

WENDT

SIT

Sound proofing Insulation Technology



Wendt SIT GmbH

- Optimierung eines ANC-Systems - Weiterentwicklung von Antischallsystemen zur technischen Reife

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 21704 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Projektleitung:

Dipl.-Ing. J. H. Haane ¹
Prof. Dr.-Ing. Gholam Reza Sinambari ²⁺³

Bearbeiter:

Dipl.-Ing. (FH) Udo Thorn ²
Dipl.-Ing. (FH) Alexander Mäurer ²

Frankenthal

März 2005

¹ Wendt SIT GmbH, Frankenthal

² IBS GmbH, Frankenthal

³ FH Bingen, FB Umweltschutz

Dieser Bericht ist zu beziehen bei:

Wendt SIT GmbH

Sound proofing Insulation Technology

Beindersheimer Str. 79

D-67227 Frankenthal

Tel.: 06233/7704-0

Fax: 06233/7704-30

e-mail: info@wendt-sit.de

<http://www.wendt-sit.de>

11/95		Projektkennblatt		
		der Deutschen Bundesstiftung Umwelt		
Az	21704/	Referat	(21/0)	Fördersumme 50.677,00 €
Antragstitel		Optimierung eines ANC-Systems - Weiterentwicklung von Antischallsystemen zur technischen Reife		
Stichworte		Verfahren Lärm , Abluft , Emission , Faser , Energie		
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
15 Monate	10/2003	12/2004	keine	
Zwischenbericht:				
Bewilligungsempfänger		Wendt-SIT GmbH Sound proofing Insulation Technology Beindersheimer Str. 79 D-67227 Frankenthal		Tel 06233/7704-0 Fax 06233/7704-30 Projektleitung J. H. Haane; Gh. R. Sinambari Bearbeiter U. Thorn, A. Mäurer
Kooperationspartner		IBS Ingenieurbüro für Schall- und Schwingungstechnik GmbH, D-67227 Frankenthal Felix Schoeller junior Foto- und Spezialpapiere GmbH & Co. KG, Werk Weißenborn, D-09600 Weißenborn/Berthelsdorf		
Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens				
<p>Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Aktive Lärminderung durch Gegenschall, Az: 12329“ wurde ein Aktiv-Schalldämpfer entwickelt, der direkt hinter dem lärmerzeugenden Aggregat auch in größeren Kanalquerschnitten eingesetzt werden kann. Erfahrungen aus dem Betrieb an einer industriellen Anlage zur Zuverlässigkeit und Stabilität des Systems lagen bislang noch nicht vor. Im Rahmen eines Pilotprojektes soll der Aktiv-Schalldämpfer zur technischen Reife weiterentwickelt werden. Hierbei soll die von tonalen Komponenten geprägte Geräuschemission einer Vakuumanlage in einer Papierfabrik reduziert werden. Ziel ist es, die emittierte Schalleistung des Abluftkamins um 10 dB(A) zu senken und die tonalen Komponenten so weit zu reduzieren, dass kein entsprechender Zuschlag für Ton- und Informationshaltigkeit bei der Beurteilungspegelbildung mehr in Ansatz gebracht werden muss. In der Nachbarschaft der Papierfabrik sollen die Immissionsrichtwerte eingehalten werden.</p>				
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden				
<p>Um die der Strömung ausgesetzten ANC-Komponenten vom Abluftstrom zu trennen wurden verschiedene Folienmaterialien ausgewählt und deren Einfluss auf das Regelverhalten der Controller-Systeme unter Laborbedingungen untersucht und bewertet. Nachdem die Bauteile optimiert und an die Anwendung angepasst waren, wurde ein Aktiv-Schalldämpfer für das Pilotprojekt konstruiert, aufgebaut und im Wendt/IBS-Technikum mit realen Signalen der Vakuumanlage (über Lautsprecher abgespielte Bandaufnahme) überprüft und getestet. Nach erfolgreicher Testphase im Technikum wurde der Aktiv-Schalldämpfer in den Abluftkamin der Vakuumanlage montiert und unter realen Einbaubedingungen getestet und optimiert. Über einen mehrwöchigen Zeitraum sollte geprüft werden, ob die Einfügungsdämpfung des aktiven Systems zeitstabil ist. Durch den Dauerbetrieb sollte ermittelt werden, welche Komponenten zum Ausfall neigen und an welchen Systemparametern ggf. aktueller Wartungsbedarf abzulesen ist. Die Instandhaltung des Aktiv-Schalldämpfers sollte nach Möglichkeit so vereinfacht werden, dass sie ohne Spezialkenntnisse auch vom Anwender durchgeführt werden kann. Durch Messungen am Kamin und in der Nachbarschaft sollte die Zielsetzung des Vorhabens überprüft werden.</p>				
Deutsche Bundesstiftung Umwelt £ An der Bornau 2 £ 49090 Osnabrück £ Tel 0541/9633-0 £ Fax 0541/9633-190				

Ergebnisse und Diskussion

Zunächst wurden verschiedene Materialien zum Schutz der ANC-Bauteile gegen Beschädigung durch feuchte und aggressive Strömungsmedien im Rahmen einer Diplomarbeit untersucht [Köc04]. Hinsichtlich der Kennschalldruckpegelminderungen und des Einflusses auf das Regelverhalten der ANC-Systeme hat Kaptonfolie bei dem Vergleich am besten abgeschnitten und wurde für den vorliegenden Anwendungsfall als geeignet befunden. Im Rahmen der Entwicklung des ANC-Schalldämpfer-Prototyps wurden Untersuchungen zur Ermittlung der Grenzfrequenz f_0 eines vierfach unterteilten Kreisquerschnittes durchgeführt und entsprechende Berechnungsformeln zu deren Abschätzung experimentell erarbeitet. Auf der Basis der durchgeführten Untersuchungen wurde ein vierfach unterteilter hybrider Aktiv-Schalldämpfer mit einem schallharten Kern entwickelt. Der ANC-Schalldämpfer-Prototyp hat einen Aktiv- und einen Passivteil, wobei der Aktivteil auf einen Wirkfrequenzbereich von 200 Hz bis 400 Hz ausgelegt ist. Die Elektroinstallation der ANC-Bauteilkomponenten wurde industrietauglich ausgeführt.

Nach der Fertigstellung des ANC-Schalldämpfer-Prototyps wurde dieser im gemeinsamen Technikum der Firmen Wendt und IBS mit realen Signalen der Vakuumanlage (über Lautsprecher abgespielte Bandaufnahme) überprüft und getestet. Bezogen auf das Originalgeräusch erreichte der ANC-Schalldämpfer-Prototyp im Technikum eine Pegelminderung von insgesamt 20 dB(A). Auf den Passivteil des Schalldämpfers entfielen dabei ca. 10 dB(A), auf den Aktivteil noch einmal ca. 10 dB(A).

Nach dem Einbau des ANC-Schalldämpfer-Prototyp in den Abluftkamin der Papierfabrik wurde dieser unter realen Einbau- und Betriebsbedingungen getestet und vor allem die ANC-Mikrofone weiter optimiert. Dabei wurde festgestellt, dass die verwendeten ANC-Bauteilkomponenten ohne entsprechende Schutzabdeckungen nicht eingesetzt werden können. Verglichen mit der Ausgangssituation vor Einbau des Kulissenschalldämpfers konnte der A-Schalldruckpegel am Referenzpunkt letztlich um 10 dB(A) gemindert werden. Subjektiv und objektiv konnten keine tonalen Komponenten mehr wahrgenommen werden. Verglichen mit dem vor Durchführung des Vorhabens eingebauten Kulissenschalldämpfer konnten hierbei 62,5 Vol% passives Absorptionsmaterial und 25% Einbaulänge eingespart werden. Die Investitionskosten für den ANC-Schalldämpfer-Prototyp lagen allerdings etwa doppelt so hoch wie diejenigen des konventionellen Kulissenschalldämpfers. Zusammenfassend lassen die Ergebnisse des Forschungsvorhabens den Schluss zu, dass Aktiv-Schalldämpfer unter ökonomischen Gesichtspunkten in den meisten Fällen – auch bei dem durchgeführten Pilotprojekt - nicht mit den konventionellen Schalldämpfern konkurrieren können. Für spezielle Anwendungsfälle, z. B. hohe Pegelminderungen bei tiefen Frequenzen (< 200Hz), ist der ANC-Schalldämpfer durchaus konkurrenzfähig, sofern der Gesamtpegel von tiefen Frequenzen bestimmt wird und daher auf einen Passivteil verzichtet werden kann.

Die Zielsetzung des Vorhabens wurde erreicht. Die Pegelminderung wird allerdings vorrangig durch den Passivteil des Schalldämpfers erzielt, da für den Gesamtpegel die tonalen Komponenten im unteren Frequenzbereich nicht alleine maßgeblich waren. So lange die Wirksamkeit des Passivteils verschmutzungsbedingt nicht nachlässt, kann die Funktionalität des Aktivteiles nicht zufriedenstellend getestet werden. Aus Zeitgründen konnten daher die noch ausstehenden Ergebnisse zur Langzeitstabilität und Wartungsanfälligkeit des Aktivteils nicht mehr im Rahmen der Laufzeit dieses Vorhabens erarbeitet werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

- Beitragsveröffentlichung in der „Zeitschrift für Lärmbekämpfung“. Springer-VDI-Verlag, 2000 [STK00]
- ANC-Schalldämpfer als Exponat auf der Hannover Messe Industrie (Research & Technology), 2001
- Weiterhin wird eine Veröffentlichung in der „Zeitschrift für Lärmbekämpfung“ geplant.

Fazit

Die Zielsetzung des Vorhabens, die emittierte Schalleistung des Abluftkamins im Gesamtpegel um 10 dB(A) zu senken und dabei die tonalen Frequenzkomponenten so weit zu reduzieren, dass kein Zuschlag für Tonhaltigkeit mehr in Ansatz gebracht werden muss, wurde erreicht.

Um einen Betrieb in sehr schmutziger und sehr feuchter Abluft zu ermöglichen, mussten bei den ANC-Mikrofonen Kompromisse hinsichtlich Dichtigkeit und Schalldurchlässigkeit zu Lasten der Regeldynamik eingegangen werden. Da grundsätzlich nicht nur tonale Komponenten gedämpft werden sollen, sollten die ANC-Controller noch weiter optimiert und deren Dynamikbereich durch Auswahl leistungsfähigerer Regelkomponenten vergrößert werden.

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt	1
Verzeichnis von Bildern und Tabellen.....	5
Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	7
Zusammenfassung.....	9
Einleitung	11
Hauptteil	15
1. Auswahl geeigneter Materialien zum Schutz der ANC-Bauteile gegen Beschädigung durch feuchte und aggressive Strömungsmedien	15
2. Optimierung der Regelkreise im Laborprüfstand.....	16
3. Entwicklung und Aufbau des ANC-Schalldämpfer-Prototyps bei der Fa. Wendt	17
3.1 Ausgangsmessungen zur Ermittlung der Ist-Situation bei der Fa. Schoeller	17
3.2 Untersuchungen zur Ermittlung der Grenzfrequenz f_0 eines vierfach unterteilten Kreisquerschnittes	18
3.3 Konstruktion des ANC-Schalldämpfer-Prototyps.....	21
4. Überprüfung des ANC-Systems im Wendt / IBS-Technikum mit realen Signalen der Vakuumpumpenanlage (Lautsprecherbeschallung).....	23
5. Montage des ANC-Schalldämpfer-Prototyps in den Abluftkamin der Vakuumpumpenanlage der Fa. Schoeller im Werk Weißenborn	26
6. Test und Optimierung des ANC-Schalldämpfer-Prototyps unter realen Einbau- und Betriebsbedingungen im Abluftkamin der Vakuumpumpenanlage der Fa. Schoeller	28
6.1 Inbetriebnahme des Aktivteils des ANC-Schalldämpfer-Prototyps.....	28
6.2 Optimierung der ANC-Mikrofone	30
6.3 Abschließende Messungen in der Pilotanlage	34

7. Ökologisch, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse.....	36
7.1 Ökologische Bewertung der Vorhabensergebnisse	36
7.2 Technologische Bewertung der Vorhabensergebnisse	37
7.3 Ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse	38
8. Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse	39
Fazit	40
Literaturverzeichnis	41

Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Abb. 1.1: Links: Konuslautsprecher; Mitte: Musikhorn; Rechts: Musikhorn mit Verlängerung [Köc04]	15
Abb. 1.2: Verschiedene Folienabdeckungen am Konuslautsprecher; links: NPG-Folie; Mitte: Kapton-Folie; Rechts: Edelstahlfolie [Köc04]	15
Abb. 3.1: Gemessener A-Schalldruckpegel am Referenzpunkt im Bereich der Kaminmündung vor und nach Einbau des konventionellen Kulissenschalldämpfers (KSD) in den Abluftkamin. - Messung vom 12.07.2002 (vor Einbau des KSD) - Messung vom 11.12.2003 (nach Einbau des KSD)	18
Abb. 3.2: Phasendifferenzmessungen zur empirischen Ermittlung der Grenzfrequenz eines vierfach unterteilten Kreisquerschnittes. - vierfach unterteilter Kreisquerschnitt: Rohrinnendurchmesser: \varnothing 1,0 m - vierfach unterteilter Kreisquerschnitt mit schallhartem Kern: Rohrinnendurchmesser: \varnothing 1,0 m, Kerndurchmesser: \varnothing 0,22 m	20
Abb. 3.3: Vierfach unterteilte Kreisquerschnitte: a) vierfach unterteilter Kreisquerschnitt b) vierfach unterteilter Kreisquerschnitt mit schallhartem Kern.....	21
Abb. 3.4: Konstruktions-skizze des ANC-Schalldämpfer-Prototyps	22
Abb. 4.1: ANC-Schalldämpfer-Prototyp im Technikumsprüfstand.....	24
Abb. 4.2: Gegenüberstellung des im Abluftkamin bei realem Geräusch gemessenen und im Technikumsprüfstand mittels Lautsprecherbeschallung erzeugten A-bew. Schalldruckpegel (jeweils vor dem Schalldämpfer gemessen)	24
Abb. 4.3: A-bew. Schalleistungspegel LWA vor Eintritt und hinter dem ANC-Schalldämpfer-Prototyp mit und ohne aktivierte ANC. Als zu kompensierendes Geräusch wurde das im Kamin der Vakuumpumpenanlage aufgezeichnete Originalgeräusch in den Kanal über eine Lautsprecherwand eingespeist (ohne Strömung).....	25
Abb. 5.1: Schaltschrank mit nachgerüstetem Klimagerät (Türen offen und geschlossen)	27
Abb. 5.2: Kamin- und Kulissenschalldämpferverschmutzung durch die Vakuumpumpenanlage	27
Abb. 5.3: Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp im Abluftkamin der Vakuumpumpenanlage der Felix Schoeller junior Foto- und Spezialpapiere GmbH & Co. KG, Werk Weißenborn	28

Abb. 6.1: Gemessener A-Schalldruckpegel am Referenzpunkt im Bereich der Kaminmündung vor Einbau des konventionellen Kulissenschalldämpfers (KSD) und nach Einbau des ANC-Schalldämpfer-Prototyps (ANC-SD) in den Abluftkamin (ANC aus).	
- Messung vom 12.07.2002 (vor Einbau des KSD)	
- Messung vom 23.09.2004 (nach Einbau des ANC-SD)	29
Abb. 6.2: Mikrofonvariante Nr. 1: ANC-Mikrofon mit Folienkapsel-Variante Nr. 1	30
Abb. 6.3: Mikrofonvariante Nr. 2: ANC-Mikrofon mit Folienkapsel-Variante Nr. 2	31
Abb. 6.4: Mikrofonvariante Nr. 3: ANC-Mikrofon mit Folienkapsel-Variante Nr. 3	32
Abb. 6.5: Versuchsaufbau für die Empfindlichkeits- und Frequenzgangmessungen der unterschiedlichen Mikrofonvarianten.....	33
Abb. 6.6: Empfindlichkeitsverlust und Frequenzgangänderungen der verschiedenen ANC-Mikrofonvarianten in Folge der zur Abdichtung notwendigen Folienkapsel	33
Abb. 6.7: Gemessener A-Schalldruckpegel am Referenzpunkt im Bereich der Kaminmündung vor Einbau des konventionellen Kulissenschalldämpfers (KSD), nach Einbau des KSD, nach Einbau des ANC-Schalldämpfer-Prototyps (ANC-SD) in den Abluftkamin (ANC aus) und bei den abschließenden Messungen nach Optimierung des ANC-SD (ANC an).	
- Messung vom 12.07.2002 (vor Einbau des KSD)	
- Messung vom 11.12.2003 (nach Einbau des KSD)	
- Messung vom 23.09.2004 (nach Einbau des ANC-SD)	
- Messung vom 30.11.2004 (nach Einbau des ANC-SD)	35

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
- Az: 21704 Optimierung eines ANC-Systems – Weiterentwicklung von Antischallsystemen zur technischen Reife

Formelzeichen:

a	Höhe eines Rechteckkanals	m
b	Breite eines Rechteckkanals	m
c_F	Schallgeschwindigkeit	m/s
d_i	Rohr-Innendurchmesser	m
$d_{K,a}$	Kern-Aussendurchmesser	m
f	Frequenz	Hz
f_0	1. Grenzfrequenz der Kanalgeometrie, unterhalb der ebene Wellen ausbreitungsfähig sind	Hz
f_G	Grenzfrequenz der Kanalgeometrie, oberhalb der die jeweilige akustische Mode ausbreitungsfähig ist	Hz
$f_{m,Okt.}$	Oktavbandmittenfrequenz	Hz
$f_{m,Tz}$	Terzbandmittenfrequenz	Hz
k	Modalfaktor	
K_T	Zuschlag für Ton- und Informationshaltigkeit	dB
L_p	Schalldruckpegel	dB
$L_{p,1m}$	Kennschalldruckpegel	dB
L_{pA}	A-Schalldruckpegel	dB(A)
L_{WA}	A-Schalleistungspegel	dB(A)
n, m	Modalordnungen	

Abkürzungen:

ANC	Activ Noise Control
ANC-SD	ANC-Schalldämpfer
FFT	Fast Fourier Transformation
IP65	IP-Code für die Schutzart nach VDE (hier staub- und strahlwasser- dichtes Gehäuse)
KMF	Künstliche Mineralfasern
KSD	Kulissenschalldämpfer

Zusammenfassung

Die Zielsetzung des Vorhabens, die emittierte Schalleistung eines Abluftkamins in einer Papierfabrik durch den Einsatz eines Aktiv-Schalldämpfers im Rahmen eines Pilotprojektes im Gesamtpegel um 10 dB(A) zu senken und dabei die tonalen Frequenzkomponenten so weit zu reduzieren, dass an maßgeblichen Immissionsorten in der Nachbarschaft kein Zuschlag für Tonhaltigkeit mehr in Ansatz gebracht werden muss, wurde erreicht.

Hinsichtlich der Kenschalldruckpegelminderungen und des Einflusses auf das Regelverhalten der ANC-Systeme hat Kaptonfolie zum Schutz der ANC-Bauteile gegen Beschädigung durch feuchte und aggressive Strömungsmedien am besten abgeschnitten und wurde für den vorliegenden Anwendungsfall als geeignet befunden. Im Rahmen der Entwicklung des ANC-Schalldämpfer-Prototyps wurden Untersuchungen zur Ermittlung der Grenzfrequenz f_0 eines vierfach unterteilten Kreisquerschnittes durchgeführt und entsprechende Berechnungsformeln zu deren Abschätzung erarbeitet. Auf der Basis der durchgeführten Untersuchungen wurde ein vierfach unterteilter hybrider Aktiv-Schalldämpfer mit einem schallharten Kern entwickelt. Der ANC-Schalldämpfer-Prototyp hat einen Aktiv- und einen Passivteil, wobei der Aktivteil auf einen Wirkfrequenzbereich von 200 Hz bis 400 Hz ausgelegt ist. Die Elektroinstallation der ANC-Bauteilkomponenten wurde industrietauglich ausgeführt.

Nach der Fertigstellung des ANC-Schalldämpfer-Prototyps wurde dieser im gemeinsamen Technikum der Firmen Wendt und IBS mit realen Signalen der Vakuumanlage (über Lautsprecher abgespielte Bandaufnahme) überprüft und getestet. Bezogen auf das Originalgeräusch erreichte der ANC-Schalldämpfer-Prototyp im Technikum eine Pegelminderung von insgesamt 20 dB(A). Auf den Passivteil des Schalldämpfers entfielen dabei ca. 10 dB(A), auf den Aktivteil noch einmal ca. 10 dB(A).

Nach dem Einbau des ANC-Schalldämpfer-Prototyp in den Abluftkamin der Papierfabrik wurde dieser unter realen Einbau- und Betriebsbedingungen getestet und vor allem die ANC-Mikrofone weiter optimiert. Verglichen mit der Ausgangssituation vor Einbau des Kulissenschalldämpfers konnte der A-Schalldruckpegel am Referenzpunkt um 10 dB(A) gemindert werden. Subjektiv und objektiv konnten keine tonalen Komponenten mehr wahrgenommen werden. Verglichen mit dem vor Durchführung des Vorhabens eingebauten Kulissenschalldämpfer konnten hierbei 62,5 Vol% passives Absorptionsmaterial und 25% Einbaulänge eingespart werden.

Die Pegelminderung wird allerdings vorrangig durch den Passivteil des Schalldämpfers erzielt, da für den Gesamtpegel die tonalen Komponenten im unteren Frequenzbereich nicht alleine maßgeblich waren. So lange die Wirksamkeit des Passivteils verschmutzungsbedingt nicht nachlässt, kann die Funktionalität des Aktivteiles nicht zufriedenstellend getestet werden. Aus Zeitgründen konnten daher die noch ausstehenden Ergebnisse zur Langzeitstabilität und Wartungsanfälligkeit des Aktivteiles nicht mehr im Rahmen der Laufzeit dieses Vorhabens erarbeitet werden.

Das Projekt „Optimierung eines ANC-Systems – Weiterentwicklung von Antischallsystemen zur technischen Reife“ wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert (Az: 21704) und in Kooperation mit der Fa. IBS Ingenieurbüro für Schall- und Schwingungstechnik GmbH, Frankenthal, und der Fa. Felix Schoeller junior Foto- und Spezialpapiere GmbH & Co. KG, Werk Weißenborn, durchgeführt.

Einleitung

Für die Lärmbekämpfung in Rohrleitungen und Kanälen werden häufig passive Schalldämpfer (Kulissen- oder Resonatorschalldämpfer) eingesetzt, obwohl diese im oft dominierenden Frequenzbereich < 500 Hz nur unbefriedigende Einfügungsdämpfungen aufweisen. Soll die Einfügungsdämpfung bei niedrigen Frequenzen erhöht werden, ist im Falle von Kulissenschalldämpfern wegen der großen Wellenlänge des Schalls ein relativ großes Volumen von Dämpfungsmaterial erforderlich.

Aktive Schalldämpfersysteme, die nach dem Prinzip der aktiven Lärminderung durch Gegenschall arbeiten, stellen zu o.g. Systemen im unteren Frequenzbereich eine gute Alternative dar. Ihr Einsatz hat sich bei der Dämpfung tieffrequenter, tonaler Komponenten bewährt [DSN00][SSKST00][Sch99].

Durch ihren Einsatz können Absorptionsmaterial (i.d.R. künstliche Mineralfasern), Bauraum und Gewicht eingespart und die Betriebskosten (z.B. in Lüftungstechnischen Anlagen) durch den geringeren Druckverlust des Schalldämpfers gesenkt werden [SSKST00][STK00][SKST00].

Da das Gas – z.B. Verbrennungsgase – in Rohrleitungen bzw. Kanälen häufig mit Schadstoffen belastet ist, muss im Falle einer rein passiven Schalldämpfer-Lösung am Ende der Standzeit eine große Menge belasteten Absorptionsmaterials – häufig als Sondermüll - entsorgt werden. Bei Verwendung eines Aktiv-Schalldämpfers fällt der zur Dämpfung der mittleren und hohen Frequenzen erforderliche passive Schalldämpfer aufgrund der geringeren Wellenlängen des Schalls erheblich kleiner aus, so dass die Menge belasteten Abfalls deutlich vermindert ist und die Entsorgungskosten entsprechend geringer ausfallen.

Im Rahmen der Forschungsvorhaben: „Aktive Lärminderung durch Gegenschall, Az 12329“ [SSKST00][Her98] und „Entwicklung einer neuartigen Regelelektronik für die breitbandige aktive Lärminderung durch Gegenschall unter Elimination von Pseudoschall-Störquellen, Az 15655“ [SKT99] wurde in Zusammenarbeit mit den Firmen IBS Ingenieurbüro für Schall- und Schwingungstechnik GmbH und ABS Gesellschaft für Automatisierung, Bildverarbeitung und Software mbH ein Aktiv-Schalldämpfer entwickelt, der direkt hinter dem lärm erzeugenden Aggregat auch in größeren Kanalquerschnitten eingesetzt werden kann. Durch diese Anordnung wird vermieden, dass sich der störende Schall z.B. in verzweigte Kanäle einer Lüftungsanlage ausbreiten kann.

Dieser Aktiv-Schalldämpfer wurde bislang im Technikumsmaßstab getestet und erzielte hierbei zufriedenstellende Ergebnisse. Erfahrungen aus dem Betrieb an einer industriellen Anlage zur Zuverlässigkeit und Stabilität des Systems unter Einbaubedingungen im industriellen Betrieb – z.B. variablen Strömungsgeschwindigkeiten und Schallpegelspektren im Dauerbetrieb – liegen derzeit nicht vor.

Dies führt dazu, dass der Aktiv-Schalldämpfer bisher mangels Referenzprojekten noch nicht erfolgreich am Markt angeboten werden kann.

Um entsprechende Betriebserfahrungen zu sammeln und das Schalldämpfersystem zur technischen Reife weiterzuentwickeln, soll ein Pilotprojekt mit der Fa. Felix

Schoeller junior Foto- und Spezialpapiere GmbH & Co. KG GmbH, Weißenborn, durchgeführt werden.

Die Fa. Schoeller produziert in ihrem Werk in Weißenborn (Nähe Dresden) Foto- und Spezialpapiere. Die Schallemission des Abluftkamins einer Vakuumpumpenanlage führte in der Nachbarschaft zu einer Überschreitung der Immissionsrichtwerte. Einer behördlichen Anordnung folgend hat der Anlagenbetreiber darauf hin eine konventionelle Lösung realisiert (Absorptionsschalldämpfer). Durch den Einbau des konventionellen Kulissenschalldämpfers konnte die immissionswirksame Geräuschemission des Abluftkamins gesenkt werden. Da der Geräuschpegel jedoch auch nach Durchführung der konventionellen Maßnahme noch immer von tonalen Komponenten geprägt ist, musste nach wie vor an 2 maßgeblichen Immissionsorten ein Zuschlag für Tonhaltigkeit bei der Bildung des Beurteilungspegels berücksichtigt werden. Dies führte dazu, dass an einem Immissionsort der Immissionsrichtwert trotz Durchführung der kostenintensiven Lärminderungsmaßnahme noch immer überschritten wurde. Im Rahmen des Pilotprojektes sollte daher das Nachbarschaftsproblem durch den Einsatz eines Aktiv-Schalldämpfers gelöst werden.

Zielsetzung des Vorhabens:

Ziel des Vorhabens ist es, das im Labor- und Technikumsmaßstab bereits getestete ANC-System im Rahmen eines Pilotprojekts an die Anforderungen im industriellen Betrieb anzupassen und die Zuverlässigkeit des Systems im Dauerbetrieb zu überprüfen. Damit würde die Perspektive eröffnet, auch für größere Kanalabmessungen Lärminderung durch Gegenschall zu betreiben.

Ziel im Rahmen des konkreten Projektes ist, die emittierte Schalleistung des Kamins um 10 dB(A) zu senken und dabei die schmalbandigen Frequenzkomponenten, die derzeit zu einem Pegelzuschlag für Tonhaltigkeit bei der Beurteilungspegelbildung führen, so weit zu reduzieren, dass kein entsprechender Zuschlag mehr in Ansatz gebracht werden muss. Ferner sollen an allen maßgeblichen Immissionsorten die Immissionsrichtwerte eingehalten werden.

Hierzu wurde folgendes Lösungskonzept bei Antragstellung ausgearbeitet:¹

a) Auswahl von Folienmaterialien

Test und Überprüfung verschiedener Folienmaterialien für den Einsatz in feuchten Medien. In diesem Zusammenhang sind folgende Untersuchungen vorgesehen:

- Auswahl verschiedener feuchteresistenter Folienmaterialien aufgrund von Herstellerangaben.

¹ Aus technischen und behördlichen Gründen war es nicht möglich, den geplanten Lösungsweg exakt einzuhalten. Auf Grund der behördlichen Auflagen war es dem Kooperationspartner Schoeller nicht möglich, der Außer-Funktion-Setzung des konventionellen Kulissenschalldämpfers zuzustimmen. Eine direkte Gegenüberstellung der Einfügungsdämpfung der konventionellen Lösung (Kulissenschalldämpfer) und des ANC-Schalldämpfers war daher nicht möglich und konnte nur abgeschätzt werden. Auch die Zuverlässigkeit des Systems im Dauerbetrieb konnte noch nicht bewertet werden, da die Vorhabenslaufzeit auf Grund eingetretener Verzögerungen hierzu nicht mehr ausreichte. Die Abweichungen, auf die in der Vorhabensbeschreibung im Hauptteil noch näher eingegangen wird, haben das Gesamtziel des Vorhabens jedoch nicht geändert.

- Ermittlung der Kenschalldruckpegelminderungen, die verschiedene Folienmaterialien verursachen.
- Überprüfung resistenter Dichtungsmaterialien für gasdichte Anbringung der Folienmaterialien.

b) Optimierung der Regelkreise im Prüfstand

Optimierung der Regelkreise mit bzw. ohne Folienmaterial im Prüfstand.

Es soll überprüft werden, ob der Einsatz der Folienmaterialien Veränderungen im Regelverhalten verursacht. Ist dies der Fall, sollen geeignete Variationen der Regelparameter ermittelt werden.

c) Aufbau des ANC-Systems bei der Fa. Wendt

Hierbei wird das komplette ANC-System in Laborräumen der Fa. Wendt aufgebaut.

d) Überprüfung des ANC-Systems bei Wendt

Die Überprüfung erfolgt ohne Strömung mit Hilfe von Lautsprechern, die durch die realen Signale der Vakuumpumpenanlage (Bandaufnahme) angeregt werden.

e) Einbau des Systems in die Anlage der Fa. Schoeller

Das ANC-System wird in die Anlage der Fa. Schoeller in Weißenborn eingebaut.

f) Test und Optimierung unter realen Einbaubedingungen

Wenn das ANC-System nicht zufriedenstellend funktioniert, sollen erforderlichenfalls Optimierungen vorgenommen werden.

Durch Langzeitmessungen an den Teilkomponenten soll überprüft werden, ob die Einfügedämpfung des aktiven Systems zeitstabil ist. Außerdem soll durch den Dauerbetrieb ermittelt werden, welche Komponenten zum Ausfall neigen und an welchen Systemparametern ggf. aktueller Wartungsbedarf abzulesen ist.

Da die behördlichen Anforderungen an die Schallemissionen des Abluftkamins kurzfristig erfüllt werden mussten, wurde der Abluftkamin mit einem Kulissenschalldämpfer ausgestattet.

Nach Möglichkeit soll der Aktiv-Schalldämpfer unterhalb des Kulissenschalldämpfers eingebaut werden. Der konventionelle Kulissenschalldämpfer kann durch Ziehen der Absorberkulissen außer Funktion gesetzt werden.

Da die Abluft sehr feucht ist, muss der Aktiv-Schalldämpfer durch eine feuchte-resistente Abdeckung vom Gasstrom getrennt werden. Aufgrund der übrigen „neutralen“ Eigenschaften des Fluids soll zusätzlich überprüft werden, ob die verwendeten Systemkomponenten ohne die Schutzabdeckung ebenfalls eingesetzt werden können.

Zudem soll das Augenmerk auf nutzerfreundliche Instandhaltung gelegt werden, die nach Möglichkeit so vereinfacht werden soll, dass sie ohne Spezialkenntnisse auch vom Anwender durchgeführt werden kann.

Hauptteil

1. Auswahl geeigneter Materialien, zum Schutz der ANC-Bauteile gegen Beschädigung durch feuchte und aggressive Strömungsmedien

Die durchgeführten Untersuchungen am Laborprüfstand waren Aufgabenstellung einer Diplomarbeit [Köc04] und wurden in dem Kurzbericht zum Projektfortschritt zu diesem Vorhaben bereits kurz beschrieben [HT04].

Neben dem alternativen Einsatz von industrietauglichen, resistenten Lautsprechertypen (Abb. 1.1) für den Außenbereich (Musikhörnern) stand vor allem die Untersuchung verschiedener Folienabdeckungen zum Schutz der Mikrofone und Kompensationslautsprecher im Vordergrund. Als Folienmaterialien wurden ausgewählt (Abb. 1.2):

- Kompensatorgewebe
(NPG-Folie: beidseitig mit Gummi beschichtetes Polyamidgewebe)
- Kaptonfolie
(beidseitig mit Teflon beschichtete Polyimidfolie)
- Edelstahlfolie



Abb. 1.1: Links: Konuslautsprecher; Mitte: Musikhorn; Rechts: Musikhorn mit Verlängerung [Köc04]



Abb. 1.2: Verschiedene Folienabdeckungen am Konuslautsprecher; links: NPG-Folie; Mitte: Kapton-Folie; Rechts: Edelstahlfolie [Köc04]

Für die Messungen wurden ein Test-Lautsprechergehäuse für einen Konustreiber sowie Testschalen zur Überprüfung der Foliendichtigkeit angefertigt. Es wurden die Kennschalldruckpegelminderungen sowie der Einfluss verschiedener Folienmaterialien auf das Regelverhalten der ANC-Systeme untersucht. Hinsichtlich der Kennschalldruckpegelminderungen und des Einflusses auf das Regelverhalten der ANC-Systeme schneidet die Kaptonfolie am besten ab. Die Edelstahlfolie verursacht ab ca. 200 Hz, das Kompensatorengewebe ab ca. 250 Hz Pegelverluste, während sich die Kaptonfolie im interessierenden Frequenzbereich nahezu „neutral“ verhält. Die untersuchten Folienmaterialien wirken sich auf die mit dem ANC-System erreichbaren Pegelminderungen vor allem bei monofrequentem Störschall nachteilig aus. Die Wirksamkeit ist aber immer noch zufriedenstellend. Es wurde festgestellt, dass sowohl die Edelstahlfolie als auch das Kompensatorengewebe ein störendes „Eigenleben“ ausführen, weshalb das Kompensatorgewebe nur bedingt einsetzbar ist und die Edelstahlfolie als für die Anwendung ungeeignet ausscheidet.

Ein Test mit industrietauglichen und für den Außenbereich geeigneten Musikhörnern der Fa. DNH GmbH (Lautsprecherhersteller für den industriellen Bedarf) auf ihre Eignung für den Einsatz als Kompensationslautsprecher hat ergeben, dass diese Lautsprecher nur in Frequenzbereichen > 200 Hz einsatzfähig sind. Darüber hinaus besitzen die Gehäuse eine schlechte Schalldämmung und müssten bei Verwendung gegen besser dämmende Gehäuse ersetzt oder eingehaust werden. Gegenüber dem getesteten Konustreiber zeichnen sich die Musikhörner zwar durch einen höheren Kennschalldruckpegel aus, da jedoch auch Frequenzanteile unterhalb 200 Hz kompensiert werden sollen, sind die Musikhörner für den geplanten Anwendungsfall ungeeignet.

Die Überprüfung resistenter Dichtungsmaterialien für die gasdichte Anbringung der Folienmaterialien ergab, dass die Abdichtung der Folienmaterialien im Flansch mit handelsüblichen Dichtungen wasserdicht, jedoch nicht dampfdicht ist. Der Einbau in Abgaskanäle setzt jedoch eine sichere Abdichtung des Kompensationslautsprechergehäuseverschlusses voraus. Zur vollflächigen Flanschabdichtung wird daher eine dauerelastische Dichtmasse eingesetzt, die in die Oberflächenstruktur der Flanschbauteile einzudringen vermag und Dampfdichtheit sicherstellt.

2. Optimierung der Regelkreise im Prüfstand

Laboruntersuchungen in einem Klimaschrank haben ergeben, dass die ANC-Mikrofone feuchtempfindlich sind und nicht direkt der feuchten Umgebung ausgesetzt werden dürfen [Köc04]. Da sich die Kaptonfolie bereits als Lautsprecherabdeckung bewährt hatte, wurden auch die ANC-Mikrofone mit einer Folienabdeckung aus diesem Material versehen. Die entworfene industrietaugliche Elektroinstallation der ANC-Mikrofone erzielte bei den Testmessungen im Labor in einem nicht unterteilten Rohr-Prüfstand zufriedenstellende Ergebnisse.

Während des Kompensationsprozesses traten im Regelverhalten bei tonalen Komponenten zwar kleine Instabilitäten auf, die aber keinen Systemausstieg verursachten und auch die Höhe der Pegelminderung nicht beeinflussten.

Die Ergebnisse der Laborversuche hinsichtlich des negativen Einflusses der verwendeten Folienabdeckungen ließen keinen Handlungsbedarf erkennen, die vorhandenen ANC-Controller in Bezug auf deren Regelparameter bzw. Hardwarekomponenten zu variieren oder zu optimieren².

3. Entwicklung und Aufbau des ANC-Schalldämpfer-Prototyps bei der Fa. Wendt

3.1 Ausgangsmessungen zur Ermittlung der Ist-Situation bei der Fa. Schoeller

Im Rahmen eines Vorort-Termins bei der Fa. Schoeller wurden die Grundlagen für die Entwicklung des ANC-Schalldämpfer-Prototyps ermittelt. Nachdem ein Aufmaß des Kamins genommen und die Anlage besichtigt wurde, erfolgten schall- und schwingungstechnische Messungen an der Vakuumpumpenanlage, im Kamin, an der Kaminmündung sowie in der Nachbarschaft an kritischen Immissionsorten.

Wie Abb. 3.1 verdeutlicht, wurde durch den Einbau des konventionellen Kulissenschalldämpfers der A-Schalldruckpegel an der Kaminmündung lediglich um ca. 5 dB(A) gesenkt. Das Potenzial des Kulissenschalldämpfers hätte eigentlich eine Einfügungsdämpfung in der Größenordnung von ca. 20 dB(A) erwarten lassen. Da der Kamin sehr stark sattet wurde vermutet, dass die beiden Kulissen durchfeuchtet sind und daher nur noch unzureichend absorbieren. Diese Vermutung wurde im Rahmen der Montagearbeiten zur Installation des ANC-Schalldämpfer-Prototyps in den Abluftkamin bestätigt.

Die tonalen Komponenten im Frequenzbereich zwischen 200 Hz und 400 Hz waren zum Zeitpunkt der Messungen nach Einbau des Kulissenschalldämpfers subjektiv noch deutlich zu hören.

Messungen mit einem Sondenmikrofon im Kamin ergaben, dass vor dem Schalldämpfer ein A-Schalldruckpegel von ca. 106 dB(A) (linear bewertet 117 dB) herrscht. Das Frequenzspektrum wird im Kamin von mehreren Einzeltönen dominiert, von denen der Einzelton bei 280 Hz am deutlichsten hervortritt. Die höchstfrequent noch störende tonale Komponente liegt bei 421 Hz.

² Unter realen Betriebsbedingungen stellte sich in der experimentellen Test- und Optimierungsphase des ANC-Schalldämpfers im Abluftkamin heraus, dass die unter Laborbedingungen getestete Folienabdeckung für die ANC-Mikrofone nicht ausreichend feuchtedicht ausgeführt war und weiterer Optimierung bedurfte.

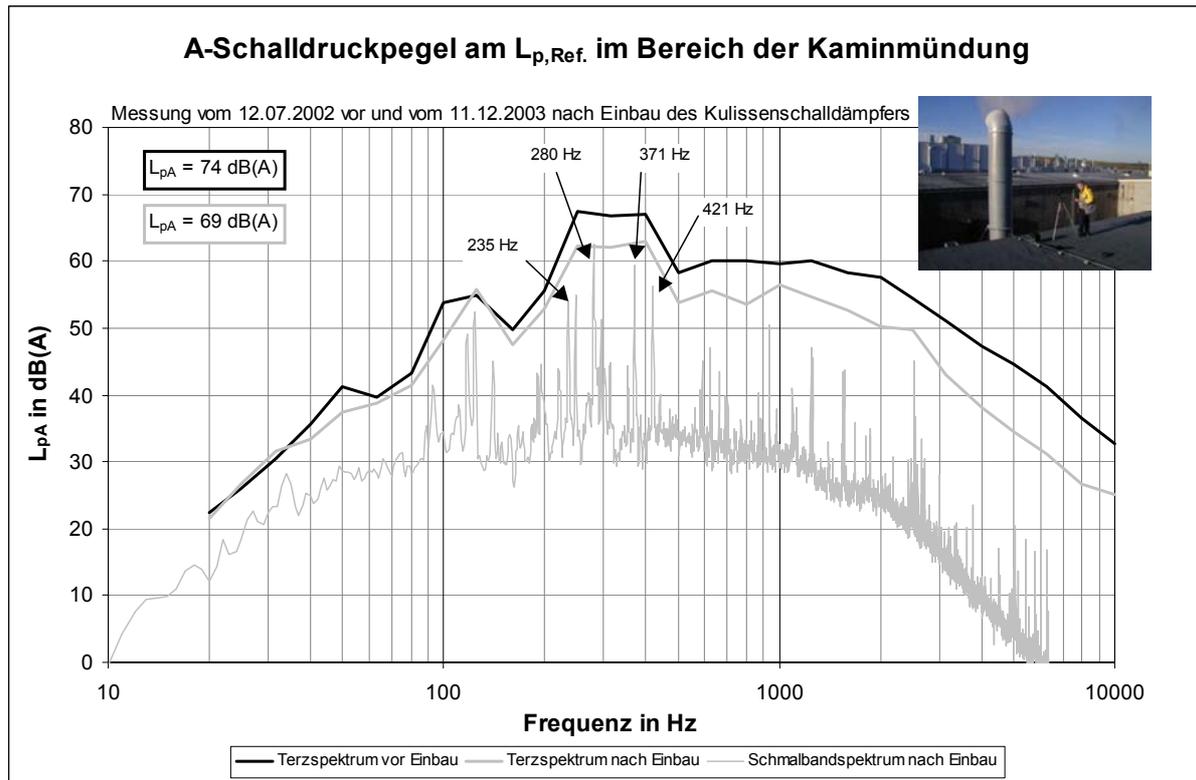


Abb. 3.1: Gemessener A-Schalldruckpegel am Referenzpunkt im Bereich der Kaminmündung vor und nach Einbau des konventionellen Kulissenschalldämpfers (KSD) in den Abluftkamin.

- Messung vom 12.07.2002 (vor Einbau des KSD)
- Messung vom 11.12.2003 (nach Einbau des KSD)

Die Zielvorgabe, die emittierte Schalleistung des Kamins im Gesamtpegel um 10 dB(A) zu senken und dabei die schmalbandigen Frequenzkomponenten, die zu einem Pegelzuschlag für Tonhaltigkeit bei der Beurteilungspegelbildung führen, so weit zu reduzieren, dass kein entsprechender Zuschlag mehr in Ansatz gebracht werden muss, lässt sich mit einem ANC-Schalldämpfer nur durch Kombination eines Aktiv- und eines Passiv-Teils realisieren. Der anzustrebende Wirkfrequenzbereich des Aktivteils soll hierbei zwischen 200 Hz und 400 Hz liegen.

3.2 Untersuchungen zur Ermittlung der Grenzfrequenz f_0 eines vierfach unterteilten Kreisquerschnittes

Da es sich bei dem Abluftkaminquerschnitt um einen kreisförmigen Querschnitt handelt und der ANC-Schalldämpfer möglichst ohne Übergangsstücke in den Kamin integriert werden soll, sollte der ANC-Schalldämpfer mit einem Kreisquerschnitt und einem dem Kamindurchmesser auf Montageniveau entsprechenden Außendurchmesser entwickelt werden.

Für rechteckige und kreisförmige Querschnitte sind die Formeln zur Berechnung der Grenzfrequenzen der jeweiligen Moden bekannt [HSF01]:

Bei rechteckigem Querschnitt berechnen sie sich zu:

$$f_{Gn,m} = \frac{c_f}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{n}{a}\right)^2 + \left(\frac{m}{b}\right)^2} \quad (1)$$

mit

- a: Höhe des Rechteckkanals in m
- b: Breite des Rechteckkanals in m
- n, m: 0, 1, 2, 3, ...

Bei kreisförmigem Querschnitt berechnen sie sich zu:

$$f_{Gn} = k_n \cdot \frac{c_f}{(\pi \cdot d_i)} \quad (2)$$

mit

- k_n : Modalfaktor ($k_1 = 1,84$)
- d_i : Rohrinne Durchmesser in m
- c_f : Schallgeschwindigkeit im Fluid in m/s

Gl. (1) ist direkt auf rechteckige Teilquerschnitte für die Berechnung der Grenzfrequenz f_0 eines unterteilten Rechteckkanals, unterhalb derer eine ebene Welle ausbreitungsfähig ist, übertragbar.

Die Grenzfrequenz f_0 ($= f_{G1}$) des nicht unterteilten Kaminquerschnittes ($\varnothing 1,1$ m) berechnet sich gemäß Gl. (2) zu $f_{G1} \approx 181$ Hz. Diese Frequenz liegt unterhalb des interessierenden Wirkfrequenzbereiches und muss daher durch eine Querschnittunterteilung erhöht werden. Gl. (2) kann für die Berechnung der Grenzfrequenz eines vierfach unterteilten Kreisquerschnittes nicht herangezogen werden. Da in der Literatur keine Abschätzformeln zur Vorausberechnung der Grenzfrequenz eines vierfach unterteilten Kreisquerschnittes bzw. eines vierfach unterteilten Kreisquerschnittes mit Kern gefunden wurden, waren weitere Untersuchungen notwendig.

Zur Ermittlung der Grenzfrequenz f_0 eines vierfach unterteilten Kreisquerschnittes, unterhalb derer eine ebene Welle ausbreitungsfähig ist, wurden Testmessungen durchgeführt. Darüber hinaus wurde der Einfluss eines schallharten Kerns auf die Grenzfrequenz eines vierfach unterteilten Kreisquerschnittes untersucht.

Hierzu wurden Phasendifferenzmessungen durchgeführt. Mit Hilfe zweier phasengepasster Mikrofone wurde das Schallfeld entlang einer Querschnittsdiagonalen abgetastet. Da sich das ebene Wellenfeld dadurch auszeichnet, dass der Schalldruck im Querschnitt phasengleich ist, kann die Grenzfrequenz aus dem Phasenfrequenzgang beider Mikrofone ermittelt werden. Die Mode 1. Ordnung ist dadurch gekennzeichnet, dass sich eine Knotenlinie im Querschnitt ausbildet, die Bereiche gleicher Phase voneinander trennt und deren Überschreiten an einem deutlichen Phasensprung erkennbar ist. Die Grenzfrequenz f_0 ist erreicht, wenn dieser Fall eintritt.

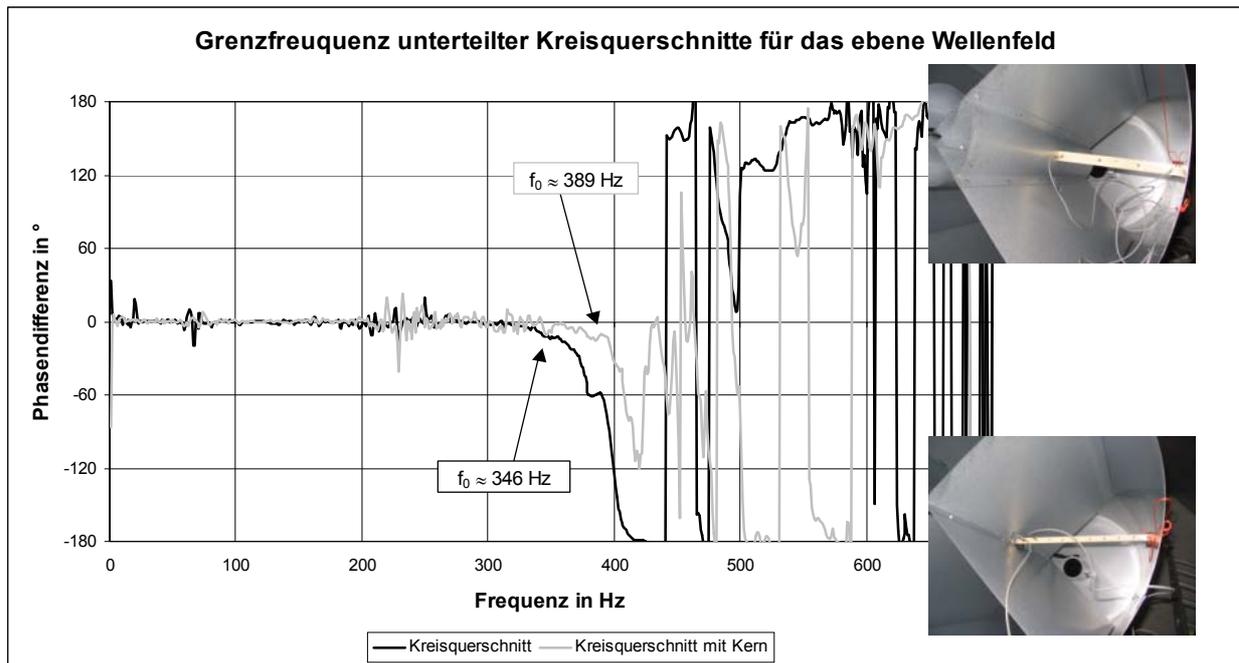


Abb. 3.2: Phasendifferenzmessungen zur empirischen Ermittlung der Grenzfrequenz eines vierfach unterteilten Kreisquerschnittes.

- vierfach unterteilter Kreisquerschnitt: Rohrrinnendurchmesser: \varnothing 1,0 m
- vierfach unterteilter Kreisquerschnitt mit schallhartem Kern:
Rohrrinnendurchmesser: \varnothing 1,0 m, Kerndurchmesser: \varnothing 0,22 m

Abb. 3.2 zeigt Phasendifferenzmessungen eines vierfach unterteilten Kreisquerschnittes bzw. eines vierfach unterteilten Kreisquerschnittes mit schallhartem Kern. Die Grenzfrequenzen der jeweils untersuchten Aufbauten sind in das Diagramm eingetragen. Man erkennt, dass durch einen schallharten Kern die Grenzfrequenz erwartungsgemäß erhöht werden kann.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass ein Teilquerschnitt (Kreissegment) eines vierfach unterteilten Kreisquerschnittes bezüglich seiner Grenzfrequenz f_0 wie ein Rechteckquerschnitt behandelt werden kann (vgl. Abb. 3.3 a)):

$$f_0 \approx \frac{c_f}{2a} = \frac{c_f}{d_i} \quad (3)$$

mit

- a: Höhe = Breite des Rechteckkanals = Radius des Kreisquerschnitts in m
- d_i : Rohrrinnendurchmesser in m
- c_f : Schallgeschwindigkeit im Fluid in m/s

Die Grenzfrequenz eines vierfach unterteilten Kreisquerschnitts mit schallhartem Kern wurde empirisch ermittelt und kann wie folgt abgeschätzt werden (vgl. Abb. 3.3 b)):

$$f_0 \approx \frac{c_f}{2(d_i - d_{K,a})} + \frac{c_f}{2d_i} \quad (4)$$

mit

- $d_{K,a}$: Kernaussendurchmesser in m
- d_i : Rohrinne Durchmesser in m
- c_f : Schallgeschwindigkeit im Fluid in m/s

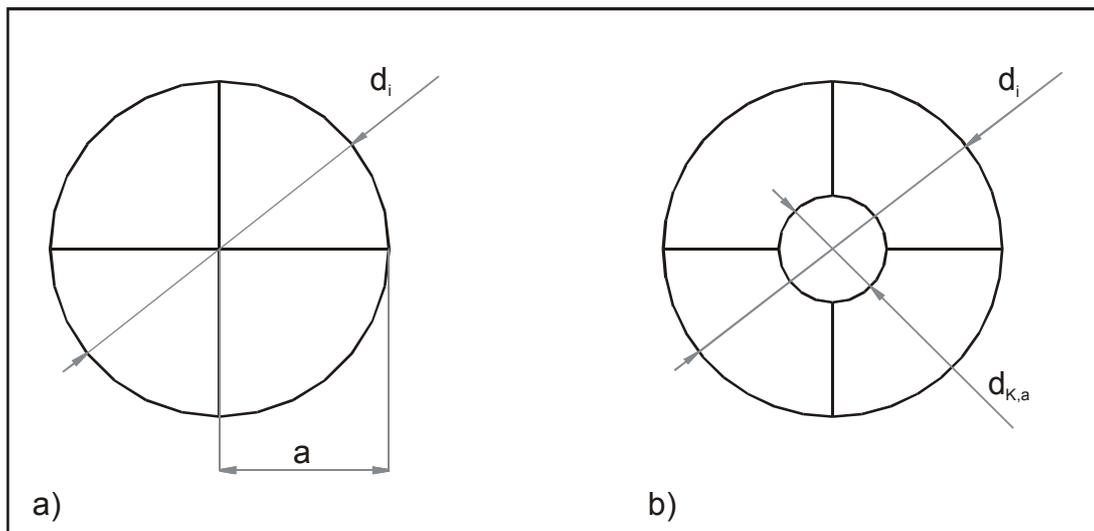


Abb. 3.3: Vierfach unterteilte Kreisquerschnitte:
a) vierfach unterteilter Kreisquerschnitt
b) vierfach unterteilter Kreisquerschnitt mit schallhartem Kern

3.3 Konstruktion des ANC-Schalldämpfer-Prototyps

Im Rahmen des Vorhabens: „Aktive Lärminderung durch Gegenschall, Az 12329“ wurde eine methodische Vorgehensweise für die Auslegung und den Einbau eines Aktiv-Schalldämpfers erarbeitet [SSKST00], die als Grundlage für die Dimensionierung des ANC-Schalldämpfer-Prototyps herangezogen wurde.

Der aktive Wirkungsbereich wurde mit 200 Hz bis ca. 400 Hz vorgegeben. Die Grenzfrequenz f_0 des Schalldämpfers sollte eine Kompensation der 371 Hz-Komponente (siehe Abb. 3.1) noch gestatten.

Bezüglich der Querschnittsform wurde sich für einen vierfach unterteilten Kreisquerschnitt mit schallhartem Kern entschieden. Die Abmessungen wurden unter den vorgegebenen Randbedingungen so gewählt, dass gemäß Gl (4) eine Grenzfrequenz von $f_0 \approx 381$ Hz erreicht wird.

Abb. 3.4 zeigt eine Konstruktionsskizze des ANC-Schalldämpfer-Prototyps.

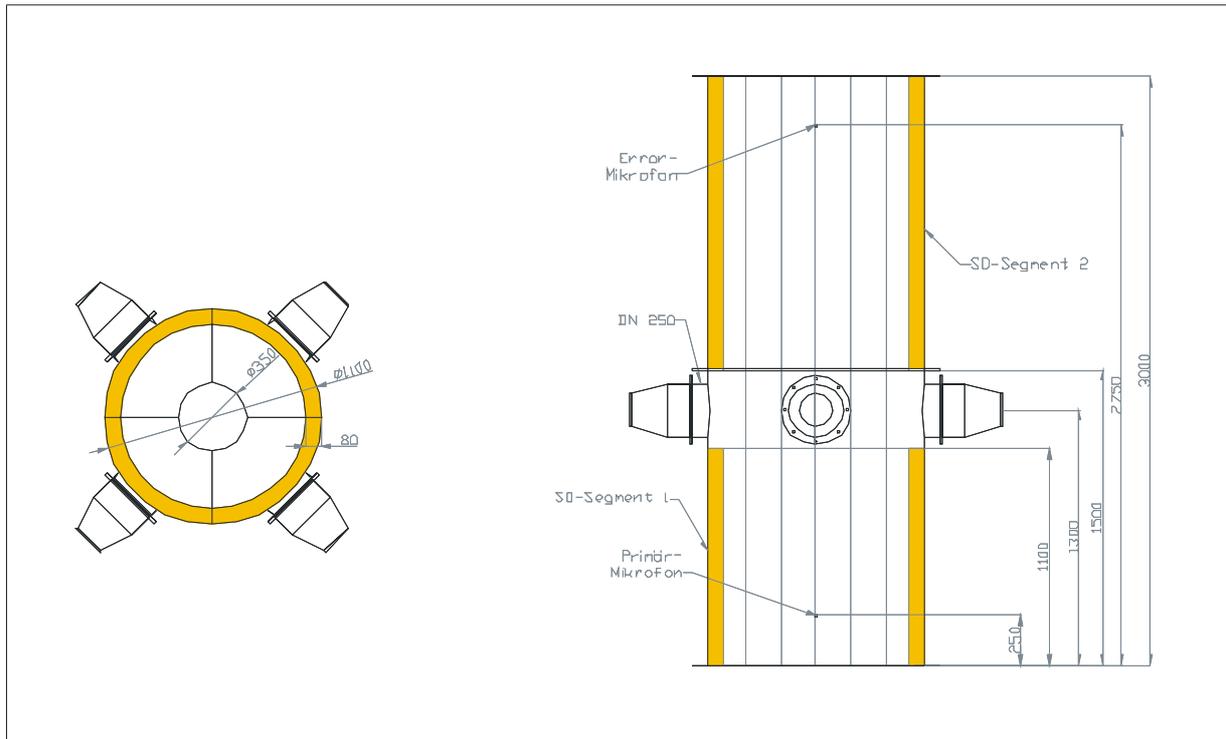


Abb. 3.4: Konstruktionsskizze des ANC-Schalldämpfer-Prototyps

Von einer Wiedergabe der detaillierten Konstruktionszeichnungen des ANC-Schalldämpfers an dieser Stelle wurde aus Gründen der Vertraulichkeit abgesehen.

Um die Zielvorgabe, die emittierte Schalleistung des Kamins im Gesamtpegel um 10 dB(A) zu senken, erreichen zu können, wurde der Passivteil auf ein Einfügedämmmaß D_e von ca. 10 dB(A) ausgelegt. Der Aktivteil sollte zusätzlich gezielt die tonalen Komponenten zwischen 200 Hz und 400 Hz dämpfen.

Der Passivteil des ANC-Schalldämpfers ist wie in Abb. 3.4 angedeutet, mit einer praxisüblichen 80 mm Randkulisse ausgeführt und schützt u.a. die ANC-Mikrofone vor dem strömenden Medium. Zum Feuchteschutz ist das Absorptionsmaterial mit einer Folie abgedeckt. An der Kaminwand herablaufendes Kondensat wird über Sammelrinnen erfasst und abgeleitet.

Da die ANC-Mikrofone von der passiven Auskleidung geschützt und durch eine Folienabdeckung auf dem Absorbermaterial unter realen Betriebsbedingungen vom feuchten Abluftstrom getrennt sein würden, wurde auf eine zusätzliche Folienabdeckung der ANC-Mikrofone zunächst verzichtet.³

³ Unter realen Betriebsbedingungen im Abluftkamin stellte sich später heraus, dass das Absorbermaterial trotz sorgfältiger Abdeckung mit einer PE-Folie durchnässt wurde. Hierdurch traten Kondensationsprobleme an den ANC-Mikrofonen auf. Die Feuchteproblematik konnte am Technikumprüfstand nicht simuliert werden und konnte daher erst unter realen Betriebsbedingungen im Abluftkamin untersucht werden.

An jedes der vier Teilsegmente ist ein Kompensationslautsprecher (Konustreiber in geschlossenem Lautsprechergehäuse) angeflanscht. Die Lautsprechergehäuse bestehen aus DIN-Rohr-Normteilen, die eine hohe Gehäusedämmung gewährleisten und wurden im Rahmen einer Diplomarbeit für diesen Anwendungsfall entwickelt und getestet [Köc04].

ANC-Mikrofone und Kompensationslautsprecher wurden über eine industrietaugliche Elektroinstallation mit den ANC-Controllern bzw. Verstärkern verbunden. Alle im Freien liegenden Teile wurden IP65 (staub- und strahlwasserdicht) ausgeführt. Die Regelelektronik wurde industrietauglich in einem belüfteten Schaltschrank untergebracht.

Der Aufbau des ANC-Schalldämpfers hat insg. 12 Wochen länger gedauert als geplant. Die Verzögerungen sind vor allem durch Lieferprobleme bei fremdgefertigten Teilen entstanden.

4. Überprüfung des ANC-Systems im Wendt / IBS-Technikum mit realen Signalen der Vakuumpumpenanlage (Lautsprecherbeschallung)

Zur Überprüfung und Test des ANC-Schalldämpfer-Prototyps wurde dieser im gemeinsamen Technikum der Firmen Wendt und IBS aufgebaut. Über ein Übergangsstück wurde der Prototyp an einen bereits vorhandenen Rechteckkanal (Abmessungen: 1,5 m x 1,5 m) horizontal angeflanscht. Abb. 4.1 zeigt den ANC-Schalldämpfer-Prototyp im Technikumsprüfstand.

Mit Hilfe einer Lautsprecherwand wurde das im Rahmen der Ausgangsmessungen digital aufgezeichnete Originalgeräusch (im Kamin der Vakuumpumpenanlage aufgenommen) in den Kanal eingespeist.

Hinsichtlich der Höhe des erzeugten Pegels mussten bei den Technikumsversuchen Kompromisse eingegangen werden, da die Leistungsfähigkeit der zur Verfügung stehenden Lautsprecherwand begrenzt war. So war es z. B. nicht möglich, den Schallleistungspegel von sieben großen Vakuumpumpen, die alle gleichzeitig betrieben wurden, zu simulieren. In Abb. 4.2 sind die im Abluftkamin bei realem Geräusch gemessenen und im Technikumsprüfstand mittels Lautsprecherbeschallung erzeugten A-bew. Schalldruckpegel jeweils vor Schalldämpfer gegenübergestellt.



Abb. 4.1: ANC-Schalldämpfer-Prototyp im Technikumsprüfstand

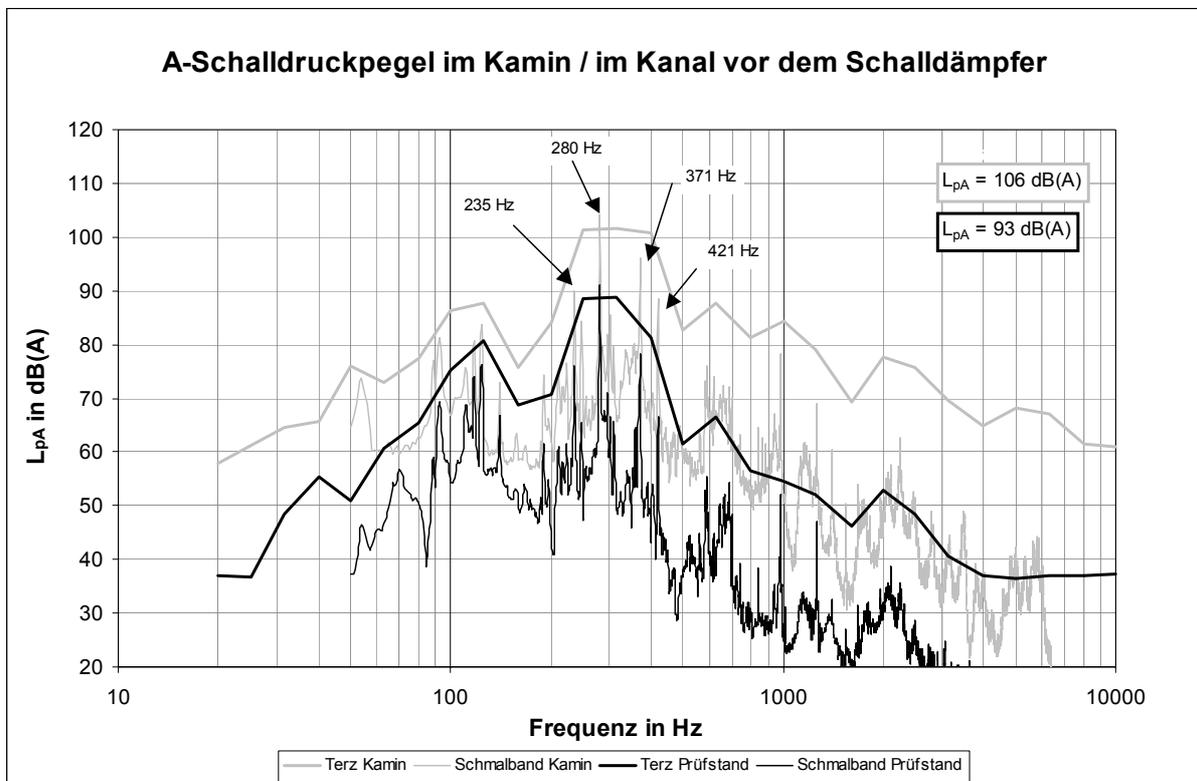


Abb. 4.2: Gegenüberstellung des im Abluftkamin bei realem Geräusch gemessenen und im Technikumsprüfstand mittels Lautsprecherbeschallung erzeugten A-bew. Schalldruckpegel (jeweils vor dem Schalldämpfer gemessen)

Während im Abluftkamin ein A-bew. Schalldruckpegel von $L_{pA} = 106 \text{ dB(A)}$ (Schallleistungspegel $L_{WA} \approx 104 \text{ dB(A)}$) gemessen wurde, konnten im Technikumsprüfstand max. $L_{pA} = 93 \text{ dB(A)}$ (Schallleistungspegel $L_{WA} \approx 92 \text{ dB(A)}$) erzeugt werden. Da die Leistungsreserve des Aktivteils, bezogen auf die reale Situation, jedoch noch ca. 1 bis 3 dB beträgt und der Frequenzgang des realen Geräusches im Technikumskanal gut nachgebildet werden konnte, wurde davon ausgegangen, dass die im Technikumsprüfstand gewonnenen Ergebnisse auf den realen Betrieb übertragbar sind.

Um das Potenzial des ANC-Schalldämpfer-Prototyps zu beurteilen, wurde der Schallleistungspegel vor bzw. nach Schalldämpfer im Technikumsprüfstand ermittelt.

Hierbei wurden folgende Schallleistungspegelmessungen durchgeführt:

- L_{WA} vor ANC-Schalldämpfer
- L_{WA} nach ANC-Schalldämpfer, nur Passivteil wirksam (ANC Off).
- L_{WA} nach ANC-Schalldämpfer, Passiv- und Aktivteil wirksam (ANC ON)

In Abb. 4.3 sind die Ergebnisse der A-bew. Schallleistungspegel und die Terzspektren dieser Messungen dargestellt.

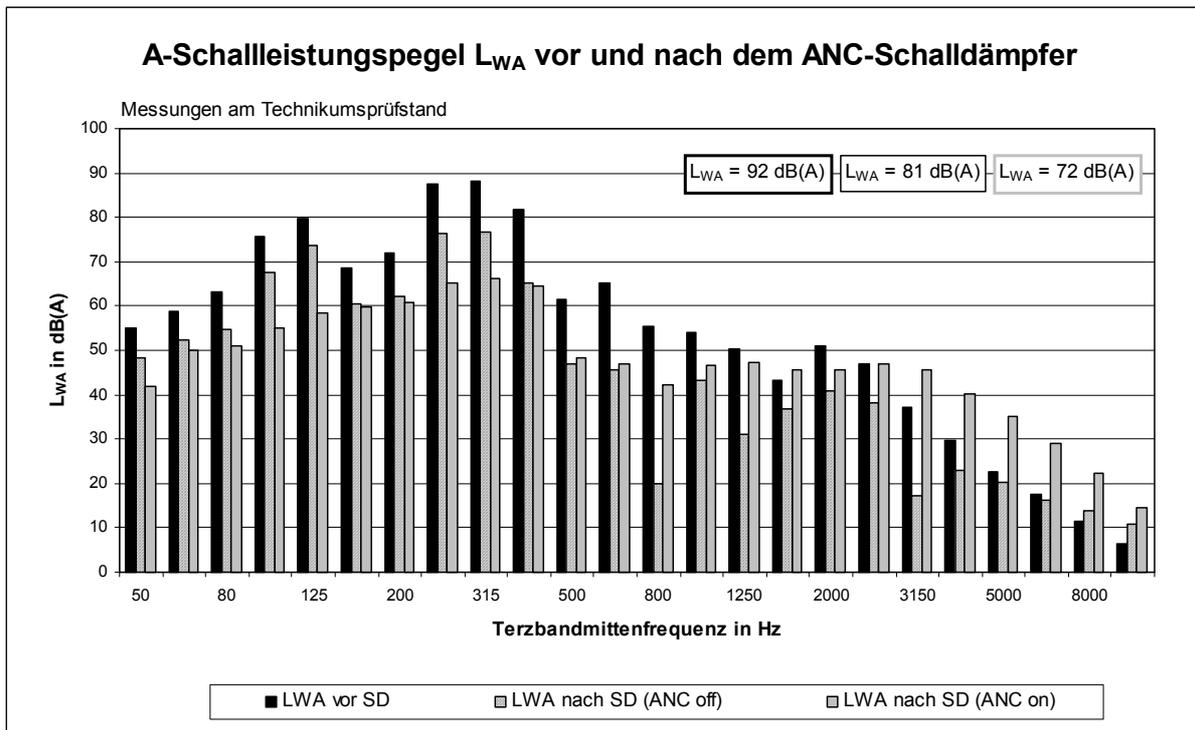


Abb. 4.3: A-bew. Schallleistungspegel L_{WA} vor Eintritt und hinter dem ANC-Schalldämpfer-Prototyp mit und ohne aktivierte ANC. Als zu kompensierendes Geräusch wurde das im Kamin der Vakuumpumpenanlage aufgezeichnete Originalgeräusch in den Kanal über eine Lautsprecherwand eingespeist (ohne Strömung).

Bezogen auf das Originalgeräusch erreichte der ANC-Schalldämpfer-Prototyp im Technikum eine Pegelminderung von insgesamt 20 dB(A). Auf den Passivteil des

Schalldämpfers entfallen dabei ca. 10 dB(A), auf den Aktivteil noch einmal ca. 10 dB(A).

Ohne aktivierten Aktivteil waren die tonalen Komponenten subjektiv noch deutlich wahrnehmbar. Nach Zuschalten des Aktivteils waren subjektiv keine tonalen Komponenten mehr wahrnehmbar. Vorhandensein von Strömung hatte keinen Einfluss auf die Stabilität der aktiven Regelung.

Die Zielvorgabe, die emittierte Schalleistung des Abluftkamins im Gesamtpegel um 10 dB(A) zu senken und dabei die tonalen Frequenzkomponenten so weit zu reduzieren, dass kein Zuschlag für Tonhaltigkeit mehr in Ansatz gebracht werden muss, schien nach diesen Ergebnissen mit dem entwickelten ANC-Schalldämpfer-Prototyp als sicher erreichbar.

Die ursprünglich für einen 8-wöchigen Zeitraum geplante experimentelle Überprüfung des ANC-Schalldämpfers mit realen Signalen im Technikumsprüfstand konnte auf 4 Wochen verkürzt werden.

5. Montage des ANC-Schalldämpfer-Prototyps in den Abluftkamin der Vakuumpumpenanlage der Fa. Schoeller im Werk Weißenborn

Der ANC-Schalldämpfer-Prototyp wurde während eines Stillstandes der Papiermaschine am 05.08.2004 in den Abluftkamin der Vakuumpumpenanlage montiert⁴. Aus genehmigungstechnischen Gründen sollte der alte Kulissenschalldämpfer im Kamin verbleiben und der ANC-Schalldämpfer-Prototyp als zusätzlicher Schalldämpfer unterhalb des alten Kulissenschalldämpfers eingebaut werden.

Der Schaltschrank für die ANC-Elektronik wurde entgegen der ursprünglichen Planung auf Wunsch des Anlagenbetreibers direkt im Vakuumpumpenhaus montiert. Da an diesem Schaltschrankstandort vor allem im Sommer Temperaturen $> 40\text{ °C}$ erreicht werden, musste der Schaltschrank nachträglich noch klimatisiert werden um eine ausreichende Wärmeabfuhr sicherzustellen. Hierzu wurde ein entsprechendes Klimagerät in den Schaltschrank integriert (s. Abb. 5.1).

⁴ Die eingetretenen Verzögerungen auf Grund von Lieferproblemen und die Rücksichtnahme auf ein geeignetes Montage-Zeitfenster machten eine Verlängerung der Projektlaufzeit von 12 auf zunächst 14 Monate notwendig.



Abb. 5.1: Schaltschrank mit nachgerüstetem Klimagerät (Türen offen und geschlossen)

Im Rahmen der Montagearbeiten wurde bei der Demontage des Kamins festgestellt, dass der Kamin stark verschmutzt ist (s. Abb. 5.2). Die Kulissen des vorhanden alten Kulissenschalldämpfers waren völlig durchfeuchtet und zugesetzt. Die Kulissen waren hier ohne Feuchteschutz dem feuchten und stark schmutzbelasteten Abgasstrom ausgesetzt. Es ist davon auszugehen, dass die Kulissenfüllung von Papierschlamm durchsetzt und verklumpt ist. Der alte Kulissenschalldämpfer hat daher stark an Wirksamkeit verloren.



Abb. 5.2:
Kamin- und Kulissenschalldämpferverschmutzung durch die Vakuumpumpenanlage

Abb. 5.3 zeigt den Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp nach Abschluss der Montagearbeiten im Abluftkamin der Vakuumpumpenanlage.

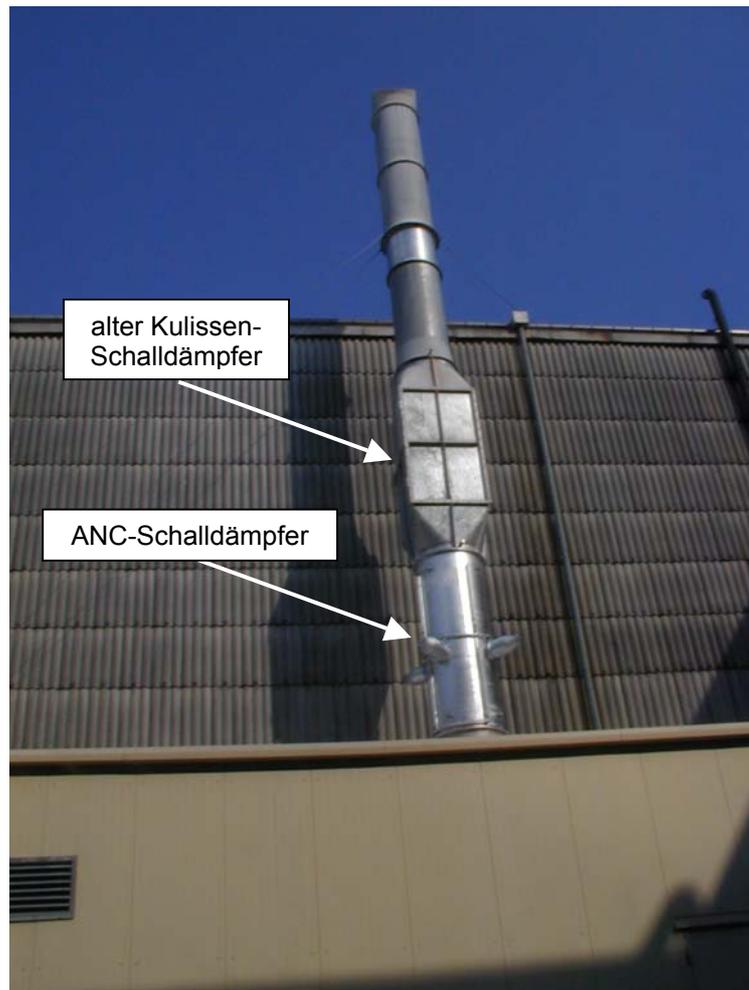


Abb. 5.3: Aktiv-Schalldämpfer-Prototyp im Abluftkamin der Vakuumpumpenanlage der Felix Schoeller junior Foto- und Spezialpapiere GmbH & Co. KG, Werk Weißenborn

6. Test und Optimierung des ANC-Schalldämpfer-Prototyps unter realen Einbau- und Betriebsbedingungen im Abluftkamin der Vakuumpumpenanlage der Fa. Schoeller

6.1 Inbetriebnahme des Aktivteils des ANC-Schalldämpfer-Prototyps

Auch ohne zugeschaltete ANC waren an der Kaminmündung bereits keine tonalen Komponenten mehr hörbar. Der Passivteil des ANC-Schalldämpfers dämpfte die tonalen Komponenten bereits soweit, dass sie an der Kaminmündung nicht mehr hervortraten. Die Zielvorgabe ist somit prinzipiell auch ohne zugeschalteten Aktivteil bereits erreicht. Es muss aber davon ausgegangen werden, dass auf Grund der hohen Schmutzlast des Abgasstromes der Passivteil trotz Folienabdeckung mit der Zeit an Wirksamkeit verlieren wird.

Abb. 6.1 zeigt eine Gegenüberstellung der am Referenzpunkt im Bereich der Kaminmündung gemessenen A-Schalldruckpegel vor Einbau des konventionellen Kulissenschalldämpfers und nach Einbau des ANC-Schalldämpfer-Prototyps.

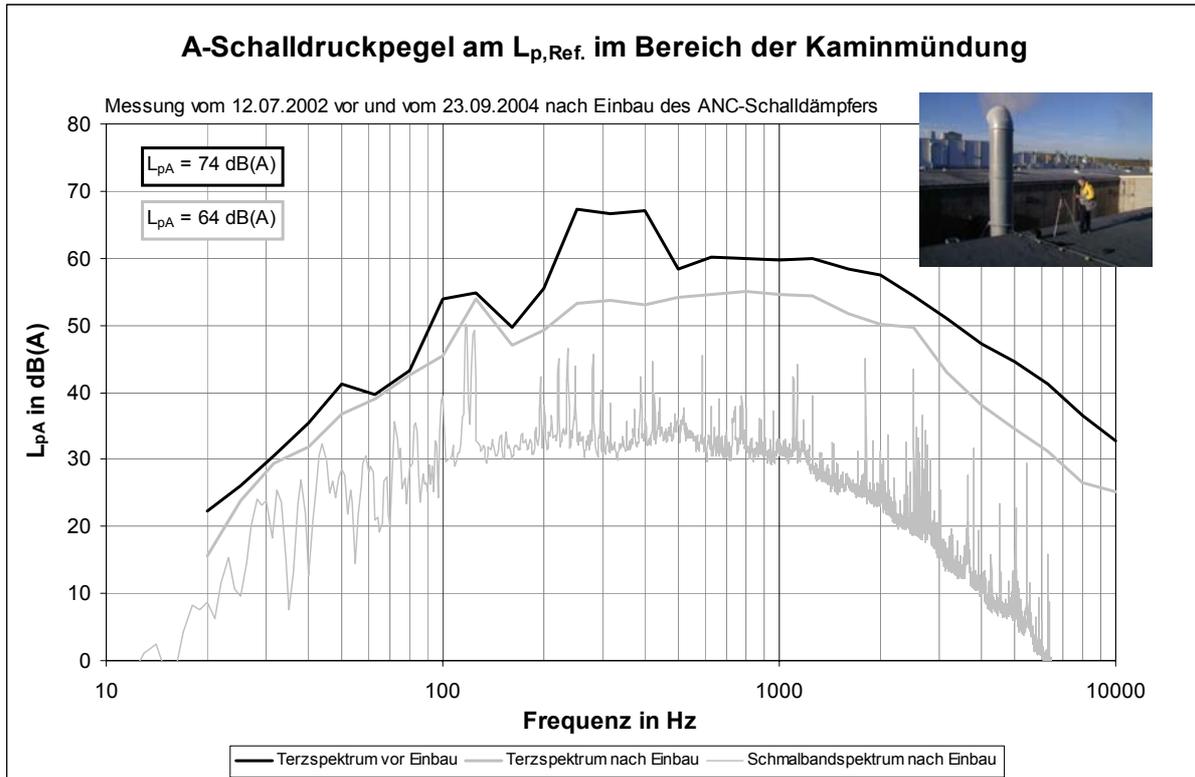


Abb. 6.1: Gemessener A-Schalldruckpegel am Referenzpunkt im Bereich der Kaminmündung vor Einbau des konventionellen Kulissenschalldämpfers (KSD) und nach Einbau des ANC-Schalldämpfer-Prototyps (ANC-SD) in den Abluftkamin (ANC aus).
- Messung vom 12.07.2002 (vor Einbau des KSD)
- Messung vom 23.09.2004 (nach Einbau des ANC-SD)

Wie bereits erwähnt, konnte der alte Kulissenschalldämpfer aus genehmigungstechnischen Gründen nicht wie ursprünglich geplant durch Ziehen der Kulissen ausser Funktion gesetzt werden. Eine direkte Gegenüberstellung der Einfügungsdämpfungen beider Schalldämpfer war daher nicht möglich. Im Vergleich zu der in Abb. 3.1 dokumentierten Pegelminderung war der alte Kulissenschalldämpfer zum Zeitpunkt der Messungen zu Abb. 6.1 bereits weitere 9 Monate dem feuchten und stark schmutzbelasteten Abluftstrom ausgesetzt. Seinem Verschmutzungszustand zu Folge kann davon ausgegangen werden, dass die erreichte Pegelminderung in Höhe von 10 dB(A) in Abb. 6.1 nahezu vollständig dem Passivteil des ANC-Schalldämpfer-Prototyp zugerechnet werden kann.

Der Aktivteil des Schalldämpfers wurde noch im Rahmen der Montagearbeiten während des Maschinenstillstandes initialisiert. Nachdem die Papiermaschine dann wieder in Betrieb war, wurde ein erster Inbetriebnahmeversuch für den Aktivteil des Schalldämpfers durchgeführt.

Trotz sorgfältiger Abdichtung des Absorbermaterials mit PE-Folie sind die ANC-Mikrofone nach ca. 1 Woche Betriebszeit in der Vakuumpumpenanlage feuchtigkeitsbedingt ausgefallen, bzw. lieferten verfälschte Signale. Ohne Schutzabdeckung können die verwendeten ANC-Bauteilkomponenten nicht eingesetzt werden. Durch die Kondensationsprobleme bedingt mussten die Mikrofone ausgebaut und weitere Optimierungsschritte bezüglich eines separaten Schutzes der Mikrofone vor Feuchtigkeit vorgenommen werden.

6.2 Optimierung der ANC-Mikrofone

Die experimentelle Überprüfung des ANC-Schalldämpfers mit realen Signalen der Vakuumpumpenanlage am Technikumsprüfstand (umgebungsfeuchte Luft, ohne Kondensat) war vielversprechend und hat gezeigt, dass der ANC-Schalldämpfer die Zielstellung erreichen kann. Die bei realem Betrieb auftretende Kondensatbildung und die damit im Detail verbundenen Probleme konnten am Technikumsprüfstand allerdings nicht simuliert werden und mussten nun zeit- und kostenintensiv vor Ort in der Papierfabrik untersucht und gelöst werden.

In einem ersten Optimierungsschritt wurden Kunststoffhülsen für die Mikrofone angefertigt, über deren oberen Rand Kaptonfolie straff gespannt wurde. Zur Abdichtung wurde die Kaptonfolie zusätzlich mit Silikon abgedichtet (s. Abb. 6.2).

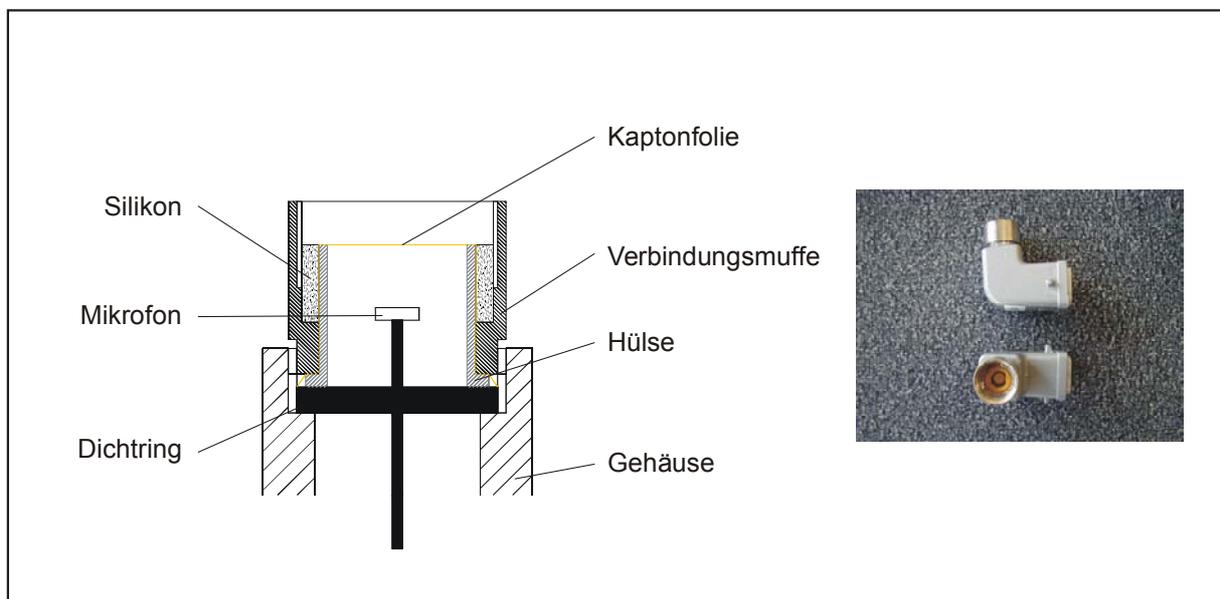


Abb. 6.2: Mikrofonvariante Nr. 1: ANC-Mikrofon mit Folienkapsel-Variante Nr. 1

Mikrofonvariante Nr. 1 erwies sich zwar als feuchtedicht, Testversuche an der Pilotanlage haben jedoch ergeben, dass diese Mikrofonvariante zu große Empfindlichkeitsverluste an den ANC-Mikrofonen verursacht und den Druckausgleich behindert.

Im Zuge der weiteren Optimierung musste daher ein Modifikationsvorschlag erarbeitet werden, der zum Einen feuchte- bzw. wasserdicht, bei dem zum Anderen aber gleichzeitig größere Empfindlichkeitsverluste und Frequenzgangveränderungen im Interessierenden Frequenzbereich 100 Hz – 500 Hz vermieden werden.

Bei einer nächsten Mikrofonvariante (Nr. 2) wurde zum Druckausgleich der Dichtring entfernt (s. Abb. 6.3). Statt dessen wurde der Gehäuseinnenraum mit luftdurchlässigem Akustikschaum ausgekleidet. Diese Variante war zwar feuchtedicht, doch der Empfindlichkeitsverlust mit > 20 dB im Wirkfrequenzbereich (200 Hz bis 400 Hz) stellte sich im Praxisversuch als noch immer zu hoch heraus.

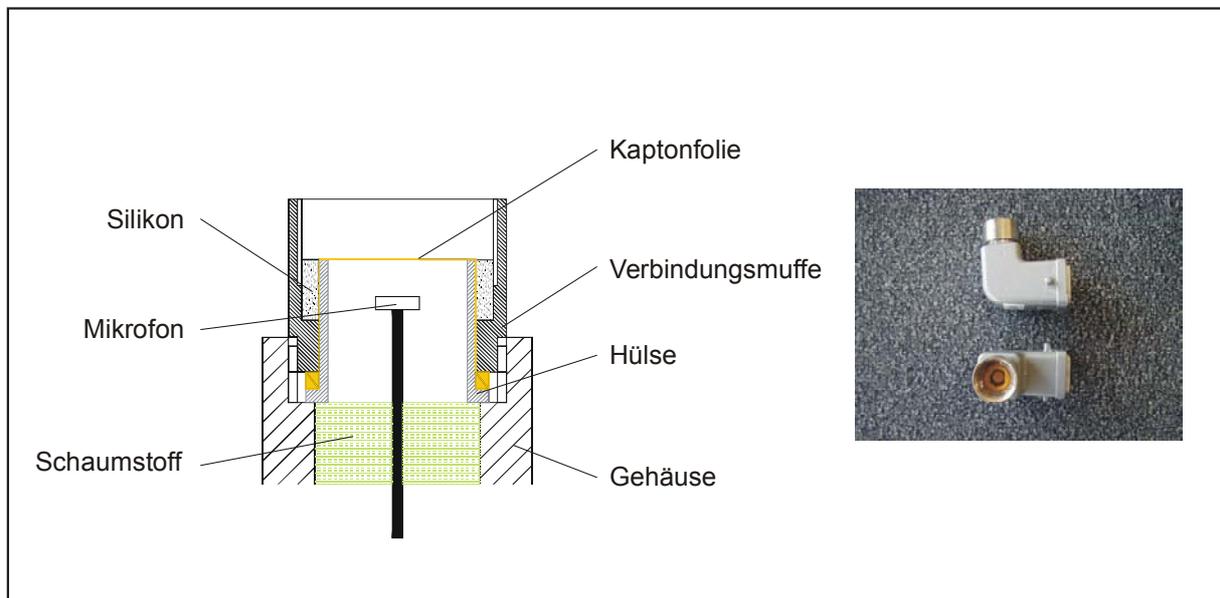


Abb. 6.3: Mikrofonvariante Nr. 2: ANC-Mikrofon mit Folienkapsel-Variante Nr. 2

Da die Mikrofon-Folienkapseln eine zu hohe Schalldämmung verursachen, sollte die Kapsel­fläche geringer Schalldämmung, also die Folienfläche, erhöht werden um dem Empfindlichkeitsverlust entgegen zu wirken. Bei einer weiteren Modifikation (Mikrofonvariante Nr. 3) wurde daher eine "Folienglocke" getestet. Hierdurch kann die Mikro­kapsel weiter vor rücken und ist nur noch von Kaptonfolie umgeben (s. Abb. 6.4).

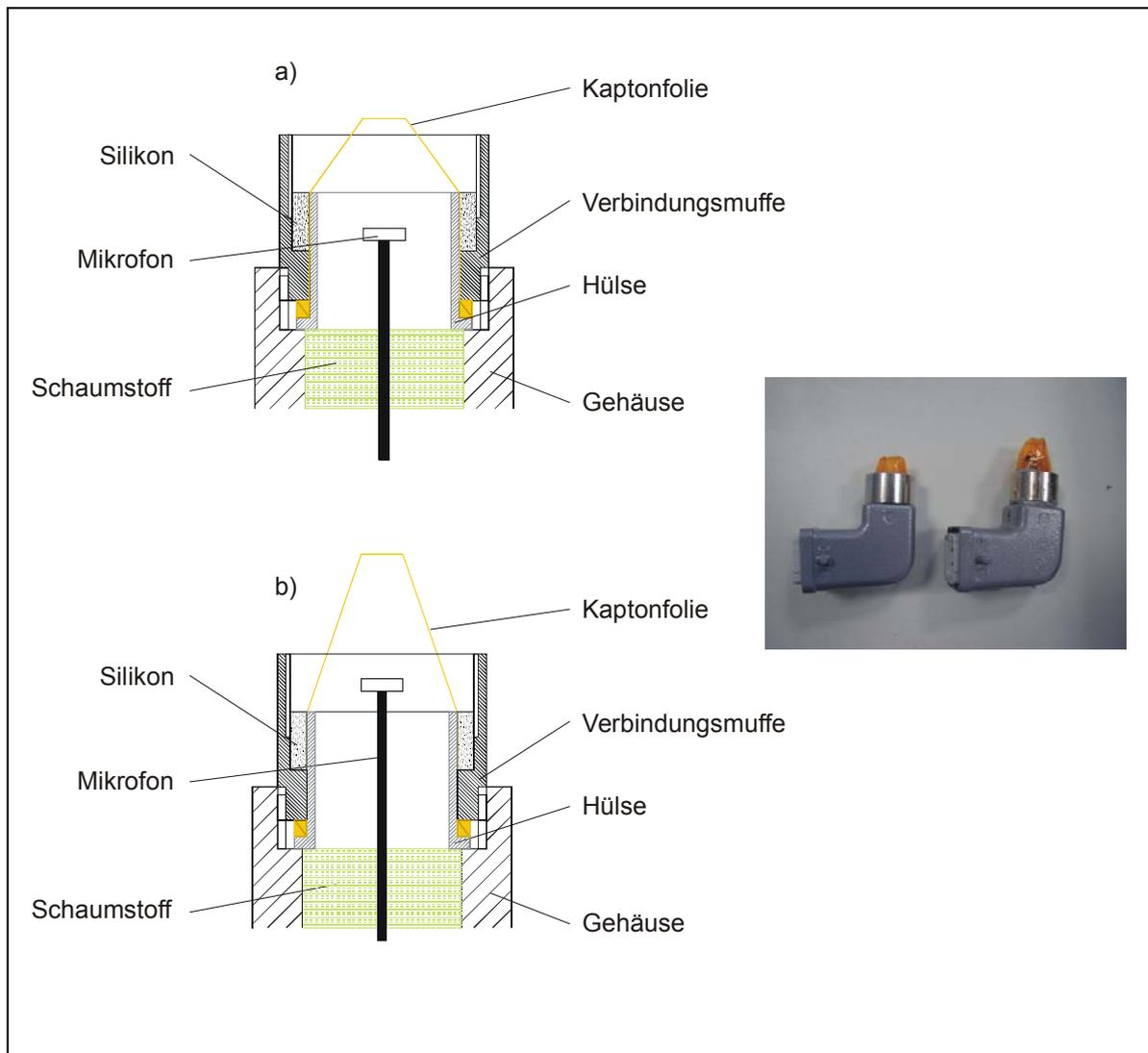


Abb. 6.4: Mikrofonvariante Nr. 3: ANC-Mikrofon mit Folienkapsel-Variante Nr. 3

Zur Untersuchung von Empfindlichkeitsverlust und Frequenzganglinearität wurde eine Messkapsel mit integriertem Lautsprecher angefertigt. Über den Lautsprecher wurde ein Prüfrauschen (weißes Rauschen) in der Kapsel erzeugt. Das ANC-Mikrofon wurde in einer passgenauen Öffnung im Kapseldeckel montiert. Das vom ANC-Mikrofon erfasste Rauschsignal wurde mit Hilfe eines FFT-Analysators schmalbandig ausgewertet.

Abb. 6.5 zeigt den Versuchsaufbau für die Empfindlichkeits- und Frequenzgangmessungen.

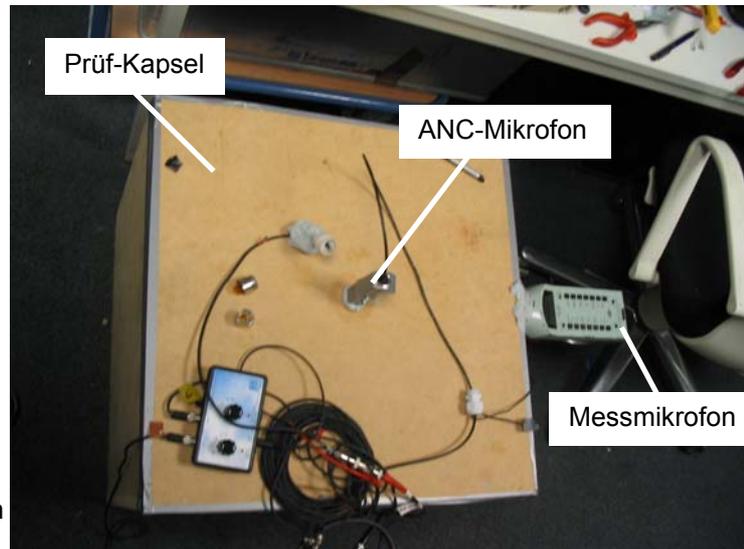


Abb. 6.5: Versuchsaufbau für die Empfindlichkeits- und Frequenzgangmessungen der unterschiedlichen Mikrofonvarianten

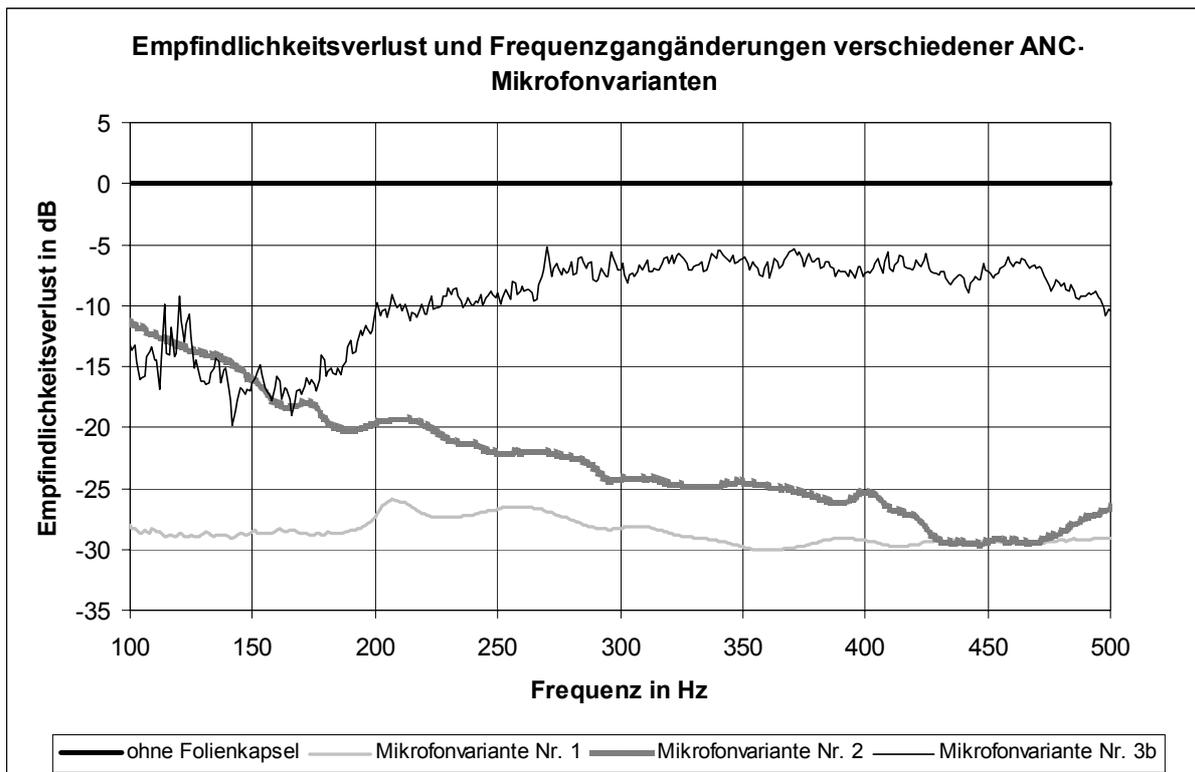


Abb. 6.6: Empfindlichkeitsverlust und Frequenzgangänderungen der verschiedenen ANC-Mikrofonvarianten in Folge der zur Abdichtung notwendigen Folienkapsel

Abb. 6.6 zeigt die Empfindlichkeitsverluste und Frequenzgangänderungen der verschiedenen Mikrofonvarianten in Folge der Folienkapsel im interessierenden Frequenzbereich von 100 Hz bis 500 Hz. Die angegebenen Empfindlichkeitsverluste aller gemessenen Frequenzgänge beziehen sich auf den Frequenzgang eines nicht modifizierten ANC-Mikrofons (ohne Folienkapsel).

Wie Abb. 6.6 zu entnehmen ist, konnten mit der letztendlich realisierten Mikrofonvariante Nr. 3b die Empfindlichkeitsverluste der ANC-Mikrofone im Wirkfrequenzbereich des ANC-Systems auf < 10 dB reduziert werden.

Da im Rahmen des Pilotprojektes vor allem tonale Komponenten aktiv gedämpft werden sollen, die sich aus dem Ausgangsspektrum schmalbandig um bis zu 25 dB hervorheben (vgl. Abb. 3.1), ist ein Empfindlichkeitsverlust bei den ANC-Mikrofonen von ca. 10 dB akzeptabel. Die Optimierung der ANC-Mikrofone konnte damit erfolgreich abgeschlossen werden.

6.3 Abschließende Messungen in der Pilotanlage

Nachdem die modifizierten ANC-Mikrofone (Mikrofonvariante Nr. 3b) in den ANC-Schalldämpfer-Prototyp wieder eingebaut wurden, konnte der Aktivteil erneut in Betrieb genommen werden⁵.

Abb. 6.7 zeigt eine Gegenüberstellung der A-bew. Schalldruckpegel am Referenzpunkt im Bereich der Kaminmündung vor Einbau des alten Kulissenschalldämpfers, nach Einbau des alten Kulissenschalldämpfers, kurz nach dem Einbau des ANC-Schalldämpfer-Prototyps (nur Passivteil wirksam) und bei den abschließenden Messungen mit aktiviertem Aktivteil.

Der ANC-Schalldämpfer-Prototyp war zum Zeitpunkt der Abschlussmessungen knapp vier Monate in der Pilotanlage installiert. Die Wirksamkeit des Passivteils hat sich in dieser Zeit nicht verschlechtert. Verglichen mit der Ausgangssituation vor Einbau des Kulissenschalldämpfers konnte der A-Schalldruckpegel am Referenzpunkt um 10 dB(A) gemindert werden. Tatsächlich fällt die Pegelminderung vermutlich noch deutlich höher aus, kann aber auf Grund der Fremdgeräuschsituation (andere Geräuschquellen als der Kamin dominieren jetzt den Schalldruckpegel am Referenzpunkt) nicht ermittelt werden. Subjektiv konnten keine tonalen Komponenten wahrgenommen werden.

Die Zielsetzungen, die emittierte Schalleistung des Abluftkamins im Gesamtpegel um 10 dB(A) zu senken und dabei die tonalen Frequenzkomponenten so weit zu reduzieren, dass kein Zuschlag für Tonhaltigkeit mehr in Ansatz gebracht werden muss, wurden erreicht.

⁵ Die eingetretenen Probleme und der erhöhte Aufwand für die experimentelle Optimierung des ANC-Schalldämpfer-Prototyps unter realen Einbau- und Betriebsbedingungen im Abluftkamin der Vakuumpumpenanlage der Fa. Schoeller machten eine weitere Verlängerung der Projektlaufzeit auf 15 Monate notwendig.

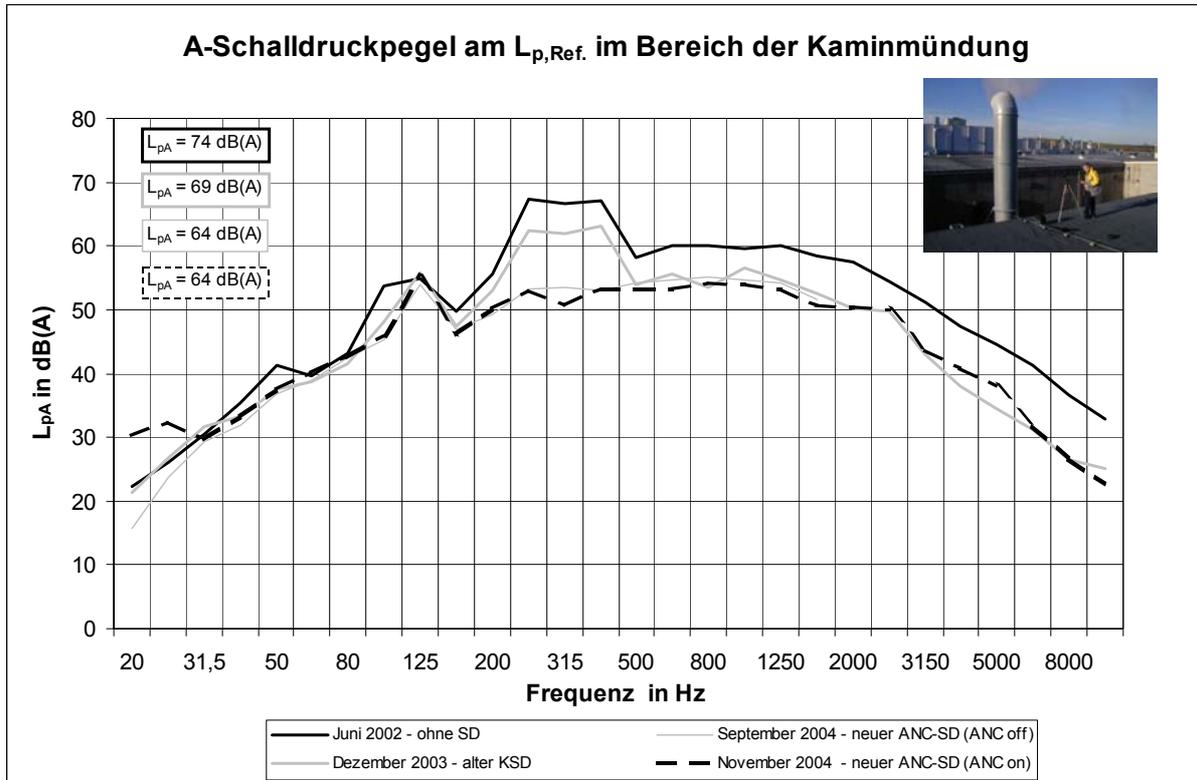


Abb. 6.7: Gemessener A-Schalldruckpegel am Referenzpunkt im Bereich der Kaminmündung vor Einbau des konventionellen Kulissenschalldämpfers (KSD), nach Einbau des KSD, nach Einbau des ANC-Schalldämpfer-Prototyps (ANC-SD) in den Abluftkamin (ANC aus) und bei den abschließenden Messungen nach Optimierung des ANC-SD (ANC an).

- Messung vom 12.07.2002 (vor Einbau des KSD)
- Messung vom 11.12.2003 (nach Einbau des KSD)
- Messung vom 23.09.2004 (nach Einbau des ANC-SD)
- Messung vom 30.11.2004 (nach Einbau des ANC-SD)

Die Pegelminderung wird allerdings vorrangig durch den Passivteil des Schalldämpfers erreicht. Zum Zeitpunkt der Abschlussmessungen trägt der Aktivteil zu keiner nennenswerten Verbesserung bei. Grund hierfür ist, dass der Passivteil des Schalldämpfers entgegen unserer Erwartungen gerade im Wirkfrequenzbereich des Aktivteils von 200 Hz bis 400 Hz trotz der hohen Schmutzfracht des Abluftstroms noch so gut funktioniert, dass hier für den Aktivteil "nicht genügend übrig bleibt". Aber gerade für diesen Frequenzbereich, indem ja auch die störenden tonalen Frequenzen lagen, ist der Aktivteil ausgelegt. Aufgrund der Tatsache, dass im Spektrum des Schalldruckpegels im Frequenzbereich 200 Hz – 400 Hz derzeit keine pegelbestimmenden Komponenten mehr vorhanden sind, versucht der Aktivteil zwar bei der tiefsten, aus dem Spektrum noch herausragenden Frequenz von 125 Hz zu kompensieren, kann aber auf Grund der festgelegten Programmierung (Tauglichkeitsfilterung) die Kompensation nicht durchführen. Dieser Frequenzbereich hatte für das Nachbarschaftsproblem auch nie Relevanz, so dass bei der Planung bzw. Auslegung des Aktivteils dieser Frequenzbereich aus dem Wirkfrequenzbereich herausgenommen bzw. herausgefiltert wurde.

Die Funktionalität des Aktivteiles kann erst dann wirklich getestet werden, wenn die Wirksamkeit des Passivteils auf Grund der Verschmutzung nachlässt.

Die ursprünglich vorgesehenen Untersuchungen zur Langzeitstabilität des Aktivteils sowie das Sammeln von Erfahrungen mit dem Dauerbetrieb, welche Komponenten zum Ausfall neigen und an welchen Systemparametern ggf. aktueller Wartungsbedarf abzulesen ist, können daher aus Zeitgründen nicht mehr im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführt werden.

7. Ökologisch, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse

7.1 Ökologische Bewertung der Vorhabensergebnisse

Auf das umstrittene Gesundheitsgefährdungspotenzial künstlicher Mineralfasern, die im konventionellen Schalldämpferbau eingesetzt werden, wurde bereits ausführlich im Abschlussbericht zum Vorhaben: „Aktive Lärminderung durch Gegenschall, Az 12329“ eingegangen [SSKST00]. Da die Regelungen der Gefahrstoffverordnung [GefStoffV] jedoch greifen und die Mineralfaserindustrie ihre Produkte entsprechend umgestellt hat, bleibt die Verwendung künstlicher Mineralfasern Stand der Technik im Schalldämpferbau.

Prinzipiell kann durch die Erhöhung des Wirkfrequenzbereiches des aktiven Teils eines ANC-Schalldämpfers durch Querschnittunterteilung auf bis zu 500 Hz 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.

Bei dem Pilotprojekt konnten im Vergleich zu dem konventionellen Kulissenschalldämpfer 62,5 Vol% passives Absorptionsmaterial eingespart werden, da der Passivteil des ANC-Schalldämpfer-Prototyps entsprechend dem Wirkfrequenzbereich des Aktivteils (ca. 200 Hz bis 400 Hz) kleiner dimensioniert werden konnte.

Hierdurch reduziert sich auch die Abfallmenge an irgendwann zu entsorgenden porösen Absorptionsmaterialien, die bei anderen Anwendungen 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 Abschlussbericht zum Vorhaben: „Aktive Lärminderung durch Gegenschall, Az 12329“ [SSKST00] wurde gezeigt, dass im Vergleich zu konventionellen Kulissenschalldämpfern der Zusatzenergiebedarf bei einem Aktiv-Schalldämpfer je nach Auslegung um 56 % bis 95 % reduziert werden kann.

Der von dem ANC-Schalldämpfer-Prototyp verursachte statische Druckverlust lag bei dem Pilotprojekt mit ca. 57 Pa in der Größenordnung des Druckverlustes des konventionellen Kulissenschalldämpfers (ca. 60 Pa). Der Kulissenschalldämpfer erreicht diesen günstigen Druckverlust aber nur deshalb, weil der Querschnitt im Bereich des

Kulissenschalldämpfers entsprechend aufgeweitet wurde, worauf beim ANC-Schalldämpfer-Prototyp verzichtet werden konnte (s. Abb. 5.3).

Die Betriebsleistung der Regelelektronik (vier NANCY2000-Controller- und -Verstärkereinheiten) wird mit ca. 320 W abgeschätzt. Energetisch ungünstig wirkt sich bei dem Pilotprojekt die erforderliche Schaltschrank-Klimatisierung aus, die mit ca. 670 W ungefähr doppelt so hoch liegt, wie die Leistung der eigentlichen Regelelektronik. Die Anschlussleistung des Schaltschranks kann daher mit ca. 1 kW angegeben werden. Verglichen mit dem konventionellen Kulissenschalldämpfer fällt damit die Energiebilanz des Pilotprojektes negativ aus.

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

7.2 Technologische Bewertung der Vorhabensergebnisse

Durch die Wirkfrequenzbereichserweiterung durch Querschnittunterteilung wird auch in größeren Kanälen der Einsatz aktiver Minderungstechnologien ermöglicht.

Technologisch bietet der Aktiv-Schalldämpfer in Verbindung mit der Regelelektronik NANCY2000 eine innovative Alternative vor allem zu Resonatorschalldämpfern. Diesen gegenüber weist er sich vor allem durch die Adaptionfähigkeit 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 frequenzumgerichteten, d.h. drehzahlvariablen Ventilatoren, Gebläsen oder, wie im vorliegenden Fall, bei Vakuumpumpen.

Besonders zur Minderung tiefer Frequenzen, die mit konventionellen Maßnahmen nur schwer und aufwendig zu dämpfen sind, bietet sich der aktive Schalldämpfer an [NE92].

Durch die kleineren Schalldämpferabmessungen (keine oder nur geringe Kanalaufweitungen) und die Einsparung an passivem Absorptionsmaterial wird gerade bei tiefen Frequenzen eine z.T. beachtliche Bauraum- und Gewichtsreduzierung erzielt. Im Vergleich zu dem konventionellen Kulissenschalldämpfer konnte bei dem ANC-Schalldämpfer-Prototyp im Rahmen des Pilotprojektes 25% an Einbaulänge eingespart werden.

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

Bei der Ermittlung von Beurteilungspegeln in der Nachbarschaft werden gemäß den geltenden Vorschriften und Normen tonhaltige Geräuschimmissionen mit einem Ton- und Informationshaltigkeits-Zuschlag $K_T = 3$ bis 6 dB berücksichtigt [TA-Lärm][1]. Aktiv-Schalldämpfer können gerade solche tonalen Komponenten effektiv unterdrücken und damit die Lärmbelastung zusätzlich um 3 bis 6 dB reduzieren. Gerade im vorliegenden Fall des Pilotprojektes führten solche Zuschläge zu einer Überschreitung von Immissionsrichtwerten in der Nachbarschaft der Papierfabrik. Mit Hilfe des ANC-Schalldämpfer-Prototyps ist es gelungen, diese Zuschläge zu vermeiden und seit dem Einbau die Einhaltung der Immissionsrichtwerte zu ermöglichen.

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

7.3 Ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse

Die Investitionskosten für einen aktiven Schalldämpfer werden in erster Linie von den Stückpreisen der Regelelektronik-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 können bei einem ANC-Schalldämpfer niedriger als bei einem konventionellen Schalldämpfer ausfallen. Dies setzt jedoch voraus, dass der ANC-Schalldämpfer erheblich geringere Druckverluste als ein vergleichbarer konventioneller Schalldämpfer verursacht. Unsere Erfahrungen gehen allerdings dahin, dass bei den meisten industriellen Projekten, bei denen Aktiv-Schalldämpfer prinzipiell in Frage kämen, genügend Bauraum für konventionelle Schalldämpfer zur Verfügung steht um die Querschnitte entsprechend aufzuweiten. In diesen Fällen können Aktiv-Schalldämpfer auch bezüglich der Betriebskosten nicht mit den konventionellen Lösungen konkurrieren.

Erfahrungen der Fa. ABS GmbH aus anderen Projekten mit Aktiv-Schalldämpfern gehen dahin, dass die Aktivteile der ANC-Schalldämpfer min. einmal jährlich durch Fachpersonal gewartet und neu initialisiert werden müssen. In der Regel werden hierzu Wartungsverträge abgeschlossen. Die hiermit verbundenen Zusatzkosten müssen den Betriebskosten zugerechnet werden.

Bei dem durchgeführten Pilotprojekt lagen die Investitionskosten für den ANC-Schalldämpfer-Prototyp in einem direkten Vergleich etwa doppelt so hoch wie diejenigen des konventionellen Kulissenschalldämpfers. Der Kulissenschalldämpfer hat zwar bereits nach kurzer Betriebszeit an Wirksamkeit verloren, dies kann jedoch auf ungeeignete Ausführung der Schalldämpferkulissen zurückgeführt werden.

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

Zusammenfassend lassen die Ergebnisse des Forschungsvorhabens den Schluss zu, dass Aktiv-Schalldämpfer unter ökonomischen Gesichtspunkten in den meisten Fällen – auch bei dem durchgeführten Pilotprojekt - nicht mit den konventionellen Schalldämpfern konkurrieren können. Für spezielle Anwendungsfälle, z. B. hohe Pegelminderungen bei tiefen Frequenzen (< 200Hz), ist der ANC-Schalldämpfer durchaus konkurrenzfähig, sofern der Gesamtpegel von tiefen Frequenzen bestimmt wird und daher auf einen Passivteil verzichtet werden kann.

8. Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Seit Erscheinen des Abschlussberichtes: „Aktive Lärminderung durch Gegenschall, Az 12329“ [SSKST00] wurden folgende Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse durchgeführt:

- Veröffentlichung eines Fachartikels in der Zeitschrift „Konstruktion“ [SKST00].
- Veröffentlichung eines Fachartikels in der „Zeitschrift für Lärmbekämpfung“ [STK00]
- Ausstellung des ANC-Schalldämpfers als Exponat auf der Hannover Messe Industrie (Research & Technology), 2001⁶

Nach Vorliegen der noch ausstehenden Vorhabensergebnisse zur Langzeitstabilität und Wartungsanfälligkeit des Aktivteils des ANC-Schalldämpfer-Prototyps ist eine weitere Beitragsveröffentlichung in der „Zeitschrift für Lärmbekämpfung“ geplant.

Weiterhin ist eine Teilnahme an der 26. Internationalen Fachmesse Kälte, Klima, Lüftung „IKK 2005“ als Mitaussteller der DBU geplant.⁷

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 NANCY2000 vornehmen soll.

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

⁶ In Kooperation mit der Fachhochschule Bingen, Fachbereich Umweltschutz

⁷ Teilnahmeabsicht des Kooperationspartners IBS GmbH am DBU-Gemeinschaftsstand auf der „IKK 2005“

Fazit

Die Zielsetzung des Vorhabens, die emittierte Schalleistung des Abluftkamins im Gesamtpegel um 10 dB(A) zu senken und dabei die tonalen Frequenzkomponenten so weit zu reduzieren, dass kein Zuschlag für Tonhaltigkeit mehr in Ansatz gebracht werden muss, wurde erreicht.

Im Rahmen des Pilotprojektes konnte der Aktiv-Schalldämpfer einen großen Schritt hin zur technischen Reife weiterentwickelt werden. Die noch ausstehenden Ergebnisse zur Langzeitstabilität und Wartungsanfälligkeit konnten aus Zeitgründen nicht mehr im Rahmen der Laufzeit dieses Vorhabens erarbeitet werden. Hierzu muss erst die Wirksamkeit des Passivteils im Wirkfrequenzbereich des Aktivteils des ANC-Schalldämpfer-Prototyps nachlassen. Für die weitere Vorgehensweise ist geplant, im Sommer 2005 eine weitere Funktions- und Wirksamkeitsprüfung in der Pilotanlage durchzuführen.

Um einen Betrieb in sehr schmutziger und sehr feuchter Abluft zu ermöglichen, mussten bei den ANC-Mikrofonen Kompromisse hinsichtlich Dichtigkeit und Schalldurchlässigkeit zu Lasten der Regeldynamik eingegangen werden. Da grundsätzlich nicht nur tonale Komponenten gedämpft werden sollen, sollten die ANC-Controller noch weiter optimiert und deren Dynamikbereich durch Auswahl leistungsfähigerer Regelkomponenten vergrößert werden.

Literaturverzeichnis

- [DSN00] DEUS, S., SCHATZ, W. und NEUMANN, T.: *Vorstellung des neuen Antischallsystems NANCY2000 und ausgewählte Einsatzfälle*. Tagungsbeitrag zur 26. Deutschen Jahrestagung Akustik DAGA 2000, 20. - 23. März 2000
- [HSF01] HENN, H., SINAMBARI, GH. R. und FALLEN, M.: *Ingenieurakustik*. 3. Auflage. Wiesbaden: Vieweg-Verlag, 2001
- [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
- [HT04] HAANE, J. H., und THORN, U.: *Optimierung eines ANC-Systems -Weiterentwicklung von Antischallsystemen zur technischen Reife*. Kurzbericht zum Projektfortschritt eines Entwicklungsprojekts, gefördert unter dem Az: 21704 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Wendt-SIT GmbH, Frankenthal 2004
- [Köc04] KÖCK, R.: *Einfluss von Folienabdeckungen auf die Wirkungsweise von ANC-Systemen*. Diplomarbeit FH Bingen, FB 1, Fachrichtung Umweltschutz, 2004
- [NE92] NELSON, P. A. und ELLIOT, S. J.: *Active Control of Sound*. London: Academic Press, 1992
- [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, 2000
- [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

- [SSKST00] SCHNEIDER, A., SINAMBARI, GH. R., KUNZ, F., SIEGEL, L. und THORN, U.: *Aktive Lärminderung durch Gegenschall*. Abschlußbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Az: 12329 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Wendt-SIT GmbH, Ludwigshafen 2000
- [STK00] SINAMBARI, GH. R, THORN, U. und KUNZ, F.: *Erhöhung des wirksamen Frequenzbereichs aktiver Schalldämpfer durch Querschnittsunterteilung*. In „Zeitschrift für Lärmbekämpfung“, Band Nr. 47, Heft Nr. 4, Springer-VDI-Verlag, 2000
- [TA-Lärm] TECHNISCHE ANLEITUNG ZUM SCHUTZ GEGEN LÄRM – TA Lärm: Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz vom 26.08.1998 (BMBI. 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: Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft, 1997*