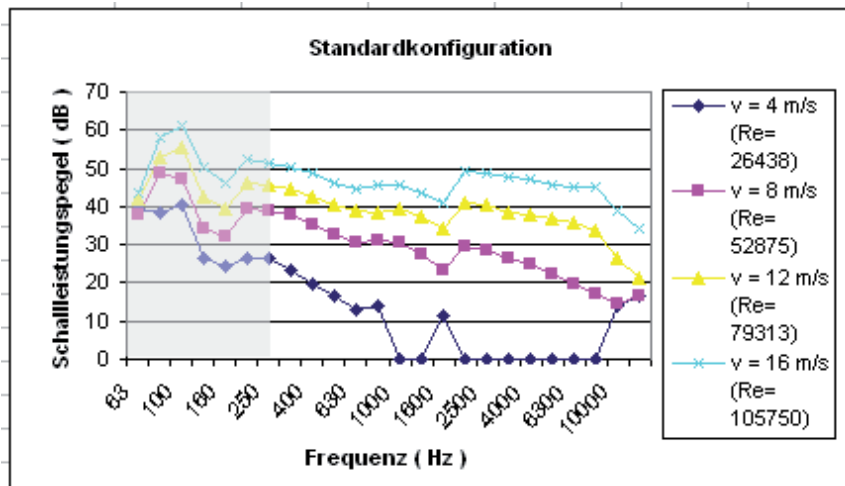


Abb. H.8 : Turbulenzgradprofile der Messungen mit Turbulenzgenerator 1 und Mehrlochblende an LDA-Messprofil 2 bei verschiedenen eingestellten Geschwindigkeiten

I.2 Akustische Messungen

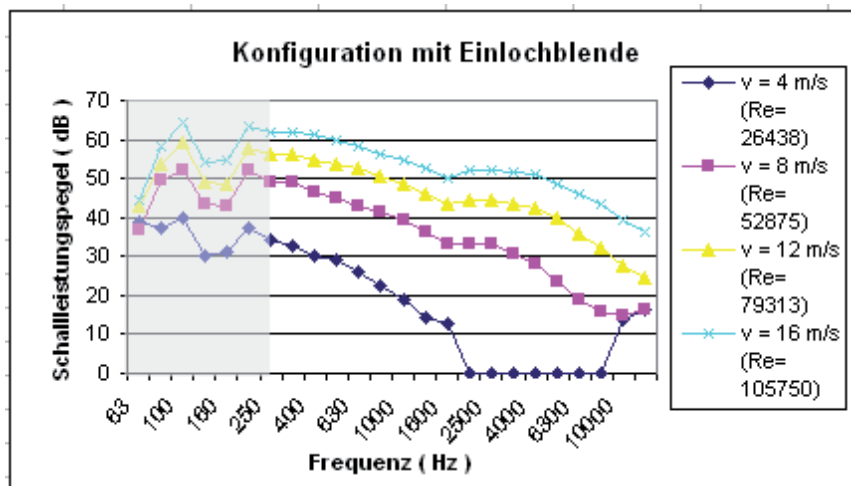


Konfig 1



Standardkonfiguration

Abb. I.1 Frequenzabhängige Schalleistungspegelkurven der Standardkonfiguration bei verschieden eingestellten Geschwindigkeiten

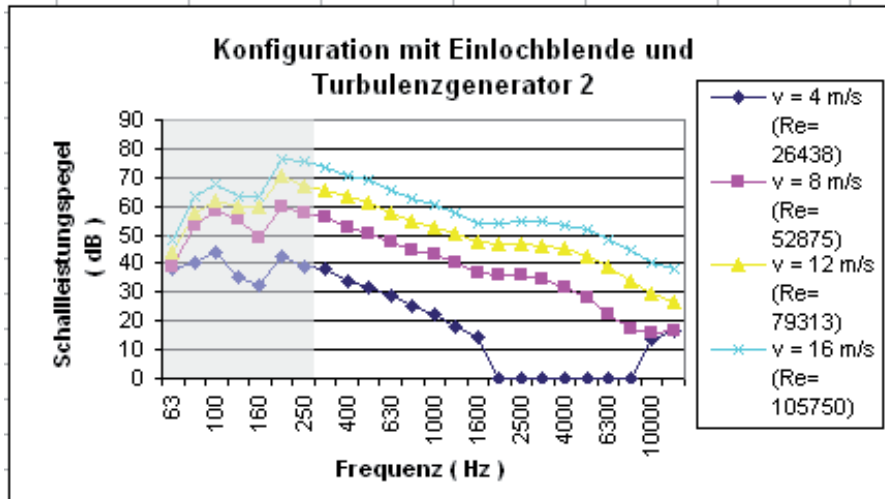


Konfig 2



Einlochblende

Abb. I.2 Frequenzabhängige Schalleistungspegelkurven der Konfiguration mit Einlochblende bei verschieden eingestellten Geschwindigkeiten

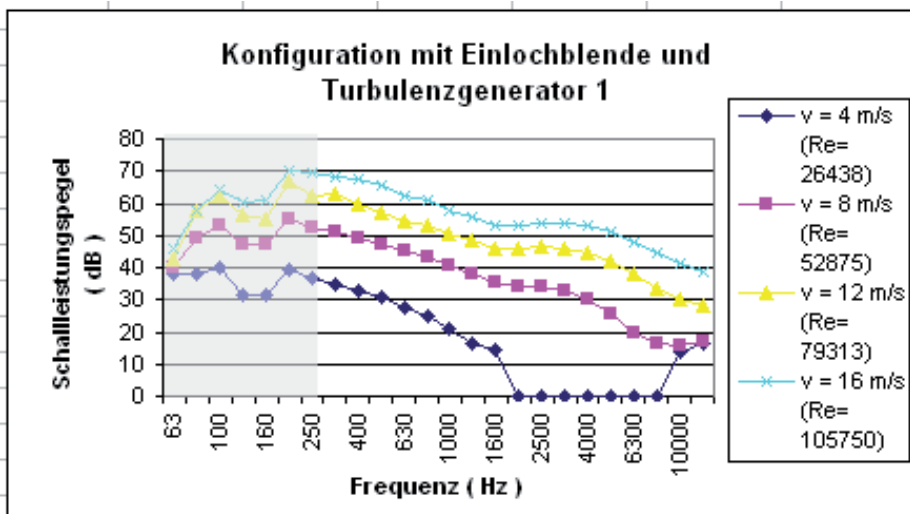


Konfig 3



Einlochblende + TG 2

Abb. 1.3 Frequenzabhängige Schalleistungspegelkurven der Konfiguration mit Einlochblende und Turbulenzgenerator 2 bei verschiedenen eingestellten Geschwindigkeiten

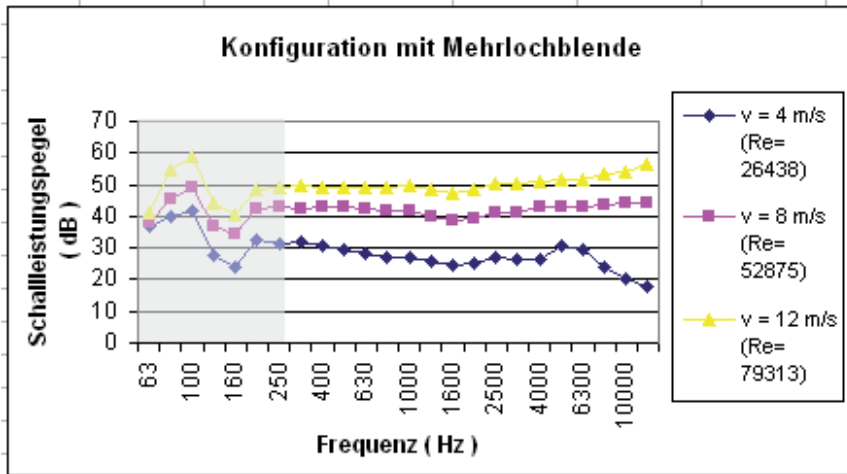


Konfig 4



Einlochblende + TG 1

Abb. 1.4 Frequenzabhängige Schalleistungspegelkurven der Konfiguration mit Einlochblende und Turbulenzgenerator 1 bei verschiedenen eingestellten Geschwindigkeiten

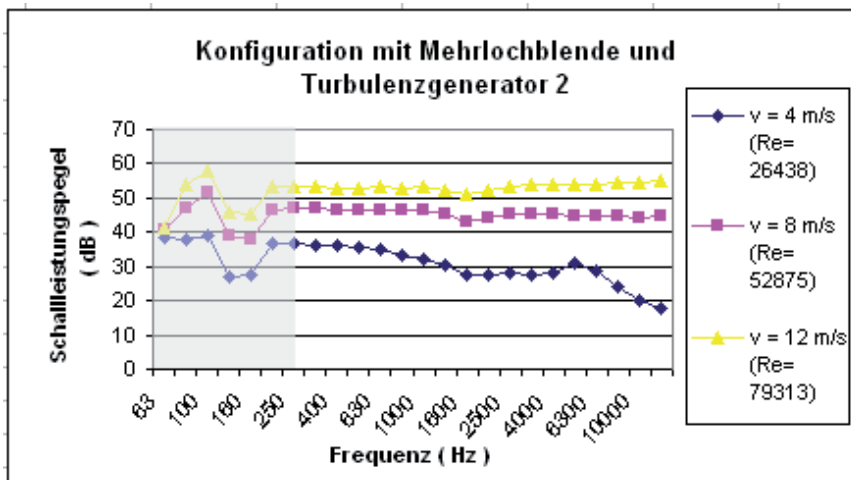


Konfig 5



Mehrlochblende

Abb. 1.5 Frequenzabhängige Schalleistungspegelkurven der Konfiguration mit Mehrlochblende bei verschieden eingestellten Geschwindigkeiten

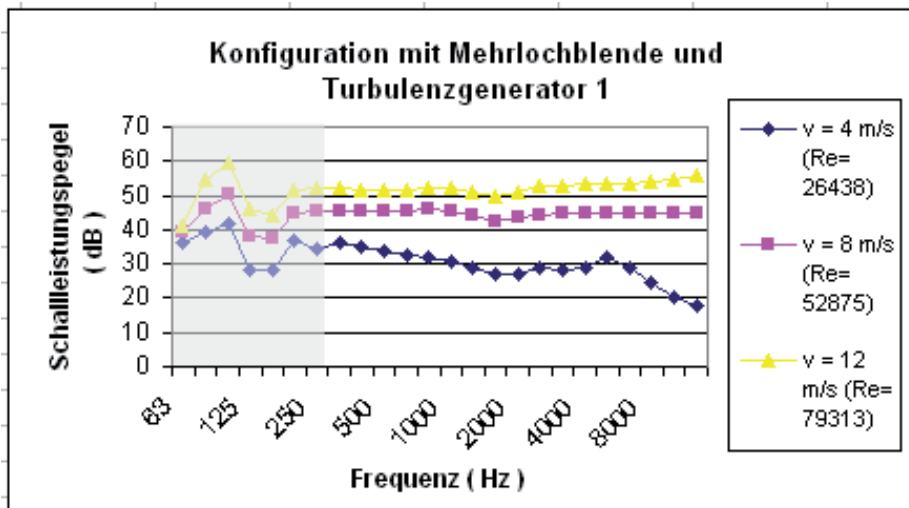


Konfig 6



Mehrlochblende + TG 2

Abb. 1.6 Frequenzabhängige Schalleistungspegelkurven der Konfiguration mit Mehrlochblende und Turbulenzgenerator 2 bei verschieden eingestellten Geschwindigkeiten



Konfig 7



Mehrlochblende + TG 1

Abb. 1.7 Frequenzabhängige Schalleistungspegelkurven der Konfiguration mit Mehrlochblende und Turbulenzgenerator 1 bei verschiedenen eingestellten Geschwindigkeiten



J.1 Wichtige Messparameter im Überblick

Mehrlochblende	3.968/7.937/11.905/15.873		3.968		7.937		11.905	
Geschwindigkeit [m/s]	3.968/7.937/11.905/15.873		3.968		7.937		11.905	
Konfiguration	Tu-Grad vor der Blende [%]	Tu-Grad hinter der Blende [%]	Gesamtschalleistungspegel [dBA]	Gesamtschalleistungspegel [dBA]	Gesamtschalleistungspegel [dBA]	Gesamtschalleistungspegel [dBA]	Gesamtschalleistungspegel [dBA]	Gesamtschalleistungspegel [dBA]
Standard	4.0-5.0	4.0-5.0	27	41.4	50.8			
Standard + MB	1.0-2.0	2.0-4.0	39.4	53.8	62.6			
Standard + TG1	10.0-15.0	6.0-8.0	27.2	42.2	50.8			
Standard + TG1 + MB	9.0-12.0	2.0-4.0	42	56.6	64.4			

3.968	7.937	11.905	3.968	7.937	11.905
Diff.Druck [Pa]	Diff.Druck [Pa]	Diff.Druck [Pa]	Volumenstrom [l/s]	Volumenstrom [l/s]	Volumenstrom [l/s]
			30.55	63.49	93.02
100.8	390	852	31.83	62.62	94.44
41.3	180.9	391.918	30.16	62.14	92.78
97.32	383	851	30.95	62.3	93.81

Mehrlochblende	Tu-Energie vor der Blende [m ² /s ²]	Tu-Energie vor der Blende [m ² /s ²]	Tu-Energie vor der Blende [m ² /s ²]	Tu-Energie vor der Blende [m ² /s ²]				
Geschwindigkeit [m/s]	3.968		7.937		11.905		15.873	
LDA-Messprofil 1								
Konfiguration								
Standard	0.058252844	0.229773844	0.507806329	0.912347297				
Standard + MB	0.055307684	0.237754461	0.493463081	-				
Standard + TG1	0.599377195	1.594540478	2.777983396	3.784781834				
Standard + TG1 + MB	0.599377481	1.443551525	2.486282487	-				

Abb. J.1 : Messparameter der Messungen mit Mehrlochblende, mit Turbulenzgenerator 1 und der Standardkonfiguration im Vergleich



Einlochblende					
Geschwindigkeit [m/s]			3.968	7.937	11.905
Konfiguration	Tu-Grad vor der Blende [%]	Tu-Grad hinter der Blende [%]	Gesamtschallleistungspegel [dBA]	Gesamtschallleistungspegel [dBA]	Gesamtschallleistungspegel [dBA]
Standard	-	-	27	41.4	50.8
Standard + EB	-	-	34.4	51	59.7
Standard + TG1	-	-	27.2	42.2	50.8
Standard + TG1 + EB	-	-	36.3	53.3	63.9

3.968	7.937	11.905	3.968	7.937	11.905	15.873
Diff.Druck [Pa]	Diff.Druck [Pa]	Diff.Druck [Pa]	Volumenstrom [l/s]	Volumenstrom [l/s]	Volumenstrom [l/s]	Volumenstrom [l/s]
-	-	-	30.55	63.49	93.02	-
50.6	203.2	427.3	31.67	62.62	93.47	599.37
41.3	180.9	391.918	30.16	62.14	92.78	-
50.3	197	397	30.63	62.22	93.17	659.37

Einlochblende	Tu-Energie vor der Blende [m ² /s ²]	Tu-Energie vor der Blende [m ² /s ²]	Tu-Energie vor der Blende [m ² /s ²]	Tu-Energie vor der Blende [m ² /s ²]
Geschwindigkeit [m/s]	3.968	7.937	11.905	15.873
LDA-Messprofil 2				
Konfiguration				
Standard	0.064554018	0.24786886	0.560753775	0.961018968
Standard + MB	0.123787918	0.51552275	1.390429581	-
Standard + TG1	0.166025152	0.607851603	1.129663163	1.985341735
Standard + TG1 + MB	0.138167574	0.576009564	1.500484119	-

Abb. J.2 : Messparameter der Messungen mit Einlochblende, mit Turbulenzgenerator 1 und der Standardkonfiguration im Vergleich

J.2 Kennliniendarstellungen

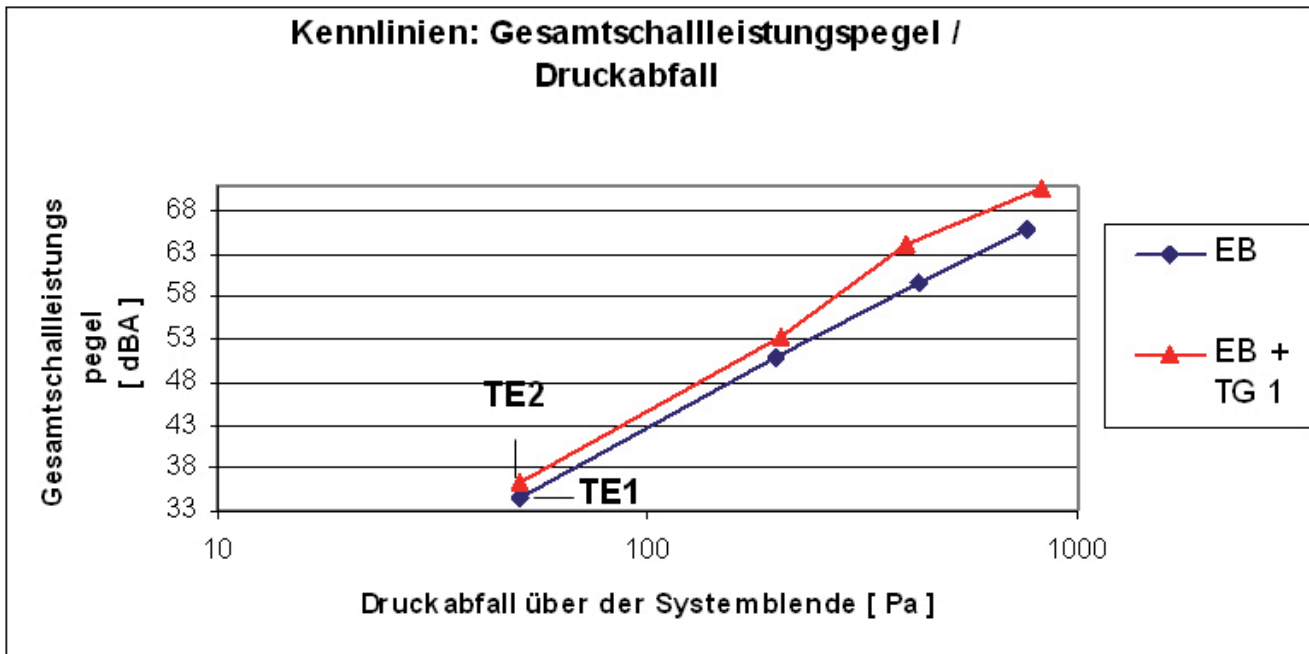


Abb. J.3 : Kennlinienvergleich (Gesamtschalleistungspegel/ Druckabfall) der Messungen mit Einlochblende und der Kombination aus Einlochblende und Turbulenzgenerator 1: Steigender Gesamtschalleistungspegel bei nahezu konstantem Druckabfall und steigender Turbulenzenergie

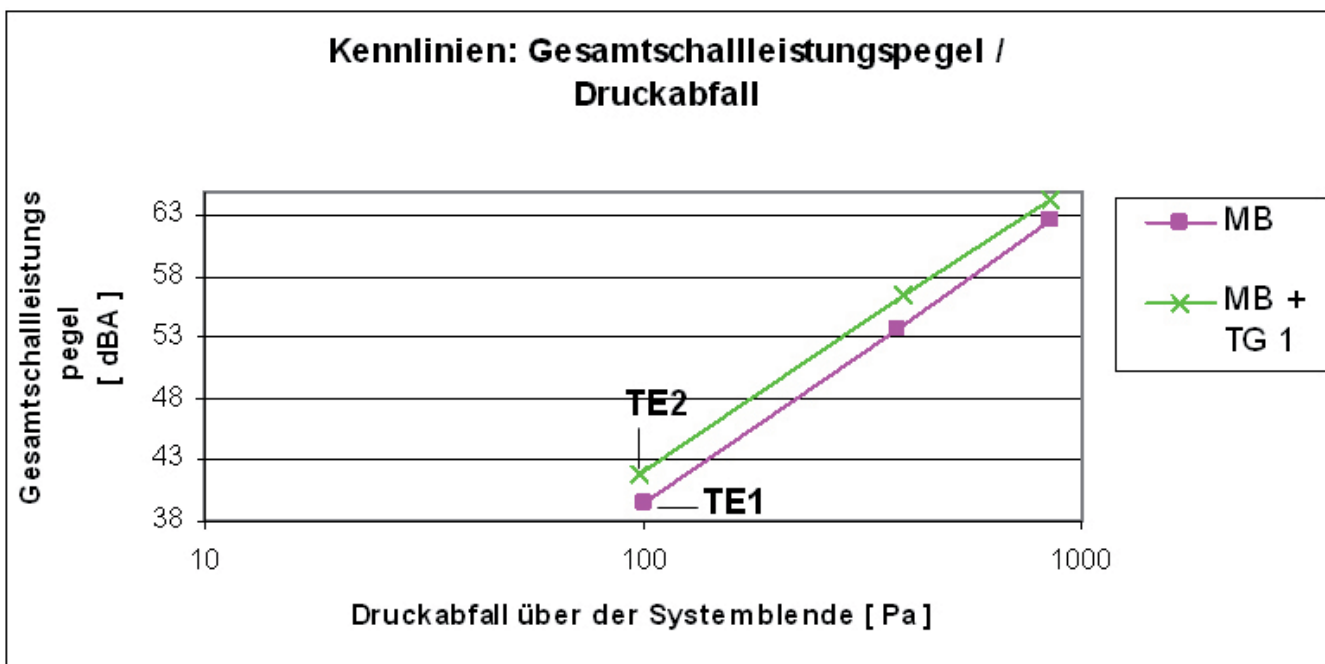


Abb. J.4 : Kennlinienvergleich (Gesamtschalleistungspegel/ Druckabfall) der Messungen mit Mehrlochblende und der Kombination aus Mehrlochblende und Turbulenzgenerator 1: Steigender Gesamtschalleistungspegel bei nahezu konstantem Druckabfall und steigender Turbulenzenergie

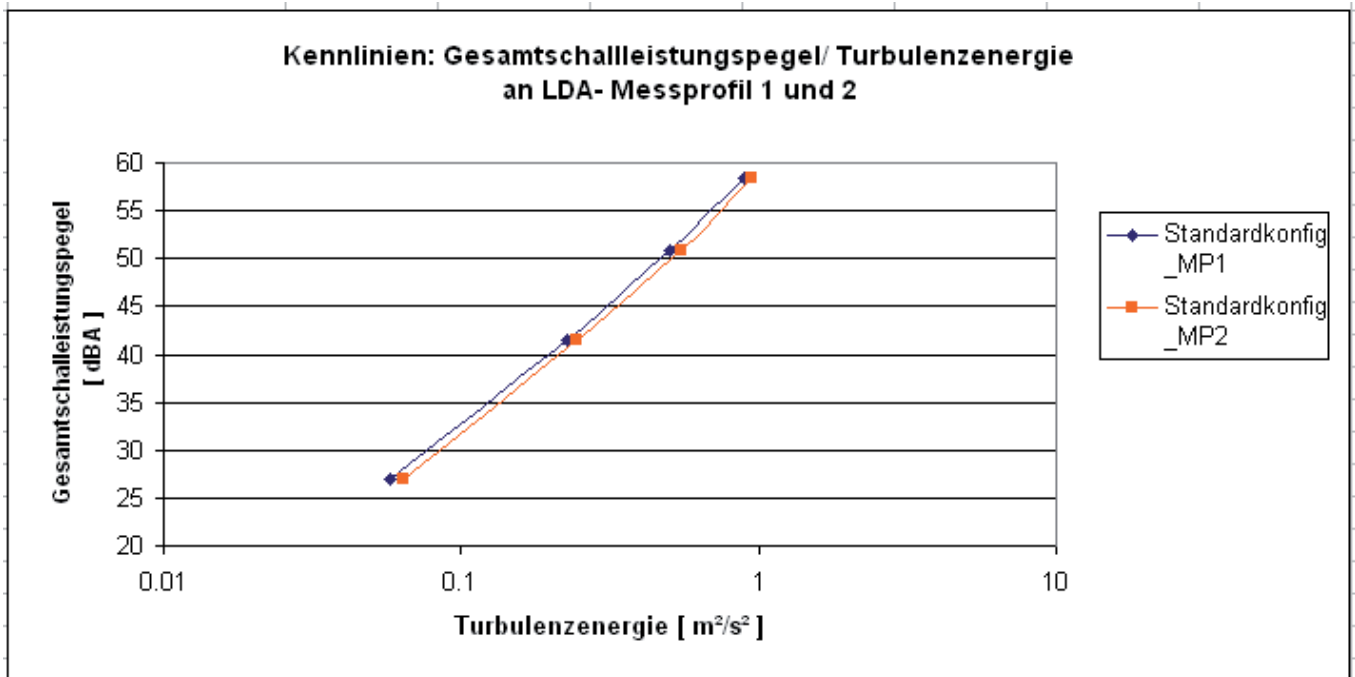


Abb. J.5 : Kennlinienvergleich (Gesamtschalleistungspegel/ Turbulenzenergie) der Standardkonfiguration an LDA- Messprofil 1 und 2 : Steigender Gesamtschalleistungspegel bei steigender Turbulenzenergie (TE)

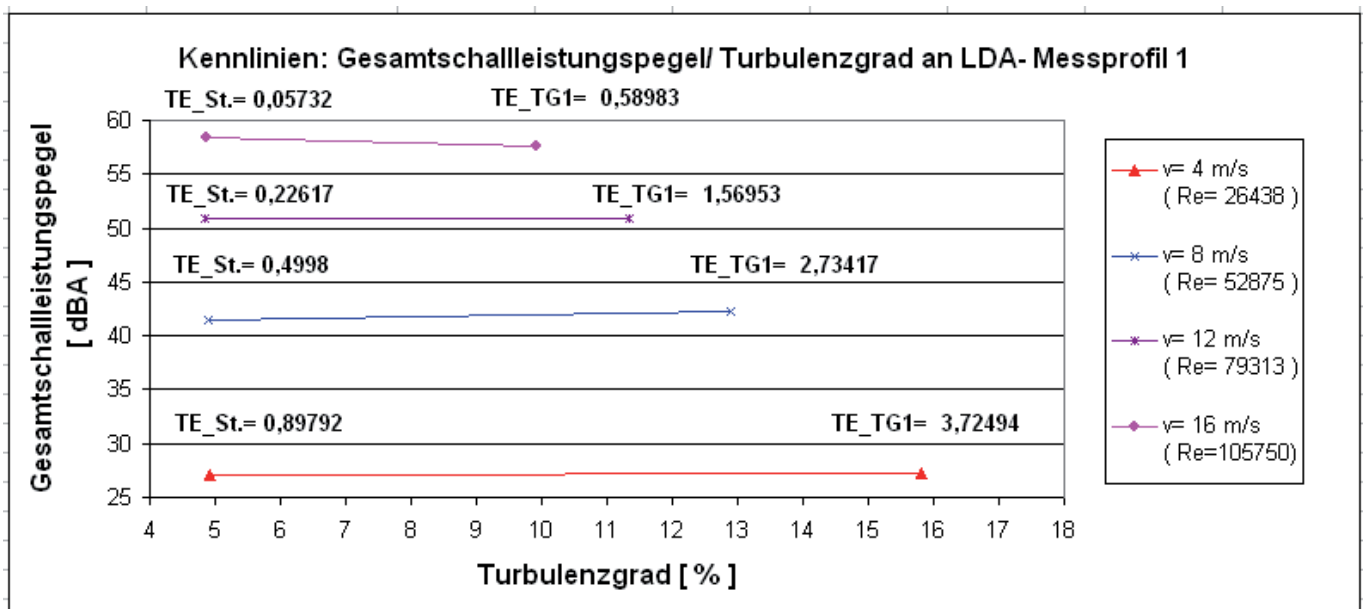


Abb. J.6 : Kennlinienvergleich (Gesamtschalleistungspegel/ Turbulenzgrad) an LDA- Messprofil 1 zwischen Standardkonfiguration und der Messung mit eingesetztem Turbulenzgenerator : Nahezu gleichbleibender Gesamtschalleistungspegel bei steigendem Turbulenzgrad

K.1 Vorteile der Hitzdrahtmesstechnik

- Geschwindigkeits und Turbulenzmessungen möglich von wenigen cm/s bis in den Überschallbereich
- hohe zeitliche Auflösung (bis zu einigen hundert kHz)
- hohe räumliche Auflösung (bis zu 1mm oder weniger)
- gleichzeitige Messung aller drei Komponenten
- liefert eine sofortige Geschwindigkeitsinformation
- kleine und handliche Messgeräte
- geeignet für 1D-, 2D- und 3D- Messungen
- sehr hohe Frequenzauflösung (für Spektralmessungen) in den meisten Fluiden

K.2 Nachteile der Hitzdrahtmesstechnik

- Durchbrennen des Drahtes (bei CCA)
- hohe Empfindlichkeit des Sensors gegenüber Temperatur, Feuchtigkeit, Schmutz usw.
- nicht-lineares Verhalten, d.h. eine Kalibrierung ist erforderlich
- rückfließende bzw. entgegengesetzte Strömungen verfälschen Ergebnis
- keine gleichzeitige Messung von Strömungslärm
(unterschiedliche Sondenhalter können Lärm erzeugen)
- keine berührungslose Messtechnik

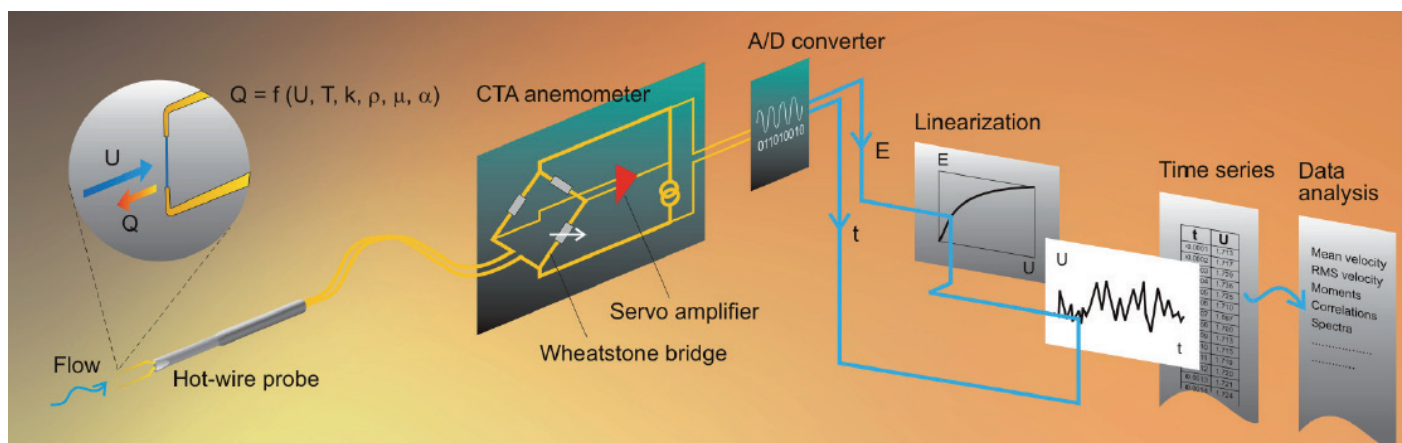


Abb. K.1 : Ablauf der Hitzdrahtmesstechnik am Beispiel eines Konstant- Temperatur- Anemometers [22]



K.3 Prinzip der Particle Imaging Velocimetry (PIV)

Das PIV-Prinzip beruht auf der mit Hilfe von Kameras schnellen Erfassung von gesamten Geschwindigkeitsfeldern, welche sofortige Ergebnisse der Geschwindigkeitsvektoren im Kreuzungsbereich der Strömung liefern. Dieser Bereich ergibt sich durch eine Kreuzung mit aus einer Laserlicht aufgespannten Ebene und der senkrecht zur Ebene strömenden Fluidteilchen.

Die zu untersuchende Strömung wird mit Tracerpartikeln (Seedings) angereichert. Die Partikel müssen dabei so klein im Durchmesser gewählt werden, dass sie der Strömung problemlos folgen können und nicht zu groß, dass sie die nachher zu bestimmenden Parameter weder strömungstechnisch noch akustisch beeinflussen.

Die ideale Größe der Partikel liegt zwischen 1 bis 10 μm . Das gewählte Material ist entweder fest (Pulver) oder flüssig (Tröpfchen). In dieser Arbeit wird ein flüssiges Material gewählt.

K.4 Bestandteile des PIV- Systems

- Flüssigkeit, um die Tracerpartikel zu generieren
- ein Laser
- Optik für den Lichtschnitt und einen Führungsarm für das Licht
- 2 Kameras mit CCD- Chip
- Traversiersystem mit Kalibrierungswerkzeug
- PIV- Prozessor mit 2 Eingängen für die Kameras
- PIV- Software
- PC

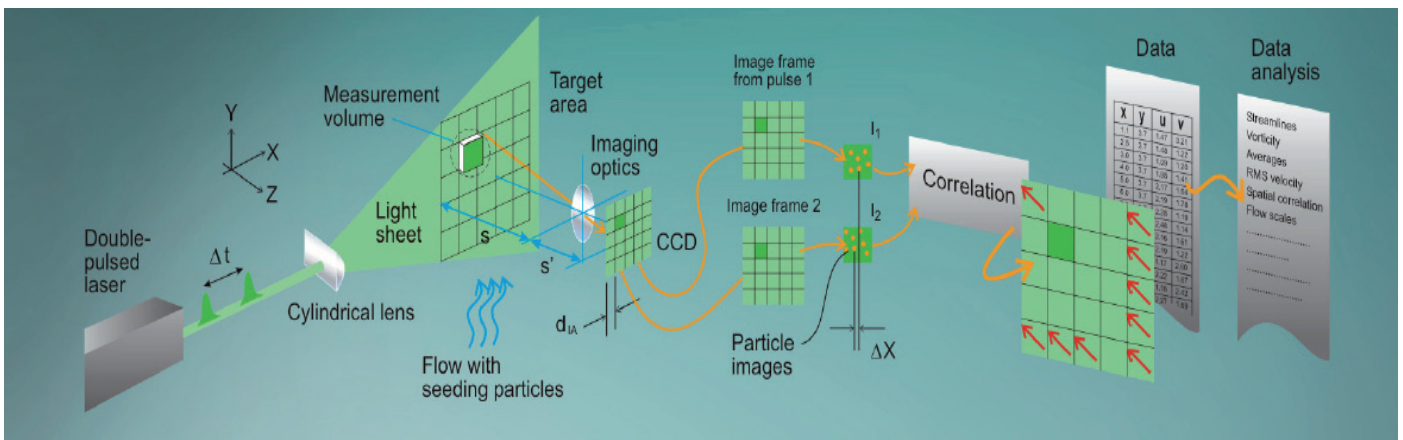


Abb. K.2 : Ablauf der Particle Imaging Velocimetry [22]

K.5 Aufgabe der Kameras bei der PIV

Mit 3D-PIV wird die Funktion des menschlichen Auges nachgeahmt: Die Stereo- Sichtweise. Unsere Augen erfassen zwei verschiedene Bilder der Umgebung und das Gehirn verknüpft beide, indem es sie in 3D interpretiert. Bei der Messtechnik übernehmen zwei Kameras die Funktion des Auges.

Die PIV ermittelt eher Verschiebungen als reale Geschwindigkeiten.

Eine Kamera wird rechts, die andere links positioniert und zwar jeweils um 45° zur Mittelachse geneigt. Somit ergibt sich zwischen beiden Kameras ein rechter Winkel [s. Abb K.3].

Bei Bedarf sind auch kleinere Winkel möglich, das führt jedoch zu Ungenauigkeiten.

Bei der 90° - Anordnung werden die präzisesten Ergebnisse erzielt.

Folgender Punkt ist zu beachten, wenn der Lichtschnitt aus einem Winkel gesehen wird:

Die Rückseite der Kamera (z. B. der CCD- Chip) muss geneigt werden, um das gesamte Kameraaufnahmefeld sorgfältig zu fokussieren.

Die Abbildung, die Linse und die Objektebene müssen sich alle entlang einer gemeinsamen Linie treffen, damit die Kameraabbildungen präzise sind.

Man spricht hier auch von der sogenannten Scheimpflug- Bedingung [s. Abb. K.4]

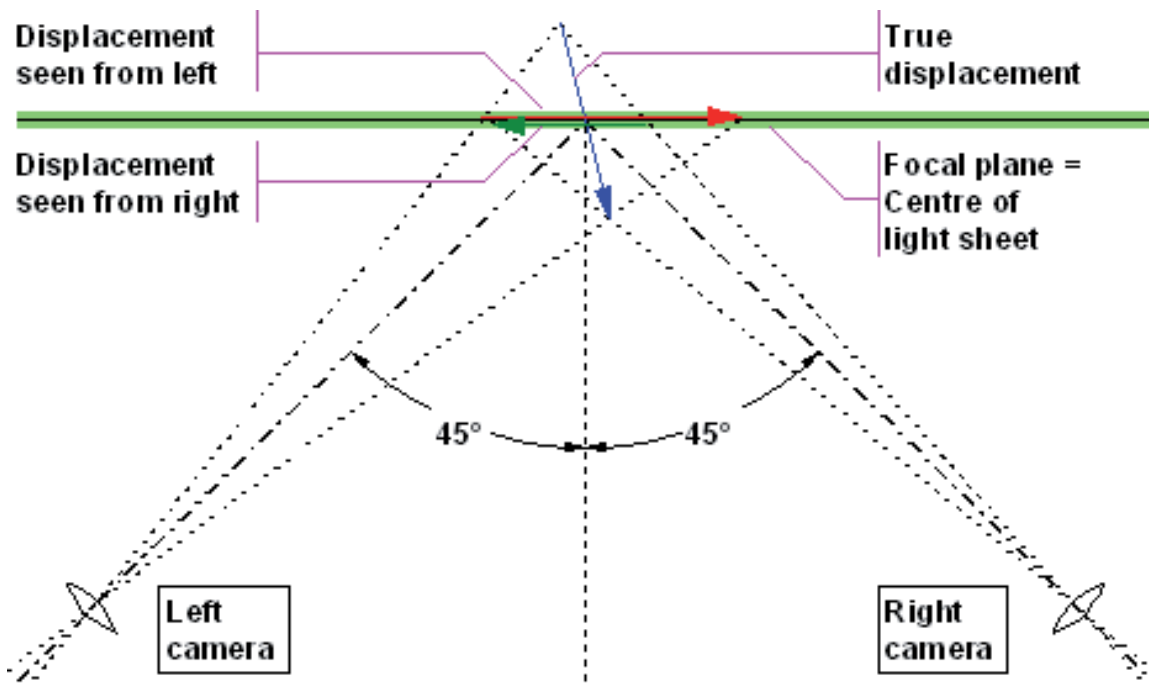


Abb. K.3 : Prinzip der Stereosichtweise [22]

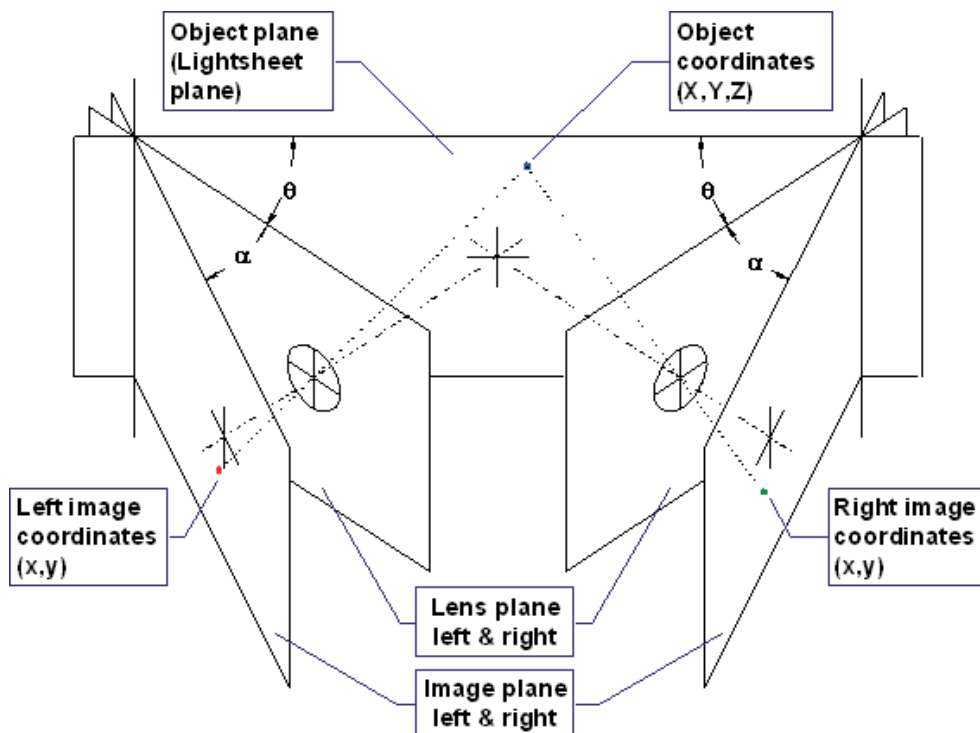


Abb. K.4 : Einstellung der beiden Kameras - Scheimpflugbedingung [22]

K.6 Ablauf der PIV

Von den beiden Kameras werden zwar nur 2 Geschwindigkeitskomponenten erfaßt, aber durch Ausnutzen der stereoskopischen Annäherung, erhält man umgehend von jedem Vektor 3 Verschiebungswerte in allen 3 Achsen.

Die Daten werden festgehalten, indem die Geschwindigkeit der Partikel zwischen zwei Lichtpulsen gemessen wird, welche von den Kameras zu zwei aufeinanderfolgenden Zeitpunkten ausgesendet werden.

Die Geschwindigkeit lässt sich ermitteln aus

$$\bar{v} = \frac{\overline{\Delta x}}{\Delta t}$$

Mit der Kamera ist es möglich, jeden Lichtpuls in getrennten Bildrahmen einzufangen. Durch die Aufzeichnung beider Lichtpulse in demselben Bildrahmen kann die Partikelbewegung nachverfolgt werden und einem damit ein guter Überblick über die Struktur der Strömung gegeben werden.

Sobald die beiden Lichtpulse erfolgt und die Aufnahmen gespeichert sind, werden die Abbildungen in kleine Untersektionen aufgeteilt, welche man auch als „Interrogation Areas“ (IA) bezeichnet, also Abfrage- oder zu untersuchende Bereiche.

Die Geschwindigkeitsvektoren erhält man aus den Untersektionen der Zielfläche (Lichtschnitt), welche die mit Partikeln angereicherte Strömung kreuzt.

Die örtliche Verschiebung der Partikel zwischen den beiden Aufnahmezeitpunkten der Kameras kann rechnerisch bestimmt und zur zeitlich hochaufgelösten Ermittlung der Geschwindigkeitsvektoren im Lichtschnitt verwendet werden, da die Partikel in der Zielfläche mit dem Lichtschnitt beleuchtet werden und ihr zurückgelegter Weg so nachvollziehbar ist.

Durch eine pixelweise Kreuzkorrelation jeder kleinen Untersektion I_1 (für Kamera 1) und I_2 (für Kamera 2) wird ein Signalmaximum erzeugt, welches ein Maß für die durchschnittliche Partikelverschiebung $\overline{\Delta x}$ liefert. Durch Interpolation der Sub-Pixel erhält man ein akkurates Ergebnis für die Verschiebung und damit auch für die durchschnittliche Geschwindigkeit \bar{v} .

Durch Korrelation aller Subsektionen von den beiden CCD –Chips der Kameras wird schließlich das Bild erzeugt, das die Geschwindigkeitsvektoren enthält.

Die Kreuzkorrelation einer Untersektion (IA) lässt sich mit

$$C(s) = \iint_{IA} I_1(X) \cdot I_2(X - s) \cdot dX$$

bestimmen [s. Abb. K.6, K.7].

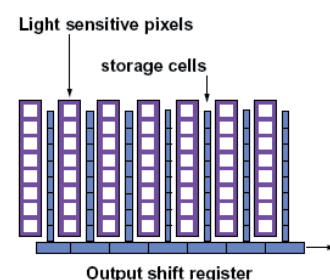


Abb. K.5 : Kreuzkorrelation einer Kamera bei der PIV [22]

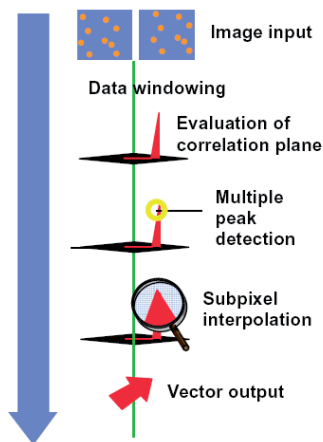


Abb. K.6 : Ablauf der Kreuzkorrelation bei der PIV [22]

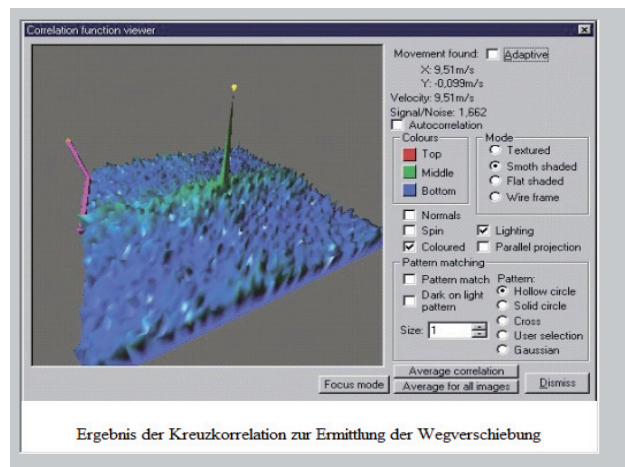


Abb. K.7 : Ergebnis der Kreuzkorrelation am PC [22]

K.7 Auswertung der Daten und Überführung in 3D

Um die 2D- in 3D-Daten zu überführen, greift man auf ein numerisches Modell zurück, das beschreibt wie räumliche Objekte auf einem 2D- Bild dargestellt werden von jeder einzelnen Kamera. Die Parameter für dieses numerische Modell erhält man durch Kalibrierung der Kamera. Auf dem CCD- Chip jeder Kamera werden die Abbildungen festgehalten.

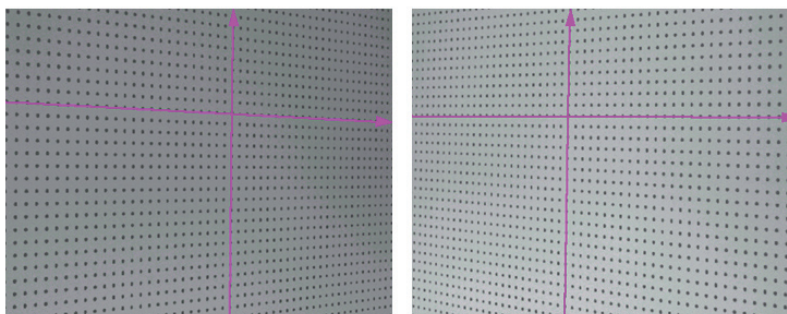


Abb. K.8 : Aufnahme der beiden kalibrierten Kameras [22]

Die Pinhole- Kamera macht sich die geometrische Optik zunutze und bietet die Grundlage für die lineare Transformation.

Zur Vereinfachung wird die Kalibrierung der Kameras experimentell durchgeführt.

Dazu werden Kalibrierungsfenster aufgenommen, die Kalibrierungsmarkierungen wie z. B. Punkte an bekannten Positionen x , y , z enthalten [s. Abb K.8].

Durch einen direkten Vergleich der bekannten Positionen der Kalibrierungsmarkierungen und der Positionen auf den zugehörigen Abbildungen von jeweils jeder Kamera können die Parameter für das numerische Modell geschätzt werden.

Die trapezförmigen Lichtausschnitte beider Kameras überlappen sich selbst bei größter Sorgfalt bei der Einstellung nie vollständig.

Eine 3D- Rekonstruktion der Daten ist somit nur an den Stellen möglich, an denen Informationen von beiden Kameras verfügbar sind.

Um eine gute zeitliche Auflösung zu erzielen, wird im Überlappungsbereich ein Rechteckauschnitt für die Bestimmung der Geschwindigkeitsvektoren gewählt.

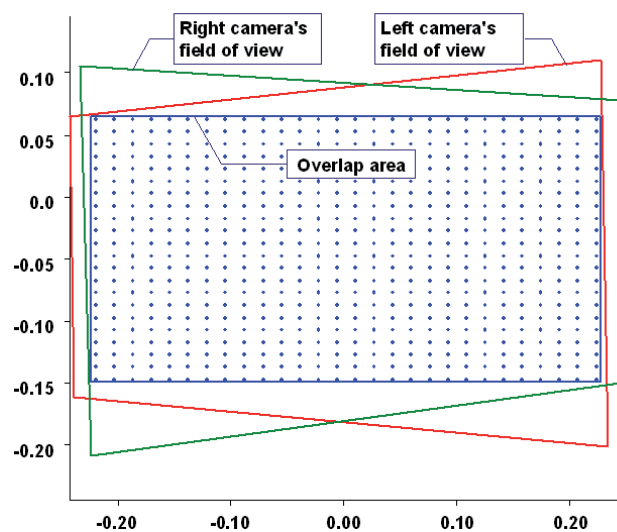


Abb. K.9 : Überlappungsbereich der beiden Kameraaufnahmen [22]

Die 2D- Abbildungen, die durch vorherige Aufnahmen der Kameras zwischen den zwei Lichtpulsen entstanden sind, werden nun mit Hilfe des rechteckigen Untersuchungsausschnittes in 3D umgesetzt. Dies wird erreicht, indem man die Punkte des Rechteckquerschnitts jeweils mit den Pixel- Punkten der Aufnahme der linken und der rechten Kamera übereinanderlegt und die 2D-Vektoren neu abschätzt [s. Abb. K.9].

Die exakte 3D- Verschiebung löst man durch Aufstellen von 4 Gleichungen mit 3 Unbekannten und der Least-Squares-Methode.

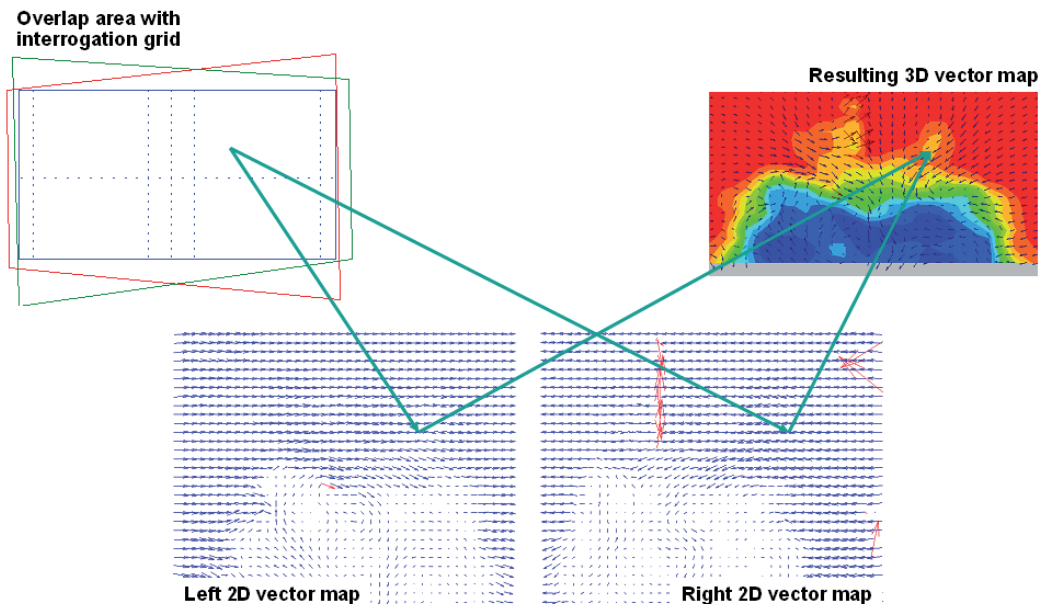


Abb. K.10 : 3D- Datenrekonstruktion [22]

Um ausreichend zufriedenstellende Statistiken aufzustellen wie z. B. mittlere 3D- Geschwindigkeiten, RMS –Werte und Kreuzkorrelations- Koeffizienten, wird eine große Anzahl an Vektorabbildungen benötigt.

Durch die Verwendung von modernen Digitalkameras und entsprechender Computer- Hardware ist die Darstellung der Geschwindigkeitsfelder in Echtzeit möglich.

K.8 Zeitliche Auflösung und dynamischer Bereich

Die infinitesimale Seitenlänge d_{IA} des zu untersuchenden Bereichs IA und die Bildvergrößerung s'/s werden gegenüber der Größe der Strömungsstruktur, die ausgewertet werden soll, ausgewogen.

Dies kann man z.B. mit kleinen Geschwindigkeitsgradienten innerhalb des Sub-Bereichs ausdrücken.

$$\frac{\frac{s'}{s} \cdot |v_{\max} - v_{\min}|_{IA} \cdot \Delta t}{d_{IA}} < 5\%$$

Die größtmögliche messbare Geschwindigkeit wird begrenzt durch die Partikel, die aus dem Sub-Bereich hinauswandern in der Zeit Δt . Dadurch entsteht ein Datenverlust bei der Korrelation beider Kamerabilder und somit auch ein Datenverlust bei der Geschwindigkeit.

Als Daumenwert wird ein Wert angegeben von

$$\frac{\frac{s'}{s} \cdot v \cdot \Delta t}{d_{IA}} 25\%$$

Wenn die Größe des Sub-Bereichs, die Einstellung des Bildes und die Dicke des Lichtschnitts bekannt sind, kann das Messvolumen errechnet werden.

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial X} - \frac{\partial u}{\partial Y}$$

K.9 Zusammenfassung der Durchführungsschritte beim PIV- Experiment

- Aufnahme der Kalibrierungsfenster in der gewünschten Position
- parallele Ausrichtung des Lichtschnitts zum Kalibrierungsziel
- Aufnahme der Kalibrierungsfenster mit beiden Kameras
- simultane Aufzeichnung von 2D-Vektor-Bildern mit beiden Kameras
- Kalibrierungsfenster und 2D-Vektor-Bilder in die PIV- Software einlesen
- Kamerakalibrierung vornehmen mit Hilfe der Kalibrierungsfenster
- 3D- Vektoren berechnen mit Hilfe der zwei 2D-Vektor-Bilder und der Kamerakalibrierung

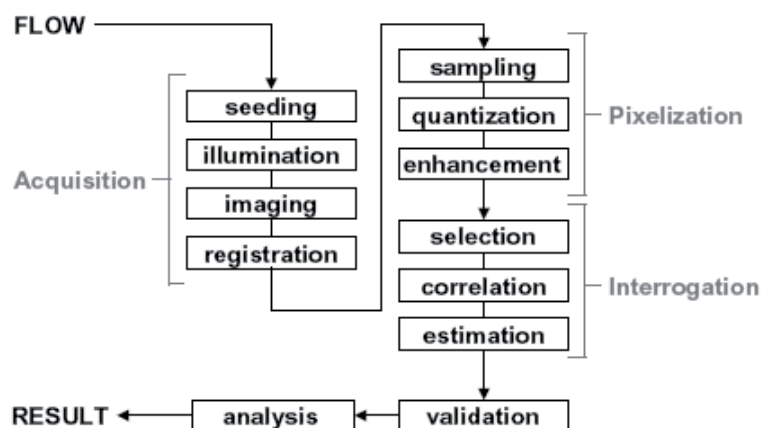


Abb. K.11 : Übersichtsdiagramm der einzelnen Schritte bei der PIV [22]



K.10 Vorteile der PIV

- berührungslose Messtechnik
- Geschwindigkeitsmessung kleinster Partikel möglich
- deckt einen Geschwindigkeitsbereich von 0 m/s bis zum Überschallbereich ab
- liefert eine sofortige Geschwindigkeitsinformation
- schnelle und sehr präzise Ergebnisse
- Messungen im kHz- Bereich
- mit den Sequenzen der Geschwindigkeitsvektor-Abbildung sind Statistiken, zeitliche Korrelationen und andere wichtige Daten verfügbar

K.11 Nachteile der PIV

- Kalibrierung erforderlich → zeitintensiv
- komplexe Installation
- Messungengenauigkeiten hängen stark von der Kalibrierung ab
- hohe Kosten
- nur Flächendarstellung der Geschwindigkeitsvektoren möglich (keine punktuellen Messungen)
- nicht geeignet für Messungen im Überschallbereich

L.1 Bestandteile des LDA- Systems

- ein Laser
- Optiken zur Übertragung und zum Empfang
- Strahlenteiler (Bragg Zelle)
- Photodetektor
- Signalprozessor
- Analyse-Software für die Datenauswertung
- Flüssigkeit, um die Partikel zu generieren
- Verstärker
- PC
- Traversiersystem
- Partikelgenerator [s. Abb. L.1]



Abb. L.1 : Partikelgenerator [39]

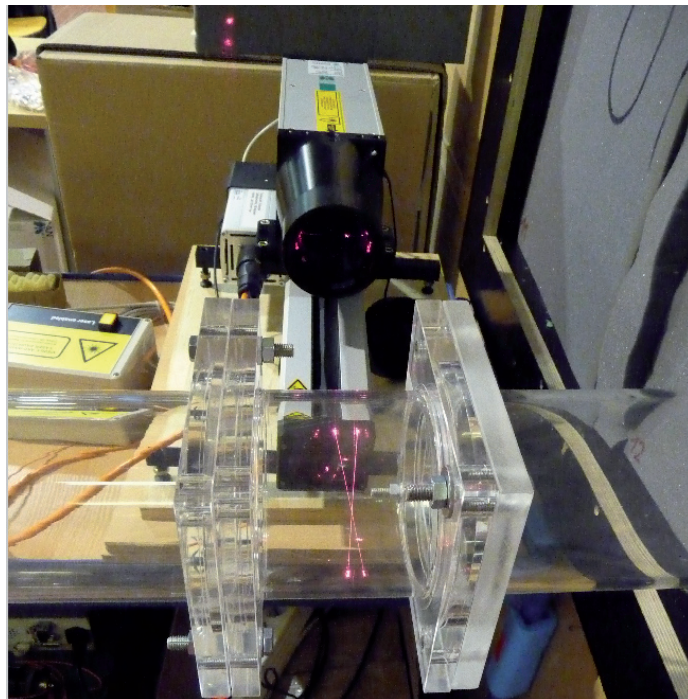


Abb. L.2 : LDA- System in Betrieb

L.2 Messprinzip der LDA

Die LDA basiert auf der Anwendung des optischen Doppler-Effektes.

Um die Luftströmungsgeschwindigkeit messen zu können, müssen lichtreflektierende Partikel in der Strömung mitgeführt werden, an denen eine Dopplerverschiebung messbar wird.

Die Partikel fungieren gleichzeitig als Sender und als Empfänger von Laserlicht.

Der Doppler-Effekt lässt sich mit einer Frequenzverschiebung begründen, welche zustande kommt durch die Relativbewegung der Partikel zur Lichtquelle.

Es kann zu positiven oder negativen Frequenzverschiebungen kommen, abhängig davon, ob sich Sender (Partikel) und Empfänger (Photodetektor) aufeinander zu- oder voneinander wegbewegen.

Die Doppler- Frequenzverschiebung lässt sich bestimmen mit

$$\Delta f_E = f_E - f_0 = \frac{f_0}{c} \cdot v \cdot (e_r - e_s) \quad \text{oder} \quad \Delta f_E = f_E - f_0 = \frac{n}{\lambda_0} \cdot v \cdot (e_r - e_s)$$

f_E : Empfängerfrequenz

f_0 : Senderfrequenz

c : Lichtgeschwindigkeit

n : Brechungsindex des Fluids

λ_0 : Wellenlänge des Laserlichtes im Vakuum

v : Geschwindigkeit des Partikels

e_r : Empfängerrichtung

e_s : Strahlrichtung

Mit der Frequenzverschiebung kann die Bewegungsrichtung der Partikel durch das Interferenzmuster [s. Abb. L.3] ermittelt werden.

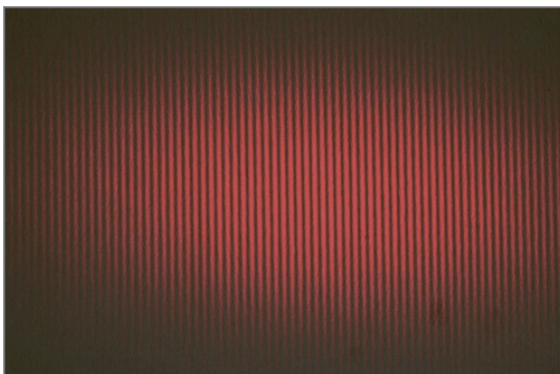


Abb. L.3 : Interferenzstreifenmuster im Messvolumen [30]

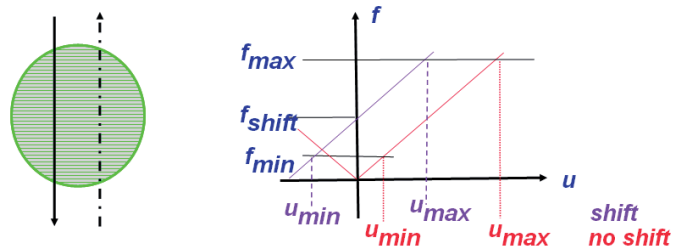


Abb. L.4 : Prinzip der Frequenzverschiebung [22]

Aus der Dopplerfrequenz kann nur die Komponente senkrecht zur Achse der Messanordnung bestimmt werden.

$$v_{\perp} = |v| \cdot \sin\left(\alpha + \frac{\theta_B}{2}\right)$$

θ_B : Beobachtungswinkel des Photodetektors

α : Winkel zum Laserstrahl, unter welchem sich das Teilchen bewegt

Die Dopplerfrequenz f_D ergibt sich dann zu

$$f_0 = \left(\frac{n}{\lambda_0}\right) \cdot 2 \cdot v_{\perp} \cdot \sin\frac{\theta}{2}$$

Die Geschwindigkeitsinformationen erhält man aus dem Messvolumen des Kreuzungspunktes der beiden Laserstrahlen. Die Kreuzung der beiden Laserstrahlen entsteht unter einem Winkel θ . Die Übertragungsoptik des Lasers enthält ein optisches Element (meist eine Bragg-Zelle), um den Strahl in zwei parallelaufende Strahlen aufzuteilen und eine Linse, um die beiden Strahlen zu fokussieren und zu kreuzen.

Durch die Überlagerung der Wellen, ergibt sich ein Interferenzmuster, welches zusammengesetzt ist aus Interferenzflächen mit einem jeweils gleichen Abstand.

Während die Partikel dieses Hell-Dunkel-Muster durchqueren, senden sie Streulicht aus bzw. reflektieren sie das Laserlicht. Jedes Mal, wenn ein Teilchen beim Durchqueren auf eine Fläche des Interferenzmusters trifft, wird ein Lichtpuls aufgezeichnet, wenn es sich im Zwischenraum zwischen zwei Flächen befindet, bleibt es dunkel, da das Teilchen nichts reflektiert. Die Folgefrequenz ist die Dopplerfrequenz.

Das Streulicht wird von einem Photodetektor empfangen [s. Abb L.6] und in ein analoges elektrisches Signal umgewandelt. Die Frequenz des rückgestreuten Lichtes enthält Informationen beider Laserstrahlen und ist direkt proportional zur Teilchengeschwindigkeit im Messpunkt. Ein Signalprozessor verarbeitet die Informationen des Photodetektors und wandelt sie in digitale Daten um. Damit werden sofortige Geschwindigkeitsinformationen der Partikel zur Verfügung gestellt.

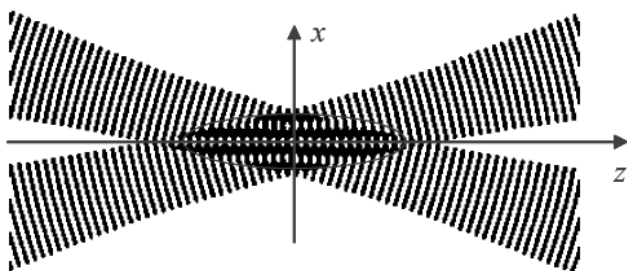


Abb. L.5 : Interferenzstreifenmuster im Kreuzungspunkt zweier Laserstrahlen [22]

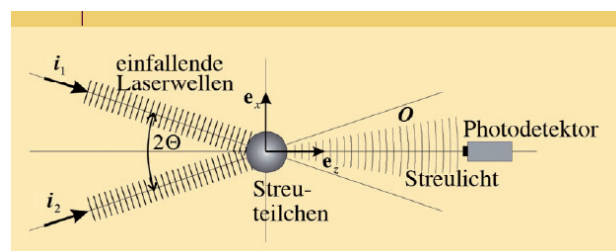


Abb. L.6 : Vom Photodetektor empfangenes Streulicht [40]

Die Geschwindigkeit errechnet sich aus der Dopplerfrequenz und dem Abstand der Interferenzflächen.

$$v = f_D \cdot \Delta x$$

Das Messvolumen, welches sich am Schnittpunkt der beiden Laserstrahlen mit gaußförmiger Intensitätsverteilung ergibt, ist ovalförmig und kann mit der Formel eines Ellipsoids bestimmt werden.

$$V = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{d^3}{\sin \Theta}$$

d : Strahldurchmesser im Schnittvolumen

Θ : Schnittwinkel der Laserstrahlen

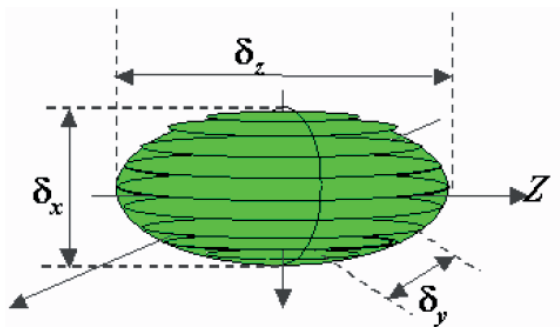


Abb. L.7 : Abmaße des Messvolumens [22]

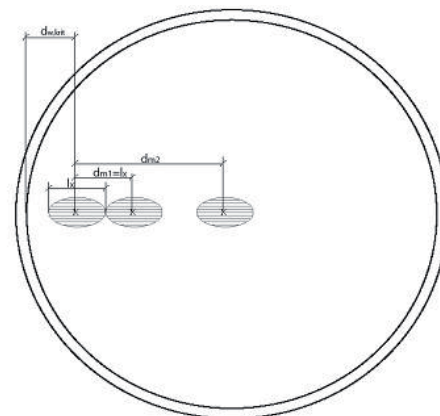


Abb. L.8 : Messvolumen im Rohrquerschnitt [22]

Der Strahldurchmesser kann mit Hilfe der Brennweite f der Sendelinse und dem Strahldurchmesser D vor Eintritt in die Sendelinse reguliert werden.

$$d = 4 \cdot f \cdot \frac{\lambda}{\pi \cdot D} \quad \text{mit} \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (\text{Laser-Wellenlänge im Fluid})$$

Ein spitzer Schnittwinkel, bewirkt, dass die Länge des Messvolumens und das Messvolumen selbst größer werden. Die Länge liegt ca. bei 1-3 mm, der Durchmesser variiert zwischen 0,5 mm und 0,3 mm.

Der Abstand der Interferenzflächen lässt sich folgendermaßen errechnen:

$$\Delta x = \frac{\lambda_0}{2 \cdot n \cdot \sin \frac{\Theta}{2}}$$

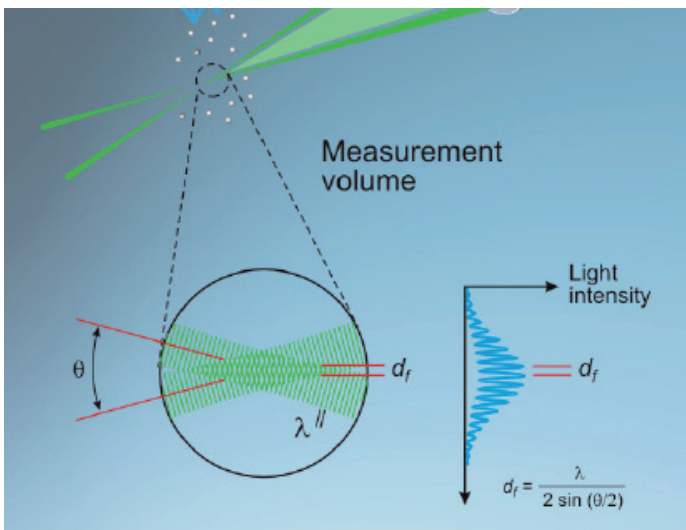


Abb. L.9 : Messvolumen mit gaußscher Normalverteilung [22]

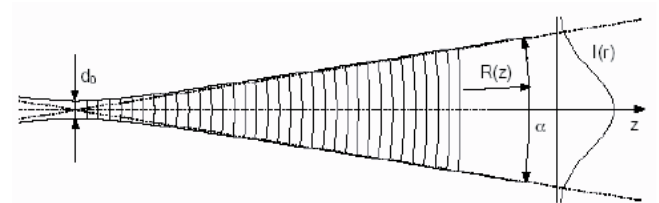


Abb. L.10 : Gaußsche Normalverteilung [40]

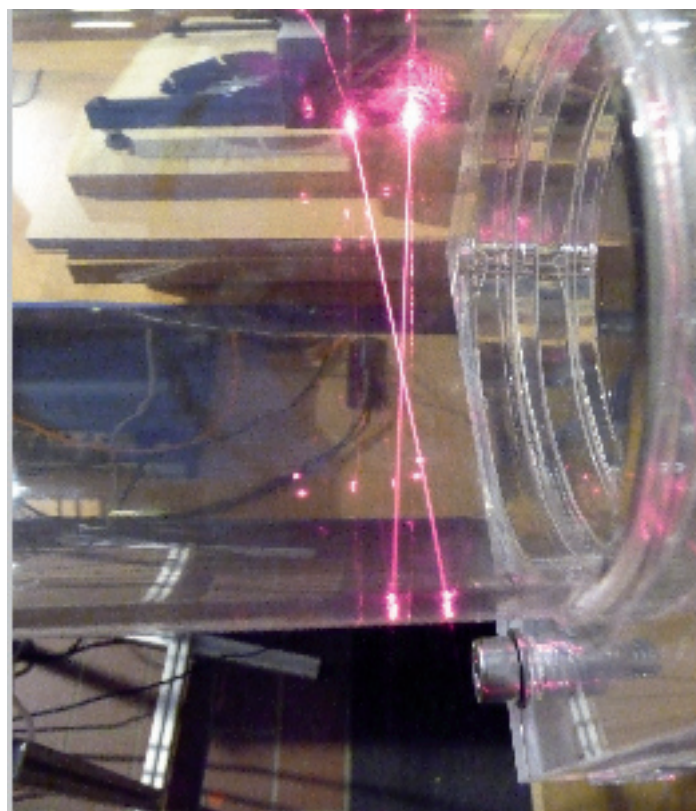


Abb. L.11 : Messvolumen im Laserstrahlenkreuzungspunkt



Mit einem 1D-LDA können auch die Komponenten in der 2. Achse gemessen werden. Voraussetzung dafür ist die Anwendung eines 2D- Traversiersystems.

L.3 Vorteile der LDA

- lineare Charakteristik
- berührungsloses Messverfahren
- keine Kalibrierung erforderlich (aufgrund der Stabilität und der Linearität der optischen elektromagnetischen Wellen), kann selbst als Kalibriergerät verwendet werden
- kaum Strömungsgeräusche
- hohe Frequenzantwort und Geschwindigkeit werden unabhängig gemessen von anderen Strömungsparametern
- hohe zeitliche Auflösung (Datenraten von 100 kHz pro Sekunde)
- hohe räumliche Auflösung (Messvolumen im μm - Bereich)
- punktuelle Messungen
- ideal für die Bestimmung der Turbulenzeigenschaften
- sehr geeignet für rückfließende, chemisch reaktive oder sehr heiße Strömungen wegen der gebündelten Sensibilität
- simultane 1D-, 2D- oder 3D- Messungen möglich
- Geschwindigkeitsbereich von 0 bis Überschall
- sehr hohe Genauigkeit bis auf 0,1 % v. M., Messungenauigkeiten bis maximal 0,5 %
- sofortige Geschwindigkeitsergebnisse verfügbar
- Messdistanz der LDA von cm- bis m-Bereich

L.4 Nachteile der LDA

- teures Messsystem
- Installation aufwendig
- nicht geeignet für Messungen im Überschallbereich
- 3D-LDA liefert in zwei Achsen keine akkuraten Werte aufgrund von Verschiebung des Messvolumens
- optische Transparenz erforderlich
- definierte Strahlführung bis zum Messvolumen

L.5 Die Bragg-Zelle

Die Bragg-Zelle, ein optoakustischer Modulator, ist Teil der Basiskomponenten des LDA-Messsystems.

Sie dient als Strahlenteiler des Laserstrahls und besteht aus einem Glasblock, an dem ein piezoelektrisch erregter Kristall befestigt ist, durch den der Laserstrahl hindurchgeführt wird. Aufgrund der Vibrationen des Kristalls entstehen akustische Wellen, die Brechungsindexschwankungen verursachen, an denen sich der einfallende Laserstrahl unter dem Bragg- Winkel beugt. Die Bragg-Zelle erzeugt zwei intensitätsgleiche Laserstrahlen mit der Frequenz f_0 und f_{shift} .



Sie werden fokussiert in optischen Fasern und vom Bestandteil der Übertragungs- und Empfangsoptiken aufgenommen, in welchem die parallelverlaufenden Strahlen ebenfalls durch eine Linse fokussiert und ins Messvolumen weitergeleitet werden.

Bedingt durch das Frequenz-Shifting der Bragg-Zelle bewegt sich das Interferenzmuster mit einer konstanten Geschwindigkeit. Partikel im ruhenden Zustand erzeugen ein Signal der Frequenz f_{shift} . Die positiven und negativen Geschwindigkeiten v_{pos} und v_{neg} generieren die entsprechenden Signale der Frequenzen f_{pos} und f_{neg} .

L.6 Abhängigkeiten der LDA-Messgenauigkeiten

Die Genauigkeit der Messung kann durch folgende Parameter beeinflusst werden:

- die Größe der Partikel
- die Einstellung des Winkels der sich kreuzenden Laserstrahlen (verändert Messvolumen)
- die Leistung des Lasers
- die Wahl eines geeigneten Materials für die Partikel
- die genaue Kreuzung der Lasertailen (die Strahlen müssen sich in den Tailen schneiden)

L.7 Der Doppler- Burst

Jedes Mal, wenn ein Partikel das Messvolumen durchquert, ist ein Signalanstieg des rückgestreuten Lichts zu erkennen. Diesen Anstieg bezeichnet man auch als „Burst“.

Die Burst-Signale werden von einem Burst-Spektrum-Analysator erfaßt, deren Hauptaufgabe aus dem Herausfiltern der Frequenzinformation aus dem Signal besteht.

Die Signale werden entdeckt und festgehalten durch die SNR-Methode (Signal-to-Noise) und das Multi-Bit-Burst-Erkennungsverfahren, das auf den nicht-konstanten Burst-Amplituden basiert. Die Amplitude variiert mit jedem Signal und ist von kurzer Zeitdauer.

SNR wird immerzu gemessen. Der Burst-Erkennungssensor definiert den Anfang t_A und das Ende t_E eines Burst-Signals. Das Zentrum t_Z wird für die Zentrierung des gesamten Intervalls um die Signalspitze genutzt, wobei das Intervall automatisch angepasst wird auf die Signaldauer. Die Dauer des Doppler-Signals wird gemessen, indem es einen Hochpassfilter (niederfrequente Anteile fallen damit raus) und danach einen Amplitudenfilter durchläuft.

Das einlaufende Signal wird mit der Fourier-Analyse berechnet.

Die Messung beginnt mit jedem neuen Doppler-Burst.

Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit findet man am Maximum des Signals, die Breite der Spitze gibt die Frequenzschwankung an, mit der sich der Turbulenzgrad bestimmen lässt. Die Doppler-Signale werden ausgewertet mit einem Signalprozessor, der mit einem Mikrorechner verbunden ist.

Zu beachten ist, daß mit Spektral-Analysatoren nur zeitliche Mittelwerte geliefert werden.

L.8 Rekonstruktion mit der Fast-Fourier-Transformation (FFT)

Die Nutzung der diskreten Fouriertransformation (DFT), setzt einen Rechenaufwand voraus, der sehr komplex ist. Er steigt quadratisch an mit der DFT- Länge N.

Komplexität $O = f(N^2)$

Mit den Algorithmen der schnellen Fouriertransformation (FFT) lässt sich hingegen der Rechenaufwand stark reduzieren.

Das am meisten angewandte Verfahren ist die Sample-and-Hold-Rekonstruktion (S+H reconstruction), welche die einfachste Polynomklasse von Rekonstruktionsalgorithmen repräsentiert.

Bei der FFT werden die Signale aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich übertragen und dort rekonstruiert.

Dies wird erreicht durch eine Multiplikation der Fourier-Transformierten mit einem Rechteckfilter der Fläche 1. Bei Überabtastung kann ein schmaleres Rechteckfilter der Breite $2 \cdot f_{\max}$ verwendet werden.

L.9 Fourier- Reihe

Die Fourierreihe ist eine Ausdehnung der periodischen Funktion $f(x)$ der Periode $2 \cdot L$ und der Winkelfrequenz $\frac{\pi}{L}$ zusammengesetzt aus Summentermen von Sinus- und Cosinusfunktionen mit Winkelfrequenzen, die ganzzahlige Vielfache sind von $\frac{\pi}{L}$.

Die Fourierreihe ist definiert durch

$$f(x) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)$$

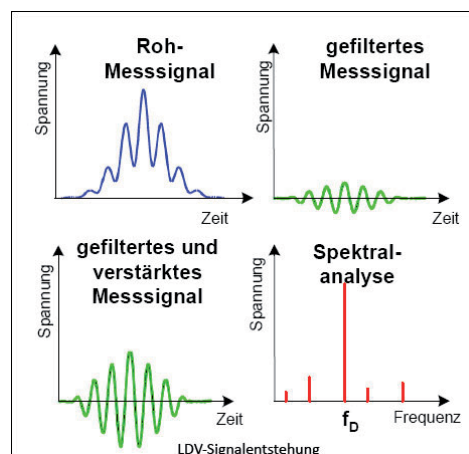


Abb. L.12 : LDA- Signalentstehung [11]

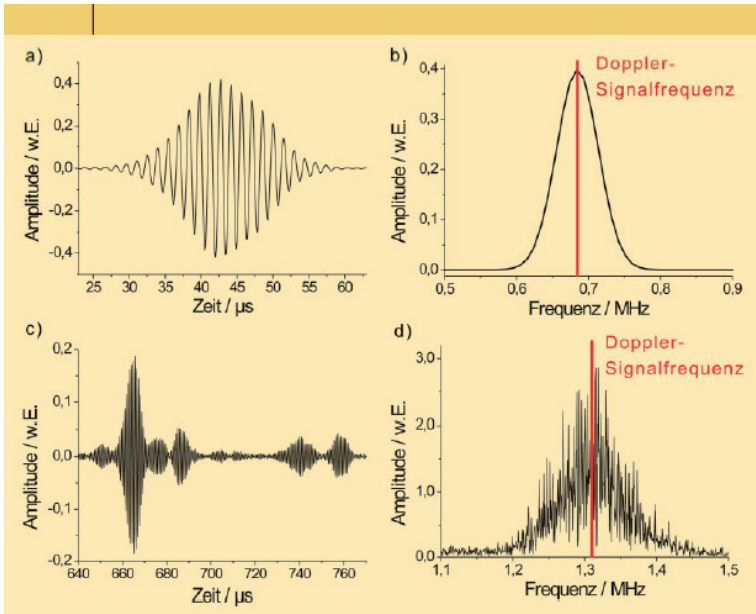


Abb. L.13 : Beispiel eines typischen Doppler- Signals [13]

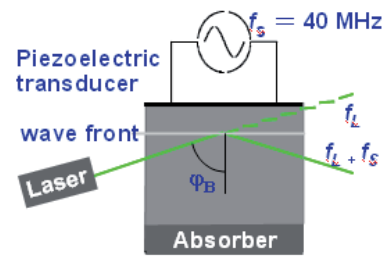


Abb. L.14 : Arbeitsweise der Bragg-Zelle [22]

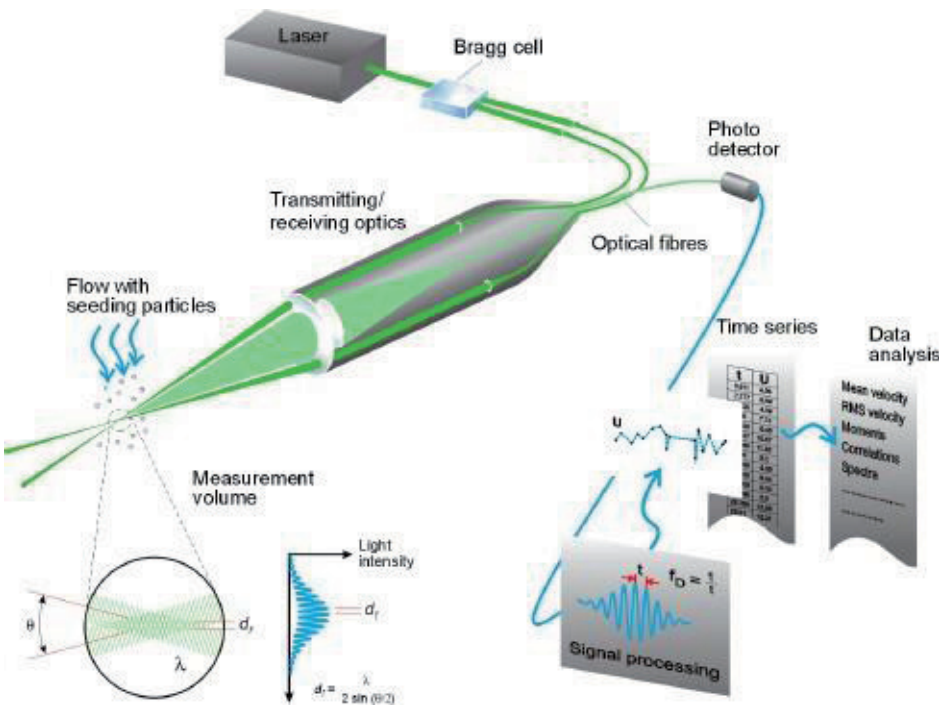


Abb. L.15 : Messprinzip der Laser Doppler Anemometrie [22]

L.10 Partikel- Material

Die Auswahl eines Partikelmaterials und die Größe der Partikelartikel haben einen erheblichen Einfluss auf das Messergebnis. In der Regel liegt die Größe der Partikel im μm - Bereich. Es ist darauf zu achten, dass sie nicht zu groß sind, um der Strömung problemlos folgen zu können und sie nicht zu beeinflussen. Die Partikel dürfen aber auch nicht zu klein gewählt werden, da sie sonst nicht erfasst werden können und somit zu wenige aussagekräftige Ergebnisse geliefert werden.

In Abb. L.16 werden verschiedene mögliche Partikel- Materialien aufgelistet. Normalerweise kommen Pflanzenöle oder DEHS zum Einsatz, aber auch Rauchpartikel sind möglich. Fast jedes Material hinterlässt Rückstände an den Begrenzungswänden, insbesondere dort, wo die Turbulenz erzeugt wird. Mit einem zwischengeschalteten Abscheider kann ein Großteil der Tröpfchen wieder aufgefangen werden.

Material	Partikeldurchmesser [mm]	Kommentar
Al ₂ O ₃	< 8	Generiert durch Verflüssigung; nützlich für Partikelflammen mit hohem Schmelzpunkt
Glycerin	0.1 - 5	Generiert durch einen Zerstäuber
Slilikonöl	1 - 3	sehr zufriedenstellend
SiO ₂ Partikel	1 - 5	Sphärische Partikel mit einem sehr engen Größendurchmesser; besserer Lichtreflektor als TiO ₂ aber nicht so gut wie Glycerin
TiO ₂ Pulver	von Submikro bis Zehntelmikro	Guter Lichtreflektor und stabil bei Flammen bis zu 2500 °C; sehr breite Größenverteilung und Partikelformen
Wasser	1 - 2	Generiert durch einen Zerstäuber; ein Verdampfungsinhibitor muss hinzugefügt werden.

Abb. L.16 : Übersicht der möglichen Materialien für die Partikelgenerierung in der Lasertechnik [34]

In dieser Arbeit wird das Material Wasser gewählt, welchem 15% Glycerin zugesetzt ist, da dieses die geringsten Rückstände hinterlässt und gesundheitlich unbedenklich ist. Glycerin wird beigemischt, weil das Wasser in der Rohrstrecke zu schnell verdunstet.



M.1 Auswirkungen von Parametern auf das LDA- Messergebnis

Trotz aller Vorteile der Laser Doppler Anemometrie, müssen dennoch bestimmte Einstellungen bzw. Gegebenheiten beachtet werden, die das Messergebnis beeinflussen können.

Wahl des Partikelstoffes

Bei den Messungen ist zunächst das Fluid Wasser gewählt worden, um eine Verschmutzung der Rohrstrecke zu vermeiden. Dabei hat sich herausgestellt, dass das Wasser zu schnell verdampft und die Partikel die Messstelle nicht mehr erreichen können.

Als Lösung für das Problem ist dem Wasser eine Glycerinlösung beigemischt worden.

Glycerinlösung

Werden dem Wasser 5 % Glycerin beigemischt, so ist dies nicht ausreichend, wenn Datenraten zwischen 1- 10 kHz erreicht werden sollen. Die ersten Messungen haben daher keine vernünftigen Ergebnisse geliefert. Es ist also zunächst notwendig, die passende Menge an Glycerin beizumischen. Als eine gute Lösung hat sich eine Zugabe von 15 % Glycerin erwiesen.

Verschmutzung der Rohrstrecke

Durch den Einsatz von Glycerin setzen sich die Partikel an den Rohrwänden ab. Besonders ist das der Fall stromabwärts des Wabengleichrichtes, der Messblende und des Turbulenzgenerators.

Die Rohre an den beiden LDA- Messstellen müssen regelmäßig gereinigt werden, da für den Laser sonst keine optische Transparenz mehr vorliegt und nicht korrekt gemessen werden kann. Die Messungen werden fehlerhaft, weil der Laser zu viele Reflexionen der Partikel aufnimmt.

Partikelgenerator und Einstellung der Datenrate

Für die Darstellung eines aussagekräftigen Turbulenzspektrums sind Datenraten von mindestens 1 kHz notwendig [22]. Es gilt: Je höher die Datenraten, desto geringer der Messfehler.

Bei den ersten Versuchen ist ein kleiner Partikelgenerator zum Einsatz gekommen (Inhalierboy). Mit diesem Gerät können keine Datenraten über 500 Hz erreicht werden, da die Partikel nicht mit genügend Druck in die Rohrstrecke eingespeist werden. Zudem ist die Messstrecke im Verhältnis zur Druckerzeugung des Gerätes zu lang.

Datenraten zwischen 1- 10 kHz werden erst mit einem großen Partikelgenerator erzeugt, der nach dem Zerstäuberprinzip arbeitet und an einem Standardanschluss für Druckluft angeschlossen werden kann. So kann genügend Druck aufgebaut werden, dass die entsprechenden Datenraten bei den Messstellen erfasst werden.

Die in dieser Arbeit aufgeführten Turbulenzspektren weisen eine hohe Leistungsdichte im Bereich von 1- 4 kHz auf. Die vom Partikelgenerator erzeugte Datenrate kann also noch erheblich gesteigert (auf 10- 20 kHz) werden, um auch eine hohe Leistungsdichte im hochfrequenten Bereich zu messen.



Signalerfassung

Die Quantität der Partikel im Messvolumen ist ein sehr wichtiges Kriterium für die Qualität der vom Photodetektor erfassten Dopplersignale und für die Effizienz des Signalprozessors.

Wenn sich im Durchschnitt viele Partikel im Messvolumen befinden, entstehen viele Dopplersignale, aus denen die gemessenen Geschwindigkeiten in einer statistischen Verteilung angezeigt werden [s. Abb. L.13].

Da der LDA- Prozessor gewöhnlich Einzel-Partikel- sowie Multi-Partikel-Signale empfangen kann, schätzt er die Geschwindigkeit der Partikel innerhalb des Messvolumens als einen gewichteten Durchschnitt.

Bei Multi- Partikel- Signalen muss allerdings darauf geachtet werden, dass sie durch ihre zufallsbedingten Phasenfluktuationen immer zusätzliche Phasenrauschsignale zur gemessenen Dopplerfrequenz hinzufügen.

An der Rohrwand werden zu viele Reflexionen vom Plexiglas verursacht, die vom Photodetektor als Rauschen bzw. Wandsignale aufgenommen werden, so dass hier nur bedingt aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden.

In der Regel kann gesagt werden, dass möglichst viele Partikel im Messvolumen vorhanden sein müssen, um genügend Dopplersignale zu erhalten und diese Informationen in Turbulenzspektren oder Ähnlichem weiterverarbeiten zu können.

Photodetektor

Da der Photodetektor sehr empfindlich ist, darf der Anodenstrom nicht zu hoch eingestellt werden, da der Detektor ansonsten elektronisch übersteuert werden könnte.

Als Folge davon kann der Photodetektor „blind“ werden, das heißt die Empfindlichkeit sinkt enorm, so dass nicht mehr alle Reflexionen der Partikel von ihm erfasst werden können.