Inhaltsverzeichnis

1.	Ein	leitung	.3
2.	Ers	stellung des aerodynamischen Datenakquirierungs-Programms	.4
	2.1	Normkennlinie	.4
	2.1.	.1 Aerodynamische Begriffe	.4
	2.1.	.2 Dimensionslose Kennzahlen	.5
	2.1.	.3 Luftwerte	.5
	2.2	Überprüfung der Temperaturmessung	.7
	2.3	Komponenten der integralen Messtechnik	10
	2.3.	.1 Der benutzte Ventilator	11
	2.3.	.2 Die Druckmessung	14
	2.3.	.3 Die Drehmoment- und Drehzahlmessung	14
	2.3.	.4 Die Temperaturmessung	15
	2.3.	5 Die Expansionszani e	15
	2.3.	.6 Die Drosseleinrichtung	16
	2.3.	./ Die Durchflussmessung	16
	2.3.	O Der Durchnusskoemzient C	17
	2.3.	.9 Die iterativen berechnungen	10
	2.4	1 Struktur des DASVI ab Programme	10
	2.4.	2 Grafische DASVI ab-Programmierung	20
	2.4.	3 Benutzeroberflächen	20
	2.4.	4 Genauigkeit der Messungen	27
ર	Δοr	rodynamischen Messungen	22
0	31	Veraleich zwischen zwei Messideen	33
	31	1 Dimensionslose Kennlinie mit Mittelung nach der Rechnung	33
	3.1	2 Dimensionslose Kennlinie mit Rechnung nach der Mittelung	34
	3.2	Reproduzierbarkeit der Messungen	34
	3.2.	.1 Überprüfung der Reproduzierbarkeit der aerodynamischen Messungen	34
	3.2.	.2 Messunsicherheiten	36
4	Fre	equenzanalvse	39
	4.1	Einführung in die Frequenzanalyse	39
	4.1.	.1 Fourieranalyse	39
	4.1.	.2 Auftretende Effekte	39
	4.2	Fensterfunktionen	41
	4.2.	.1 Eigenschaften einer Fensterfunktion	42
	5.2.	.1 Übersicht über die typischen Standardfensterfunktionen	45
5	Übe	erprüfung des Bewertungsfensters auf die akustischen Kenndaten4	48
6	Übe	erprüfung des Einflusses der Überlappung auf die akustische Analyse	53
	6.1	Überlappungen mit Hanningfenster	54
	6.2	Überlappungen mit Flattopfenster	57
7	Ein	Ifluss der Mittelungszeit auf der Analyse	30
8	Rep	produzierbarkeit der akustischen Messung	35
9	Ein	flusses der Mikrofonposition auf die Geräuschanalyse	39
1() N	Nahfeld - und Fernfeldmessungen verschiedener Betriebspunkte bei	
Ve	erschie	edenen Drehzahlen in unterschiedlichen Mikrofonpositionen	73
	10.1	Analyse der Schalldruckschwankungen im Nahfeld des Ventilators	73
	10.2	Vergleich der Schalldruckschwankungen im Nah- und Fernfeld des Ventilators	78
1	1 F	Prognoseverfahren	38
	11.1	Allgemeines Geräuschgesetz und spezifischen Schallkenngrößen	88
	11.2	Ermittlung der akustischen Kennlinie des Ventilators	90
	11.3	Aeroakustische Versuchsergebnisse	90

1

12	Zusammenfassung	93
13	Literaturverzeichnis	95
Anhan	g-A Ergebnisse der Nah- und Fernfeldmessungen	96
Anhan	g-B Bedienungsanleitungen der entstandenen Matlab-Programme	177
А	Mat_kap_verbessert.m	177
В	Mat_lesen_darstellen_kap_ohne_korrektur.m	180
С	Mat_Lesen_Darstellen_kap_Frequenzgangkorrektur.m	181
Anhan	g-C Programmierung der benutzen Schnittstellen von DASYLab-Pro	ogramm
für Aeı	rodynamik	183
D D	ie Matlab-Programmierung	188
D.1	Mat_kap_verbessert	188
D.2	Mat_lesen_darstellen_kap_ohne_korrektur	197
D.3	Mat_lesen_darstellen_Kap_frequenzgangkorektur	
E Ü	bersicht auf die entwickelten Software im Prüfstand	

1. Einleitung

Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit wurden die zur Datenakquirierung und Auswertung gehörenden Softwaremodule zur aerodynamischen und aeroakustischen Leistungsvermessung an einem industriellen Ventilatorenversuchstand erneuert und vervollständigt.

Ausgangspunkt der Arbeit war das LabVIEW-Programm zur aerodynamischen Datenerfassung von Demissie und Haukap (1999 ohne Veröffentlichung), dass in der Diplomarbeit von Previti (2003) /1/ weiter entwickelt und eingesetzt wurde. Einer der Ziele dieser Arbeit war es, ein neues Messwerterfassungs- und Auswertungsprogramm für die aerodynamische Vermessung mit dem DASYLab Programm zu erstellen. Dabei sollen die physikalischen Werte (Drücke, Temperatur, Drehmoment, Drehzahl) als Spannungen über die Schnittstellen in einen PC eingelesen werden und gemäß EN ISO 5167-1, die Ventilatorkennlinien berechnet und Online dargestellt werden. Mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogramms Excel können die aufgenommenen Daten weiterbearbeitet werden.

Ein weiterer Teil der Arbeit besteht in der Fortsetzung der in der Arbeit von Sariaslan (2004) /2/ angefertigten MATLAB-Programme zur einen semiempirischen Prognoseverfahren für die Abstrahlung der Geräusche von Radialventilatoren.

Mit den neu programmierten Softwaremodulen für die Datenakquirierung und Auswertung der aerodynamischen und aeroakustischen Kenndaten, sollten verschiedene Einflussfaktoren untersucht werden. Das Auswechseln der kleinen Blendenscheibe durch die große Blendenscheibe ermöglicht es, dass auch größere Volumenströme vermessen werden können. Der Einfluss der Blendenscheibe auf die aerodynamische Leistungsuntersuchung ist einer der zu untersuchenden Einflussfaktoren. Der Einfluss des Bewertungsfensters und des Overlappings auf die Frequenzspektren wurden untersucht.

Eine Auskunft über die Schallentstehung und Schallausbreitung im akustischen Nahfeld, geben die akustischen Messungen an mehreren Umfangspositionen im akustischen Nahfeld und Fernfeld

2. Erstellung des aerodynamischen Datenakquirierungs-Programms

2.1 Normkennlinie

Unter einer Normkennlinie eines Ventilators versteht man nach DIN 24163 die auf einem Normprüfstand unter exakten Versuchsbedingungen gemessenen Zusammenhänge zwischen der Druckerhöhung $\mathbf{p}_{\mathbf{f}}$ bzw. Totaldruckerhöhung $\mathbf{p}_{\mathbf{f}}$ des Ventilators und dem angesaugten Volumenstrom $\mathbf{q}_{\mathbf{v}}$.

2.1.1 Aerodynamische Begriffe

• Druckerhöhungen

Bei frei ausblasenden Ventilatoren entspricht der statische Druck p_{st2} dem Umgebungsdruck p_{baro} . Bei frei ansaugenden Ventilatoren entspricht der statische Druck p_{st1} .dem Umgebungsdruck p_{baro} .

Die Druckerhöhungen $? p_{fa}$ und die Totaldruckerhöhung $? p_{tot.}$ sind in DIN 24163-1 festgelegt:

- Druckerhöhung

$$\Delta p_{fa} = p_{st2} - (p_{st1} + p_{d1})$$
(1)

- Totaldruckerhöhung

$$\Delta p_{tot} = p_{fa} + p_{d2} \tag{2}$$

Der dynamische Druck $p_{d(i)}$ berechnet sich gemäß folgender Gleichung:

$$p_{d(i)} = 0.5 \cdot \mathbf{r}_{a(i)} \cdot C_{a(i)}^2$$
(3)

Der im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendete Prüfstand saugt aus dem Freien an.

- Leistung
- Förderleistung

$$P_{t} = \Delta P_{iotal} \cdot Q_{v} \tag{4}$$

- Antriebsleistung $P_{M} = M \cdot \mathbf{w}$ (5)

2.1.2 Dimensionslose Kennzahlen

Damit wird die Vergleichbarkeit der Messungen verschiedener Drehzahlen überprüft.

• Durchflusszahl $j = \frac{Q_v}{U_{Laufrad}} \cdot A_{VENT} = \frac{4.Q_v}{p^2 \cdot D_{vent}^3 \cdot n}$ (7) • Druckzahl $\Psi = \frac{\frac{\Delta P_{total}}{r}}{\frac{U_{Laufrad}}{2}}$ (8)

? = ? Umgebung

2.1.3 Luftwerte

A. Luftdichte

Ausgehend von der thermischen Zustandsgleichung fürs ideale Gas

$$\boldsymbol{r} = \frac{p}{R_i \cdot T} \tag{9}$$

wobei

Ri : Gaskonstante bei trockener Luft = 287,2 [J/kg*K]

P: Luftdruck [N/m²]

T : Lufttemperatur [°K]

wird die Dichte des Fördermediums bestimmt. Abhängig von Druck und Temperatur kann die Luft nur eine bestimmte, maximale Wasserdampfmenge aufnehmen. Enthält die Luft die maximal mögliche Wasserdampfmenge, spricht man von gesättigter Luft. Die Dichte von feuchter Luft kann aus folgender Beziehung vgl Bohl (1994)./3/ bestimmt werden:

$$\boldsymbol{r}_{f} = \boldsymbol{r}_{tr} \left(1 - 0,377 \cdot \boldsymbol{j} \cdot \frac{\boldsymbol{P}_{s}}{\boldsymbol{P}} \right)$$
(10)

wobei

- $?_{f}$: Dichte der feuchten Luft
- ?tr : Dichte der trockenen Luft
- f : relative Luftfeuchte
- p_{s} : Sättigungsdruck des Wasser =f(T)
- *p* : Luftdruck

Die Abhängigkeit des Sättigungsdrucks des Wasserdampfs von der Temperatur ist in der folgenden Grafik Bild 2.1, dargestellt vgl Werner Pohlenz (1981)./4/



Sättigungsdruck Ps über Temperatur T

Bild 2.1 Abhängigkeit des Sättigungsdrucks des Wasserdampfs von der Temperatur vgl Werner Pohlenz (1981)./4/

Eine polynomische Interpolation der Ps-Werte vierter Ordnung ergibt einen besseren Regressionskoeffizienten (R=1). Der Sättigungsdruck des Wasserdampfs hängt von der Temperatur mit folgender Beziehung (aus der Excel-Grafik Bild 2.1) ab:

$$p_{s}[mbar] = 10^{-5} \cdot T^{4} - 0,0004 \cdot T^{3} + 0,0402 \cdot T^{2} - 0,122 \cdot T + 6,388$$
(11)

B. Dynamische Viskosität

Die Zunahme der dynamischen Viskosität von Gasen mit steigender Temperatur kann nach der empirischen Gleichung von Sutherland vgl./aero1/ abgeschätzt werden:

$$\boldsymbol{h} \approx \boldsymbol{h}_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{T_0 + T_s}{T + T_s}$$
(12)

?: dynamische Viskosität bei der Temperatur T
 ?o: dynamische Viskosität bei der Temperatur T_o = 273 K°, ?o,(Luft) = 1,71.10⁻⁵ Pa*s
 Ts: Sutherland-Konstante mit der Dimension einer Temperatur, Ts,(Luft) = 122 °K

2.2 Überprüfung der Temperaturmessung

Die Temperaturmessung erfolgt mit einem thermodynamischen Temperaturaufnehmer Von der Anzeigeeinheit wird das Analogsignal (Spannung 0-12V) zur Weiterverarbeitung im PC genutzt. Zunächst wurden die Eingänge der AD-Wandler-Karte National Instrument NI-DAQ (AT-MIO-16E-10 Logical Device 12Bits) auf ihre Genauigkeit überprüft. Mit einer Präzisionsspannungsquelle sind verschiedene Amplituden für Gleich- und Wechselanteil sowie verschiedene Frequenzen für die Wechselanteil auf die AD-Wandler-Karte gegeben worden. Mit dem folgenden Schaltbild wurden die Spannungswerte überprüft, vgl. Bild 2.2.



<u>Bild 2.2:</u> DASYLab Schaltbild zur Überprüfung der AD-Wandler-Karte National Instrument NI-DAQ

Da das Temperatursignal ein DC-Signal ist, wurde für die Untersuchung ein Gleichspannungssignal von einer Präzisionsspannungsquelle (Digitalgenerator) verwendet.

Die Datenerfassung erfolgt über den Analog-Eingang Modul DASYLabs. Wichtig dabei ist die richtige Einstellung der Eingangsspannungen. Nachdem die Minimalund Maximalwerte für die Eingangsspannungen eingetragen wurden, wurde der Offset der angelegten Gleichspannung variiert. Außerdem wurde der Einfluss des Eingangsspannungsbereichs auf reale Temperaturmessung überprüft. Die folgenden Tabellen fassen die Ergebnisse der Untersuchung zusammen.

	Eingangsspannungsbereich	[-1;+1] V
Generator	DASYLab	Bemerkung
[V]	[V]	
0	0	DC
0,1	0,099	DC+Geräusch von 0.1V DC ≈20% von
0,2	0,196	max(Spann.bereich)
0,3	0,294	DC
0,4	0,3975	DC
1	0,993	DC

Tabelle 2.1. Einstellung des Eingangspannungsbereichs* [-1;+1] V

Tabelle 2.2.	Einstellung des	Eingangspannu	nasbereichs	[-5:+5] V
	-		-	

	Eingangsspannungsbereich	[-5;+5] V
Generator	DASYLab	Bemerkung
[V]	[V]	
0,1	0,1	DC+Geräusch von 0.1V
0,2	0,198	DC+Geräusch von 0.2V
0,4	0,397	DC+Geräusch von 0.4V
0,5	0,496	DC+Geräusch von 0.5V
0,6	0,59	DC+Geräusch von 0.6V
0.7	0.68	DC DC ≈13% von max(Spann bereich)
0,7	0,08	max(Spann.bereich)
0,8	0,8	DC

Tabelle 2.3.	Einstellung des	Eingangspannu	ngsbereichs	[-10:+10] V

Eingangsspannungsbereich [-10;+10] V						
Generator	DASYLab	Bemerkung				
[V]	[V]					
0	0	DC				
0,1	0,102	DC+Geräusch von 0.1V				
0,2	0,2	DC+Geräusch von 0.18V				
0,3	0,2978	DC+Geräusch von 0.28V				
0,4	0,4	DC+Geräusch von 0.4V				
0,5	0,498	DC+Geräusch von 0.5V				
0,9	0,8984	DC+Geräusch von 0.9V				
1	0,996	DC+Geräusch von 1V				
1,1	1,088	DC+Geräusch von 1.1V				
1,2	1,196	DC+Geräusch von 1.2V DC ≈13% von				
1,3	1,298	max(Spann.bereich)				
2	1,99	DC				
4	4,028	DC				
5,1	5,11	DC				
7,3	7,314	DC				

*Eingangspannungsbereichs : Für jeden Kanal kann der Eingangsbereich (Minimal- und Maximalwert) eingegeben werden. Der Treiber stellt die erforderliche Verstärkung für den gewünschten Bereich optimal ein

Multimeter	DASYLab	Steuerungsbereich	Bemerkung
[mV]	[mV]	[V]	
20,79	20,75	[-0.001;+0.001]	DC
20,78	20,72	[-0.002;+0.002]	DC
20,84	20,83	[-0.003;+0.003]	DC
20,79	20,75	[-0.004;+0.004]	DC
20,89	20,87	[-0.005;+0.005]	DC
20,91	20,87	[-0.006;+0.006]	DC
20,9	20,94	[-0.007;+0.007]	DC
21,06	20,99	[-0.01;+0.01]	DC
21,09	20,99	[-0.011;+0.011]	DC+Geräusch von 21mV
21,17	20,96	[-1;+1]	DC+Geräusch von 21mV

Tabelle 2.4.Unterschiedliche Einstellungen des Eingangspannungsbereichs bei derTemperaturmessung





Bild 2.3 Getestetes DC-Signal (1V: Steuerungsbereich [-10 V:+10 V]) mit Rauschen



Bild 2.4 Getestetes DC-Signal (1.7 V: Steuerungsbereich [-10 V:+10 V])ohne Rauschen



Bild 2.5 Temperatursignal mit Rauschen

Aus den oben stehenden Tabellen merkt man, dass die von DASYLab gelesene Spannung linear abhängig von der Spannung des Generators ist. Im Bereich [0,1; 1,2] V tritt ein Rauschen mit demselben Offset auf, wie die Höhe der vom Generator erzeugten Spannung.

In einer realen Messung wurde die Lufttemperatur gemessen und mit DASYLab ausgewertet. Bei geringen Eingangsspannungsbereich von [-0,001; +0,001] V bishin zu [-0,01; +0,01] V trat kein Rauschen auf. Ab Eingangsspannungsbereich von [-0,011;+0,011] V tritt jedoch ein Rauschen mit einer Amplitude gleich der gemessenen Temperatur/Spannung auf. Daraus ergibt sich, dass die AD-Wandlerkarte National Instrument NI-DAQ nur für bestimme Spannungsbereiche rauschfrei bzw. störungsfrei messen kann.

In den durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurden die minimale von 20% der maximalen Wert des Spannungsbereichs für die NT-DAQ AD-Wandler experimentell bestimmt.

2.3 Komponenten der integralen Messtechnik

Zur Bestimmung der Kennlinien von Ventilatoren werden manchmal neben der Messtechnik zur Erfassung der Strömungsgrößen auch Hilfsaggregate benötigt, zB. Hilfsventilator, die das Anfahren definierter Betriebspunkte ermöglichen. Für die Kennlinien werden Volumenstrom, statische Druckerhöhung, Temperatur, Dichte, Drehzahl und Antriebsleistung benötigt. Zur Erlangung definierter Betriebspunkte der Kennlinien wird eine Drosselvorrichtung benötigt. Die einzelnen Komponenten zur Erfassung und Regelung werden nachfolgend beschrieben.

2.3.1 Der benutzte Ventilator

Der Ventilator wurde von der Firma Pollrich GmbH,Mönchengladbach, hergestellt. Das Laufrad hat zehn rückwärtsgekrümmte Kreisbogenschaufeln (Z=10) mit einem Schaufelwinkel von β_2 =41°, einen Außendurchmesser von D=722 mm und eine Breite von b=92,7 mm. Die Gehäusekontur beschreibt eine Spirale, die Gehäusebreite beträgt B=310 mm. Dieser Ventilator wird von einem Pendelmotor mit einer maximalen Leistung von P=30 kW angetrieben.



	Mess	größen	Prüfstandskomponente und Messgeräte	Bezeichnung / Hersteller / Typ Abmaße / sonstiges
1			Drosselkegel	
2			Normblende	$\beta = 0.6/0.82$
3			Schalldämpfer	
4			Reflexionsarmer Abschluss	
5	U	[V]	Kondensatormikrofon	Brüel&Kjaer Typ 4133
6			Zugangsklappe	
7			Schlitzrohrsonde	Brüel&Kjaer
8			Drehkanal	
9			Schrittmotor	SIG positec VRDM 397/50 LWC
10			Manschette	
11			Strömungsgleichrichter	
12			Ringkanal	
13	U	[V]	Kondensatormikrofon	Brüel&Kjaer Typ 4136
14			Übergangsstück	von Rechteck auf Kreisförmig
15				
16			Wägezelle mit Messprozessor	Z3H3, Hattinger Baldwin Messtechnik
17			Pendelmotor	30 kW
18			Ventilator mit Gehäuse	
19			Einlaufdüse	
20			Steuergerät für den Drosselkegel	
21			Rechner für die Aerodynamik	Pentium 2 MMX, 200 MHz, mit
22	T _E	[°C]	Temperaturmessgerät	Saturn 4010
24			AD-Wandler	
25			AD-Wandler	
26	р _ь	mbar	Digitalmanometer	Tradinco, Typ 2090-P A, 0-1100 mbar
27	dp _{Bl}	mbar	Digitalmanometer	Tradinco, Typ 2090-DP, 0-100 mbar
28	dp ₁	mbar	Digitalmanometer	Tradinco, Typ 2090-P, 0-100 mbar
29	dpa	mbar	Digitalmanometer	Tradinco, Typ 2090-P, 0-100 mbar
30			Initialisierung der Drückgeräte	
31	М	[Nm]	Drehmomentmessgerät	Hornel dig 200
32	n	[min ⁻¹]	Drehzahlmessgerät	MVD 2630A
33			Rechner für die Akustik	Pentium 3, 500 MHz, mit installiertem
34			Positioniersteuerung	TLC 511-F
35			Netzteil	225 W, 230~, 50 Hz
36			Signalverstärker	Brüel&Kjaer-Verstärker "Nexus"
	İ		Akustischer Kalibrator	Brüel&Kiaer Tvp 4340, 1000 Hz, 94 dB

Tabelle 2.5 Prüfstandskomponente und Messgeräte vgl. Sariaslan (2004)/2/

13

2.3.2 Die Druckmessung

Die Druckmessungen erfolgen über eine parallele GPIB-Schnittstelle, einmal durch Bohrungen in der Kanalwand und die Blende (zur Volumenstrombestimmung). Die erfassten Drücke lassen die Bestimmung aller Parameter des Volumenstroms Q_v sowie totalen Druck ptot und des Wirkungsgrads ? zu. Hier ist anzumerken, dass vor dem Ventilator atmosphärischer Druck herrscht.

2.3.3 Die Drehmoment- und Drehzahlmessung

Das Laufradmoment wird über eine RS232 serielle Schnittstelle mit Hilfe eines DMS-Aufnehmers ermittelt. Der Drehmomentaufnehmer Z3H3 von der Firma HBM ist mit dem Motorstator mit einer Hebelarm von 500 mm lang gebunden. Und kann das Drehmoment bis zu einem maximalen Wert von 95,5 Nm aufnehmen.

Die Drehzahlerfassung erfolgt über einen Analog-Eingang durch einen induktiven Sensor. Eine drehzahlproportionale Frequenz erhält man durch Erfassung einer am Umfang der rotierenden Welle angebrachten Markierung, die induktiv abgetastet wird. Das Prinzip des induktiven Sensors ist aus dem Bild 2.7. zu erkennen.



Bild 2.7 Prinzip des induktiven Drehzahlaufnehmers vg 15/

Im Magnetfeld eines Permanentmagneten um den, oder in unmittelbarer Nähe dessen, sich eine Spule mit N Windungen befindet, dreht sich ein ferromagnetisches Zahnrad (*Z* Zahnradanzahl) mit der mechanischen Kreisfrequenz ? . Wenn die Zahnspitze in der Nähe des Magnetpols ist, wird der magnetische Widerstand minimal, der magnetische Fluss hat den Wert B_{max}. Liegt der Magnetpol zwischen

den Zähnen ist der Fluss B_{min}. Den Fluss durch die Spule kann man in guter Nährung als sinusförmig annehmen.

$$B = \left(\frac{B_{\max} + B_{\min}}{2}\right) + \left(\frac{B_{\max} - B_{\min}}{2}\right) \cdot \sin\left(Z \cdot \mathbf{w} \cdot t\right)$$
(13)

$$B = B_0 + \widehat{B} \cdot \sin\left(Z \cdot \mathbf{w} \cdot t\right) \tag{14}$$

Die in der Spule mit der Querschnittsfläche A induzierte Spannung *u* beträgt demnach $u = N \cdot \hat{B} \cdot A \cdot w \cdot Z \cdot \cos(Z \cdot w \cdot t)$ (15) Die Spannung *u*, die man mit dem Drehzahlaufnehmer misst, weist also in ihrer

Amplitude und Frequenz ein drehzahlproportionales Verhalten auf.

2.3.4 Die Temperaturmessung

Die Temperaturmessung erfolgt über einen Analog-Eingang durch einen Thermoelement-Aufnehmer am Eintritt des Ventilators. wegen der geringen Temperaturerhöhung etwa 3°K ($=\frac{\max DRUCKERHÖHUNG_{Ein/Aus}}{1000}$ °C). Die Temperatur an der Blende unterscheidet sich von der Umgebungstemperatur nicht viel so dass alle Berechnungen im Bereich der Messblende mit der Umgebungstemperatur durchgeführt werden können.

2.3.5 Die Expansionszahl e

Für kompressible Medien, wie Luft, muss die Expansionszahl ϵ berechnet werden. Zur Berechnung von ϵ wird folgende empirisch ermittelte Gleichung nach EN ISO 5167-1 angewandt:

$$\boldsymbol{e} = 1 - (0,41+,035, \boldsymbol{b}^4) \cdot \frac{\Delta p_{Bl}}{\boldsymbol{k} \cdot (p_{Bar} + \Delta p_1)}$$
(16)

e: Expansionszahl

ß: Das Öffnungsverhältnis der Blende

?p_{Bl}: Druckdifferenz an der Blende

*p*_{Bar}: Umgebungsdruck

 p_l : Druck vor der Blende

2.3.6 Die Drosseleinrichtung

Zur Drosselung des Volumenstroms ist eine Drosselblende am Ende des Kanals eingebaut. Sie wird über eine Verstellspindel, angetrieben von einem Elektromotor, verstellt.

2.3.7 Die Durchflussmessung

Die Volumenstrommessung erfolgt gemäß *EN ISO 5167-1:2003* durch Messung des Druckabfalls in der Messblende, die sich auf der Druckseite des Ventilators in der Messstrecke befindet.



Bild 2.8 Prinzip der Blendenmessung vgl. /6/

Der Durchfluss *qm* berechnet sich aus dem Druckabfall ? pBlende an der Blende nach folgender Beziehung

$$qm = \frac{C}{\sqrt{1-b}} \cdot \boldsymbol{e} \cdot \boldsymbol{p} \cdot \boldsymbol{d}^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p_{Blende}} \cdot \boldsymbol{r}$$
(17)

d: Blendendurchmesser ? pBlende : Druckdifferenz an der Blende

Entsprechend berechnet sich der Volumendurchfluss qv aus Gleichung (18)

wobei:
$$qv = \frac{qm}{r}$$
 (18)

Reynoldszahl Re_D, bezogen auf den Rohrdurchmesser

$$\operatorname{Re}_{D} = \frac{4 \cdot qm}{\boldsymbol{p} \cdot D_{\operatorname{Rohr}} \cdot \boldsymbol{h}}$$
(19)

16

2.3.8 Der Durchflusskoeffizient C

Der Durchflusskoeffizient C ist eine Kenngröße, die für ein inkompressibles Fluid den Zusammenhang zwischen dem tatsächlichen und dem idealen, reibungsfreien, aus der Bernouilli-Gleichung abgeleiteten Durchfluss durch das Messgerät darstellt und für inkompressible Fluide durch die *Reader-Harris/Gallanher*-Gleichung definiert wird :

$$C = 0,5961 + 0,0261.\boldsymbol{b}^{2} - 0,216.\boldsymbol{b}^{8} + 0,000521.\boldsymbol{b}^{2.5} \left(\frac{10^{6}.\boldsymbol{b}}{\text{Re}_{D}}\right)^{0,7} + (0,0188 + 0,0063.A).\boldsymbol{b}^{3.5} \left(\frac{10^{6}}{\text{Re}_{D}}\right)^{0,3} + (0,043 + 0,080.e^{-10.L_{1}} - 0,123.e^{-7.L_{1}})(1 - 0,11.A).\frac{\boldsymbol{b}^{4}}{1 - \boldsymbol{b}^{4}} - 0,031 \left(\boldsymbol{M}_{2}^{2} - 0,8.\boldsymbol{M}_{2}^{-1,1}\right) \boldsymbol{b}^{1,3}$$
(20)

Dabei bedeuten:

 $\boldsymbol{b} = \frac{D_{Bl}}{D_{Rohr}}$

Durchmesserverhältnis von Blende zu Rohr (<1)

Reynoldszahl bezogen auf den Rohrdurchmesser

$$\operatorname{Re}_{D}$$

$$A = \left(\frac{19000 \cdot \boldsymbol{b}}{\operatorname{Re}_{D}}\right)^{0.8}$$

$$M_{2} = \frac{2 \cdot L_{2}}{1 - \boldsymbol{b}}$$

$$L_{1} = \frac{l_{1}}{D_{Rohr}}$$

$$L_2 = \frac{l_2}{D_{Rohr}}$$

das Verhältnis des Abstandes der Druckentnahme im Einlauf von der Blendenstirnseite zum Rohrdurchmesser

das Verhältnis des Abstandes der Druckentnahme im Auslauf

vonder Blendenrückseite zum Rohrdurchmesser (L_2 deutet den Bezug auf den Abstand von der Blendenrückseite an, L_2 würde sich auf den Abstand von der Blendenstirnseite beziehen).

Unterscheidung von D-, $\frac{D}{2}$ -, Flansch- und Eck-Druckentnahmen : <u>Eck-Druckentnahme :</u> L₁=L'₂=0 <u>D-, $\frac{D}{2}$ - Druckentnahme :</u> L₁=1, L'₂=0,47

<u>Flansch -Druckentnahme</u> $L_1 = L_2 = \frac{25,4}{D_{Rohr}}$

2.3.9 Die iterativen Berechnungen

Ein iteratives Berechnungsverfahren wird erforderlich, wenn Aufgaben nicht durch direkte Berechnungsverfahren gelöst werden können.

Bei Messblenden sind iterative Berechnungen immer anzuwenden bei der Berechnungen des Durchflusses q_m bei gegebenen Werten von $?, \mu, D, d, und ?p$. Das Prinzip ist, alle bekannten Werte der Gleichung

$$q_{m} = C \cdot \boldsymbol{e} \cdot d^{2} \cdot \frac{\boldsymbol{p}}{4} \cdot \left(1 - \boldsymbol{b}^{4}\right)^{-0.5} \cdot \left(2 \cdot \Delta \boldsymbol{p}_{Blende} \cdot \boldsymbol{r}\right)^{0.5}$$
(21)

wobei

C: Durchflusskoeffizient

in einem Term zusammenzufassen und die unbekannten Werte in dem anderen Term unterzubringen.

2.4 Programm zur aerodynamischen Datenakquirierung

Die aerodynamischen Kenngrößen am Ventilatorenprüfstand wurden bislang mittels eines LabView-Programms aufgenommen. Die Bedienung des LabView-Programms erfordert Kenntnisse im Umgang mit LabView selbst. Um Änderungen, wie z.B. das Einfügen eines neuen Messgerätes im LabView-Programm vornehmen zu können, reichen die normalen Kenntnisse nicht mehr aus. Ein weiterer Nachteil an dem vorhandenen LabView-Programm war es, dass man die Regressionsgraden für die Kalibrierung der Temperaturmessungen nicht richtig einstellen konnte, weil die Kommunikation zwischen dem Messgerät und dem Programm nicht richtig funktionierte. Zur besseren Kommunikation zwischen den Messgeräten und dem Programm sollte ein neues Programm mittels DASYLab für die Datenakquirierung und Auswertung der aerodynamischen Kenngrößen am Ventilatorenprüfstand erstellt werden. Diese Aufgabe wurde erweitert, indem die gemessenen Größen direkt in die benötigten Kenngrößen umgerechnet, und Online dargestellt wurden.

Es gibt heute viele Programme und komplette Systeme, deren Leistung zu beurteilen eine schwierige Aufgabe ist. Die Anforderungen, denen Messtechnik-Softwarepakete genügen müssen. Am Beispiel von DASYLab sollen die Konzeption, die Art der Bedienung und wesentliche Funktionen veranschaulicht werden.

2.4.1 Struktur des DASYLab Programms

Die aerodynamische Messung an einem Ventilatorprüfstand besteht aus der Datenakquirierung und Datenverarbeitung. Für die aerodynamische Datenakquirierung ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein DASYLab-Programm entwickelt worden. Dieses Programm gliedert sich in drei Abschnitte vgl.Bild 2.9



- Archivierung als ASCII-Format und
 - Weiterverarbeitung der Ergebnisse mit Excel

Bild 2.9 Struktur des DASYLab Programms für aerodynamische Datenakquirierung

2.4.2 Grafische DASYLab-Programmierung

Aufgrund des modularen Aufbaus von DASYLab kann man ein professionelles Messdatenakquirierungssystem einfach erstellen. Andere Möglichkeiten, die das Programm DASYLab bietet, sind die Benutzung der globalen Variabeln und Black-Boxes. Im Rahmen dieser Arbeit wurden alle Messgrößen und errechnete Größen im erstellten Akquirierungsprogramm als globalen Variablen verwendet. Die globalen Variablen bieten die Möglichkeit Werte während der Messung zu verändern und um Daten zwischen verschiedenen Schaltbildern, die nacheinander ablaufen. auszutauschen. Mit dem Black-Box-Konzept bietet DASYLab die Möglichkeit, Teilschaltbilder einzeln zu laden und abzuspeichern, um immer wieder vorkommende Teilaufgaben nicht jedes Mal neu zusammenstellen zu müssen. Mit Hilfe der Black-Box-Module kann man auf einfache Weise eigenen standardisierten Modulbausteine anlegen, die intern maßgeschneiderte Algorithmen ausführen, die DASYLab so nicht bereitstellt.

Bild 2.10 zeigt das programmierte Schaltbild , das in drei grundlegenden Bereiche unterteilt ist. Auf einzelnen Formeln der Formelmodule wird hier nicht eingegangen, weil diese ausführlich im Abschnitt 2.1 behandelt wurden





Bild 2.11 zeigt im Detail den Inhalt des Blackboxs "Datenerfassung" (Blackbox A im Bild 2.10). Die Messgrößen werden über die seriellen Schnittstellen eingelesen (1)-Details über die Einstellungen der Schnittstellen befinden sich im Anhang C. Im Skalierungsbereich (2) werden die Messgrößen umgerechnet, um realistische Werte bei den Anzeigern (3) anzuzeigen, und dann in globalen Variabeln abgespeichert , so können die Kenngrößen z.B. Q_v, Ptot berechnet und Online gezeigt werden. Die erfassten Messgröße lassen sich auch mitteln und in anderen globalen Variablen abspeichern (4). Die Anzahl der Mittelung wird beim Start der Messung angegeben (Siehe Abschnitt 2.4.3.).Der Einfluss der Mittelung auf Kennlinien wird im Kapitel vier behandelt. Das Exportmodul dient dazu, Daten zu übergeordneten Blackbox weiterzugeben.



Bild 2.11 Schaltbild für die Datenerfassung und Mittelung

Bild 2.12 zeigt im Detail den Inhalt des Blackboxs "Gas_gemittelt" (Blackbox B im Bild 2.10). Mit den gemittelten Messgrößen werden die Luftwerte z.B. Luftdichte, Expansionszahl, Viskosität usw. errechnet und in globalen Variabeln gespeichert, um danach im anderen Blackbox die Kenngrößen zu rechnen.

Masterarbeit 2005, Driss Harrou



Bild 2.12 Schaltbild für die Luftwerteberechnung mit gemittelten Messgrößen

Das Bild 2.13 stellt das Schaltbild dar, in dem die iterative Bestimmung des Volumenstroms bzw. der Rohrgeschwindigkeit durchgeführt wird. Zuerst wird der Volumenstrom berechnet (1). Aus diesem wird die Rohrgeschwindigkeit ermittelt (2), die wiederum dazu dient, eine Reynoldszahl zu berechnen und als globale Variabel abzuspeichern (3). Die Aufzählung und der Einhalt der Iterationsschritte erfolgen mit den Modulen im Bereich (4). Wenn die im Modul <u>C</u>angegebene Iterationsanzahl erreicht ist, wird der berechnete Wert von Volumenstrom durch das Exportmodul weitergegeben (5).



Bild 2.13 Schaltbild für die Volumenstrombestimmung mit iterativem Verfahren

Bilder 2.14 und 2.15 zeigen im Detail den Inhalt des Blackboxs "Auswertung mitt" bzw. "Datenausgabe" (Blackbox C bzw. D im Bild 2.10). Die Kenngrößen z.B. Q_v, ptot, P. werden aus den gemittelten und ungemittelten Messgrößen gerechnet und als globalen Variabeln abgespeichert. Dies dient zur Berechnung der dimensionslosen Kenngrößen φ , ψ , und η . Da diese letzten Kenngrößen zu keiner Rechnung dienen, werden sie nicht als globalen Variabeln angespeichert. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden Online mit Digitalanzeigern (für die ungemittelten Messgrößen) und in Tabellen und Grafik: Q_vf(ptot) vgl. Bilder 2.16 und 2.17.



Bild 2.14 Kenngrößenberechnungen mit gemittelten Messgrößen



Bild 2.15 Darstellung der Ergebnisse in Tabellen und Grafik

2.4.3 Benutzeroberflächen

Die Benutzeroberfläche des Messdatenerfassungssystems gliedert sich in 2 Bereiche, wie es in den Bildern 2.16 und 2.17 dargestellt wird:

A Online-Anzeigebereich

In diesem Bereich werden die erfassten und die berechneten Größen Online ohne Mittelung der Messgrößen gezeigt. Dies dient zur Bestimmung der Betriebspunkte während der Drosselung. Die Messunsicherheiten der Messung zwischen Berechnungen mit und ohne Mittelung der Messgrößen werden im nächsten Abschnitt ermittelt.

B Aufnahme-Anzeigebereich

Beim Start des Programms (Siehe *Bild 2.18*) bestimmt man die Anzahl der Mittelungen, die das Mittelung-Modul nach dem Aufnehmen der Messwerte durchführt. Mit den gemittelten Messgrößen werden alle für die Zeichnung der Kennlinie benötigten Rechnungen durchgeführt. Ein Vergleich zwischen einer Kennlinie ohne und mit Mittelung der Messgrößen wird in dem Abschnitt 4.1 erklärt. Das Programm enthält 2 Layouts, weil die Aufnahmetabelle nicht in einem einzigen Layout gezeigt werden konnte.







Bild 2.18 Anfangsparamtereingabe

Beim Start des Programms bekommt man das im Bild 2.18 gezeigte Fenster.

Nach der Eingabe der Startparameter kann das Pogramm gestartet werden. Unter den angelegten Dateinamen (1) werden alle erfassten und berechneten Größen abgespeichert. In der zweiten Zeile trägt man die Anzahl der zu mittelnden Blöcke auf. Da die Luftdichte von der Luftfeuchtigkeit abhängig ist, muss man die Luftfeuchtigkeit an einem Durchschnittswert schätzen und eingeben (3). Die Luftfeuchtigkeit könnte auch mit einen Feuchtigkeitsmessgerät gemessen und in das Programm eingegeben werden. Andere wichtige Angaben für die Berechnung der Kennlinie sind in den Feldern (4), (5) und (6) einzugeben. Und zwar der Blenden-, Rohr- und Laufraddurchmesser bzw. d_1, d_2 und d_lauf. Alle Werte müssen in Meter eingegeben werden.

2.4.4 Genauigkeit der Messungen

Die im Prüfstand benutzten Digitalmanometer von der Firma Tradinco mit Piezoresistivem Sensor weisen jeweils einen Messfehler<0,05 % v. E. innerhalb des Temperaturbereichs von 5.. 45°C einschließlich Hysterese, Linearitätsfehler, Wiederholgenauigkeit und Temperaturdrift auf **[gemäss Unterlagen der Firma tradinco].**

Eine genaue Untersuchung dieser Messfehler soll bei verschiedenen Betriebspunkten durchgeführt werden. Dafür wurden die Messgrößen für zwei Betriebspunkte Phi=0,023 und Phi=0,126 über 60 Sekunden aufgenommen und Mittelwert- und Standardabweichung als statistische Größen berechnet. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in folgenden Bildern gezeigt.



Dp_Blende über Aufnahmezeit bei n=1000 min⁻¹; phi=0,023

Bild 2.19 Druckschwankung in der Blende bei n=1000 U/min : f=0.023



Dp_Austritt über Aufnahmezeit bei n=1000 min⁻; phi=0,023







Bild 2.21 Druckschwankung vor der Blende bei n=1000 U/min; f =0.023



Drehmoment über Aufnahmezeit bei n=1000 min⁻¹; phi=0,023



Lufttemperatur über Aufnahmezeit bei n=1000 min⁻¹; phi=0,023





Dp_Blende über Aufnahmezeit bei n=1000 min⁻¹; phi=0,126





Dp_Austritt über Aufnahmezeit bei n=1000 min⁻¹; phi=0,126





Dp_1 über Aufnahmezeit bei n=1000 min⁻¹; phi=0,126





Drehmoment über Aufnahmezeit bei n=1000 min⁻¹; phi=0,126



Nach DIN 1319 Teil 1 wird die Genauigkeit einer Messung als Standardabweichung bezeichnet. Sie entspricht der Genauigkeit welche Genauigkeit eines Einzelwerts relativ zum Mittelwert. In Tabelle 2.6. sind die Genauigkeitsrechnungen für alle Messgrößen bei zwei Betriebspunkten gezeigt. Die Genauigkeit wurde in Prozent dargestellt, indem man die Standardabweichung der Messgröße durch die maximale Abweichung dividiert.

Beispiel: für den Druckbereich [0...30] **Pa** in der Messblende streut sich der Druck mit 19,5 **Pa**, d.h. mit einer *Genauigkeit* = $\frac{19,5}{30} = 15,3\%$. Während im Druckbereich [0...750] **Pa** beträgt die *Genauigkeit* = $\frac{7,62}{750} = 1\%$.

Aus der Tabelle 2.1. kann man beobachten, dass im Allgemeinen die Messgeräte höhere Genauigkeiten aufweisen, wenn der Messbereich breiter ist.

		Dp_Blende	Dp_Aus	Dp_1	Drehmoment	Temperatur
		[Pa]	[Pa]	[Pa]	[N.m]	[C°]
	Max.Abweichung	030	01104	01102	06	021,6
Phi1=0,023	Schwankungsbereich	10	45	80	0,13	1,2
	Mittelwert	19,5	1080	1069	5,9	21,28
	STABW	4,6	9,76	16,25	0,04	0,14
	Genauigkeit [%]	15,3	0,88	1,5	0,7	0,65
	Max.Abweichung	0750	0427	0387	017,36	022
Phi2=0,126	Schwankungsbereich	36	10	17	0,14	0,85
	Mittelwert	733	421	378	17,23	21,31
	STABW	7,62	1,93	3,72	0,04	0,1
	Genauigkeit [%]	1	0,45	0,96	0,23	0,5

Tabelle 2.6	Statistische	Berechnung	en
1000110 2.0.	0101101100110	Derconnung	211

3 Aerodynamischen Messungen

3.1 Vergleich zwischen zwei Messideen

In den Bildern 3.1 und 3.2 ist die Druckzahl ? über der Lieferzahl f bei druckseitigem Anschluss des Ventilators am Kanal aufgetragen. Dabei sind Drehzahlen 1000 U/min und 1500 U/min gefahren worden.

3.1.1 Dimensionslose Kennlinie mit Mittelung nach der Rechnung

In diesem Fall geht es um die Durchführung der Mittelung nach der Berechnung der Kenngrößen. Bei diesen Berechnungen wurden die großen Schwankungen der Messgrößen – vor allem die Drücke am Austritt des Ventilators, vor und an der Blende- nicht berücksichtigt. Die Rechnungen führen in diesem Fall zu der im nachstehenden Bild 3.1 dargestellten Kennlinie.

In einer dimensionslosen Normkennlinie ?(f) würde man erwarten, dass alle Kurven für verschiedene Drehzahlen aufeinander liegen, was im Fall ohne Mittelung der Messgrößen nicht vorkommt, vgl. Bild 3.1. Es wurde ein zulässiger Fehler von 5% festgelegt. Der Grund dafür ist die Genauigkeit der Berechnung d.h. die Berechnung der Volumenströme ohne Berücksichtigung der großen Schwankungen der Drücke.



Psi=f(Phi)

<u>Bild 3. 1</u> Dimensionslose Kennlinie-Fall-1: Mittelung nach der Messgröße in eine <u>Strömungsgröße</u>

3.1.2 Dimensionslose Kennlinie mit Rechnung nach der Mittelung

Hier werden alle erfassten Messgrößen zuerst gemittelt, um dann mit den gemittelten Werten die Kenngrößen zu berechnen. Bild 3.2 zeigt deutlich, dass die Kennlinien bei verschiedenen Drehzahlen aufeinander liegen. Es ist damit die Notwendigkeit einer ausreichenden Mittelung vor der Berechnung der Messgrößen gezeigt.



Bild 3.2 Dimensionslose Kennlinie-Fall-2: Mittelung der Messgrößen und anschließende Berechnung der Strömungsgrößen.

3.2 Reproduzierbarkeit der Messungen

3.2.1 Überprüfung der Reproduzierbarkeit der aerodynamischen Messungen

Für die Überprüfung der Reproduzierbarkeit der aerodynamischen Messungen mit dem neuen Datenakquirierungsprogamm wurde die Blendenscheibe mit dem Öffnungsverhältnis β 0,802 gegen eine andere Lochscheibe mit dem Öffnungsverhältnis β 0,6 ausgetauscht. Die Messungen wurden am selben Tag durchgeführt, damit exakt die gleichen Versuchsbedingungen vorlagen. Die nachstehenden Bilder vgl. Bild 3.3 und Bild 3.4 bestätigen die Reproduzierbarkeit der Kennlinien vor und nach dem Blendenwechsel.



Ptot=f(Q_v) bei n=1500 U/min ;40 Mittlungen ;Aufnahmezeit =34 s



Psi=f(Phi) bei n=1500 U/mn ;40 Mittlungen ;Aufnahmezeit =34 s

Bild 3.4 Reproduzierbarkeit-dimensionslose Kennlinie

Der Wirkungsgradverlauf zeigt, dass die Blende β =0.6, den Betriebsbereich stark einschränkt. Da die akustischen Untersuchungen auch weit vom optimalen Betriebspunkt des Ventilators durchgeführt werden sollen, ist die Verwendung der Blende ß=0.802 sinnvoll. Für die Untersuchung der Prognoseverfahren sind Betriebspunkte weit rechts vom optimalen Betriebspunkt notwendig

3.2.2 Messunsicherheiten

Da Messergebnisse mit der kleinen Messblende (β =0.6) nicht einen großen Bereich des Volumenstroms wie mit der großen Messblende (β =0.802) überdecken können, war es notwendig mit mathematischer Interpolation die Messunsicherheiten zu berechnen. Für einen vernünftigen Vergleich zwischen den beiden Messergebnissen wurden die Regressionsfunktionen ?(Ptot), f (Q_v) und η (f) für die große Messblende (β =0.802) mit Excel ermittelt. Und dann damit die neuen Kenngrößen bezüglich der kleinen Messblende gerechnet. Bilder 3.5 , 3.6 und 3.7 zeigen die Änderungen von ?, f und η vor und nach dem Blendenwechsel.





Bild 3.5 Änderung von Phi über Q v bei n=1500 min⁻¹


Relative Änderung von Psi über Ptot bei n=1500 min⁻¹



Die höchste Differenz für die Lieferzahl beträgt weniger als 0,9% und liegt damit innerhalb des Bereiches der in DIN 24163 festgelegten zulässigen relativen Messunsicherheiten, die eine Abweichung von maximal ±2% gestatten. Ebenso liegt bei der Druckzahl mit einem Maximum bei unter 0,8% keine Überschreitung der maximal zulässigen Messunsicherheiten von ±1.1% vor.



Absolute Änderung von Eta über Phi bei n=1500 min⁻¹



Da der Wirkungsgrad Eta vom totalen Druck, Volumenstrom, Drehzahl und Drehmoment abhängig ist, werden bei der Berechnung der absoluten Differenzen von Eta durch die Messunsicherheiten der einzeln gemessenen Variablen die errechneten Differenzen größer. Die Ergebnisse der Berechnung der absoluten Differenzen des Wirkungsgrads überschreiten die maximal zulässige Messunsicherheit von +5% nicht.

4 Frequenzanalyse

4.1 Einführung in die Frequenzanalyse

Die Frequenzanalyse von Zeitsignalen wird heute ausschließlich mit Rechnern bewerkstelligt, d.h. das Zeitsignal muss im Zeit- und Frequenzbereich durch diskrete Werte dargestellt werden. Nur diese kann ein Rechner verarbeiten.

4.1.1 Fourieranalyse

Nach Fourier kann jede Zeitfunktion f(t) als Summe von sinus- oder kosinusförmigen Zeitfunktionen unterschiedlicher Frequenz dargestellt werden.

$$F(\mathbf{w}) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\mathbf{w}} dt$$
(22)

Diskrete Fourier-Transformation

Die Diskrete Fourier-Transformation oder DFT ist ein Algorithmus mit dessen Hilfe die Fourier-Transformierte eines zeitdiskreten endlichen Signals berechnet werden kann. Die DFT wird in der Signalverarbeitung verwendet um die in einem abgetasteten Signal enthaltenen Frequenzen zu untersuchen.

4.1.2 Auftretende Effekte

A Aliasing

Um im Zeitbereich diskrete Werte zu erhalten, muss das Signal in Zeitabständen t (Abtastzeit) abgetastet werden. Die gesamte strukturelle Information wird nur dann erfasst, wenn man das **Abtasttheorem** beachtet, das besagt, dass die Abtastfrequenz **fa** =1/*t* mindestens gleich der doppelten im Signal vorkommenden höchsten Frequenz **fsmax** sein muss. $f_a \ge 2f_{smax}$

Bei Unterabtastung erhält man ein Fehlsignal, das sog. **Aliasingsignal** mit der Frequenz $f_{all} = f_a - f_s$, das nicht im ursprünglichen Signal enthalten ist und sehr störend ist. Abhilfe schafft ein Antialiasingfilter, das alle Frequenzen > $\frac{f_a}{2}$ herausfiltert.

B Leckeffekt

Ein anderer Effekt, der beim Übergang zur diskreten Fourier-Transformation (DFT) zu beachten ist, ist der so genannte Leckeffekt. Anschaulich kommt er dadurch zustande, dass ein diskretes Signal, das mit dem Rechner verarbeitet werden soll, immer nur aus endlich vielen Werten besteht ($N < \infty$). Die Abtastung des Spektrums mit der Frequenzauflösung $\Delta f = \frac{1}{Nt_a}$ (wobei t_a die Abtastzeit ist) führt zu einer periodischen Wiederholung im Zeitbereich, wobei die Periode der Beobachtungsdauer $N \cdot t_a$ –oder auch Block genannt- entspricht. Durch Sprünge an den Rändern des Beobachtungsintervalls werden zusätzliche Frequenzen erzeugt, was zu verfälschenden Frequenzkomponenten an den Abtaststellen der diskreten (DFT) führt. Aufgabe einer Fensterfunktion ist es, das Signal an den Blockrändern gegen Null laufen zu lassen, und den Block dadurch zwangsweise zu periodisieren. Das diskrete gefensterte Signal $x_w(t)$ wird in der Zeitebene durch eine Multiplikation des Signals x(t) mit der Fensterfunktion



 $x_w(t) = x(t) \cdot w(t)$

Bild 4.1 links Signal, mitte Fensterfunktion, rechts gefenstertes Signal

Gemäß dem Faltungstheorem entspricht der Multiplikation im Zeitbereich eine Faltung im Frequenzenbereich.

$$X_w(f) = X(f) * W(f)$$
⁽²⁴⁾

(23)

Theoretisch gesehen ist die Faltung eine Verschmierungsoperation. Das Spektrum $X_w(f)$ des gefensterten Signals entsteht somit aus einer Verschmierung des Signals X(f) mit dem Spektrum W(f) der Fensterfunktion.

4.2 Fensterfunktionen

Die mathematische Formulierung einer Fensterfunktion ist wie folgendes definiert:





Bild 4.2 Standard-Fensterfunktionen vgl.MATLAB 6.5

Wie gesehen, besteht ein Fenster aus der Summe einer DC Komponente und vier harmonische Terme. Die Koeffizienten der vier Standardfunktionen sind in der folgenden Tabelle gegeben.

Tabelle 4.1.	Fensterkoeffizienten vgl./7/
	•

	a0	a1	a2	a3	a4
Rechteck	1	-	-	-	-
Hanning	1	1	-	-	-
Hamming	1	0,84	-	-	-
Flat top	1	1,933	1,286	0,388	0,032

4.2.1 Eigenschaften einer Fensterfunktion

A Maximale Amplitude

Die maximale Amplitude kann aus der Summe der Fensterkoeffizienten berechnet werden.

$$Max(w(t)) = \sum_{i=0}^{n} a_i$$
(26)

B Overlapping

Wenn Fenster an Blöcke einer Zeitreihenfolge angewendet werden, wird ein signifikanter Teil des Zeitsignals ignoriertes. Aus diesem Grund können gefensterte Zeitdaten überlappend verarbeitet werden. D.h. eine einstellbare Anzahl der Werte wird in einem Datenblock in den nächsten Block übernommen.



C Amplitudenkorrektur

Da die einzelnen Bewertungsfenster bis auf das Rechteckfenster, das keine Signaländerung bewirkt, eine Verringerung der Energie des betrachteten Signalausschnittes verursachen, besteht hier die Möglichkeit, die Änderung der Amplitude durch einen Formfaktor *e* wieder auszugleichen.

Gängig sind das durchweg einheitlich definierte Hanning-Fenster mit einem Formfaktor e = 1,5. und das so genannte Flat-Top Fenster, von dem unterschiedliche Definitionen Anwendung finden mit entsprechend verschiedenen Formfaktoren (e = 3,82. am HP Analysator und e = 3,4286 unter DASYLab).vgl.Kameier (2001) /9/

D Mittelwertbildung

Eine Grundaufgabe der Signalanalyse ist die Bestimmung und Weiterverarbeitung eines gemessenen Signals. Wie das Beispiel in Bild 4.5. zeigt, sind Signale meistens von stochastischen Störungen überlagert. Zu ihrer Beseitigung benutzt man die schon mehrfach beschriebene Mittelwertbildung, die sowohl im Zeitbereich als auch im Frequenzbereich angewandt wird.



D.1 Mittelwertbildung im Zeitbereich

Sie erfolgt für eine Anzahl M von Zeitreihen (Abtastwerte der analogen Zeitfunktion x(t)) und dient der Verbesserung von Schätzwerten für die Zielgrößen der Messung

$$\overline{x}_{k} = \frac{1}{M} \sum_{l=1}^{M} x_{k}^{(l)} \qquad \qquad x_{k}^{(l)} \Rightarrow M \text{ verschiedene Zeitreihen (Zeitfenster)}$$
$$\overline{x}_{k} \Rightarrow \text{Mittelwert der k- ten Zeitfenster}$$

Für stochastische Signale erfolgt die Mittelung entweder sequentiell, d.h. jedes Zeitfenster x_k schließt nahtlos an die vorhergehende an, oder überlappend.

D.2 Mittelwertbildung im Zeitbereich

Die Mittelwertbildung im Frequenzbereich bedeutet die Mittelung von Spektren.

Bei der Verwendung eines Frequenzanalysators geht man nun so vor, dass man eine arithmetische Mittelung mehrerer hintereinander erfasster Amplitudenspektren mit quadratischer Einheit verwendet. Die Anzahl der Mittelung hängt dabei von der Güte des Signals, von der Frequenzauflösung und von der zur Verfügung stehenden Zeit ab, sie muss experimentell ermittelt werden und kann zwischen 3 und 1000 liegen. vgl.Kameier (2004) /9/ Im nächsten Kapitel wird der Einfluss der Anzahl der Mittelung untersucht

Bilder 4.6., 4.7., 4.8., zeigen, wie sich Mittelung auf die Geräusche auswirken. Hier wird ein akustisches Signal mit verschiedenen Mittlungszahlen gezeigt. Man sieht, dass sich die Abweichung durch die Mittelung von 2-mal bis 32-mal verkleinert hat.





Bild 4.8 Geräusch 32 mal gemittelt

Wie es in den Bild 4.6 bis Bild 4.8 zu sehen ist, spielt die Mittelung eine große Rolle bei der Unterdrückung der stochastischen Signalanteile

5.2.1 Übersicht über die typischen Standardfensterfunktionen

Die in diesem Abschnitt behandelten Fensterfunktionen sind die Recheck-, Hannund Flattopfunktion. Sie werden im Zeit – und Frequenzbereich verglichen.

Die Spektralfunktionen sind bei logarithmischer Skalierung jeweils auf ihre Maximalwerte normiert.

A Recheckfunktion (NOP)

Dieses Fenster wird aufgrund seiner Definition auch als "kein Fenster" (No Operation) bezeichnet. Bei der Anwendung dieses Fensters muss mit verstärkt auftretenden Leckeffekt gerechnet werden. Das Rechteck Fenster gezeigt in dem Bild 4.2. ist folgendermaßen definiert:

$$w(t) = \begin{cases} 1 \to 0 \le t \le T \\ 0 \end{cases}$$
(27)

Das Recheckfenster ist somit weniger für Identifikation von im Signal vorliegenden Frequenzkomponenten geeignet.

<u>B</u> Hanningfenster

Dieses Fenster bewertet das Signal mit der Hanning-Funktion. Es ist eines der am häufigsten verwendeten Bewertungsfenster. Das Hanningfenster gezeigt in dem Bild 4.2 ist wie folgt definiert:

$$w(t) = \begin{cases} 1 - \cos\left(2p \cdot \frac{t}{T}\right) \to 0 \le t \le T \\ 0 \end{cases}$$
(28)

Wie man das merkt, dieses Fenster ist die Summe vom Rechteckfenster und einem Kosinusfunktion mit der gleichen Amplitude.

Bild 4.5. zeigt das Betragsspektrum eines Sinussignals der Frequenz 10Hz und der Amplitude 1 V multipliziert im Zeitbereich mit dem Hanningfenster. Die Verwendung eines Hanningfenster ist angebracht, wenn in einem Signal eine oder mehrere Sinusschwingungen unbekannter Frequenz zu detektieren sind. Dieses Fenster ist für Frequenzgenauigkeit geeignet.



C Flattopfenster

Dieses Fenster kann hervorragend zu Kalibrierungszwecken eingesetzt werden, da es nur unbedeutende Amplitudenfehler produziert. Das Flattopfenster gezeigt in dem Bild 4.2 ist wie folgt definiert:

$$w(t) = \begin{cases} 1-1,933\cos\left(2\cdot \boldsymbol{p}\cdot \frac{t}{T}\right) + 1,286\cos\left(4\cdot \boldsymbol{p}\cdot \frac{t}{T}\right) - 0,388\cos\left(8\boldsymbol{p}\cdot \frac{t}{T}\right) \rightarrow 0 \le t \le T \\ 0 \end{cases}$$
(29)

Man merkt bei diesem Fenster, dass es die Summe aus dem Recheckfenster und vier harmonische Terme bildet.

Bild 4.6 zeigt das Betragsspektrum eines Sinussignals der Frequenz 10Hz und der Amplitude 1 V multipliziert im Zeitbereich mit dem Flattopfenster.

In den meisten Anwendungsfällen wird jedoch das Hanningfenster dem Flattopfenster vorgezogen, da seine Bandbreite schmaler ist.



5 Überprüfung des Bewertungsfensters auf die akustischen Kenndaten

Die Fenster, die in der Spektralanalyse benutzt werden, sind zahlreich und sind umfassend von F.J.Harris detailliert worden. vgl. Fredric J.Harris (1978)/10/. Bei der Benutzung eines Bewertungsfensters im Allgemeinen versucht man, die Abnahme der sekundären Lappen zu beschleunigen, indem man die Erweiterung des Hauptlappens minimiert.

Bei den in der Literatur vorgeschlagenen Fenstern, wird man sich bei vorliegender Arbeit für das Hanning- und Flattop-Fenster interessieren. Um die Auswirkung der Fenster im Spektralbereich zu begreifen, betrachtet man die folgenden Situationen, indem man dieselben akustischen Daten mit den Fenstern Hanning und Flattop bei verschiedenen Überlappungen und Mittelungen analysiert.

Vergleich der Ventilatorgeräusche in drei Bestpunkten

Zu untersuchen waren Geräusche im Kanal, die bei der Drehzahl des Ventilators n=1000 mn⁻¹, jeweils am optimalen Wirkungsgrad und zwei Betriebspunkte links und rechts vom Optimum, entstanden sind.

Wie aus Bildern .5.1 , 5.3., 5.5. zu ersehen ist, treten bei der Analyse mit Hanningfenster geringere Rauschpegel hervor. Diese wurden sogar bis zu 5dB wegen der relativen Bandbreite der Hanningfenster bezüglich des Flattopfensters gedämpft. Insofern hat die Bandbreite vom Hanningfenster einen niedrigen Wert verglichen mit der Bandbreite vom Flattopfenster. Die erst genannte Bandbreite Δf ist im Zusammenhang mit der Spektraldichte wie folgt darzustellen vgl.Kameier (2004) /9/

$$P_{\mathbf{w}}^{2}(\mathbf{w}) = \frac{P^{2}(\mathbf{w})}{\mathbf{e} \cdot \Delta f}$$
(30)

- $P_w(w)$: Spektraldichte der Druckschwankung
- P(w): Amplitudenspektrum der Druckschwankung
- *e*: Formfaktor bezüglich des benutzten Fensters
- Δf : Bandbreite im Frequenzbereich des Zeitfensters

Die Gesamtpegeldifferenzen betragen im Betriebspunkt f $_{opti_li}$ ~1,2 dB, im Betriebspunkt f $_{opti}$ ~2,3 dB, im Betriebspunkt f $_{opti_re}$ ~2,5 dB.

Die Terzpegelabweichungen in den Bildern *5.2, 5.4, 5.6.* zeigen, dass die Terzspektren gut übereinstimmen, wenn man bedenkt, dass die **DIN EN ISO 5136** je nach Terzmittenfrequenz 2dB bis 4,5 dB als Messunterschied angibt. Man merke auch, dass die Terzpegelabweichungen kleine Werte aufweisen, als die in dem Schalldruckspektren zu erkennen sind, und zwar die 5 dB. Diese ist aus dem Grund, dass bei den Terzberechnungen das Formfaktor e auftaucht. Es wird mit dem Formfaktor die Summe der AutoPowerSpecter APS-Pegeln für einen bestimmten Terzband korrigiert.











0% Überlappung.









Im gezoomten Bereich des Bilds 5.5. ist es deutlich die Vergleichbarkeit der ersten BFF bei 169 Hz zwischen dem Flattop- und dem Hanningfenster zu erkennen. Der blaue Peak , analysiert mit dem Flattopfenster, weist eine Abweichung von 0,4 dB gegenüber dem roten Peak auf. Deutlich zu ersehen ist auch die größere Bandbreite des Flattopfenster verglichen mit der von Hanningfenster.

Die Norm DIN EN ISO 5136 empfiehlt keine bestimmte Fensterungsart für die akustische Analyse. Das Hanningfenster hat sich für die akustischen Analysen bewährt, weil das Hanningfenster gegenüber den anderen Fensterungsarten eine hohe Genauigkeit im Frequenz- und Amplitudenbereich aufweist.

6 Überprüfung des Einflusses der Überlappung auf die akustische Analyse

In diesem Abschnitt interessiert man sich für die Einwirkung unterschiedlicher Überlappungen auf die akustische Datenanalyse.

Die wavedatei wird mit einer Abtastrate Fs=44.1kHz in einem Zeitfenster T eingelesen Im Zusammenhang mit der Blockgröße nFFT= 32768 lässt sich die Aufnahmedauer t_A folgendermaßen berechnen:

$$T = \frac{nFFT}{F_s}$$
(31)

Die Mittelungszeit *t* für eine bestimmte Mittelungszahl N kann folgendes dargestellt werden:

$$t = T + T \cdot (1 - \ddot{U}) \cdot (N - 1) \tag{32}$$

wobei Ü die Überlappung ist.

T-1-14					FFT 00700
I ANALIA N 1	verdielen der	IV/IITTEII INASZEITEN	nach i inerianni i	naen es-44 1kHz	n =
		111110101190201011			
	_				

	<u>N=60</u>
Überlappung	Mittelungszeit
[%]	[s]
0	44,58231293
25	33,62249433
50	22,66267574
75	11,70285714
98	1,619824036



Bild 6.1 Mittelungszeit über Überlappung für Fs=44.1kHz, nFFT= 32768, N=60

Im Bild 6.1 wird den Zusammenhang zwischen der Überlappung der Spektren und der Mittelungszeit. Man erkennt, dass sich die Mittelungszeit mit steigender Überlappung reduzieren lässt.

Im Folgenden werden aus Übersichtlichkeitsgründen nur die relativen Terzpegelabweichungen der gegenübergestellten Terzspektren aufgeführt. Die relative Terzpegelabweichungen für die 25%- 50%- 75%- und 98%- Overlapping werden auf 0%-Overlapping bezogen.



6.1 Überlappungen mit Hanningfenster





<u>Bild 6.3</u> Vergleich Überlappungen mit Hanningfenster , n=1000 U/min <u>f_{opt}=0.08</u>



Bild 6.4 Vergleich Überlappungen mit Hanningfenster , n=1000 U/min. f_{opt re}=0.086



Überlappungen mit Flattopfenster 6.2

Vergleich Überlappungen mit Flattopfenster , n=1000 U/min Bild 6.5. <u>fopt=0.08</u>

0.

0.0

0.8

0.0 0.4 0.4

Terzp 0.25

0.

0.1

0.

0.0









Durch die Overlapping gewinnt man die zu Null multiplizierten Signalanteile zurück. Im Rahmen der Mittelung der Spektren werden dann alle Signalanteile berücksichtigt. Die Bilder.6.2 bis 6.7. haben etwas gemeinsam. Betrachtet man sich die Terzpegelabweichung einer Terzmittenfrequenz –beim selben Betriebspunkt- für die Analyse mit unterschiedlichen Überlappungen, so fällt auf, dass sich dort kaum Abweichung ergeben.

Mit der Überlappung wird die Mittelungszeit reduziert

7 Einfluss der Mittelungszeit auf der Analyse

Zur Beurteilung dieser Frage werden Spektren bei verschiedenen Mittelungszeiten miteinander verglichen.

Die folgende Tabelle zeigt die Größe der aufgenommenen WAV-Dateien.

Tabelle 7.1. Vergleich der WAV-Dateiengößen bei verschiedenen Mittelungszeiten

Aufnahmedauer [Sekunden]	Dateigröße [MBytes]	Anzahl der Mittelungen AVG	Gesamtpegel [dB]
2,45	0,257	2	102,5
5,8	0,769	6	102,3
8,47	1,025	8	102,6
11,37	2,817	22	103,1
30	4,097	32	103,4
41	7,169	56	103,5
60	10,753	84	103,4

Bilder 7.1. und 7.2. zeigen die Autopowerspektren bei verschiedenen Mittelungszeiten.





\Unbewertete APS | Kanal: rechts | Frequenzband [0; 17226.5625] Hz Fenster: hanning | Überlappung: 0 % | k: 367.8405 Pa/EU | delta_f: 1.3458 Hz | f_ab :44100 Hz

f [Hz]



<u>Bild 7.4.</u> <u>Gegenüberstellung de Terzspegelabweichungen (Lp_{AVG=8}-Lp_{AVG=2})</u> 0 Hz – 12.5 kHz, n=1000 U/min, f_{op}=0.08, 0% Überlappung</u>



<u>Bild 7.5</u> Gegenüberstellung der Terzspegelabweichungen (Lp_{AVG=22}-Lp_{AVG=2}) <u>0 Hz – 12.5 kHz n=1000 U/min, f_{op}=0.08 . 0% Überlappung</u>





<u>Bild 7.7</u> <u>Gegenüberstellung der Terzspegelabweichungen (Lp_{AVG=56}-Lp_{AVG=2})</u> 0 Hz – 12.5 kHz. n=1000 U/min. f_{.op}=0.08 . 0% Überlappung



<u>Bild 7.8</u> Gegenüberstellung der Terzspegelabweichungen (Lp_{AVG=84}-Lp_{AVG=2}) <u>0 Hz – 12,5 kHz, n=1000 U/min, f_{op}=0,08, 0% Überlappung</u>

Über den gesamten Frequenzbereich betrachtet, sind große Abweichungen der einzelnen Spektren zu erkennen, wenn sich die Mittelungszeit ändert. Je kleiner die Mittelungszeit ist, desto größer sind die Schwankungen des Signals.

Mit Mittelungszeiten größeren werden diese Schwankungen reduziert. Im Ausschnitt von 160 bis 185 Hz sind diese Unterschiede sehr deutlich zu sehen. In allen Spektren des Bild 7.2 treten Peaks der ersten BFF bei 167 Hz hervor. Bei kleinerer Mittelungszeiten von AVG=2 bis AVG=8 weisen diese Peaks niedrige Werte auf verglichen mit Peakswerten bei AVG ab 22. Man stellt auch fest, dass ab 11 Sekunden-Aufnahmezeit die Signalschwankungen und die Gesamtpegel konstant bleiben. Die Terzpegelabweichungen in den Bildern 7.3. bis 7.8. weisen keinen großen Unterschied auf.

8 Reproduzierbarkeit der akustischen Messung

Im Folgenden wird die Reproduzierbarkeit der akustischen Messungen für drei Betriebspunkte vor und nach dem Blendenwechsel überprüft. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in den nachstehenden Bildern dargestellt.



<u>0 Hz – 12.5 kHz . n=1000 Ū/min. f=0.08</u>



\ Unbewertete APS | Kanal: links | Frequenzband [0; 17226.5625] Hz Fenster: hanning | Überlappung: 0 % | k: 342.0356 Pa/EU | delta_f: 1.3458 Hz | f_ab :44100 Hz







\Unbewertete APS | Kanal: links | Frequenzband [0; 17226.5625] Hz Fenster: hanning | Überlappung: 0 % | k: 342.0356 Pa/EU | delta_f: 1.3458 Hz | f_ab :44100 Hz 110

Die Bilder 8.1 bis 8.6 zeigen die Schalldruckspektren und ihre zugehörigen Terzspektren vor und nach dem Blendenwechsel (aufgenommen für die Drehzahl 1000 U/min und für drei Betriebspunkte). Wie erwartet, stimmen die aufgenommenen Spektren gut überein. Die Terzspektren weisen keine großen Unterschiede auf.

Den Messergebnissen kann man entnehmen, dass trotz des Umbaus des Versuchsprüfstandes die aufgenommenen Schalldruckspektren gut reproduziert werden können. Der Umbau des Versuchstandes wirkt sich nicht auf die akustischen Messungen aus.

9 Einflusses der Mikrofonposition auf die Geräuschanalyse

Im Folgenden wurden Geräusche im Drehkanal, die während der Drehung und des Stillstands bei einer bestimmten **Mikrofonposition** bei verschiedenen Untersuchung Betriebspunkten, untersucht. Eine des Einflusses der Drehkanaldrehung auf die Geräuschanalyse wurde von vgl. Sariaslan (2004)/2/. Es wurde ermittelt, dass die Drehkanalgeräusche das Nutzsignal nicht beeinflussten.

Um eine Vorstellung über die Drehkanalgeräusche bei Veränderung des Messortes zu erhalten, wurden Messungen in vier Positionen bei den Winkeln α =20°; α =140°; α =240° und α =260° durchgeführt. In den folgenden Bildern sind die Schalldruckspektren von 0 – 750 Hz dargestellt.





69











<u>Bild 9.4</u> Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0-750 Hz im Fernfeld <u>n= 1500 U/min. f_{op} =0.08</u>

Das Ergebnis im Bild 9.1. zeigen gute Übereinstimmung der Geräusche, die über den Umfang gemittelt wurden, mit den Geräuschen, die in einer bestimmten Mikrofonposition gemittelt wurden. In den Bilder Bild 9.1 und Bild 9.4. sind die drei ersten BFF zuerkennen. Es ist deutlich zu ersehen, dass die Pegel der BFF mit steigender Anzahl der Harmonischen abnehmen.

Kurven in Bild 9.2. und Bild 10.4 zeigen eine starke Mikrofonpositionsabhängigkeit der Pegeln ab die Frequenz f=500 Hz, die der Cut-On Frequenz entspricht (Cut-On-Frequenz (500 Hz), siehe Formel (33) vgl.Kameier (2001) /9/). Oberhalb der Cut-On-Frequenz tritt eine Abweichung der Spektren auf.

$$f_{co} = \frac{J}{2 \cdot \boldsymbol{p} \cdot R_{Rohr}} \cdot a\sqrt{1 - Ma^2} = 507 Hz$$
(33)

J:	Besselkoeffizient =1,8418
$a = \sqrt{\mathbf{k} \cdot \mathbf{R} \cdot T}$:	Schallgeschwindigkeit [m/s]
T:	Lufttemperatur [°K]
к:	Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten=1,4
R:	Gaskonstante= 287 [Nm/kg*K]

71

- 2.R_{Rohr}: Rohrdurchmesser = 0,396 m
- $Ma = \frac{U}{a}$: Machzahl

 $U = D_{Rohr} \cdot \boldsymbol{p} \cdot \boldsymbol{n}$: Umfanggeschwindigkeit im Laufrad [m/s]
10 Nahfeld- und Fernfeldmessungen verschiedener Betriebspunkte bei verschiedenen Drehzahlen in unterschiedlichen Mikrofonpositionen

10.1 Analyse der Schalldruckschwankungen im Nahfeld des Ventilators

Gemäß DIN 5136 wird die Messung des Schalldrucks des Ventilators im angeschlossenen druckseitigen Drehkanal durchgeführt, was hier als Fernfeldmessung bezeichnet wird. Für die Fernfeldmessung beträgt der Abstand L zwischen Mirkofon und Ventilator L=7*D (wobei D der Rohrdurchmesser ist) und wird im Drehkanal mit einem ½"-Mikrofon unternommen. Die Mikrofonebene befindet sich in Höhe der Ventilatorausblasöffnung und ist in einer Brüel&Kjaer-Schlitzrohrsonde montiert, welche sich im Drehkanal mit einer Geschwindigkeit von 1U/min dreht.

Zusätzlich Fernfeldmessungen zu den sind Messungen der Wanddruckschwankungen in der Nähe des Ventilatoraustritts durchgeführt worden, Nahfeldmessung bezeichnet werden. Die was als Messungen der Schalldruckschwankungen an der Messebene erfolgen mit einem ¼"-Mikrofon Typ Microtech, welches in vier Positionen in der Messebene aufnimmt. Die Rohrwand wurde mit vier Bohrungen - in vier verschiedenen Polarwinkeln (20', 140', 240' und 260')- vgl. Bild 10.1 von Durchmesser d=1mm versehen. Über die Bohrungen wurden Hülsen geklebt, so dass das ¼"-Mikrofon. platziert werden konnte. Es wurden drei verschiedene Betriebspunkte vernommen, wobei die Mikrofonposition für jeden Betriebspunkt verändert wurde.



Bild 10.1 Anordnung der Messpositionen für die Nahfeldmessung

Die Ergebnisse der Nahfeldmessungen sind in den folgenden Bildern dargestellt. Hinweis: Die schwarzen Kurven stellen die Ergebnisse der Messung an der Position 2 dar. Der Bohrungsdurchmesser an dieser Position beträgt 10 mm. Das Messmikrofon kann hier aufgrund der großen Bohrungsdurchmesser wandbündig angebracht werden. An allen anderen Positionen beträgt der Bohrungsdurchmesser 1 mm. Hier entstehen durch die verwendeten Mikrofonadaptern Volumen zwischen dem Messmikrofon und der Bohrung, dass dadurch sich Helmholtz-Resonator Frequenzen ausbilden.









15:09h 25.05.2005/PAK (5.2)







Die Bilder 10.2 bis 10.4 zeigen die Schalldruckspektren in dem Frequenzenbereich [0-20 kHz] mit dem entsprechenden gezoomten Fenster [0-1 kHz]. Auffällig an diesen Schalldruckspektren sind die breitbandigen Erhebungen um die Frequenz von 3 kHz (Bereich A). Diese Erhebung ist die Folge des entstehenden Helmholtz-Resonators. Der Helmholtz-Resonator entsteht durch das nicht wandbündige Abschließen der verwendeten Mikrofone und der damit entstehende Volumen in der Hülse. Mit dem Volumen in der Hülse der zwischen dem Mikrofon und der 1mm Rohrwandbohrung vorliegt, entsteht ein Helmholtz-Resonator. An der Position 2 (a₂=140°) wurde das verwendete Mikrofon wandbündig angebracht, so das kein Volumen für die Entstehung eines Helmholtz-Resonators vorlag. Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass die breitbandige Erhebung in dem Frequenzbereich um 3 kHz damit beseitigt werden konnte. Die Spektren im Frequenzbereich bis ca. 2 kHz sind für alle Positionen gleich.

Neue Mikrofonadapter wurden gefertigt vgl.Bild 10.7,.um einfache Nahfeldmessungen durchführen zu können. Diese sollten auch das auftreten von Helmholtz-Resonanz Frequenzen nicht ermöglichen vgl bild 10.5 und Bild 10.6 und





Bild 10.7. Anordnung der Messpositionen für die Nahfeldmessung

Im nächsten Abschnitt werden die detaillierten Ergebnisse (bis 1 kHz) der Nahfeld-Messungen vorgestellt. Die Interpretation der nun sinnvollen Messungen ist Aufgabe einer weiteren Forschungstätigkeiten, die sich an die vorliegenden Arbeit anschließen werden. Für die Analyse der Schalldruckschwankungen im Nah- und Fernfeld wurden Messungen in vier unterschiedlichen Umfangspositionen (Polarwinkel $a_1=0^\circ$, $a_2=20^\circ$, $a_3=140^\circ$, $a_4=260^\circ$) bei drei konstanten Drehzahlen ($n_1=1000$ U/min, $n_2=1500$ U/min und $n_3=2000$ U/min) und bei unterschiedlichen Betriebpunkten (f $_{op_li}=0,038$, f $_{op}=0,081$ und f $_{op_re}=0,087$) durchgeführt. Die Datenerfassung und für die spezielle Auswertungen wird das Prüfstandakustiksystem PAK VXI der MüllerBBM VibroAkustikSysteme GmbH mit einer maximalen Abtastrate von 52 kHz eingesetzt. Als Bewertungsfenster wurde für alle Messungen das Hanning-Fenster verwendet.

Die Bilder 10.9, 10.11, 10.16 und 10.17 bzw. die dem Anhang-A beigefügten Bilder A_{i,j} (i=1..9 und j=2; 4; 9; 10) sind die Schalldruckspektren und Terzspektren für die unterschiedlichen Mikrofonpositionen dargestellt. Die hohen Gesamtpegeln aller Mikrofonpositionen bei dem ersten eingestellten Betriebpunkt (f _{op_li} = 0,038) werden durch starke Drosselung hervorgerufen. Die Gesamtpegel der weiteren zwei Betriebspunkte (f _{op}=0,081 und f _{op_re}=0,087) weichen nicht stark voneinander ab. Die Schalldruckspektren zeigen, wie Terzspektren, die gleichen Ergebnisse.

Deutlich an den Ergebnissen der Fernfeldmessungen sind die positionscharakteristischen Merkmale ab die Frequenz 500 Hz zu erkennen. Ab diese Frequenz tritt die größte Abweichung zwischen den Schalldruckspektren, insbesondere zwischen den Mikrofonpositionen $a_1=0^\circ$ und $a_4=140^\circ$, mit etwa 8 dB, auf. Hier wird das auftreten von höheren akustischen Rohrmoden zu vermuten.

Vergleicht man die Pegel der Schalldruckspektren vom Nah- und Fernfeldmessungen für bestimmte Mikrofonpositionen vgl. Bilder 10.12 bis 10.15 bzw. die dem Anhang-A beigefügten Bilder A_{i,j} (i=1..9 und j=5..8), so zeigen die Schalldruckspektren der Nahfeldmessungen höhere Pegel auf. Vergleicht man dazu die Terzspektren die in den Bildern 10.16 bis 10.17 bzw. die dem Anhang-A beigefügten Bilder A_{i,j} (i=1..9 und j=9; 10) für alle Betriebspunkte dargestellt sind, so erkennt man deutlich, dass das Pegelniveau an der 3. Position a₃=140° immer den größten Pegelwert aufweist, als alle anderen Mikrofonpositionen. Eine Erklärung dafür könnten die auftretenden höheren akustischen Rohrmoden sein.

78

Der Vergleich der Nah- und Fernfeldspektren, die in den Bildern 10.8 und 10.10 bzw. A_{i.j} (i=1..9 und j=1; 3, siehe Anhang) dargestellt sind, zeigen, dass die Schalldruckpegeln des Nahfeldes in dem Frequenzbereich [0 - 2 kHz] deutlich über den Schalldruckpegeln des Fernfeldes liegen. Ab 2 kHz fallen die Schalldruckpegeln des Fernfeldes stärker ab als die des Nahfeldes.

In den Bildern 10.9 und 10.11 bzw. $A_{i,j}$ (i=1..9 und j=2; 4, siehe Anhang) sind die Schalldruckspektren des Nah- und Fernfelds für den Frequenzbereich [0 – 2 kHz], bzw. [0 - 800 Hz] dar-gestellt. Man erkennt, dass oberhalb der Grenzfrequenz die Schalldruckspektren unregelmäßige Verläufe aufzeigen, die durch das nicht ebene Wellenausbreitung entstehen.

In der Tabelle 10.1 sind die ermittelten Gesamtpegeln je nach Mikrofonposition, Betriebspunkt und Drehzahl angegeben und in den Bildern 10.18, 10.19 und 10.20 als Diagramme dargestellt.







<u>Bild 10.9</u> Gegenüberstellungen der Schalldruckspektren 0 Hz – 2 kHz Fernfeldmessung .n=1000 U/min. f og=0.081</u>







<u>Bild 10.11</u> Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Nahfeldmessung "n=1000 U/min, f _{op}=0.081 81



<u>Bild 10.12</u> Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition $a_1=0^{\circ}$, n=1000 U/min. $f_{.00}=0.081$







<u>Bild 10.14</u> Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a₃=140° n=1000 U/min. f _{op}=0.081



<u>Bild 10.15</u> Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a₄=260° n=1000 U/min. f _{op}=0.081







<u>Bild 10.17</u> Gegenüberstellung der Terzspektren) 0 Hz – 12.5 kHz Fernfeldmessung, n=1000 U/min, f op=0.081</u>

Tabelle 10.1 Gesamtpegeln im Nah- und Fernfeld in Abhängigkeit von Drehzahl und Mikrofonposition

n=1000 U/min

Mikrofonposition	a1=0°			a2=20°			a3=140°			a4=260°		
	GP Nahfeld	GP Fernfeld	? GP	GP Nahfeld	GP Fernfeld	? GP	GP Nahfeld	GP Fernfeld	? GP	GP Nahfeld	GP Fernfeld	? GP
Betriebspunkt	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
f _{op} =0,081	104,2	103,3	0,9	103,9	103,1	0,8	104,9	103,2	1,7	104,8	103,1	1,7
f _{op_li} =0,038	110	109,7	0,3	110,1	109,7	0,4	110,1	109,6	0,5	110,1	109,7	0,4
f _{op_re} =0,087	104,5	103,2	1,3	104,2	103,2	1	105	103,4	1,6	104,8	102,9	1,9

n=1500 U/min

Mikrofonposition	a1=0°			a2=20°			a3=140°			a4=260°		
	GP Nahfeld	GP Fernfeld	?GP	GP Nahfeld	GP Fernfeld	? GP	GP Nahfeld	GP Fernfeld	? GP	GP Nahfeld	GP Fernfeld	? G P
Betriebspunkt	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
f _{op} =0,081	110,6	109,4	1,2	110,3	109,4	0,9	111,4	109,2	2,2	111,1	109,2	1,9
f _{op li} =0,038	116,5	116,3	0,2	116,5	116,3	0,2	116,5	116,2	0,3	116,3	116,3	0
f _{op re} =0,087	111,1	103,2	7,9	110,8	103,2	7,6	111,5	103,4	8,1	111,4	102,9	8,5

n=2000 U/min

Mikrofonposition	a1=0°			a2=20°			a3=140°			a4=260°		
	GP Nahfeld	GP Fernfeld	? G P	GP Nahfeld	GP Fernfeld	? GP	GP Nahfeld	GP Fernfeld	? GP	GP Nahfeld	GP Fernfeld	? GP
Betriebspunkt	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
f _{op} =0,081	116,4	116,1	0,3	116,4	116,3	0,1	117,2	115,9	1,3	116,8	116,4	0,4
f _{op_li} =0,038	121,2	121,1	0,1	121,4	121	0,4	121,1	120,9	0,2	121,1	121	0,1
f _{op_re} =0,087	117	116,3	0,7	116,6	116,3	0,3	117,1	116	1,1	117,1	116,2	0,9



Gesamtpegel über Mikrofonposition bei n =1000 U/min

Bild 10.18 Gesamtpegel in Nah- und Fernfeld über Mikrofonposition. n =1000 U/min



Gesamtpegel über Mikrofonposition n=1500 U/min





Gesamtpegel über Mikrofonposition n=2000 U/min

Bild 10.20 Gesamtpegel in Nah- und Fernfeld über Mikrofonposition, n =2000 U/min

Bild 10.18 zeigt den Gesamtpegelverlauf in Abhängigkeit der Mikrofonposition für alle Betriebspunkte . Die Gesamtpegelverläufe für die Betriebspunkte f $_{op_re} = 0,087$ und f $_{op}= 0,081$ zeigen keinen Unterschied zwischen den beiden Nah- und Fernfeldmessungen. Bei den Nahfeldmessungen erkennt man, dass der Gesamtpegelverlauf Mikrofonpositionsabhängig ist. Ab der 2. Position (a₂=20°) steigt der Gesamtpegelverlauf um 1 dB an.

Bei dem Betriebspunkt $f_{op_li} = 0,038$ ist kein Unterschied zwischen den Nah- und Fernfeldmessungen in den aufgenommenen Gesamtpegeln zu erkennen. Bei den höheren Drehzahlen (Bilder 10.19, Bild 10.20) sieht der Verlauf der Kurven ganz anders aus. Hier ändern sich die Gesamtpegel im Nah- und Fernfeld von Betriebspunkt zu Betriebspunkt.

11 Prognoseverfahren

Dieses Kapitel stellt eine Einführung in die Anwendung aeroakustischer Modellgesetze dar. Es wird ein Überblick über das Prinzip und die Verfahrensweise zur Prognose der Geräuschentwicklung von Ventilatoren gegeben. Auf die Herleitung der Formeln wird hier verzichtet und auf die in dieser Arbeit zitierte Literatur verwiesen.

In der Abschlussarbeit von Sariaslan (2004)/2/ wurden MATLAB-Programme zum Kappen und Darstellen der Schalldruckspektren geschrieben. Diese Programme sind die ersten Schritte für das Prognoseverfahren. In diesem Abschnitt werden die vorhandenen MATLAB-Programme mit der kombinierten Frequenzgangkorrektur $C=C_1 + C_2 + C_{3,4}$ ergänzt, damit die in der DIN EN ISO 5136 aufgeführten Schallkenngrößen programmiert werden können.

11.1 Allgemeines Geräuschgesetz und spezifischen Schallkenngrößen

Ausgangspunkt einer gezielten Geräuschuntersuchung ist das fundamentale Geräuschgesetz laut Bommes (1994)./11/

$$L_{wt} = A^* + B^* \cdot \lg(Ma) \tag{34}$$

wobei:

$$A^{*} = L_{B} + L_{gs} + L_{us}$$
(35)

$$\boldsymbol{B}^* = 10 \cdot \boldsymbol{g} \tag{36}$$

Die einzelnen Pegelterme sind nach Bommes (1994)/11/ folgendermaßen definiert: Das Bezugsgrößenmaß:

$$L_{\rm B} = 193,7 + 10 \, \text{lg}\!\left(\frac{\rho a^3}{\rho_0 a_0^3}\right) \tag{37}$$

Das spezifische Geräuschflächenmaß:

$$L_{gs} = 10 \lg \left(\lambda \frac{A_2}{A_0} \right)$$
(38)

mit: Leistungsdichte
$$l = j \cdot y$$
 (39)

88

FH-D

Das spezifische Schallumsetzungsmaß:

 $Ra = \frac{R_e}{Ma}$

$$L_{us} = 10 \lg (k \cdot Ra^{\alpha}) = 10 \alpha \lg Ra + 10 \lg k = 10 \alpha \frac{aD_2}{v} - 40 dB$$
(40)

mit:

Bei dem spezifischen Schallumsetzungsmaß kann erfahrungsgemäß für der Term 10lg(k) -40 dB angenommen werden.

Ein derartiges Geräuschgesetz (34) wurde erstmals von Bommes angegeben. Dabei beinhaltet *A** den geschwindigkeitstunabhängigen Pegelanteil, während $B^* \cdot \lg(Ma)$ den geschwindigkeitsabhängigen Pegel mit dem Machzahlexponenten γ als Wichtungsfaktor beschreibt. γ ist das Maß für den Quellcharakter des Geräusches. Gleichung (36) beschreibt die sogenannte "akustische Kennlinie" des Ventilators. In Bild 11.1 ist eine solche akustische Kennlinie dargestellt.



Bild 11.1 Gesamtschallleistungs-Kennlinie

Mit Hilfe der Gesamtschallleistungs-Kennlinie kann man die noch unbekannten Größen ermitteln. Die am Modell noch zu ermittelnden Größen sind, dass Schallumsetzungsmaß Lus, das die akustische Güte des Ventilators beschreibt und der Machzahlexponent γ .

$$L_{us} = A^* - L_B - L_{gs} \tag{42}$$

$$\boldsymbol{g} = \frac{\boldsymbol{B}^*}{10} \tag{43}$$

(41)

11.2 Ermittlung der akustischen Kennlinie des Ventilators

Für die weiterführenden Untersuchungen zur Bestimmung der akustischen Kennlinie des Ventilators, wurden Geräusche im Kanal bei unterschiedlichen Drehzahlen (700, 900, 1200, 1500 und 1800 U/min) im optimalen Betriebspunkt φ_{op} =0,081 aufgenommen Die Auswertung dieser Geräusche wurde mit dem MATLAB-Programm: *Wav_Analyse_Programm_auto_3DAPS.m* durchgeführt.

Für das Prognoseverfahren wurden die Programme *Mat_Kap_verbessert.m* (Anhang D.1), *Mat_Lesen_darstellen_Kap_ohne_korrektur.m* (Anhang D.2) (Darstellung ohne Frequenzgangkorrektur) vervollständigt und ein neues Programm für die Darstellung der gekappten Spektren mit Berücksichtigung des Übertragungsmaßes der verwendeten Schlitzsonde geschrieben *Mat_lesen_darstellen_Kap_frequenzgangkorektur.m*. (Anhang D.3) Die Anwendung der Programme ist im Anhang B dokumentiert.

11.3 Aeroakustische Versuchsergebnisse

Die nachfolgenden Ergebnisse gelten für den Betrieb freiansaugend über Düse mit Drallregler bei Drallklappenstellung a = 0°

Die Bilder 11.2 und 11.3 zeigen für das jeweilige Optimum die Gesamtschalleistungspegel, die bei den Drehzahlen n= 700, 900, 1200, 1500 und 1800 min⁻¹ ermittelt wurden, ohne und mit Frequenzgangkorrektur Die beiden Ergebnisse weichen voneinander nicht bemerkenswert ab.

Aus den Bildern sind die Emissionswerte L_us und ? zu entnehmen.



Bild 11.2 Gegenüberstellung des Gesamtschalleistungspegels ohne Frequenzgangkorrektur C



Bild 11.3 Gegenüberstellung des Gesamtschalleistungspegels mit Frequenzgangkorrektur C



 \mathbb{A} AO: Axialventilatoren ohne Leitrad

<u>Bild 11.4</u> Gegenüberstellung des spezifischen Schallumsetzungsmaß Lus in Abhängigkeit vom Machzahlexponenten ?, ermittelt an Radialventilatoren unterschiedlicher Schnellläufigkeit und Axialventilatoren mit und ohne Leitrad .Bommes (1994)/11/

Aus dem Bild 11.4 ist ersichtlich, dass der Ventilator im Prüfstand im Vergleich zu anderen eine mittlere Position einnimmt. Das bedeutet, der Ventilator ist vom Rauschen her betrachtet weder sehr laut noch sehr leise.

12 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist ein DASYLab-Programm zur aerodynamischen Leistungsvermessung von Ventilatoren unter dem Gesichtspunkt der einfachen und Praktikablen Softwarepflege erstellt worden. Mit dem erstellten sich Kennliniendaten von Radialventilatoren an Programm lassen einem Normprüfstand aufnehmen und die Ventilatorkennlinie berechnen. Für die Speicherung der gewonnenen Ergebnisse wurde ein ASCII-Datenformat gewählt. Das erstellte Programm ist durch den modularen Aufbau für zukünftige Änderungen und Erweiterungen offen.

Der Wechsel der Normblende mit einem größeren Öffnungsverhältnis ermöglichte einen größeren Volumendurchsatz, d.h. die Ventilatorenkennlinie konnte bis weit rechts vom Optimalpunkt ermittelt werden. Der Vergleich der aerodynamischen und aeroakustischen Auswertungen vor und nach dem Blendenwechsel zeigt keinen Unterschied im Verlauf der Ventilatorenkennlinie und der aufgenommenen Schalldruckspektren bis hin zum Optimalpunkt auf. Die aerodynamischen und aeroakustischen Ergebnisse nach dem Blendenwechsel sind reproduzierbar.

Neben der aerodynamischen Messdatenerfassung wurden mehrere Signalverarbeitungsuntersuchungen der akustischen Daten durchgeführt. Untersucht wurden die Einflüsse der Bewertungsfenster (Hanning und Flattop) und die unterschiedlich eingestellten Überlappungen auf die Signalspektren. Jeder Datensatz, der mit den zwei Bewertungsfenstern analysiert worden ist, zeigt beim Schmalbandspektrum eine Abweichung von 5 dB an. Bei den Terzspektren liegt die Abweichung unter 2.5 dB. Diese Abweichungen werden durch die unterschiedlichen Formfaktoren sowie die unterschiedlichen Bandbreiten der beiden Bewertungsfenster hervorgerufen.

Mit der Überlappung kann man die Güte der akustischen Signalanalyse nicht verbessern. Die Überlappung bringt den Vorteil, dass die Messzeit minimiert werden kann.

Neue Mikrofonadapter wurden gebaut, um bestmögliche Messungen im akustischen Nahfeld durchführen zu können. Bei den alten Mikrofonadaptern wirkte sich das Volumen zwischen den Mikrofonkapsel und der Wandbohrung wie ein Helmholtz-Resonator aus und beeinflusste den Frequenzbereich um 3 kHz. Die Ergebnisse der akustischen Messungen an mehreren Umfangpositionen im akustischen Nahfeld bei unterschiedlichen Betriebspunkten zeigen, dass ab der Cut On Frequenz (507 Hz) sich der Verlauf der Spektren unterscheidet. Dies liegt daran, dass nach der Cut On Frequenz kein ebenes Wellenfeld mehr vorliegt. Die Gesamtpegel im akustischen Nahfeld sind positionsabhängig.

Die von Sariaslan (2004)/2/ geschriebenen MATLAB-Programme wurden so vervollständigt, dass eine Aussage für die Geräuschabstrahlung des hier verwendeten Radialventilators gemacht werden kann. Das Auftragen der akustischen Kenngrößen L_us = -43 dB und ? = 5,2 in dem von Bommes (1994)./11/ ermittelten Diagramm zeigt, dass der vermessene Radialventilator vom Rauschen her betrachtet weder sehr laut noch extrem leise ist. Dabei wird ? von der Frequenzgangkorrektur der Sonde nicht beeinflusst. Auf diesen MATLAB-Programmen kann im Hinblick auf das Forschungsvorhaben "Ähnlichkeitsgesetze" aufgebaut werden.

13 Literaturverzeichnis

- /1/ David Previti : Diplomarbeit:"Objektorientierte Programmierung eines Ventilatorenprüfstandes zur aeroakustischen Leistungsvermessung", Fachhochschule Düsseldorf, 2003
- /2/ Ertu Sariaslan: Diplomarbeit:"Messung und Prognose von Ventilatorgeräuschen", Fachhochschule Düsseldorf, 2004
- /3/ Willi Bohl, Technische Strömungslehre, Würzburg, 1994
- /4/ Werner Pohlenz: Grundwissen des Ingenieurs 10.Auflage,Leipzig,1981
- 15/ Dr.-Ing. Prexler, http://www.fh-landshut.de/~fprexle/lehre/messtechnik.html
- /6/ www.druckluft-effizient.de
- /7/ Technical Review, Windows to FFT Analysis (Part I)/1987/Nr.3.
- /8/ Chris Bochow Diplomarbeit:"Modellierung und Interpretation von STFT und anderen Transformationen für Signale aus Flugzwugtriebwerksversuchen",Uni-Berlin,1996
- /9/ Prof.Frank Kameier, Strömungstechnik und Akustik,FH-D,2001
- /10/ Fredric J.Harris, On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the DFT, Vol.66, No.1,1978
- /11/ L.Bommes/J.Fricke/K.Klaes (Hrsg): Ventilatoren, Essen, 1994

Anhang-A Ergebnisse der Nah- und Fernfeldmessungen





98







<u>Bild A1.5</u> Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a1=0°..n=1000 U/min. f op li=0.038</u>



<u>Bild A1.6</u> <u>Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a₂=20°.,n=1000 U/min. f_{op li}=0.038</u>



Bild A1.7 Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a₃=140°.,n=1000 U/min. f _{op li}=0.038



<u>Bild A1.8</u> <u>Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz</u> Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a₄=260°..n=1000 U/min. f _{op II}=0.038





Nahfeldmessung .n=1500 U/min. f op I=0.038










<u>Bild A2.5</u> Gegenüberstellungen der Schalldruckspektren 0 Hz – 2 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a1=0°..n=1000 U/min. f op re=0.087</u>



<u>Bild A2.6</u> <u>Gegenüberstellungen der Schalldruckspektren 0 Hz – 2kHz</u> Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a2=20°..n=1000 U/min. fop re=0.087</u>



<u>Bild A2.7</u> Gegenüberstellungen der Schalldruckspektren 0 Hz – 2 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a3=140°...n=1000 U/min. f op re=0.087



<u>Bild A2.8</u> Gegenüberstellungen der Schalldruckspektren 0 Hz – 2 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a4=260°..n=1000 U/min. f op re=0.087



<u>Nahfeldmessung. n=1000 U/min. f op re=0.087</u>



Fernfeldmessung. n=1000 U/min. f op re=0.087











Bild A3.5 Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a1=0°..n=1000 U/min. f op=0.081



Bild A3.6 Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung, Winkelposition a2=20°..n=1000 U/min. fop=0.081



<u>Bild A3.7</u> Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a₃=140°..n=1000 U/min. f _{op}=0.081



<u>Bild A3.8</u> <u>Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a₄=260°,.n=1000 U/min. f _{on}=0.081</u>



Fernfeldmessung. n=1000 U/min. f op re=0.081



<u>Fernfeldmessung. n=1000 U/min. f op re=0.081</u>





4.2 Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz <u>Fernfeldmessung ,n=1500 U/min, f op li=0.038</u>







Bild A4.5 Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a₁=0°.,n=1500 U/min, f _{op li}=0.038



<u>Bild A4.6</u> <u>Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a₂=20°.,n=1500 U/min. f_{op li}=0.038</u>



<u>Bild A4.7</u> Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a₃=140°..n=1500 U/min. f _{op I}=0.038



<u>Bild A4.8</u> <u>Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz</u> Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a₄=260°..n=1500 U/min. f op I=0.038</u>



<u>Nahfeldmessung .n=1500 U/min. f op li=0.038</u>













<u>Bild A5.5</u> <u>Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz</u> Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a1=0°...n=1500 U/min. f op re=0.087</u>



<u>Bild A5.6</u> Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a2=20°..n=1500 U/min. fop re=0.087



<u>Bild A5.7</u> Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a3=140°..n=1500 U/min. f op re=0.087



<u>Bild A5.8</u> Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a4=260°..n=1500 U/min. f op re=0.087














<u>Bild A6.5</u> Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a1=0°..n=2000 U/min. f op=0.081



<u>Bild A6.6</u> Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung, Winkelposition a2=20°..n=2000 U/min. fop=0.081



<u>Bild A6.7</u> Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a3=140°.,n=2000 U/min. f op=0.081



<u>Bild A6.8</u> Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a4=260°..n=2000 U/min. f op=0.081















<u>Bild A7.5</u> Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a1=0°..n=2000 U/min. f op li=0.038</u>



<u>Bild A7.6</u> Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung, Winkelposition a2=20°,.n=2000 U/min, fop Ii=0.038</u>



<u>Bild A7.7</u> Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a3=140°..n=2000 U/min. f op Ii=0.038</u>



<u>Bild A7.8</u> Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a4=260°..n=2000 U/min. f op Ii=0.038







Nahfeldmessung .n=2000 U/min. f op I=0.038











<u>Bild A8.5</u> Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a1=0°..n=2000 U/min. f op re=0.087



<u>Bild A8.6</u> Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Wink elposition a2=20°..n=2000 U/min. fop re=0.087



<u>Bild A8.7</u> Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a3=140°...n=2000 U/min. f op re=0.087



<u>Bild A8.8</u> Gegenüberstellung der Schalldruckspektren 0 Hz – 20 kHz Vergleich Nah- und Feldmessung. Winkelposition a4=260°..n=2000 U/min. f op re=0.087



Nahfeldmessung .n=2000 U/min. f op re=0.087



Anhang-B Bedienungsanleitungen der entstandenen Matlab-Programme

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die folgenden Programme vervollständigt

A Mat_kap_verbessert.m

- Auswahl der Mat-Datei, die mit Wav_Analyse_Programm_auto_3DAPS.m erstellt wurden.
- Eingabe der Kappenparameter (Drehzahl) und der Parameter für die Berechnung der Gesamtschallleistungspegeln
- In diesem Program werden die
- 1 Drehzahlabhängigen Peaks gekappt
- 2 Schalldruckpegel im Frequenzbereich von 0 Hz bis 44 Hz gleich 0 dB gesetzt
- 3 GP neu errechnet
- 4 Terzspektren neu errechnet
- 5 A-Bewertungen aktualisiert
- 6 Ma und Gesamtschallleistungspegel Lwt
- 7 MAT Dateien aktualisiert mit dem Dateinamen [Dateiname_kap.MAT]
- Das Programm bietet die Möglichkeit:
- 1 Drehzahlanhängige Peack zu kappen mit der Onlinedarstellung des momentanen Schalldruckspektrums nach dem Kappen
- 2 Beliebige Peack zu kappen

Nach der Durchführung des Mat_kap_verbessert.m erscheint das folgende Fenster

MAT-Ergebnisdatei zum Kappen wählen		
Suchen in:	🔁 DK_Mf_261103_opteta_1000_MAT_re 💌 🗢 🛍 🗂	* 📰 🕶
DK_MF_28	1103_opteta_1000_MP1_rel 1103_opteta_1000_MP2_re 1103_opteta_1000_MP3_re	
Dateiname:	DK_Mt_261103_optets_1000_KALI_re_re	Öttnən

Bild B.1	Auswahl der zu analysierenden Mat-Datei

Nach dem Auswählen einer MAT-Datei erscheint nacheinander verschiedene Menus, bei denen man die notwindigen Parameter für das Kappen und akustische Rechnungen eingibt vgl.Bild B.2.

4 Eingabe der Daten		×
Gebe für das Kappen der Drehtonabhängigen Peak 1000	s Die Drehza	ahl in [U/min] ein:
	ОК	Cancel
🥠 Geben Sie die Temperatur ein		×
Temperatur [°C] 23		
	ОК	Cancel
🛃 Geben Sie den Laufraddurchmesser ein		×
Laufraddurchmeser [m] 0.722		
	ОК	Cancel
A Cohon Cio dia LiafarzahluDhi ain		1
Geben sie die Lieferzani:Phi ein		×
Lieferzahl:Phi [] 0.081		X
Lieferzahl:Phi []	ОК	Cancel
Jieferzahl:Phi [] 0.081 Geben Sie die Druckzahl :Psi ein	ОК	Cancel
Seben Sie die Druckzahl :Psi ein Druckzahl :Psi [] 1.12	OK	Cancel
Seben Sie die Druckzahl :Psi ein Druckzahl :Psi [] 1.12	ОК ОК	Cancel
Seben Sie die Druckzahl :Psi ein Druckzahl :Psi [] 1.12 Geben Sie den Umgebunngsdruck pbare	OK OK	Cancel Cancel
Geben Sie die Druckzahl :Psi ein Druckzahl :Psi [] 1.12 Geben Sie den Umgebunngsdruck pbare Umgebunngsdruck: pbaro[mBar]	OK OK o ein	Cancel X Cancel X
Geben Sie die Druckzahl :Psi ein Druckzahl :Psi [] 1.12 Geben Sie den Umgebunngsdruck pbare Umgebunngsdruck: pbaro[mBar] 1011.1	OK OK Dein	Cancel Cancel

Bild B.2 Eingabe der Rechenparameter

Nach der Eingabe der oben nötigten Daten verfährt das Programm mit dem Kappen. Zuerst wird nach der eingegebenen Drehzahl die Peak der BFF aufgefunden. Nachdem Auffinden erscheinen hintereinander Plots mit Abfragefenster, ob die aufgefundenen Peaks gekappt werden sollen vgl. Blid B.3. Mit dem Klick auf "Ja" wird bei der aufgeführten Frequenz der Peak gekappt. Mit dem Klick auf "Nein" wird das neue Terzspektrum, die Ma und den Gesamtschallleistungspegel gerechnet und danach das Programm beendet und unter dem Dateinamen_kap.m, im Verzeichnis, wo sich die alte MAT-Datei befand, abgespeichert. Mit dem Klick auf "start Interaktiv" kann man mit dem Mauszeiger einen Peak manuell kappen. Nach jedem interaktiven Kappung erscheint das Abfragefenster "Noch mal interaktiv kappen". Mit "Ja" kann das interaktive Plotten fortgesetzt werden. Mit "Nein" wird das Spektrum abgespeichert. Beim Abspeicherung werden die Schalldruckpegel bis 44Hz auf 0 dB herabgesetzt. Somit wird der Messvorschrift der DIN EN ISO 5136 (Terzspektren von 50Hz bis 10kHz) nachgekommen.

Die abgespeicherte _kap_Mat-Datei kann mit den Dateien "Mat_lesen_darstellen_kap_verbessert" und "Mat_lesen_darstellen_Kap_frequenzgangkorektur" zur Auswertung dargestellt werden.



Bild B.3 Kappen der BFF-Peaks

B Mat_lesen_darstellen_kap_ohne_korrektur.m

Dieses Programm dient zur Darstellung der mit dem Programm "Mat_kap_verbessert.m" gekappten Spektren ohne Frequenzgangkorrektur.

Nach dem Start des Programms erscheint ein Fenster für die Auswahl der kap_MAT-Datei vgl. Bild B.4. Nach dem auswählen einer MAT-Datei hat man die Möglichkeit eine andere Mat-Datei auszuwählen oder das Programm zu beenden vgl. Bild B.5. Wenn man auf "JA" anklickt , zeigt das Programm die Grafen

- Zeitlich gemitteltes Schalldruckspektrum über der Frequenz
- Terzspektrum

Für die neu ausgewählte Mat-Datei. Wenn man auf "NEIN" klickt, zeigt das Programm die Grafik Lwt über log(Ma) und rechnet damit die Regressionsfunktion, die Korrelationsfaktor (R²) und die Abweichung zwischen den gemessenen und den mit der Regressionsfunktion gerechneten Gesamtschallleistungspegeln vgl. Bild B.6 Es werden auch die Emissionswerte L_us und ? für den untersuchten Ventilator.

MAT-Ergebni	isdatei zum Darstellen wählen		? X	
Suchen in:	a 190705_n700_MAT_re	▼ 🖬 🏝 💌		
190705_n700_MP1_re 190705_n700_MP1_re_kap				
Dateiname:	koeff_C3,4		Öffnen	
Dateityp:	MAT-files (*.mat)	Ab	brechen	

Bild B.4 Datei-Auswahlfenster

📣 MENU	
Weitere Ma	at-Datein darstellen
ja	
nein	
Bild B.5	Datei-Auswahlfenster


C Mat_Lesen_Darstellen_kap_Frequenzgangkorrektur.m

Dieses Programm dient zur Darstellung der mit dem Programm "Mat_kap_verbessert.m" gekappten Spektren ohne und mit Frequenzgangkorrektur.

Nachdem Start des Programms erscheint ein Fenster für die Auswahl der kap_MAT-Datei zur Darstellung der Schalldruckspektren, der Terzspektren. Nachdem Auswahl der darzustellenden MAT-Datei erscheint ein Menu, bei dem man zwischen der Optionen "Frequenzgangkorrektur durchführen" oder "unkorrigiert fortfahren" wählen kann vgl. Bild B.7. Beim Klick auf "unkorrigiert fortfahren", verhält sich das Programm wie das Programm "Mat lesen darstellen Kap ohne korrektur.m". Beim Klick auf "Frequenzgangkorrektur durchführen", führt das Programm die nach DIN EN ISO 5136 kombinierte Frequenzgangkorrektur durch. (näheres zu Frequenzgangkorrektur befinden sich im Bericht von .Sariaslan (2004)/2/. Für die Korrektur das Programm wird die Luftgeschwindigkeit angefordert vgl. Bild B.8



👃 Geben Sie die Strömungsg	jeschwindigkeit ein	×
Strömungsgeschwindigkeit [m/s] 7		
	ОК	Cancel
<u>Bild B.8</u>	Darstellungsoptionen	

Anhang-C Programmierung der benutzen Schnittstellen von DASYLab-Programm für Aerodynamik

Für die Messgrößenerfassung stehen 4 im Rechner installierte Interfacekarten zur Verfügung. Diese Interfaces werden durch die DASYLab-Module gesteuert.

GBIP INPUT (IEEE488-Eingang von National Instruments)-Modul

Dieses Modul dient der Messwert-Erfassung von Geräten mit einer seriellen IEEE488-Schnittstelle und wird zur Erfassung der 4 Drücke $P_{barom,}$? $P_{a.}$, ? P_{BL} , ? $P_{a.}$ und ? $P_{1.}$ benutzt. Die unten stehenden Bilder beschreiben die zu programmierenden Einstellungen des Interfaces.

5
Ok
brechen
Hilfe
and the second se

Bild C-1 Einstellen der GPIB-Interfacekarte

Der Befehl **ibrd (user)** im Feld Messdaten-Anforderung genügt fürs Einlesen von Daten in String. Beim Einstellen muss man beachten die richtigen Angaben über der betroffenen Hardware zu geben. Das folgende Bild zeigt die wichtigsten Einstellungen dafür.

Hardware Optione	n	X
Einstellungen Geräteadresse:	13	ОК
Sekundäradresse:	0	Abbrechen
Timeout:	7	

Bild C-2 Hardwareoptionen für Tradinco

In dieser Dialogbox werden diverse Einstellungen zum eigentlichen Messgerät vorgenommen:

- Die Geräteadresse gibt die am Messgerät eingestellte IEEE-Busadresse an.
- Die **Sekundäradresse** dient zur Einstellung einer eventuell zweiten Messgeräteadresse.
- Die **Timeout** in (s) gibt die Zeit an, die auf Daten vom Messgerät gewartet wird.

Andere Optionen müssen gesondert eingestellt werden (Sehen Sie folgendes Bild)

h fu sharanta	A. Calman da	OK
	Aurnanmemodus	
0,5000 Sekunden	Einzelwerte	Abbrechen
Transfereinstellungen		Hilfe
Fransferblocklänge pro Kanal	Transferpuffer	
1 🔹	8 KByte 💌	
Abfragerate 0.0500 💌 Sekunden	Ausgangsblocklänge	
Meßwerterfassung		-
Dispatcher	C Statusabfrage	
Meßdaten-Anforderung		1
Zuklisch senden	C Auf Aktion senden	



In dieser Dialogbox können Einstellungen vorgenommen werden, die die Abtastrate, die Übertragungsart und den Abtastmodus festlegen.

Alle diese Einstellungen beziehen sich nur auf die Interpretation der empfangenen Daten in DASYLab, nicht jedoch auf die Programmierung des angeschlossenen Messgerätes.

RS232-Eingang-Modul



Dieses Modul dient der Erfassung von Daten an Geräten mit Serieller Schnittstelle.

Im Prüfstand wird dieses Modul für die Erfassung des Drehmoments benutzt. Alle durch die RS232-Schnittstelle eingelesenen Messwerte werden automatisch mit Block- und Zeitinformationen versehen, die für die Datenverarbeitung in DASYLab notwendig sind.

		1		
Modulname: RS Master	00	Beschreibur	ig:	
	4 5 6	7 8 9		14 15
Kanalname: SeriellEin ()	Einheit:		Ok
Datenformat			1	Abbrechen
Meßdaten-Anforderung:				Hilfe
Meßdaten-Format:	a\r			
Meßdaten-Bestätigung:				
Optionen Zusatzda	aten Schr	nittstelle	RS232-Monitor	Laden
				Coolebarr

RS232-Setup Bild C-4-1

Wichtige Einstellungen der Schnittstelle stehen Sie im folgenden Bild:

Coloritotallar	Caro	-	OK
activitistette.	Lons	_	(hhashan
Bauchare:	9600	-	Automati
Detenbits:	7	•	Hile
Stoppbits:	2	*	34
Parität	keine	*	
Handsheke	ahne	•	
Pulfei Einstell	ingen		
Engengspuffet	4 KByte	•	

Bild C-4-2 RS232-

In dieser Dialogbox werden die Parameter der Schnittstelle eingegeben, die von diesem Modul in DASYLab benutzt wird. Und zwar :

- Schnittstelle: Dieser Eintrag legt die Schnittstelle fest. Gültige Einträge sind COM1 bis COM32 (man wählt den Eintrag COM9).
- **Baudrate**: In diesem Feld wird die Übertragungsrate eingestellt.300 Baud bis 57600 Baud sind möglich (man bestimmt auf 9600).
- Datenbits: Hier wird die Anzahl der Datenbits eingetragen (man trägt 7 ein).
- **Stopbits**: Hier wird die Anzahl der Stopbits eingestellt (2).
- **Parität**: Dieser Eintrag legt fest, ob ein zusätzliches Paritätsbit benutzt wird.(man stellt keine ein).
- Handshake: Damit kann man festlegen, ob und wenn mit welchem Kommunikationsprotokoll der Datenaustausch gesteuert wird. Hier wird auf ohne eingestellt.

Andere wichtige Einstellungen findet man in den seriellen Schnittstellen-Optionen.

[Ok
Reset Kommando:	-	Abbrechen
Start Kommando:	×	Hilfe
Stop Kommando:	×	
Datenanforderung notwendig	Ein Meßwert pro	
O Ja● Nein Abtastabstand:	 Kanal Kanalista 	
s	C Globale Einstellungen	
	Header-Größe	
Aniorderang wiedemolen		
C Ja C Nein	0 Char	
C Ja C Nein	lo Char	
C Ja C Nein Fehlerbehandlung Bei Timeout neu aufsetzen	Timeout: 0,00 s	

Bild C-4-3 RS232-Optionen

Diese Dialogbox erlaubt die Einstellung der Datentransfer-Parameter für das Messgerät und die Auswahl des Synchronisationsmodus.

Datenanforderung notwendig

- 1- Wenn man **Ja** wählt, sendet DASYLab den Datenanforderungs-String in dem Intervall an das externe Gerät, das in Abtastabstand eingestellt wurde. Außerhalb dieses Intervalls gibt DASYLab Blöcke von Nullen aus.
- 2- Wenn man Nein wählt, wartet DASYLab auf die Daten, die das externe Gerät irgendwann sendet. In diesem Fall kann die Abtastrate nicht vom Anwender beeinflusst werden
- Synchronisationsmodus: Hier wird die Globale Einstellung gewählt.

Analog-Input

 $\overline{}$

Das Modul greift direkt über den Treiber auf das Messgerät zu, das heißt, der hier eingestellte Kanal wird auch physikalisch mit der Messwerterfassungs-Hardware gemessen und der Wert dem Programm zur Verfügung gestellt.

Mit diesen Eingängen gewinnt man die Erfassung von der Temperatur am Ventilatoreintritt Te, sowie die Drehzahl n.

D Die Matlab-Programmierung

D.1 Mat_kap_verbessert

%-----

% Programm zum Kappen von Peaks in einem vorhandenen Schalldruckspektrum

% 01.06.2004 Sariaslan Ertugrul, Driss Harrou 01.07.05

%-----

% Nach dem Start die ses Programmes die .MAT Datei wählen, die mit dem

% Programm Wav_Analyse_Programm_auto.m erstellt worden ist.

% Aus dieser .MAT Datei werden die erforderlichen Daten zur Kappung

% aufgegriffen und weiterverarbeitet.

% In diesem Program werden die

- % Drehzahlabhängigen Peaks gekappt
- % Schalldruckpegel im Frequenzbereich von 0 Hz bis 44 Hz gleich 0 dB gesetzt
- % GP neu errechnet
- % Terzspektren neu errechnet
- % A-Bewertungen aktualisiert
- % Mazahl berechnet
- % Gesamtschallleistungspegel berechnet
- % .MAT Dateien aktualisiert mit dem Dateinamen [Dateiname_kap.MAT]

clear all close all clc: %Schaufelanzahl = 10;Z = 1.5;epsilon p_null = 2e-5;kapa = 1.4;R = 287;s 0 = 1;

clear F_gesamt aps_lin_mittel_dB_gesamt c1x c1;

[dateiname, pfad] = uigetfile('*.mat', 'MAT-Ergebnisdatei zum Kappen wählen'); load(strcat(pfad,dateiname));

figure(1) plot (F_gesamt,aps_lin_mittel_dB_gesamt) grid on xlim([0 7980])

hold on

%_____ % Für die Suche nach dem BFF ist die Eingabe des Drehzahles notwendig. % Damit wird der Suchbereich verkleinert. iv=0; prompt={'Gebe für das Kappen der Drehtonabhängigen Peaks Die Drehzahl in [U/min] ein:'}; dlg title='Eingabe der Daten'; num lines=1; def={'1000'}; Dz=inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def); Dz=str2double(Dz); button1 = 'Ja';%Eingabe der Temperatur, -----prompt = {'Temperatur [$^{\circ}C$]'}; dlg title = 'Geben Sie die Temperatur ein'; num lines = 1; def $= \{'23'\};$ Temperatur= inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def); Temperatur= str2double(Temperatur) %Eingabe des Laufraddurchmessers D_2 ----prompt = {'Laufraddurchmeser [m]'}; dlg_title = 'Geben Sie den Laufraddurchmesser ein'; num_lines = 1; def = $\{'0.722'\};$ D_2= inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def); D_2=str2double(D_2); %Eingabe des Lieferzahl Phi----prompt = {'Lie ferzahl:Phi [--]'}; dlg_title = 'Geben Sie die Lieferzahl:Phi ein'; num_lines = 1; def = $\{'0.081'\};$ Phi= inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def); Phi=str2double(Phi); %Eingabe der Druckzahl Phi-----prompt = {'Druckzahl :Psi [--]'}; dlg_title = 'Geben Sie die Druckzahl :Psi ein'; num lines = 1; $= \{ '1.12' \};$ def Psi= inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def); Psi=str2double(Psi); %Eingabe des Umgebunngsdruck Pbaro.----prompt = {'Umgebunngsdruck: pbaro[mBar]'};

```
dlg_title = 'Geben Sie den Umgebunngsdruck pbaro ein';
    num_lines = 1;
    def
           = \{ '1011.1' \};
    pbaro= inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
    pbaro=str2double(pbaro);
%------
    v = 1;
    while v == 1:
      if strcmp(button1,'Ja') | strcmp(button1,'Nein');
                           % iy ist die Anzahl des Obertones
      iy = iy + 1;
       BFF= iy * (z * Dz / 60); % BFF = n * z
       ix0 = round(BFF / delta_f); % Die BFF bfindet sich in der nähe des indexes ix0
       ix1 = ix0 - 15;
                            % Abgesucht wird der Bereich +/- 15 Linien um ix0
       ix2 = ix0 + 15;
       [MM,peak] = max(aps_lin_mittel_dB_gesamt(ix1:ix2)); % Maximum bei (ix0-
15)+peak mit dem Wert MM
      ix3 = (ix1 + peak - 1); % Bei ix3 befindet sich der Peak
       ix4 = ix3:
       BFF = round(F gesamt(ix3));
       BFF = num2str(BFF);
       text=strcat('Peak bei >>>',BFF, ' [Hz]<<< kappen?');
       button1 = questdlg(text, '', 'Ja', 'Nein', 'Start Interaktiv', 'Ja');
      end
      if strcmp(button1,'Ja');
         xx = ix3 - 1;
         while aps_lin_mittel_dB_gesamt(ix3) > aps_lin_mittel_dB_gesamt(xx);
           xx = xx - 1:
                           % Es wird im linken Teil des Peaks der Wert gesucht, dessen ...
                           % Nachfolger größer als dieser ist.
           ix3 = ix3 - 1;
                           % ix5 ist am linken Teil des Peaks der Minimalwert
            ix5 = ix3;
         end
                            % ix4 ist nur ein Hilfsindex
         xy = ix4 + 1;
         while aps_lin_mittel_dB_gesamt(ix4) > aps_lin_mittel_dB_gesamt(xy);
                            % Es wird im rechten Teil des Peaks der Wert gesucht, dessen
           xy = xy + 1;
            ix4 = ix4 + 1; % Nachfolger größer als dieser ist.
                           % ix6 ist am rechten Teil des Peaks der Minimalwert
            ix6 = ix4:
         end
      end
      if strcmp(button1,'Nein')
         break
```

...

end

```
button3 = 'Ja':
       if strcmp (button1, 'Start Interaktiv') % Falls nochmal interaktiv gekappt werden soll,
wird hier gestartet
          iz = 0:
          while button3 == 'Ja'
          iz = iz + 1;
          close all
          plot(F_gesamt,aps_lin_mittel_dB_gesamt);
          xlim([0 1000])
          grid on
          ax=gca;
          child = get(ax,'Children');
          rect = getrect(ax);
                                 % Mit der Maus kann nun ein rechteck im Plot gezogen
werden
          xdata = get(child,'Xdata');
          ydata = get(child, 'Ydata');
          [MM1,ix8] = min(abs(xdata-rect(1)));
          [MM1,ix9] = min(abs(xdata-(rect(1)+rect(3))));
          [MM1,peak1] = max(ydata(ix8:ix9));
          ix10 = ix8 + peak1 - 1;
          ix11 = ix10:
          xv = ix10 - 1;
          while aps_lin_mittel_dB_gesamt(ix10) > aps_lin_mittel_dB_gesamt(xv);
            xv = xv - 1:
            ix10 = ix10 - 1;
            ix12 = ix10:
          if xv == 0
            ix12 = 1:
            break
          end
          end
          xw = ix11 + 1;
          while aps_lin_mittel_dB_gesamt(ix11) > aps_lin_mittel_dB_gesamt(xw);
            xw = xw + 1;
            ix11 = ix11 + 1;
            ix13 = ix11;
          end
          ix14 = ix12 : 1 : ix13;
          st_ia = (aps_lin_mittel_dB_gesamt(ix13) - aps_lin_mittel_dB_gesamt(ix12)) / (ix13)
- ix12); % die Steigung (st) der Geraden von der Stelle ix5 bis ix6
```

% m = (y2-y1)/(x2-x1)

```
of_ia = aps_lin_mittel_dB_gesamt(ix12) - st_ia * ix12; % offset der errechneten
Geraden n=y1-m*x1
                      peak_kap_ia = st_ia * ix14 + of_ia;
                                                                                                                                     % Die neuen peak-Werte
                      aps_lin_mittel_dB_gesamt(ix12:ix13) = peak_kap_ia;
                                                                                                                                                         % Die neuen Peak-Werte
werden hier ins APS geschrieben
                      plot(F_gesamt,aps_lin_mittel_dB_gesamt);
                                                                                                                                                % Der Plot wird aktualisiert
                      xlim([0 1000])
                      grid on
                      button3 = questdlg(' Nochmal Interaktiv kappen ?', '', 'Ja', 'Nein', 'Ja');
                      if strcmp (button3, 'Nein')
                            break
                      end
                   end
                 end
                 if strcmp (button3, 'Nein')
                      break
                 end
                 if aps lin mittel dB gesamt(ix1 + peak - 1) - aps lin mittel dB gesamt(ix5) < 3 \&
aps_lin_mittel_dB_gesamt(ix1 + peak - 1) - aps_lin_mittel_dB_gesamt(ix6) < 3;
                       % Als Peak werden nur solche aufgegriffen, dessen Spitzenwert von dem am Rand
liegenden Minimalwert (ix5 und ix6)
                      % größer als 3 dB abweichen. Sonst wird eine Abfrage getstartet, ob trotzdem
fortgesetzt werden soll.
                      % Spitzenwert - Minimalwert (links) < 3 & Spitzenwert - Minimalwert (rechts)
< 3
                       button2 = questdlg('Es scheint, als ob kein Peak mehr zum Kappen vorhanden ist.
Trotzdem fortfahren', 'Achtung !!!','Ja', 'Nein', 'Start Interaktiv', 'Nein');
                       if strcmp(button2,'Start Interaktiv');
                             button1 = 'Start Interaktiv':
                       end
                       if strcmp(button2,'Ja');
                              ix7 = ix5 : 1 : ix6:
                             st = (aps\_lin\_mittel\_dB\_gesamt(ix6) - aps\_lin\_mittel\_dB\_gesamt(ix5)) / (ix6 - aps\_lin\_mittel\_gesamt(ix5)) / (ix6 - aps\_lin\_mittel\_dB\_gesamt(ix5)) / (ix6 - aps\_lin\_gesamt(ix5)) / (ix6 -
ix5); % die Steigung (st) der Geraden von der Stelle ix5 bis ix6
                                                                                                                                                  \% m = (y2-y1)/(x2-x1)
                             of = aps lin mittel dB gesamt(ix5) - st * ix5; % offset der errechneten Geraden
n=y1-m*x1
                             peak kap = st * ix7 + of;
                                                                                                                   % Die neuen peak-Werte
                             aps lin mittel dB gesamt(ix5:ix6) = peak kap; % Einbau der neuen Peak-
Werte ins APS
                              figure (1)
                             plot(F_gesamt,aps_lin_mittel_dB_gesamt, 'r')
                       end
```

```
if strcmp(button2,'Nein');
           break
         end
      else v == 1;
         if strcmp (button3, 'Nein')
 end
         end
         ix7 = ix5 : 1 : ix6;
         st = (aps_lin_mittel_dB_gesamt(ix6) - aps_lin_mittel_dB_gesamt(ix5)) / (ix6 - ix5);
% die Steigung (st) der Geraden von der Stelle ix5 bis ix6
                                                         \% m = (y2-y1)/(x2-x1)
         of = aps_lin_mittel_dB_gesamt(ix5) - st * ix5; % offset der errechneten Geraden
n=y1-m*x1
         peak_kap = st * ix7 + of;
                                            % Die neuen peak-Werte
         aps_lin_mittel_dB_gesamt(ix5:ix6) = peak_kap; % Einbau der neuen Peak-Werte
ins APS
         figure (1)
         farben = ['r' 'k' 'g' 'm' 'c' 'b' 'r' 'k' 'g' 'm' 'c' 'b' 'r' 'k' 'g' 'm' 'c' 'b'];
         plot(F gesamt, aps lin mittel dB gesamt, 'color', farben(iy));
      end
    end
  end
%------
aps_lin_mittel_Pa_gesamt = (10.^(aps_lin_mittel_dB_gesamt/20))*p_null;
aps lin mittel dB gesamt(1:34.:) = 0:
                                                               % Schalldruckpegel 0
Hz bis 44 Hz = 0, da Terzbandeckbandfrequenz von 50 Hz = 44,25 Hz
                                                                              ..
aps_lin_mittel_Pa_gesamt(1:34,:) = p_null;
                                                                       "
                                                                %
gp_aps_lin_mittel_Pa_gesamt = sqrt(1/epsilon * sum(aps_lin_mittel_Pa_gesamt.^2));
gp_aps_lin_mittel_dB_gesamt = 20. * log10(gp_aps_lin_mittel_Pa_gesamt ./ p_null);
%------
%- Frequenzspanne ermitteln
f min = 0;
%- Theoretische Maximalfrequenz
f max th = abtastrate / divisor;
%- Maximalfrequenz, die mit delta f erfasst wird
```

```
f_max = f_max_th - mod(f_max_th, delta_f);
```

%- delta_f passt n-mal in f_max, es gibt aber n+1 Stützstellen $n_f = f_max / delta_f + 1;$ %- Matrix mit den abgedeckten Frequenzen frequenzen = linspace(f_min, f_max, n_f); %- Nenn-Terzmittenfrequenzen f_mn = [10 12.5 16 20 25 31.5 40 50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000 2500 3150 4000 5000 6300 8000 10000 12500 16000 20000]; %- Zu f mn zugehörige dB-A-Werte %- Korrekturwerte für die A-Bewertung nach DIN EN 60651 dba_stuetz = [-70.4 -63.4 -56.7 -50.5 -44.7 -39.4 -34.6 -30.2 -26.2 -22.5 -19.1 -16.1 -13.4 -10.9 - 8.6 - 6.6 - 4.8 - 3.2 - 1.9 - 0.8 0 0.6 1 1.2 1.3 1.2 1 0.5 - 0.1 - 1.1 - 2.5 - 4.3 - 6.6 - 9.3]; %- Spline für die A-Bewertung erzeugen %- Es wird aufgrund der dbA-Stützstellen und des Frequenzbereiches %- "frequenzen" eine Ausgleichskurve erzeugt und für jeden Frequenz-%- wert ein dBA-Korrekturwert abgelegt Lp_A_spl_gesamt = (spline(f_mn, dba_stuetz, frequenzen))'; %- A-Bewertung aps_lin_mittel_dB_A_gesamt = aps_lin_mittel_dB_gesamt + Lp_A_spl_gesamt; %- Amplituden aus aps_lin_mittel_dB_A_gesamt für gp_ges in dB(A) amp_A_Pa_gesamt = 10.^(aps_lin_mittel_dB_A_gesamt ./ 20) * p_null; gp_lin_A_Pa_gesamt = sqrt(1/epsilon * sum(amp_A_Pa_gesamt.^2)); gp_aps_lin_mittel_dB_A_gesamt = 20. * log10(gp_lin_A_Pa_gesamt ./ p_null); %----f mn a %- Erste beachtete Terz (Nenn-Frequenz), = 16: %- letzte beachtete Terz (Nenn-Frequenz); f mn e = 12500;%- Stufensprung für die Normreihe R10 $= 10^{(1/10)};$ q $f_abbrech = f_mn_e * sqrt(q);$ f m start = 10; %- Erste Terzmittenfrequenz i = 1: $f_m(1) = f_m_start;$ while f $m \le f$ abbrech %- exakte Terzmittenfrequenzen i = i + 1: %- berechnen $f_m(i) = f_m(i-1) * q;$ end %- while-Anweisung $index_a = find(f_mn == f_mn_a);$ $index_e = find(f_mn == f_mn_e);$ f_mnenn = f_mn(index_a : index_e);

%- Vorgegebenen Terzmittenfrequenzbereich aus f_mn entnehmen %- Start bei f_mn_a %- Ende bei f_mn_e index_a = find(f_mn == f_mn_a); index_e = find(f_mn == f_mn_e);

f_mnenn = f_mn(index_a : index_e);

%- Auf den Bereich f_mn_a bis f_mn_e angepasste exakte Mittenfrequenzen
%- Mittenfrequenzen des vorgegebenen Bereiches holen
f_m = f_m(index_a : index_e);

%- Zugehörige Bandeckfrequenzen f_1 und f_2 berechnen for i = 1 : length(f_m) $f_1(i) = f_m(i) / sqrt(q);$ $f_2(i) = f_m(i) * sqrt(q);$ band(i) = f_2(i) - f_1(i); end %- for-Schleife

%- Aufgrund von f_mn_a und f_mn_e und den errechneten %- Bandeckfrequenzen steht nun die Frequenzspanne fest f_start = f_1(1); f_ende = f_2(length(f_2));

h = 0;%- Für jedes einzelne Terzband werden die Linien addiert. for i = 1 : length(f_m)

%- Suche die Indizes der Frequenzen, die in das jeweilige Band %- hineinpassen. terz i = find (F gesamt >= f 1(i) & F gesamt < f 2(i));

```
%- Anzahl der Frequenzlinien im aktuellen Terzband
terz_i_anz = length(terz_i);
tabelle(i,1) = f_mnenn(i);
tabelle(i,2) = f_m(i);
tabelle(i,3) = f_1(i);
tabelle(i,6) = f_2(i);
%- Prüfen, ob das Band gefüllt ist
if (F_gesamt(terz_i(1)) - f_1(i) <= delta_f) & (f_2(i) - F_gesamt(terz_i(terz_i_anz)) <=
delta_f)
% f_1 enthält Informationen über die verwirklichten Terzbänder
tabelle_inhalt = ['f_mnenn | f_m | f_1 | f_1_ist | index_f_1 | f_2 | f_2_ist | index_f_2 |
Anz.Linien | Lp_Terz_dB | Lp_Terz_dB(A)'];
tabelle(i,4) = F_gesamt(terz_i(1));
tabelle(i,7) = F_gesamt(terz_i(terz_i_anz));
```

```
tabelle(i,8) = terz_i(terz_i_anz);
     tabelle(i,9) = terz_i_anz;
     for k = 1 : terz_i_anz
        summe_terz = sum(aps_lin_mittel_Pa_gesamt(terz_i(1) : terz_i(terz_i_anz)).^2);
       korrigiert = summe_terz / epsilon;
       wurzel
                = sqrt(korrigiert);
       amp\_terz\_dB(i) = 20 * log10 (wurzel / p\_null);
     end %- for-Schleife
     tabelle(i,10) = amp\_terz\_dB(i);
  else %- Band nicht gefüllt
     tabelle(i.4) = 0;
     tabelle(i,5) = 0;
     tabelle(i,7) = 0;
     tabelle(i,8) = 0;
     tabelle(i,9) = 0;
     tabelle(i, 10) = 0;
  end %- if-Anweisung
end %- for-Schleife
```

%- Gesamtschalldruckpegel aus dem Terzspektrum gp_terz_dB = 10*log10(sum(10.^(amp_terz_dB(:)./10)));

```
%- Die A-Bewertung des Terzspektrums
start_index = find(f_mn == tabelle(1,1));
stop_index = find(f_mn == tabelle(length(tabelle),1));
```

%- amp_terz_dB_A = amp_terz_dB; % Rückrechnen amp_terz_dB_A = amp_terz_dB + dba_stuetz(start_index:stop_index); tabelle(:,11) = amp_terz_dB_A';

%- Gesamtschalldruckpegelpegel aus dem Terzspektrum A-bewertet gp_terz_dB_A = 10*log10(sum(10.^(amp_terz_dB_A(:)./10)));

%- Für die Darstellung mit <stairs> muss am Ende ein zusätzlicher
%- Stützpunkt eingefügt werden (bei f_2) der den Pegelwert des
%- letzen f 1-Punktes hat

%- Nehme alle f_1-Werte aus tabelle f_stairs = tabelle(:,3);

%- Füge an die Liste der f_1-Werte den letzen f_2-Wert an f_stairs((length(f_stairs))+1) = tabelle(length(tabelle),6); amp_terz_spek = amp_terz_dB;

%- Logarithmierte Frequenzlisten log_f_stairs = log10(f_stairs); log_f_mn = log10(f_mn(index_a : index_e+1)); %- Füge an die Liste der Pegelwerte den letzten Pegel an amp_terz_spek((length(amp_terz_spek)+1)) = amp_terz_dB(length(amp_terz_dB));

%-----%Akustischen Rechnungen------%1-Berechnung der Schallgeschwidigkeit und Ma-Zahl aus der Temperatur, Kapa und %Gaskonstante

a=sqrt(kapa*(Temperatur+273.15)*R); Ma=(D_2*pi*(Dz/60))/a; Lwt=gp_aps_lin_mittel_dB_gesamt+10*log10((0.396.^2*pi/4)/s_0); rho=pbaro*100/(R*(Temperatur+273.15)); lamda=Phi*Psi; A_L=(pi/4)*D_2^2;

dateiname = dateiname(1:length(dateiname)-4);

ergebnisdatei = strcat(dateiname, '_kap','.MAT');

ergebnis = strcat(pfad, ergebnisdatei);

save(ergebnis, 'aps_lin_mittel_Pa_gesamt', 'aps_lin_mittel_dB_gesamt', 'F_gesamt',

'gp_aps_lin_mittel_dB_gesamt', ...

'gp_aps_lin_mittel_dB_A_gesamt', 'mittelungsanzahl', 'kanal', 'fenster_typ', 'ueberlappung', 'kalibrierfaktor', ...

'abtastrate', 'delta_f', 'tabelle', 'gp_terz_dB', 'gp_terz_dB_A', 'log_f_stairs', 'log_f_mn', 'oktav_m',...

'Ma',

'a','Lwt','lamda','A_L','rho','Dz','Temperatur','D_2','kapa','R','pbaro','lamda','Phi','Psi','A_L');

D.2 Mat_lesen_darstellen_kap_ohne_korrektur

%------

%- Programm zum Einlesen der MAT-Ergebnisdateien

%- 15.06.2004 Sariaslan Ertugrul, Driss Harrou 01.07.05

%-----

%-

%- Dieses Programm dient der Darstellung der Spektren, die mit dem

%- Programm Wav_Analyse_Programm_auto.m, Wav_Analyse_Programm_auto_3DAPS.m

%- und Mat_kap_verbessert.m erstellt wurden. Dazu werden die MAT-Dateien eingelesen.

%- Dargestellt werden das unbewertete APS und das unbewertete Terzspektrum

%-

%- Es können bis zu 6 Dateinen in einem Fenster geplottet werden

%- Bei Bedarf kann ein Vergleichsterzspektrum in das erstelle Terzspektrum

%- hinzugefügt werden. Das Vergleichsspektrum muss als Textdatei

- %- vorliegen. Die Textdateien können mit Hilfe des Programmes terzlp2txt.m
- %- erzeugt werden.
- %- Zusätzlich können auch HP-MAT-Dateien eingelesen werden.
- %-
- %- Das Programm ist entsprechend dem Inhalt der MAT-Dateien erweiterbar.

```
%------
```

```
clear all;
close all;
clc:
rho 0
          =1.2;
a_0
         =340;
A_B
          =1;
       m 2 = 1;
       i = 0;
       k = 0:
       while m 2 == 1
          clear F_gesamt aps_lin_mittel_dB_gesamt c1x c1;
          i = i + 1;
          k = k + 1;
          [dateiname, pfad] = uigetfile('*.mat', 'MAT-Ergebnisdatei zum Darstellen wählen');
          load(strcat(pfad,dateiname));
          gp_fig = 1;
          terz_fig = 1;
          lwt_fig =1;
          %- Wenn eine konvertierte HP-Datei geladen wird
          if exist ('c1x');
            aps_lin_mittel_dB_gesamt = 20*log10(sqrt(c1./2));
            F gesamt = c1x;
            gp_aps_lin_mittel_dB_gesamt = 0;
            mittelungsanzahl = 0;
            kanal = '--';
            fenster_typ = 'hanning';
            ueberlappung = '--';
            kalibrierfaktor = 0;
            delta f = 0;
            abtastrate = 0;
            gp_z = 0;
            gp_fig = 0;
            terz_fig = 0;
          end
```

```
%- Pfad merken
          cd(pfad);
          legend_string = strcat('\', dateiname, ' (GP:',
num2str(gp_aps_lin_mittel_dB_gesamt, '%5.1f'), 'dB...',
num2str(gp_aps_lin_mittel_dB_A_gesamt, '%5.1f'), 'dB(A))');
          %legend_string = strcat('\', dateiname, ' (GP:',
num2str(gp_aps_lin_mittel_dB_gesamt, '%5.1f'), 'dB)', 'AVG: ', num2str(mittelungsanzahl));
          string_matrix(i).name = legend_string;
          if i == 1
          %- aps_matrix(:,1) = F_gesamt;
          end
          %- aps matrix(:,(i+1)) = aps lin mittel dB gesamt;
          f_{min} = F_{gesamt}(1);
          f_max = F_gesamt(length(F_gesamt));
          freq string 2 = ['Frequenzspanne [', num2str(f min), '; ', num2str(f max), '] Hz'];
          if k == 7;
             k = 1;
          end
          %- Farben für die Darstellung
          farben = ['b' 'r' 'k' 'g' 'm' 'c' ];
          %- APS plotten
          if gp_fig \sim 0
          figure(1);
          plot(F_gesamt, aps_lin_mittel_dB_gesamt, 'color', farben(k) );
          %- farben = input('Farbe ("k" "r" "b" "g" "m" "c"): ', 's');
          %- plot(F gesamt, aps lin mittel dB gesamt, 'color', farben );
          title(['\ Unbewertete APS | Kanal: ', kanal, ' | ', freq_string_2, ' Fenster: ',
fenster_typ, ' | Überlappung: ', num2str(ueberlappung), ' % | k: ',num2str(kalibrierfaktor), '
Pa/EU | delta_f: ', num2str(delta_f), ' Hz | f_ab :', num2str(abtastrate), ' Hz']);
          xlabel('f [Hz]'):
          ylabel('Lp [dB]');
          grid on;
          set(gca, 'xlim', [f min, f max]);
          legend(string_matrix(:).name);
          hold on
       end
          if terz_fig ~ 0 % terz_fig == 0
          %- Terzspektrum plotten
          amp terz spek = tabelle(:,10);
          amp terz spek((length(amp terz spek)+1)) = tabelle(length(tabelle),10);
          terz string = ['Terzmittelfrequenzen [', num2str(tabelle(1,1)), '; ',
num2str(tabelle(length(tabelle),1)), ']'];
          gp terz dB = 10 \times \log 10( \text{ sum}( 10.((\text{tabelle}(:,10)./10))));
```

```
figure(3);
          set(gcf,'name', dateiname);
          stairs(log_f_stairs, amp_terz_spek, farben(k));
          title(['Unbewertetes Terzspektrum; Kanal: ', kanal, '; AVG = ',
num2str(mittelungsanzahl,3), '; GP: ', num2str(gp_terz_dB, '%5.1f'), ' dB<rms>; ',
terz_string]);
          xlabel('f [Hz]');
          ylabel('Lp [dB]');
          set(gca, 'xlim', [log_f_stairs(1), log10(tabelle(length(tabelle),6))]);
          set(gca, 'xscale', 'linear');
          set(gca, 'xtick', log_f_mn);
          set(gca, 'xticklabel', oktav_m);
          set(gca, 'fontsize', 10);
          set(gca, 'xgrid', 'on');
          set(gca, 'ygrid', 'on');
          hold on
          end
         if i==1
            lwt 1=Lwt;
            Ma_1=log10(Ma);
         end
         if i==2
            lwt_2=Lwt;
            Ma_2=log10(Ma);
          end
          if i==3
          lwt_3=Lwt;
          Ma_3=log10(Ma);
       end
      if i==4
       lwt_4=Lwt;
      Ma 4 = \log 10(Ma);
    end
          %if i==5
        % lwt_5=Lwt;
        % Ma_5=log10(Ma);
        %end
          \% if i==6
           % lwt_6=Lwt;
           % Ma_6=log10(Ma);
           %end
     m_2 =menu('Weitere Mat-Datein darstellen','ja','nein');
   end
     if m_2 == 2;
```

```
%
    figure(5);
     x=[Ma_1 Ma_2 Ma_3 Ma_4 ]';
    y=[lwt_1 lwt_2 lwt_3 lwt_4 ]';
    [p,S] = polyfit(x,y,1)
    polyn=polyval(p,x);
    err=polyn-y;
     A_st=p(2);
    B_st=p(1);
     %plot(x,y,x,y,'o')
    L B=193,7+10*log10((rho*a^3)/(rho 0*a 0^3));
    L gs=10*\log 10(lamda*(A L/A B));
    L_us=A_st-L_B-L_gs ;
    gamma=B_st/10;
    ymean=mean(y);
    r2=sqrt(sum((polyn-ymean).^2)/sum((y-ymean).^2));
     freq_string_3 = [' Geradengleichung : ', num2str(A_st), ' + ', num2str(B_st), '*
log(Ma) ', ' Gamma = ' num2str(gamma), ' L_us= ' ,num2str(L_us) , ' L_gs= '
\operatorname{num2str}(L \text{ gs}), ' R2 =',\operatorname{num2str}(r2)];
    errorbar(x,y,err)
     %plot(x,y,'o',x,polyn),title('Lineare Regression');
     % grid,axis([-1,6,-2,120]),legend('gemessen','gerechnet ',4)
     title(['Lwt=f(Ma)', freq_string_3, ]);
     xlabel('log(Ma) [--]')
     ylabel('Gesamtschalleistungspegel Lwt [dB]')
     % text('Die Geradengleichung ist : ',A st,'+',B st,'*log(Ma)');
     grid
    hold on
```

end

D.3 Mat_lesen_darstellen_Kap_frequenzgangkorektur

%-----%- Programm zum Einlesen der MAT-Ergebnisdateien %- 17.03.2003 Terence Klitz, 19.02.2004 Ertugrul Sariaslan, 01.07.2005 Driss Harrou %------

.....

```
%- Dieses Programm dient der Darstellung der Spektren, die mit dem
```

%- Programm Mat_kap_verbessert.m erstellt wurden. Dazu

%- werden die MAT-Dateien eingelesen.

%- Dargestellt werden das unbewertete APS, das unbewertete Terzspektrum,

```
%- Gesamtschallleistungspegel über log(Ma)
```

%- Es können bis zu 6 Dateinen in einem Fenster geplottet werden

%- Das Programm ist entsprechend dem Inhalt der MAT-Dateien erweiterbar.

%-----

clear all close all: clc; = 10;%Schaufelanzahl Ζ epsilon = 1.5;p_null = 2e-5:kapa = 1.4;R = 287;s_0 = 1; rho 0 =1.2;a 0 =340;A_B =1; $m_1 = 2;$ $m_2 = 1;$ load('diff_trac15_16.mat'); load('koeff C3,4.mat'); = PDiff(3:length(PDiff)); % Hier ist bei der Messung die Netzfrequenz von 50 Hz PDiff festgestellt worden, PDiff(1) = 0;% die hier gelöscht und zu Null gesetzt werden = x(3:length(x));х if $m_1 == 2$ %- Darstellung Multidiagrammen p = 0;k = 0: while $m_2 == 1$ clear F gesamt aps lin mittel dB gesamt c1x c1; p = p + 1; % Kontrolliert die reihenfolge der Legendeneinträge k = k + 1;[dateiname, pfad] = uigetfile('*.mat', 'MAT-Ergebnisdatei zum Darstellen wählen'); load(strcat(pfad,dateiname)); $gp_fig = 1;$ $terz_fig = 1;$ %- Wenn eine konvertierte HP-Datei geladen wird if exist ('c1x'); aps lin mittel dB gesamt = $20*\log 10(\operatorname{sqrt}(c1./2));$ F gesamt = c1x; gp_aps_lin_mittel_dB_gesamt = 0; mittelungsanzahl = 0;kanal = '--'; fenster_typ = 'hanning';

```
ueberlappung = '--';
           kalibrierfaktor = 0;
           delta_f = 0;
           abtastrate = 0;
           % gp_z = 0;
           gp_fig = 0;
           terz_fig = 0;
         end
         %- Pfad merken
         cd(pfad):
         legend_string = strcat('\', dateiname, ' (GP:',
num2str(gp_aps_lin_mittel_dB_gesamt,'%5.1f'), 'dB) ', 'AVG: ', num2str(mittelungsanzahl));
         string_matrix(p).name = legend_string;
         if i == 1
         end
         f_{min} = F_{gesamt}(1);
         f max = F gesamt(length(F gesamt));
         freq_string_2 = ['Frequenzband [', num2str(f_min), '; ', num2str(f_max), '] Hz'];
         %anz_gp = length(gp_z);
         %t min = gp z(1,1);
         %t_max = gp_z(anz_gp,1);
         if k == 7;
           k = 1:
         end
         %- Farben für die Darstellung
         farben = ['b' 'r' 'k' 'g' 'm' 'c' ];
         %-----
         % Frequenzgangkorrektur C2
         % Die Frequenzgangkorrektur wird von der DIN EN ISO 5136 vorgeschrieben und
kann unter diesem
         % Menu berücksichtigt werden. Die kombinierte Frequenzgangkorrektur (C = C1 + C
C2 + C3,4) ergibt
         % sich aus C1, die laut Werkprüfschein 0 gesetzt werden kann. C2 (die
Frequenzgangkorrektur des
         % Mikrofonvorsatzes) wurde am 02.08.04 von Herrn Dipl. Ing Reinhartz ermittelt.
Sie liegt extern
         % als eine .MAT Datei vor. Da sie mit dem HP Analysator erstellt wurde, besteht sie
nur aus 801 Werten.
         % - Deshalb wird sie für die Weiterverarbeitung zunächst "versplined" ----> in
Schmalband überführt
        % - in das Schmalbandspektrum des Nutzsignals versehen
        % - und schließlich aus dem Schmalbandspektrum des Nutzsignals (inkl.
Korrekturwerte) das Terzspektrum
        % ermittelt
0/_____
```

m_5 = menu('Bitte wählen','Frequenzgangkorrektur durchführen','unkorrigiert
fortfahren');

if m_5==1

% Frequenzgangkorrektur des Mikrofonvorsatzes C2

```
epsilon = 1.5;
p_null = 2e-5;
f_max = abtastrate/2.56;
n_f = f_max / delta_f + 1;
f_min_index = find((round(F_gesamt))==x(1)); % HP Analysator fängt bei 30 Hz
(23. Linie im APS) an zu analysieren
f_max_index = find((round(F_gesamt))==x(length(x))); % und endet bei 12830
Hz (9533. Linie im APS)
```

```
C2_bereich = ((spline(x, PDiff, F_gesamt(f_min_index:f_max_index)))); % fgk:
Frequenzgangkorrektur
C2(1:f_min_index) = 0;
C2((f_max_index):length(F_gesamt))=0;
```

C2(f_min_index:f_max_index) = C2_bereich;

aps_lin_mittel_dB_gesamt = aps_lin_mittel_dB_gesamt + C2';

```
aps_lin_mittel_Pa_gesamt = (10.^(aps_lin_mittel_dB_gesamt/20) * p_null);
gp_aps_lin_mittel_Pa_gesamt = sqrt(1/epsilon *
sum(aps_lin_mittel_Pa_gesamt.^2));
gp_aps_lin_mittel_dB_gesamt = 20. * log10(gp_aps_lin_mittel_Pa_gesamt ./
p_null);
```

legend_string = strcat('\', dateiname, ' (GP:', num2str(gp_aps_lin_mittel_dB_gesamt,'%5.1f'), ' dB) ', ' AVG: ', num2str(mittelungsanzahl)); string_matrix(p).name = legend_string;

%------

%-----

% Strömungsgeschwindigkeits-Frequenzgangkorrektur des Mikrofonvorsatzes C3,4

% Die Koeffizienten zur Berechnung der

% Strömungsgeschwindigkeits-Frequenzgangkorrektur-Werte liegen extern als .Mat Datei vor.

% Anders als bei der Berechnung von C2 wird nach einer Eingabeaufforderung nach der Geschwindigkeit,

% - das Terzspektrum der Frequenzgangkorrektur errechnet

```
% - das Terzspektrum des Nutzsignals mit den Terz-Frequenzgangkorrekturen
versehen
        % - die Terz-Frequenzgangkorrekturen "versplined" ---> in Schmalband überführt
            - das Schmalbandspektrum des Nutzsignals mit den "versplineten"
        %
              Terz-Frequenzgangkorrekturen versehen
        %
        if m_5==1
        prompt = {'Strömungsgeschwindigkeit [m/s]'};
        dlg_title = 'Geben Sie die Strömungsgeschwindigkeit ein';
        num lines = 1:
        def
               = \{ '0' \};
        str_geschw= inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
        str geschw= str2double(str_geschw);
        koeff length=length(koeff ai);
                  = koeff_ai(:,1) + koeff_ai(:,2)*str_geschw + koeff_ai(:,3)*str_geschw^2 +
        C34 t
koeff_ai(:,4)*str_geschw^3 + koeff_ai(:,5)*str_geschw^4 + koeff_ai(:,6)*str_geschw^5 +
koeff ai(:,7)*str geschw^6;
        C34(6:30:) = C34 t:
        C34(1:5,:) = 0;
        C34(31,:) = 0;
        f mn = [16\ 20\ 25\ 31.5\ 40\ 50\ 63\ 80\ 100\ 125\ 160\ 200\ 250\ 315\ 400\ 500\ 630\ 800\ 1000
1250 1600 2000 2500 3150 4000 5000 6300 8000 10000 12500];
                         = find((round(F gesamt))==f mn(6)); % HP Analysator fängt bei
        f min index 1
30 Hz (23. Linie im APS) an zu analysieren
                          = find((round(F_gesamt))==f_mn(length(f_mn))); % und endet
        f max index 1
bei 12830 Hz (9533. Linie im APS)
                      = spline(f_mn, C34(1:30),
        C34 aps
F_gesamt(f_min_index_1:f_max_index_1));
        C34 aps(1:f min index 1) = 0;
        C34_aps((f_max_index_1):length(F_gesamt))=0;
        aps lin mittel dB gesamt = aps lin mittel dB gesamt + C34 aps;
        end
        end
        %-----
         %- APS plotten
         figure(1);
         plot(F_gesamt, aps_lin_mittel_dB_gesamt, 'color', farben(k) );
         title(['\ Unbewertete APS | Kanal: ', kanal, ' | ', freq_string_2, ' Fenster: ',
fenster_typ, ' | Überlappung: ', num2str(ueberlappung), ' % | k: ',num2str(kalibrierfaktor), '
Pa/EU | delta_f: ', num2str(delta_f), ' Hz | f_ab :', num2str(abtastrate), ' Hz']);
         xlabel('f [Hz]');
         ylabel('Lp [dB]');
         grid on;
         set(gca, 'xlim', [f min, f max]);
         legend(string matrix(:).name);
         hold on
        %-----
```

% Terzspektrum für die Frequenzgangkorrektur neu berechnen if m_5==1 f_mn_a = 16; %- Erste beachtete Terz (Nenn-Frequenz), f_mn_e = 12500;%- letzte beachtete Terz (Nenn-Frequenz); %- Stufensprung für die Normreihe R10 $= 10^{(1/10)};$ q f_mn = [10 12.5 16 20 25 31.5 40 50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000 2500 3150 4000 5000 6300 8000 10000 12500 16000 20000]; $f_abbrech = f_mn_e * sqrt(q);$ $f_m_start = 10;$ %- Erste Terzmittenfrequenz i = 1; $f_m(1) = f_m_start;$ while $f_m \ll f_abbrech$ %- exakte Terzmittenfrequenzen i = i + 1;%- berechnen $f_m(i) = f_m(i-1) * q;$ end %- while-Anweisung index a = find(f mn == f mn a); $index_e = find(f_mn == f_mn_e);$ f_mnenn = f_mn(index_a : index_e); %- Vorgegebenen Terzmittenfrequenzbereich aus f_mn entnehmen %- Start bei f mn a %- Ende bei f mn e index a = find(f mn == f mn a); $index_e = find(f_mn == f_mn_e);$ f_mnenn = f_mn(index_a : index_e); %- Auf den Bereich f_mn_a bis f_mn_e angepasste exakte Mittenfrequenzen %- Mittenfrequenzen des vorgegebenen Bereiches holen f m = f m(index a : index e);%- Zugehörige Bandeckfrequenzen f_1 und f_2 berechnen for i = 1 : length(f m) $f_1(i) = f_m(i) / sqrt(q);$ $f_2(i) = f_m(i) * sqrt(q);$ $band(i) = f_2(i) - f_1(i);$ end %- for-Schleife

%- Aufgrund von f_mn_a und f_mn_e und den errechneten %- Bandeckfrequenzen steht nun die Frequenzspanne fest f_start = f_1(1);

```
f_ende = f_2(length(f_2));
h = 0;
%- Für jedes einzelne Terzband werden die Linien addiert.
for i = 1 : length(f_m)
  %- Suche die Indizes der Frequenzen, die in das jeweilige Band
  %- hineinpassen.
  % F_gesamt = frequenzen;
  terz_i = find (F_gesamt >= f_1(i) \& F_gesamt < f_2(i));
  %- Anzahl der Frequenzlinien im aktuellen Terzband
  terz_i_anz = length(terz_i);
  tabelle(i,1) = f_mnenn(i);
  tabelle(i,2) = f m(i);
  tabelle(i,3) = f 1(i);
  tabelle(i,6) = f_2(i);
  %- Prüfen, ob das Band gefüllt ist
  if (F_gesamt(terz_i(1)) - f_1(i) <= delta_f) & (f_2(i) - F_gesamt(terz_i(terz_i_anz)) <=
delta f)
     % f_1 enthält Informationen über die verwirklichten Terzbänder
     tabelle_inhalt = ['f_mnenn | f_m | f_1 | f_1_ist | index_f_1 | f_2 | f_2_ist | index_f_2 |
Anz.Linien | Lp_Terz_dB | Lp_Terz_dB(A)'];
     tabelle(i,4) = F gesamt(terz i(1));
     tabelle(i,5) = terz_i(1);
     tabelle(i,7) = F_gesamt(terz_i(terz_i_anz));
     tabelle(i,8) = terz_i(terz_i_anz);
     tabelle(i,9) = terz_i_anz;
     for j = 1 : terz_i_anz
        summe_terz = sum(aps_lin_mittel_Pa_gesamt(terz_i(1) : terz_i(terz_i_anz)).^2);
        korrigiert = summe_terz / epsilon; % Terzpegel durch die Anzahl der im Terzband
befindenden Linien teilen
       wurzel
                 = sqrt(korrigiert);
       amp terz dB(i) = 20 * \log 10 (wurzel / p null);
     end %- for-Schleife
     tabelle(i,10) = amp\_terz\_dB(i);
  else %- Band nicht gefüllt
     tabelle(i,4) = 0;
     tabelle(i,5) = 0;
     tabelle(i,7) = 0;
     tabelle(i,8) = 0;
     tabelle(i.9) = 0:
     tabelle(i, 10) = 0;
  end %- if-Anweisung
end %- for-Schleife
```

% Addition von C34 auf die Terzpegel

%- Gesamtschalldruckpegel aus dem Terzspektrum

gp_terz_dB = 10*log10(sum(10.^(amp_terz_dB(:)./10)));

%- Die A-Bewertung des Terzspektrums start_index = find(f_mn == tabelle(1,1)); stop_index = find(f_mn == tabelle(length(tabelle),1));

%- Für die Darstellung mit <stairs> muss am Ende ein zusätzlicher
%- Stützpunkt eingefügt werden (bei f_2) der den Pegelwert des
%- letzen f 1-Punktes hat

%- Nehme alle f_1-Werte aus tabelle f_stairs = tabelle(:,3);

%- Füge an die Liste der f_1-Werte den letzen f_2-Wert an f_stairs((length(f_stairs))+1) = tabelle(length(tabelle),6); amp_terz_spek = amp_terz_dB;

%- Logarithmierte Frequenzlisten log_f_stairs = log10(f_stairs); log_f_mn = log10(f_mn(index_a : index_e+1));

```
%- Füge an die Liste der Pegelwerte den letzten Pegel an
amp_terz_spek((length(amp_terz_spek)+1)) = amp_terz_dB(length(amp_terz_dB));
end
%------
```

%- Terzspektrum plotten

```
if terz_fig ~ 0 % terz_fig == 0
%- Terzspektrum plotten
amp_terz_spek = tabelle(:,10);
amp_terz_spek((length(amp_terz_spek)+1)) = tabelle(length(tabelle),10);
terz_string = ['Terzmittelfrequenzen [', num2str(tabelle(1,1)), '; ',
num2str(tabelle(length(tabelle),1)), ']'];
gp_terz_dB = 10*log10( sum( 10.^(tabelle(:,10)./10)));
```

figure(3);
set(gcf,'name', dateiname);

```
stairs(log_f_stairs, amp_terz_spek, farben(k));
title(['Unbewertetes Terzspektrum; Kanal: ', kanal, '; AVG = ',
num2str(mittelungsanzahl,3), '; GP: ', num2str(gp_terz_dB,'%5.1f'), ' dB<rms>; ',
terz_string]);
xlabel('f [Hz]');
ylabel('Lp [dB]');
```

```
set(gca, 'xlim', [log_f_stairs(1), log10(tabelle(length(tabelle),6))]);
set(gca, 'xscale', 'linear');
```

```
set(gca, 'xtick', log_f_mn);
       set(gca, 'xticklabel', oktav_m);
       set(gca, 'fontsize', 10);
       set(gca, 'xgrid', 'on');
       set(gca, 'ygrid', 'on');
       hold on
       end
%-----
                      _____
      if p == 1
         lwt 1=Lwt;
         Ma_1=log10(Ma);
       end
       if p==2
         lwt_2=Lwt;
         Ma_2 = log 10(Ma);
       end
     if p==3
       lwt_3=Lwt;
       Ma_3=log10(Ma);
     end
   if p==4
   lwt_4=Lwt;
   Ma_4 = log10(Ma);
   end
     if p==5
      lwt_5=Lwt;
       Ma_5=log10(Ma);
        end
       if p == 6
        lwt_6=Lwt;
         Ma_6=log10(Ma);
      end
m_2 =menu('Weitere Mat-Datein analysieren','ja','nein');
```

end

```
a=sqrt(kapa*(Temperatur+273.15)*R);
Ma=(D_2*pi*(Dz/60))/a;
Lwt=gp_aps_lin_mittel_dB_gesamt+10*log10((0.396.^2*pi/4)/s_0);
rho=pbaro*100/(R*(Temperatur+273.15));
lamda=Phi*Psi;
A_L=(pi/4)*D_2^2;
```

```
if m_2 ==2;
%
%
figure(5);
g=[Ma_1 Ma_2 Ma_3 Ma_4 Ma_5 Ma_6]';
```

```
y=[lwt_1 lwt_2 lwt_3 lwt_4 lwt_5 lwt_6]';
    [p,S] = polyfit(g,y,1)
    polyn=polyval(p,g);
    err=polyn-y;
    A_st=p(2);
    B_st=p(1);
     \%plot(x,y,x,y,'o')
    L_B=193,7+10*\log 10((rho*a^3)/(rho_0*a_0^3));
    L_gs=10*log10(lamda*(A_L/A_B));
    L_us=A_st-L_B-L_gs ;
    gamma=B st/10;
    ymean=mean(y);
    r2=sqrt(sum((polyn-ymean).^2)/sum((y-ymean).^2));
    freq_string_3 = [' Geradengleichung : ', num2str(A_st), ' + ', num2str(B_st), '*
log(Ma) ',' Gamma = 'num2str(gamma),' L_us= ', num2str(L_us),' L_gs= '
,num2str(L_gs), ' R2 =',num2str(r2)];
    errorbar(g,y,err)
     %plot(x,y,'o',x,polyn),title('Lineare Regression');
     % grid,axis([-1,6,-2,120]),legend('gemessen','gerechnet ',4)
    title(['Lwt=f(Ma)', freq_string_3, ]);
    xlabel('log(Ma) [--]')
    ylabel('Gesamtschalleistungspegel Lwt [dB]')
     %text('Die Geradengleichung ist : ',A_st,'+',B_st,'*log(Ma)');
    grid
    hold on
```

```
end
end
```

E Übersicht auf die entwickelten Software im Prüfstand