

# WENDT



SIT

Sound proofing Insulation Technology



Wendt SIT GmbH

## Aktive Lärminderung durch Gegenschall

Abschlußbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 12329 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

### Projektleitung:

Oberingenieur Arnold Schneider <sup>1</sup>  
Prof. Dr.-Ing. Gholam Reza Sinambari <sup>2+3</sup>

### Bearbeiter:

Dr.-Ing. Frieder Kunz <sup>2</sup>  
Dipl.-Ing. Lothar Siegel <sup>1</sup>  
Dipl.-Ing. (FH) Udo Thorn <sup>3</sup>

Ludwigshafen

Januar 2000

---

<sup>1</sup> Wendt SIT GmbH, Ludwigshafen  
<sup>2</sup> IBS GmbH, Ludwigshafen  
<sup>3</sup> FH Bingen, FB Umweltschutz

Dieser Bericht ist zu beziehen bei:

**Wendt SIT GmbH**  
Sound proofing Insulation Technology  
Rheinhorststr. 1-5  
**D-67071 Ludwigshafen**

Tel.: 0621/67151-0  
Fax: 0621/67151-30  
e-mail: [allgemein@wendt-sit.de](mailto:allgemein@wendt-sit.de)  
<http://www.wendt-sit.de>

11/95		<b>Projektkennblatt</b>		
		der <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>		
Az	<b>12329/</b>	Referat	<b>(21/0)</b>	Fördersumme <b>350.000,00 DM</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Aktive Lärminderung durch Gegenschall</b>		
<b>Stichworte</b>		Verfahren Lärm , Abluft , Emission , Faser , Energie		
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
<b>28 Monate</b>	<b>10/97</b>	<b>01/2000</b>	<b>keine</b>	
Zwischenbericht:		10/98		
<b>Bewilligungsempfänger</b>	Hermann Wendt GmbH & Co. Dämmtechnik KG <sup>1</sup> Rheinhorststraße 1 - 5 67071 Ludwigshafen		Tel 0621/67151-0 Fax 0621/67151-30	
			Projektleitung A. Schneider; Gh. R. Sinambari	
			Bearbeiter F. Kunz, L. Siegel, U. Thom	
<b>Kooperationspartner</b>		IBS Ingenieurbüro für Schall- und Schwingungstechnik GmbH, 67071 Ludwigshafen Fachhochschule Bingen, FB Umweltschutz, 55411 Bingen		
<b>Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens</b>				
<p>Die derzeit bekannten Methoden zur aktiven Lärminderung in Rohrleitungen und Kanälen beschränken sich auf die Kompensation von Frequenzen, deren Weiterleitung in Kanälen in erster Linie in Form von ebenen Wellen erfolgt. In vielen technischen Anwendungen liegen jedoch größere Kanalabmessungen vor, bei denen geometrisch bedingt das Schallfeld bereits bei tiefen Frequenzen (ca. 125 - 500 Hz) durch Bildung von Quermoden nicht mehr eben ist. Im Rahmen des Vorhabens soll mit Hilfe der aktiven Lärminderung durch Gegenschall ein alternatives Verfahren für den sekundären Schallschutz vor allem für größere Kanalabmessungen als Ersatz für herkömmliche Resonatoren bzw. poröse Absorbermaterialien auf KMF-Basis entwickelt werden.</p>				
<b>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</b>				
<p>In einer 12- monatigen Labor- und Technikums-Entwicklungsphase wurde zuerst an einer Versuchsstrecke an der FH Bingen im Labor-Maßstab die prinzipielle Wirkungsweise der aktiven Lärminderung bei Querschnittunterteilung ohne Strömung untersucht, sowie die technische Realisierbarkeit überprüft und optimiert. Auf die Ergebnisse aufbauend wurden bei der Hermann Wendt GmbH und der IBS GmbH zwei Strömungsteststrecken im Technikumsmaßstab entwickelt und realisiert. Im Rahmen der durchgeführten Labor- und Technikumsuntersuchungen wurde die gesteckte Zielsetzung überprüft, vorhandene Schwachstellen der Entwicklung analysiert und darauf aufbauend das vorgeschlagene Lösungskonzept bzgl. der weiteren Arbeitsschritte optimiert.</p> <p>In der sich anschließenden Entwicklungs- und Testphase eines industrietauglichen Aktiv-Schalldämpfers wurde der große Technikumsprüfstand zum Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp ausgebaut. Die elektronischen Komponenten der Aktivschall-Systeme wurden auf Grundlage der im Labor- und Technikumsmaßstab gewonnenen Erkenntnisse optimiert und weiterentwickelt. Weiterhin wurde u.a. die Zahl und Größe der Querschnittunterteilungen im Hinblick auf die Betriebs- und Investitionskosten optimiert. Das Vorhaben wurde mit dem Test eines Aktiv-Schalldämpfers im Rahmen eines Pilotprojektes erfolgreich abgeschlossen.</p>				
Deutsche Bundesstiftung Umwelt £ An der Bornau 2 £ 49090 Osnabrück £ Tel 0541/9633-0 £ Fax 0541/9633-190				

### **Ergebnisse und Diskussion**

Die in der Labor- und Technikums-Entwicklungsphase durchgeführten Arbeitsschritte, Untersuchungen und Ergebnisse wurden bereits eingehend im Zwischenbericht zu diesem Vorhaben dokumentiert und diskutiert [Her98]. U.a. wurde darin die Notwendigkeit aufgezeigt, die verwendete Hard- und Softwarearchitektur der Aktivschall-Controller-Systeme neu zu konzeptionieren. Das vorgeschlagene Lösungskonzept bzgl. der weiteren Arbeitsschritte in der Entwicklungs- und Testphase eines industrietauglichen Aktiv-Schalldämpfers wurde daher in Bezug auf die vorgesehene Controller-Entwicklung abgeändert und in einem von diesem Vorhaben entkoppelten Entwicklungsprojekt durchgeführt [SKT99].

Im Rahmen des Ausbaus des großen Technikumsprüfstandes (Querschnitt: 1,5 m x 1,5 m; vierfachunterteilt) zu einem Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp ließen sich zunächst durch Erhöhung der Verstärkerleistung und Einsatz leistungsfähigerer Kompensationslautsprecher einige diskrete Einzeltöne auch bei Vorhandensein von Strömung mit herkömmlichen Controller-Systemen erfolgreich kompensieren. Durch den Einsatz der neu entwickelten **NANCY 2000**-Systeme [SKT99] konnte bei Vollast des Gebläses durch Kombination von aktiven- und passiven Maßnahmen eine breitbandige Gesamtpegelreduzierung von 23 dB(A) erreicht werden. Die Untersuchungen bestätigten, daß neben dem Einsatz aktiver Minderstechnologien nicht auf zusätzliche passive Maßnahmen verzichtet werden kann, da das Gebläsegeräusch, wie viele technische Geräusche, noch pegelmitbestimmende Komponenten oberhalb 500 Hz besitzt. Da passive Maßnahmen hier allerdings erheblich kleiner dimensioniert werden können, lassen sich bis zu 70 Vol% Absorptionsmaterial einsparen. Der verursachte statische Druckverlust des Prototyps liegt bei einem Durchsatz von ca. 55.000 m<sup>3</sup>/h mit ca. 10 Pa deutlich niedriger als bei einem vergleichbaren Kulissenschalldämpfer, der ohne Querschnittsaufweitung je nach Auslegung bis zu 260 Pa verursachen kann. Bei dem vorliegenden Durchsatz entsprechen die o.a. Druckverluste einer Gebläseleistung von ca. 190 W. (Aktiv-Schalldämpfer) bzw. ca. 5000 W (absorptionsoptimierter Kulissenschalldämpfer). Berücksichtigt man, daß für den Betrieb des Aktiv-Schalldämpfers zusätzlich ca. 60 W elektr. ANC-Regelleistung (Betriebsleistung) notwendig ist, dann beträgt die erforderliche Zusatzleistung des Aktiv-Schalldämpfers ca. 5% des konventionellen Kulissenschalldämpfers. Langzeitstabilität und Betriebssicherheit der ANC-Technologie wurde in Langzeitversuchen über einen mehrwöchigen Zeitraum bestätigt. Zahl und Größe der Querschnittsunterteilungen richtet sich individuell nach dem zu kompensierenden Geräusch und der Kanalgeometrie. Für den praktischen Einsatz von Aktiv-Schalldämpfern wurde eine methodische Vorgehensweise von der Auslegung bis zum Einbau vorgeschlagen.

Im Rahmen des Pilotprojektes „ANC-Lüftungsschalldämpfer“ konnte im Zuluftstrang einer Lüftungsanlage an der FH Bingen ein konventioneller Kulissenschalldämpfer durch einen Aktiv-Schalldämpfer erfolgreich substituiert werden. Gegenüber dem substituierten Kulissenschalldämpfer konnte das passive Absorptionsmaterial im ANC-Lüftungsschalldämpfer um über 80 Vol% reduziert werden. Der verursachte Druckverlust liegt mit ca. 25 Pa in der Größenordnung des Druckverlustes des Kulissenschalldämpfers. Dieser erreicht diesen günstigen Druckverlust aber nur deshalb, weil der Querschnitt im Bereich des Kulissenschalldämpfers entsprechend aufgeweitet wurde, worauf beim ANC-Lüftungsschalldämpfer verzichtet werden konnte. Die elektrische Betriebsleistung der Regelelektronik im Kompensationsfall wurde mit ca. 30W ermittelt und fällt damit nicht nennenswert ins Gewicht.

### **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

- Auszeichnung und Präsentation des Aktiv-Schalldämpfers auf dem „Erfinderforum 1999“ in Mainz anlässlich der Verleihung des Erfinderpreises Rheinland-Pfalz 1999 der Investitions- und Strukturbank Rheinland-Pfalz (ISB) GmbH.
- Tagungsbeitrag zur Veranstaltung: Antischallsysteme im Schallschutz und für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen; Haus der Technik, Essen 1998 [ST98].
- Beitragsveröffentlichung in den VDI nachrichten vom 15.10.1999, Nr. 41 [SCH99].
- Beitragsveröffentlichung in der Fachzeitschrift „Konstruktion“. VDI-Springer Verlag, 2000 [SKST00]
- Geplante Veröffentlichungen auf einer Tagung (Haus der Technik, Essen) und in der „Zeitschrift für Lärmbekämpfung“.

### **Fazit**

Die Zielsetzung des Vorhabens wurde erreicht. Die Kompensationslautsprecher sollten bei Beibehaltung des Wirkungsgrades noch weiter zu kompakteren Bauformen hin entwickelt werden. Soll der Aktiv-Schalldämpfer von aggressiven, feuchten oder heißen Medien durchströmt werden, bedürfen die der Strömung ausgesetzten ANC-Komponenten noch weiterer Optimierung.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Projektkennblatt.....</b>	<b>1</b>
<b>Verzeichnis von Bildern und Tabellen.....</b>	<b>5</b>
<b>Verzeichnis von Begriffen und Definitionen .....</b>	<b>7</b>
<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>9</b>
<b>Einleitung.....</b>	<b>11</b>
<b>Hauptteil .....</b>	<b>15</b>
<b>1. Aufbau und Untersuchungen an einer Versuchsstrecke im Labormaßstab .....</b>	<b>15</b>
<b>2. Aufbau und Untersuchungen an zwei Versuchsstrecken im Technikumsmaßstab .....</b>	<b>17</b>
<b>3. Entwicklung / Optimierung der Regelelektronik .....</b>	<b>20</b>
<b>4. Ausbau des großen Technikumsprüfstandes zum Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp .....</b>	<b>21</b>
4.1 Aufbau des Aktiv-Schalldämpfer-Prototyps .....	21
4.2 Durchgeführte Untersuchungen am Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp .....	23
4.3 Vergleich mit konventionellen Kulissenschalldämpfern .....	26
4.4 Einsatzbereich marktgängiger Kompensationslautsprecher .....	29
4.5 Notlaufstrategie.....	31
<b>5. Test des Aktiv-Schalldämpfers im industriellen Einsatz im Rahmen des Pilotprojektes „ANC-Lüftungsschalldämpfer“ .....</b>	<b>31</b>
5.1 Voruntersuchungen zur Ausgangssituation .....	31
5.2 Auslegung und Aufbau des ANC-Lüftungsschalldämpfers .....	33
5.3 Voruntersuchungen am kleinen Technikumsprüfstand.....	34
5.4 Durchgeführte Untersuchungen am ANC-Lüftungsschalldämpfer unter realen Betriebsbedingungen in der Lüftungsanlage .....	36
5.5 Vergleich mit dem substituierten Kulissenschalldämpfer.....	40

<b>6. Untersuchungen zur Langzeitstabilität der neu entwickelten Regelelektronik bei Parallelbetrieb mehrerer Controller.....</b>	<b>40</b>
<b>7. Methodische Vorgehensweise bei der Auslegung und dem Einbau eines Aktiv-Schalldämpfers .....</b>	<b>42</b>
<b>8. Ökologisch, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse .....</b>	<b>45</b>
8.1 Ökologische Bewertung der Vorhabensergebnisse .....	45
8.2 Technologische Bewertung der Vorhabensergebnisse.....	46
8.3 Ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse.....	47
<b>9. Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse .....</b>	<b>48</b>
<b>Fazit.....</b>	<b>49</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>50</b>
<b>DIN A4-Poster</b>	

## Verzeichnis von Bildern und Tabellen

<b>Abb. 1.1:</b> Laborprüfstand zur Untersuchung der prinzipiellen Möglichkeit der Wirkfrequenzbereichserweiterung eines aktiven Schalldämpfers durch Querschnittsunterteilung.....	15
<b>Abb. 1.2:</b> Vergleich der in Anlehnung an DIN EN ISO 11820 [3] ermittelten Einfügungsdämpfungen des aktiven-, des passiven- und der Kombination aus aktivem- und passivem Teil des Aktiv-Schalldämpfers im zweifach viertelsgeteilten Laborprüfstand bei optimierten ANC-Mikrofonpositionen.....	16
<b>Abb. 2.1:</b> Großer Technikumsprüfstand ohne Querschnittsunterteilung (Querschnitt: 1,5 m x 1,5 m): Max. Gebläseleistung: $\dot{V} \approx 55.000 \text{ m}^3/\text{h}$ ; $v \approx 7 \text{ m/s}$ ; $P_{el.} = 29,3 \text{ kW}$ ; $L_{WA} = 98 \text{ dB(A)}$ ; $f_{G,1} = 113 \text{ Hz}$ ; Ventilator Drehklang: 93 Hz (100% Gebläseleistung); Zusatzschallquelle: 8 Tieftonchassis auf Lautsprecherwand, Nennbelastbarkeit: ca. 500 W .....	17
<b>Abb. 2.2:</b> Kleiner Technikumsprüfstand (0,5 m x 0,5 m): Gebläseleistung: $\dot{V} \approx 6.500 \text{ m}^3/\text{h}$ ; $v \approx 7 \text{ m/s}$ ; $L_{WA} \approx 85 \text{ dB(A)}$ ; $f_{G,1} = 340 \text{ Hz}$ .....	18
<b>Abb. 4.1:</b> Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp (ohne passive Auskleidung).....	21
<b>Abb. 4.2:</b> Großer Technikumsprüfstand mit Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp (Querschnitt: 1,5m x 1,5m) Max. Gebläseleistung: $\dot{V} \approx 55.000 \text{ m}^3/\text{h}$ , Strömungsgeschwindigkeit im Prototyp $v_s \approx 9 \text{ m/s}$ , $P_{el.} = 29,3 \text{ kW}$ , $L_{WA} = 98 \text{ dB(A)}$ , 4 Teilkanäle zur Wirkfrequenzbereichserweiterung ( $F_{G,neu} \approx 220 \text{ Hz}$ ), mit passiven Randkulissen ausgekleidet ( $d = 80 \text{ mm}$ ).....	22
<b>Abb. 4.3:</b> Aufnahmen des eingebauten Aktiv-Schalldämpfer-Prototyps im Technikum der Firmen Wendt SIT GmbH und IBS GmbH (Fotos: Tröster) .....	23
<b>Abb. 4.4:</b> A-Schalldruckpegelminderungen bei Gebläsevollast an einem Referenzpunkt am Kanalaustritt mit und ohne parallelbetriebene <b>NANCY</b> -Systeme bei überlagerten Sinustönen.....	24
<b>Abb. 4.5:</b> A-Schalleistungspegel $L_{WA}$ mit und ohne aktive und passive Maßnahmen am Kanalaustritt des großen Technikumsprüfstandes bei Vollast des Gebläses (ca. 55.000 m <sup>3</sup> /h) [SKT99] .....	25
<b>Abb. 4.6:</b> Effektivität der parallelbetriebenen <b>NANCY 2000</b> -Systeme bei überlagerten tonalen Komponenten (mit passiver Zusatzdämpfung) [SKT99].....	26
<b>Abb. 4.7:</b> Anschauungsskizze des großen Technikumsprüfstandes mit simuliertem konventionellem Kulissenschalldämpfer SD III .....	29
<b>Abb. 5.1:</b> Lüftungsanlage für die Labore „Meß- und Regeltechnik“ und „Angewandte Thermodynamik“ an der Fachhochschule Bingen, FBV, in Bauwerk II vor Durchführung des Pilotprojektes „ANC-Lüftungsschalldämpfer“ (Anlage II. 12/V 49/50; Luftmenge: ZL/Abl. 5000 m <sup>3</sup> /h) .....	32

<b>Abb. 5.2:</b> A-Schalleistungspegel des Zuluft- und Abluft-Gebläsegeräusches (aus Aufwandsgründen nur orientierend, nicht normgerecht ermittelt).....	33
<b>Abb. 5.3:</b> ANC-Lüftungsschalldämpfer (RM = Referenzmikrofon, EM = Errormikrofon, LS = Kompensationslautsprecher).....	34
<b>Abb. 5.4:</b> Aufnahme des ANC-Lüftungsschalldämpfers bei den Voruntersuchungen am kleinen Technikumsprüfstand [SKT99] .....	35
<b>Abb. 5.5:</b> Mittlerer A-Schalldruckpegel $L_{pA}$ ohne aktiv- / passive-, ohne aktive / mit passiven und mit aktiv- /passiven Maßnahmen beim ANC-Lüftungsschalldämpfer 1m hinter dem Kanalende des kleinen Technikumsprüfstandes [SKT99] .....	35
<b>Abb. 5.6:</b> Lüftungsanlage für die Labore „Meß- und Regeltechnik“ und „Angewandte Thermodynamik“ an der Fachhochschule Bingen nach Einbau des ANC-Lüftungsschalldämpfers und Substitution des passiven Zuluft-SD .....	36
<b>Abb. 5.7:</b> Aufnahme des ANC-Lüftungsschalldämpfers unter realen Einbaubedingungen in der Unterdecke im Flur 1 OG. ....	37
<b>Abb. 5.8:</b> Aufnahme der Regeleinheiten des ANC-Lüftungsschalldämpfers (bestehend aus zwei <b>NANCY 2000</b> Controllern und -Verstärkereinheiten).....	37
<b>Abb. 5.9:</b> A-Schalldruckpegel $L_{pA}$ am Referenz- und Error-Mikrofon im Teilkanal 1 des ANC-Lüftungsschalldämpfers bei substituiertem Zuluft-SD .....	38
<b>Abb. 5.10:</b> Gegenüberstellung der in Anlehnung an DIN EN ISO 11820 ermittelten Durchgangsdämpfungsmaße des ANC-Lüftungsschalldämpfers (Teilkanal 1) und des passiven Zuluftschalldämpfers .....	39
<b>Abb. 5.11:</b> A-Schalldruckpegel am Referenzpunkt im Labor für Meß- und Regeltechnik mit und ohne ANC-Lüftungsschalldämpfer bzw. passivem Zuluft-Schalldämpfer .....	39
<b>Abb. 6.1:</b> Schalldruckpegel am Referenzpunkt bei aktiviertem Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp über einen ca. 110-stündigen Langzeitversuch (Vom 29.12.1999 bis 02.01.2000). (Sinuston $f = 125$ Hz, ohne Strömung, terzbandgefilterter Schalldruckpegel bei $f_{m,Tz} = 125$ Hz) .....	41
<b>Tab. 4.1:</b> Gegenüberstellung der Auslegungsdaten von konventionellen Kulissenschalldämpfern und Aktiv-Schalldämpfern. Alle Auslegungen beziehen sich auf einen Durchsatz von 55.000 m <sup>3</sup> /h, einen Kanalquerschnitt von 1,5 m x 1,5 m und eine Einfügungsdämpfung von 17 dB bei $f_{m,Okt.} = 125$ Hz. ....	28

## Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

### Aktenzeichen der Forschungsvorhaben:

(gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt)

- Az: 12329      Aktive Lärminderung durch Gegenschall
- Az: 15655      Entwicklung einer neuartigen Regelelektronik für die breitbandige aktive Lärminderung durch Gegenschall unter Elimination von Pseudoschall-Störquellen

### Formelzeichen:

$b^*$	Größte Seitenlänge eines Rechteckrohres	m
$b_T^*$	Größte Seitenlänge des gewählten Teilkanals	m
$c_F$	Schallgeschwindigkeit	m/s
$d$	Dicke des passiven Absorptionsmaterials	mm
$\Delta p$	Statische Druckdifferenz	Pa
$f$	Frequenz	Hz
$f_G$	Grenzfrequenz der Kanalgeometrie, oberhalb der die jeweilige akustische Mode ausbreitungsfähig ist	Hz
$f_{G,alt}$	Grenzfrequenz ebener Schallausbreitung vor einer Querschnittsunterteilung des Kanals	Hz
$f_{G,neu}$	Grenzfrequenz ebener Schallausbreitung nach der Querschnittsunterteilung des Kanals	Hz
$f_{G1}$	1. Grenzfrequenz der Kanalgeometrie, unterhalb der ebene Wellen ausbreitungsfähig sind	Hz
$f_{K,n}$	Selbstausschlag-Frequenz	Hz
$f_{m,Tz}$	Terzbandmittenfrequenz	Hz
$f_{m,Okt.}$	Oktavbandmittenfrequenz	Hz
$\eta$	Mechanischer Wirkungsgrad einer Strömungsmaschine	-
$\mu$	Einsatzgrad	-
$\rho$	Dichte	kg/m <sup>3</sup>
$v$	Strömungsgeschwindigkeit	m/s

$v_s$	Spaltgeschwindigkeit	m/s
$\zeta$	Druckverlust-Koeffizient	-
B	Breite	m
$D_i$	Rohr-Innendurchmesser	m
$\Delta B$	Abstand Kompensationslautsprecher / Reflektor	m
EK	Energiekosten	DM/kWh
EL	Energiebedarf	kWh/a
H	Höhe	m
$K_T$	Zuschlag für Ton- und Informationshaltigkeit	dB
L	Länge	m
$L_p$	Schalldruckpegel	dB
$L_{p,1m}$	Kennschalldruckpegel	dB
$L_{pA}$	A-Schalldruckpegel	dB(A)
$L_{WA}$	A-Schalleistungspegel	dB(A)
$P_{el.}$	elektrische Anschlußleistung	kW
$P_{\Delta p}$	erf. elektrische Zusatzleistung zur Druckverlustüberwindung	W
$P_{ANC}$	elektrische ANC-Regelleistung	W
$\dot{V}$	Volumenstrom	m <sup>3</sup> /h

### Abkürzungen:

Abluft-SD	Abluft-Schalldämpfer
ANC	Activ Noise Control
ANC-SD	ANC-Schalldämpfer
DSP	Digitaler Signalprozessor
EM	Error-Mikrofon
FFT	Fast Fourier Transformation
Fortluft-SD	Fortluft-Schalldämpfer
IP65	IP-Code für die Schutzart nach VDE (hier staub- und strahlwasserdichtes Gehäuse)
KMF	Künstliche Mineralfasern
LS	Kompensationslautsprecher
NF	Niederfrequenz
OG	Obergeschoß
RM	Referenz-Mikrofon
TF	Tauglichkeitsfilter
WHO	World Health Organisation
Zuluft-SD	Zuluft-Schalldämpfer

## Zusammenfassung

Die Zielsetzung des Vorhabens, kommerzielle aktive Schalldämpfer dahingehend zu erweitern, daß auch bei größeren Kanalabmessungen oberhalb der Grenzfrequenz  $f_{G1}$  eine wirksame Schallreduzierung erzielt werden kann, wurde erfolgreich realisiert.

Die in der Labor- und Technikums-Entwicklungsphase durchgeführten Arbeitsschritte, Untersuchungen und Ergebnisse wurden bereits eingehend im Zwischenbericht zu diesem Vorhaben dokumentiert und diskutiert [Her98]. U.a. wurde darin die Notwendigkeit aufgezeigt, die verwendete Hard- und Softwarearchitektur der Regelelektroniken neu zu konzeptionieren. Das vorgeschlagene Lösungskonzept bzgl. der weiteren Arbeitsschritte wurde daher in Bezug auf die vorgesehene Controller-Entwicklung abgeändert und in einem von diesem Vorhaben entkoppelten Entwicklungsprojekt durchgeführt [SKT99].

Durch den Einsatz der neu entwickelten **NANCY 2000**-Systeme [SKT99] konnte bei Vollast des Gebläses durch Kombination von aktiven- und passiven Maßnahmen mit dem Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp eine breitbandige Gesamtpegelreduzierung von 23 dB(A) erreicht werden. Die Untersuchungen bestätigten, daß bei einem aktiven Schalldämpfer nicht auf zusätzliche passive Maßnahmen verzichtet werden kann, wenn hohe Frequenzkomponenten,  $f > 500$  Hz, pegelbestimmend sind. Allerdings können passive Maßnahmen hier erheblich kleiner dimensioniert werden. Je nach Anwendungsfall und zu kompensierenden Frequenzen können ca. 10 bis 80 Vol% Absorptionsmaterial eingespart werden. Der verursachte statische Druckverlust des Prototyps liegt bei einem Durchsatz von ca. 55.000 m<sup>3</sup>/h mit ca. 10 Pa deutlich niedriger als bei einem vergleichbaren Kulissenschalldämpfer, der ohne Querschnittsaufweitung je nach Auslegung bis zu 260 Pa verursachen kann. Bei dem vorliegenden Durchsatz entsprechen die o.a. Druckverluste einer Gebläseleistung von ca. 190 W. (Aktiv-Schalldämpfer) bzw. ca. 5000 W (absorptionsoptimierter Kulissenschalldämpfer). Berücksichtigt man, daß für den Betrieb des Aktiv-Schalldämpfers zusätzlich ca. 60 W elektr. ANC-Regelleistung (Betriebsleistung) notwendig ist, beträgt die erforderliche Zusatzleistung des Aktiv-Schalldämpfers ca. 5% des konventionellen Kulissenschalldämpfers. Langzeitstabilität und Betriebssicherheit der ANC-Technologie wurde in Langzeitversuchen über einen mehrwöchigen Zeitraum bestätigt.

Im Rahmen des Pilotprojektes „ANC-Lüftungsschalldämpfer“ konnte im Zuluftstrang einer Lüftungsanlage an der FH Bingen ein konventioneller Kulissenschalldämpfer erfolgreich durch einen Aktiv-Schalldämpfer substituiert werden. Gegenüber dem substituierten Kulissenschalldämpfer konnte das passive Absorptionsmaterial im ANC-Lüftungsschalldämpfer um über 80 Vol% reduziert werden. Der verursachte Druckverlust liegt mit ca. 25 Pa in der Größenordnung des druckverlustoptimierten Kulissenschalldämpfers. Die elektrische Betriebsleistung der Regелеlektronik im Kompensationsfall wurde mit ca. 30 W ermittelt und fällt damit nicht nennenswert ins Gewicht.

Das Projekt „Aktive Lärminderung durch Gegenschall“ wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert (Az: 12329) und in Kooperation mit der Fa. IBS Ingenieurbüro für Schall- und Schwingungstechnik GmbH, Ludwigshafen, und der Fachhochschule Bingen, Fachbereich Umweltschutz, durchgeführt.



## Einleitung

Vorwiegend findet Lärmbekämpfung heute durch primäre (konstruktive) Maßnahmen an der Schallquelle selbst oder durch Verminderung der Schallübertragung mittels sekundärer Maßnahmen durch Dämmungs- und Dämpfungsmaßnahmen statt. Die Grenzen der konventionellen Techniken sind aber vielerorts erreicht, so daß zunehmend nach neuen Wegen der Lärmbekämpfung gesucht wird.

Konventionelle Absorptions-Schalldämpfertechnologien werden in einem weiten Anlagenspektrum zur Lärmbekämpfung eingesetzt. Ihre Wirksamkeit ist allerdings bei tiefen Frequenzen ( $< 500$  Hz) physikalisch bedingt eingeschränkt, da die Wellenlänge niederfrequenter Schallwellen z.B. verglichen mit der Dicke einer Absorberkulisse sehr groß sind und daher eine Dämpfung nur mit sehr großen Kulissen-Abmessungen erreicht werden kann [ST98]. Da aber eine Vielzahl der praktischen Lärmprobleme von niederfrequenten Geräuschen herrühren, fallen passive Absorptionsmaßnahmen hier sehr voluminös, schwer und teuer aus.

In Absorptions-Schalldämpfern finden üblicherweise poröse Absorber wie z.B. künstliche Mineralfasern (KMF) Verwendung, deren kanzerogenes Potential seit über einem Jahrzehnt von Wissenschaftlern diskutiert wird und bis dato immer noch nicht zweifelsfrei geklärt ist [ST97]. Gerade bei tiefen Frequenzen ( $f < 250$  Hz) ist wegen der großen Wellenlänge eine wirksame Dämpfung des Schalls durch poröse Absorber wie KMF nur dann zu erwarten, wenn rel. große Volumen von Dämpfungsmaterialien eingesetzt werden, d.h. die Absorptionswirkung wird bei tiefen Frequenzen in der Regel von den Abmessungen des sekundären Schallschutzproduktes bestimmt und entscheidet somit über die erforderliche Einsatzmenge an Fasermaterialien.

Für die tieffrequente Lärmbekämpfung in Rohrleitungen und Kanälen finden neben Absorptions-Schalldämpfern auch Resonatorschalldämpfer Verwendung. Ein Nachteil von Resonatoren ist allerdings ihre Schmalbandigkeit im Hinblick auf ihre Resonanzfrequenz. Ferner bewirken z.B. bei Hohlraumresonatoren die für die Frequenzabstimmung erforderlichen Kammervolumina auch hier große Abmessungen der Resonatorculissen, die zudem kompliziert aufgebaut und in Folge dessen sehr teuer werden können. Ein weiterer Nachteil von Resonatorschalldämpfern ist die nachlassende Wirksamkeit bei sich ändernder Betriebsfrequenz des lärm erzeugenden Aggregates, z.B. bei mehrstufigen oder drehzahlvariablen Ventilatoren oder Gebläsen.

Beiden konventionellen Schalldämpfertechnologien ist gemein, daß sie erhebliche Druckverluste verursachen und im Hinblick auf die Betriebskosten kräftig zu Buche schlagen können.

Vor diesem Hintergrund stellen die aktiven Schalldämpfertechnologien „Lärminderung durch Antischall“ für tiefe Frequenzen eine sinnvolle Ergänzung der passiven Methoden dar. Die wichtigsten Vorteile aktiver Schalldämpfersysteme sind [BJ96]:

- die hohe Dämpfung bei tiefen Frequenzen,
- die kleinen Abmessungen und damit die Gewichtsreduzierung gerade bei tiefen Frequenzen,

- geringe Umweltbelastung durch Verwendung von deutlich weniger Absorptionsmaterialien, z.B. Künstliche Mineralfasern, da die passive Dämpfung nicht mehr auf tiefe Frequenzen ausgelegt werden muß,
- der einfache Einbau (auch nachträglich möglich),
- die geringen Strömungsverluste (Leistungs- und Energieeinsparung bei den Ventilatoren und Gebläsen),
- die Möglichkeit der gezielten Unterdrückung störender, tonaler Komponenten im Geräuschkpektrum und
- die Adaptionfähigkeit des aktiven Systems, d.h. der aktive Schalldämpfer reagiert z.B. im Gegensatz zu einem Resonator selbständig auf Drehzahl- und damit Drehklangänderungen, z.B. bei mehrstufigen oder drehzahlvariablen Ventilatoren und Gebläsen

Die Wirkung von kommerziellen aktiven Schalldämpfern, die mit rel. einfachen Controllern arbeiten, beschränkt sich von einigen Ausnahmen abgesehen [KL98] i.A. auf die Kompensation von Frequenzen, deren Weiterleitung in Rohrleitungen und Kanälen in Form von ebenen Wellen erfolgt [DNS98][Gui95].

In vielen technischen Anwendungen liegen jedoch größere Kanalabmessungen vor, deren Grenzfrequenz  $f_{G1}$ , unterhalb derer eine ebene Welle nur ausbreitungsfähig ist, sehr tieffrequent ist. Dadurch sinkt der wirksame Frequenzbereich mit zunehmendem Rohr- bzw. Kanaldurchmesser und bleibt auf den unteren Frequenzbereich beschränkt. Werden Durchmesser, die größer als ca. 1,7 m sind, erreicht, sinkt die Wirkfrequenz des aktiven Systems unter ca. 100 Hz und man verläßt den akustisch interessanten Bereich zunehmend. Da aber die Geräuschentwicklung vieler Maschinen, wie z.B. Ventilatoren, Pumpen und Kompressoren, die an solche Rohrleitungen angeschlossen sind, oftmals dominierende tonale Komponenten im Frequenzspektrum aufweisen, die deutlich oberhalb der Grenzfrequenz der Kanäle liegen, ist eine aktive Lärminderung nach derzeitigem Stand der Technik dort nicht möglich.

#### *Zielsetzung des Vorhabens:*

Kommerzielle aktive Schalldämpfer sollen dahingehend weitergebildet werden, daß auch bei größeren Kanalabmessungen oberhalb der Grenzfrequenz  $f_{G1}$  eine wirksame Schallreduzierung erzielt werden kann. Die technischen Voraussetzungen für eine Kompensation der interessierenden Schallfrequenzen mittels aktiver Minderungstechnologien sollen hierzu durch geeignete Unterteilung von Kanalquerschnitten realisiert werden.

Bezogen auf zu dämpfende Eingangspegel wird ein Einfügungsdämpfungsmaß von ca. 15 bis 25 dB im Terzmittenfrequenzbereich von 63 bis 315 Hz und von 10 bis 15 dB im Terzmittenfrequenzbereich von 400 bis 800 Hz in Abhängigkeit vom jeweiligen Quellspektrum angestrebt.

Durch den Einsatz aktiver Schalldämpfertechnologien sollen Absorptionsmaterial, zusätzlich benötigte Leistung bei Strömungsmaschinen, Bauraum und Gewicht eingespart, sowie die Betriebskosten in Lüftungstechnischen Anlagen gesenkt werden.

Hierzu wurde folgendes Lösungskonzept bei Antragstellung ausgearbeitet: <sup>1</sup>

### *Entwicklung eines Aktiv-Schalldämpfers im Labor- und Technikumsmaßstab*

#### a) *Laborprüfstand:*

Aufbau einer Versuchsstrecke im Labor-Maßstab um die prinzipielle Wirkungsweise einer Querschnittunterteilung zu untersuchen und nachzuweisen. Die Anregung soll hierbei noch durch Lautsprecherbeschallung erfolgen. Die Kompensation wird manuell von Hand vorgenommen.

#### b) *Technikumsprüfstand:*

Aufbauend auf vorherige Erkenntnisse wird ein Modell im Technikums-Maßstab angefertigt und eine Pegelminderung durch aktive Lärminderung in einem querschnittsunterteilten Kanal untersucht. Die Anregung erfolgt hierbei weiterhin durch Lautsprecherbeschallung mittels manueller Kompensation. Hierzu ist vorgesehen, den bei der Fa. Hermann Wendt GmbH & Co. Dämmtechnik KG bereits vorhandenen Versuchskanal zu diesem Zweck entsprechend umzubauen. An diesem Prüfstand sollen folgende prinzipielle Fragen beantwortet werden:

Wie gestaltet sich der Übergang vom Diffusfeld zum ebenen Wellenfeld hinter der Kanalaufteilung? Welche Wegstrecke wird benötigt, bis sich ein ebenes Wellenfeld ausgebildet hat? Wo sollen innerhalb des Teilkanals Lautsprecher und Mikrophone angebracht werden? Wie lang muß die Querschnittsunterteilung sein? Wie weit muß man sich bei der Kompensation im Rohr von der Mündung entfernen?

#### c) *Technikumsprüfstand mit autom. Kompensation:*

Erweiterung des Versuchsaufbaus (b) um die automatische Kompensation mit Hilfe marktgängiger Controller mit automatischer Regelmöglichkeit. Hierzu ist vorgesehen, zwei Controller auf adaptiver Digitalfiltertechnik bzw. auf der Basis von Wellenformsynthese anzuschaffen, bzw. in Zusammenarbeit mit der Fa. ABS GmbH die vorhandene Systeme auf die gestellte Aufgabenstellung anzupassen. Hierbei soll untersucht werden, ob die auf dem Markt befindlichen Controller-Einheiten für die gesteckten Zielsetzungen geeignet sind, bzw. Schwachstellen analysiert werden, deren Ergebnisse ggf. Ansatzmöglichkeiten für die geplante Controller-Entwicklung (Arbeitsschritt e)) liefern soll.

#### d) *Ventilatoren- Meßstrecke:*

Erweiterung des Versuchsaufbaus (c) für strömungstechnische Untersuchungen bis zu einer Geschwindigkeit von ca. 20 m/s. Hierbei ist vorgesehen, einen der Fa. IBS Ingenieurbüro für Schall- und Schwingungstechnik GmbH gehörenden Großventilator techn. zu überholen und in Zusammenarbeit mit der Fa. Hermann Wendt GmbH & Co. Dämmtechnik KG durch entsprechende Übergangs- und Schalldämpferstrecken an den Technikumsprüfstand anzuschließen. Für die ge-

<sup>1</sup> Aus technischen Gründen war es nicht möglich, den geplanten Lösungsweg exakt einzuhalten. Die Abweichungen wurden der Deutschen Bundesstiftung Umwelt mitgeteilt. Wesentliche Abweichungen, z.B. die Entwicklung einer neuartigen Regelelektronik, erfolgten mit Zustimmung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Die Abweichungen, auf die in der Vorhabensbeschreibung im Hauptteil noch näher eingegangen wird, haben das Gesamtziel des Vorhabens nicht geändert.

planten Untersuchungen muß hierzu zur Unterdrückung von Schallnebenwegen der Ventilator akustisch durch Isolationsmaßnahmen entkoppelt werden. Nach akustischer- und strömungstechnischer Optimierung der Versuchsstrecke wird die Kompensation der Schallsignale bei Vorhandensein von Strömungen getestet und nötigenfalls der Versuchsaufbau optimiert. Dabei soll analog zu Schritt b) die Ausbildung des ebenen Wellenfeldes nach der Kanalteilung bei Vorhandensein von Strömung untersucht werden. Ferner soll die strömungstechnisch günstige Positionierung der Kompensationslautsprecher getestet und optimiert werden. Mögliche Schwachstellen marktgängiger Controller-Typen sollen bei Vorhandensein von Strömung analysiert werden.

#### *Marktreife Entwicklung und Test des Aktiv-Schalldämpfers im Rahmen eines Pilotprojektes*

e) *Controller- Entwicklung:*

Entwicklung und Optimierung der Controller- Einheit auf Grundlage der im Rahmen der Arbeitsschritte c) und d) durchgeführten Schwachstellenanalyse in Zusammenarbeit mit in Frage kommenden Controller- Herstellern für den industriellen Einsatz und deren Erprobung unter realen Einbaubedingungen in der Versuchsstrecke (d). Hierbei soll u.a. überprüft werden, ob für die Problemlösung mehrere Einkanalssysteme oder ein Mehrkanalsystem erforderlich ist.

f) *Entwicklung eines Aktiv-Schalldämpfer-Prototyps:*

Entwicklung eines aktiven Prototyp- Schalldämpfers einschließlich der entsprechenden Controller- Einheit für den industriellen Einsatz. Test und Optimierung des Prototyps im vorhandene Strömungskanal (d). Hierbei soll die Langzeitstabilität und Standsicherheit dieser Technologie getestet werden. In diesem Zusammenhang ist u.a. vorgesehen, den Einsatzbereich der marktgängigen Kompensationslautsprecher , vor allem im Hinblick auf höhere Temperaturen und korrosive Medien zu beschreiben und die Einsatzgebiete festzulegen, um evtl. eine Weiterentwicklung in Zusammenarbeit mit Kompensationslautsprecher- Herstellern anzuregen. Parallel dazu soll eine Notlaufstrategie erarbeitet werden, die einen Teilausfall des Systems erkennt und Maßnahmen einleitet, die die Schalldämpfung in einem Mindestmaß bis zur Fehlerbeseitigung gewährleistet.

g) *Test des Aktiv-Schalldämpfers im industriellen Einsatz im Rahmen eines Pilotprojektes:*

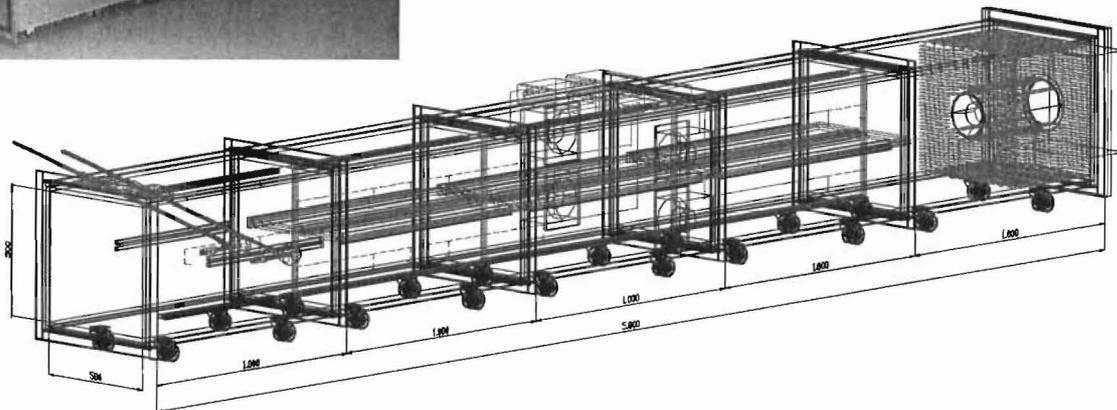
Industrieller Einsatz des Aktiv- Schalldämpfers. Hierbei ist vorgesehen, diese Technologie in Frage kommenden Kunden der Fa. Hermann Wendt GmbH & Co. Dämmtechnik KG als Alternative zu herkömmlichen Absorber- und Resonatorschalldämpfern anzubieten. In diesem Zusammenhang wird angestrebt, um einen direkten Vergleich zu erhalten, einen vorhandenen, konventionellen Schalldämpfer durch den Aktiv- Schalldämpfer zu ersetzen und diesen zu testen. Hierbei gehen wir davon aus, daß bei Vorlage entsprechend positiver Ergebnisse sich ein Kunde der Fa. Hermann Wendt GmbH & Co. Dämmtechnik KG für den Test und die Optimierung des industriellen Einsatzes des Aktiv- Schalldämpfers im Rahmen eines Pilotprojektes zur Verfügung stellt.

## Hauptteil

### 1. Aufbau und Untersuchungen an einer Versuchsstrecke im Labormaßstab

Aufbau und durchgeführte Untersuchungen am Laborprüfstand wurden bereits ausführlich im Zwischenbericht zu diesem Vorhaben beschrieben [Her98].

Abb. 1.1 zeigt den vierfach querschnittsgeteilten Laborprüfstand an der FH Bingen.



**Abb. 1.1:** Laborprüfstand zur Untersuchung der prinzipiellen Möglichkeit der Wirkfrequenzbereichserweiterung eines aktiven Schalldämpfers durch Querschnittunterteilung

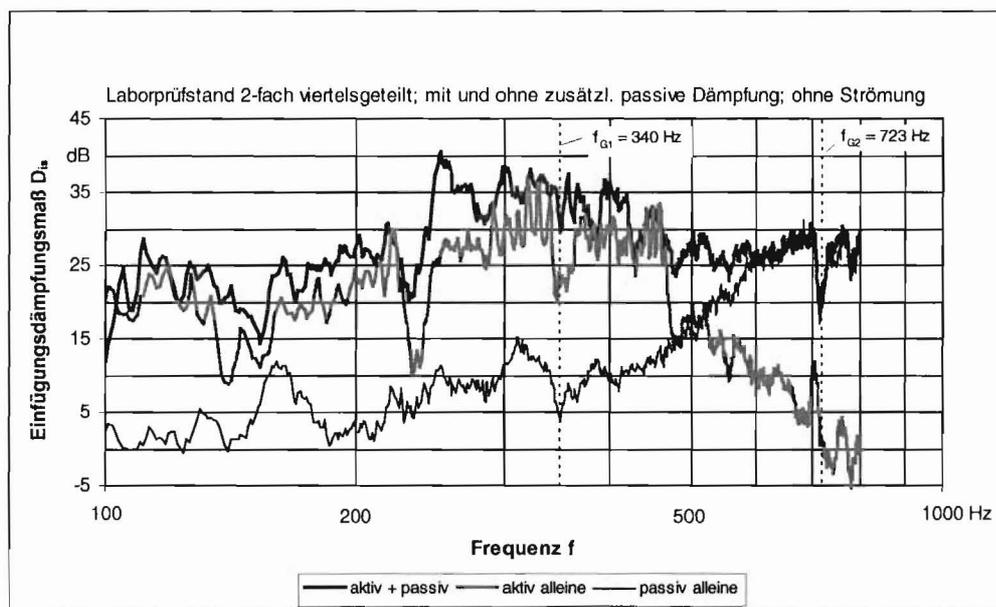
Die Untersuchungen wurden am Laborprüfstand ohne Vorhandensein von Strömung mit Lautsprecherbeschallung durchgeführt. Ursprünglich war vorgesehen, die Kompensation an dieser Versuchsstrecke manuell von Hand vorzunehmen. Durch die frühe Einbindung der ABS GmbH als Hersteller von ANC-Controllersystemen in das Vorhaben konnte jedoch bereits in diesem Stadium mit automatischer Kompensation gearbeitet werden. Es wurden insg. sechs herkömmliche ANC-Controller-Systeme der Fa. ABS GmbH vom Typ **NANCY**, die auf dem Prinzip der adaptiven Digitalfilterung nach dem derzeitigen Stand der ANC-Regeltechnik arbeiten, angeschafft.

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurden u.a. Fragestellungen zum Übergang vom Dif-fus- ins ebene Schallwellenfeld bearbeitet sowie Untersuchungen bzgl. der hierzu notwendigen Wegstrecke in der Querschnittunterteilung durchgeführt [PFE98]. Neben der Bestimmung der Einfügungsdämpfung des Aktiv-Schalldämpfers mit und ohne Unterteilung wurde am Laborprüfstand u.a. der Einfluß:

- der ANC-Referenz- und Erormikrofonposition
- der Kompensationslautsprecherposition
- zusätzlicher passiver Dämpfung
- der Dämmung der Teilquerschnittswände

untersucht.

Auszugsweise ist in Abb. 1.2 eine Gegenüberstellung der jeweiligen Einfügungsdämpfungen des aktiven-, des passiven- und der Kombination aus aktivem- und passiven Teil des Aktiv-Schalldämpfers für den zweifach viertelsgeteilten Laborprüfstand für Breitbandrauschen bei den empirisch als optimal ermittelten ANC-Mikrofonpositionen wiedergegeben [Her98].



**Abb. 1.2:** Vergleich der in Anlehnung an DIN EN ISO 11820 [3] ermittelten Einfügungsdämpfungen des aktiven-, des passiven- und der Kombination aus aktivem- und passivem Teil des Aktiv-Schalldämpfers im zweifach viertelsgeteilten Laborprüfstand bei optimierten ANC-Mikrofonpositionen.

Wie Abb. 1.2 zeigt, erreicht der aus aktivem- und passivem Teil kombinierte Schalldämpfer bereits ab 100 Hz beträchtliche Einfügungsdämpfungen von ca. 25 dB über den gesamten, interessierenden Frequenzbereich!

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, daß es prinzipiell möglich ist, den Wirkfrequenzbereich eines Aktiv-Schalldämpfers durch Querschnittunterteilung zu erhöhen. Hierbei ist deutlich zu erkennen, daß durch Kanalunterteilung Frequenzen oberhalb der Grenzfrequenz des nicht unterteilten Kanals ( $f_{G1}$ ) kompensiert werden können. Der Abfall der aktiven Wirksamkeit ab ca. 460 Hz begründet sich in der beschränkten Rechnerleistung und der Anti-Allising-Tiefpassfilterung der verwendeten Controller. Theoretisch wäre bei entsprechender Anpassung des Wirkfrequenzbereiches der Controller eine Kompensation bis zur Grenzfrequenz des unterteilten Kanals ( $f_{G2}$ ) möglich. Es ist allerdings zu berücksichtigen, daß für höhere Frequenzen  $f > 500$  Hz die Verwendung von Absorbern (passiven Schalldämpfern) kostengünstiger ist.

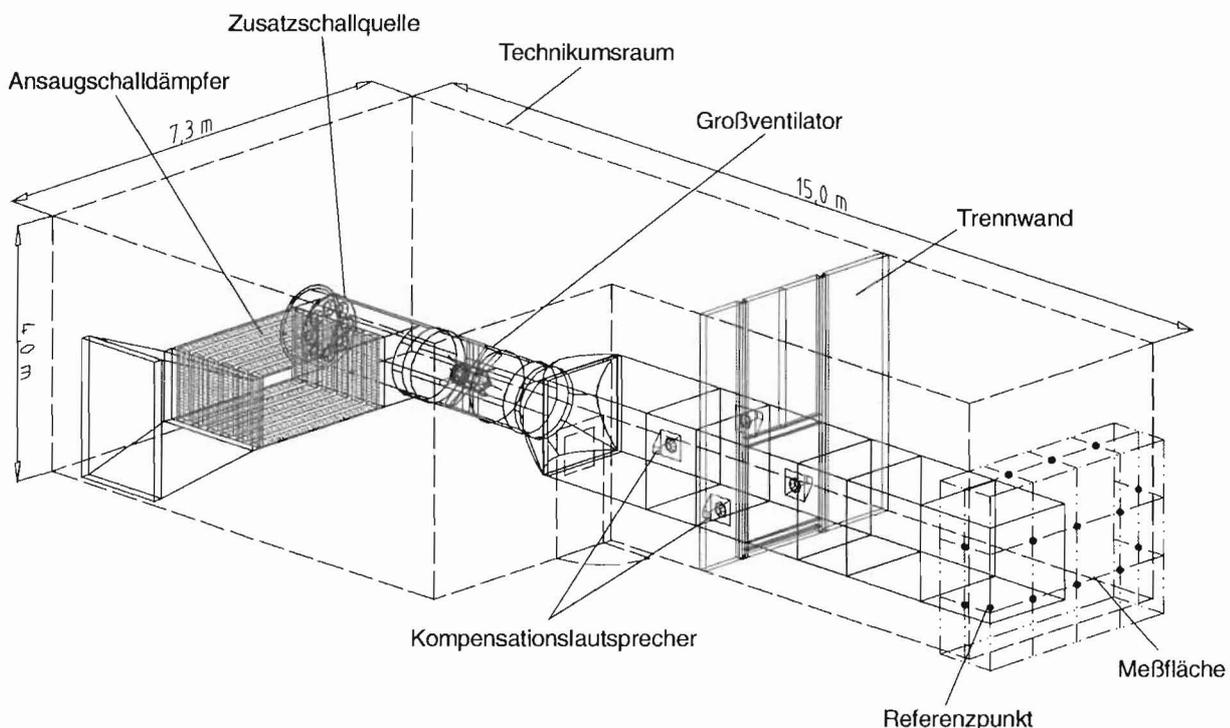
Bezüglich der ANC-Bauteilpositionierung am Kanal konnten günstige und ungünstige Positionen ermittelt werden [SW97][ST98]. Ferner konnten Aussagen zur Querschnittsunterteilungslänge und -ausführung getroffen werden [Her98].

Die wesentlichen Ergebnisse dieser Untersuchungen fließen in die methodische Vorgehensweise bei der Auslegung eines Aktiv-Schalldämpfers ein (vgl. Pkt. 7).

## 2. Aufbau und Untersuchungen an zwei Versuchsstrecken im Technikumsmaßstab

Die Erkenntnisse aus den Laborversuchen sollten in einer Technikums-Versuchsstrecke (Großer Technikumsprüfstand: Querschnitt 1,5 m x 1,5 m) in einem querschnittsunterteilten Kanal umgesetzt und ähnlichkeitstheoretische Untersuchungen im Hinblick auf eine geplante Pilotanlage durchgeführt werden. Diese Untersuchungen sollten ursprünglich zunächst ohne Strömung mit manueller Kompensation bei Lautsprecherbeschallung durchgeführt werden. Da bereits während den Laborprüfstands-Untersuchungen mit automatischer Kompensation gearbeitet wurde, war es jedoch sinnvoll, auch hier praxisnah direkt mit automatischer Kompensation in die Technikumsphase einzusteigen, um eine Schwachstellenanalyse an marktgängigen Controller-Systemen durchzuführen.

Abb. 2.1 zeigt den großen Technikumsprüfstand ohne Querschnittsunterteilung.



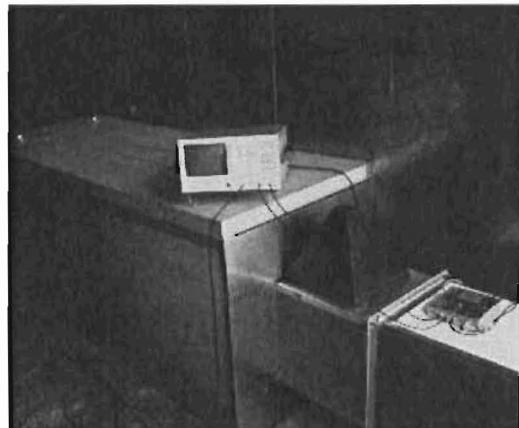
**Abb. 2.1:** Großer Technikumsprüfstand ohne Querschnittsunterteilung (Querschnitt: 1,5 m x 1,5 m):

Max. Gebläseleistung:  $\dot{V} \approx 55.000 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  $v \approx 7 \text{ m/s}$ ;  $P_{\text{el.}} = 29,3 \text{ kW}$ ;  $L_{\text{WA}} = 98 \text{ dB(A)}$ ;  
 $f_{\text{G},1} = 113 \text{ Hz}$ ; Ventilatorordrehklang: 93 Hz (100% Gebläseleistung); Zusatzschallquelle:  
 8 Tieftonchassis auf Lautsprecherwand, Nennbelastbarkeit: ca. 500 W

Da dem Vorhandensein von Strömungen bei der automatischen Kompensation eine wesentliche Bedeutung zukommt, wurde der Technikumsprüfstand ferner abweichend vom ursprünglichen Projektplan direkt als Ventilatorenmeßstrecke aufgebaut.

Da sich nach Teilfertigstellung des großen Technikumsprüfstandes erste strömungstechnische Problemstellungen bei der automatischen aktiven Schallfeldkompensation abzeichneten, die man besser in kleinerem Maßstab zuerst untersuchen sollte, wurde abweichend von der ursprünglichen Projektplanung ein weiterer Technikumsprüfstand als Ventilatorenmeßstrecke mit kleineren Abmessungen aufgebaut, an dem einkanalige Untersuchungen bei Vorhandensein von Strömung durchgeführt wurden.

Abb. 2.2 zeigt eine Aufnahme des kleinen Technikumsprüfstandes.



**Abb. 2.2:**

Kleiner Technikumsprüfstand (0,5 m x 0,5 m):

Gebläseleistung:  $\dot{V} \approx 6.500 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  $v \approx 7 \text{ m/s}$ ;

$L_{WA} \approx 85 \text{ dB(A)}$ ;  $f_{G,1} = 340 \text{ Hz}$

Auf den Aufbau der beiden Technikumsprüfstände und die in dieser Projektphase durchgeführten Untersuchungen sowie auf die entsprechenden Ergebnisse wurde bereits detailliert im Zwischenbericht eingegangen [Her98].

Die Ergebnisse der Technikumsuntersuchungen können wie folgt zusammengefaßt werden [Her98]:

Beim großen Technikumsprüfstand konnten einige diskrete Frequenzen (Sinustöne) unter Berücksichtigung der Kanalgeometrie und der ANC-Bauteilpositionen ohne Strömung auch bei Vierfachteilung des großen Technikumsprüfstandes erfolgreich mit dem **NANCY**-System kompensiert werden. Die Einfügungsdämpfung betrug dabei ca. 20 dB. Bei Vorhandensein von Strömung war ein stabiler Betrieb jedoch zunächst nicht möglich. Herkömmliche ANC-Controller scheitern in großen Querschnitten an den realen Betriebsbedingungen, wie sie in der Praxis vorgefunden werden.

Beim kleinen Technikumsprüfstand konnte Breitbandrauschen im Bereich ebener Wellenausbreitung um ca. 15 dB abgesenkt werden. Mit Strömung arbeitet das ANC-System nur für Frequenzen ab 130 Hz. Darunter kann es sogar zu Pegelerhöhungen kommen. Die gemessene Wirkungsgrenze lag bei ca. 320 Hz; Die theoretische Grenzfrequenz des Kanals ist  $f_{G,1} = 340 \text{ Hz}$ . Das breitbandige Ventilatorengeräusch liegt im Bereich der ebenen Wellenausbreitung und konnte um ca. 12 dB abgesenkt werden. Der Drehklang des Ventilators wurde um ca. 15 dB abgesenkt.

Ein Sinuston, der dem Strömungsrauschen überlagert wurde, konnte um fast 30 dB abgesenkt werden.

Die beobachteten Probleme lassen sich u.a. durch folgende Überlegungen erklären:

Herkömmliche Aktivschall-Regelelektroniken (ANC-Controller) neigen unter bestimmten Voraussetzungen zu Instabilitäten. Daß es zu Instabilitäten im aktiven Systemregelprozeß kommen kann ist u.a. darauf zurückzuführen, daß die Kompensations-Lautsprecher bei bestimmten Frequenzen, je nach Reflektionsbedingungen, keine Leistung in das Rohrsystem einspeisen können [ST98]. Beim Versuch solche Frequenzen, die sich durch Einbrüche in der Übertragungsfunktion zeigen, adaptiv zu kompensieren, übersteuert das System, wird infolgedessen instabil und kann dann auch nicht mehr diejenigen Frequenzbereiche kompensieren, in denen eine für die Kompensation günstige Übertragungsfunktion vorliegt.

Ferner erzeugt der Kompensations-Lautsprecher grundsätzlich unabhängig von der Schalldruckminimumlage des Primärfeldes durch die Überlagerung von Kompensations- und Primärsignal im Kompensationsfall in Richtung Primärschallquelle ein erstes Schalldruckminimum im Abstand einer halben Wellenlänge des abgestrahlten Signals vom Kompensations-Lautsprecher. Positioniert man die Mikrofone an solchen oder anderen ungünstigen Mikrofonpositionen, an denen z.B. der Pegel für ausgesuchte Frequenzen zu niedrig ist (Schalldruckminimum), kann es ebenfalls zu Instabilitäten kommen.

Desweiteren ist bei Pseudoschall mit Instabilitäten zu rechnen, wenn insbesondere turbulente Druckschwankungen am Referenz- und/oder Fehlermikrofon als Schallanteile fehlinterpretiert werden, da diese Signale am Referenz- und Fehlermikrofon nicht kohärent sind.

Darüber hinaus wird ein Teil der Adaptionfähigkeit des Systems für Frequenzbereiche oberhalb der Grenzfrequenz  $f_{G,1}$  der Kanalgeometrie „verschwendet“, wenn in Abhängigkeit der Kanalgeometrie die Grenzfrequenz ebener Wellenausbreitung insbesondere bei größeren Kanalabmessungen unterhalb der oberen Wirkfrequenz, für die das aktive Steuersystem konzipiert ist, liegt.

Die im Rahmen der Labor- und Technikumsuntersuchungen ermittelten Erkenntnisse zeigten die Notwendigkeit auf, die verwendete Hard- und Softwarearchitektur der Aktivschall-Controller-Systeme neu zu konzeptionieren [Her98][SKT99]. Eine ANC-Controller-Entwicklung derartigen Umfangs, bei der nicht mit der vorhandenen Controller-Konzeptionen weitergearbeitet werden kann, war jedoch nicht im Rahmen des Arbeits-, Zeit- und Kostenplans des Vorhabens vorgesehen. Das vorgeschlagene Lösungskonzept bzgl. der weiteren Arbeitsschritte in der Entwicklungs- und Testphase eines industrietauglichen Aktiv-Schalldämpfers wurde daher in Bezug auf die vorgesehene Controller-Entwicklung abgeändert und in einem von diesem Vorhaben entkoppelten Entwicklungsprojekt „Entwicklung einer neuartigen Regелеlektronik für die breitbandige aktive Lärminderung durch Gegenschall unter Elimination von Pseudoschall-Störquellen“ (Az. 15655) durchgeführt [SKT99].

### 3. Entwicklung / Optimierung der Regelelektronik

Im Rahmen des durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter dem Az: 15655 geförderten Projektes: „Entwicklung einer neuartigen Regelelektronik für die breitbandige aktive Lärminderung durch Gegenschall unter Elimination von Pseudoschall-Störquellen“, wurde basierend auf den in der Labor- und Technikums-Entwicklungsphase gewonnenen Erkenntnissen das **NANCY 2000**-System von den Firmen IBS GmbH und ABS GmbH entwickelt [SKT99].

Durch den Einsatz der neuartigen Regelelektronik konnte unter Berücksichtigung der Kanalgeometrie ein stabiler, breitbandiger, störungsfreier Betrieb des ANC-Systems auch bei Vorhandensein von Strömung in querschnittsunterteilten Kanälen erfolgreich realisiert werden.

Die wesentlichen Entwicklungsmerkmale der neuartigen Regelelektronik **NANCY 2000** sind nachfolgend zusammenfassend dargestellt:

Im Vergleich zum herkömmlichen **NANCY**-System wurde folgendes geändert:

- Trennung von Signalverarbeitung und Leistungsteil  
Damit ist es möglich, für verschiedene Anwendungen durch Auswahl eines passenden NF-Verstärkers zugeschnittene Systeme zu konfektionieren.
- Übergang von Festkomma- zu Gleitkomma-Prozessoren mit einer dreifachen Rechenleistung.  
Damit war es möglich, die zusätzlichen Filterfunktionen zu realisieren, ohne daß es zu Leistungsengpässen im Signalprozessor kommt.
- Die Hardware wurde so ausgelegt, daß später ein 2-Kanalsystem und mit einer zweiten Prozessorplatine ein 4-Kanal-System realisiert werden kann.
- Die Initialisierungsprozedur wurde weiter automatisiert (Autorangefunktion)

Zusätzlich wurden folgende neue Module in das Regelkonzept integriert:

- Tauglichkeitsfilter (Tiefpass, Hochpass, bis zu drei Notch-Filter) für die Ausblendung störender Frequenzen im Primär- und/oder Sekundärzweig, einstellbar per PC-Programm
- Verschiedene Parameter und Arbeitsmodi sind per PC-Programm einstellbar:
  - Initialisierung mit/ohne Störsignal
  - automatische oder manuelle Einstellung der Mikrofonvorverstärkung und des Ausgangspegels
  - Einstellung der Adaptionsschrittweite und Filterlängen
  - PC-ControlPanel (serielles Interface zu einem PC mit Bedienprogramm)
    - Zur Einstellung der Arbeitsmodi/Parameter und Filtercharakteristiken
    - Zur Beobachtung der Arbeitsweise des ANC-Systems (Monitorfunktion)
    - Zum Downloaden neuer Firmenware oder anderer Parametersätze in den nichtflüchtigen Speicher

Mit Hilfe der **NANCY 2000**-Systeme besteht nun die Möglichkeit „Problemfrequenzen“, die z.B. durch Fehlanpassung der ANC-Bauteile an die Kanalgeometrie oder in Folge schlechter Kohärenz durch Pseudoschall auftreten können, auszublenden, um so einen stabilen ANC-Betrieb zu gewährleisten. Das Filterdesign wird programmtechnisch unterstützt und zur Kontrolle grafisch dargestellt. Die Parameterisierung des ANC-Systems per PC erlaubt nun eine wesentlich flexiblere Anpassung der Arbeitsweise des Systems an die akustische Umgebung.

Für weitere Informationen verweisen wir auf den eigenständigen Abschlußbericht zum Vorhaben 15655, in dem die Entwicklung des **NANCY 2000**-Systems detailliert beschrieben wird [SKT99].

## 4. Ausbau des großen Technikumsprüfstandes zum Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp

### 4.1 Aufbau des Aktiv-Schalldämpfer-Prototyps

Der Aufbau des großen Technikumsprüfstandes wurde bereits im Zwischenbericht beschrieben [Her98]. Im Rahmen des Ausbaus zum Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp wurde zunächst die Verstärkerleistung der ANC-Controller erhöht. Hierzu wurden zwei externe NF-Verstärker (Stereo-Hochleistungs-Endverstärker; Hersteller: K+H; Typ: SA 240, 2 x 120/160 Watt oder 1 x 240/340 Watt bei Brückenbetrieb) eingesetzt, so daß vierkanalig statt 20 W nun jeweils 120 W Nennbelastbarkeit pro ANC-System zur Verfügung steht. Ferner kamen vier leistungsfähigere Kompensationslautsprecher-Boxen (38 cm Tieftonchassis in geschlossenem 100 l MDF-Gehäuse; Nennbelastbarkeit: 200 W; Kennschalldruckpegel: 97 dB, 1 m Abstand, 1 W) zum Einsatz.

Abb. 4.1 zeigt den Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp (ohne passive Auskleidung)

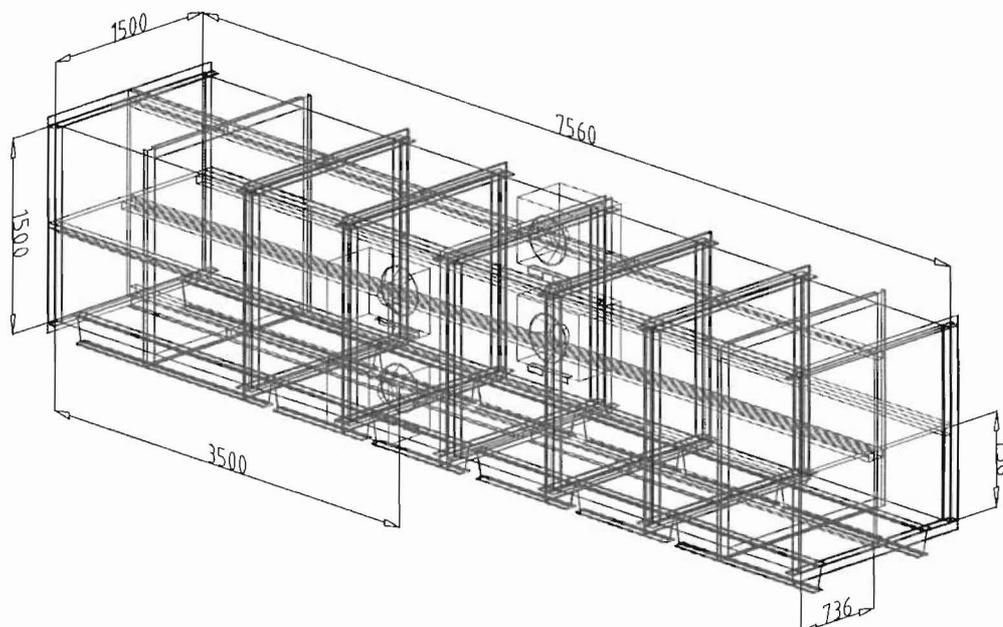


Abb. 4.1: Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp (ohne passive Auskleidung)

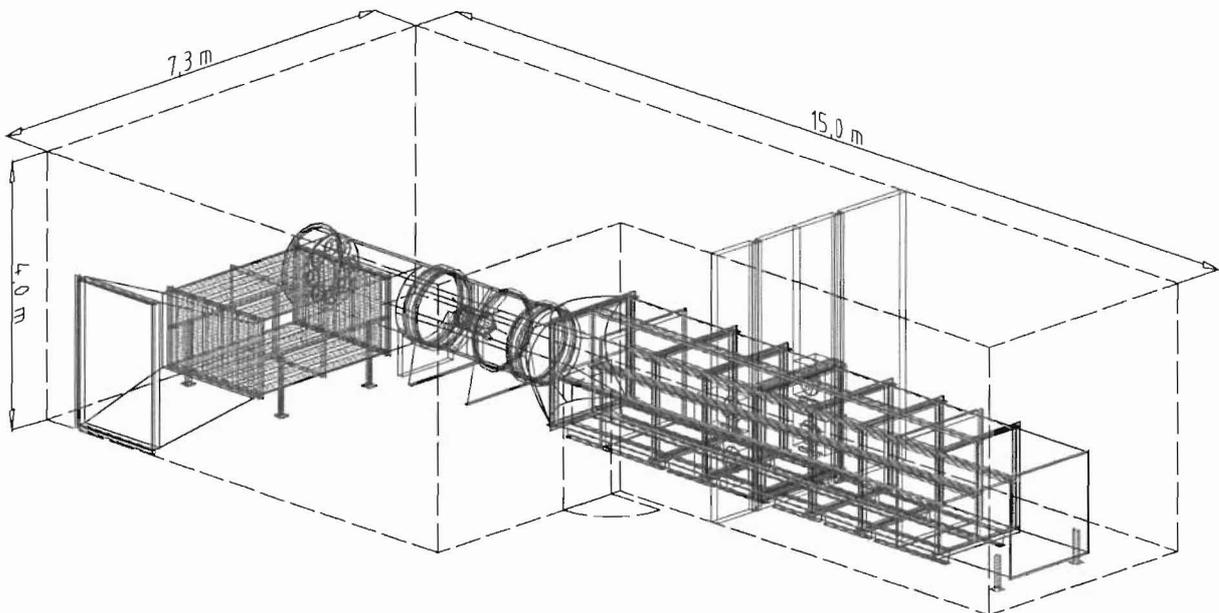
Die Kanalwand aus Stahl hat eine Dicke von 5 mm. Der Kanal ist in vier Teilquerschnitte unterteilt. Die Unterteilung in 4 Segmente besteht aus 28 mm dicken Hartfaserplatten. Der Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp hat durch die Unterteilung eine Grenzfrequenz von  $f_{G,neu} \approx 220$  Hz.

Alle ANC-Bauteile (Kompensationslautsprecher, Referenz- und Error-Mikrofone) sind an den vier Teilquerschnitten jeweils an der gleichen Position angebracht. Die Kompensationslautsprecher sind jeweils 3,5 m hinter dem Schalldämpfereinlaß positioniert. Die Referenz-Mikrofone befinden sich jeweils 0,8 m oder 1,8 m vor den Kompensationslautsprechern. Die Error-Mikrofone sind 3 m hinter den Kompensationslautsprechern positioniert. Die Wahl der entsprechenden Positionen wird in Kap. 7 noch näher begründet.

Da sich im Rahmen der Untersuchungen die Notwendigkeit abzeichnete, den Aktiv-Schalldämpfer zur Dämpfung höherer Frequenzen zusätzlich noch passiv zu bedämpfen (vgl. Kap. 4.2), wurde der Prototyp mit 80 mm dicken, vertikal angebrachten Randkulissen ausgekleidet. Die ANC-Mikrofone werden durch die Randkulissen von der Strömung abgeschirmt.

Nach erfolgreicher Entwicklung des **NANCY 2000**-Systems wurden die Stereo-Verstärker schließlich gegen vier 100 W **NANCY 2000**-Verstärkereinheiten (Schutzgrad IP65) ausgetauscht.

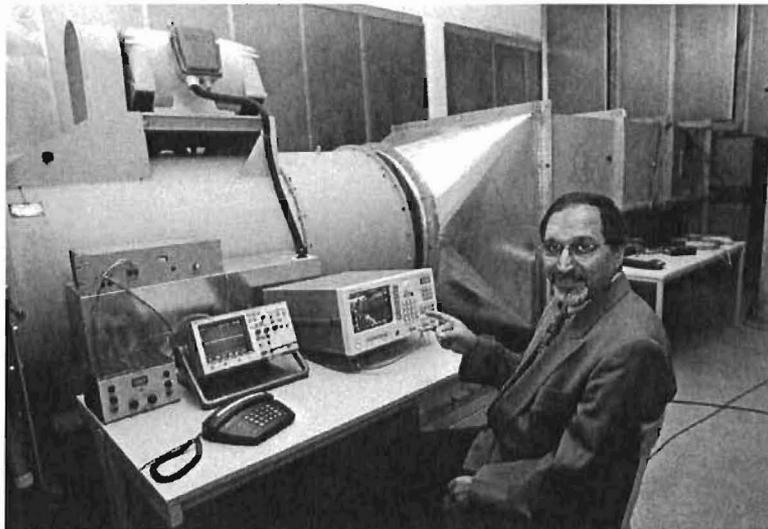
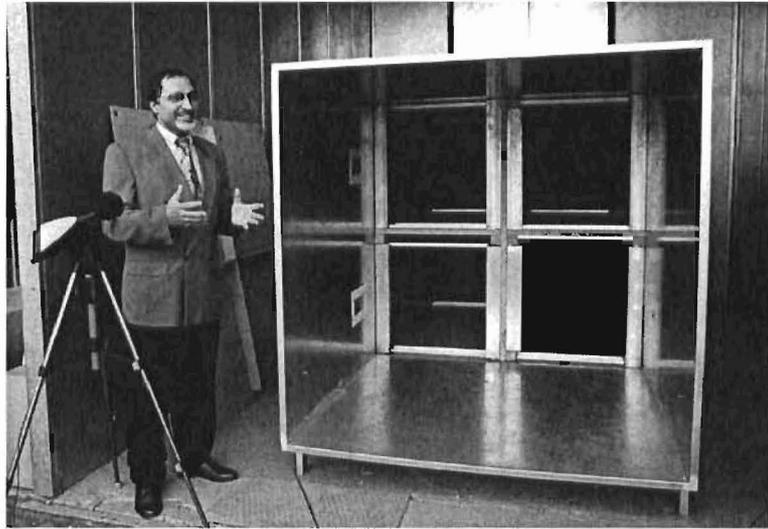
Abb. 4.2 zeigt den in den großen Technikumsprüfstand eingebauten Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp.



**Abb. 4.2:** Großer Technikumsprüfstand mit Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp (Querschnitt: 1,5m x 1,5m)

Max. Gebläseleistung:  $\dot{V} \approx 55.000$  m<sup>3</sup>/h, Spaltgeschwindigkeit im Prototyp  $v_s \approx 9$  m/s,  
 $P_{el.} = 29,3$  kW,  $L_{WA} = 98$  dB(A), 4 Teilkanäle zur Wirkfrequenzbereichserweiterung  
 ( $f_{G,neu} \approx 220$  Hz), mit passiven Randkulissen ausgekleidet ( $d = 80$  mm)

Abb. 4.3 zeigt Aufnahmen des eingebauten Aktiv-Schalldämpfer-Prototyps im Technikum der Firmen Wendt SIT GmbH und IBS GmbH.



**Abb. 4.3:**

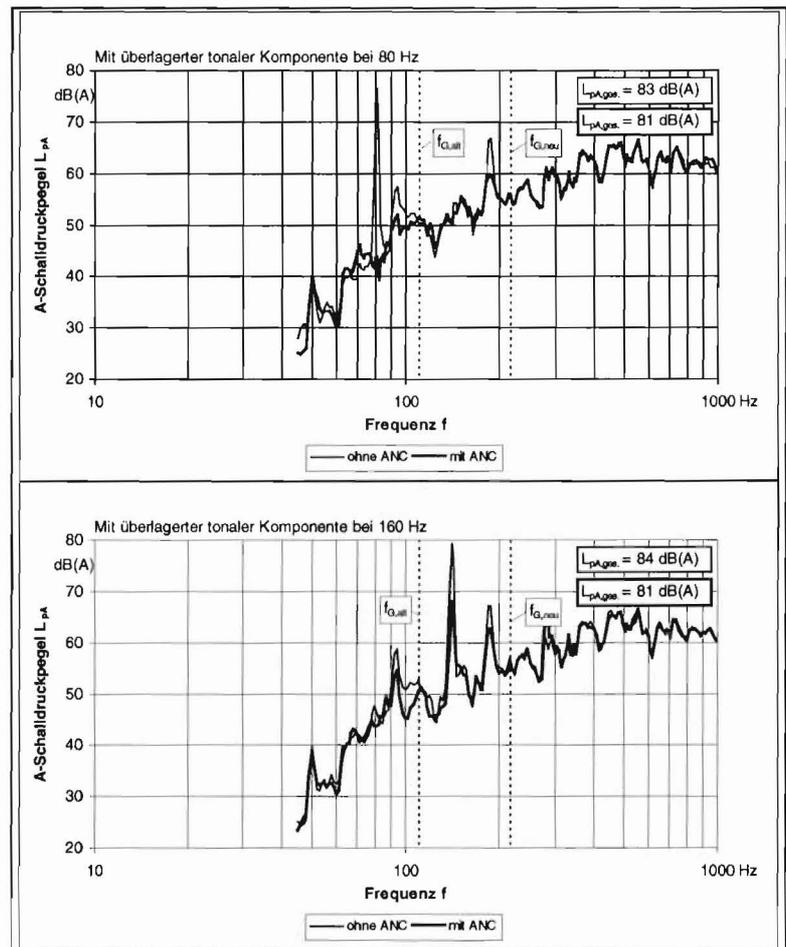
Aufnahmen des eingebauten Aktiv-Schalldämpfer-Prototyps im Technikum der Firmen Wendt SIT GmbH und IBS GmbH  
(Fotos: Tröster)

## 4.2 Durchgeführte Untersuchungen am Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp

Unabhängig von der im Rahmen des Vorhabens Az. 15655 durchgeführten Controller-Entwicklung wurde im Rahmen des Ausbaus des großen Technikumsprüfstandes zum Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp zunächst mit vier herkömmlichen **NANCY**-Systemen weitergearbeitet. Die Untersuchungen mußten sich daher zunächst auf diskrete Frequenzen beschränken.

Nach Erhöhung der Verstärkerleistung und Einsatz leistungsfähigerer Kompensationslautsprecher konnten einige diskrete Einzeltöne mit dem Prototyp auch bei Vorhandensein von Strömung mit herkömmlichen Controller-Systemen erfolgreich kompensiert werden. Die **NANCY**-Systeme wurden hierzu insofern „überlistet“, in dem man dem Regelalgorithmus einen dem Strömungsgeräusch deutlich überlagerten Sinuston zur Kompensation anbietet, so daß sich die Regelung praktisch nur auf diese Frequenz adaptiert und daher stabil bleibt.

Abb. 4.4 zeigt beispielhaft die ermittelten A-Schalldruckpegelminderungen an einem Referenzpunkt am Kanalausstritt mit und ohne aktivierte **NANCY**-Systeme für zwei ausgewählte überlagerte tonale Komponenten. Der Aktiv-Schalldämpfer war bei diesen Untersuchungen noch nicht zusätzlich passiv ausgekleidet. Die ANC-Mikrofone waren mit einer 50 mm dicken Schaumstoffschicht von der Strömung abgeschirmt.



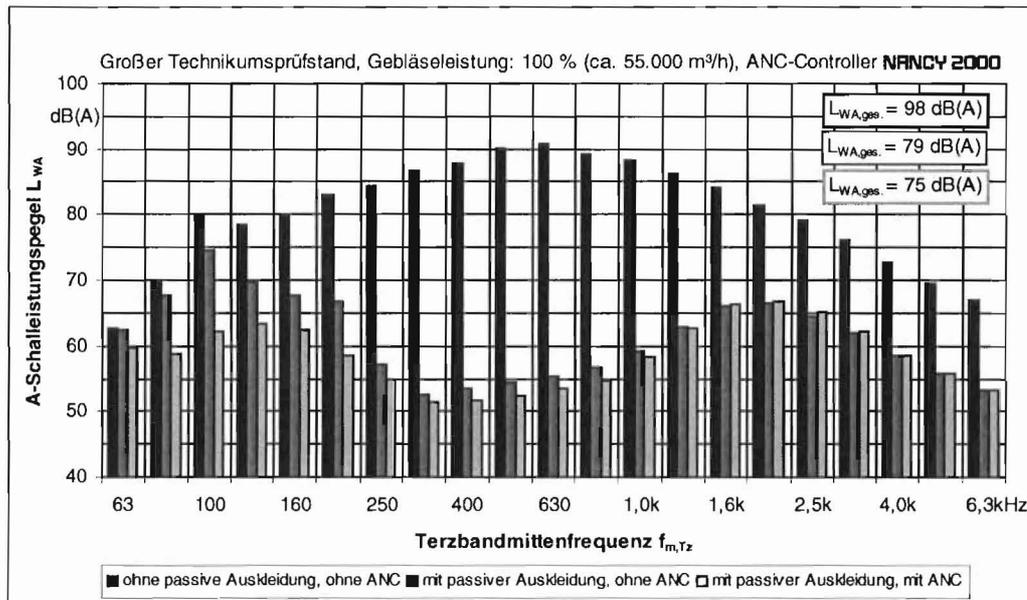
**Abb. 4.4:**

A-Schalldruckpegelminderungen bei Gebläsevollast an einem Referenzpunkt am Kanalausstritt mit und ohne parallelbetriebene **NANCY**-Systeme bei überlagerten Sinustönen

Wie Abb. 4.4 zeigt ist es mit dem Prototyp möglich, diskrete, ausgewählte Einzeltöne auch bei Vorhandensein von Strömung mit herkömmlichen ANC-Regelungen schmalbandig um 10 bis 30 dB zu reduzieren. Die Gesamtpegelreduzierung fällt allerdings deutlich niedriger aus, da das Gebläsegeräusch, u.a. auch in Folge der A-Bewertung, von höheren Frequenzen oberhalb des Wirkfrequenzbereiches des Prototyps bestimmt wird. Deshalb kann nicht auf zusätzliche passive Dämpfung verzichtet werden, um eine entsprechende Einfügungsdämpfung im Frequenzbereich  $f > f_{G,neu}$  zu erreichen.

Ein stabiler, breitbandiger, störungsfreier Betrieb der ANC-Systeme zur Kompensation des Gebläsegeräusches war allerdings ohne zusätzlich überlagerte, ausgewählte Einzeltöne mit herkömmlichen Regelungen nicht dauerhaft möglich. Einzelne Teilsysteme zeigten im Parallelbetrieb abwechselnd immer wieder Instabilitäten.

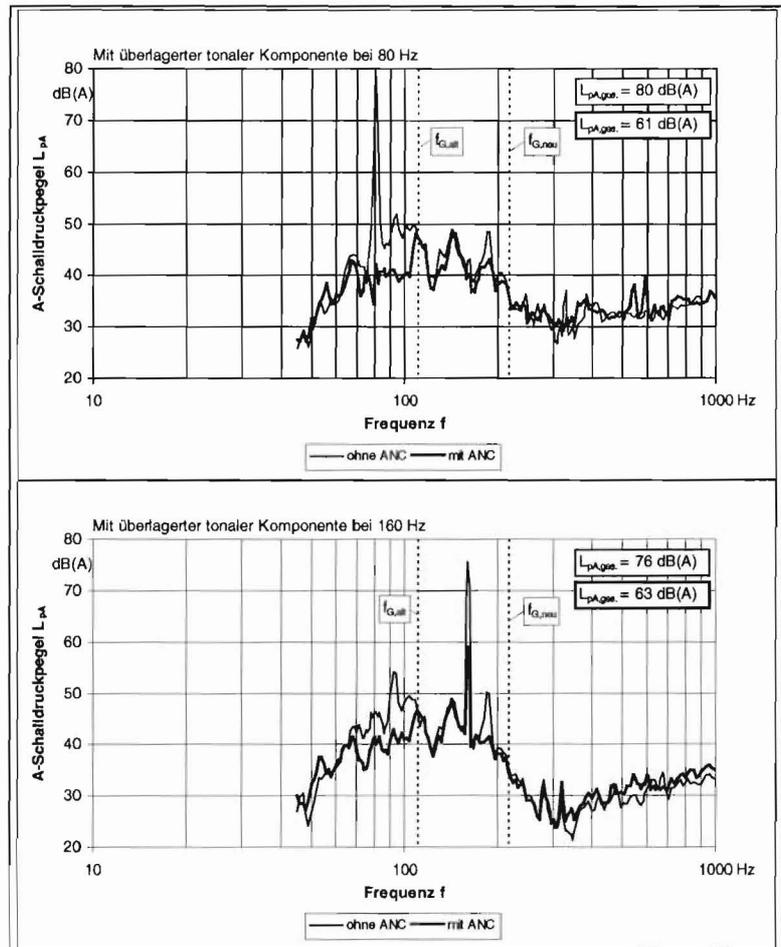
Erst durch die Entwicklung der neuartigen **NANCY 2000**-Systeme konnte dies erfolgreich realisiert werden. Ohne Tauglichkeitsfilterung zeigten sich bei der breitbandigen Kompensation des Gebläsegeräusches Instabilitäten im Bereich von ca. 20 Hz. Diese konnten durch eine Tauglichkeitsfilterung behoben werden. Um die hierfür zusätzlich benötigte Signallaufzeit gewährleisten zu können, wurde die Vorlaufstrecke (Abstand Referenz-Mikrofone - Kompensationslautsprecher) um 1 m erweitert.



**Abb. 4.5:** A-Schalleistungspegel  $L_{WA}$  mit und ohne aktive und passive Maßnahmen am Kanalaustritt des großen Technikumsprüfstandes bei Vollast des Gebläses (ca. 55.000 m³/h) [SKT99].

Abb. 4.5 zeigt, daß durch kombinierte aktive und passiver Maßnahmen am großen Technikumsprüfstand bei voller Gebläseleistung mit dem Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp eine Gesamt-A-Schalleistungspegelminderung von 23 dB realisiert werden konnte. Auch diese Abbildung zeigt, daß man aufgrund der spektralen Pegelverteilung des Gebläsegeräusches nicht auf zusätzliche passive Maßnahmen im höheren Frequenzbereich verzichten konnte, um die Gesamtschalleistung zu reduzieren. Die pegelbestimmenden Frequenzkomponenten des ungedämpften Gebläselärms liegen hier im Bereich der Terzen 500 Hz und 630 Hz und damit außerhalb des Wirkfrequenzbereiches aktiver Systeme. Die passiven Maßnahmen können allerdings sehr viel kleiner dimensioniert werden, als dies bei einem vergleichbaren rein passiven Kulissenschalldämpfer der Fall wäre, der die selbe Einfügungsdämpfung wie die aktiv-passiv-Kombination vor allem im Frequenzbereich < 200 Hz erreichen soll (vgl. Kap. 4.3).

Noch eindrucksvoller zeigt sich in Abb. 4.6 vor allem die Wirksamkeit des aktiven Schalldämpfers, wenn das Gebläsegeräusch zusätzlich noch von tonalen Komponenten im Wirkfrequenzbereich der Aktiv-Einheit überlagert ist. In der Abbildung sind beispielhaft die A-Schalldruckpegelminderungen an einem Referenzpunkt am Kanalaustritt mit und ohne aktivierte **NANCY 2000**-Systeme schmalbandig dargestellt.



**Abb. 4.6:**  
Effektivität der parallelbetriebenen **NANCY 2000**-Systeme bei überlagerten tonalen Komponenten (mit passiver Zusatzdämpfung) [SKT99]

### 4.3 Vergleich mit konventionellen Kulissenschalldämpfern

Um den Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp und einem entsprechenden konventionellen Kulissenschalldämpfer vergleichend bewerten zu können, wurden mehrere konventionelle Kulissenschalldämpfer absorptions- und druckverlustoptimiert ausgelegt und Anhand der Auslegungsdaten dem Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp gegenübergestellt.

Für einen sinnvollen Vergleich sollten die simulierten Kulissenschalldämpfer auf die gleiche Einfügungsdämpfung, die der Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp unterhalb der neuen Grenzfrequenz  $f_{G,neu}$  bei Vollast des Gebläses ohne Zusatzschallquelle erreicht hat, ausgelegt werden. Dementsprechend wurde als Auslegungsziel eine Einfügungsdämpfung von 17 dB bei  $f_{m,Okt.} = 125$  Hz angesetzt. Als Ausgangspegel wurde das Oktav-A-Schalleistungsspektrum des Gebläsegeräusches (Vollast) angenommen.

Die Auslegung erfolgte mit einem firmeninternen Auslegungsprogramm der Fa. IBS GmbH, dessen verlässliche Simulationsergebnisse anhand zahlreicher Praxis-Ausführungen validiert sind.

Es wurden insg. drei unterschiedliche konventionelle Kulissenschalldämpfer (SD I, SD II, SD III) ausgelegt. Bei zwei Schalldämpfern (SD I, SD II) wurde angenommen, daß der Kanalquerschnitt (1,5 m x 1,5 m) wie beim Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp (ANC-Prototyp) aus Platzgründen nicht aufgeweitet werden darf. SD I wurde dabei druckverlustoptimiert, SD II baulängenoptimiert ausgelegt. In beiden Fällen muß eine Verengung der freien Querschnittsfläche in Kauf genommen werden. SD III wurde sowohl druckverlust- als auch baulängenoptimiert konzipiert. Es wurde angenommen, daß bei SD III die freie Querschnittsfläche, die auch im Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp vorliegt, nicht eingeschränkt werden darf. Hierzu ist eine entsprechende Querschnittsaufweitung des Kanals unumgänglich. Für alle drei Schalldämpfer wird laut Auslegung in der 125 Hz Oktave dieselbe Einfügungsdämpfung von 17 dB prognostiziert.

Zusätzlich wurde ein dem Kenntnisstand am Projektende entsprechender Aktiv-Schalldämpfer (ANC-SD) für die selben Anforderungen prognostiziert, der im Vergleich zum derzeitigen Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp in seiner Bauform noch kompakter ist.

Ferner wurde eine energetische Bewertung der verschiedenen Schalldämpfer-Typen vorgenommen. Die für Schalldämpfer auf Grund der verursachten Druckverluste zusätzlich bereitzustellende Leistung  $P_{\Delta p}$  läßt sich gemäß nachstehender Gleichung abschätzen:

$$P_{\Delta p} = \frac{\zeta \cdot \rho \cdot v_s^2 \cdot \dot{V}}{2 \cdot \eta} \quad [\text{W}] \qquad \zeta = \frac{2\Delta p}{\rho \cdot v_s^2} \qquad (4.1)$$

mit:

- $\Delta p$  stat. Druckdifferenz [Pa]
- $\zeta$  Druckverlust- Koeffizient [dim.-los]
- $\rho$  Dichte des Fluids [kg/m<sup>3</sup>]
- $v_s$  Spaltgeschwindigkeit [m/s]
- $\dot{V}$  Volumenstrom [m<sup>3</sup>/s]
- $\eta$  mech. Wirkungsgrad der Strömungsmaschine [dim.-los]

Umgerechnet auf den el. Energiebedarf pro Jahr EL ergibt sich unter Berücksichtigung des Einsatzgrades  $\mu$  der strömungstechnischen Anlage z.B. ausgedrückt durch:

$$\mu = \frac{\text{Betriebsstunden (h) / Tag}}{24\text{h}}$$

und bei Aktiv-Schalldämpfern unter Berücksichtigung der ANC-Regelleistung  $P_{\text{ANC}}$  der zusätzlich durch einen Schalldämpfer verursachte Energiebedarf EL pro Jahr:

$$EL = 8,76 \cdot \mu \cdot (P_{\Delta p} + P_{\text{ANC}}) \quad [\text{kWh/a}] \qquad (4.2)$$

Die jährlich verursachten Energiekosten EK berechnen sich dann zu

$$EK = \varepsilon \cdot EL \quad [\text{DM/a}] \quad \text{mit } \varepsilon = \text{Energiepreis in [DM/kWh].}$$

In Tab. 4.1 sind die entsprechenden Auslegungsdaten dem Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp gegenübergestellt.

**Tab. 4.1:** Gegenüberstellung der Auslegungsdaten von konventionellen Kulissenschalldämpfern und Aktiv-Schalldämpfern. Alle Auslegungen beziehen sich auf einen Durchsatz von 55.000 m<sup>3</sup>/h, einen Kanalquerschnitt von 1,5 m x 1,5 m und eine Einfügungsdämpfung von 17 dB bei  $f_{m,Okt.} = 125$  Hz.

Schalldämpfer-Typ	ANC-Prototyp	SD I	SD II	SD III	ANC-SD	
Schalldämpferabmessungen	L = 7,5 B = 1,5 H = 1,5	L = 6,0 B = 1,5 H = 1,5	L = 2,6 B = 1,5 H = 1,5	L = 4,0 B = 2,8 H = 1,5	L = 4,0 B = 1,5 H = 1,5	[m] [m] [m]
Kulissenanzahl <sup>1</sup>	4 x R	5 x M	5 x M	8 x M	2 x R, 2 x M	[-]
Kulissendicke	0,08	0,15	0,2	0,2	0,12	[m]
Kulissenspaltbreite	0,58	0,15	0,1	0,15	0,25	[m]
Spaltgeschwindigkeit	9,0	13,5	20,4	8,5	10,6	[m/s]
statischer Druckverlust	10	60	260	30	20	[Pa]
verbautes Absorbervolumen	3,6	6,75	3,9	9,6	2,9	[m <sup>3</sup> ]
Gesamtgewicht der Kulissen <sup>2</sup>	ca. 520	ca. 970	ca. 520	ca. 1230	ca. 440	[kg]
erf. Zusatzleistung $P_{3^p}$ zur Druckverlustüberwindung	190	1150	4970	570	390	[W]
Zusatzleistung $P_{ANC}$ für den ANC-Betrieb	60	0	0	0	60	[W]
erf. Zusatz-Gesamtleistung	250	1150	4970	570	450	[W]
Zusatzenergiebedarf EL pro Jahr <sup>4</sup>	2,1	9,6	41,4	4,7	3,7	[MWh/a]
Energiekosten EK für den Schalldämpferbetrieb <sup>5</sup>	ca. 420	ca. 1900	ca. 8300	ca. 950	ca. 740	[DM/a]
<sup>1</sup> R = Randkulisse; M = Mittelkulisse; jede Kulisse schließt vorne und hinten mit Leitblechen ab <sup>2</sup> mit einer Absorberrichte von 50 kg/m <sup>3</sup> abgeschätzt; Randkulissen mit einer Lochblech-, Mittelkulissen mit zwei Lochblechabdeckungen (5 kg/m <sup>2</sup> ) abgeschätzt; jede Kulisse ist mit einem umlaufenden Bodenblech (11 kg/m <sup>2</sup> ) abgeschlossen; Leitbleche einheitlich mit ca. 2,5 kg/Stk. angenommen. <sup>3</sup> gemäß Gl. (4.1) mit $\rho = 1,2$ kg/m <sup>3</sup> und $\eta = 0,8$ abgeschätzt <sup>4</sup> gemäß Gl. (4.2) mit $\mu = 0,95$ abgeschätzt <sup>5</sup> mit einem Energiepreis von $\epsilon = 0,20$ DM/kWh abgeschätzt						

Abb. 4.7 zeigt eine Prinzipskizze des großen Technikumsprüfstandes mit simuliertem Kulissenschalldämpfer SD III. Die Abbildung vermittelt einen Eindruck vom für diesen Schalldämpfer benötigten Bauraum. Man erkennt, daß man trotz kürzerem Schalldämpfer durch die notwendigen Übergangsstücke wieder vergleichbare Baulängen wie der Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp erreicht. Kompakter ausgeführte Kulissenschalldämpfer verursachen z.T. erhebliche Druckverluste und damit entsprechend hohe Betriebskosten.

Da auf die ökologisch, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse noch in einem separaten Kapitel eingegangen wird, bleibt die weitere Diskussion der Auslegungsdaten diesem entsprechenden Kapitel vorbehalten (vgl. Kap. 8).

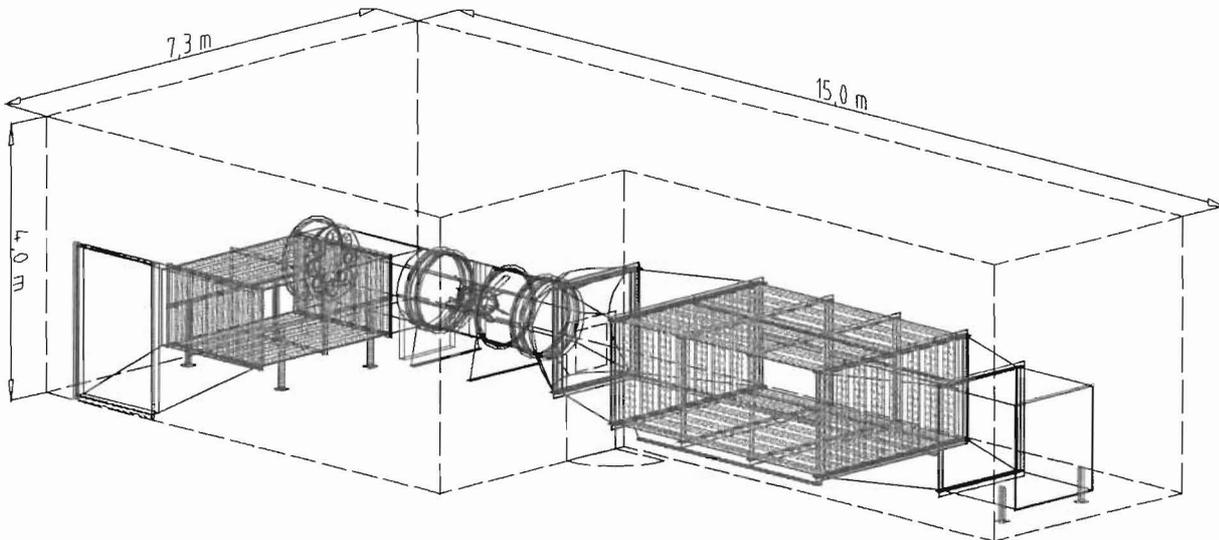


Abb. 4.7: Anschauungsskizze des großen Technikumsprüfstandes mit simuliertem konventionellem Kulissenschalldämpfer SD III.

#### 4.4 Einsatzbereich marktgängiger Kompensationslautsprecher

##### Anforderungsprofil:

Der aktive Teil des hier vorgeschlagenen Aktiv-Schalldämpfers beschränkt sich auf Frequenzen **< 500 Hz**. Für den praktischen Einsatz werden in Folge der rel. lauten zu kompensierenden Geräusche (im Rahmen der Untersuchungen wurden Schalldruckpegel von bis zu 160 dB in Rohrleitungen gemessen) leistungsfähige, belastbare Kompensationslautsprecher benötigt (**Nennbelastbarkeit  $\geq 100$  W**).

Um mit den Leistungsressourcen der ANC-Systeme sparsam umzugehen, sollten sich die Kompensationslautsprecher durch **hohe Wirkungsgrade** auszeichnen. In diesem Zusammenhang versteht man unter dem Wirkungsgrad eines Lautsprechers in einem Frequenzband gemäß DIN IEC 268-5 [4] das Verhältnis von abgestrahlter akustischer Schalleistung zu der anliegenden elektrischen Leistung. Ein von den Herstellern üblicherweise angegebener Wert, der mit dem Wirkungsgrad korreliert, ist der nach DIN IEC 268-5 unter Freifeld- oder Freifeldhalbraumbedingungen gemessene Kennschalldruckpegel  $L_{p,1m}$ . Der Kennschalldruckpegel ist als der Schalldruckpegel definiert, der in einem angegebenen Frequenzband in 1 m Abstand bei einer elektrischen Eingangsleistung des Lautsprechers von  $P_{eff.} = 1$  W ermittelt wird.

Die Kompensationslautsprecher werden ferner in bestimmten Anwendungsfällen:

- heißen,
- korrosiven, aggressiven oder
- feuchten Gasatmosphären

ausgesetzt. Darüber hinaus müssen sie in manchen Fällen statischen **Über- bzw. Unterdrücken** standhalten und dabei funktionstüchtig bleiben.

Im Falle des hier vorgeschlagenen Aktiv-Schalldämpfers kann es erforderlich sein, die Lautsprecher auch im Inneren des Teilkanals anzubringen. Um dabei den Quer-

schnitt nicht unnötig einzuschränken, ist ein weiteres Merkmal geeigneter Kompensationslautsprecher die **Kompaktheit** ihrer Gehäuse.

Für eine industrietaugliche Ausführung sollte das Gehäuse **spritzwassergeschützt** ausgeführt sein.

Vor diesem Hintergrund kommen derzeit nur wenige Lautsprechertypen in Frage:

*Druckkammer-Lautsprecher* (Hörner), die sich durch sehr hohe Wirkungsgrade auszeichnen ( $L_{p,1m} > 100$  dB, 1m, 1W), arbeiten für die meisten Anwendungen leider zu hochfrequent. Marktgängige Hochleistungslautsprecher auf Druckkammertreiberbasis arbeiten im Frequenzbereich von ca. 200 bis ca. 6000 Hz [NN98]. Beschränkt sich der zu kompensierende Frequenzbereich auf Frequenzen  $> 200$  Hz, sind Druckkammer-Lautsprecher eine gute Alternative. Da Gehäuse und Treiber in metallischer Ausführung erhältlich sind, können sie auch bei entsprechender Ausführung in aggressiven oder feuchten Medien eingesetzt werden. Sorgt man für einen entsprechenden Druckausgleich, können sie auch bei höheren statischen Über- bzw. Unterdrücken Einsatz finden. Ebenso sind sie bei metallischer Ausführung rel. temperaturunempfindlich. Die Treiber selbst haben rel. kleine Abmessungen und können daher platzsparend angebracht werden. Auf den Wirkungsgrad bezogen, ist das Exponentialhorn-Gehäuse rel. kompakt. Es sind spritzwassergeschützte Gehäuse erhältlich [NN98].

Für die üblichen, zu kompensierenden Geräusche kommen i.d.R. entsprechende *Tiefton-Lautsprecher* mit Kennschalldruckpegeln  $\geq 90$  dB als Kompensationslautsprecher in Frage. Je nach Anwendung kommen hierbei handelsübliche Treiberausführungen (i.d.R. Tiefton-Konustreiber) zum Einsatz. Beispielhaft sei hier auf die Produkte der Chassis-Hersteller Visaton, Seas, Eton, Peerless, IT Intertechnik, TOA, Hamann, Gradient, Alcone, Davis oder Vifa verwiesen. Für den Betrieb in haustechnischen Lüftungsanlagen (strömendes Medium: Luft bei Raumtemperatur oder leicht gekühlt, nicht aggressiv) sind hinsichtlich der Treiber keine besonderen Anforderungen zu erfüllen. Hier können herkömmliche Tieftöner mit Papiermembranen eingesetzt werden. In aggressiven Gasatmosphären sollten beständigere Membranmaterialien verwendet werden. Hier kommen laut Herstellerankunft (Fa. Visaton) Tieftöner mit Glasfaser, Aluminium oder Nawi-Membranen (hochwertige Polypropylenmembranen) in Frage. Übliche robuste Tiefton-Chassis sind bis ca. 100 °C temperaturbeständig. Chassis mit Aluminiummembranen können bis ca. 200 °C eingesetzt werden (Herstellerankunft: Fa. Hamann). Sorgt man für einen entsprechenden Druckausgleich, können Tiefton-Konustreiber auch bei höheren statischen Überdrücken Einsatz finden. Nachteilig sind die zur Gehäuseabstimmung erforderlichen großen Innenvolumen (ca. 30 bis 100 l) der üblicherweise geschlossen ausgeführten Lautsprecherboxen. Bei entsprechendem Aufbau können die Gehäuse spritzwassergeschützt ausgeführt werden.

Für eine Anwendung aus der Automobilindustrie (Einsatzgebiet: Abgasstrom) werden z.Z. 175 mm Spezial-Konustreiber (Einzelstücke, keine Serie), mit Aluminiummembran entwickelt (Herstellerankunft: Fa. Hamann). Der Treiber soll einen Kennschalldruckpegel von  $L_{p,1m} \approx 90$  dB haben und bis 200 °C einsatzfähig sein. Da diese Treiberentwicklung im Zusammenhang mit Forschungsaktivitäten eines großen Automobilkonzerns steht, konnten keine weiteren Angaben gemacht werden. Der Trei-

ber ist derzeit nicht auf dem freien Markt erhältlich. Die weiteren Recherchen bzgl. Kompensationslautsprechern ergaben, daß es derzeit für den Anwendungsbereich Aktiv-Schalldämpfer keine marktgängige Spezialentwicklung gibt, die alle aufgestellten Anforderungen an Kompensationslautsprecher für große, querschnittsunterteilte Kanäle erfüllt. Insbesondere im Hinblick auf aggressive und / oder heiße Gasatmosphären besteht noch weiterhin Optimierungsbedarf.

#### **4.5 Notlaufstrategie**

Im Rahmen der Entwicklungs- und Testphase eines industrietauglichen Aktiv-Schalldämpfers sollte eine Notlaufstrategie erarbeitet werden, die einen Teilausfall des Systems erkennt und Maßnahmen einleitet, die die Schalldämpfung in einem Mindestmaß bis zur Fehlerbeseitigung gewährleistet.

Idee war hierbei, Statussignale der Regelelektronik zu überwachen und bei Ausfall den jeweiligen Teilquerschnitt automatisch durch eine vorgeschaltete Klappe abzudichten. Der entsprechende Teilvolumenstrom und die entsprechende Teil-Schalleistung würde sich auf die anderen, intakten Teilkanäle verteilen. Auf diese Weise sollte die Schalldämpfung in einem Mindestmaß bis zur Fehlerbeseitigung gewährleistet werden. Jeder Teilkanal wäre am Einlaß mit einer Klappe ausgestattet. Das Regelkonzept sollte so gestaltet werden, daß maximal nur soviel Teilkanäle gleichzeitig gesperrt werden dürften, daß die Strömungsgeschwindigkeit im Schalldämpfer max. 20 m/s erreichen dürfte.

Der hierfür notwendige Aufwand würde allerdings die Investitionskosten erheblich in die Höhe treiben. Ökonomisch sinnvoll wäre eine solche Maßnahme daher nur bei einer entsprechend großen Anzahl an Teilkanälen, bei der sie finanziell gegenüber den übrigen Kosten weniger ins Gewicht fallen würde.

Eine kostengünstigere Alternative wäre es, bei einem Ausfall ein Alarmsignal z.B. in eine Warte zu senden, um eine Wartung des Systems zu veranlassen.

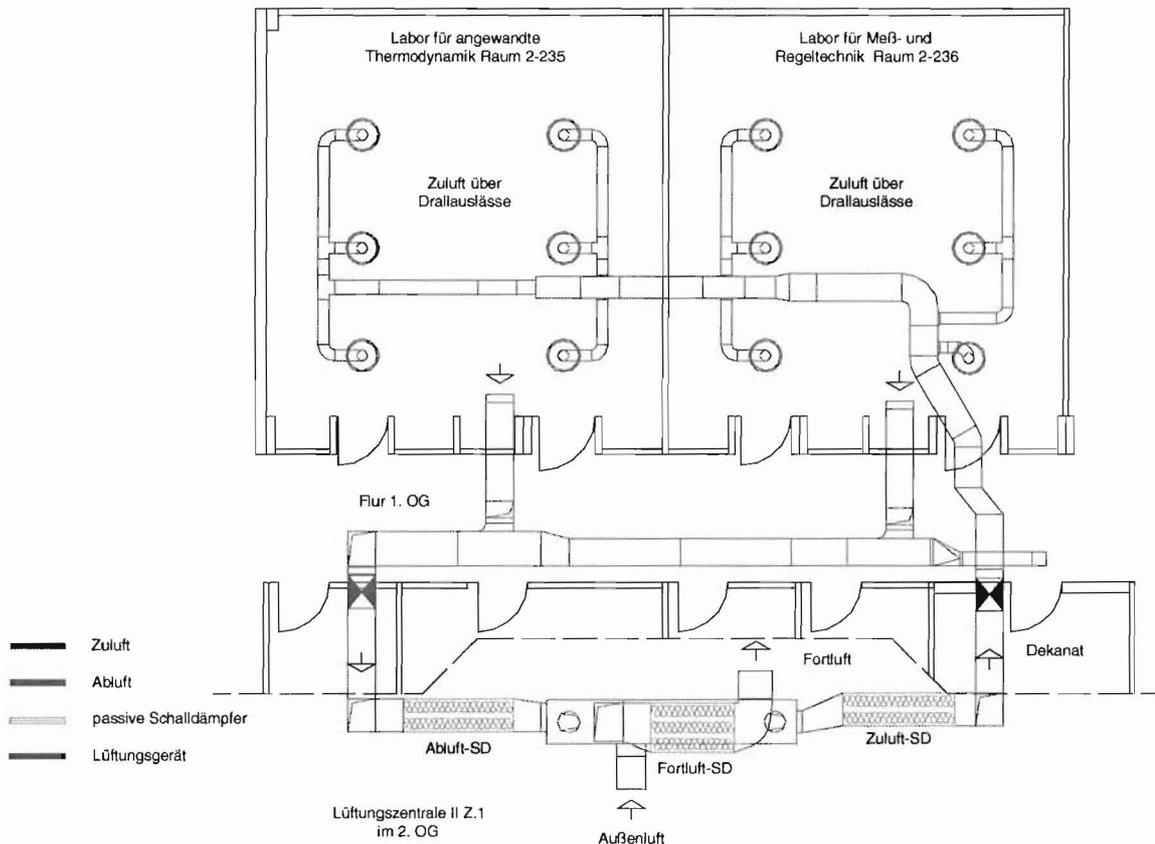
Da bei derzeitigem Entwicklungsstand erst mit bis zu vier Teilkanälen gearbeitet wurde, wurde bisher von der Realisierung einer Notlaufstrategie abgesehen.

### **5. Test des Aktiv-Schalldämpfers im industriellen Einsatz im Rahmen des Pilotprojektes „ANC-Lüftungsschalldämpfer“..**

#### **5.1 Voruntersuchungen zur Ausgangssituation**

Die Durchführung eines Pilotprojektes bei der Rheinbraun AG, Köln [Her98], die ihre Bereitschaft zur Zusammenarbeit signalisiert hatte, wurde nach ersten Voruntersuchungen aufgegeben. Das zu kompensierende Quellspektrum war bei diesem Anwendungsfall zu stark vom Frequenzbereich  $> 500$  Hz dominiert und daher nicht für eine aktive Schalldämpfung geeignet.

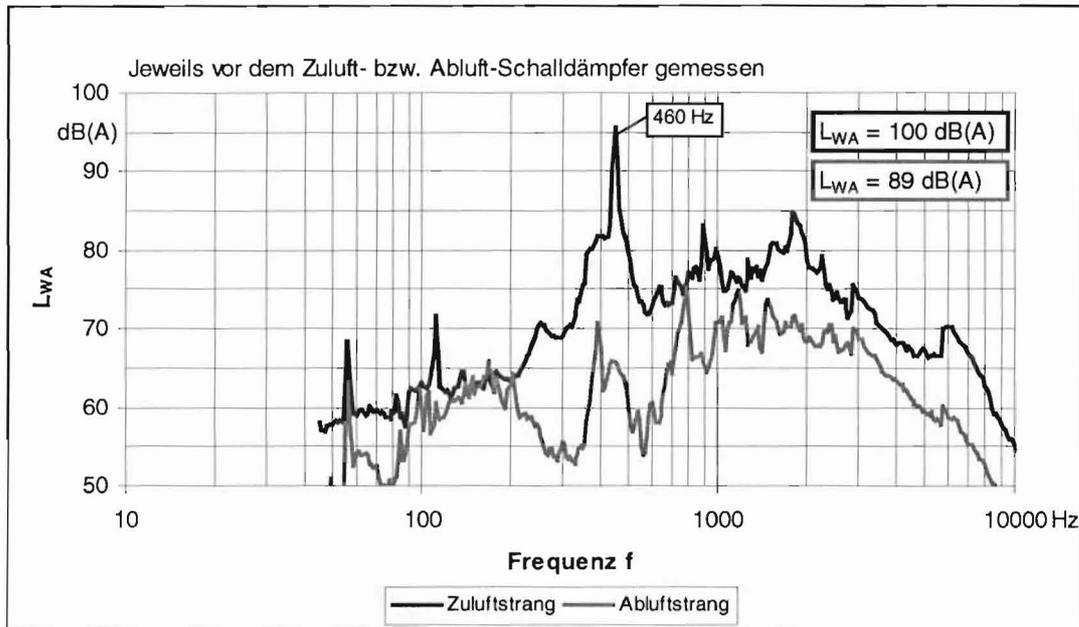
An der Fachhochschule Bingen fand sich im Fachbereich Verfahrenstechnik ein geeigneter Anwendungsfall. Das Labor für Meß- und Regeltechnik, Raum 2-236, und das Labor für angewandte Thermodynamik, Raum 2-235, werden von einer gemeinsamen Lüftungsanlage be- und entlüftet (siehe Abb. 5.1).



**Abb. 5.1:** Lüftungsanlage für die Labore „Meß- und Regeltechnik“ und „Angewandte Thermodynamik“ an der Fachhochschule Bingen, FBV, in Bauwerk II vor Durchführung des Pilotprojektes „ANC-Lüftungsschalldämpfer“ (Anlage II. 12/V 49/50; Luftmenge: ZL/Abl. 5000 m<sup>3</sup>/h)

Um in den Laboratorien Präzisionsmessungen gewährleisten zu können, ist eine Temperaturkonstanz über mehrere Stunden erforderlich. Die Lüftungsanlage ist daher mit einer Kühlung für die warme Jahreszeit ausgestattet. Während die Laboratorien im 1. OG liegen, befindet sich das kombinierte Lüftungsggerät in der Lüftungszentrale II Z1 im 2. OG. Die Zuluft wird mit Drallauslässen in den Raum geblasen. Die Abluft wird über die abgehängte Decke (Randspalt) abgesaugt. Das Labor für Meß- und Regeltechnik ist im Zuluftstrang mit einer Drossel ausgestattet, um keine zu hohe Abkühlung zu erhalten. Jeder Drallauslaß ist darüber hinaus mit einer Drosselklappe für individuelle Einstellungen ausgestattet. Die Schalldämpfer im Zuluft-, Abluft- und Fortluftstrang befinden sich in der Lüftungszentrale und sind jeweils als konventionelle Kulissenschalldämpfer ausgeführt.

Abb. 5.2 zeigt die schmalbandig gemessenen A-Schalleistungsspektren im Zuluft- und Abluftstrang direkt hinter den Gebläsen vor den passiven Schalldämpfern. Das Frequenzspektrum der A-Schalleistung im Zuluftstrang wird deutlich von einer tonalen Drehklangkomponente bei 460 Hz geprägt. Ein solches Spektrum bietet sich sehr gut für den Einsatz eines Aktiv-Schalldämpfers an. Die tonale Komponente liegt im Wirkfrequenzbereich aktiver Systeme.



**Abb. 5.2:** A-Schalleistungspegel des Zuluft- und Abluft-Gebläsegeräusches (aus Aufwandsgründen nur orientierend, nicht normgerecht ermittelt)

Es bot sich daher an, den konventionellen Kulissenschalldämpfer im Zuluftstrang (Zuluft-SD) der Lüftungsanlage nachträglich durch einen Aktiv-Schalldämpfer im Rahmen des Pilotprojektes „ANC-Lüftungsschalldämpfer“ zu substituieren.

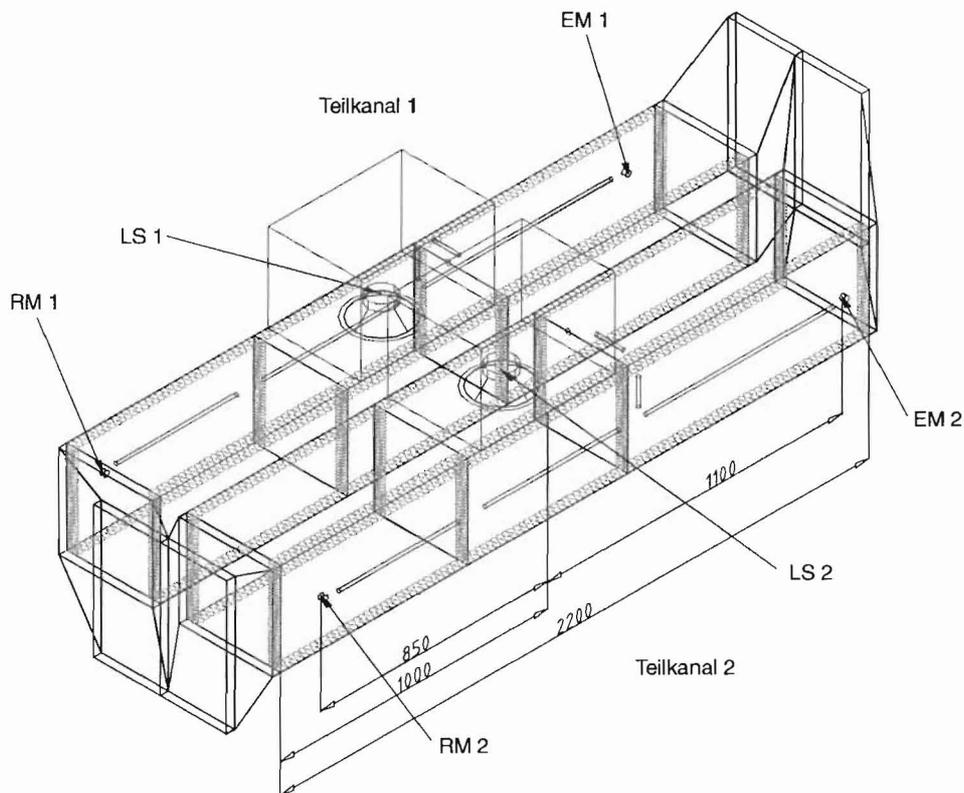
Um einerseits den baulichen Aufwand in Grenzen zu halten, und da andererseits das Pilotprojekt nur unter der Auflage des anschließenden Rückbaus der Lüftungsanlage durchgeführt werden konnte, wurde der Einbau des ANC-Lüftungsschalldämpfers im Bereich der Flur-Unterdecke im 1.OG vorgesehen. Die Substitution des Zuluft-SD erfolgte durch Entfernen der Schalldämpferkulissen, die bei Abschluß des Projektes wieder eingebaut wurden.

## 5.2 Auslegung und Aufbau des ANC-Lüftungsschalldämpfers

Der Zuluftstrang hat vor dem ersten Abzweig die Abmessungen 0,5 m x 0,5 m. Die Grenzfrequenz der Kanalgeometrie liegt mit  $f_{G1} = 340$  Hz unterhalb des zu kompensierenden Drehklangs (460 Hz). Die Aktiveinheit des ANC-Lüftungsschalldämpfers (ANC-SD) wurde daher für einen Wirkfrequenzbereich bis 500 Hz konzipiert. Der Kanalquerschnitt des Zuluftstranges wurde hierzu im Bereich des ANC-SD in zwei Teilkanäle (0,35m x 0,35m,  $f_{G,neu} = 485$  Hz) aufgeteilt. Die Einbausituation im Bereich der Flur-Unterdecke macht Versatzsprünge, die durch die beiden Übergangsstücke realisiert werden, notwendig.

Da die Gesamtschalleistung im Kanal auch von höheren Frequenzen bestimmt wird, kann auch hier nicht auf zusätzliche passive Dämpfung verzichtet werden. Die „Passivseinheit“ ist auf den Frequenzbereich  $> 500$  Hz ausgelegt und besteht aus Melaminharz-Schaumstoff-Randkulissen ( $d = 40$  mm).

Abb. 5.3 zeigt den Aufbau des in zwei Teilkanäle aufgeteilten ANC-Schalldämpfers.



**Abb. 5.3:** ANC-Lüftungsschalldämpfer (RM = Referenzmikrofon, EM = Errormikrofon, LS = Kompensationslautsprecher)

Die Teilkonäle sind für die Montage bei engen Raumverhältnissen jeweils in drei Segmente von 0,7 m, 0,6 m und 0,9 m unterteilt.

Die Referenzmikrofone wurden einheitlich 0,85 m vor, die Errormikrofone einheitlich 1,1 m hinter den Kompensationslautsprechern angeordnet. Die Gesamtlänge des ANC-Lüftungsschalldämpfers beträgt ohne Übergangsstücke 2,2 m.

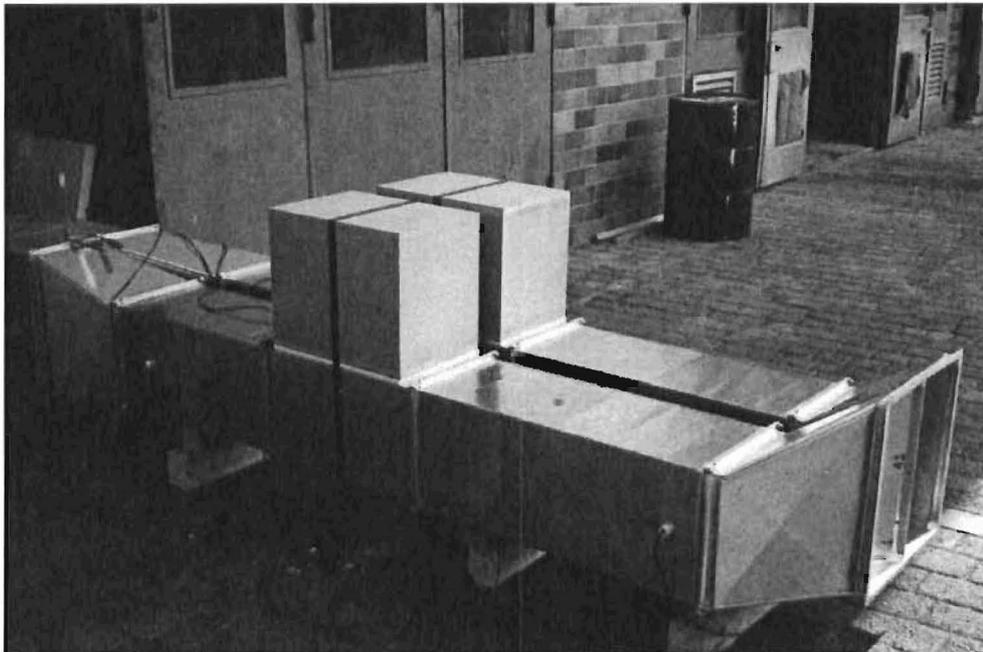
Der Durchsatz im Zuluftstrang beträgt ca. 5000 m<sup>3</sup>/h, was einer Strömungsgeschwindigkeit im ankommenden Kanal (0,5m x 0,5m) von ca. 5,6 m/s entspricht. Die Spaltgeschwindigkeit im ANC-Schalldämpfer kann mit ca. 8 m/s angenommen werden.

Die Auslegung des ANC-Lüftungsschalldämpfers und die Auswahl der gewählten ANC-Bauteilpositionen wurde gemäß der unter Pkt. 7 vorgeschlagenen Vorgehensweise durchgeführt.

### 5.3 Voruntersuchungen am kleinen Technikumsprüfstand

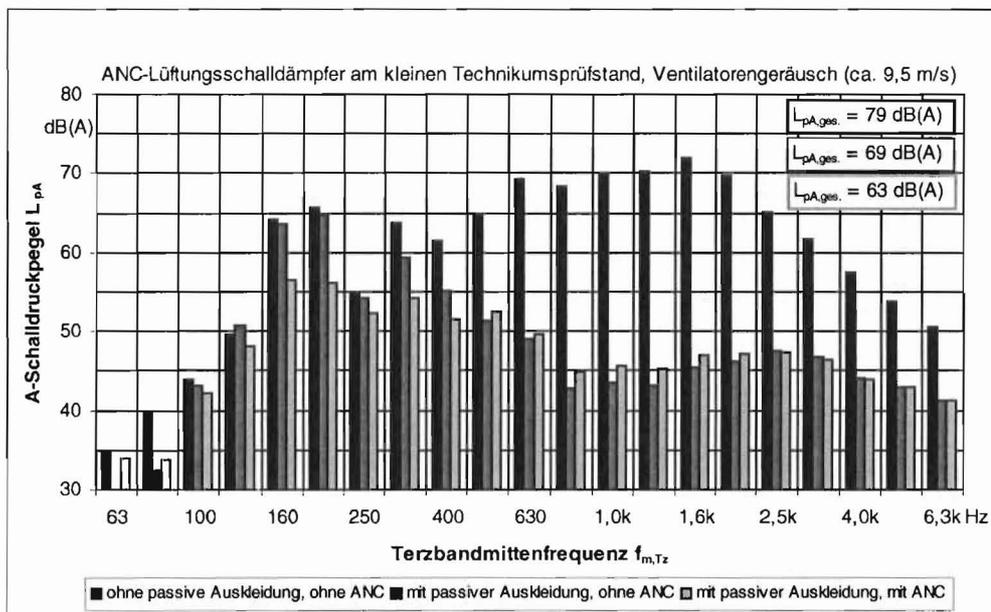
Die Wirksamkeit des ANC-SD wurde im Rahmen von Voruntersuchungen am kleinen Technikumsprüfstand der Firmen Wendt Sit GmbH und IBS GmbH bestätigt. Abb. 5.4 zeigt eine Aufnahme des ANC-Lüftungsschalldämpfers bei den Voruntersuchungen am kleinen Technikumsprüfstand.

Durch den Einsatz von zwei parallelbetriebenen **NANCY 2000**-Systemen konnte ein stabiler ANC-Betrieb bei Vorhandensein von Strömung realisiert werden.



**Abb. 5.4:** Aufnahme des ANC-Lüftungsschalldämpfers bei den Voruntersuchungen am kleinen Technikumsprüfstand [SKT99]

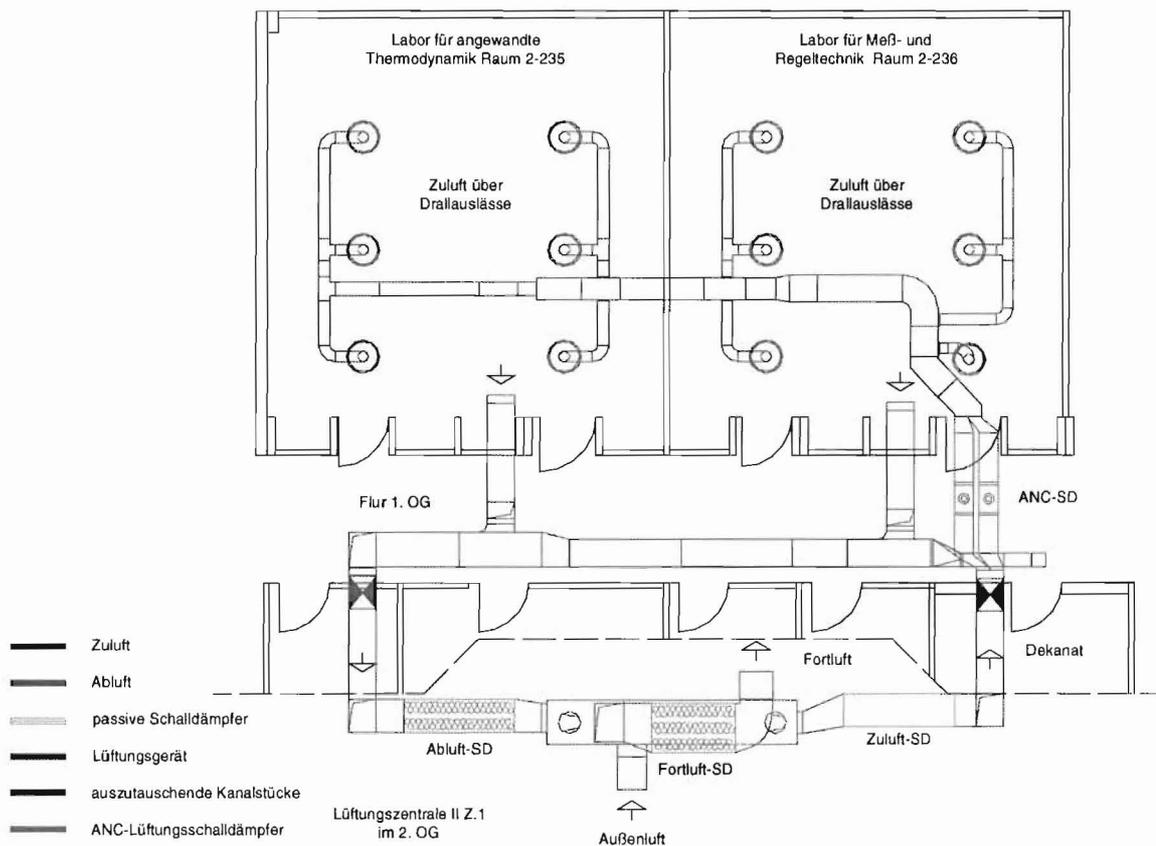
Wie Abb. 5.5 zeigt, konnte bei den Voruntersuchungen durch die Kombination von aktiven und passiven Maßnahmen mit dem ANC-Lüftungsschalldämpfer am kleinen Technikumsprüfstand eine Gesamt-A-Schalldruckpegelminderung von 16 dB(A), gemessen 1 m hinter dem Kanalende, erreicht werden.



**Abb. 5.5:** Mittlerer A-Schalldruckpegel  $L_{pA}$  ohne aktiv- / passive-, ohne aktive / mit passiven und mit aktiv- /passiven Maßnahmen beim ANC-Lüftungsschalldämpfer 1m hinter dem Kanalende des kleinen Technikumsprüfstandes [SKT99]

## 5.4 Durchgeführte Untersuchungen am ANC-Lüftungsschalldämpfer unter realen Betriebsbedingungen in der Lüftungsanlage

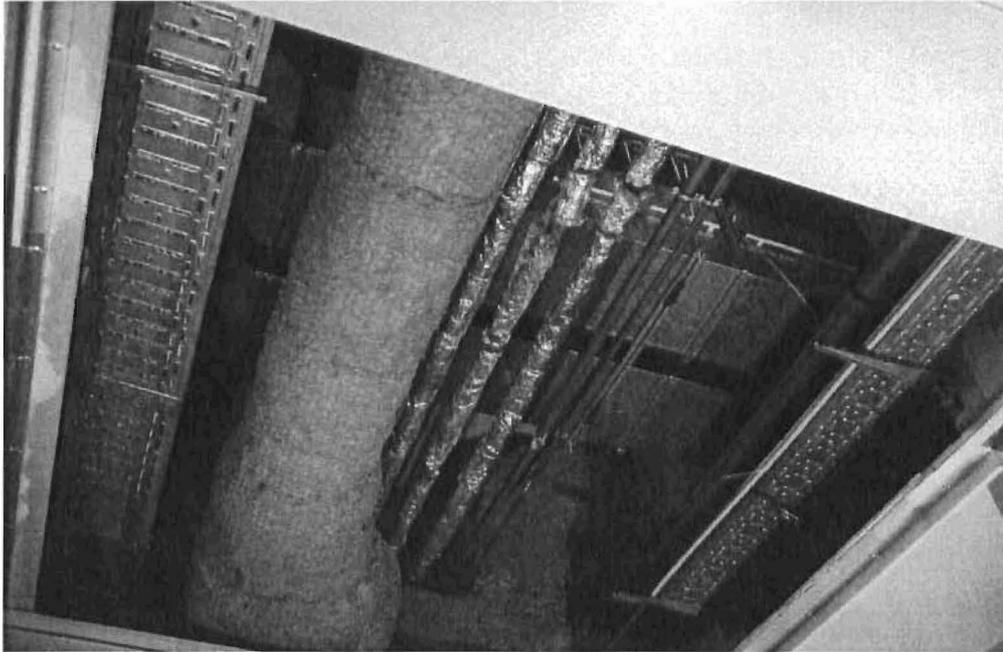
Nach erfolgreicher Durchführung der Vorversuche wurde der ANC-Lüftungsschalldämpfer unter realen Einbaubedingungen in die Lüftungsanlage an der FH Bingen im Bereich der Unterdecke im Flur 1.OG integriert (siehe Abb. 5.6).



**Abb. 5.6:** Lüftungsanlage für die Labore „Meß- und Regeltechnik“ und „Angewandte Thermodynamik“ an der Fachhochschule Bingen nach Einbau des ANC-Lüftungsschalldämpfers und Substitution des passiven Zuluft-SD

Abb. 5.7 zeigt eine Aufnahme des ANC-Lüftungsschalldämpfers unter realen Einbaubedingungen in der abgehängten Unterdecke. Trotz beengter Montagemöglichkeiten war der nachträgliche Einbau rel. problemlos möglich.

Die Regeleinheiten (2 **NANCY 2000**-Systeme, jeweils bestehend aus Regeleinheit und 100 W Leistungsverstärker) wurden in einem angrenzenden Installationsschacht leicht zugänglich angebracht (siehe Abb. 5.8).



**Abb. 5.7:** Aufnahme des ANC-Lüftungsschalldämpfers unter realen Einbaubedingungen in der Unterdecke im Flur 1 OG.



**Abb. 5.8:**

Aufnahme der Regeleinheiten des ANC-Lüftungsschalldämpfers (bestehend aus zwei **NANCY 2000** Controllern und -Verstärkereinheiten)

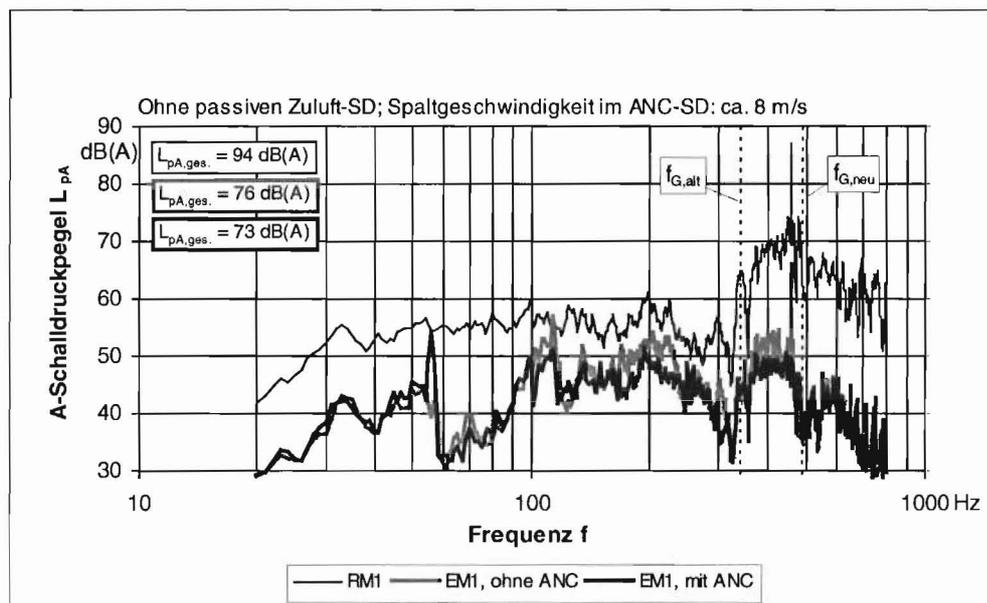
Der passive Zuluft-SD wurde durch ziehen der beiden Absorberkulissen (2 Stück KMF-Kulissen; LxBxH: 2000 mm x 200 mm x 900 mm, gleichzeitig durch entsprechende Ausführung als Plattenresonator wirksam) substituiert.

Bei der Inbetriebnahme des Lüftungsschalldämpfers zeigte sich, daß ein stabiler Parallelbetrieb der Regeleinheiten unter realen Einbaubedingungen ohne Tauglichkeitsfilterung nicht möglich war.

Im Abschlußbericht zum Projekt Az. 15655 wurde ausführlich auf diese Problematik eingegangen [SKT99].

Nachdem mit Hilfe der **NANCY 2000**-Systeme eine Tauglichkeitsfilterung mittels Notch-Filtern bei drei „Instabilitätsfrequenzen“ durchgeführt wurde, konnte ein stabiler Parallelbetrieb der Systeme realisiert werden.

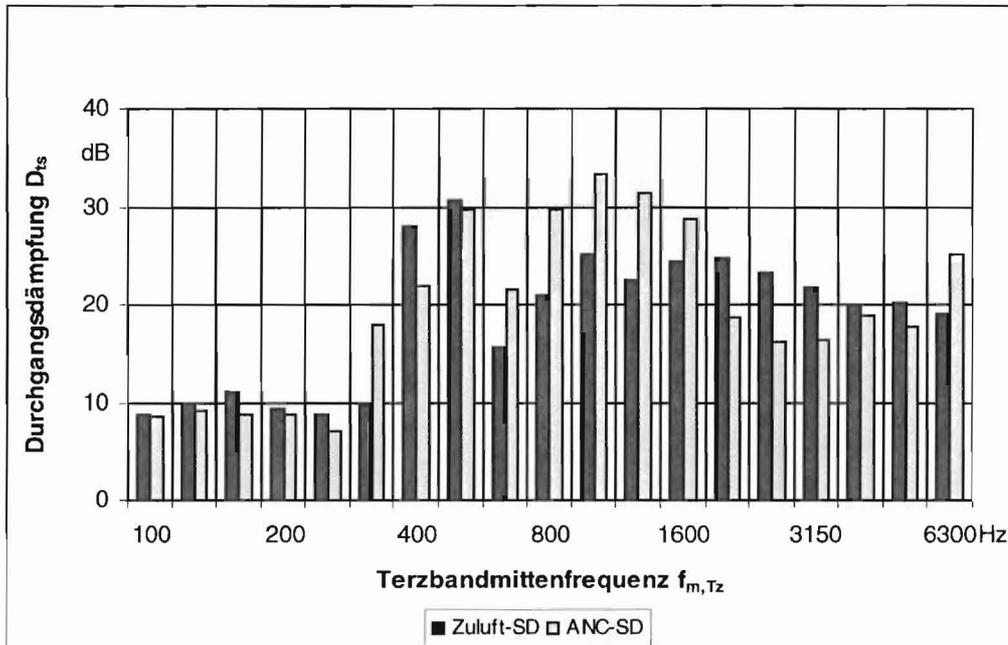
Abb. 5.9 zeigt stellvertretend für einen Teilkanal des Aktiv-Schalldämpfers den A-Schalldruckpegel  $L_{pA}$  am Referenz- und Error-Mikrofon des ANC-Lüftungsschalldämpfers bei substituiertem Zuluft-SD.



**Abb. 5.9:** A-Schalldruckpegel  $L_{pA}$  am Referenz- und Error-Mikrofon im Teilkanal 1 des ANC-Lüftungsschalldämpfers bei substituiertem Zuluft-SD

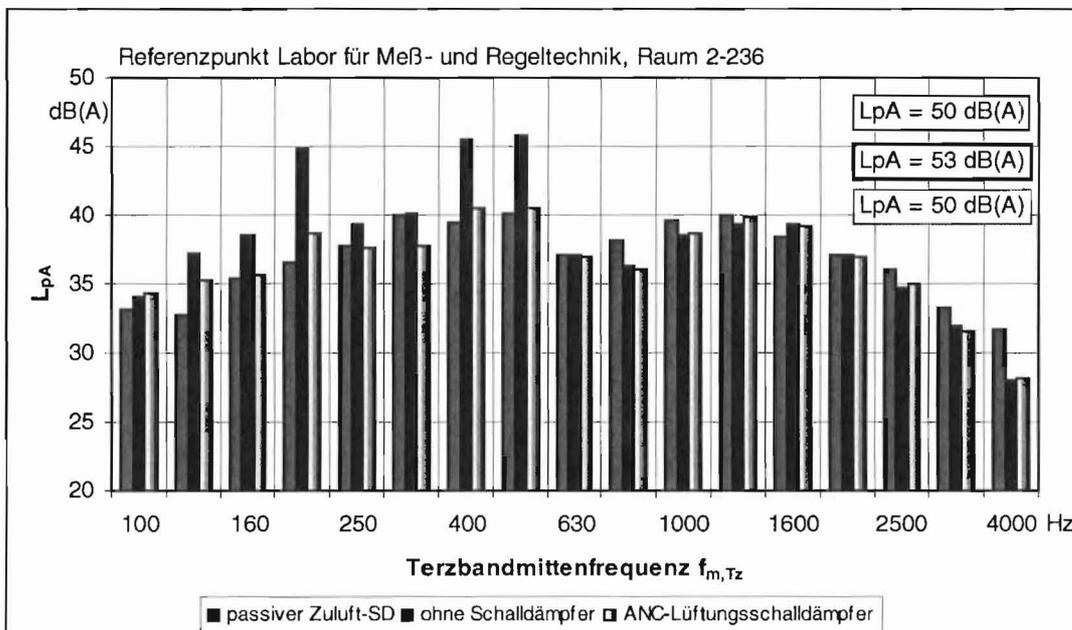
Der Pegelunterschied zwischen dem Referenz- und Error-Mikrofon (ohne ANC) ist, zumindest im Bereich der Drehklangfrequenz 460 Hz, auf die Passivwirkung des Lüftungsschalldämpfers rückführbar. Bei aktiviertem ANC-System wird insbesondere der Drehklang bei 460 Hz um weitere 20 dB(A), also um insgesamt ca. 40 dB(A), im Kanal gesenkt. Die Gesamtpegelreduzierung beträgt im Kanal ca. 21 dB(A).

In Abb. 5.10 werden die Durchgangsdämpfungsmaße eines Teilkanals des ANC-Lüftungsschalldämpfers und des passiven Zuluftschalldämpfers einander gegenübergestellt. Die Messungen konnten aus einbautechnischen Gründen nur punktuell an einzelnen Meßpositionen, in Anlehnung an DIN EN ISO 11820 [3] durchgeführt werden und dürfen daher nur als orientierend angesehen werden. Das Durchgangsdämpfungsmaß in Teilkanal 2 des ANC-Lüftungsschalldämpfers konnte aus einbautechnischen Gründen nicht ermittelt werden, da im Gegenteil zu allen anderen Meßpositionen keine kalibrierte Referenzmessung an der Errormikrofonposition dieses Teilkanals durchgeführt werden konnte. Es kann aber davon ausgegangen werden, daß dieser Teilkanal eine ähnliche Durchgangsdämpfung wie Teilkanal 1 erreicht. Bei orientierender Interpretation der Meßergebnisse erreichen beide Schalldämpfer-typen weitgehend vergleichbare Durchgangsdämpfungen.



**Abb. 5.10:** Gegenüberstellung der in Anlehnung an DIN EN ISO 11820 ermittelten Durchgangsdämpfungsmaße des ANC-Lüftungsschalldämpfers (Teilkanal 1) und des passiven Zuluftschalldämpfers

Abb. 5.11 zeigt beispielhaft den im Labor für Meß- und Regeltechnik am Referenzpunkt ermittelten A-Schalldruckpegel mit und ohne ANC-Lüftungsschalldämpfer bzw. passivem Kulissenschalldämpfer.



**Abb. 5.11:** A-Schalldruckpegel am Referenzpunkt im Labor für Meß- und Regeltechnik mit und ohne ANC-Lüftungsschalldämpfer bzw. passivem Zuluft-Schalldämpfer

Ein direkter akustischer Vergleich von Aktiv-Schalldämpfer und substituiertem Kulissenschalldämpfer unter realen Einbau- und Betriebsbedingungen ist nicht ohne weiteres möglich, da durch ungünstige Strömungsführung im Bereich der Drallauslässe hinter den Schalldämpfern wieder strömungsinduzierter Schall entsteht, der die Schalldämpferwirkung reduziert. Die erzielte Gesamtpegelminderung fällt in den Laboratorien daher nur ca. 3 dB aus. Für beide Schalldämpfertypen werden die selben A-Schalldruckpegel an den Referenzpunkten ermittelt.

### **5.5 Vergleich mit dem substituierten Kulissenschalldämpfer**

Die akustische Wirksamkeit des kombinierten aktiv-/passiv Schalldämpfers im Vergleich zu dem konventionellen Kulissenschalldämpfer kann als gleichwertig angesehen werden.

Bezüglich des notwendigen passiven Absorptionsmaterials konnten im Vergleich zum Kulissenschalldämpfer 80 Vol% Absorptionsmaterial eingespart werden.

Der von dem ANC-Lüftungsschalldämpfer verursachte statische Druckverlust liegt mit ca. 25 Pa in der Größenordnung des Druckverlustes des substituierten Kulissenschalldämpfers. Der Kulissenschalldämpfer ( $L \times B \times H = 2,0 \text{ m} \times 0,6 \text{ m} \times 0,9 \text{ m}$ ) erreicht diesen günstigen Druckverlust aber nur deshalb, weil der Querschnitt im Bereich des Kulissenschalldämpfers von  $0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$  auf  $0,6 \text{ m} \times 0,9 \text{ m}$  aufgeweitet wurde, um die freie Querschnittsfläche zwischen den Kulissenspalten möglichst so groß zu halten, wie der freie Kanalquerschnitt des ankommenden Kanals. Beim ANC-Lüftungsschalldämpfer hingegen konnte auf eine entsprechende Kanalaufweitung verzichtet werden.

Die aufgenommene elektrische Betriebsleistung der Regelelektronik im Kompensationsfall wurde mit ca. 30W ermittelt und fällt damit rel. niedrig aus.

## **6. Untersuchungen zur Langzeitstabilität der neu entwickelten Regelelektronik bei Parallelbetrieb mehrerer Controller**

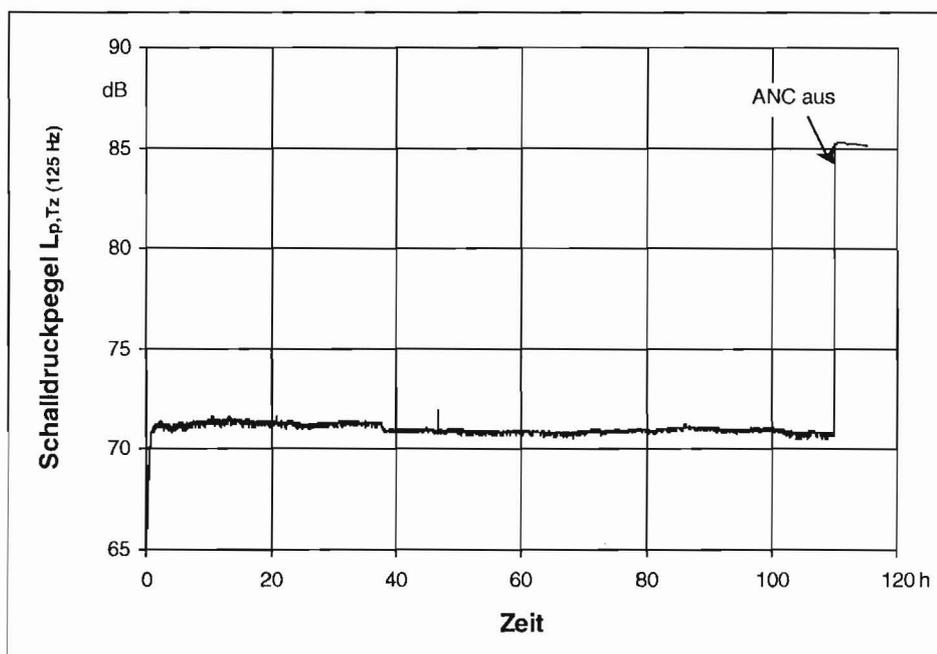
Die Langzeitstabilität der neu entwickelten Regelelektronik bei Parallelbetrieb mehrerer Controller wurde am Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp getestet. Die Untersuchungen erstreckten sich insgesamt über einen vierwöchigen Zeitraum. Zur Dokumentation wurde der Schalldruckpegel am Referenzpunkt hinter dem Aktiv-Schalldämpfer meßtechnisch erfaßt, über eine Schnittstelle in einen PC eingelesen und im 6-Sekunden-Abstand gespeichert. Der Aktiv-Schalldämpfer wurde sowohl mit Strömung bei Vollast des Gebläses, als auch mit diskreten Einzeltönen ohne Strömung betrieben.

Da der gemessene Schalldruckpegel am Referenzpunkt bei aktivierter ANC vom Umgebungsgeräusch (ca. 72 dB) auf dem Werksgelände der Wendt SIT GmbH beeinflusst wird, sollte sich ein Ausfall der Regelsysteme in einem deutlichen Pegelanstieg äußern. Der Pegelanstieg sollte eindeutig einem Systemausfall und keinem sonstigen Ereignis (z.B. sonstige Gewerbe- und Verkehrsgeräusche) zugeordnet werden können. Hierzu wurden zusätzliche Sinustöne über die Zusatzlautsprecher

eingespeist. Der Schalldruckpegel am Referenzpunkt wurde dann in Abhängigkeit vom eingespeisten Sinuston im entsprechenden Terzband aufgezeichnet. Ein Systemausfall konnte nun durch einen Pegelanstieg um ca. 15 dB identifiziert werden.

Aus speicher- und auswertungstechnischen Gründen konnten die Messungen bei der notwendigen zeitlichen Auflösung (alle 6 s eine Meßwertaufzeichnung) maximal nur über einen ca. 110-stündigen Zeitraum (ca. 4½ Tage) ununterbrochen aufgezeichnet werden. Danach mußte jeweils eine Unterbrechung erfolgen.

Abb. 6.1 zeigt beispielhaft den ununterbrochen über ca. 110 h aufgezeichneten Schalldruckpegel am Referenzpunkt bei aktiviertem Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp.



**Abb. 6.1:** Schalldruckpegel am Referenzpunkt bei aktiviertem Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp über einen ca. 110-stündigen Langzeitversuch (Vom 29.12.1999 bis 02.01.2000). (Sinuston  $f = 125$  Hz, ohne Strömung, terzbandgefilterter Schalldruckpegel bei  $f_{m,Tz} = 125$  Hz)

Abb. 6.1 belegt, daß über einen ca. 110-stündigen Zeitraum kein Systemausfall beim Aktiv-Schalldämpfer beobachtet werden konnte. Am Ende dieses Versuchs wurde das aktive System manuell deaktiviert, um zu zeigen, daß ein möglicher Ausfall sicher hätte erkannt werden können.

Auch in den weiteren Untersuchungen zeigten die Regelelektroniken sowohl mit und ohne Strömung, auch ohne zusätzliche Sinustonüberlagerung, eine gute Langzeitstabilität und Betriebssicherheit.

Probleme zeigten sich lediglich bei Stromausfällen bzw. Netzschwankungen. Bei einem regionalen Stromausfall in Folge eines Unwetters wurde die Hardware eines **NANCY 2000**-Controllers beschädigt und mußte repariert werden. In einem weiteren Fall wurde eine Softwarelöschung beobachtet, wenn die Regelelektroniken häufig vom Netz getrennt wurden. Die Netzteil-Stabilität der Controller wird daher noch optimiert.

## 7. Methodische Vorgehensweise bei der Auslegung und dem Einbau eines Aktiv-Schalldämpfers

### 1. Meßtechnische Erfassung des zu kompensierenden Geräusches (A-Schallleistungsbestimmung)

Die Messung sollte schmalbandig und A-bewertet erfolgen. Der Einsatz eines Aktiv-Schalldämpfers ist nur sinnvoll, wenn der A-bewertete Gesamtpegel auch von Komponenten unterhalb 500 Hz bestimmt wird.

### 2. Ermittlung der Grenzfrequenz der ursprünglichen Kanalgeometrie und Festlegung der Anzahl der erforderlichen Teilkanäle

Die Grenzfrequenz  $f_{G1}$  der Kanalgeometrie kann wie folgt berechnet werden:

$$f_{G1} = \frac{c_F}{2 \cdot b^*} \quad (\text{Rechteckquerschnitt}) \quad (7.1)$$

$$f_{G1} = 1,84 \cdot \frac{c_F}{(\pi \cdot D_i)} \quad (\text{Kreisquerschnitt}) \quad (7.2)$$

$c_F$  Schallgeschwindigkeit [m/s]

$b^*$  größte Seitenlänge des Rechteckrohres [m]

$D_i$  Innendurchmesser [m]

In Abhängigkeit vom zu kompensierenden Geräuschspektrum wird der gewünschte Wirkfrequenzbereich der Aktiv-Einheit individuell festgelegt.

Es wird empfohlen, bei Kanalabmessungen bis zu 0,7 m x 0,7 m einen aktiven Wirkfrequenzbereich von ca. 500 Hz anzustreben. Dem entsprechen bis zu 4 Teilkanäle mit 0,35 m x 0,35 m. Bei größeren Kanalabmessungen sollten die Teilkanäle nicht kleiner als 0,5 m x 0,5 m sein, also nur noch auf einen aktiven Wirkfrequenzbereich von ca. 340 Hz ausgelegt werden. Die erforderliche Anzahl an Teilkanälen richtet sich nach der Grenzfrequenz der ursprünglichen Kanalgeometrie.

### 3. Ermittlung der erforderlichen Vor- und Nachlaufstrecke der Aktiv-Einheit; Positionierung der ANC-Bauteilgruppen

Die Vorlaufstrecke (Abstand Referenzmikrofon / Kompensationslautsprecher) muß min. 0,8 m lang sein. Sollen tonale Geräuschkomponenten kompensiert werden, muß zusätzlich darauf geachtet werden, daß das Referenzmikrofon nicht im Abstand von Vielfachen der halben Wellenlänge von tonalen Komponenten angeordnet wird.

Die Nachlaufstrecke (Abstand Errormikrofon / Kompensationslautsprecher) sollte min. drei- bis viermal so lang wie die größte Seitenlänge ( $b_T^*$ ) des gewählten Teilkanals sein.

Referenzmikrofon, Errormikrofon und Kompensationslautsprecher werden in allen Teilkanälen gleich positioniert.

Die Querschnittunterteilung sollte jeweils um ca.  $b_T^*/2$  über die ANC-Mikrofone hinaus reichen. Vor- und Nachlaufstrecke verlängern sich dadurch jeweils entsprechend und ergeben zusammenaddiert die Gesamtlänge des Aktiv-Schalldämpfers.

Bei beengten Einbausituationen sollte der Aktiv-Schalldämpfer entsprechend günstig segmentiert werden um insbesondere den nachträglichen Einbau zu erleichtern.

#### 4. *Festlegung der angestrebten Einfügungsdämpfung und Auslegung des Passivteils des Aktiv-Schalldämpfers*

Die zum Erreichen der gesetzten Zielsetzung erforderliche Einfügungsdämpfung wird frequenzabhängig festgelegt. Die erforderliche Einfügungsdämpfung oberhalb des aktiven Wirkfrequenzbereiches wird passiv mit mindestens einer Randkulisse und ggf. weiteren Mittenkulisen ausgelegt. Die Randkulisse sollte min. 40 mm dick sein und muß das Referenz- und Errormikrofon des Teilkanals abdecken. Die Mikrofone müssen direkt hinter dem Absorptionsmaterial angeordnet werden.

Kanal- und Teilkanalwanddämmung werden ebenfalls auf die angestrebte Einfügungsdämpfung ausgelegt.

#### 5. *Auswahl von geeigneten Kompensationslautsprechern*

Entsprechend den Umweltbedingungen, in denen die Kompensationslautsprecher eingesetzt werden sollen, und der zu kompensierenden Schalleistung müssen geeignete Treiber ausgewählt werden.

Der Kennschalldruckpegel eines Treibers wird von den Herstellern meist für ein rel. breites Frequenzband als Gesamtpegel angegeben. In den meisten Fällen liegt von Herstellerseite kein Terzspektrum des Kennschalldruckpegels vor, was für eine Auslegung erfordert wäre. Daher wird empfohlen, für eine Auswahl von Kompensationslautsprechern direkt den Schalleistungspegel (bezogen auf 1 W Eingangsleistung) in Terzbandbreite zu ermitteln. Die max. Schalleistung, die der Kompensationslautsprecher abstrahlen kann, kann dann anhand der Nennbelastbarkeit des Treibers abgeschätzt werden.

## 6. Einbau des Aktiv-Schalldämpfers

Der Aktiv-Schalldämpfer soll so im Kanal positioniert werden, daß eine offensichtliche Selbstausschöpfung-Frequenz  $f_K$  nicht mit einer aus dem zu kompensierenden Geräuschspektrum deutlich hervortretenden Frequenz zusammentrifft.

Selbstausschöpfung-Frequenzen  $f_{K,n}$  lassen sich bei schallharter Reflektion wie folgt abschätzen:

$$f_{K,n} \approx n \cdot \frac{c_F}{4 \cdot \Delta B} \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (7.3)$$

$f_{K,n}$  Selbstausschöpfung-Frequenz [Hz]

$c_F$  Schallgeschwindigkeit im Fluid [m/s]

$\Delta B$  Abstand Kompensationslautsprecher zu Reflektor [m]

Bezüglich des Abstandes der Kompensationslautsprecher zu Umlenkungen vor und hinter dem Aktiv-Schalldämpfer, die als solche Reflektoren wirken können, sollte dies berücksichtigt werden. Bedingt durch unvollständige Reflektion läßt sich  $\Delta B$  in der Praxis allerdings nicht exakt abschätzen. Am sichersten lassen sich die Einbrüche durch Messung des Frequenzgangs des Kompensationslautsprechers für die gegebenen Einbaubedingungen ermitteln. Ein sicheres Abschätzen der Frequenzgangeinbrüche im Voraus ist derzeit bei praktischen Anwendungsfällen auf Grund der Komplexheit der Zusammenhänge nicht ohne weiteres möglich.

## 7. Anschluß und Inbetriebnahme der ANC-Regelheiten

Beim Anschluß der Regelheiten ist darauf zu achten, daß es nicht zur Erdschleifenbildung kommt. Alle ANC-Bauteile müssen vom Kanal elektrisch isoliert sein und werden getrennt über die Regelheiten geerdet. Werden die Regelheiten in einem Schaltschrank angebracht, muß auch dieser vom Kanal elektrisch isoliert sein. Bei Herstellung der Netzversorgung muß bei den Controllern und Verstärkern auf strikte Phasen-, Massen- und Schutzleitertrennung geachtet werden um „Massebrummen“ zu vermeiden.

Die Regelheiten werden gemäß Anleitung in Betrieb genommen.

„Problemfrequenzen“, die auf Grund von Fehlanpassungen der ANC-Bauteile an die Kanalgeometrie, nicht-kohärenten Signalanteilen (Pseudoschall) oder ungünstigen Mikrofonpositionen auftreten können und zu Systeminstabilitäten führen, werden durch entsprechende Tauglichkeitsfilterung aus dem Regelprozeß ausgeblendet.

## 8. Ökologisch, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse

### 8.1 Ökologische Bewertung der Vorhabensergebnisse

Konventionelle Schalldämpfer werden derzeit immer noch zum Großteil mit künstlichen Mineralfasern (KMF) befüllt. Bei herkömmlichen Mineralfasern, deren kanzerogenes Potential seit über einem Jahrzehnt von Wissenschaftlern diskutiert wird und bis dato immer noch nicht zweifelsfrei geklärt ist, liegt eine mögliche Gesundheitsgefährdung dann vor, wenn lungengängige Fasergeometrien z.B. durch Abrieb bei der Verarbeitung und Handhabung freigesetzt und eingeatmet werden. Insbesondere beim Einsatz als sekundäre Schallschutzprodukte werden sie u.a. erhöhten Strömungen und damit einem noch größeren Abrieb z.B. als Schalldämpfer in Lüftungskanälen ausgesetzt. Bei der wissenschaftlichen Diskussion wurde unstrittig festgestellt, daß eine ausreichend hohe Löslichkeit der Mineralfasern in Körperflüssigkeit, ihre sog. Biolöslichkeit, sie vom Krebsverdacht befreien würde. Umstritten ist aber nach wie vor, wie man die Biolöslichkeit bestimmt und eine „ausreichende Höhe“ bewertet [ST97].

Rechtlich gelten in der BRD derzeit für den Umgang mit künstlichen Mineralfasern die Regelungen der Gefahrstoffverordnung [GefStoffV]. Von einer Gefährdung durch künstliche Mineralfasern geht man danach nicht mehr aus, wenn bei KMF, bei denen lungengängige Faserstäube freigesetzt werden können,

- ein geeigneter Intraperitonealtest keine Anzeichen übermäßiger Kanzerogenität zum Ausdruck gebracht hat,
- die Halbwertszeit nach intratrachealer Instillation von 2 mg einer Fasersuspension für Fasern mit einer Länge größer 5µm, einem Durchmesser kleiner 3 µm und einem Längen- zu Durchmesser Verhältnis von größer 3:1 (WHO-Fasern) weniger oder gleich 65 Tage beträgt (ab dem 01. Oktober 2000 weniger oder gleich 40 Tage) oder
- der Kanzerogenitätsindex KI, der sich aus der Differenz zwischen der Summe der Massengehalte (in vom Hundert) der Oxide von Natrium, Kalium, Bor, Calcium, Magnesium, Barium und dem doppelten Massengehalt (in vom Hundert) von Aluminiumoxid ergibt, größer oder gleich 40 ist [GefStoffV].

International gilt das Gefährdungspotential der Mineralfaser immer noch nicht als zweifelsfrei geklärt. Daher werden Alternativen zur Mineralfaser nachwievor vor allem für die Anwendungsgebiete der Schalldämpfertechnik benötigt.

Durch die Erhöhung des Wirkfrequenzbereiches des aktiven Teils des ANC-Schalldämpfers durch Querschnittsunterteilung auf bis zu 500 Hz kann der passive Teil des Schalldämpfers entsprechend auf Frequenzen > 500 Hz, also sehr viel kleiner, dimensioniert werden, als dies bei einem rein passiven Kulissenschalldämpfer der Fall wäre. Hierdurch können erhebliche Mengen an gesundheitlich umstrittenen KMF-Materialien eingespart werden.

Im Vergleich zu konventionellen Kulissenschalldämpfern (vgl. Kap. 4.3) konnte beim Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp (ANC-Prototyp) je nach Auslegung zwischen 8 Vol% und 62,5 Vol% passives Absorptionsmaterial eingespart werden. Gegenüber dem neu prognostizierten Aktiv-Schalldämpfer (ANC-SD) könnte das passive Absorptionsmaterial um bis zu 70 Vol% reduziert werden. Bei dem durchgeführten Pilotprojekt „ANC-Lüftungsschalldämpfer“ konnte im Vergleich zum substituierten Kulissenschalldämpfer 80 Vol% passives Absorptionsmaterial eingespart werden.

Hierdurch reduziert sich auch die Abfallmenge an irgendwann zu entsorgenden porösen Absorptionsmaterialien, die durch Verunreinigungen nach ihrem Einsatz durchaus zu besonders überwachungsbedürftigem Abfall (Sondermüll) werden können.

Auch energetisch gesehen birgt die aktive Schalldämpfertechnologie ein erhebliches Einsparpotential. Die durch Schalldämpfer verursachten Druckverluste müssen während den Betriebszeiten der lufttechnischen Anlage ständig von der Strömungsmaschine überwunden werden. Im Vergleich zu konventionellen Kulissenschalldämpfern (vgl. Kap. 4.3) konnte der Zusatzenergiebedarf beim Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp je nach Auslegung um 56 % bis 95 % eingeschränkt werden. Die hierbei für den ANC-Betrieb erforderliche Betriebsleistung der vier Regeleinheiten (**NANCY 2000**-Controller- und -Verstärkereinheiten) ist bei der Betrachtung bereits berücksichtigt und fällt bei Vollast des Gebläses mit 60 W kaum ins Gewicht.

Der von dem ANC-Lüftungsschalldämpfer verursachte statische Druckverlust lag bei dem Pilotprojekt mit ca. 25 Pa in der Größenordnung des Druckverlustes des substituierten Kulissenschalldämpfers. Der Kulissenschalldämpfer erreicht diesen günstigen Druckverlust aber nur deshalb, weil der Querschnitt im Bereich des Kulissenschalldämpfers entsprechend aufgeweitet wurde. Die Betriebsleistung der Regel elektronik (Zwei **NANCY 2000**-Controller- und -Verstärkereinheiten) wurde hier mit ca. 30 W ermittelt und fällt ebenfalls sehr niedrig aus.

Die Betriebsleistung der neuen Regelelektronik kann mit ca. 15 W pro System (Controller + 100 W Verstärkereinheit) angegeben werden. Sie wird im wesentlichen von der Verstärkereinheit bestimmt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß der neu entwickelte Aktiv-Schalldämpfer im Vergleich zu herkömmlichen Schalldämpfern und Resonatoren in z.T. erheblichem Maß zur Umweltentlastung beitragen kann.

## 8.2 Technologische Bewertung der Vorhabensergebnisse

Durch die Wirkfrequenzbereichserweiterung durch Querschnittunterteilung und die breitbandige, stabile Kompensationswirkung bei Vorhandensein von Strömung, wird nun auch in größeren Kanälen der Einsatz aktiver Minderungstechnologien ermöglicht.

Technologisch bietet der Aktiv-Schalldämpfer in Verbindung mit der neuen Regel elektronik **NANCY 2000** eine innovative Alternative vor allem zu Resonatorenschalldämpfern. Diesen gegenüber weist er sich vor allem durch die Adaptionsfähigkeit des aktiven Systems aus, d.h. der aktive Schalldämpfer reagiert z.B. im Gegensatz

zu einem Resonator selbständig auf Drehzahl- und damit Drehklangänderungen, z.B. bei mehrstufigen oder drehzahlvariablen Ventilatoren und Gebläsen.

Besonders zur Minderung tiefer Frequenzen, die mit konventionellen Maßnahmen nur schwer und aufwendig zu dämpfen sind, bietet sich der aktive Schalldämpfer an.

Durch die kleineren Schalldämpferabmessungen (keine oder nur geringe Kanalausweitungen) und die Einsparung an passivem Absorptionsmaterial wird gerade bei tiefen Frequenzen eine z.T. beachtliche Bauraum- und Gewichtsreduzierung erzielt. Im Vergleich zu konventionellen Kulissenschalldämpfern (vgl. Kap. 4.3) konnte beim Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp je nach Auslegung alleine durch Kleinerdimensionierung des passiven Schalldämpferteils bis zu 58 Gew.% Kulissengewicht eingespart werden.

Ein weiterer Vorteil dieser Technologie ist die Möglichkeit der gezielten Unterdrückung von störenden, tonalen Komponenten im Geräuschspektrum.

Bei der Ermittlung von Beurteilungspegeln in der Nachbarschaft oder am Arbeitsplatz werden gemäß den geltenden Vorschriften und Normen tonhaltige Geräuschmischungen mit einem Ton- und Informationshaltigkeits-Zuschlag  $K_T = 3$  bis 6 dB berücksichtigt (z.B. [1][2][TA-Lärm],...). Aktiv-Schalldämpfer können gerade solche tonalen Komponenten effektiv unterdrücken und damit die Lärmbelastung zusätzlich um 3 bis 6 dB reduzieren.

Vor diesen Hintergründen stellen die aktiven Schalldämpfertechnologien auch technologisch gesehen vor allem für tiefe Frequenzen eine sinnvolle Ergänzung der passiven Methoden dar.

### **8.3 Ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse**

Die Investitionskosten für einen aktiven Schalldämpfer werden in erster Linie von den Stückpreisen der **NANCY 2000**-Systeme, der Anzahl der Teilkanäle, den Schalldämpferkulissen für den passiven Teil und den Anforderungen an die Ausführung der ANC-Bauteilkomponenten bestimmt. Im Vergleich zu konventionellen Kulissenschalldämpfern erhöhen sich die Investitionskosten überschlägig um die Kosten für die aktive Hard- und Software pro Teilkanal.

Die Betriebskosten liegen, vor allem bedingt durch geringere Druckverluste, im Gegensatz zu den Investitionskosten niedriger.

Verglichen mit einem Kulissenschalldämpfer gleicher Baugröße amortisieren sich die höheren Investitionskosten für einen Aktiv-Schalldämpfer durch die Betriebskosteneinsparung innerhalb von ca. einem Jahr.

Für eine genauere Kostenanalyse fehlen z.Z. noch genauere Daten und Erfahrungen.

Die hier vorgenommenen Vergleiche beziehen sich lediglich auf konventionelle Kulissenschalldämpfer. Beim Einsatz von Resonatoren ist je nach Bauart mit wesentlich höheren Investitionskosten zu rechnen.

## 9. Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Der Aktiv-Schalldämpfer wurde auf dem „Erfinderforum 1999“ in Mainz anlässlich der Verleihung des „Erfinderpreises Rheinland-Pfalz 1999 der Investitions- und Strukturbank Rheinland-Pfalz (ISB) GmbH“ präsentiert und ausgezeichnet.

Auf der Jahrestagung „Antischallsysteme im Schallschutz und für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen – Möglichkeiten und Grenzen“, Haus der Technik, Essen, wurden erste Vorhabenserkenntnisse vorgestellt [ST98]. Für die Jahrestagung 2000 ist wieder ein Beitrag angemeldet.

In den VDI nachrichten wurde ein Beitrag zum aktiven Schalldämpfer veröffentlicht [SCH99].

Darüber hinaus wurde eine Veröffentlichung in der Zeitschrift „Konstruktion“ eingereicht. [SKST00].

Weiterhin ist eine Beitragsveröffentlichung in der „Zeitschrift für Lärmbekämpfung“ geplant.

Im Rahmen einer Lizenzvereinbarung zwischen den Firmen IBS GmbH, Wendt SIT GmbH und ABS GmbH wurde vereinbart, daß die Fa. ABS GmbH die Vermarktung des neu entwickelten ANC-Controllers **NANCY 2000** vornehmen soll.

Über die Fa. Wendt SIT GmbH soll der Aktiv-Schalldämpfer vermarktet und somit einem großen Kundenkreis zugänglich gemacht werden.

## Fazit

Die Zielsetzung des Vorhabens, kommerzielle aktive Schalldämpfer dahingehend weiter zu entwickeln, daß auch bei größeren Kanalabmessungen oberhalb der Grenzfrequenz  $f_{G1}$  eine wirksame Schallreduzierung erzielt werden kann, wurde durch geeignete Unterteilung von Kanalquerschnitten erfolgreich realisiert.

Mit dem **NANCY 2000**-System steht eine neuartige Regelelektronik für die breitbandige aktive Lärminderung durch Gegenschall zur Verfügung, wodurch ein stabiler, breitbandiger, störungsfreier Betrieb des ANC-Systems auch bei Vorhandensein von Strömung gewährleistet werden kann [SKT99].

Durch den Einsatz aktiver Schalldämpfertechnologien kann Absorptionsmaterial, zusätzlich benötigte Leistung bei Strömungsmaschinen, Bauraum und Gewicht eingespart, sowie die Betriebskosten in Lüftungstechnischen Anlagen z.T. erheblich gesenkt werden.

Die Kompensationslautsprecher sollten bei Beibehaltung des Wirkungsgrades noch weiter zu kompakteren Bauformen hin entwickelt werden. Soll der Aktiv-Schalldämpfer von aggressiven, feuchten oder heißen Medien durchströmt werden, bedürfen die der Strömung ausgesetzten ANC-Komponenten noch weiterer Optimierung. Die Netzteil-Stabilität der **NANCY 2000**-Controller sollte im Hinblick auf Netzschwankungen und -ausfälle noch verbessert werden.

## Literaturverzeichnis

- [BJ96] BIERMANN, J.-W. und JANOWITZ, T.: *Lärminderung im Arbeitsschutz durch Antischall*. [Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz] Bremerhafen: Wirtschaftsverl. NW, Verl. für Neue Wiss., 1996 (Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz: Forschung; Fb 730)
- [DNS98] DEUS, S., NEUMANN, T. und SCHATZ, W.: *Aktive Schalldämpfung im Ansaugkanal von Gebläsen*. Tagungsbeitrag zur 24. Deutschen Jahrestagung Akustik DAGA 98 in Zürich, 1998
- [Gui95] GUICKING, D.: *Active Noise and Vibration Control, Reference Bibliography*. 3rd Edition, February 1988, 1st Supplement August 1991, 2nd Supplement November 1995, Drittes Physikalisches Institut Universität Göttingen, 1988, 1991, 1995
- [HE95] HECKL, M. und MÜLLER, H.A.: *Taschenbuch der Technischen Akustik*. 2. Aufl. Berlin: Springer-Verlag 1995
- [Her97] HERMANN WENDT GMBH (Hrsg.): *Aktive Lärminderung durch Gegenschall in Rohrleitungen und Kanälen oberhalb der Grenzfrequenz  $f_{G1}$ , einem Frequenzbereich, in dem das Schallfeld nicht mehr eben ist*. Unveröffentlichte Antragschrift zum Vorhaben Az: 12329 bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück; Ludwigshafen: 1997
- [Her98] HERMANN WENDT GMBH (Hrsg.): *Zwischenbericht zum Projekt: „Aktive Lärminderung durch Gegenschall“, Az: 12329*. Gemeinsamer Untersuchungsbericht der Firmen Hermann Wendt GmbH und IBS GmbH sowie der Fachhochschule Bingen, Fachbereich Umweltschutz. 1998
- [KL98] KRÜGER, J. und LEISTNER, P.: *Wirksamkeit und Stabilität eines neuartigen aktiven Schalldämpfers*. ACUSTICA - acta acustica, Vol: 84 1998, S. 658 - 667
- [NE92] NELSON, P. A. und ELLIOT, S. J.: *Active Control of Sound*. London: Academic Press, 1992
- [NN98] NN: *TOA Audio Products Beschallungstechnik*. Firmenkatalog der Fa. TOA Electronics Europe GmbH, Hamburg 1998
- [PFE98] PFEIFER, C.: *Lärminderung in Kanälen durch aktive Schallfeldkompensation unter Berücksichtigung der Kanalgeometrie*. Diplomarbeit FH Bingen, Fachbereich Umweltschutz, 1998

- [SW97] SCHECKER, B. UND WONS M.: *Aufbau und Optimierung einer Versuchsstrecke für zwei bekannte Verfahren der aktiven Lärminderung in geschlossenen Kanälen. Ermittlung und Bewertung von Einflußparametern auf die Wirksamkeit.* Diplomarbeit FH Bingen, Fachbereich Umweltschutz, 1997
- [SCH99] SCHULTE, U.: *Die Suche nach dem leisen Ton.* In VDI nachrichten, Nr. 41, S. 33 vom 15.10.1999
- [SKST00] SINAMBARI, GH. R, KUNZ, F., SIEGEL, L. und THORN, U.: *Aktive Schalldämpfer für Kanäle mit großen Durchmessern.* In „Konstruktion“, VDI-Springer Verlag, (Veröffentlichung für Februar 2000 geplant)
- [SKT99] SINAMBARI, GH. R, KUNZ, F. und THORN, U.: *Entwicklung einer neuartigen Regelelektronik für die breitbandige aktive Lärminderung durch Gegenschall unter Elimination von Pseudoschall-Störquellen.* Abschlußbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Az: 15655 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. IBS Ingenieurbüro für Schall- und Schwingungstechnik GmbH, Ludwigshafen 1999
- [ST98] SINAMBARI, GH. R. und THORN, U.: *Lärminderung mit Hilfe der aktiven Schalldämpfung im Kanal und an der Rohrmündung - Grenzen, Fehlerquellen.* Tagungsbeitrag zur Veranstaltung: Antischallsysteme im Schallschutz und für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen - Möglichkeiten und Grenzen. Tagung Nr. E - 30 - 631 - 103 - 8 im Haus der Technik, Essen am 23. Juni 1998
- [ST97] SINAMBARI, GH. R. und THORN, U.: *Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben „Entwicklung alternativer Dämmstoffe für den sekundären Schallschutz“.* Fachhochschule Bingen, Fachbereich Umweltschutz, 1997
- [TA-Lärm] TECHNISCHE ANLEITUNG ZUM SCHUTZ GEGEN LÄRM – TA Lärm: Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz vom 26.08.1998 (BMBl. 1998, S. 503)
- [GefStoffV] VERORDNUNG ZUM SCHUTZ VOR GEFÄHRLICHEN STOFFEN (GEFAHRSTOFFVERORDNUNG (GefStoffV) vom 26. August 1986 (BGBl. I S. 1470) i.d.F. der Bek. vom 26. Oktober 1993 (BGBl. I S. 1782, 1783), zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 22. Dezember 1998 (BGBl. I S. 3956)

**Normung:**

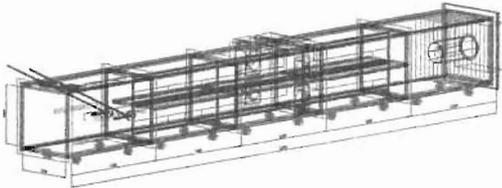
- [1] **DIN 45645-1** *Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen – Teil 1: Geräuschemissionen in der Nachbarschaft, 1997*
- [2] **DIN 45645-2** *Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen – Teil 2: Geräuschemissionen am Arbeitsplatz, 1997*
- [3] **DIN EN ISO 11820** *Akustik - Messungen an Schalldämpfern im Einsatzfall (ISO 11820:1996), 1997*
- [4] **DIN IEC 268-5:** *Elektroakustische Geräte, Teil 5: Lautsprecher (IEC 268-5: 1989 + A1: 1993; Deutsche Fassung HD 483.5 S2: 1994), 1995*

# Aktiver Schalldämpfer

Entwickelt im Rahmen der Forschungsvorhaben:

“Aktive Lärminderung durch Gegenschall in Rohrleitungen und Kanälen oberhalb der Grenzfrequenz  $f_{G1}$ , einem Frequenzbereich, in dem das Schallfeld nicht mehr eben ist”, Az 12329

“Entwicklung einer neuartigen Regelelektronik für die breitbandige aktive Lärminderung durch Gegenschall unter Elimination von Pseudoschall-Störquellen”, Az 15655



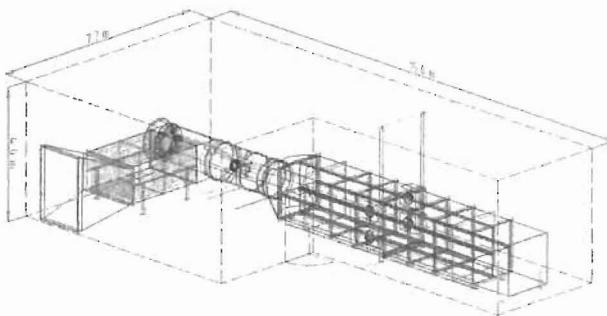
Laborprüfstand zur Untersuchung der prinzipiellen Möglichkeit der Wirkfrequenzbereichserweiterung eines aktiven Schalldämpfers durch Querschnittunterteilung



Aufnahme des Laborprüfstandes im Labor für Schall- und Erschütterungsschutz der FH Bingen, FBU



Schalldruckpegel im Meßmodus des Laborprüfstandes mit und ohne aktive/passive Maßnahmen



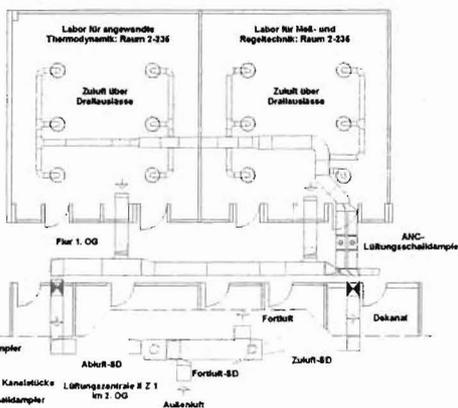
Großer Technikumsprüfstand (Querschnitt: 1,6m x 1,6m):  
Max. Gebläseleistung:  $\dot{V} \approx 55.000 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $v \approx 7 \text{ m/s}$ ,  $P_{el} = 29,3 \text{ kW}$ ,  $L_{wa} = 98 \text{ dB(A)}$ ;  
4 Teilkanäle zur Wirkfrequenzbereichserweiterung, mit passiven Randkissen ausgekleidet ( $d = 80 \text{ mm}$ )



Aufnahmen des großen Technikumsprüfstandes im Schall-Labor der IBS GmbH Fotos: Tröster



Erzielte Schalldruckpegelminderung durch Kombination von aktiven und passiven Maßnahmen



ANC-Lüftungsschalldämpfer (Pilotprojekt):  
Substitution eines passiven Kulissenschalldämpfers im Zulufstrang einer Lüftungsanlage an der FH Bingen durch einen ANC-Lüftungsschalldämpfer mit zwei Teilkanälen



Aufnahmen des ANC-Lüftungsschalldämpfers (Unter realen Einbaubedingungen und bei den Vorversuchen am kleinen Technikumsprüfstand der Wendt SIT GmbH)



Erzielte Schalldruckpegelminderung mit dem ANC-Lüftungsschalldämpfer (in der Lüftungsanlage und bei den Vorversuchen)

