

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle
für Prüfung, Überwachung und
Zertifizierung
Zulassung neuer Baustoffe, Bauteile
und Bauarten
Forschung, Entwicklung, Demonstra-
tion und Beratung auf den Gebieten
der Bauphysik

Institutsleitung
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

Abschlussbericht

Machbarkeitsstudie für die Entwicklung, Konstruktion und den Bau eines neuen Musikinstruments Windradorgel



Durchgeführt im Auftrag des Vereins zur Förderung von Bildung
und Publizistik zu Umwelt und
Entwicklung e.V. *SOLIDARISCH LEBEN LERNEN*

Judit Angster
Felipe Merino Reyes
Andras Miklos

Stuttgart, 13. April 2010

Dr. rer. nat. Judit Angster
Gruppenleiterin Musikalische Akustik/Photoakustik

Inhalt

1	Zusammenfassung	4
2	Einleitung	9
3	Aufgabenstellung	10
4	Die im Projekt untersuchten Schallquellen	11
5	Die durchgeführten Messungen	16
5.1	Versuchsaufbau, Messtechnik und Analysemethoden	16
5.1.1	„Einfacher Windkanal“	16
5.1.2	„Großer Windkanal“ (Schalldämpferprüfstand des IBP)	17
5.2	Auswahl der Analysemethode	17
5.3	Aufbau, und Durchführung der akustischen Messungen	18
6	Messergebnisse der Schallquellen	22
6.1	Kurze Zusammenfassung der Testergebnisse aller Schallquellen	22
6.2	Messung des Schalldruckpegels im „einfachen Windkanal“ (Testergebnisse einer aufschlagenden Zungenpfeife)	23
6.3	Messung des Schalldruckpegels im „Großen Windkanal“ (Testergebnisse der durchschlagenden Zunge E'')	23
6.4	Messung des Schalleistungspegels im „Großen Windkanal“ (Testergebnisse der durchschlagenden Zunge E'')	25
6.5	Möglichkeiten zur Stilllegung der durchschlagenden Zungenpfeifen	29
6.6	Diskussion der Messergebnisse, Auswahl der geeigneten Schallquelle	30
7	Weitere Pläne und Möglichkeiten für die Verwirklichung des Windradinstrumentes	31
7.1	Allgemeiner Aufbau des Systems	31
7.2	Pfeifenentwicklung und akustische Optimierung	32
7.3	Ansteuerung der Zunge (Abschalten des Tons)	32
7.4	Stimmung der Pfeifen	33
7.5	Aufbau der Steuerung	33
7.6	Technische Windradaspekte bei der Weiterentwicklung des Instrumentes	35
7.7	Weitere Vorgehensweise	35
8	Anlage 1 – Definitionen, Erklärungen	36
8.1	Der Staudruck	36
8.2	Der Resonator, der Helmholtz-Resonator	37
8.3	Die Kirchenorgel	38
8.3.1	Funktionsprinzip einer Kirchenorgel	38
8.3.2	Die Lippenpfeife der Kirchenorgel	40
8.3.3	Die Zungenpfeife der Kirchenorgel	40

9	Anlage 2 – Der „große Windkanal“ – technische Daten und Messmethoden	42
9.1	Der Schalldämpferprüfstand (Windkanal) des IBP	42
9.2	Bestimmung der Schalleistungspegel (des Strömungsgeräuschs) im Schalldämpferprüfstand (IBP-Mitteilung)	44
10	Anlage 3 –Arbeitsteilung und Zuständigkeiten der Projektpartner	46
11	Literaturverzeichnis	47
12	Anlage 4 – Powerpoint Präsentation des Fraunhofer-IBP am Abschlussmeeting am 30. März 2010	47

1 Zusammenfassung

Machbarkeitsstudie Windradorgel

Machbarkeitskriterien der Studie

Das Fraunhoferinstitut für Bauphysik, Stuttgart, (IBP) in Zusammenarbeit mit der Werkstätte für Orgelbau Mühleisen GmbH, dem Spezialisten für Windradtechnik, Dipl. Ing. Jan Liersch und dem Orgelbauer Stefan O. Heuss, Spezialist für elektronische Steuerungstechnik von Orgeln, wurden vom Verein zur Förderung von Bildung und Publizistik zu Umwelt und Entwicklung e.V. beauftragt, eine Machbarkeitsstudie für die Entwicklung eines neuen Musikinstruments Windradorgel zu erstellen. Die Studie wurde finanziell vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert.

Die Grundidee von dem Musikinstrument ist, Orgelpfeifen an den Rotorblättern von Windrädern zu befestigen und diese durch den Winddruck, der durch die Drehung der Rotorblätter entsteht, zum Tönen anzuregen. Um dieses Ziel zu erreichen, sollten Pfeifen gefunden werden, die mit einem auf diese Weise produzierten Staudruck Töne möglichst konstanter Frequenz und möglichst großer Schallleistung erzeugen. Für jede Frequenz (Tonhöhe) kann dann jeweils eine bestimmte Pfeife hergestellt werden, z.B. 25 Pfeifen für zwei Oktaven.

Weiter sollte geklärt werden, mit welchem Mechanismus die Pfeifentöne so an- und abgeschaltet werden können, dass dieser Vorgang von einem Keyboard drahtlos ferngesteuert werden kann. Ein Satz von Pfeifen z.B. für zwei Oktaven kann dann wie ein Klavier oder eine Orgel auf dem Keyboard gespielt werden.

Schließlich sollte bestimmt werden, welche Werkstoffe sich für Pfeifen mit den genannten Eigenschaften eignen.

Akustische Machbarkeit

Das IBP testete eine Reihe unterschiedlicher Klanggeneratoren im Windkanal. Bei diesen Experimenten zeigte sich, dass nur die durchschlagende Zungenpfeife, die mit einem Resonator (Becher) versehen ist, ein eindeutig positives Ergebnis hinsichtlich konstanter Tonfrequenz und großer Schallleistung aufweist. Bei diesem Pfeifentyp ist die Grundfrequenz des Klanges vom Winddruck weitgehend unabhängig. Diese Unabhängigkeit der Tonfrequenz vom Staudruck ist von großer Bedeutung, da am Windrad aufgrund wechselnder Windstärken und dementsprechend einer – allerdings relativ geringen – Variabilität der Drehgeschwindigkeit der Rotorblätter auch der durch die Drehgeschwindigkeit erzeugte Staudruck auf den Pfeifen in einem entsprechenden Umfang variiert.

Durch den Pfeifenresonator (Becher) ist bei der getesteten durchschlagenden Zungenpfeife der Schalldruckpegel im Verhältnis zum allgemeinen Rauschen größer als 40 dB. Das bedeutet, es kann davon ausgegangen werden, die am Windrad erzeugten Töne können so stark optimiert werden, dass sie auch in Entfernungen über 100 m deutlich zu hören sind., Die bei durchschlagenden Zungenpfeifen erzeugte Schallleistung ist also für die Windradanwendung geeignet.

Machbarkeit der elektronischen Fernsteuerung

Das positive Untersuchungsergebnis des IBP, das die akustische Machbarkeit einer Windradorgel begründet, wurde mit den anderen an der Studie beteiligten Experten (elektronische Fernsteuerung der Pfeifen und Windradtechnik) hinsichtlich der weiteren Machbarkeitskriterien bei einem Workshop am 30. März 2010 im IBP in Stuttgart ausgewertet.

Die Experten stellten fest, dass alle erkennbaren technischen Probleme für die Konstruktion des Musikinstruments Windradorgel lösbar sind.

Die akustisch geeignete durchschlagende Zungenpfeife ist auch für eine elektronische Fernsteuerung der Pfeife besonders geeignet. Sie ermöglicht das An- und Abschalten der Töne durch Stilllegung einer magnetischen Metallzunge mit Hilfe eines Tonmagneten. Dieser Mechanismus benötigt so wenig elektrische Energie, dass er mit Hilfe eines solarbetriebenen Akku betrieben und von einem Keyboard mit Hilfe eines MIDI Steuermoduls ferngesteuert werden kann.

Machbarkeit bezüglich der Windradtechnik

Eine „autonome“ Lösung für die Energieversorgung des Musikinstruments Windradorgel ermöglicht einen minimalen Eingriff in die Konstruktion eines Windrads, insbesondere die aerodynamischen Eigenschaften der Rotorblätter und damit die Energieleistung des Windrads.

Es kann davon ausgegangen werden, dass mehrere Pfeifen zu einem Teilregister auf einer Konsole verankert werden. Diese wiederum kann über Stege auf ein Rotorblatt des Windrads fest montiert werden. Zur gleichmäßigen Verteilung des Gewichts der Pfeifen auf die drei Rotorblätter eines Windrads sind die Pfeifen auf drei Stegen zu befestigen. Die längste Pfeife wird kaum länger sein, als die Blatattiefe (Abstand von Vorderkante zu Hinterkante) der üblichen Rotorblätter in deren mittleren Bereich, also zwei bis drei Meter.

Ein weiterer Vorteil der Zungenpfeife ist, dass die verwandten Werkstoffe insbesondere für den Resonator keine wesentliche Wirkung auf die Tonqualität (konstante Frequenz und große Schalleistung) haben. Es können also überwiegend leichte Werkstoffe aus Glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) verwandt werden. Durch diese Leichtbauweise können auch die Fliehkräfte minimiert werden.

Eine typische Rotordrehzahl von beispielsweise 20 U/min und einer Blattlänge von 35m bedeutet eine Umfangsgeschwindigkeit von ca. 250km/h.

Die Umfangsgeschwindigkeit der Rotorblätter in ihrem mittleren Bereich (z.B. 40% des Radius) beträgt um 100 km/h. Bei diesen Anströmgeschwindigkeiten wurde die durchschlagende Pfeife im großen Windkanal des IBP getestet.

Zum Vergleich: ab Windgeschwindigkeiten von 4 m/s beginnt der Arbeitsbereich für Windrotoren.

Erfordernisse und Pläne für die Verwirklichung der Windradorgel

Die Teilnehmer des Auswertungsworkshops am 30. März 2010 haben folgendes Planungsdesign für die Fertigstellung eines Prototyps der Windradorgel mit zwei Tonoktaven entwickelt.

Allgemeiner Aufbau des Systems

Allgemeiner Aufbau des Systems (**Bild 1**):

- Max. 25 Pfeifen auf 3 Rotorblätter verteilt
- Höhe des Windrades 70 m + 35 m Blattlänge
- ca. 3 Sekunden für eine Umdrehung (20 U/min)
- Die Rotorgeschwindigkeit kann auf ca. 1% konstant gehalten werden.
- Die Ansteuerung der Pfeifen soll repetierend erfolgen (somit spielbar über mehroktavige Klaviatur).
- Der Anbau der Pfeifen soll möglichst ohne größere Veränderungen am Windrad erfolgen können (keine Kabel, möglichst wenig Bohrungen usw.).
- Das System soll über ein handelsübliches Keyboard per MIDI angesteuert werden können.

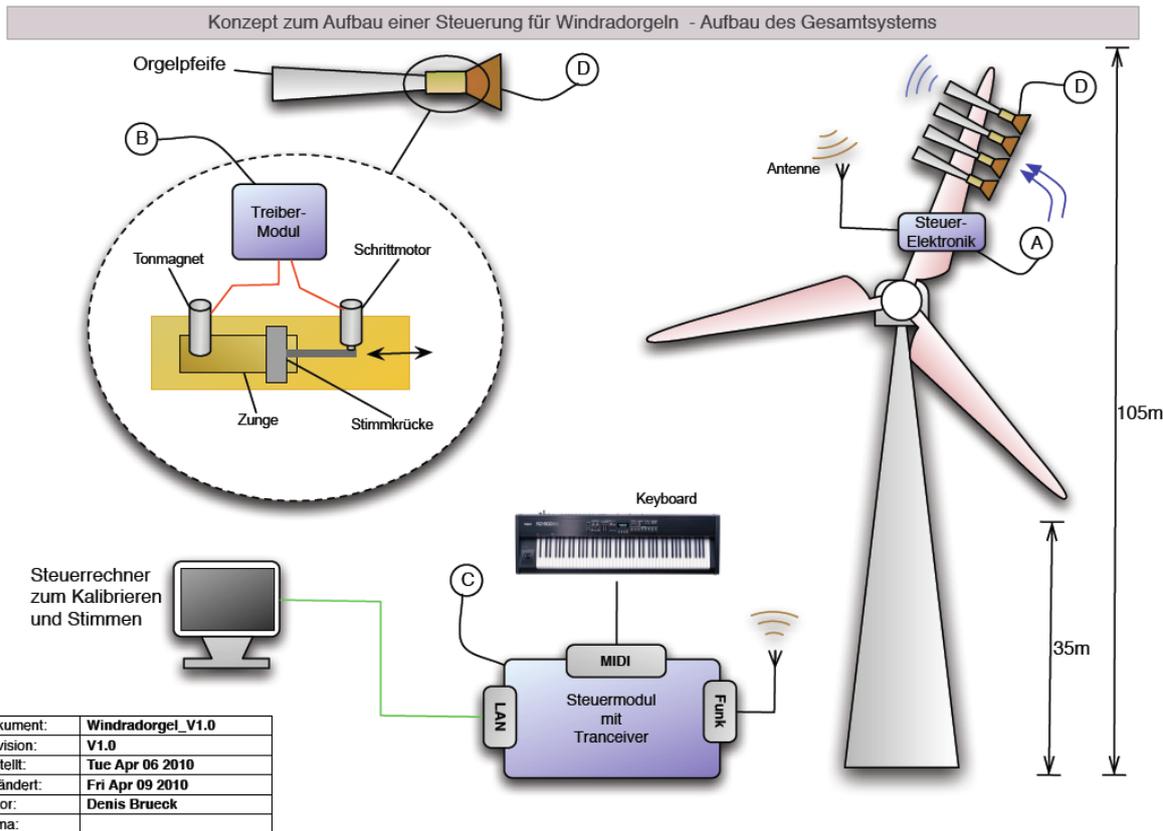


Bild 1 Konzept zum Aufbau des Gesamtsystems (Entworfen von H. Brück, i. A. O. Heuss GmbH) Orgelpfeifen nicht maßstäblich

Pfeifenentwicklung und akustische Optimierung

Für Windradzwecke müssen spezifische durchschlagende Zungenpfeifen entwickelt und akustisch optimiert werden.

Zuerst muss eine durchschlagende Pfeife konstruiert werden, die den besonderen Bedingungen eines Windrads Rechnung trägt. Folgende Aspekte sind dabei zu berücksichtigen:

- Um das An- und Abschalten der Pfeifen zu gewährleisten, sollte die Zunge aus einem magnetischen Material hergestellt werden. (siehe auch Ansteuerung der Zunge)
- Auswirkungen der Zentrifugalkräfte
- Auswirkungen von Windturbulenzen aufgrund der Veränderung der Windgeschwindigkeit (Windböen) und des Staudrucks durch die Drehgeschwindigkeit der Rotorblätter, allgemeiner Geräuschpegel von Windrad und Pfeife im Verhältnis zur Schallgröße des Tons der Pfeife. Zur akustischen Optimierung der neukonstruierten Pfeife müssen Testmessungen sowohl im Akustiklabor des IBP als auch an einem Windrad im Freifeld durchgeführt werden.
- Im nächsten Schritt muss das Magnetventil plus Zusatzgeräten (Stimmkrücke mit Schrittmotor, solarbetriebener Akku) für die Pfeifensteuerung in die Konstruktion eingebaut und getestet werden
- Danach kann die Konstruktionsentwicklung und akustische Optimierung von max. 25 Pfeifen für zwei Oktaven erfolgen.

Ansteuerung der Zunge (An- und Abschalten des Tons)

An das von Stefan Heuss und Denis Brueck empfohlene Verfahren zum An- und Abschalten einer durchschlagenden Zungenpfeife mit Hilfe eines Tonmagnets sind folgende Anforderungen zu stellen:

- Der Magnet sollte im stromlosen Zustand den Ton abschalten. Im Störfall darf kein Ton zu hören sein
- Die Stromaufnahme muss möglichst gering sein, damit das System über Akku betrieben werden kann.
- Um den Magneten konstruieren zu können, muss zunächst bekannt sein, welche Kräfte zum Ein- bzw. Ausschalten benötigt werden.
- Um den Mechanismus zu vereinfachen, sollte die Zunge aus einem magnetischen Material hergestellt werden.
- Die Ein- und Ausschaltverzögerung (Latenz) sollt möglichst gering sein (< 15ms).
- Die Ansteuerung muss die entstehenden Zentrifugalkräfte aushalten (robustes Design)

Stimmung der Pfeifen

Um die einzelnen Pfeifen des Systems im Betrieb stimmen zu können, schlägt die Firma Heuss einen Schrittmotor (evtl. Linearmotor) zum Betätigen der Stimmkrücken vor.

Aufbau der Steuerung

In **Bild 2** ist das Konzept zur Ansteuerung der Pfeifen, in **Bild 3** das Konzept zur Steuereinheit dargestellt. Das System soll über einen MIDI-Eingang verfügen, dessen Signale über die zu entwickelnde Steuerung in Schaltbefehle für die Tonmagnete umgesetzt werden. Alle Signale sollen über Funk übertragen werden.

Um die Eingriffe in die Windradkonstruktion zu minimieren und damit die Akzeptanz der Orgel bei den Windradbetreibern zu erhöhen, sollen die einzelnen Teile des Systems möglichst mit einer eigenen Stromversorgung auskommen z.B. durch Integration einer Ladeschaltung für Akkus, die von Solarzellen gespeist werden.

Weiterhin müssen das Auftreten von Doppler-Effekten sowie die durch die großen Entfernungen bedingten Laufzeiten des Schalls bedacht werden. Um Laufzeiten kompensieren zu können, soll im System ein „intelligentes“ Verzögerungsglied integriert werden, welches je nach Position des Blattes unterschiedliche Signalverzögerungen errechnet. Hiermit kann realisiert werden, dass der Schall von unterschiedlich positionierten Pfeifen „gleichzeitig“ beim Zuhörer ankommt.

Beispielrechnung:

Rotorblatt (oben): 105 m

Rotorblatt (unten): 35 m

Abstand der Zuhörer vom Windrad: 30 m

Laufzeit (oben): 321 ms

Laufzeit (unten): 135 ms

Die ergibt einen Laufzeitunterschied von 186 ms.

Diese Laufzeiten sind sehr stark als Verzögerung wahrnehmbar und sollten kompensiert werden. Ein Problem wird sich bei diesen Verzögerungen für den Organisten einstellen, da für ihn der gespielte und der gehörte Ton zeitlich versetzt sind. Das System muss über ein Steuersystem gestimmt und kalibriert werden können.

Konzept zum Aufbau einer Steuerung für Windradorgeln - Ansteuerung der Pfeifen

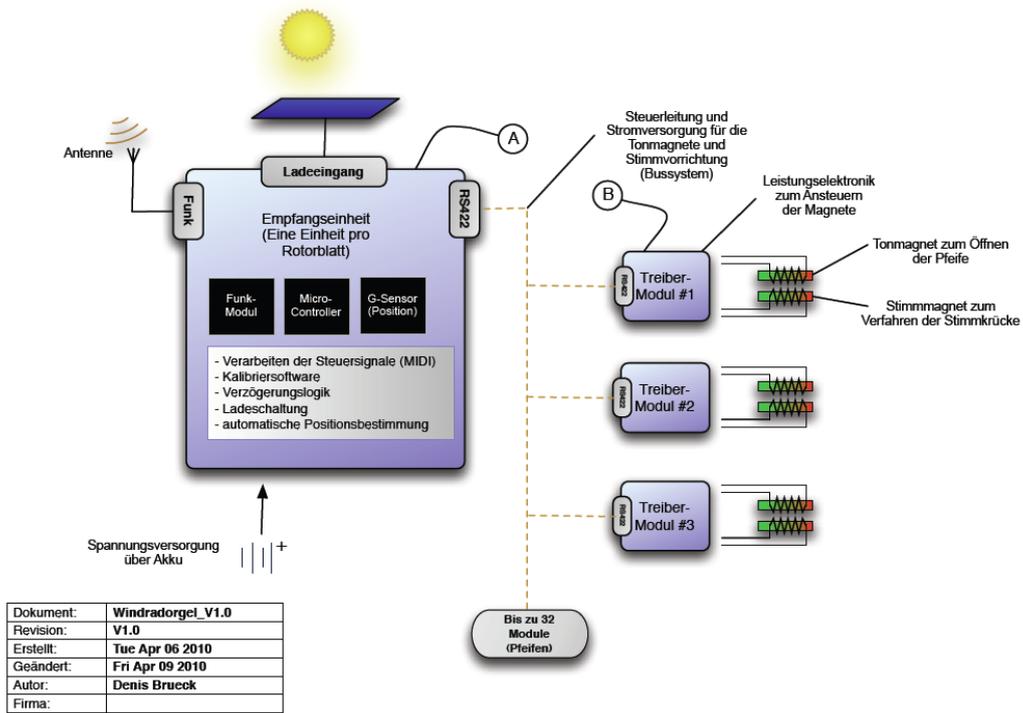


Bild 2 Konzept zur Ansteuerung der Pfeifen (Entworfen von H. Brück, i. A. Otto Heuss GmbH)

Konzept zum Aufbau einer Steuerung für Windradorgeln - Steuereinheit

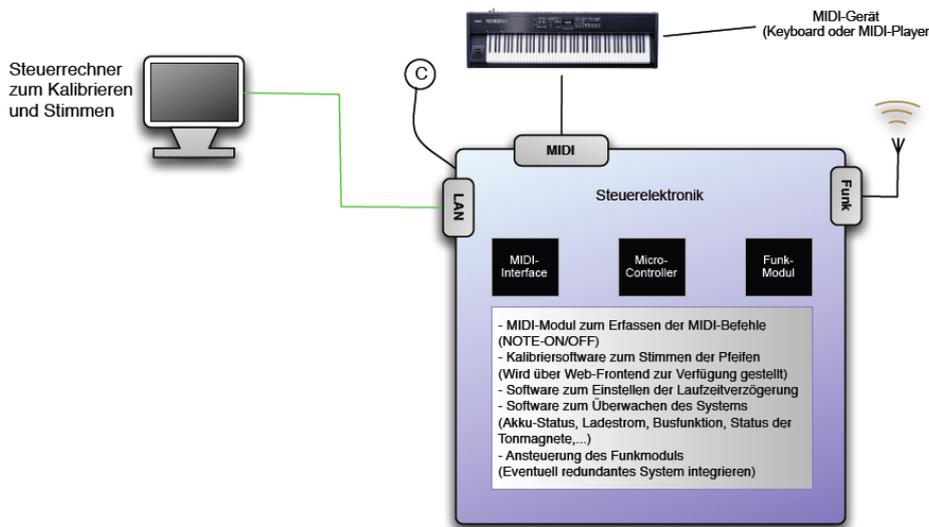


Bild 3 Konzept zur Steuereinheit (Entworfen von H. Brück, i. A. Otto Heuss GmbH)

Technische Windradaspekte bei der Weiterentwicklung des Instrumentes

Die Vorversuche zur Ermittlung der Bauform der Orgelpfeife konnten noch nicht die exakten Anströmverhältnisse berücksichtigen, wie sie am drehenden Rotorblatt einer Windenergieanlage (WEA) auftreten können.

Folgende Aspekte sind nach der Optimierung im Windkanal im Freifeld mittels Prototypentest noch zu untersuchen und ggf. zu optimieren:

- Einfluss der Drehung auf die Anströmung auf die Orgelpfeife; ggf. Optimierung der Ausrichtung auf die Anströmung
- Einfluss von Drehzahlschwankungen auf die Anströmung, z.B. Lautstärkeänderung (als Validierung der Windkanalversuche)
- Einfluss der Turbulenz (schnelle Windgeschwindigkeitsänderungen und Windrichtungsänderungen)
- Einfluss von Manövern der WEA, z.B. Schalten des Generators (sofern der Generator für die Zeit nicht ganz entkoppelt wird, in der die Windradorgel gespielt wird) oder Azimutmanöver bei Änderung der Windrichtung
- Aspekte der Schallabstrahlung, z.B. Einfluss der Ausrichtung der WEA-Gondel.

Weitere technische Aspekte sind zu untersuchen:

- Arrangement der einzelnen Orgelpfeifen zu Registern, die auf die Rotorblätter verteilt werden
- Optimierung der Positionen der Orgelpfeifen und Register an den Rotorblättern und auch der Positionierung der Zunge hinsichtlich guter Spielbarkeit
- Festigkeitsnachweise: Ermittlung von mittleren und maximalen Lasten, um Vorgaben für die konstruktive Auslegung von Orgelpfeifen und Befestigungen zu bestimmen
- Änderungen am Rotorblatt für die Aufnahme der Windradorgel (z.B. Einbau von Konsolen)
- Rechnerischer Nachweis und konstruktive Auslegung der Befestigung der Orgelregister am Rotorblatt
- Wahl der geeigneten Materialien
- Stromversorgung der Verschlüsse bzw. Blockierungen der Orgelzungen für die Zeiten ohne Orgelbetrieb und im Betrieb der Windradorgel für die Stimmung der Pfeifen sowie für Fernwirkung während des Konzerts
- Notwendige Einbauten im Rotorblatt, der Rotornabe und der Gondel, z.B. Funkübertragung, Kabel o.ä.
- Option für einen Klangabnehmer inkl. Midi-Schnittstelle
- Weitere Aspekte, die den Betrieb der WEA beeinflussen können:
 - Ertragminderung durch die Windradorgel
 - Blitzschutz
 - Änderung der Anlagensteuerung für den Konzert-Betrieb, z.B. Regelung auf konstante Drehzahl

Weiteres Vorgehen

Die beteiligten Institute und Unternehmen erklären ihr Interesse, an der Weiterentwicklung und Realisierung der Windradorgel zusammen zu arbeiten. Für ein Perspektivgespräch werden sie einen Zeit- und Kostenplan erstellen.

2 Einleitung

Der Klimaschutz ist eine der herausragenden Aufgaben dieser Zeit. Zu den wichtigsten Risikofaktoren der Klimaveränderung gehört das „Klimagas“ CO₂. Deshalb ist es notwendig, die Energieversorgung von fossilen auf regenerative Energieträger umzustellen – neben Energieeinsparungen und Erhöhung der Energieeffizienz. Dennoch ist die öffentliche Kommunikation über den regenerativen Energieträger Windkraft von Widersprüchen und heftigen Auseinandersetzungen geprägt. Einerseits besteht zunehmend Konsens über die Notwendigkeit, eine lebensbedrohliche Klimaveränderung auf der Erde zu verhindern, andererseits stoßen große Windkraftwerke in weiten Teilen der Bevölkerung auf Ablehnung. In der emotional aufgelade-

nen Situation wird die Nutzung von Windrädern für Musik, an der sich auch Gegner von Windkraftanlagen erfreuen können, zu einer Entspannung und Versachlichung der Diskussion um Windenergie beitragen. Es ist zu erwarten, dass das neue Musikinstrument vielfach eingesetzt wird: bei der Eröffnung von Windparks, bei „Offenen Tagen“ und anderen Windparkfesten und allgemein für Open Air Konzerte, die das Instrument einbeziehen. Dementsprechend wird eine beträchtliche wirtschaftliche Wirkung von Windradorgeln ausgehen, angefangen von Einkünften der Hersteller des Musikinstruments, der Veranstalter von Open Air Konzerten, von Windparkbetreibern und Windradherstellern bis hin zu verminderten Kosten des Umweltschutzes aufgrund geringerer Klimaschäden.

Nach ersten eigenen Überlegungen wurde die Idee als technisch umsetzbar eingeschätzt, insbesondere die Pfeifen so an den Rotorblättern zu befestigen, dass sie nicht aufgrund zu hoher Fliehkräfte abgerissen werden. Dabei wird im "Normalbetrieb" eine Geschwindigkeit von ca. 320 km/h der Rotorblätter im Außenbereich zugrunde gelegt. Diese Geschwindigkeit wird erreicht, wenn die Windgeschwindigkeit etwa 35 km/h beträgt. Bei stärkerem Wind werden die Windräder gebremst, d.h., ab einer Windgeschwindigkeit von 35 km/h wird ein konstanter Luftdruck mit einer resultierenden Geschwindigkeit von 150 - 200 km/h im Mittelbereich der Rotorblätter angenommen. Bezüglich winderregter Pfeifenklänge wird erwartet, dass der dabei entstehende Luftdruck an den Pfeifen so hoch ist, dass sich ausreichend laute Töne erzeugen lassen, um schließlich auch das Dauergeräusch des Stromgenerators, der Rotoren usw. in einer Entfernung von 200 bis 500 m zu übertönen.

Ungeachtet dieser Annahmen sind einige technische Fragen zu beantworten.

- Aus Gewichtsgründen dürfen die Pfeifen nicht wie übliche Orgelpfeifen aus Blei und Zinn gefertigt sein, sondern aus einem möglichst leichten Material, z.B. PVC oder Aluminium.
- Die Pfeifen müssen ein- und ausschaltbar sein, um sie wie bei der Orgel oder dem Piano „spielen“ zu können. Die dabei verwandten Techniken und drahtlose Trakturen sind an sich bekannt. Angesichts hoher Fliehkräfte könnten allerdings größere Magnetverschlüsse oder Elektromotoren notwendig werden, die wiederum ein Gewichtsproblem mit sich bringen.
- Doppler-Effekte können auftreten, wobei wiederum das "Instrument" Windrad nicht genau wie eine Orgel oder gar ein Piano klingen müsste.

3 Aufgabenstellung

Die Machbarkeitsstudie für die Entwicklung und Herstellung einer „Windradorgel“ soll die zentralen Fragen beantworten, ob und wie das neue Musikinstrument funktioniert. Diese zentralen Fragen sind:

2. Entwicklung von Pfeifen, die - an den Rotorblättern großer Windräder befestigt – eine für große Open-Air-Konzerte geeignete Lautstärke erzeugen.
3. Erläuterung: Traditionelle Orgelpfeifen werden mit statischem Luftdruck, die in der Windlade eingestellt wird, zum Tönen gebracht. Bei einer Windradorgel soll der Luftdruck durch die Drehgeschwindigkeit des Windrads erzeugt werden (Staudruck (siehe auch Anlage 1)). Ein mit Staudruck funktionierendes Musikinstrument existiert noch nicht.
4. Formulierung weiterführender Entwicklungsschritte eines Mechanismus, mit dem die Töne der Pfeifen an- und abgeschaltet werden können. Der voraussichtlich elektromagnetische Mechanismus muss sich drahtlos per Funk steuern lassen, so dass die Pfeifen von einem externen Keyboard wie ein Klavier oder eine Orgel bespielt werden können.
5. Bestimmen, welche Werkstoffe sich am besten für die Pfeifen eignen.

Erläuterung: Das Gewicht der Pfeifen darf die Aerodynamik der Rotorblätter nicht wesentlich beeinträchtigen und muss die Fliehkräfte an den Rotorblättern minimieren, so dass die Pfeifen sicher an den Rotorblättern befestigt und ohne Beschädigung der Rotorblätter rasch wieder abmontiert werden können.

4 Die im Projekt untersuchten Schallquellen

Um geeignete Schallquellen für ein Windradinstrument zu finden, müssen die folgenden Kriterien erfüllt werden:

- Der Pfeifenklang muss eine möglichst stabile Frequenz
- und eine große Schalleistung

aufweisen. Die stabile Frequenz ist für spielbare musikalische Noten ein wichtiges Kriterium, wobei eine ausreichend große Schalleistung dazu benötigt wird, die Zuschauer, die in mehr als 100 m Entfernung vom Windrad stehen, mit Schallenergie zu versorgen.

Es wurden solche Quellen gesucht, die durch Strömung zum klingen gebracht werden können und bei denen die Grundfrequenz durch einen Resonator stabilisiert wird. Im Projekt wurden im Akustiklabor des Fraunhofer Institut für Bauphysik zahlreiche Schallquellen untersucht um bestimmen zu können, ob das erzeugte Schallsignal für einen musikalischen Klang eines neuen Windradinstrumentes geeignet wäre. Hierfür wird nur eine kleine Zusammenfassung der ausgewählten und getesteten Quellen gegeben. Im Kapitel 4 werden die Messmethoden und Messsysteme, bei denen ähnliche physikalische Umstände, wie am Windrad simuliert werden, beschrieben. Die Messergebnisse der nicht geeigneten Quellen werden hier nur kurz erläutert, in der Anlage 4 sind jedoch in einer Powerpoint Präsentation die wichtigeren Ergebnisse zusammengefasst. Ausführlicher wird über die, für ein Windradinstrument ausgewählte Schallquelle berichtet, wie sie an einem Windrad voraussichtlich akustisch funktionieren, aus welchem Material sie hergestellt werden könnte, und wie die Pfeifen voraussichtlich mit einer geplanten Fernsteuerung gespielt werden könnten. Erklärungen zu hier benutzten Fachbegriffe wie Resonator, Helmholtz-Resonator; etc. sind wiederum in der Anlage 1 ohne Anspruch auf Vollständigkeit angegeben.

Die folgenden Schallquellen wurden im Akustiklabor des Fraunhofer IBP getestet, ob sie als eine Quelle für das Windradinstrument geeignet wären:

1. Kunststoffrohr: Das im Bild 3.1 dargestellte Kunststoffrohr wird normalerweise für Akustikunterrichtszwecke benutzt. Das Rohr wird an einem Ende in die Hand genommen und in der Luft umgedreht, wobei bei kleineren Umdrehungsgeschwindigkeiten ein tieferer, bei höheren Geschwindigkeiten höhere Töne zu hören sind. Hierbei handelt es sich um die akustischen Eigenresonanzfrequenzen (Eigenmoden des Rohres). Die Anregung der einzelnen Längsresonanzfrequenzen des Rohres hängt sehr eindeutig von der Umdrehungsfrequenz ab.



Bild 3.1 Kunststoffrohr

Bild 3.2 zeigt ein einfaches, auf einer Seite geschlossenes Metallrohr, das als $\frac{1}{4}$ Wellenlänge – ($\lambda/4$ -) Resonator funktionieren soll.



Bild 3.2 Einfaches, auf einem Ende geschlossenes Metallrohr, als akustischer Resonator

Eine einfache Flasche, wie drei unterschiedlichen Sorten in den Bildern 3.3-3.5 dargestellt sind, kann als ein akustischer Helmholtz-Resonator funktionieren (Anlage 1).



Bild 3.3 Helmholtz-Resonator/1



Bild 3.4 Helmholtz-Resonator/2



Bild 3.5 Helmholtz-Resonator/3

Die im Bild 3.6 gezeigten zwei parallelen Stäbe könnten prinzipiell so funktionieren, das am ersten Stab eine Wirbelablösung entsteht, wobei vom 2. Stab eine Rückkopplung ausgeübt werden könnte so, wie an elektrischen Leitungen, wenn der Wind weht, oft bestimmte Schallsignale zu hören sind.

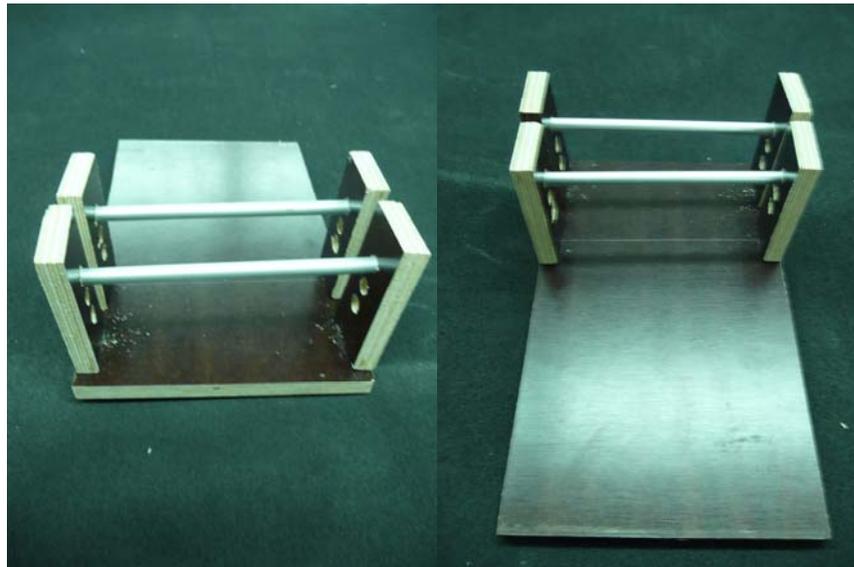


Bild 3.6 Zwei parallele Stäbe

Bild 3.7 zeigt den Längsschnitt durch eine Lippenorgelpfeife und ein Foto (mehr siehe in der Anlage 1).

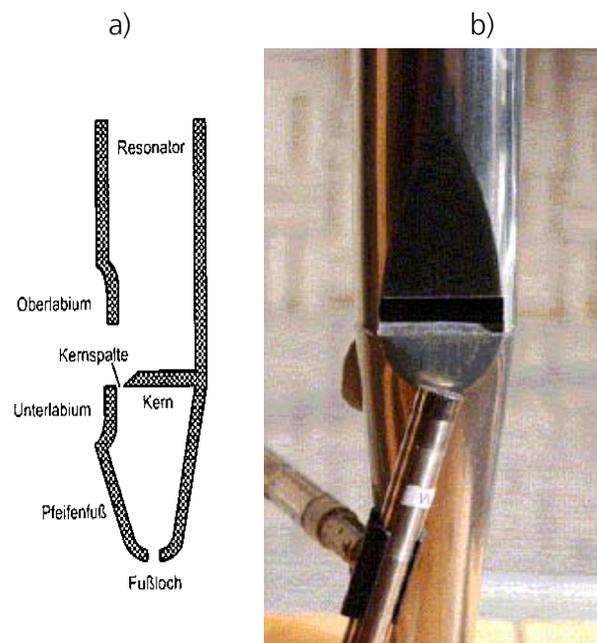


Bild 3.7 **Lippenorgelpfeife** : a) Längsschnitt einer Lippenorgelpfeife; b) Labium mit Mikrophon zur Schallaufnahme

Die zweite Gruppe der Orgelpfeifen sind die *Lingualpfeifen* oder *Zungenpfeifen*, bei denen der Luftstrom eine Metallzunge in Schwingungen versetzt, der Klang wird durch einen Resonanzkörper (*Becher*) verstärkt (Bild 3.8). Bei der aufschlagenden Zunge schlägt die Metallzunge auf eine *Kehle* auf (Bild 3.9) bei der durchschlagenden Zunge hingegen schwingt die Metallzunge durch eine genau passende Öffnung hindurch (Bild 3.10). Der Klang von Zungenpfeifen ist wesentlich obertonreicher als der von Lippenpfeifen.

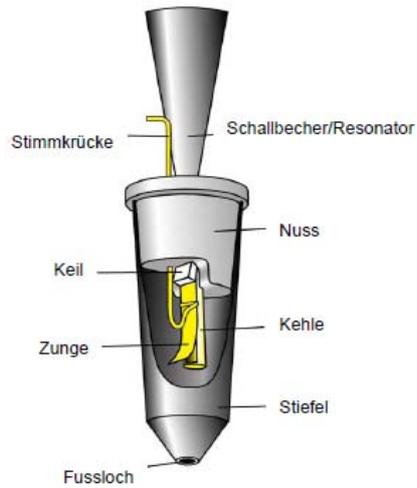


Bild 3.8 Längsschnitt einer Zungenpfeife

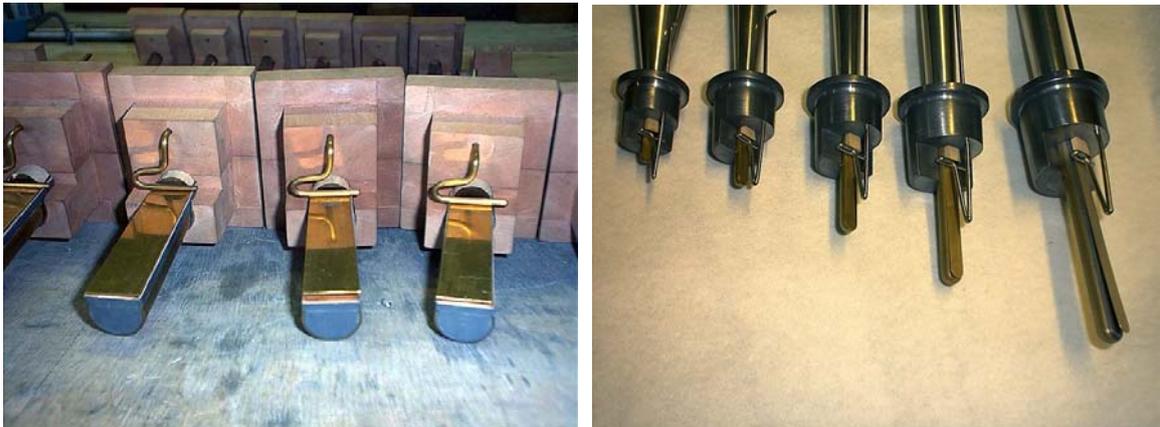


Bild 3.9 Aufschlagende Zungen (Foto: Henry Güntzel)



Bild 3.10 Durchschlagende Zungen (Foto: Henry Güntzel)

5 Die durchgeführten Messungen

5.1 Versuchsaufbau, Messtechnik und Analysemethoden

5.1.1 „Einfacher Windkanal“

Es wurde am IBP ein Testwindkanal aufgebaut, um die strömungsakustischen Umstände von einem Windrad zu simulieren. Um die, in diesem Projekt eingesetzten zwei unterschiedlichen Windkanäle voneinander unterscheiden zu können wird dieser Windkanal hier „einfacher Windkanal“ genannt). Das System besteht aus einem eingekapselten Gebläse und einem Windkanal, durch den die Luft (Wind) ausströmt. Das Gebläse wurde mit einer Drehzahlsteuerung versehen, um die Windgeschwindigkeit im Windkanal variieren zu können.

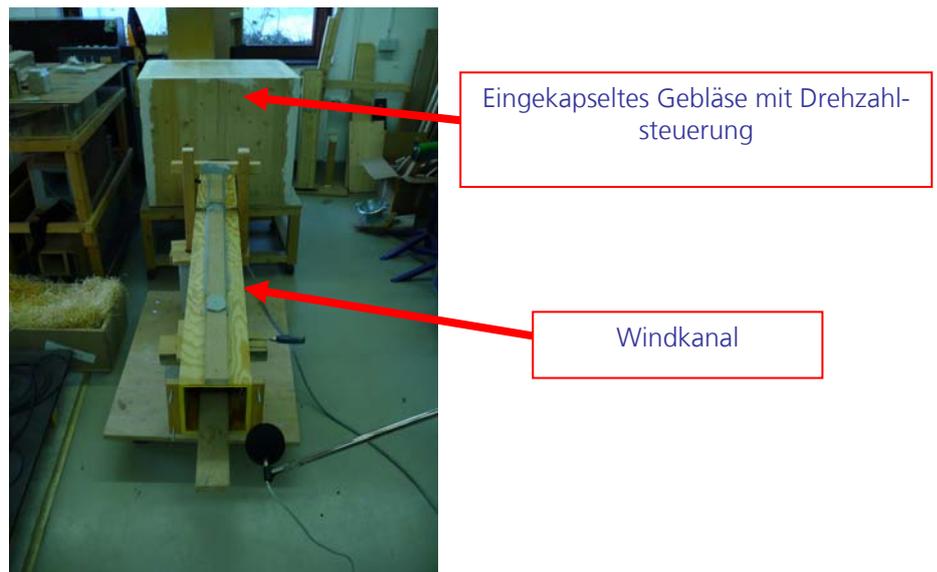


Bild 4.1 „Einfacher Windkanal“ für die Simulation der strömungsakustischen Umstände von einem Windrad.

5.1.2 „Großer Windkanal“ (Schalldämpferprüfstand des IBP)

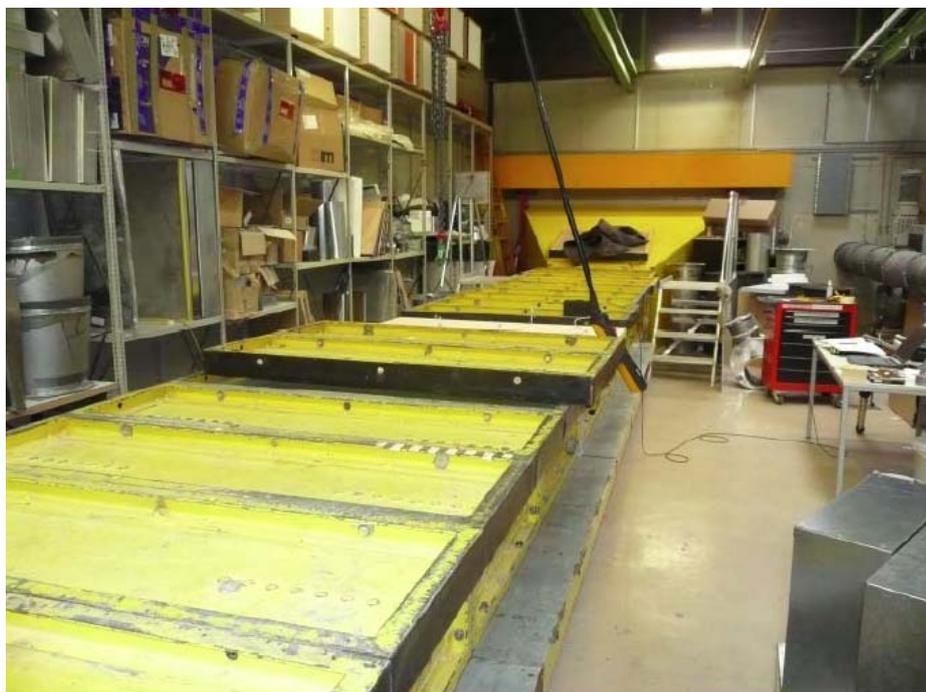
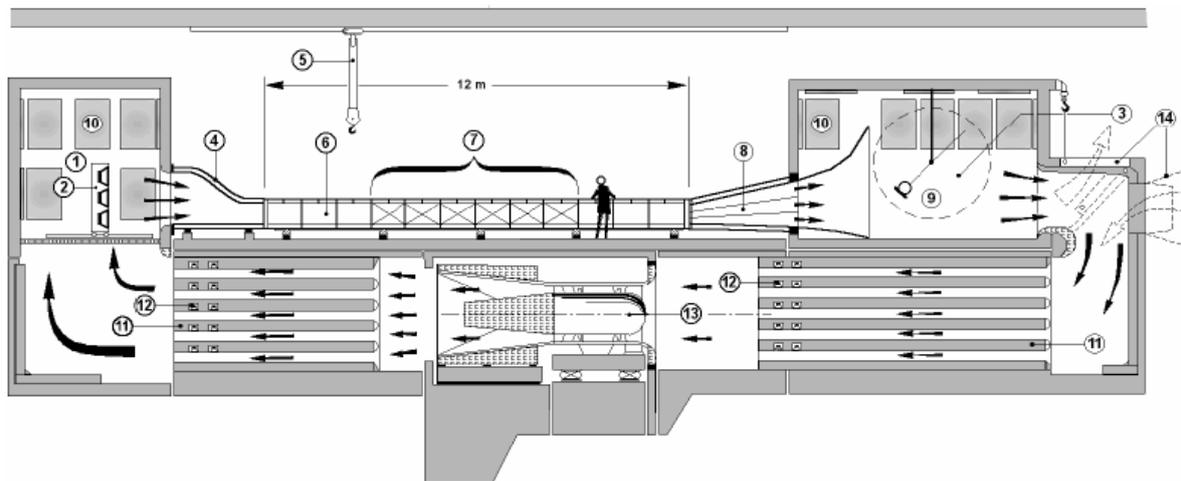


Bild 4.2 „Großer Windkanal“ (Schalldämpferprüfstand des IBP) für die Simulation der strömungsakustischen Umstände von einem Windrad (ausführliche technischen Daten sind in der Anlage 2 angegeben). Oben: Längsschnittzeichnung Unten: Photo

5.2 Auswahl der Analysemethode

Für die Analyse der Pfeifenklänge wurden verschiedene Methoden verwendet. Zum einen sollten Spektren des Stationärklangs der Pfeifen ermittelt werden. Zur Ermittlung dieser Stationärklangspektren wurde eine Mittelung über 10 Spektren, die im Stationärklang mit 10 aneinander anschließenden Hannfenstern (Fenstergröße jeweils 16384 Samples) ermittelt wurden, benutzt. Hierfür wurde ein eigenes Auswertungspro-

gramm entwickelt. Der Algorithmus zur Auswertung des Stationärklangspektrums wurde in MATLAB implementiert. Jede Berechnung durchläuft prinzipiell folgende Schritte:

- 1) Ermittlung des Startwerts der FFT. Damit wird es gewährleistet, dass die Analyse im Stationärbereich durchgeführt wird.
- 2) Einstellung der Fensterlänge der FFT, des Überlappungsbereichs der einzelnen Fenster und der Anzahl der Fenster.
- 3) Die FFT wird für jedes Fenster separat berechnet und anschließend der arithmetische Mittelwert von diesen Daten gebildet.
- 4) Für die Darstellung der Messdaten wurde die Software ORIGIN angewendet.

5.3 Aufbau, und Durchführung der akustischen Messungen

Bild 4.3 zeigt die Geräuschemessung am Ende des „einfachen Windkanals“ mit einem Windschutz am Mikrofon, wogegen im Bild 4.4 die Grundgeräuschemessung im „großen Windkanal“ dargestellt ist. Die Grundgeräuschemessungen im „normalen Windkanal“ bei 8 m/s und 15 m/s und im „großen Windkanal“ bei 7 m/s und 14 m/s sind in Bild 4.5 zu entnehmen. Bei beiden Windkanälen ist es gut zu beobachten, dass bei größerer Windgeschwindigkeit das Grundgeräusch auch größer ist.



Bild 4.3 Geräuschemessung am Ende des „einfachen Windkanals“ mit einem Windschutz am Mikrofon



Bild 4.4 Grundgeräuschemessung im „großen Windkanal“ (das Mikrofon befindet sich im Kanal)

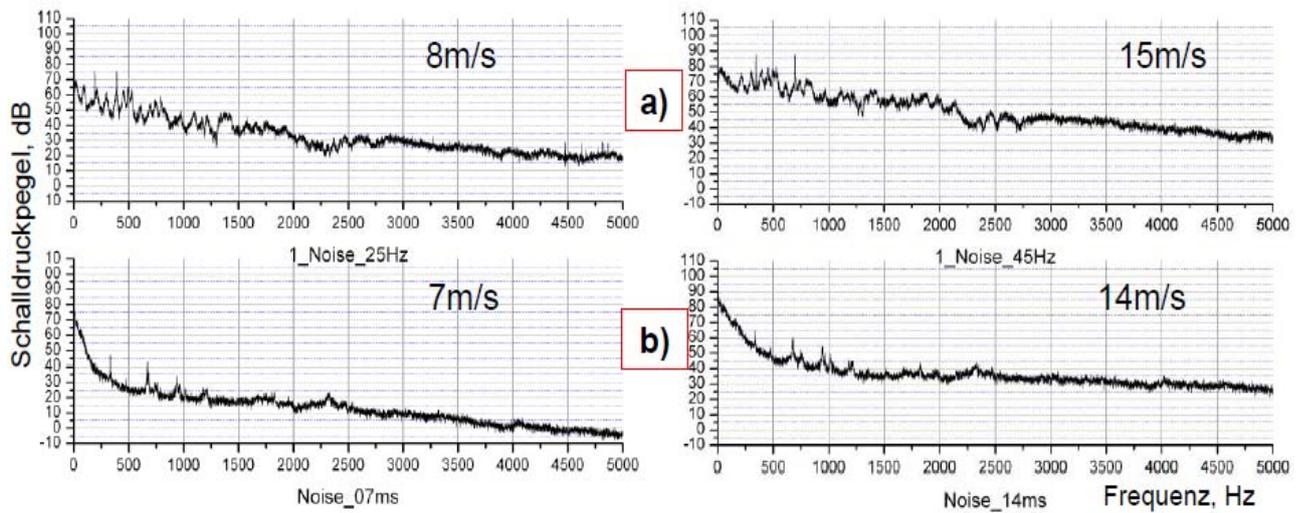


Bild 4.5 Grundgeräuschmessung im „normalen Windkanal“ (a) bei 8 m/s und 15 m/s und im „großen Windkanal“ (b) bei 7 m/s und 14 m/s.

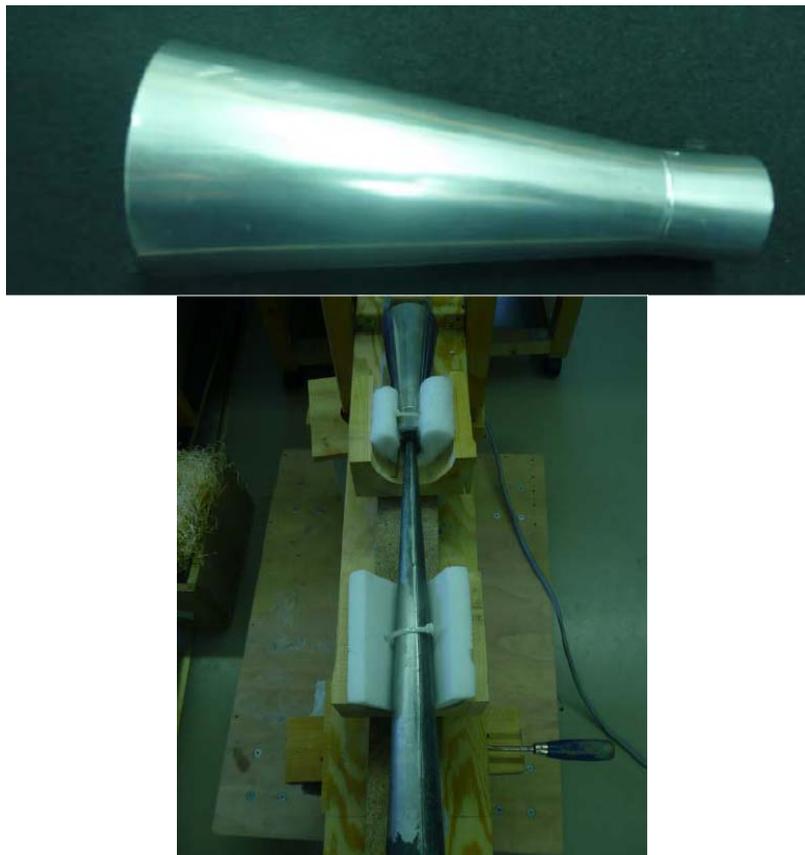


Bild 4.6 An die aufschlagende Zungenpfeife angepasster Trichter (oben) und die Zungenpfeife vorbereitet mit einem Trichter zur Messung in der Luftströmung (Wind)



Bild 4.7 Eine Zungenpfeife vorbereitet für die Messung im „einfachen Windanal“

Die Messergebnisse der nicht geeigneten Quellen sind, wie bereits erwähnt, im Anhang 4 zusammengefasst.

Ausführlicher wird hier über die, für ein Windradinstrument ausgewählte und für die Anwendung für geeignet geschätzte Schallquelle berichtet.

Bild 4.8 zeigt die durchschlagende Zunge E'', die statt dem, für normale Zungenorgelpfeifen üblichen „Stiefel“ mit einem Trichter versehen wurde, um Staudruck erzeugen zu können. Zum Zungenteil wurde ein Metallresonator (Becher) angepasst.

Bild 4.9 zeigt wie die durchschlagende Zunge mit Trichter für eine Messung ohne Resonator und in den Bildern 4.10 und 4.11 mit Resonator in den „großen Windkanal“ einmontiert wird.

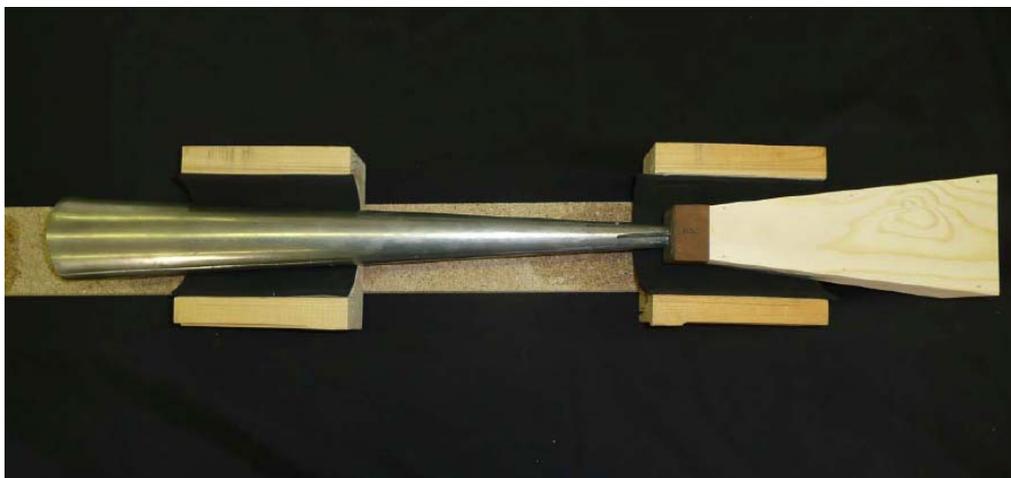


Bild 4.8 Durchschlagende Zunge E'', die statt dem, für normale Zungenorgelpfeifen üblichen „Stiefel“ mit einem Trichter versehen wurde, um Staudruck erzeugen zu können. Zum Zungenteil wurde ein Metallresonator (Becher) angepasst.



Bild 4.9 Die durchschlagende Zunge mit Trichter ohne Resonator wird in den „großen Windkanal“ einmontiert



Bild 4.10 Die durchschlagende Zungenpfeife (mit Resonator) und mit Trichter wird in den „großen Windkanal“ einmontiert



Bild 4.11 Die durchschlagende Zungenpfeife (mit Resonator) und mit Trichter im „großen Windkanal“

6 Messergebnisse der Schallquellen

6.1 Kurze Zusammenfassung der Testergebnisse aller Schallquellen

Wie bereits erwähnt, müssen - um geeignete Schallquellen für ein Windradinstrument zu finden - die folgenden Kriterien erfüllt werden:

- Der Pfeifenklang muss eine möglichst stabile Frequenz
- und eine große Schalleistung

aufweisen um einerseits eine eindeutige Tonhöhe für die Musizierung zur Verfügung zu haben und andererseits eine ausreichend große Schalleistung zu erreichen, um die Zuschauer, die in mehr, als 100 m Entfernung vom Windrad stehen, mit Schallenergie versorgen zu können. Diesen Kriterien nach wurden die Testergebnisse folgender Klanggeneratoren, die ausführlicher in der Anlage 4 präsentiert werden, kurz zusammengefasst:

- Kunststoffrohr: erzeugt einen zu leisen modulierten Ton, dessen Tonhöhe sich bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten sprunghaft ändern kann. Dadurch ist diese Quelle für Windradzwecke nicht geeignet.
- An einem Ende geschlossenes Metallrohr (Lambda-Viertel-Resonator): Die Schallerzeugung bei diesem Resonator hängt zu erheblichem Maße von der Windrichtung ab, wodurch sich auch diese Quelle als unbrauchbar ergeben hat (am Windrad ist es nicht möglich, die Windrichtung relativ zur Quelle konstant einzustellen).
- Verschiedene Flaschen, als Helmholtz-Resonatoren: Ähnlich, wie beim „Lambda-Viertel-Resonator“ hängt auch hier die Schallerzeugung von der Windrichtung ab, wodurch sich auch diese Quelle als unbrauchbar ergeben hat.
- Zwei parallele Stäbe: haben sich als unbrauchbar ergeben.
- Lippenorgelpfeife:
 - Es wurde festgestellt, dass eine Lippenorgelpfeife, die in den Windkanal eingelegt wird, keinen Klang erzeugen kann, da die Pfeife, anders, als bei einer Pfeifenorgel, vom Wind umströmt wird, und somit die, aus der Kernspalte ausströmende Luft sich um das Oberlabium herum in einer anderen Weise bewegt.
- Aufschlagende Zungenpfeife:
 - Die getesteten aufschlagende Zungenpfeifen haben in den Windkanälen funktioniert. Wie auch erwartet wurde, enthält das sich hierbei ergebende Schallsignal viele Obertöne. Auch eine geeignete

te Schalleistung konnte bei einigen Pfeifen erreicht werden. Jedoch wird die Frequenz der Teiltöne vom Winddruck deutlich beeinflusst, wodurch Tonhöhen-Modulationen auftreten. Auch nichtharmonische Spektrumkomponenten treten auf (bei diesem Pfeifentyp kommt dies aber auch bei der normalen Orgelnutzung vor). Wegen der Tonhöhenmodulationen müssen die aufschlagenden Zungenpfeifen auch für nicht geeignet eingestuft werden.

- Durchschlagende Zungenpfeife:

Hierbei erscheinen sehr schmale Spektrumlinien; der Grundton und die Obertöne werden kaum moduliert. Durch einen Pfeifenresonator (Becher) konnte der Schalldruckpegel deutlich erhöht werden (Rauschabstand > 40dB). Diese Pfeife ist für das Windradinstrument geeignet!

Da für ein Windradinstrument sich erst die durchschlagenden Zungenpfeifen als geeignet bewiesen haben, werden demnächst für die nicht geeigneten Quellen nur einige Beispielergebnisse gezeigt, die Messergebnisse an durchschlagenden Zungenpfeifen werden jedoch ausführlicher vorgeführt. Als Beispiel wird hierbei die durchschlagende Zunge E'' genommen.

6.2 Messung des Schalldruckpegels im „einfachen Windkanal“ (Testergebnisse einer aufschlagenden Zungenpfeife)

Bild 5.1 zeigt die Stationärspektren des Grundgeräusches (oben) und der im Bild 4.6 dargestellten aufschlagenden Zungenpfeife (unten) im „einfachen Windkanal“ bei 7 m/s und bei 15 m/s Windgeschwindigkeiten. Die Pfeife funktioniert im Windkanal gut und auch wie hierbei erwartet wurde, enthält das Stationärspektrum viele Obertöne. Der Schalldruckpegel und damit auch das Signal zu Rauschen Verhältnis wäre akzeptierbar. Es treten auch nichtharmonische Spektrumkomponenten auf (was aber auch bei der normalen Orgelnutzung vorkommt, wodurch dies noch nicht gegen eine Windradanwendung sprechen würde). Jedoch wird die Frequenz der Teiltöne vom Winddruck beeinflusst, wodurch Tonhöhen-Modulationen auftreten (siehe breite Spektrallinien). Wegen der Tonhöhenmodulationen müssen die aufschlagenden Zungenpfeifen auch für nicht geeignet eingestuft werden.

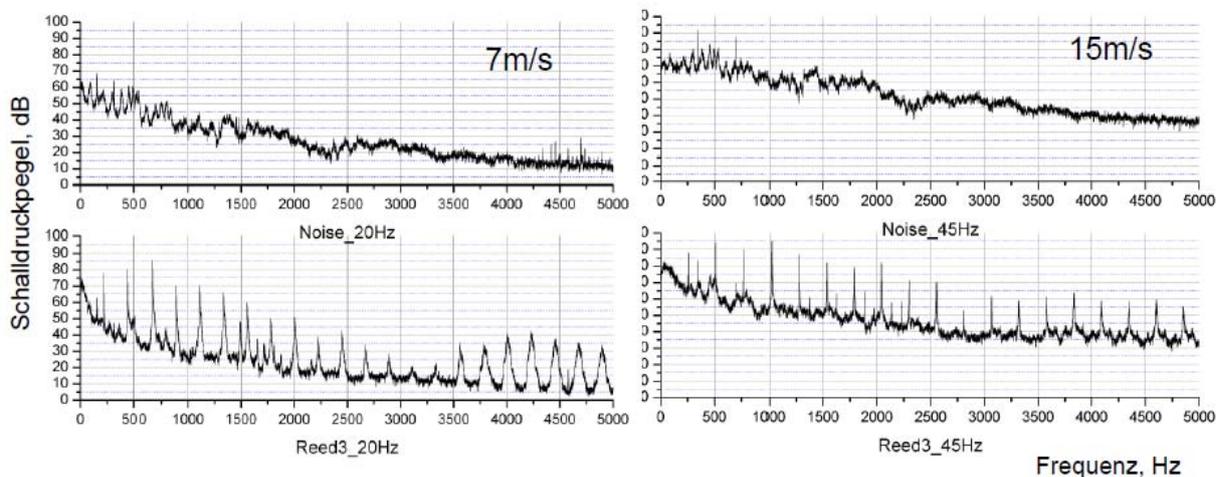


Bild 5.1 Stationärspektren des Grundgeräusches (oben) und der im Bild 4.6 dargestellten aufschlagenden Zungenpfeife (unten) im „einfachen Windkanal“ bei 7 m/s und bei 15 m/s Windgeschwindigkeiten

6.3 Messung des Schalldruckpegels im „Großen Windkanal“ (Testergebnisse der durchschlagenden Zunge E'')

Bild 5.2 zeigt die Stationärspektren des Grundgeräusches (oben) und der durchschlagenden Zunge E'' ohne Resonator im „großen Windkanal“ bei 15 m/s und bei 18 m/s Windgeschwindigkeiten. Bei den Grundge-

räuschmessungen erscheinen im tiefen Frequenzbereich einige tonale Komponenten, die bei der Auswertung der Spektren mit gemessenen Schallquellen betrachtet werden müssen. Mit größerer Windgeschwindigkeit wird das Grundgeräusch etwas größer.

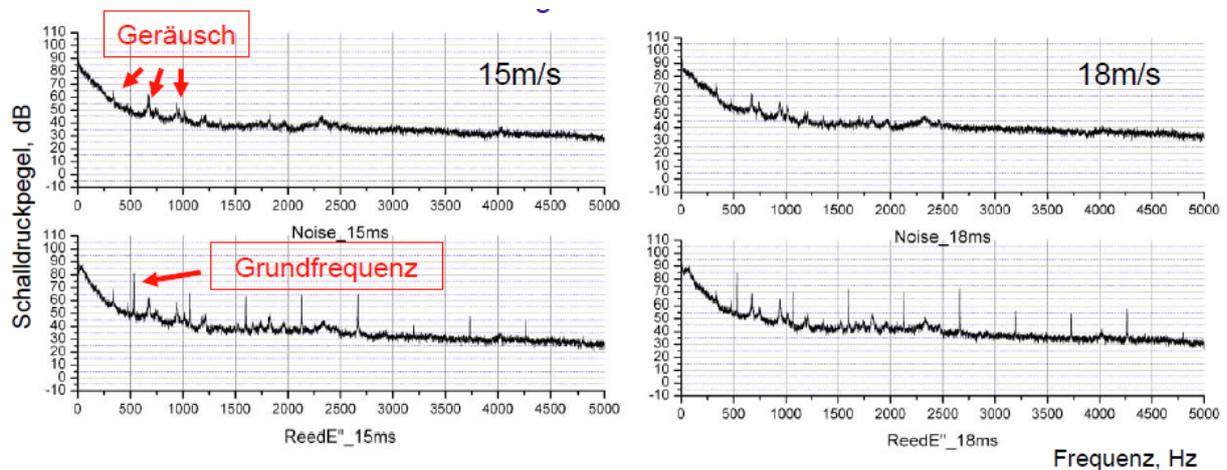


Bild 5.2 Stationärspektren des Grundgeräusches (oben) und der durchschlagenden Zunge E'' ohne Resonator (unten) im „großen Windkanal“ bei 15 m/s und bei 18 m/s Windgeschwindigkeiten

Auffällig ist relativ zu allen anderen gemessenen Quellen (siehe auch Anlage 4), dass hier die Spektrumlinien nicht ausgebreitet sind, d.h. die Zungenfrequenz trotz Druckschwankungen im Wind stabil erscheint. Jedoch klingt die Zunge ohne Resonator (Becher) sehr leise.

Bild 5.3 zeigt die Stationärspektren des Grundgeräusches (oben) und der durchschlagenden Zunge E'' mit Resonator (unten) im „großen Windkanal“ bei 19 m/s und bei 20 m/s Windgeschwindigkeiten. Es ist gut zu beobachten, dass die Spektrumlinien auch hier nicht ausgebreitet sind, d.h. die Zungenfrequenz trotz Druckschwankungen im Wind stabil bleibt. Die aufschlagende Zunge mit Resonator (Becher) klingt auch ziemlich stark. Der Schalldruckpegel des Grundtones ist mit mehr, als 40 dB stärker, als das Grundgeräusch, was ein gutes Signal zu Rauschen Verhältnis bedeutet.

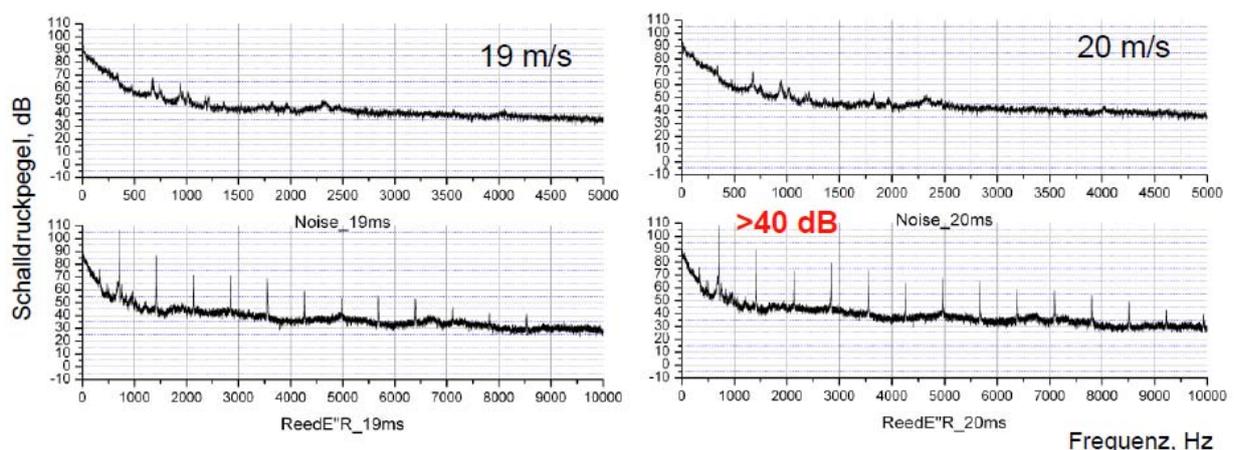


Bild 5.3 Stationärspektren des Grundgeräusches (oben) und der durchschlagenden Zunge E'' mit Resonator (unten) im „großen Windkanal“ bei 19 m/s und bei 20 m/s Windgeschwindigkeiten

6.4 Messung des Schallleistungspegels im „Großen Windkanal“ (Testergebnisse der durchschlagenden Zunge E'')

Um abschätzen zu können, ob der, von einer durchschlagenden Zungenpfeife abgestrahlte Klang dazu geeignet ist, die Zuschauer, die in mehr, als 100 m Entfernung vom Windrad stehen, mit Schallenergie zu versorgen, wurde bei einigen untersuchten Schallquellen auch die abgestrahlte Schallleistung ausgemessen. Die Messungen wurden im „großen Windkanal“ (Schalldämpferprüfstand des IBP) durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der Messmethode ist in der Anlage 2 zu finden (IBP-Mitteilung). Die Bestimmung der Schallleistungspegel von den Schallquellen aus Schalldruckmessungen erfolgte nach der Norm „DIN EN ISO 3745 – Akustik“ [2].

Die Bilder 5.4 und 5.5 zeigen die linearen Schallleistungsspektren in Terzbändern der durchschlagenden Zunge E'' mit Resonator (ermittelt im „großen Windkanal“ bei 19 m/s und bei 22 m/s Windgeschwindigkeiten (Messergebnisse auf einer linearen Frequenzskala dargestellt). Der Grundton der Pfeife fällt zwischen den Terzbereichen von 500 Hz und 630 Hz. Bei erhöhter Windgeschwindigkeit wird die Schallleistung des Grundtones erhöht, aber auch die höheren Obertöne werden etwas stärker. Im unteren Frequenzbereich (unterhalb des Grundtones) kann nur die Erhöhung des Grundgeräusches beobachtet werden (die Spitze um 200 Hz wird durch den Windkanalmesssystem hervorgerufen, diese gehört nicht zum Pfeifenklang).

Bild 5.6 zeigt den A-bewerteten Schallleistungspegel der durchschlagenden Zunge E'' mit Resonator (ermittelt im „großen Windkanal“ bei 19 m/s und bei 22 m/s Windgeschwindigkeit, wobei in Bild 5.7 der lineare Schallleistungspegel der selben Pfeife bei den selben Windgeschwindigkeiten dargestellt sind (die Messergebnisse sind in Terzbereichen auf einer logarithmischen Frequenzskala dargestellt). Der Grundton der Pfeife fällt zwischen den Terzbereichen von 500 Hz und 630 Hz. Bei erhöhter Windgeschwindigkeit wird die Schallleistung des Grundtones erhöht, aber auch die höheren Obertöne werden etwas stärker. Bei einer eventuellen Windradanwendung wäre die Windgeschwindigkeiten höher, wodurch auch höhere Schallleistungswerte zu erwarten sind. Im unteren Frequenzbereich (unterhalb des Grundtones) kann nur die Erhöhung des Grundgeräusches beobachtet werden.

Für eine genauere Betrachtung sind in den Tabellen 5.1 und 5.2 je die linearen und die A-bewerteten Schallleistungspegel-Werte in Terzbändern der durchschlagenden Zunge E'' mit Resonator aufgelistet (ermittelt im „großen Windkanal“ je bei 19 m/s und bei 22 m/s Windgeschwindigkeiten).

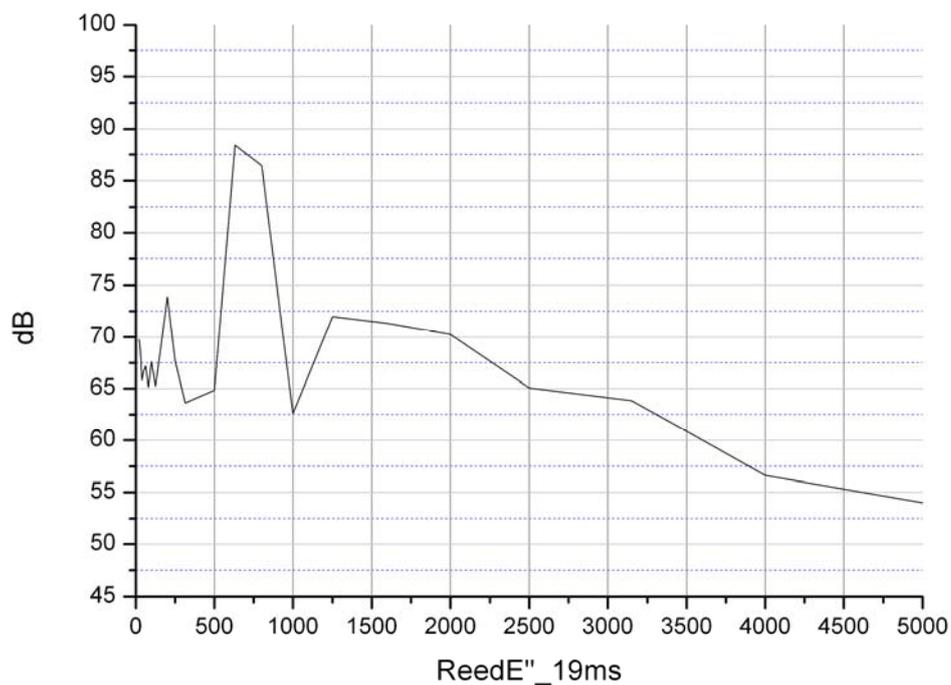


Bild 5.4 Der lineare Schalleistungsspektrum der durchschlagenden Zunge E'' mit Resonator (ermittelt im „großen Windkanal“ bei 19 m/s Windgeschwindigkeit (Messergebnisse in Terzbereichen auf einer linearen Frequenzskala dargestellt)

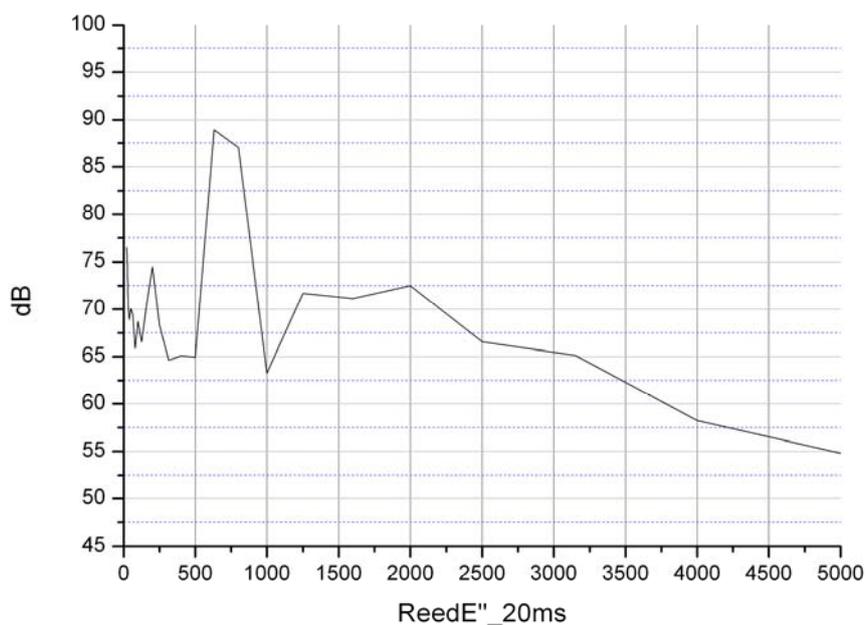


Bild 5.5 Der lineare Schalleistungsspektrum der durchschlagenden Zunge E'' mit Resonator (ermittelt im „großen Windkanal“ bei 20 m/s Windgeschwindigkeit (Messergebnisse in Terzbereichen auf einer linearen Frequenzskala dargestellt)

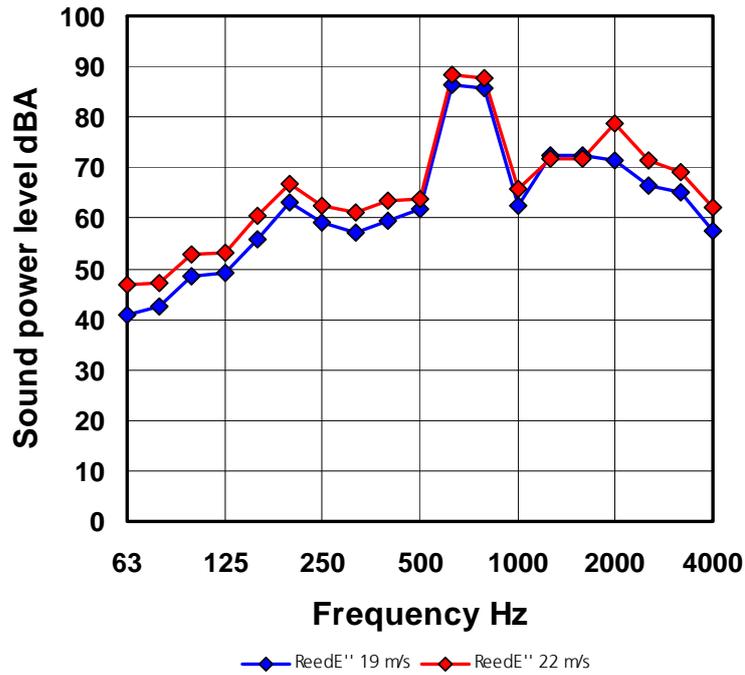


Bild 5.6 Der A-bewertete Schalleistungspegel der durchschlagenden Zunge E'' mit Resonator (ermittelt im „großen Windkanal“ bei 19 m/s und bei 22 m/s Windgeschwindigkeit (Messergebnisse in Terzbereichen auf einer logarithmischen Frequenzskala dargestellt)

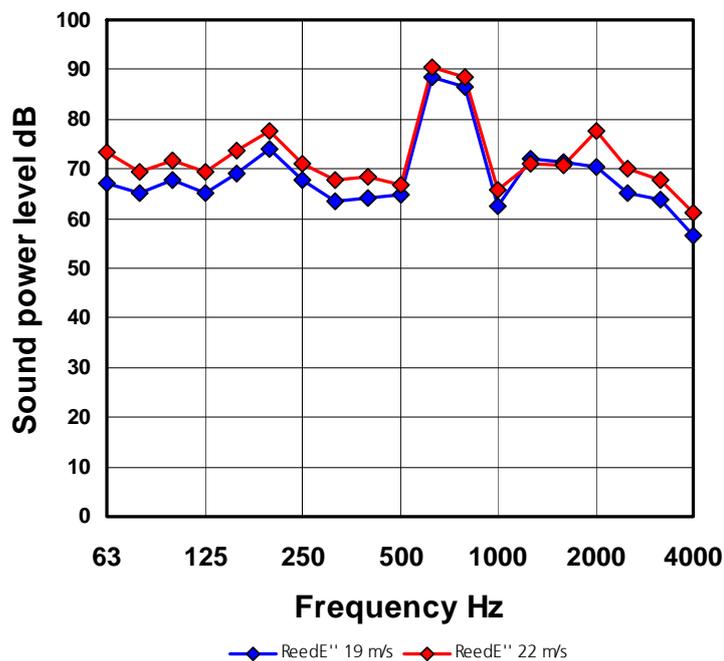


Bild 5.7 Der lineare Schalleistungspegel der durchschlagenden Zunge E'' mit Resonator (ermittelt im „großen Windkanal“ bei 19 m/s und bei 22 m/s Windgeschwindigkeit (Messergebnisse in Terzbereichen auf einer logarithmischen Frequenzskala dargestellt)

Tabelle 5.1 Der lineare und der A-bewertete Schalleistungspegel-Werte in Terbändern der durchschlagenden Zunge E'' mit Resonator (ermittelt im „großen Windkanal“ bei 19 m/s Windgeschwindigkeit
ReedE'' 19 m/s

1/3 Octave Frequency [Hz]	Sound Power Level Linear [dB]	Sound Power Level A-weighted [dBA]
50	67	36
63	67	41
80	65	43
100	68	49
125	65	49
160	69	56
200	74	63
250	68	59
315	64	57
400	64	59
500	65	62
630	88	87
800	86	86
1000	63	63
1250	72	73
1600	71	72
2000	70	71
2500	65	66
3150	64	65
4000	57	58
5000	54	55
Over all level	91	89

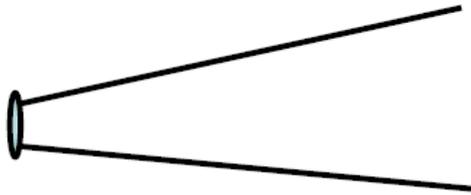
Tabelle 5.2 Der lineare und der A-bewertete Schalleistungspegel-Werte in Terzbändern der durchschlagenden Zunge E'' mit Resonator (ermittelt im „großen Windkanal“ bei 22 m/s Windgeschwindigkeit
ReedE'' 22 m/s

1/3 Octave Frequency [Hz]	Sound Power Level Linear [dB]	Sound Power Level A-weighted [dBA]
50	76	46
63	73	47
80	70	47
100	72	53
125	69	53
160	74	60
200	78	67
250	71	63
315	68	61
400	68	63
500	67	64
630	90	88
800	89	88
1000	66	66
1250	71	72
1600	71	72
2000	78	79
2500	70	71
3150	68	69
4000	61	62
5000	57	58
Over all level	93	92

Der im Kapitel 5.1 erwähnten Kriterien nach, weisen die Ergebnisse der Schalldruckpegel und der Schallleistungsmessungen darauf hin, dass bei durch den aufschlagenden Zungenpfeifen erzeugten Klängen sowohl die Klangqualität als auch die Schallleistung („Klangstärke“) für ein Windradinstrument geeignet wären. Allerdings müssten auch diese Pfeifen akustisch optimiert werden.

6.5 Möglichkeiten zur Stilllegung der durchschlagenden Zungenpfeifen

Eine wichtige Aufgabe ist es eine geeignete Methode zur Stilllegung der Pfeifen zu finden, die für die Fernsteuerung (ein- und abschalten der Töne) unter den Windradbedingungen geeignet ist. Dadurch könnten die einzelnen Pfeifen von einer Klaviatur ferngesteuert gespielt werden. Eine Möglichkeit zur Stilllegung wird in Bild 5.8 gezeigt, wobei der Resonator der Zungenpfeife (Becher) auf der engeren Seite zugemacht wird. Bild 5.9 zeigt eine andere Möglichkeit zur Stilllegung, wobei um die Schwingung der Zunge zu verhindern, wird ein Stück Silikongummi auf die Zunge gedrückt (hier mit Klebeband befestigt).



a)



b)

Bild 5.8 Der Resonator der Zungenpfeife (Becher) wird auf der engeren Seite zugemacht (a) Skizze b) Zur Messung im „großen Windkanal“ vorbereitet

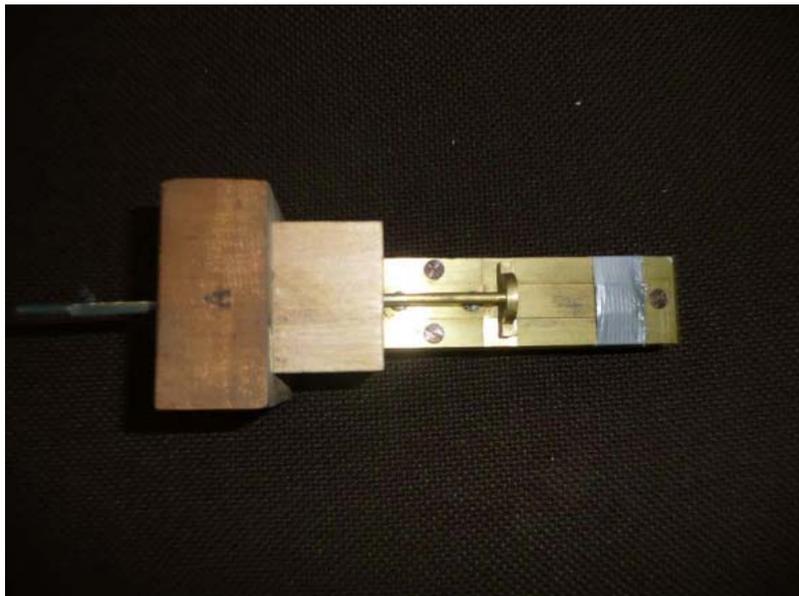


Bild 5.9 Die durchschlagende Zunge wird abgeklebt

Beide Stilllegungsmethoden wurden erst im „einfachen Windkanal“, dann im „großen Windkanal“ getestet. Die Experimente weisen darauf hin, dass zur Stilllegung der durchschlagenden Zungenpfeifen beide Methoden geeignet sind. Allerdings hat sich der, im Projekt für die Steuerung zuständige Experte, Herr Stefan Heuss (Otto Heuss GmbH) für die Anwendung der zweiten Methode entschieden, da seiner Meinung nach die Stilllegung der Zunge praktisch viel einfacher lösbar und mit dieser Methode eine kürzere Reaktionszeit erreichbar wäre.

6.6 Diskussion der Messergebnisse, Auswahl der geeigneten Schallquelle

Die neue Aufgabe, eine Pfeife mit Staudruck ertönen zu lassen, konnte mit Anwendung von geeigneten Trichtern in der Strömung gut gelöst werden. In dieser Machbarkeitsphase des Projektes wurden viele Quellmöglichkeiten zu einem Windradinstrument getestet. Bei den meisten Schallquellen (Kunststoffrohr,

Metallrohr (Lambda-Viertel-Resonator), verschiedene Flaschen, als Helmholtz-Resonatoren, zwei parallele Stäbe) wird jedoch die Entstehung von einem gut geeigneten musikalischen Klang einerseits durch Frequenzmodulationen der Grund- und Obertöne wegen den auftreten Winddruckschwingungen verhindert bzw. gestört. (Ähnliche Winddruckfluktuationen sind aber bei den Windrädern auch dann zu erwarten, wenn die Windradumdrehung konstant gehalten wird, da der natürliche Wind bestimmte Turbulenzen und Fluktuationen auf jeden Fall aufweisen kann.) Andererseits waren die erzeugten Schalldruckpegel nicht groß genug um mit solchen Schallquellen unter Windrad-Bedingungen musizieren zu können.

Bei aufschlagenden Zungenpfeifen waren die Ergebnisse schon deutlich besser, Frequenzmodulationen traten jedoch auch hier auf.

Erfreulicherweise haben die Experimente bei den durchschlagenden Zungenpfeifen ein eindeutig positives Ergebnis aufgewiesen. Bei diesem Pfeifentyp ist die Grundfrequenz des Klages vom Winddruck weitgehend unabhängig, wodurch musikalische Klänge voraussichtlich auch mit dem, am Windrad erzeugten Staudruck ertönt werden können. Durch einen Pfeifenresonator (Becher) konnte der Schalldruckpegel deutlich erhöht werden. Der Signal zu Rauschen Verhältnis war hierbei größer als 40 dB. Bei den getesteten durchschlagenden Zungenpfeifen konnte festgestellt werden, dass die erzeugte Schalleistung für die Windradanwendung geeignet sein könnte. Allerdings müssten die, im zukünftigen Windradinstrument anzuwendenden Pfeifen akustisch optimiert und auch direkt am Windrad getestet werden.

7 Weitere Pläne und Möglichkeiten für die Verwirklichung des Windradinstrumentes

In diesem Kapitel sind die Ideen aller Projektteilnehmer, die am 30. März 2010 stattgefundenen Abschlussmeeting diskutiert wurden, zusammengefasst. Diese können Anhaltspunkte (ohne eine Bestrebung auf Vollständigkeit) für das weitere Vorgehen der Verwirklichung des Windradinstrumentes liefern. Die Arbeitsteilung und Zuständigkeiten der Projektpartner sind in der Anlage 3 zusammengefasst.

7.1 Allgemeiner Aufbau des Systems

Allgemeiner Aufbau des Systems (**Bild 6.1**):

- 25 Pfeifen auf 3 Rotorblätter verteilt
- Höhe des Windrades 70 m + 35 m Blattlänge
- ca. 3 Sekunden für eine Umdrehung (20 U/min)
- Die Rotorgeschwindigkeit kann auf ca. 1% konstant gehalten werden.
- Die Ansteuerung der Pfeifen soll repetierend erfolgen (somit spielbar über mehroktavige Klaviatur).
- Der Anbau der Pfeifen soll möglichst ohne größere Veränderungen am Windrad erfolgen können (keine Kabel, möglichst wenig Bohrungen usw.).
- Das System soll über ein handelsübliches Keyboard per MIDI angesteuert werden können.

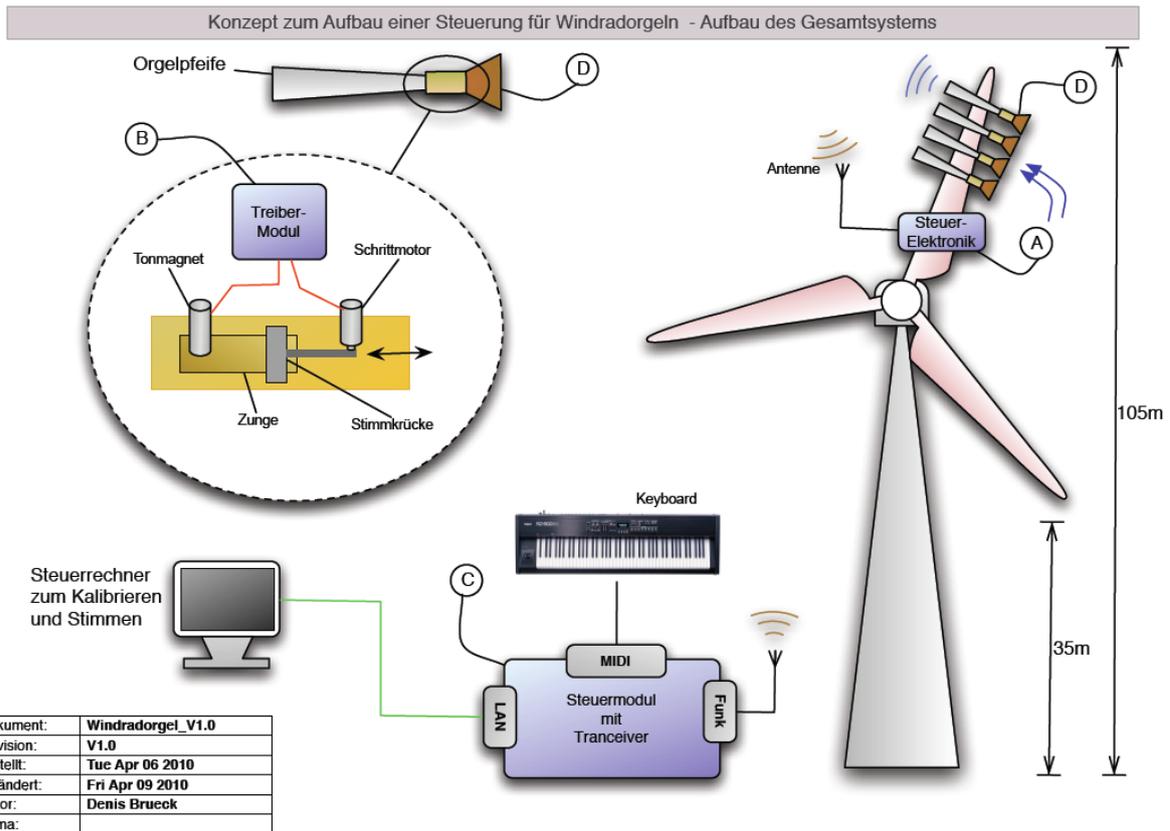


Bild 6.1 Konzept zum Aufbau des Gesamtsystems (Entworfen von H. Brück, i. A. O. Heuss GmbH)

7.2 Pfeifenentwicklung und akustische Optimierung

Für Windradzwecke müssen individuelle durchschlagende Zungenpfeifen entwickelt und akustisch optimiert werden.

- Zuerst muss die Konstruktion einer individuellen, neuartigen Pfeife, die die, am Windrad auftretenden Kräfte ertragen kann, erfolgen (Teamarbeit durch das IBP, durch Orgelbauer und durch Windradexperten). Die neukonstruierte Pfeife muss akustisch optimiert werden. Hierfür müssen Testmessungen sowohl im Akustiklabor des IBP als auch an einem Windrad (im Freifeld) durchgeführt werden. Dabei müssen die Kriterien beachtet werden, dass der Pfeifenklang eine möglichst stabile Frequenz und eine große Schallleistung aufweist.
- Danach müssten sowohl die Konstruktionsentwicklung als auch die akustische Optimierung von 25 Pfeifen erfolgen (alle beteiligten Partner).
- In einem weiteren Schritt müsste das Magnetventil für die Pfeifensteuerung in die Konstruktion eingebaut werden (alle beteiligten Partner)

7.3 Ansteuerung der Zunge (Abschalten des Tons)

Vom Fraunhofer IBP wurden zwei Vorschläge zur Abschaltung des Tones gemacht.

- Verschließen des Resonators mit einer Art Deckel
- Fixieren der Zunge über einen Magneten

Von Herrn Heuss wurde Vorschlag a) ausgeschlossen, da die sich ergebende Latenz zum Verschließen des Resonators zu groß ist. Deswegen wird ein System, welches die „Stilllegung“ der Zunge über einen Magneten (Tonmagnet) vornimmt, entwickelt.

Anforderungen:

- Der Magnet sollte im stromlosen Zustand den Ton abschalten. Im Störfall darf kein Ton zu hören sein!
- Die Stromaufnahme muss möglichst gering sein, da das System eventuell über Akkus betrieben werden soll.
- Um den Magneten konstruieren zu können, muss zunächst bekannt sein, welche Kräfte zum Ein- bzw. Ausschalten benötigt werden.
- Kann die Zunge aus einem magnetischen Material hergestellt werden? Dies könnte den Mechanismus vereinfachen.
- Die Ein- und Ausschaltverzögerung (Latenz) sollt möglichst gering sein (< 15ms).
- Die Ansteuerung muss die entstehenden Zentrifugalkräfte aushalten (robustes Design ist wichtig!)

Es wurde festgelegt, dass zunächst die Konstruktion der Pfeife erfolgt und danach ein entsprechender Tonmagnet entwickelt wird.

7.4 Stimmung der Pfeifen

Um die einzelnen Pfeifen des Systems im Betrieb stimmen zu können, wurde von der Firma Heuss vorgeschlagen, einen Schrittmotor (evtl. Linearmotor) zum Betätigen der Stimmkrücken vorzusehen.

7.5 Aufbau der Steuerung

In Bild 6.2 ist das Konzept zur Ansteuerung der Pfeifen, in Bild 6.3 das Konzept zur Steuereinheit dargestellt. Das System soll über einen MIDI-Eingang verfügen dessen Signale über die zu entwickelnde Steuerung in Schaltbefehle für die Tonmagnete umgesetzt werden. Alle Signale sollen über Funk übertragen werden.

Um die Akzeptanz der Orgel bei den Windradbetreibern zu erhöhen, sollen die einzelnen Teile des Systems möglichst mit einer eigenen Stromversorgung auskommen. Hierzu könnte überlegt werden, eine Ladeschaltung für die Akkus zu integrieren. Diese könnte dann beispielsweise von Solarzellen gespeist werden.

Weiterhin müssen das Auftreten von Doppler-Effekten sowie die durch die großen Entfernungen bedingten Laufzeiten des Schalls überlegt werden. Um Laufzeiten kompensieren zu können, soll im System ein „intelligentes“ Verzögerungsglied integriert werden, welches je nach Position des Blattes unterschiedliche Signalverzögerungen errechnet. Hiermit kann realisiert werden, dass der Schall von unterschiedlich positionierten Pfeifen „gleichzeitig“ beim Zuhörer ankommt.

Beispielrechnung:

Rotorblatt (oben): 105 m

Rotorblatt (unten): 35 m

Abstand der Zuhörer vom Windrad: 30 m

Laufzeit (oben): 321 ms

Laufzeit (unten): 135 ms

Die ergibt einen Laufzeitunterschied von 186 ms!!

Diese Laufzeiten sind sehr stark als Verzögerung/ Delay wahrnehmbar und sollten in jedem Fall kompensiert werden. Ein Problem wird sich bei diesen Verzögerungen für den Organisten einstellen, da der gespielte und der gehörte Ton zeitlich versetzt sind. Das System muss über ein Steuersystem gestimmt und kalibriert werden können.

Konzept zum Aufbau einer Steuerung für Windradorgeln - Ansteuerung der Pfeifen

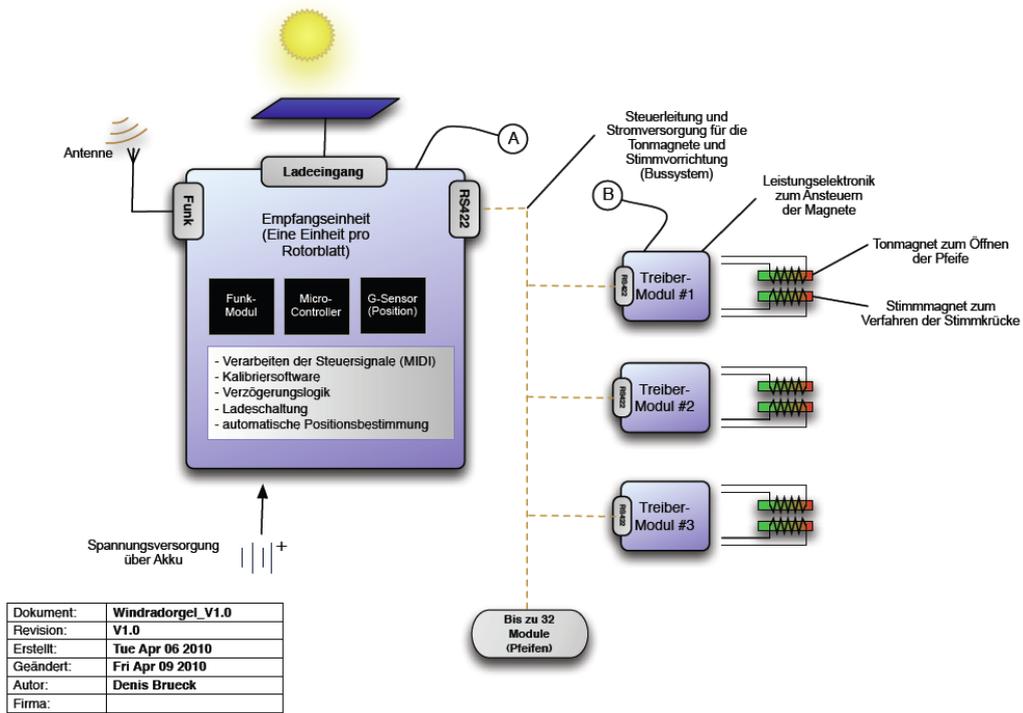


Bild 6.2 Konzept zur Ansteuerung der Pfeifen (Entworfen von H. Brück, i. A. Otto Heuss GmbH)

Konzept zum Aufbau einer Steuerung für Windradorgeln - Steuereinheit

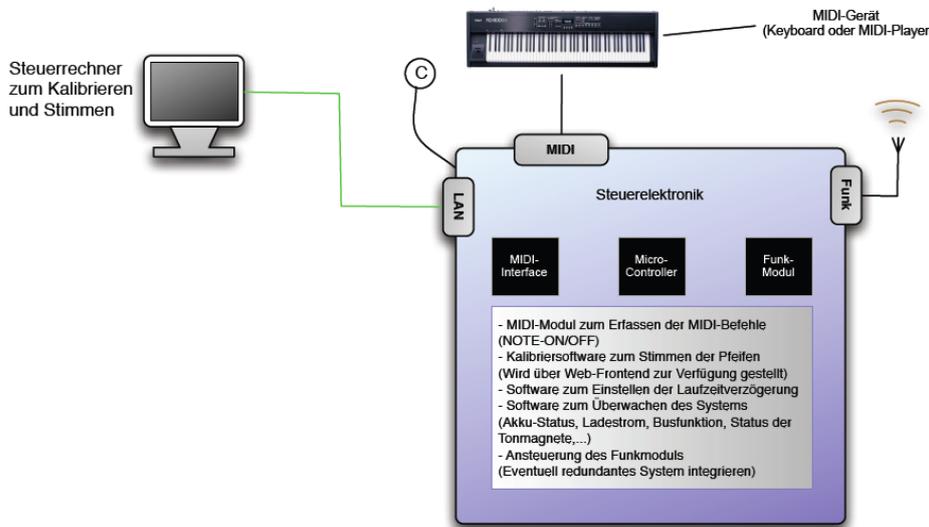


Bild 6.3 Konzept zur Steuereinheit (Entworfen von H. Brück, i. A. Otto Heuss GmbH)

7.6 Technische Windradaspekte bei der Weiterentwicklung des Instrumentes

Die Vorversuche zur Ermittlung der Bauform der Orgelpfeife beinhalten noch keine realistischen Anströmverhältnisse, wie sie am drehenden Rotorblatt einer Windenergieanlage (WEA) auftreten.

Folgende Aspekte sind nach der Optimierung im Windkanal im Freifeld mittels Prototypentest noch zu untersuchen und ggf. zu optimieren:

- Einfluss der Drehung auf die Anströmung auf die Orgelpfeife
- Einfluss der Drehzahl auf die Anströmung, z.B. Lautstärkeänderung (als Validierung der Windkanalversuche)
- Einfluss der Turbulenz (schnelle Windgeschwindigkeitsänderungen und Windrichtungsänderungen)
- Einfluss von Manövern der WEA, z.B. Schalten des Generators und Azimutmanöver bei Änderung der Windrichtung
- Aspekte der Schallabstrahlung, z.B. auch Doppler-Effekte und Einfluss der Ausrichtung der WEA-Gondel

Weitere technische Aspekte sind zu untersuchen:

- Arrangement der einzelnen Orgelpfeifen zu einem Register auf einem oder mehreren Rotorblättern
- Optimierung der Positionen der Orgelpfeifen und Register am Rotorblatt und auch der Positionierung der Zunge hinsichtlich guter Spielbarkeit
- Festigkeitsnachweise: Ermittlung von mittleren und maximalen Lasten, um Vorgaben für die konstruktive Auslegung von Orgelpfeifen und Befestigungen zu bestimmen
- Änderungen am Rotorblatt für die Aufnahme der Windradorgel
- Rechnerischer Nachweis und konstruktive Auslegung der Befestigung der Orgelregister am Rotorblatt
- Wahl der geeigneten Materialien
- Stromversorgung der Verschlüsse bzw. Blockierungen der Orgelzungen für die Zeiten ohne Orgelbetrieb und im Betrieb der Windradorgel für die Stimmung der Pfeifen sowie für Fernwirkung während des Konzerts
- Notwendige Einbauten im Rotorblatt, der Rotornabe und der Gondel, z.B. Funkübertragung, Kabel o.ä.
- Option für ein Klangabnehmer inkl. Midi-Schnittstelle
- Weitere Aspekte, die den Betrieb der WEA beeinflussen können:
 - Ertragminderung durch die Windradorgel
 - Blitzschutz
 - Änderung der Anlagensteuerung für den Konzert-Betrieb, z.B. Regelung auf konstante Drehzahl

7.7 Weitere Vorgehensweise

Nachdem die Fragen zur Orgelpfeifengestaltung und zum geeigneten Werkstoff geklärt sind, erfolgt der Bau von einem Funktionsmuster für den Test im Freifeld.

Parallel zu dem beschriebenen Ablaufplan laufen auch die Vorbereitungen zur Prüfung der Standorte für die Realisierung des Projekts. Dazu wurden bereits im Vorfeld Standorte in Betrachtung gezogen, Standort Streitberg, Standort Fröttmaninger in Nähe zum Allianzstadion, München.

8 Anlage 1 – Definitionen, Erklärungen

8.1 Der Staudruck

Der Luftdruck (Gesamtdruck) in einer Strömung ist eine Energieform und setzt sich aus drei Anteilen zusammen [3]:

Der hydrostatische Druckanteil hängt von der Höhe im Strömungsgebiet ab und entsteht durch die Lageenergie der Luft. Der statische Druckanteil entsteht durch die Zuführung von mechanischer Energie, z.B. wenn Luft durch einen Kolben in einem Zylinder komprimiert wird. Der dynamische Druckanteil ergibt sich aus der Bewegungsenergie der strömenden Luft und wächst quadratisch mit der Geschwindigkeit.

Der Staudruck ist als Summe der statischen und dynamischen Druckanteile definiert und entsteht immer an Punkten, an denen eine Strömung aufgestaut wird.

Beispiel 1 (allgemeiner Fall):

Durch einen Kolben wird in einem horizontalen Zylinder eine Strömung vorbei an einem geschlossenen Trichter erzeugt (vgl. Bild 7.1). Da die Bewegung horizontal erfolgt, ist der hydrostatische Druckanteil (p_{hyd}) an den Positionen 1 und 2 gleich groß (die Lageenergie ändert sich nicht). An Position 1 entsteht durch die Kolbenbewegung ein statischer Druckanteil p_{stat} (als Folge der Komprimierung) und ein dynamischer Druckanteil p_{dyn} (als Folge der Luftbewegung). An Position 2 im Trichter wird die Luftströmung jedoch aufgestaut und bis zum Ruhezustand abgebremst. Der dynamische Druckanteil wandelt sich in zusätzlichen statischen Druck (als Folge einer Komprimierung durch das Aufstauen) um. Der sich aus beiden statischen Anteilen ergebende Druck ist der Staudruck.

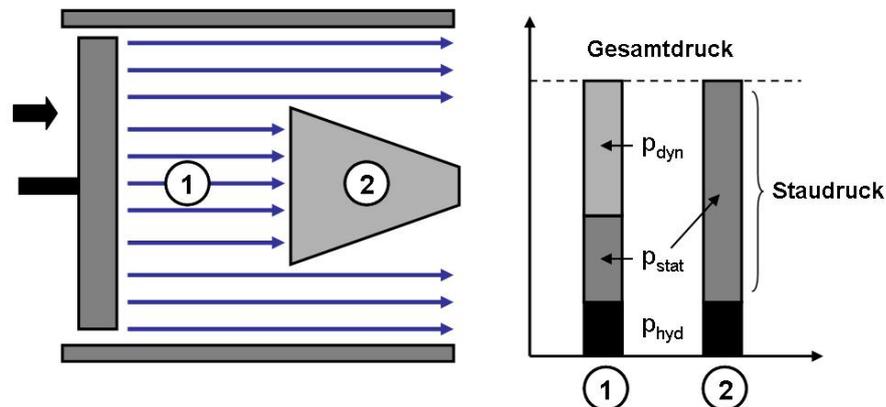


Bild 7.1 Entstehung des Staudrucks an einem von komprimierter Luft umströmten Körper

Beispiel 2 (Spezialfall, ähnlich wie beim Windrad):

Luft strömt horizontal an einem geschlossenen Trichter vorbei, diesmal in freier Umgebung (vgl. Bild 7.2). Im Trichter wird die Luft aufgestaut und der dynamische Druckanteil wandelt sich infolge der Kompression in statischen Druck um. Da eine externe Kompression wie im Beispiel 1 nicht vorhanden ist, ist der Staudruck hier genau so groß wie der dynamische Druck.

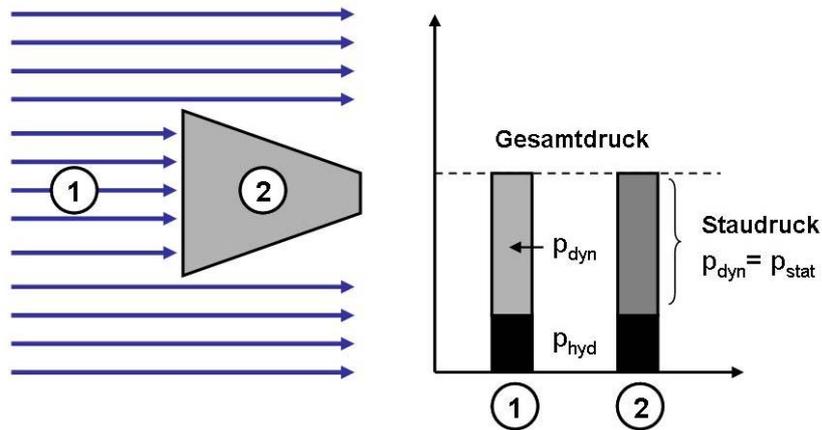


Bild 7.2 Entstehung des Staudrucks an einem in freier Umgebung umströmten Körper

8.2 Der Resonator, der Helmholtz-Resonator

Ein **Resonator** ist ein sehr schwingfähiges System, dessen Komponenten auf *eine bestimmte Frequenz (Eigenfrequenz)* in der Art abgestimmt sind, dass der Resonator bei Anregung mit dieser Frequenz aus-schwingt (Resonanz). Man unterscheidet mechanische, akustische; usw. Resonatoren.

1. Der einfachste mechanische Resonator besteht aus einer Feder und einer Masse (Bild 7.3).

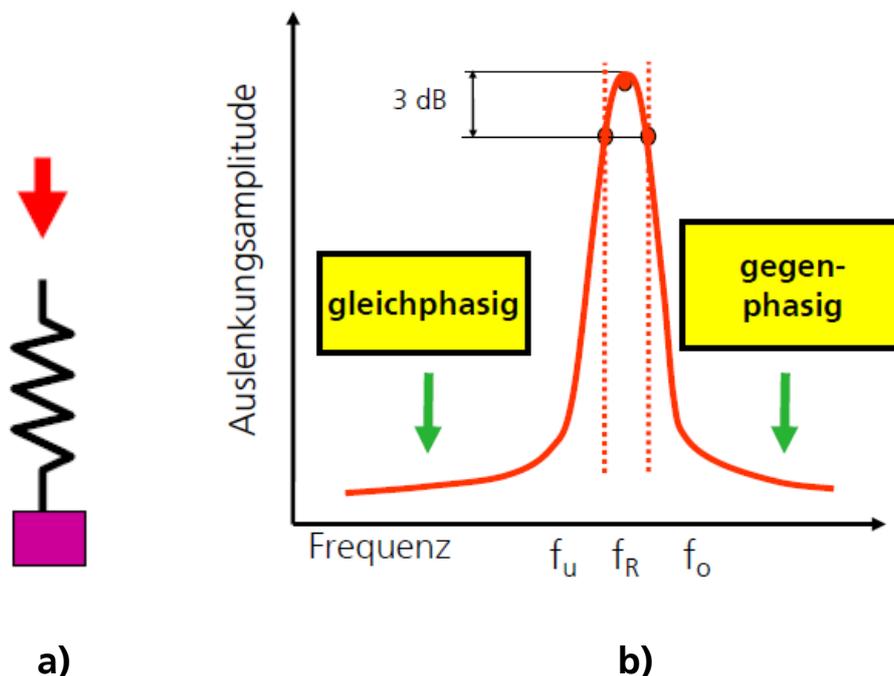


Bild 7.3 Der einfachste mechanische Resonator: ein Feder – Masse-System (a) Darstellung der Resonanzkurve (Frequenz- Auslenkung-Diagramm) (b)

2. Akustische Resonatoren (Luftschall) bestehen aus einem abgeschlossenen oder teilweise offenen Luftvolumen. Die Elastizität der Luft in einem Hohlraum und die Masse der Luft in einer rohrartigen Öffnung darin führt zu sehr tiefen Resonanzfrequenzen, wie bei einer Bassreflexbox. Der Helmholtz-Resonator ist ein teilweise offener Hohlraumresonator. Ein Helmholtz-Resonator besteht aus einem Gasvolumen mit einer engen Öffnung nach außen (Bild 7.4). Durch die Elastizität des Luftvolumens im Inneren (V) in Kombination mit der trägen Masse der in der Öffnung befindlichen Luft entsteht ein mechanisches Masse-Feder-System mit einer ausgeprägten Eigenresonanz

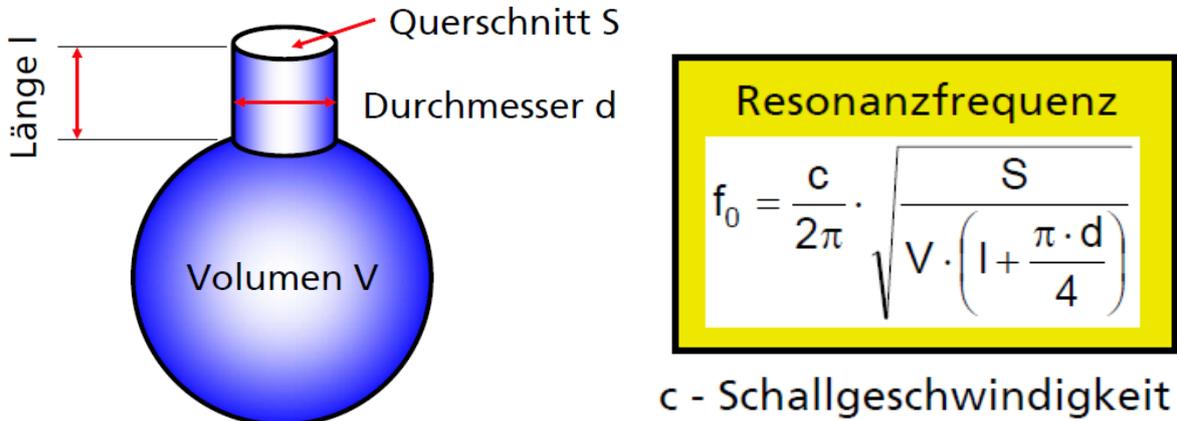


Bild 7.4 Der Helmholtz-Resonator und die einfache Berechnung dessen Resonanzfrequenz

8.3 Die Kirchenorgel

8.3.1 Funktionsprinzip einer Kirchenorgel

In Bild 7.5 sind die Hauptbestandteile einer Orgel dargestellt. Der Wind¹, den die Pfeifen zum Erklängen benötigen, wird von einem Gebläse erzeugt. Dieses Gebläse ist mit dem sogenannten Balg verbunden, das ist ein Kasten mit einem beweglichen Deckel, der als Puffer dient, um den im Betrieb schwankenden Windbedarf auszugleichen. Weiterhin wird mit auf dem Balgdeckel aufgelegten Gewichten der Betriebsdruck der Orgel eingestellt. Das Rollventil regelt in Verbindung mit dem Balgdeckel die Windzufuhr, die je nach Größe und Anzahl der klingenden Pfeifen unterschiedlich sein kann. Vom Balg aus wird - durch ein Windkanalsystem verbunden - die Windlade auf der die Pfeifen stehen mit Wind versorgt. Die Windlade selbst besteht aus dem sogenannten Windkasten und verschiedenen Kanzellen. Betätigt der Organist eine Taste öffnet sich das Tonventil der entsprechenden Kanzelle, die im Windkasten aufgestaute Luft strömt in die Kanzelle ein, und die Pfeife kann erklingen. Auf einer Kanzelle befinden sich Pfeifen gleicher Tonhöhe aber von unterschiedlichem Klangcharakter. Soll eine oder mehrere Pfeifen dieser Kanzelle erklingen, muss zusätzlich zur gedrückten Taste der Klaviatur die entsprechende Registrierung getroffen werden (ein Register ist eine Gruppe von Pfeifen mit unterschiedlicher Tonhöhe aber gleicher Klangfarbe). Durch die Einregistrierung werden die durch Schleifer verschlossenen Eintrittsöffnungen der Pfeifen freigegeben und dadurch der erwünschte Klangcharakter erzielt.

¹ Orgelbauer bezeichnen die Druckluft, mit der die Orgel betrieben wird, als Wind

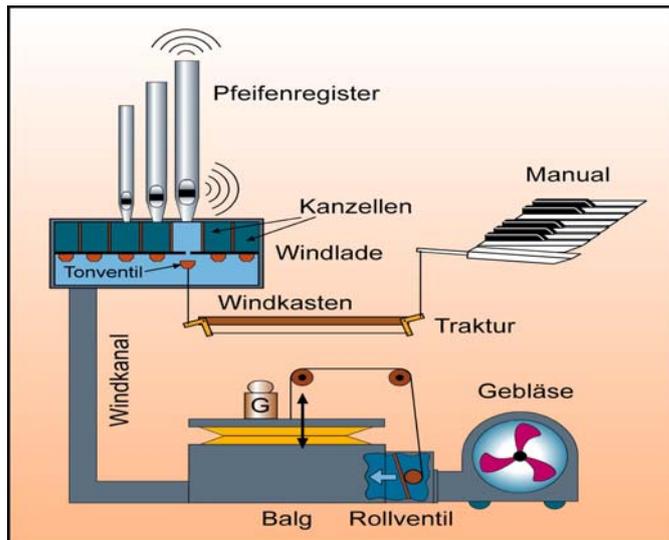


Bild 7.5 Schematische Zeichnung des Funktionsprinzips einer Kirchenorgel

Es existieren unzählige Bauformen für Orgelpfeifen, die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale sind:

- das Pfeifenmaterial (Holz oder Metall)
- die Form des Resonators (zylindrisch, konisch, rechteckig)
- die Art der Schwingungserregung (Zungenpfeifen, Lippenpfeifen)
- die Öffnung des Resonatorenendes (offen, geschlossen (gedackt), teilweise geschlossen (halb gedackt))

Da Orgelpfeifen sehr unterschiedliche Klangcharaktere besitzen können, werden Pfeifen gleicher Klangfarbe zu Registern zusammengefasst und erhalten eine charakteristische Bezeichnung. So wird z.B. das wichtigste Register, welches einer Orgel den strahlenden Klang verleiht, Prinzipalregister genannt.

8.3.2 Die Lippenpfeife der Kirchenorgel

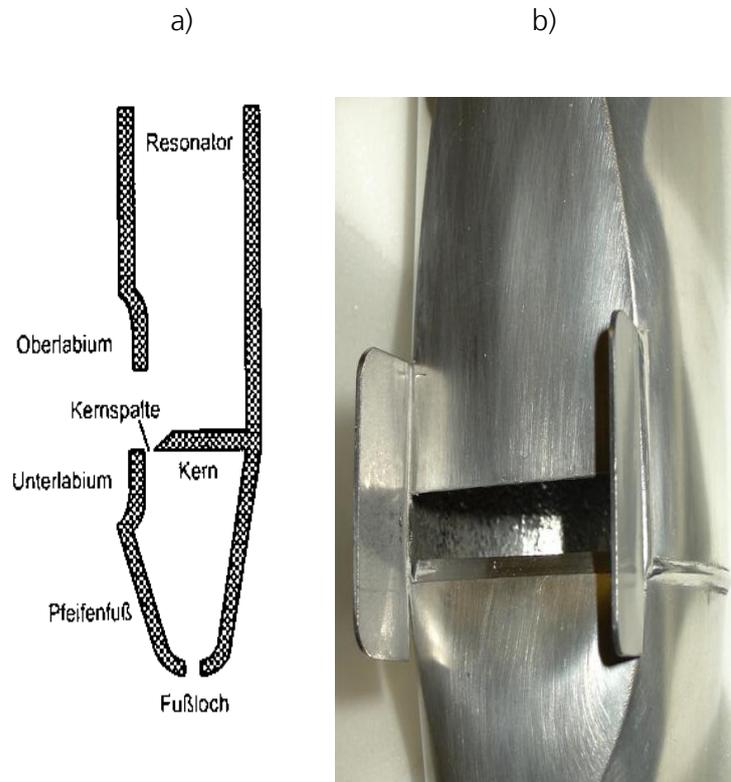


Bild 7.6 a) Längsschnitt einer Lippenpfeife; **b)** Labium mit Bart;

Bild 7.6a zeigt den Längsschnitt durch eine Lippenpfeife. Die zwei Hauptbestandteile sind der Pfeifenresonator und der Pfeifenfuß, welcher der Luftzuführung dient. Diese beiden Teile sind durch den Kern voneinander abgetrennt. Die Weite der Kernspalte (Abstand von Kern zu Unterlabium) beträgt in der Regel 0,3 bis 0,8 mm, sodass hier der Luftstrom als sehr schmales Band austritt. Oft sind seitlich des Labiums sogenannte Bärte (siehe Bild 7.6b) angebracht, um ein seitliches Ausweichen des Luftbands zu vermeiden. Die Festlegung der genauen Dimensionen einer Pfeife wird vom Orgelbauer Mensurierung genannt. Im Folgenden sind einige wichtige Parameter aufgeführt:

- Resonatorlänge
- Resonatordurchmesser
- Aufschnitthöhe (Abstand Oberlabium-Unterlabium)
- Labiumbreite
- Kernspaltenweite (Abstand Kern-Unterlabium)

8.3.3 Die Zungenpfeife der Kirchenorgel

Die zweite Gruppe der Orgelpfeifen sind die *Lingualpfeifen* oder *Zungenpfeifen*, bei denen der Luftstrom eine Metallzunge in Schwingungen versetzt, der Klang wird durch einen Resonanzkörper (*Becher*) verstärkt (Bild 7.7). Die Metallzunge schlägt dabei entweder auf eine *Kehle* auf („aufschlagende“ Zungenstimme) oder schwingt durch eine genau passende Öffnung hindurch („durchschlagende“ Zunge). Der Klang von Zungenpfeifen ist wesentlich obertonreicher als der von Lippenpfeifen.

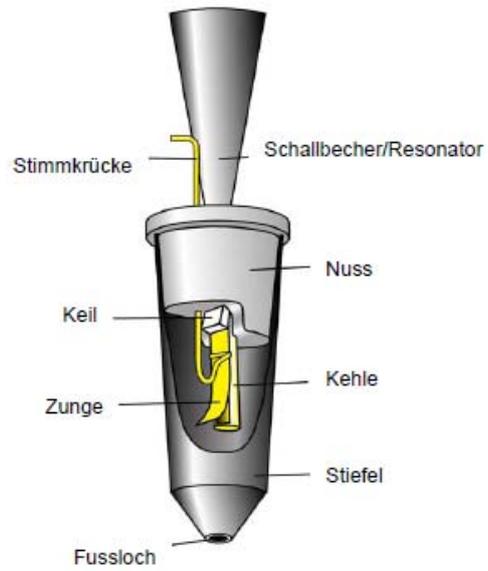
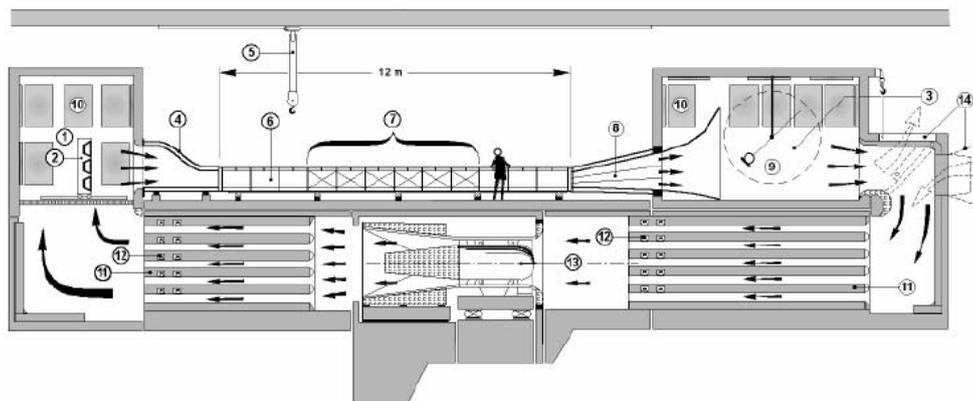


Bild 7.7 Längsschnitt einer Zungenpfeife

9 Anlage 2 – Der „große Windkanal“ – technische Daten und Messmethoden

9.1 Der Schalldämpferprüfstand (Windkanal) des IBP

Schalldämpferprüfstand



Technische Daten

Messstrecke ⑥

Länge: 12 m

Breite: 1000 mm; variabel im mittleren Bereich (6 m Länge) von 500 bis 1300 mm
in 50 mm-Schritten

Höhe: 500 mm

Sendehallraum ①

Länge: 4 m

Breite: 6,25 m

Höhe: 4,25 m

Volumen: 106 m³

Akustische Ausrüstung: Lautsprecherwand: 2800 W, Verstärkerleistung: 1500 W

Empfangshallraum ⑨

Länge: 6,5 m

Breite: 6,4 m

Höhe: 4,5 m

Volumen: 187 m³

Akustische Ausrüstung: Drehmikrofon ③

Einlauftrichter ④

Länge: 2 m

Einströmquerschnitt: 2,8 m x 1,4 m

Ausströmquerschnitt: 1 m x 0,5 m

Einschnürung: 8:1

Luftströmung umkehrbar ⑩

Diffusor ⑧

Länge: 5,5 m

Einströmquerschnitt: 1 m x 0,5 m, Ausströmquerschnitt: 3 m x 5 m

Gebläse ⑬

Länge: 6,7 m

max. Durchmesser der Einlaufdüse: 3,3 m, Außendurchmesser der Flügel: 1,6 m

Nabenverhältnis: 0,69

Axialgebläse, zweistufig, Drehrichtung umkehrbar

Drehzahl stufenlos regelbar: ≤ 989 U/min.

Antriebsleistung: ≤ 130 kW

Volumenstrom: ≤ 35 m³/s

Gesamtdruckerhöhung: ≤ 2500 Pa

Prüfobjekt ⑦

Länge normal: ≤ 6 m, max.: ≤ 10 m (bei 1 m Kanalbreite)

Höhe: 497 ± 3 mm

Der Schalldämpferprüfstand des IBP bietet den Herstellern von Schalldämpfern und weiterer strömungstechnischer Komponenten die Möglichkeit, ihre Produkte unter genau definierten Testbedingungen nach der Norm DIN EN ISO 7235 zu prüfen und weiter zu entwickeln. Mit dem für die Dämpfungsmessung verwendeten Substitutionsverfahren wird die durchgelassene Schall-Leistung im Empfangsraum mit und ohne Prüfobjekt in der Einbaustrecke bestimmt.

Beim Einsatz eines Schalldämpfers und anderer Bauteile in einem Strömungskanal sind drei Kenngrößen zu bestimmen, die mit Hilfe des Schalldämpferprüfstands normgerecht ermittelt werden können:

- Einfügungsdämpfungsmaß des Bauteils mit und ohne Strömung,
- Schalleistung des Strömungsgeräusches des Bauteils selbst,
- Druckverlust des Bauteils.

Die 12 m lange Messstrecke (6) des Prüfstands ist an einem Ende über einen Einlauftrichter (4) und am anderen Ende über einen Diffusor (8) an je einen Hallraum angekoppelt. Mit einer Lautsprecherwand (2) wird im Sendehallraum (1) ein Schallfeld erzeugt, in dem am Eintritt in den Kanal die ebene Welle dominiert. Der über die Messstrecke übertragene Schallanteil gelangt in den Empfangshallraum (3), wo sich ein diffuses Schallfeld bildet. Über ein an der Decke montiertes Drehmikrofon (9) im Empfangshallraum können die jeweiligen räumlich und zeitlich gemittelten Schallpegel bestimmt werden. Zur Glättung des modalen Schallfeldes bei sehr tiefen Frequenzen sind in beiden Hallräumen Verbund-Platten-Resonatoren (10) mit geschlossenen Rändern in den Raumkanten eingebaut. Schwere Prüfobjekte können mit einem Kran (5) auf die Messstrecke gehoben werden. Druckverlustmessungen werden zwischen den beiden Hallräumen durchgeführt. Die Luftförderung erfolgt durch ein im Untergeschoss befindliches zweistufiges Axialgebläse (13), dessen Leistung von 130 kW Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 70 m/s im 1 m breiten Kanal ermöglicht. Die Drehrichtung des Gebläses kann umgekehrt werden, so dass das Prüfobjekt sowohl in Richtung des einfallenden Schalls, als auch in entgegengesetzter Richtung durchströmt werden kann. Über die gesamte Länge hat die Messstrecke einen lichten Querschnitt von 500 mm x 1000 mm. Im mittleren Bereich (7) kann die Kanalbreite jedoch über eine Länge von 6 m zwischen 500 mm und 1300 mm in Schritten von 50 mm variiert werden, womit eine beträchtliche Flexibilität für Schalldämpfer- und Bauteilanordnungen besteht. Von außen in die Messstrecke eindringender Luftschall und entlang der Messstrecke übertragener Körperschall sind durch die Modul-Konstruktion der Messstrecke minimiert. Jedes Modul besitzt eine hohe Schalldämmung von außen und eine axiale Körperschallisolierung durch Grummidichtungen an den Stößen.

Durch sorgfältige Schallschutzmaßnahmen wurde sichergestellt, dass nur ein vernachlässigbar kleiner Anteil des vom Gebläse erzeugten Schalls in die Hallräume gelangt. Das Gebläse liegt zwischen Schalldämpferkulissen (11) von 400 mm Dicke mit Luftspalten von 340 mm. Diese sind auf einer Länge von 6 m hinter und 8 m vor dem Gebläse angeordnet. Zur weiteren Bedämpfung bei tiefen Frequenzen sind zuschaltbare aktive Absorberkassetten (12) in die Kulissen integriert.

Um Körperschallstörungen durch das Gebläse auf ein Minimum herabzusetzen, ist dieses vom Baukörper durch doppelt elastische Lagerung auf einem schweren Fundament abgekoppelt. Ferner werden die wichtigsten Teile des Baukörpers selbst elastisch voneinander getrennt.

9.2 Bestimmung der Schalleistungspegel (des Strömungsgeräuschs) im Schalldämpferprüfstand (IBP-Mitteilung)



13 (1986) Neue Forschungsergebnisse, kurz gefaßt

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

U. Ackermann

Bestimmung des Strömungsgeräuschs im Schalldämpfer-Prüfstand

Bei der Belüftung von Gebäuden gelangt neben der Luft auch der vom Gebläse erzeugte Lärm in die angeschlossenen Räume. Deshalb werden in die Strömungskanäle Schalldämpfer eingebaut, die die Lärmbelastigung der in den Räumen wohnenden bzw. arbeitenden Personen verringern. Mit der neuen DIN 45 646 - Messungen an Schalldämpfern in Kanälen - liegt eine Meßvorschrift vor, nach der eine Kennzeichnung von Schalldämpfern vorgenommen werden kann hinsichtlich ihrer

- (a) schalltechnischen Qualität durch Bestimmung der Einfügungsdämpfung D_e mit und ohne Strömung [1]
- (b) aero-akustischen Eigenschaften durch Bestimmung des Schalleistungspegels L_w des Strömungsgeräuschs
- (c) aero-dynamischen Eigenschaften durch Bestimmung des Druckverlustes Δp [2].

Der Schalldämpfer-Prüfstand des IBP [3] erfüllt die Anforderungen der DIN 45 646 sehr gut: Die Prüflinge werden in eine 12 m lange rechteckige Meßstrecke eingebaut, die den Sendehallraum ($V = 106 \text{ m}^3$) und den Empfangshallraum ($V = 187 \text{ m}^3$) verbindet. Die Meßstrecke hat eine Höhe von 0,5 m, die Breite läßt sich zwischen 0,5 m und 1,3 m variieren. Der Volumenstrom kann bei variabler Strömungsrichtung auf maximal $30 \text{ m}^3/\text{s}$ eingestellt werden.

In der sehr variabel einstellbaren Meßstrecke können außer Schalldämpfern auch alle anderen Komponenten von Lüftungsanlagen hinsichtlich der o.g. Parameter untersucht werden.

Strömungsgeräusch

Zur aero-akustischen Kennzeichnung von Schalldämpfern wird im Schalldämpfer-Prüfstand [3] die Schalleistung des Strömungsgeräuschs durch eine Messung des Schalldruckpegels im Empfangshallraum bestimmt. Da die Luft aus einer großen Beruhigungskammer - dem Sendehallraum - in die Meßstrecke einströmt, ist die Strömung dort turbulenzarm und drallfrei, sowie das Strömungsprofil glatt. Das Strömungsgeräusch wird damit bei idealen Anströmbedingungen gemessen. Da das Eigengeräusch des SD-Prüfstands durch sorgfältige Schallschutzmaßnahmen fast vollständig unterdrückt wird, sind Messungen von sehr niedrigen Strömungsgeräuschpegeln möglich, wie sie in hochwertigen Raumluft-technischen (RLT) Anlagen auftreten.

Aus den im Empfangshallraum gemessenen Schalldruckpegeln wird der Schalleistungspegel L_w des Strömungsgeräuschs wie folgt berechnet:

$$L_w = \bar{L}_p - 10 \lg r - 10 \lg \frac{T}{T_0} + 10 \lg \frac{V}{V_0} + 10 \lg \left(1 + \frac{S\lambda}{8V} \right) - 10 \lg \frac{p_a}{p_{a0}} - 14 \text{ dB}$$

Hierin bedeuten:

- \bar{L}_p örtlich und zeitlich gemittelter Oktav- bzw. Terzband-Schalldruckpegel in dB. Die Mittelung wird auf einem Kreis mit 2 m Radius über 4 Umdrehungen im Hallraum durchgeführt (Bild 1)
- r der Transmissionsgrad des Transmissionselements
- T Nachhallzeit des Empfangshallraums, wenn das Transmissionselement schallhart verschlossen ist
- $T_0 = 1 \text{ s}$ Bezugszeit; entfällt
- $V = 187 \text{ m}^3$ Volumen des Hallraums
- $V_0 = 1 \text{ m}^3$ Bezugsvolumen
- λ Wellenlänge entsprechend der Mittenfrequenz des jeweiligen Terz- bzw. Oktavbandes
- S innere Oberfläche des Hallraums = 200 m^2
- p_a Atmosphärendruck am Meßtag
- $p_{a0} = 10^5 \text{ Pa}$ Bezugsdruck

Beispiele

In Bild 2 sind die Oktav-Schalleistungsspektren des Geräuschs eines durchströmten Kulissen-Schalldämpfers für drei Strömungsgeschwindigkeiten aufgetragen. Der Schalldämpfer ist aus $\lambda/4$ -Resonatoren aufgebaut und besteht aus einer 6,7 m langen, 0,5 m breiten und 0,49 m hohen Mittelkulisse, die in die 0,8 m breite Meßstrecke eingebaut war. Das Spektrum weist keine tonalen Anteile auf, die durch die Überströmung der offenen Resonator-kammern auftreten könnten. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 35 m/s im Randkanal beträgt der Schalleistungspegel des Strömungsgeräuschs in der 250 Hz Oktave 83 dB, die Dämpfung der Kulisse beträgt etwa 60 dB, d.h. in dieser Oktave wird die Dämpfung der Kulisse nur bei sehr hohen Pegeln der einfallenden Schallwellen vollständig ausgenutzt.

In Bild 3 ist das Schmalband-Schalldruckspektrum des Strömungsgeräuschs eines Kühlers für drei verschiedene Anströmgeschwindigkeiten abgebildet. Im Spektrum treten deutliche Spitzen auf. Sie werden durch die Schallabstrahlung von Wirbelstraßen verursacht, die bei der Anströmung des im Kühler eingebauten Rohrbündels entstehen.

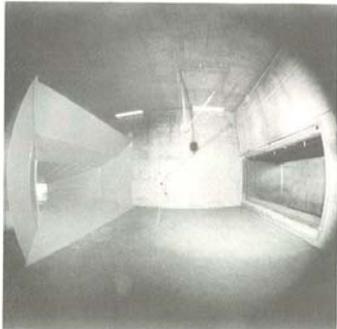


Bild 1: Drehmikron im Empfangshallraum

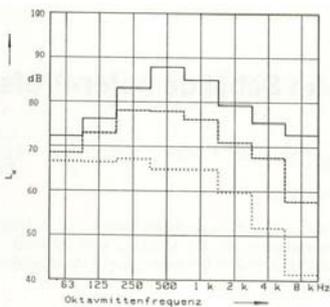


Bild 2: Schalleistungsspektrum einer umströmten Schalldämpferkulissee aus $\lambda/4$ -Resonatoren

- 35 m/s im Randkanal
- - - 25 m/s im Randkanal
- • • 15 m/s im Randkanal

Bild 4 zeigt den A-bewerteten Schalleistungspegel L_{WA} eines durchströmten Wetterschutzgitters in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit. Nach der VDI-Richtlinie 2081 läßt sich der Summenpegel nach der Gleichung

$$L_{WA} = 10 \lg \dot{V} + 30 \lg \Delta p_s - 33 \text{ dB(A)}$$

abschätzen. Darin bedeuten

- \dot{V} = Volumenstrom in m^3/h
- Δp_s = Druckverlust in Pa.

Setzt man die im Schalldämpfer-Prüfstand gemessenen Werte von \dot{V} und Δp_s in die Gleichung ein, so ergeben sich Schalleistungspegel, die bis zu 10 dB(A) über den direkt gemessenen liegen.

Bestimmt man die Schalleistung aus einer Messung in der Meßstrecke, erhält man etwas höhere Pegel [4]. Die Abweichungen liegen jedoch in dem Streubereich, der beim Vergleich verschiedener Normverfahren zur Bestimmung der Schalleistung zu erwarten ist.

Beim Umsetzen der im Prüfstand bestimmten Schalleistungspegel in die Praxis spielt die Größe des Prüflings eine entscheidende Rolle. Ist z.B. die Höhe des Strömungskanals, in den ein Schalldämpfer schließlich eingebaut wird, zehn mal größer als im Prüfstand bei

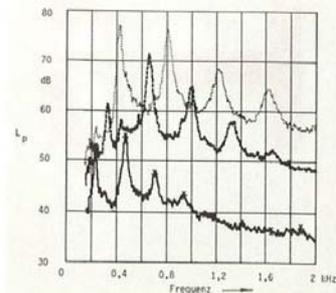


Bild 3: Schalldruckspektrum eines durchströmten Kühlers Bandbreite 5 Hz

- Anströmgeschwindigkeit 10,5 m/s
- - - Anströmgeschwindigkeit 16,0 m/s
- • • Anströmgeschwindigkeit 20,0 m/s

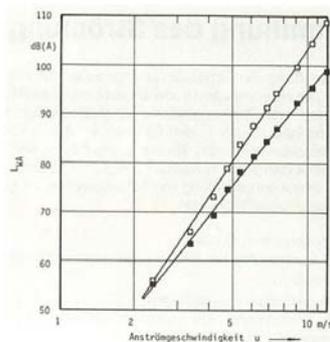


Bild 4: Schalleistung eines durchströmten Wetterschutzgitters

- Messung im Empfangshallraum des SD-Prüfstands
- VDI Richtlinie 2081

sonst gleichen Abmessungen und Strömungsverhältnissen, so kann man erwarten, daß sich auch die Schalleistung um den Faktor 10 (entsprechend 10 dB) erhöht.

Das gleiche gilt für die Breite des Strömungskanals. Beträgt sie in der Praxis das Zehnfache der Breite des Prüfstands bei gleicher Höhe, muß die zehnfache Kulissenanzahl eingebaut werden. Entsprechend kann man ein um 10 dB höheres Strömungsgeräusch erwarten. Die Übertragung der im Prüfstand bestimmten Schalleistungen in die Praxis erfordert also eine Umrechnung auf die jeweilige Einbausituation.

Literatur

- [1] Ackermann, U.: Bestimmung der Einfügungsdämpfung im Schalldämpfer-Prüfstand. IBP-Mitteilung Nr. 106 (1986)
- [2] Ackermann, U.; Fuchs, H.V.: Bestimmung des Druckverlustes im Schalldämpfer-Prüfstand. IBP-Mitteilung Nr. 108 (1986)
- [3] IBP-Prospekt "Schalldämpfer-Prüfstand"
- [4] Ackermann, U.; Fuchs, H.V.; Rambauek, N.: Bestimmung der Schalleistung einer durchströmten Lochplatte. In: Fortschritte der Akustik (DAGA '85). Bad Honnef: DPG-GmbH 1985, 743-746



FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK
7000 Stuttgart 80, Nobelstraße 12, Tel.(0711)6868-00
8150 Holzkirchen (OBB), Postf. 1180, Tel. (08024)643-0

Herstellung und Druck:
IRB Verlag, Informationszentrum RAUM und BAU
der Fraunhofer-Gesellschaft, Stuttgart
Nachdruck nur mit schriftlicher Genehmigung des
Fraunhofer-Instituts für Bauphysik

10 Anlage 3 –Arbeitsteilung und Zuständigkeiten der Projektpartner

Der Verein zur Förderung von Bildung und Publizistik zu Umwelt und Entwicklung ist der Träger des Projekts, der die Finanzierung organisiert und die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie umsetzt. Er koordiniert die Zusammenarbeit zwischen den am Projekt beteiligten Instituten und Unternehmen der Fachbereiche Akustik, Orgelbau, Windrad- und Steuerungs- bzw. MIDI-Technik. (Projektleiter/Ansprechpartner: Konrad Melchers, Vertretung: Herr Gunia)

Das Fraunhofer Institut für Bauphysik, Stuttgart ist für die akustische Entwicklung, Bemessung und Optimierung der neuartigen Schallquellen, die am Windrad angewandt werden, zuständig (Dr. Judit Angster, Dr. Andras Miklos).

Werkstätte für Orgelbau Mühleisen, Leonberg ist für Beratung und Hilfe beim Entwurf, Optimierung und Konstruktion von den neuartigen Pfeifen zuständig (Herr Karlmartin Haap, Geschäftsführer). Es ist geplant, in der zweiten Phase des Projektes den Fachmann für durchschlagende Zungen, Herrn Güntzel (i.A. Werkstätte für Orgelbau Mühleisen, Leonberg)) auch einzubeziehen. Auch die Möglichkeit der Anwendung von magnetischem Material für die Herstellung des Zungenblattes muss von den Orgelfachleuten untersucht werden.

Die Fachfragen im Bereich Windradtechnik werden von Dipl. Ing. Jan Liersch, Geschäftsführer von **Key-Windenergy GmbH, Berlin** koordiniert. Er ist auch für die Herstellung der neuen Pfeifenkonstruktionen aus entsprechenden Materialien (außer des Zungenblatts), die in der 2. Phase des Projektes entschieden werden sollen (wie z.B. Glasfaserverstärktem Kunststoff) zuständig.

Die **Otto Heuss GmbH, Lich** ist für die Steuerungstechnik (Entwicklung eines Mechanismus und dessen Fernsteuerung zum An- und Abschalten der Töne der Pfeifen) und für die MIDI-Technik verantwortlich (Stefan Heuss, Denis Brück (i.A. Otto Heuss GmbH)

11 Literaturverzeichnis

- [1] A. Miklos, J. Angster: Properties of the Sound of Flue Organ Pipes. Acustica united with Acta Acustica. Vol. 86. 2000, (611-622)
- [2] DIN EN ISO 3745 - Akustik – Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Verfahren der Genauigkeitsklasse 1 für reflexionsarme Räume und Halbräume (ISO 3745:2003); Deutsche Fassung EN ISO 3745:2009
- [3] Entworfen von Stephan Pitsch, Fraunhofer IBP

12 Anlage 4 – Powerpoint Präsentation des Fraunhofer-IBP am Abschlussmeeting am 30. März 2010

Machbarkeitsstudie für die Entwicklung, Konstruktion und den Bau eines neuen Musikinstruments Windradorgel

Judit Angster, Felipe Merino Reyes*
András Miklós****

**Fraunhofer IBP Stuttgart, angster@ibp.fhg.de*

****Steinbeis Transferzentrum Angewandte Akustik, Stuttgart*



Durchgeführt im Auftrag des
„Verein zur Förderung von
Bildung und Publizistik zu
Umwelt und Entwicklung e.V.“



- Notwendigkeit des Forschungsvorhabens
Schallerregung mit Staudruck – neue Aufgabe!

- Test Zahlreicher Quellmöglichkeiten

Windradumdrehung konstant, aber Wind → Fluktuationen
Entstehung eines guten musikalischen Klanges (f-Änderungen!) notwendig!

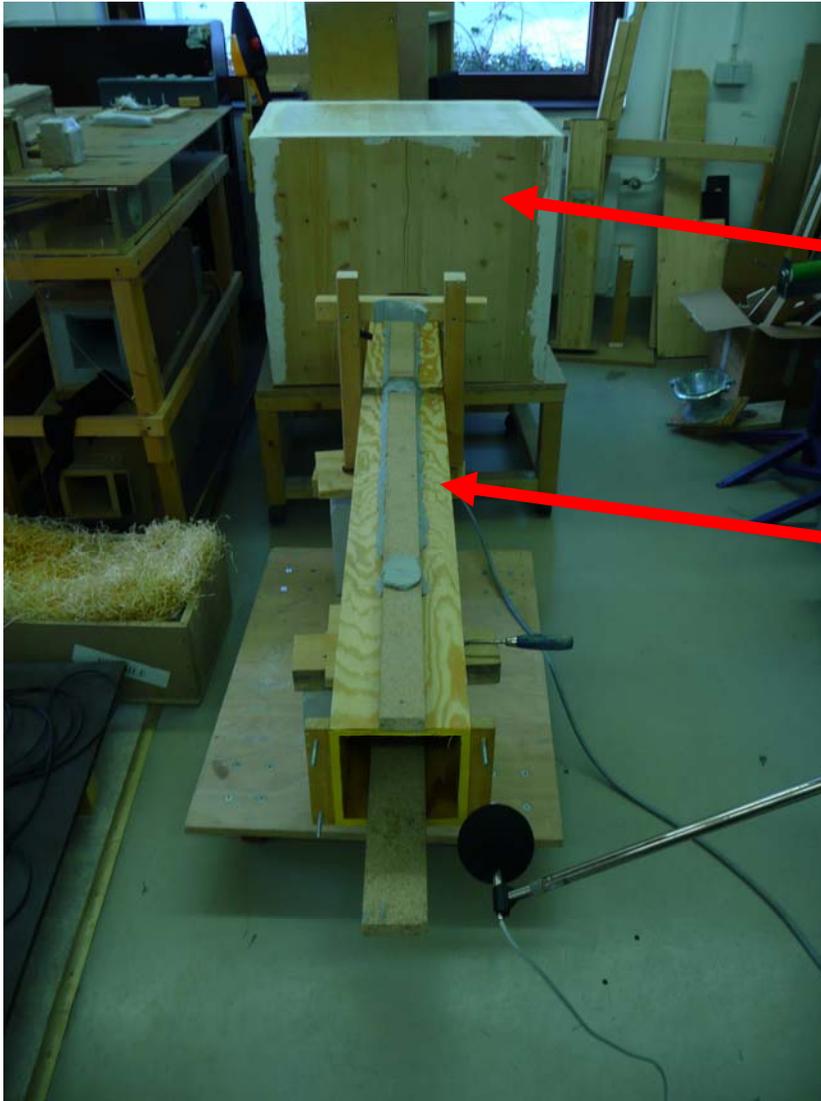
- Welche Schallquellen funktionieren gut?

- Frequenz unabhängig vom Winddruck
- Große Schalleistung muss erreicht werden

- Zusammenfassung, Vorschläge und Perspektiven



Windradorgel



Messungen im kleinen
Windkanal

Eingekapseltes Gebläse
mit Drehzahlsteuerung

Windkanal

Windradorgel



Geräuschmessung am Ende des Windkanals

Windradorgel



Grundgeräuschmessung ohne Pfeife

Windradorgel



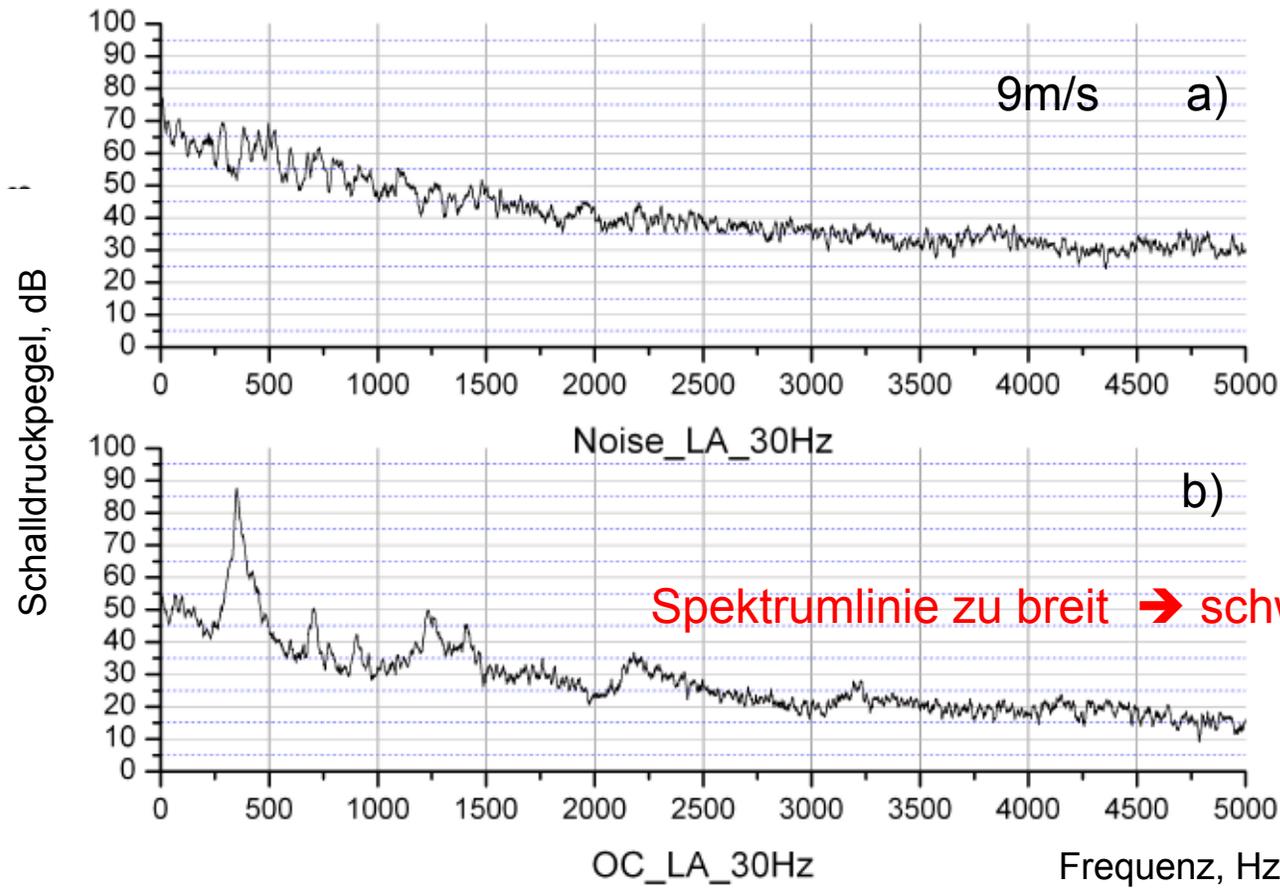
Messung mit einer gedackten Pfeife

Windradorgel



Trichter im Windkanal um
Staudruck für die Pfeifen
herzustellen

Windradorgel

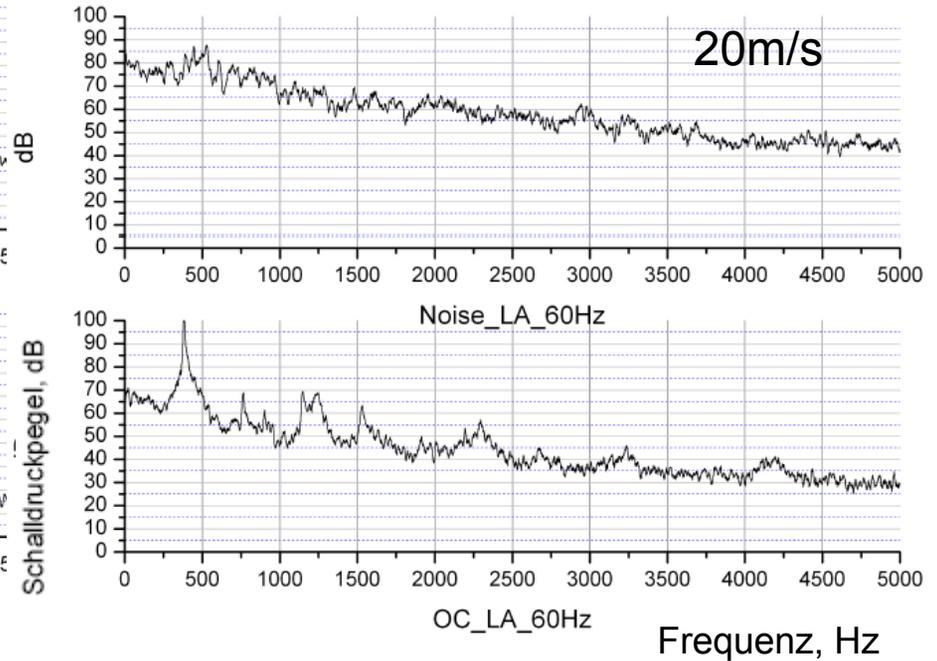
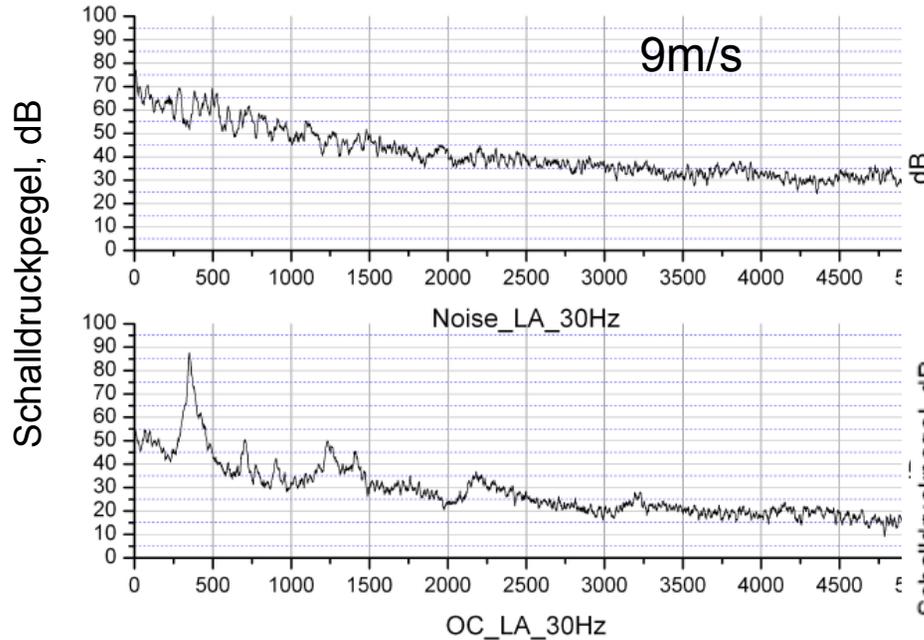


Gedackte Lippenpfeife

- a) Windgeräusch ohne Pfeifenklang
- b) Pfeifenklang

Windradorgel

Gedackte Lippenpfeife



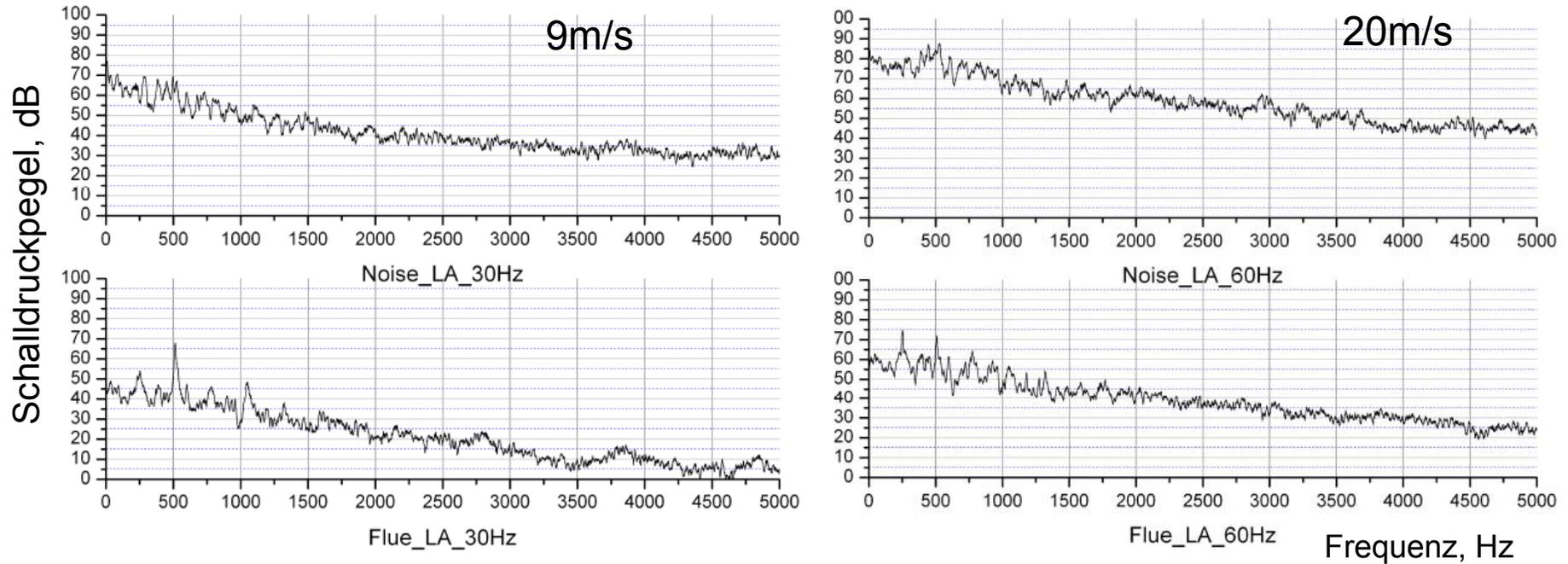
Größere Geschwindigkeit (v) → größeres Geräusch →
→ größere Amplitude (dB) → größere Frequenz (f)
Spektrumlinie zu breit!

Windradorgel



Messung einer offenen
Lippenorgelpfeife

Offene Lippenorgelpfeife gemessen am Labium



Die Pfeife klingt kaum
Spektrumlinien sind breit

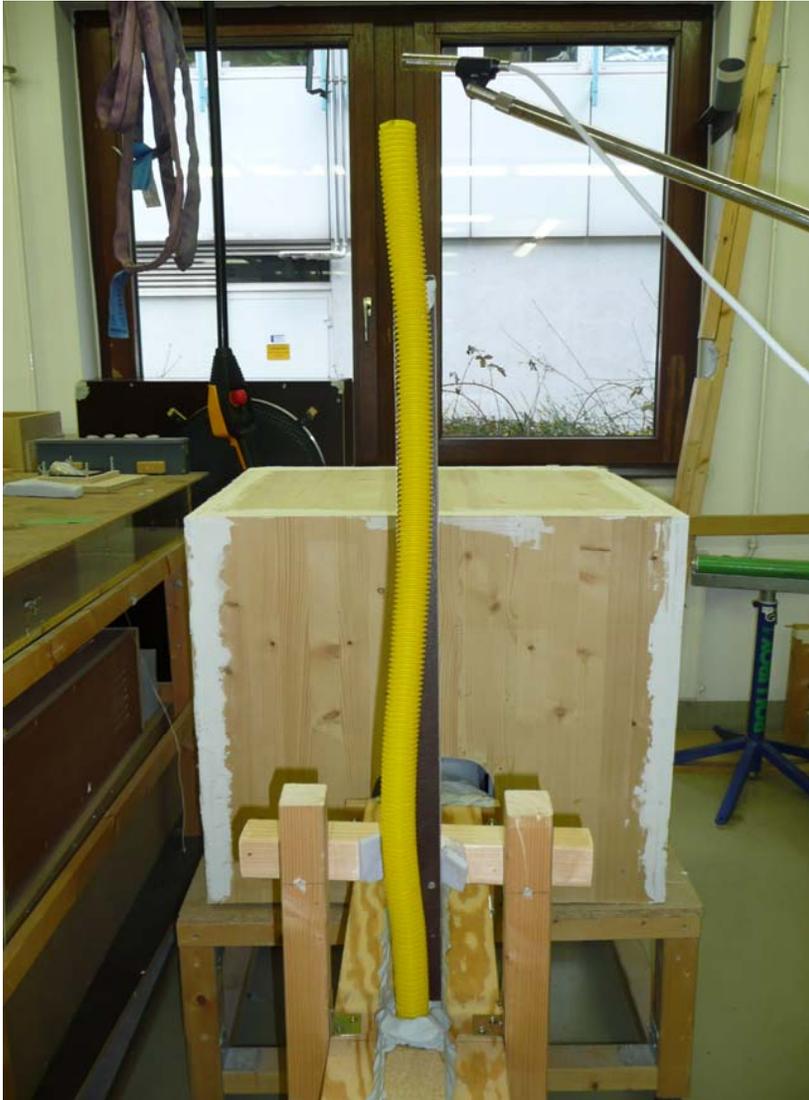
Die Lippenpfeife wird in den Windkanal eingelegt

Die Pfeife klingt kaum!

Windradorgel

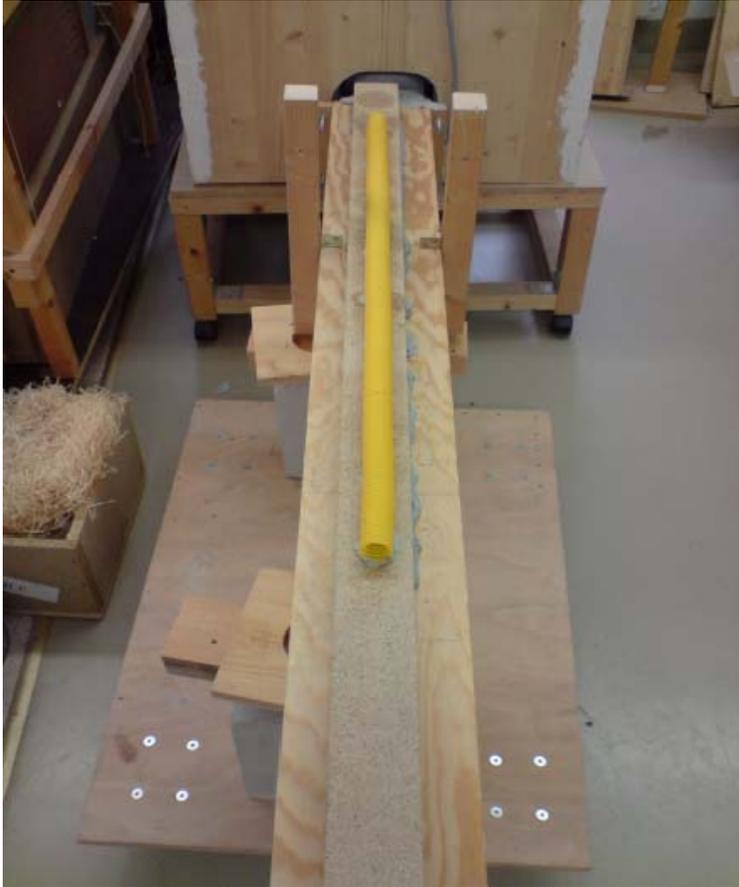


Kunststoffrohr



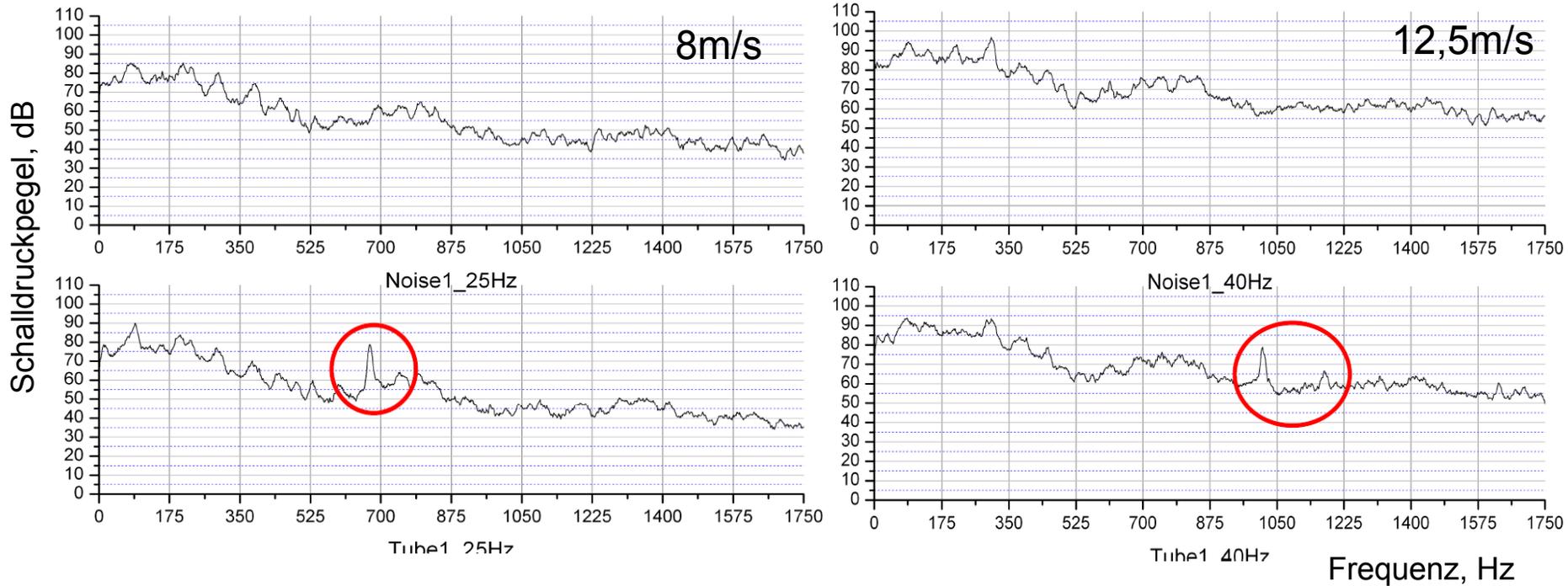
Kunststoffrohr am Windkanal

Windradorgel



Windradorgel

Kunststoffrohr

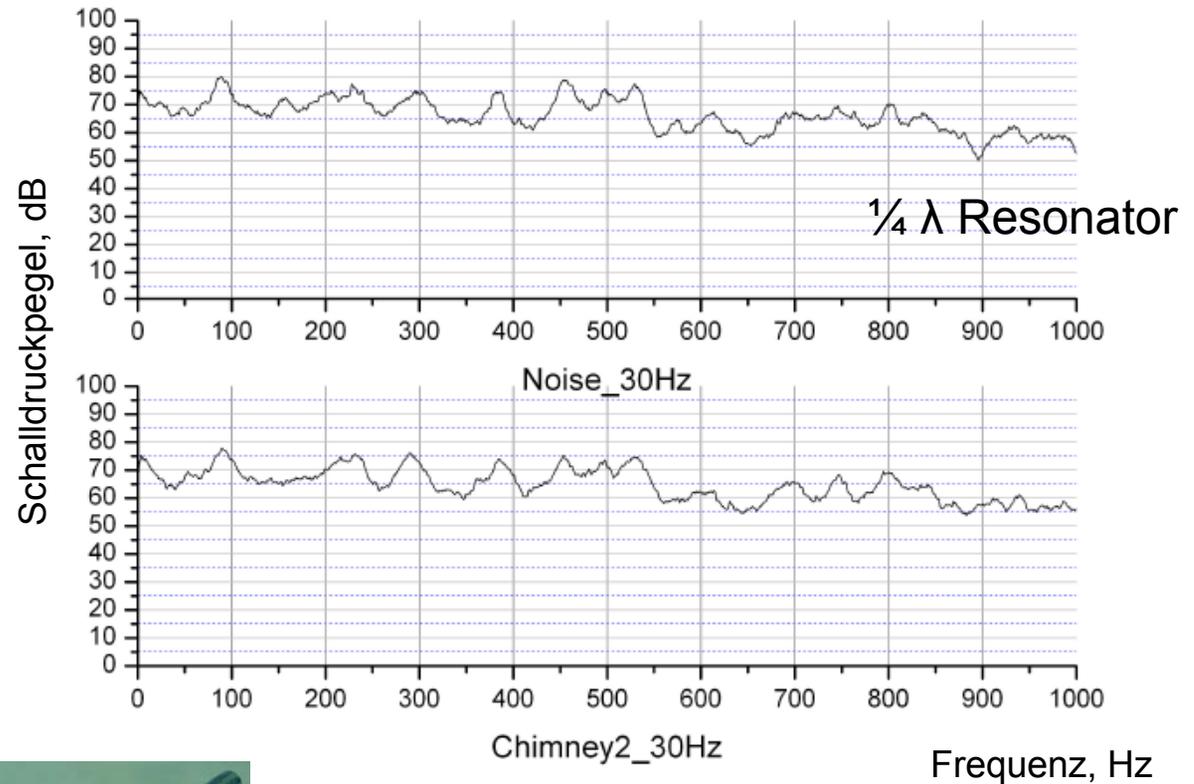


Schwache, breite Obertöne

Windradorgel



Kleines Metallrohr

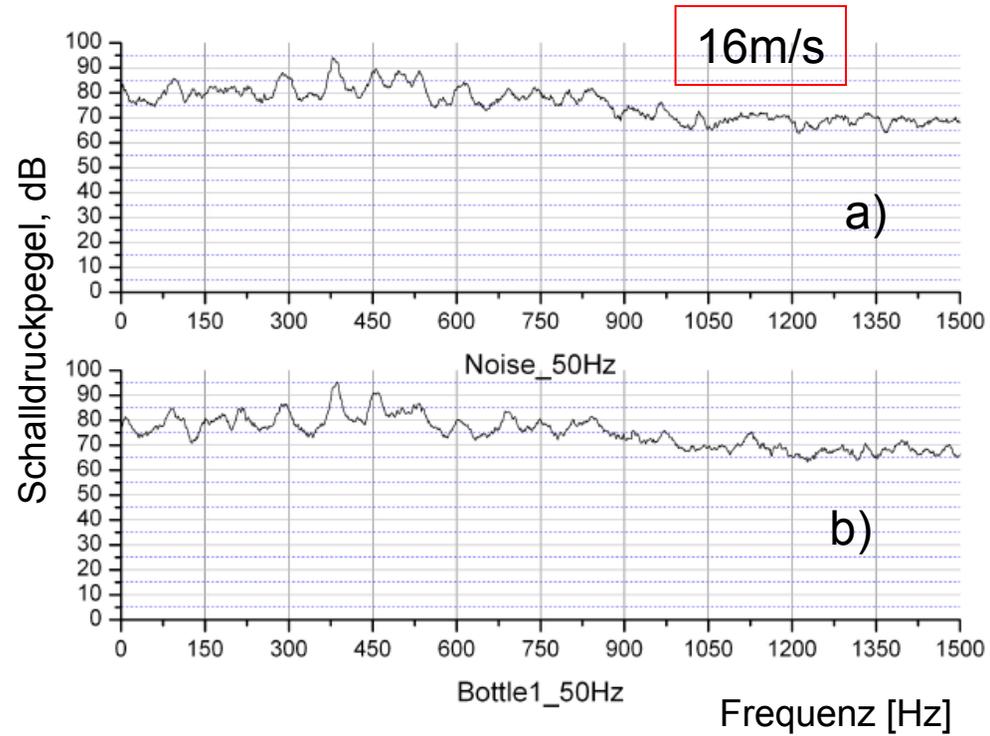


Praktisch kein
musikalischer Klang....

Windradorgel



H-Resonator 1



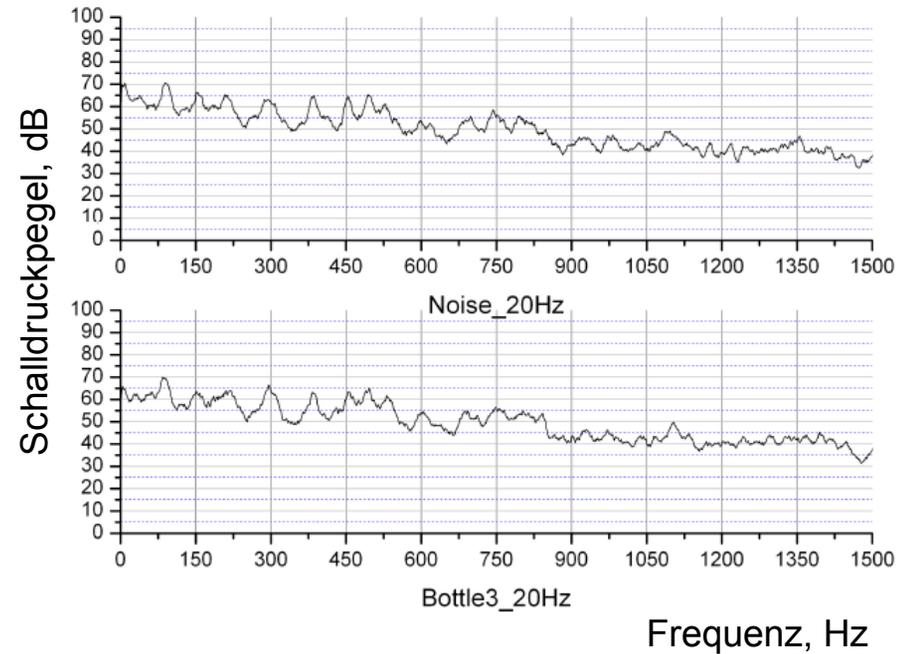


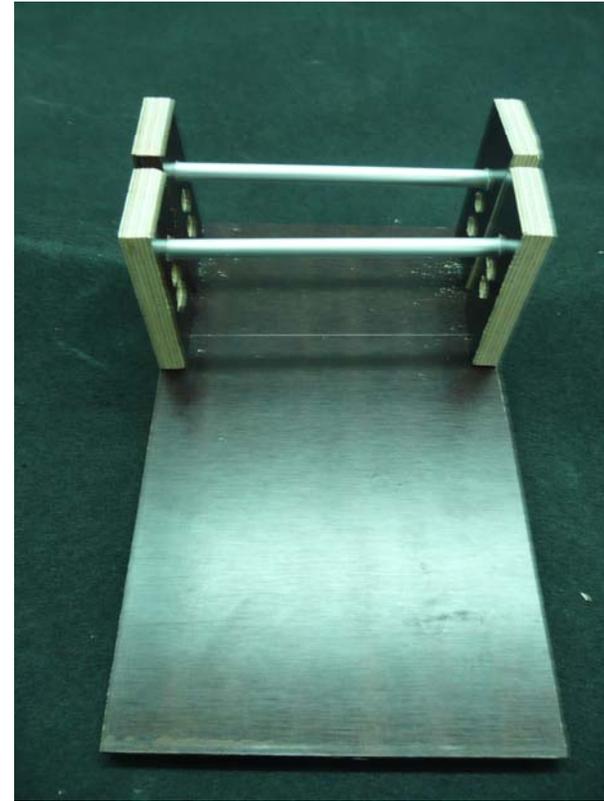
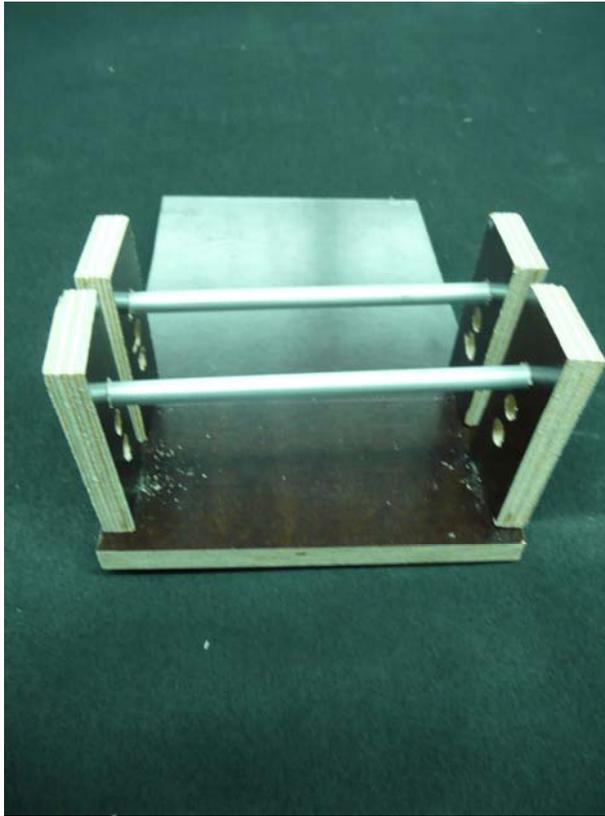
H-Resonator 2

Windradorgel



H-Resonator 3





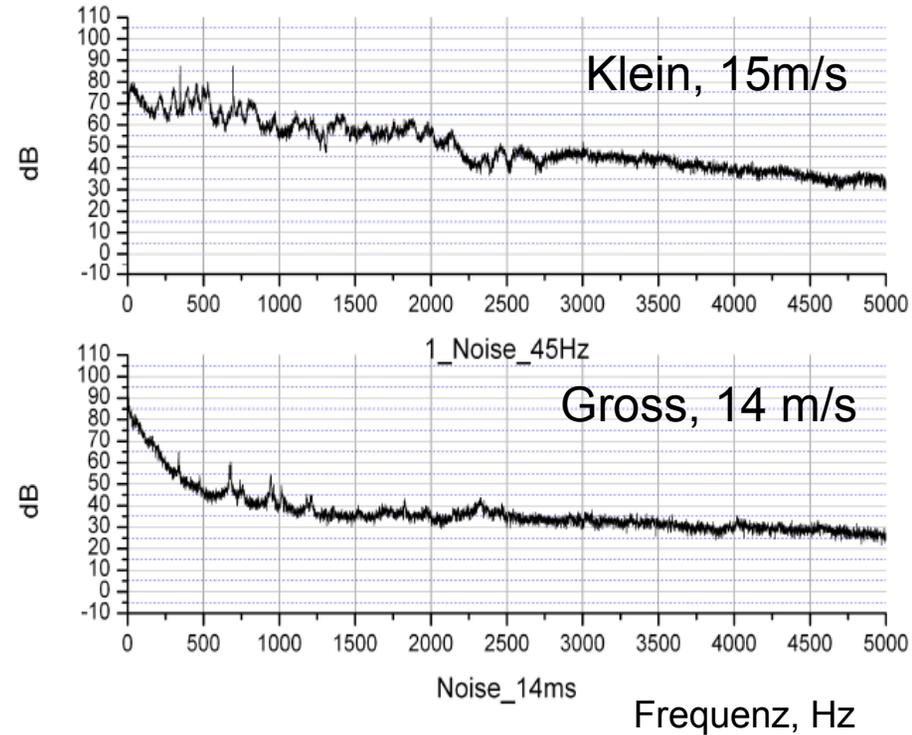
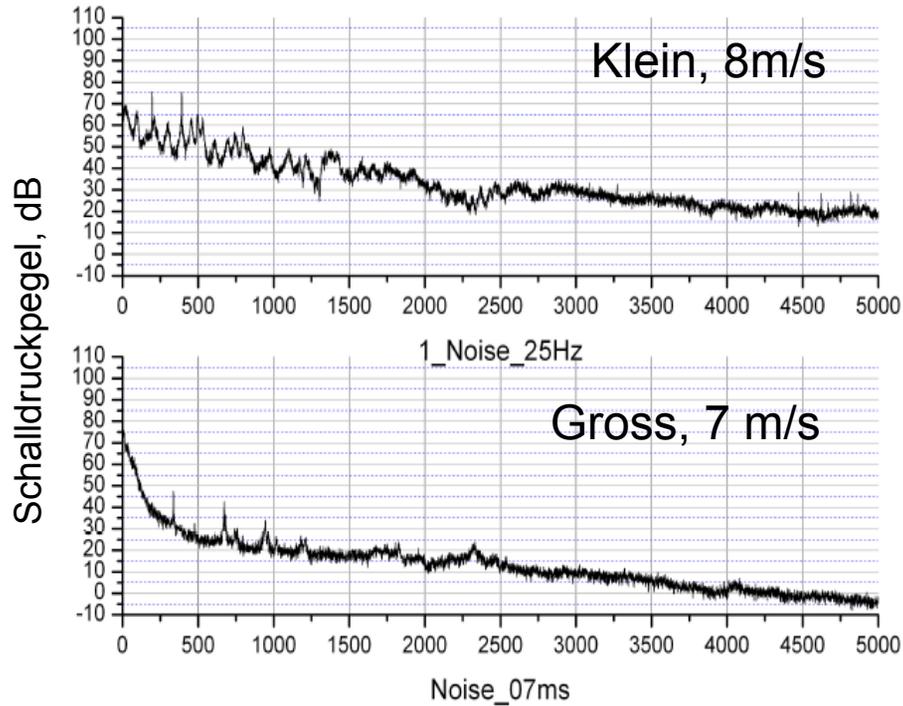
2 parallele Stäbe, Wirbelablösung am 1. Stab, Rückkopplung vom 2. Stab
(wie an elektrischen Leitungen)
Keine geeignete Quelle fürs Windrad

Windradorgel

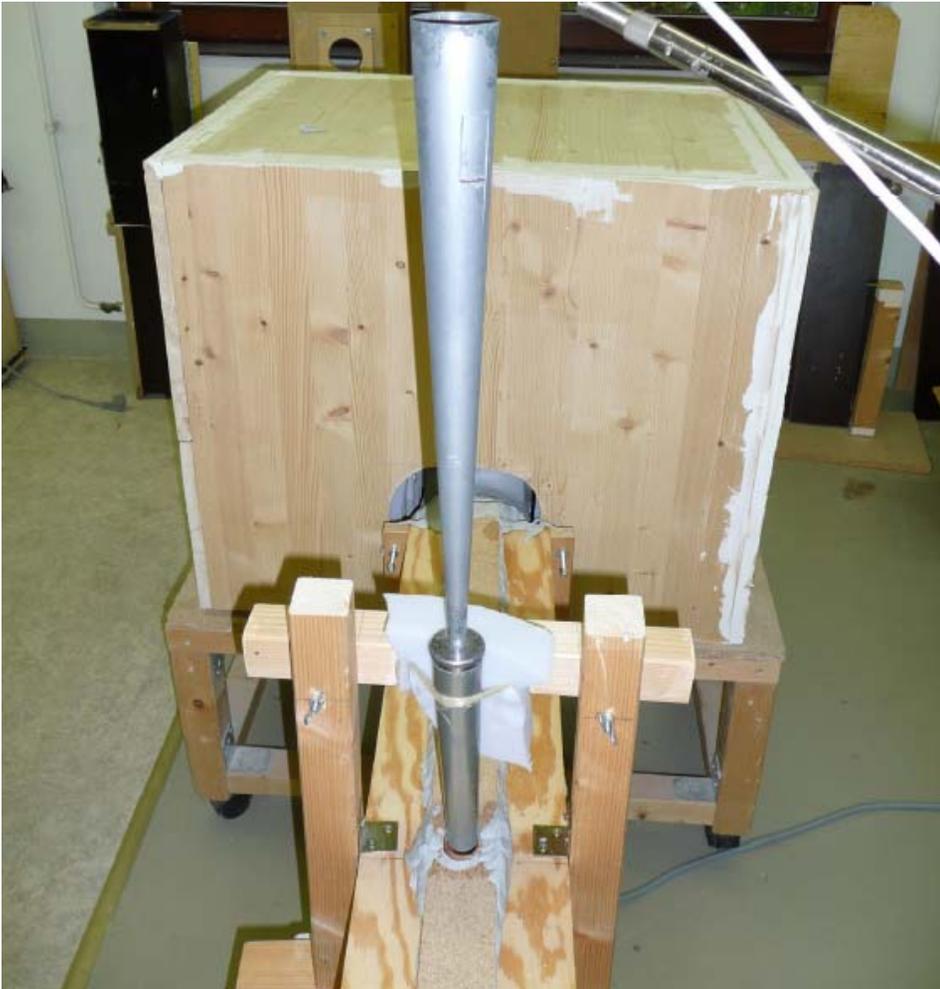


Grundgeräusch Messung im großen Windkanal

Windradorgel



Vergleich des Grundgeräusches in beiden Windkanälen

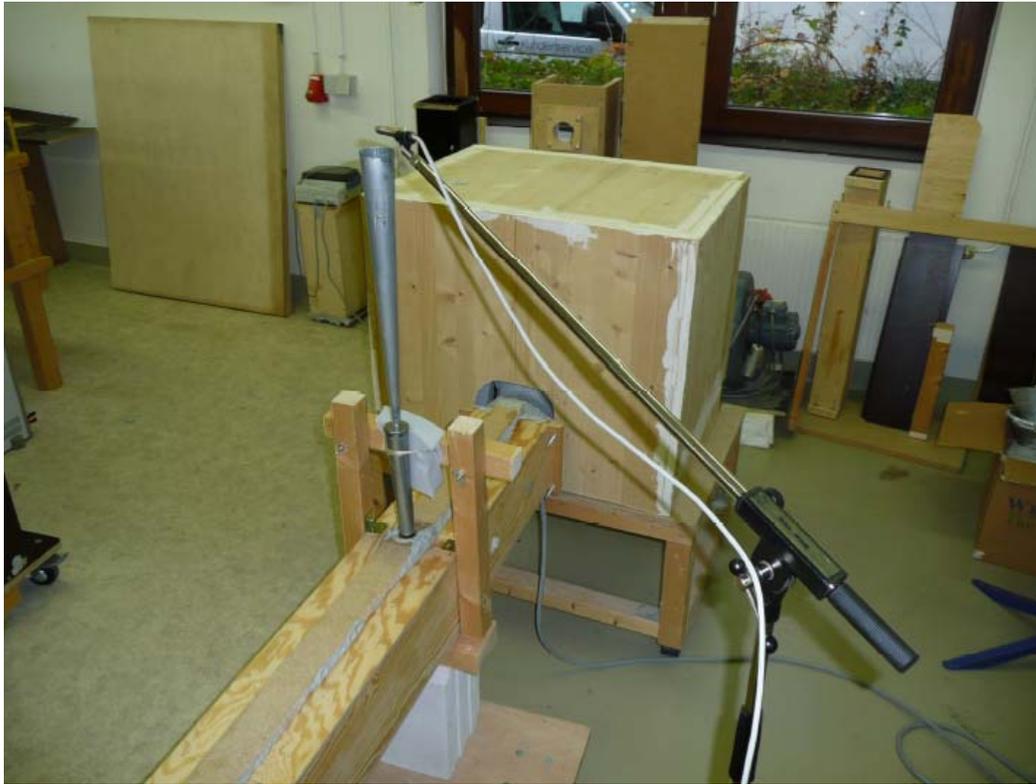


Aufschlagende Zungenpfeife

Windradorgel



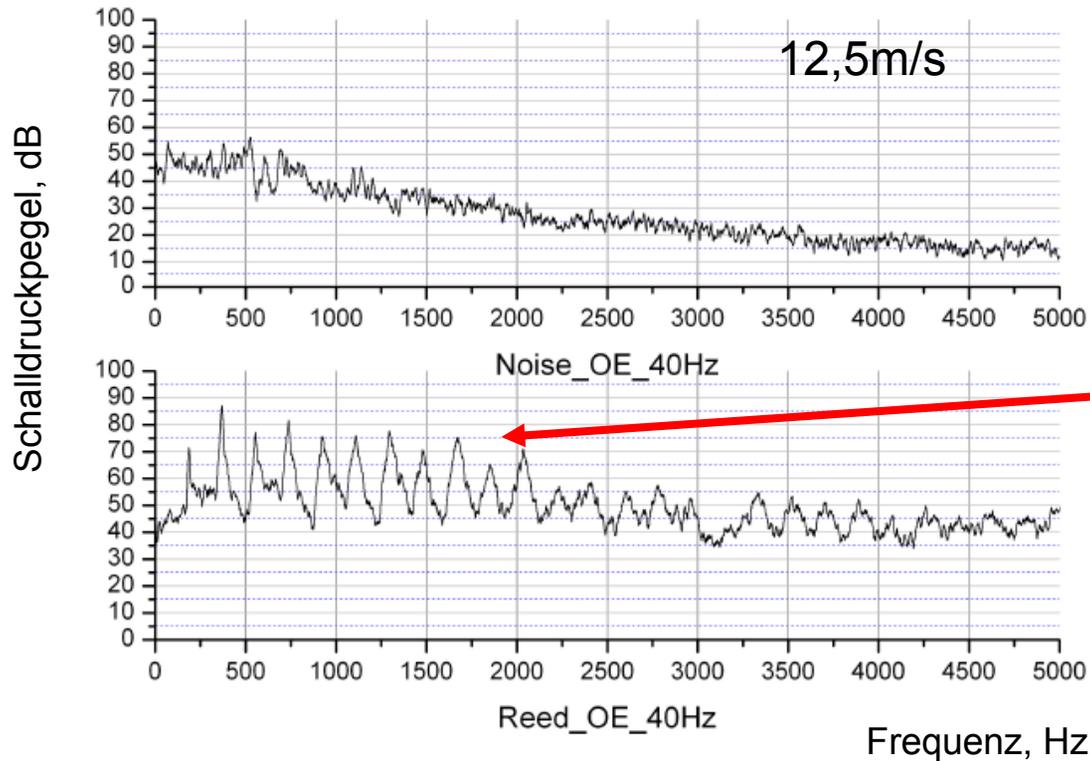
Pfeife im Kanal: Schallmessung am Kanalende



Pfeife außerhalb des Kanals:
Schallmessung am
Pfeifenende

Pfeife im Kanal:
Schallmessung am
Kanalende

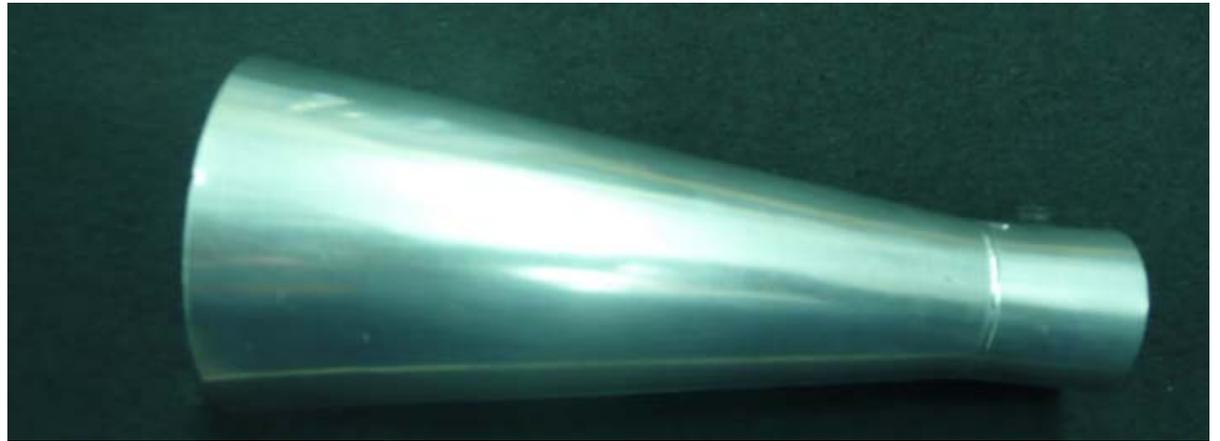
Pfeife außerhalb des Kanals



Die Pfeife klingt relativ gut,
aber zu breite Spektrallinien

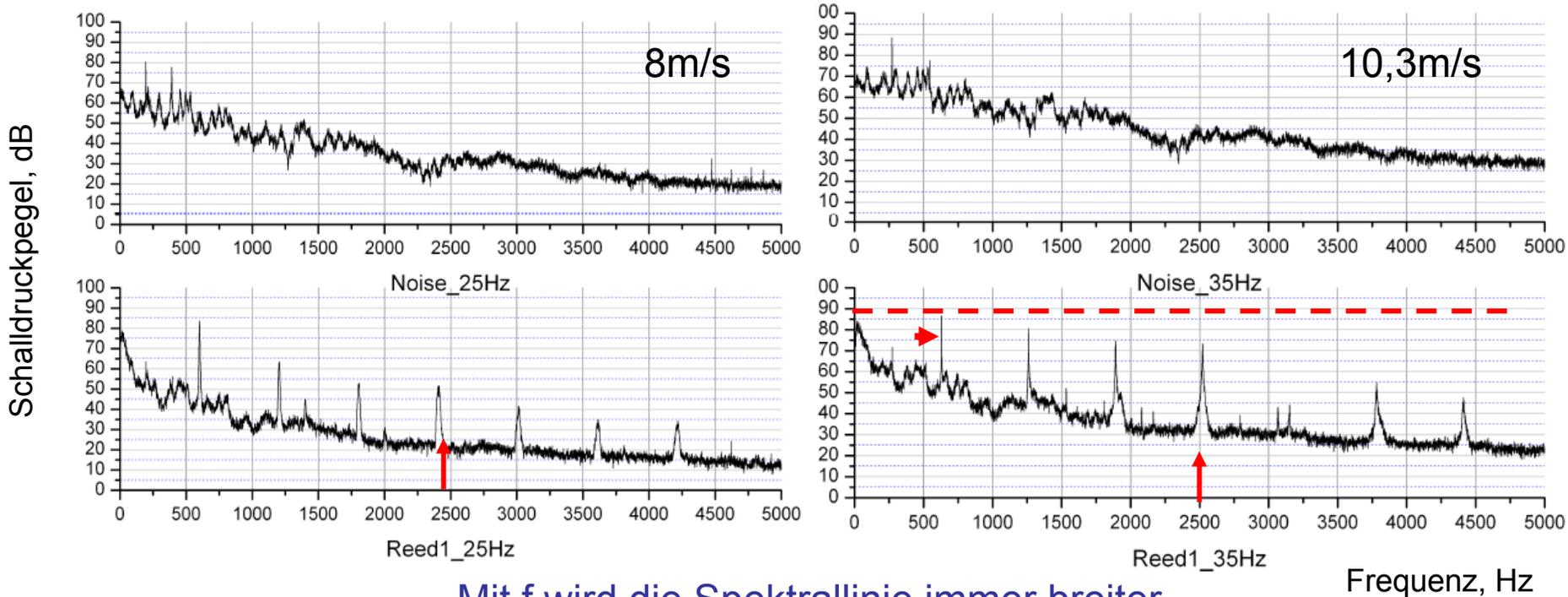
f-Modulation wegen
v-fluktuation

Aufschlagende Zungenpfeife 1 mit angepasstem Trichter 1



Windradorgel

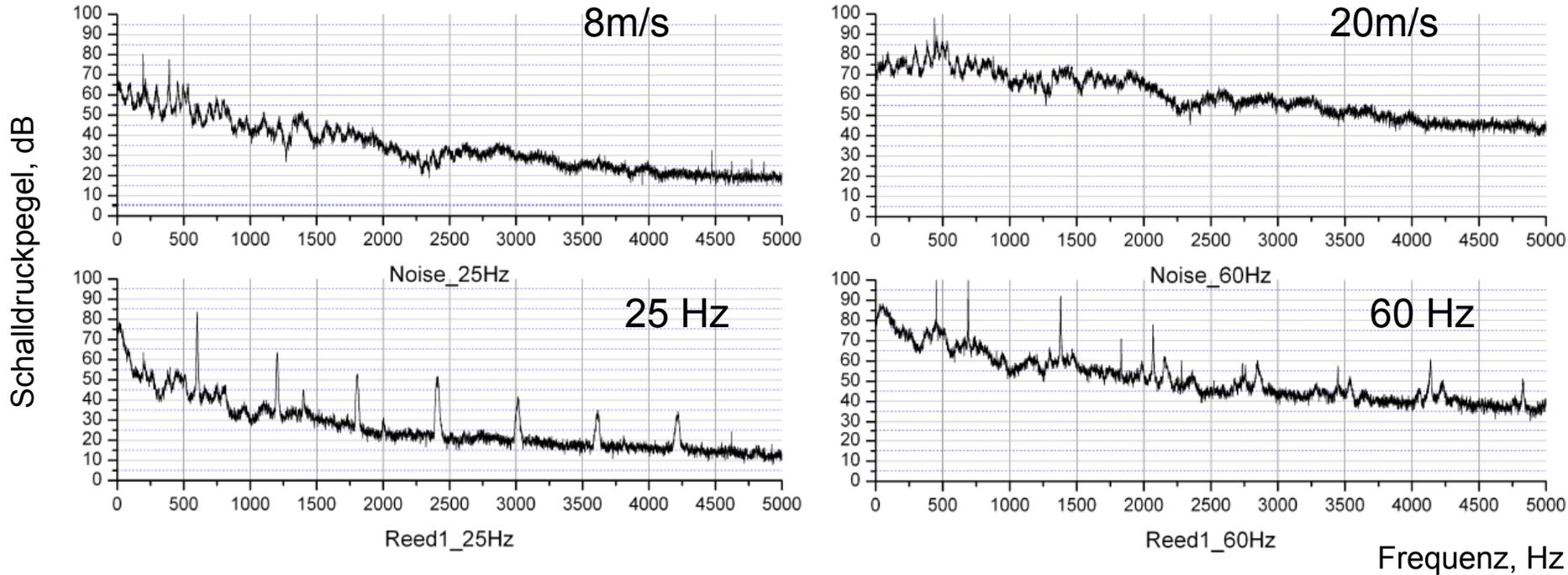
Zungenpfeife I mit angepasstem Trichter



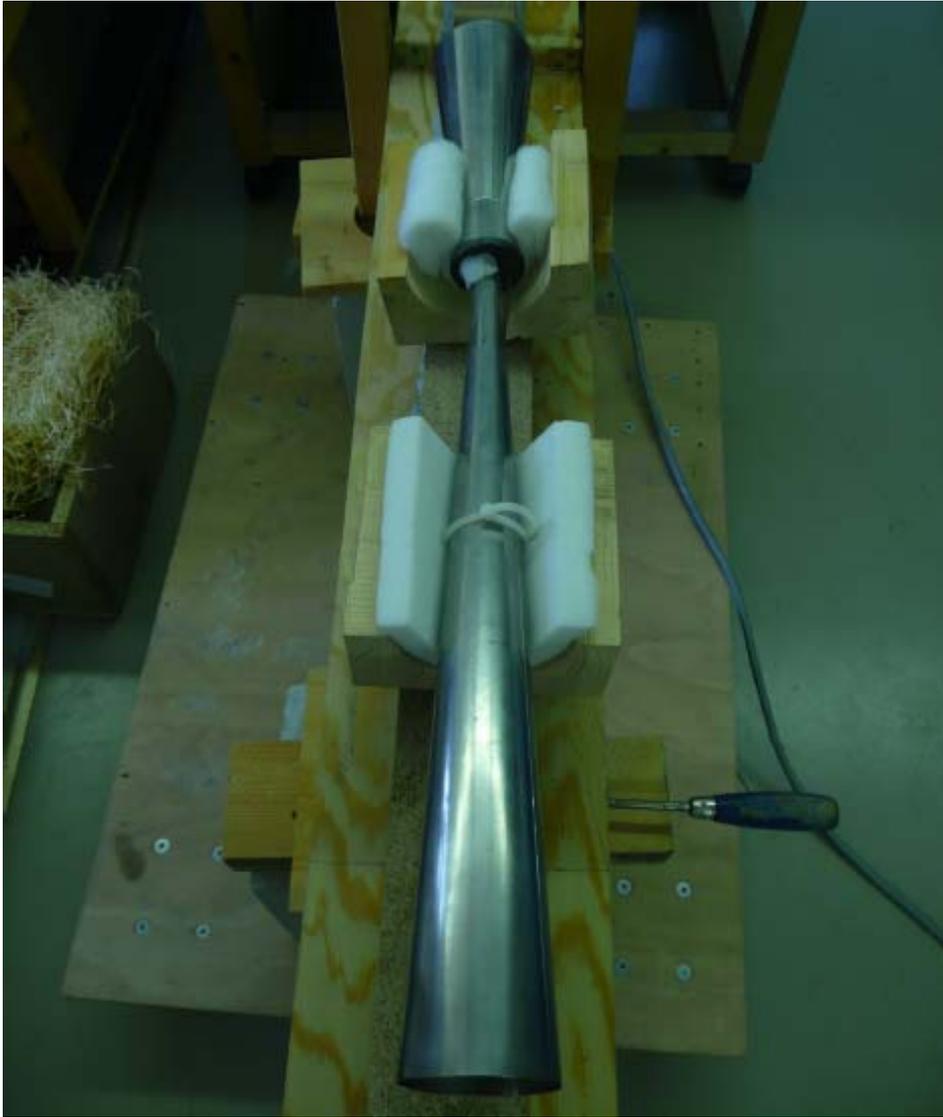
Mit f wird die Spektrallinie immer breiter
 v größer \rightarrow Spektrallinie breiter

L_p weniger, als 90 dB
 v größer \rightarrow Spektrallinie breiter
Die Tonhöhe ändert sich hörbar

Zungenpfeife I mit angepasstem Trichter

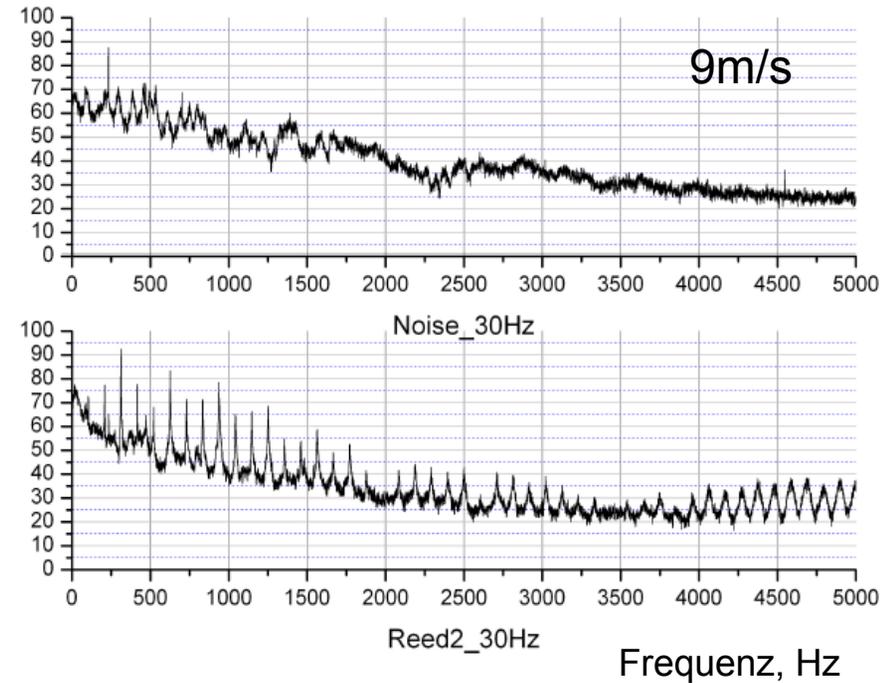
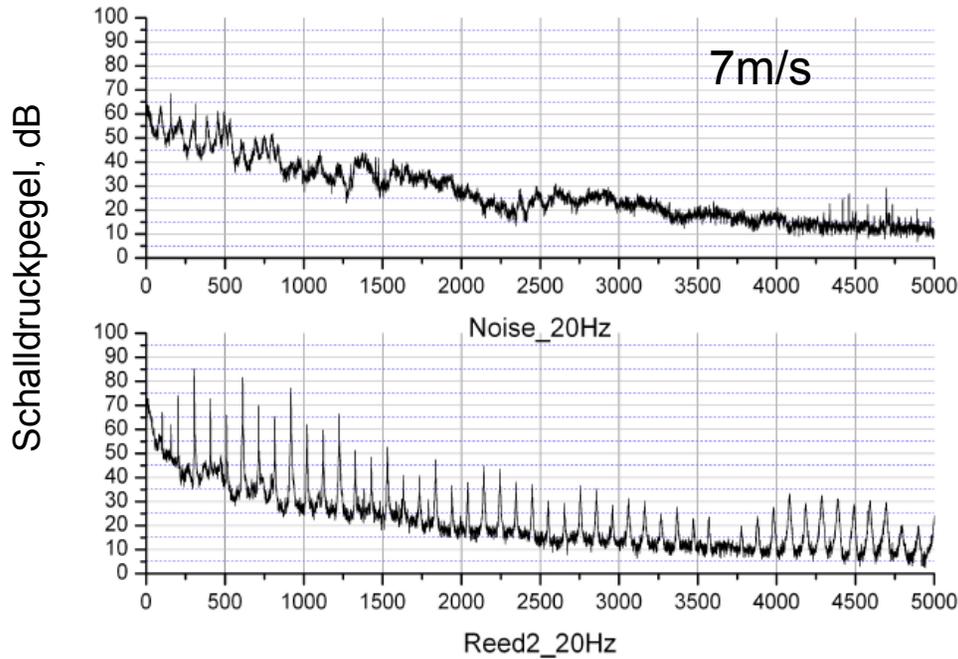


Auch nichtharmonische Komponente erscheinen



Aufschlagende Zungenpfeife 2
mit Trichter 2

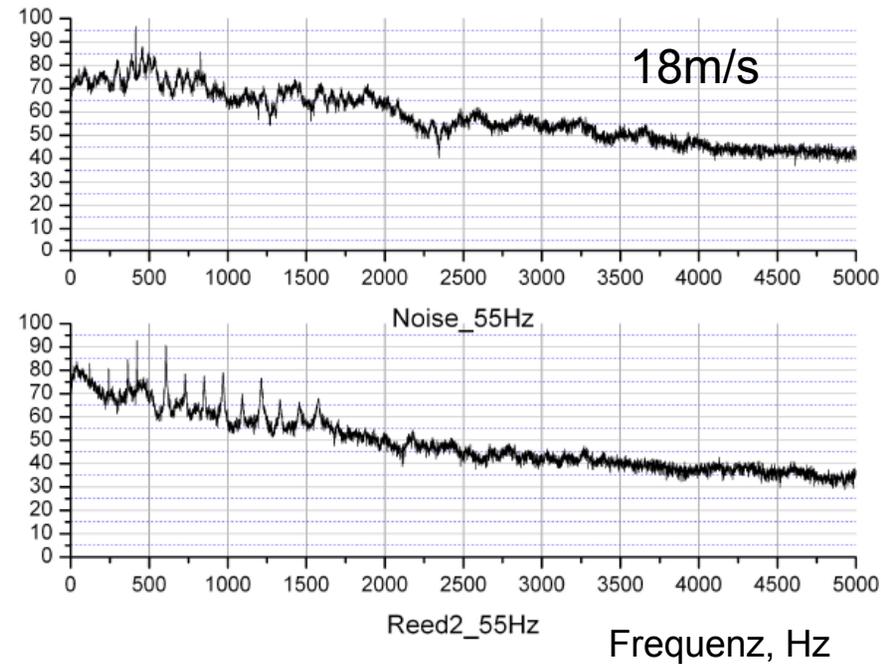
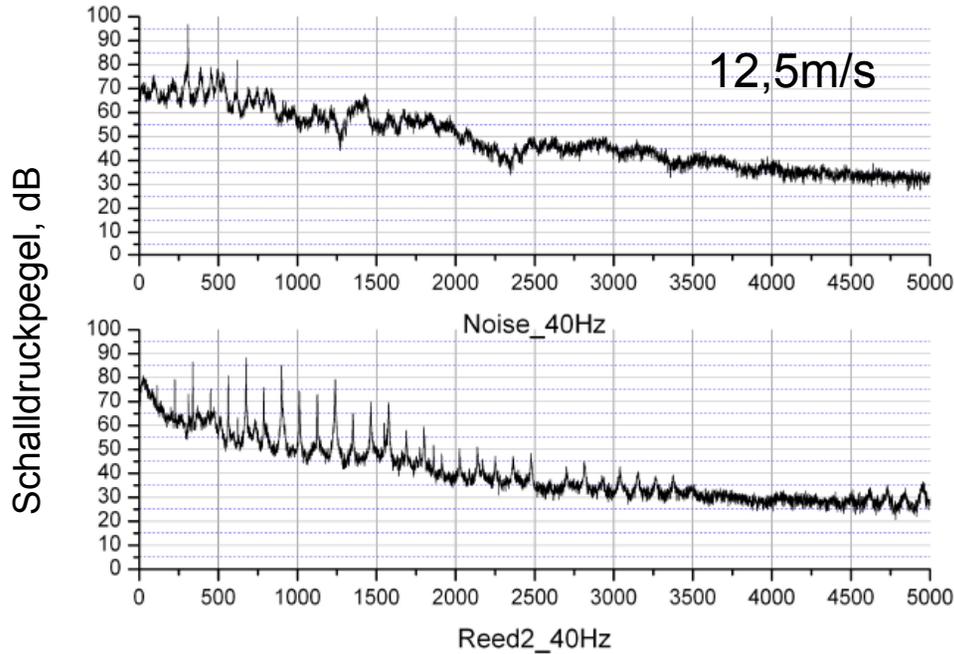
Windradorgel



Bei kleiner v klingt die Pfeife ziemlich gut,
aber f -Modulation – f höher → Linien breiter

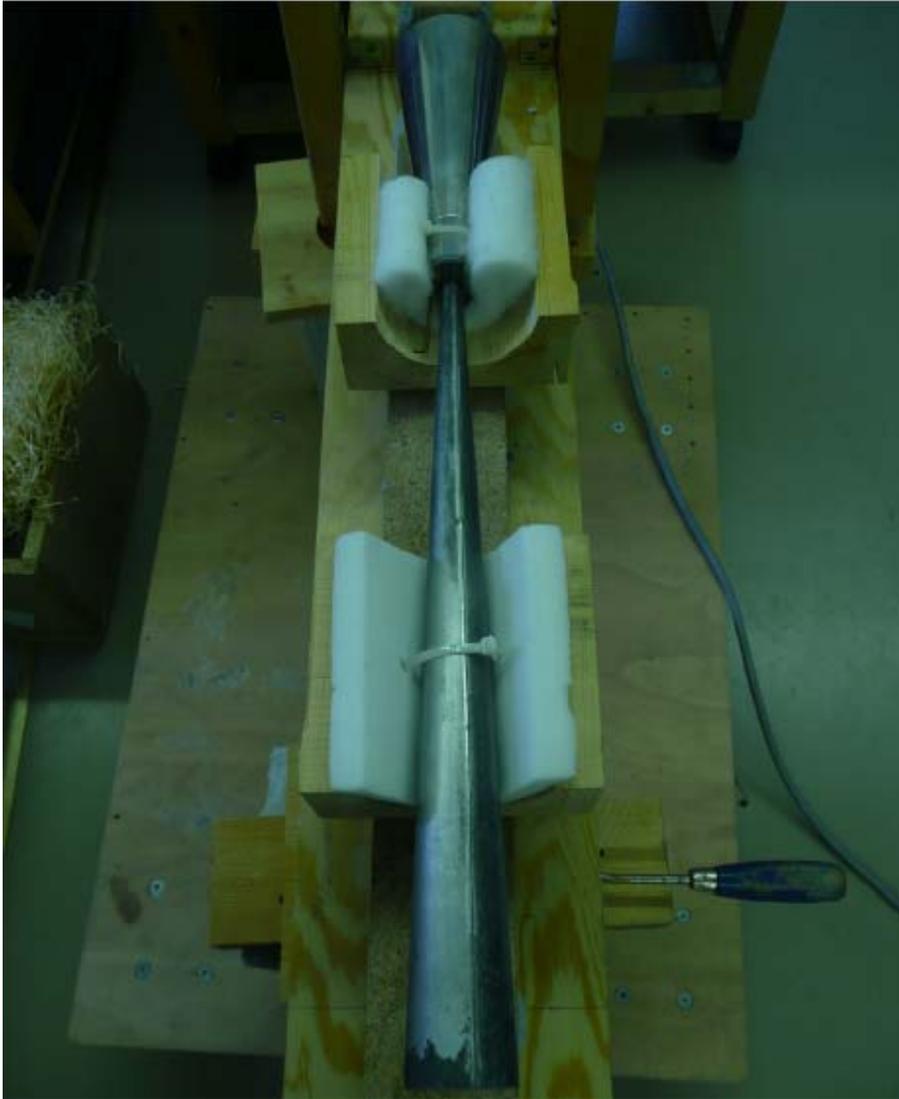
v größer → größere Schwankungen,
Breitere Spektrallinien

Windradorgel



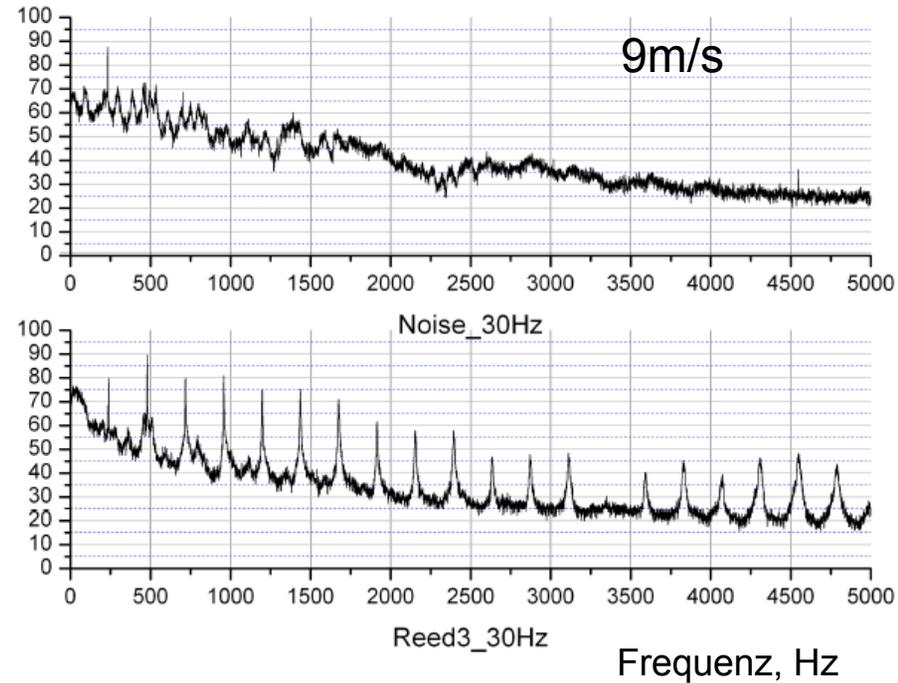
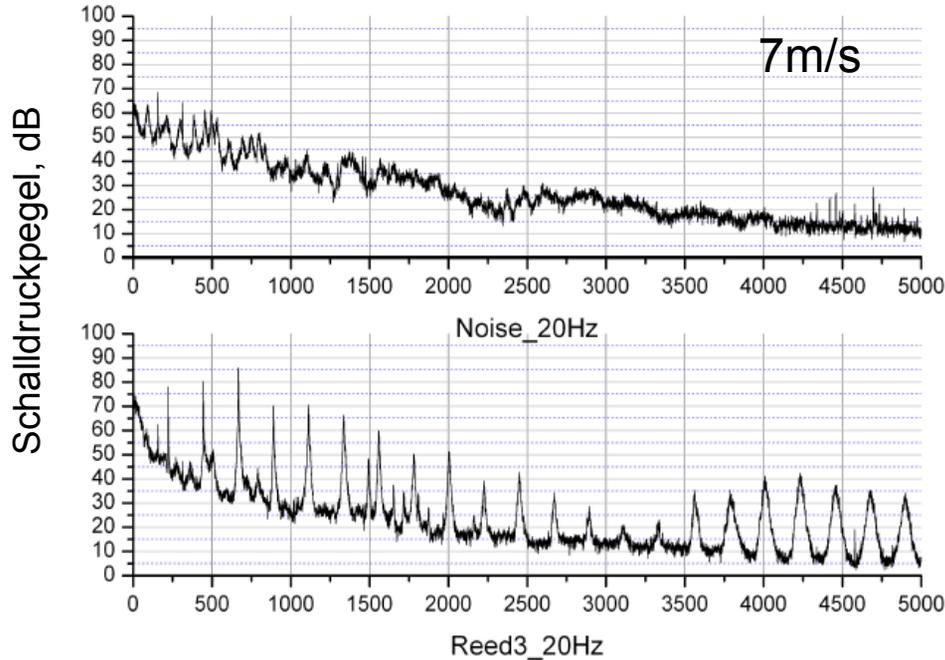
Höhere Komponente
verschwinden (Mittelung!)

Schlechter Pfeifenklang



Aufschlagende Zungenpfeife 3
mit Trichter 3

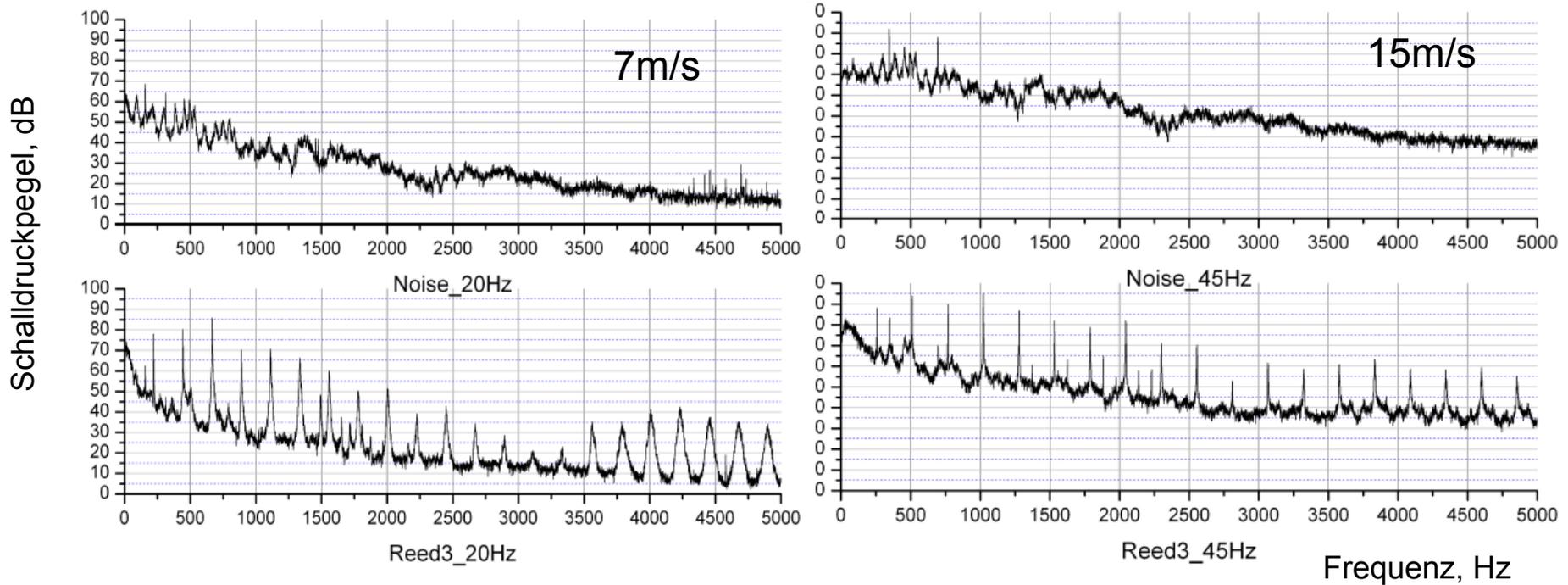
Windradorgel



f-Modulation – f höher → Linien breiter

f wird höher,
Breite Linien

Windradorgel



Auch zusätzliche, nichtharmonische Linien treten auf

Windradorgel



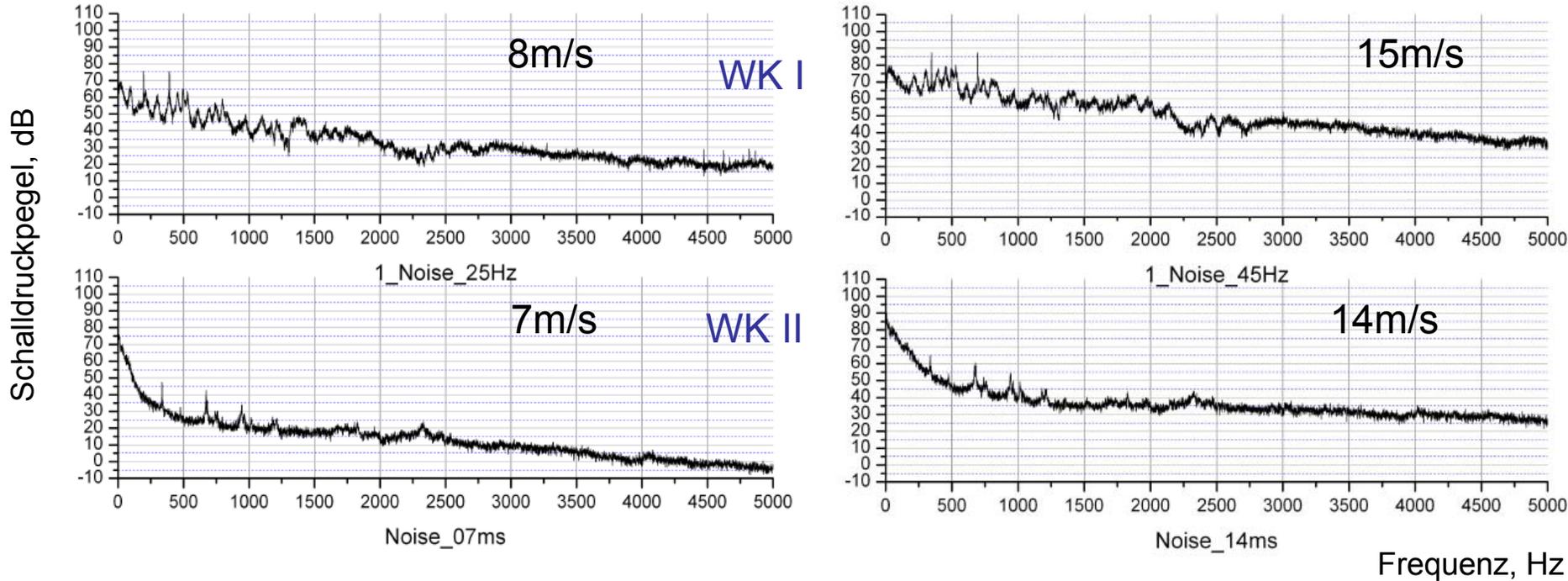
Großer Windkanal

Windradorgel



Grundgeräusch Messung im großen Windkanal

Windradorgel



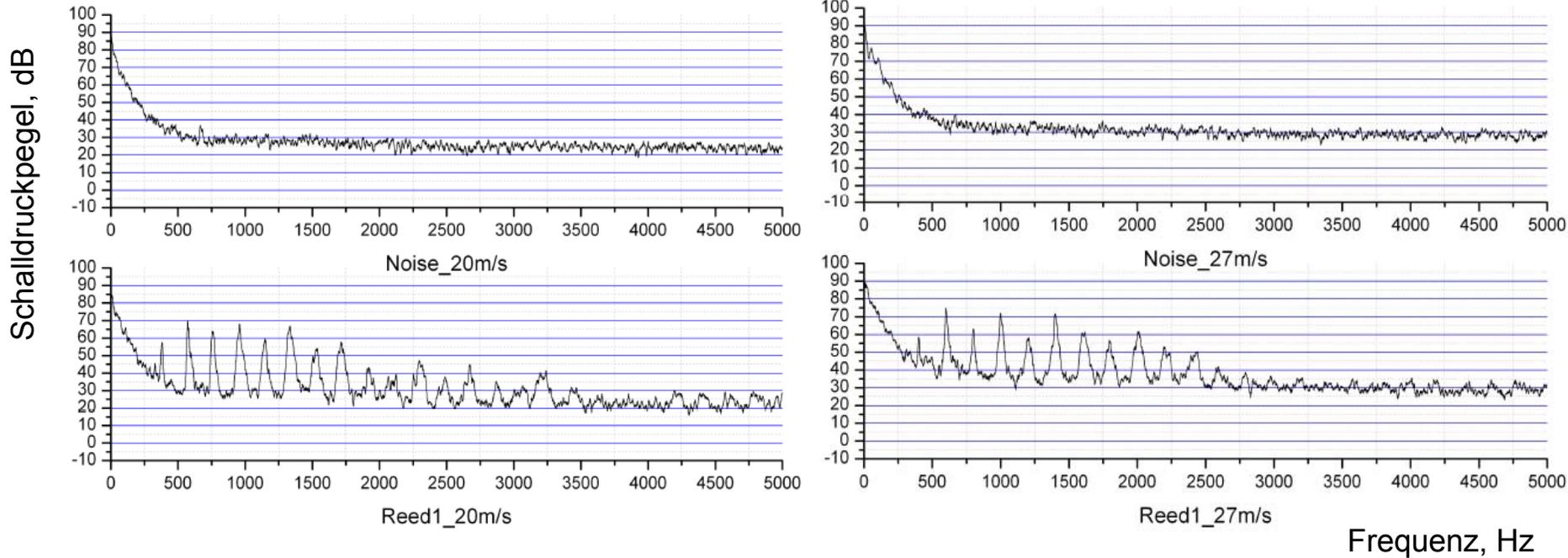
Vergleich des Grundgeräusch in WK I (klein) und II (groß)

Unter 500 Hz große Kanalgeräusche
v größer → Geräusch größer



Aufschlagende Zungenpfeife 3
mit altem Trichter

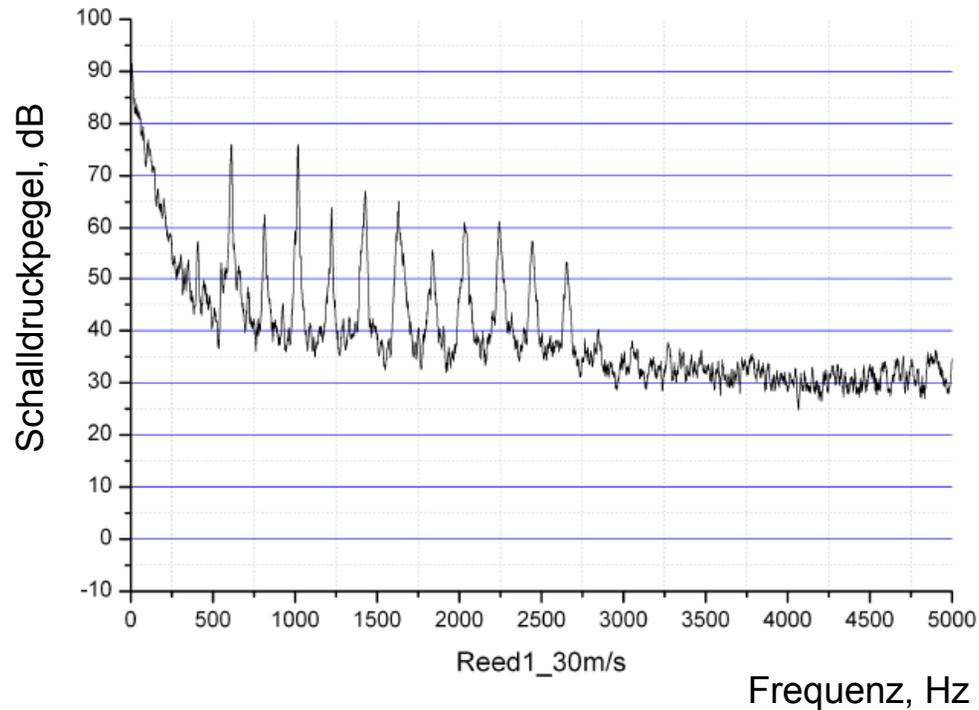
Aufschlagende Zungenpfeife 3 mit altem Trichter



Etwa 70 dB, große f-Modulation!

v größer \rightarrow Geräusch größer

Aufschlagende Zungenpfeife 3 mit altem Trichter



Kein guter musikalischer Klang! Zu breite Linien!

Durchschlagende Zunge E“ mit Trichter und Resonator



Die durchschlagende Zungenpfeife wird so in den Windkanal eingelegt

Windradorgel



Die Zunge mit Trichter ohne Resonator wird in den großen Windkanal einmontiert

Windradorgel



Die Zungenpfeife (mit Resonator) und mit Trichter wird in den großen Windkanal einmontiert

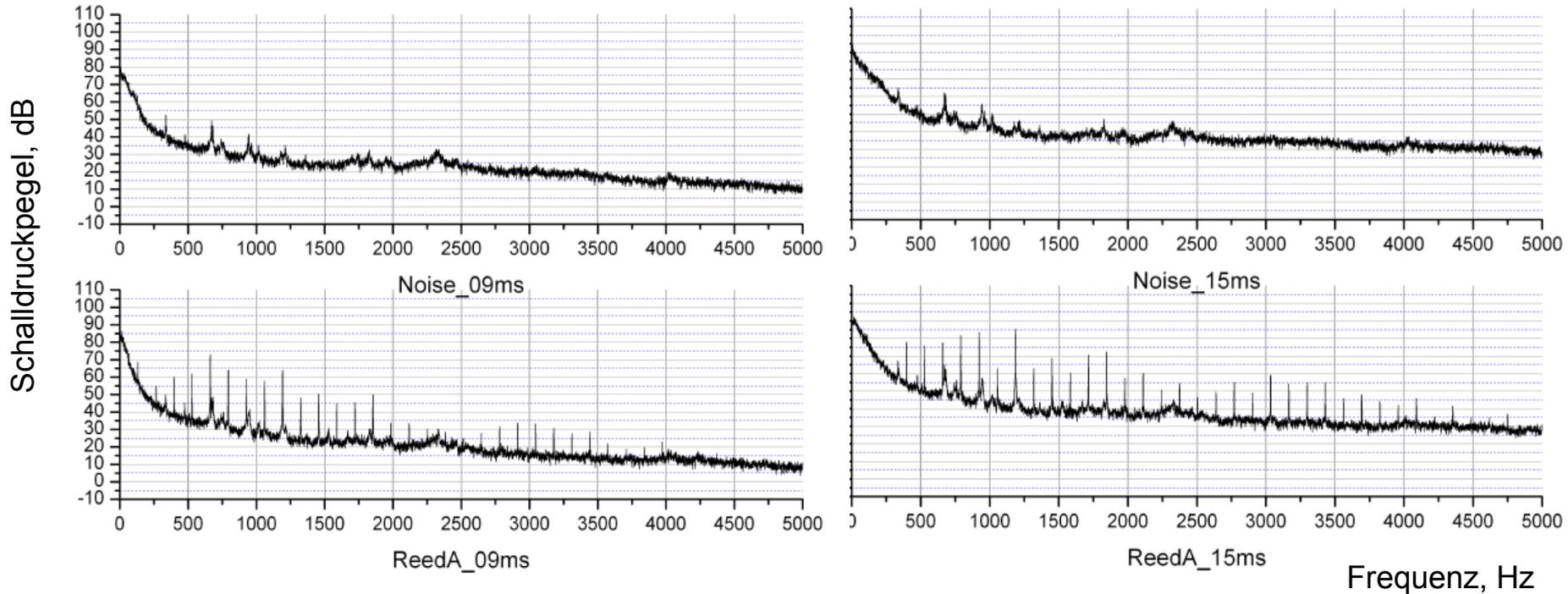
Windradorgel



Die durchschlagende Zungenpfeife (mit Resonator) und mit Trichter im großen Windkanal

Windradorgel

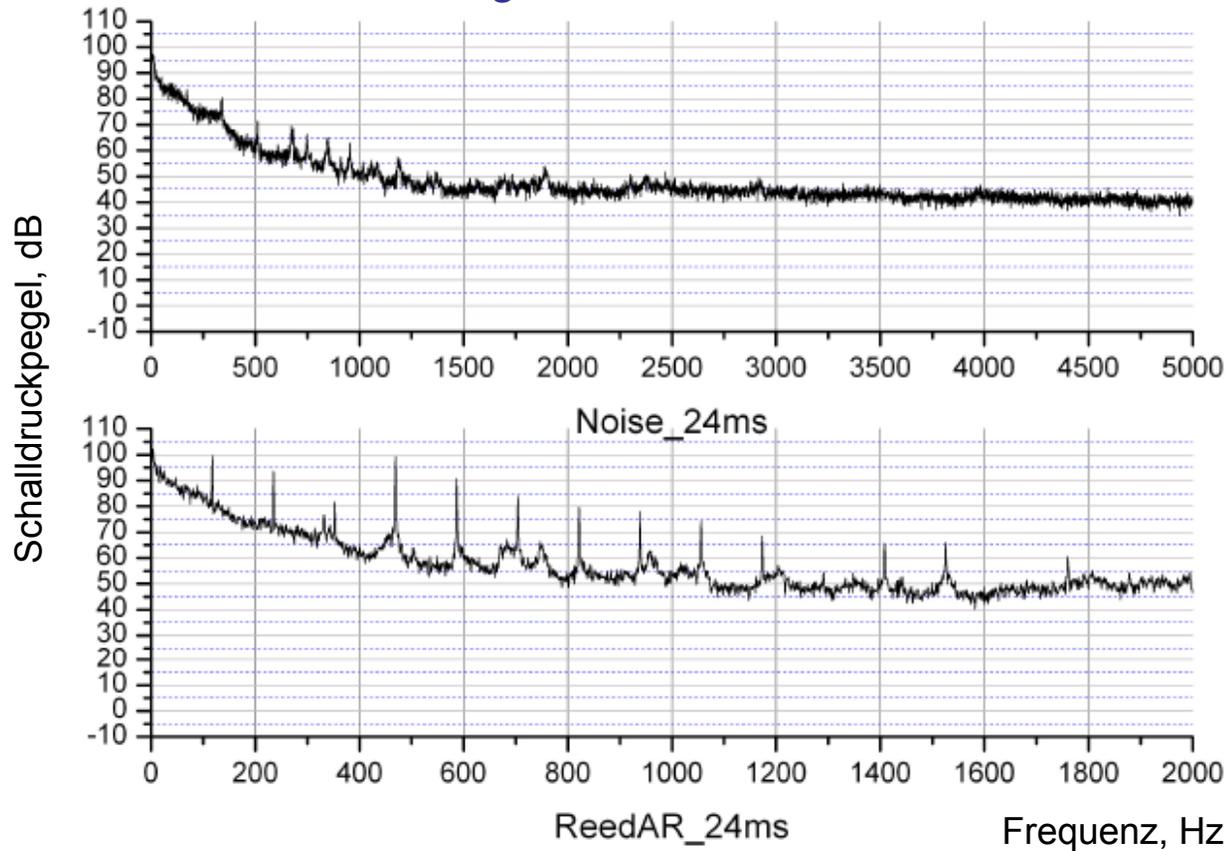
Die durchschlagende Zunge A ohne Resonator im großen Windkanal



Keine breite Linien, aber sehr leise!

Windradorgel

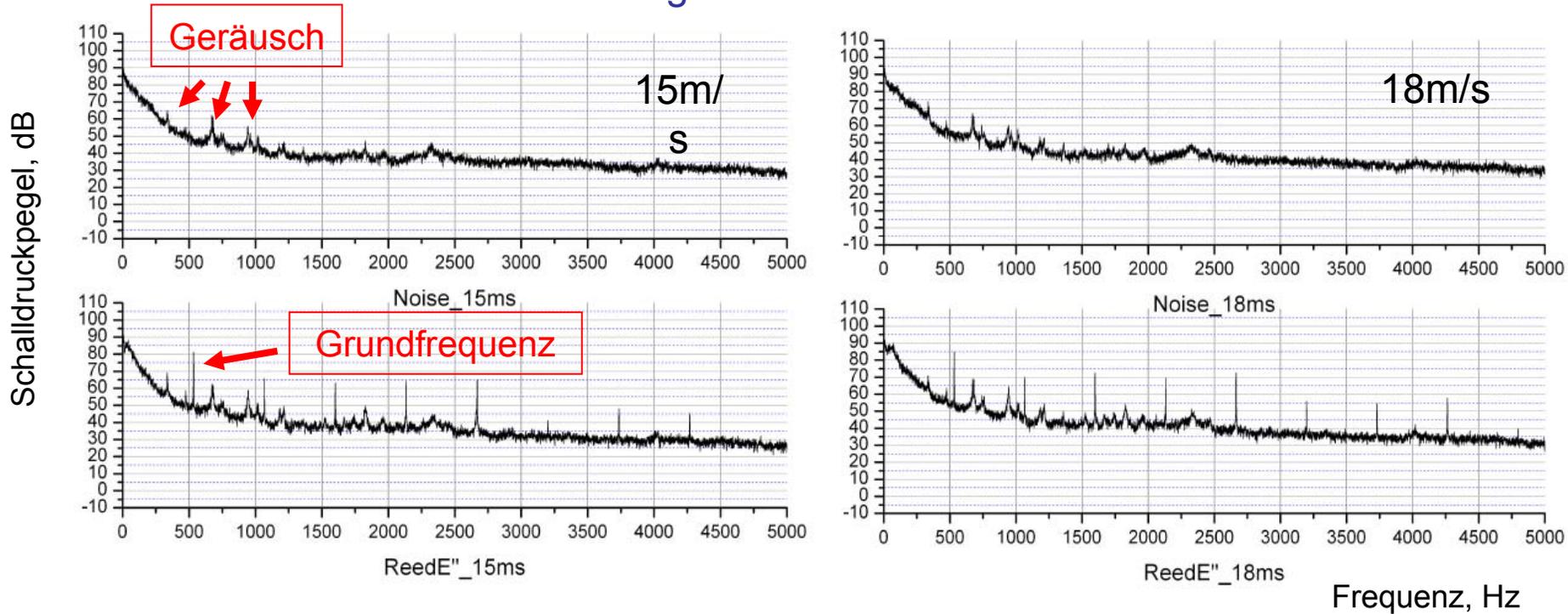
Die durchschlagende Zungenpfeife A mit Resonator
im großen Windkanal



Der Pfeifenklang wird harmonisch

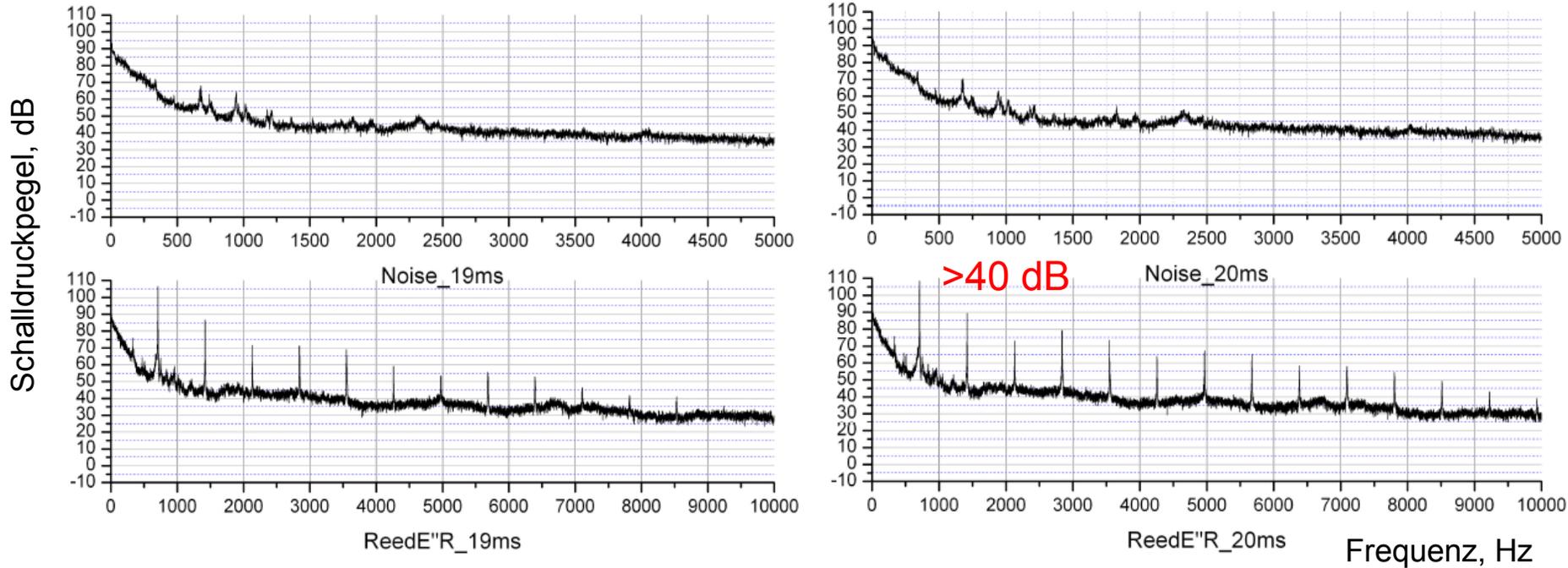
Windradorgel

Die durchschlagende Zunge E“ ohne Resonator
im großen Windkanal



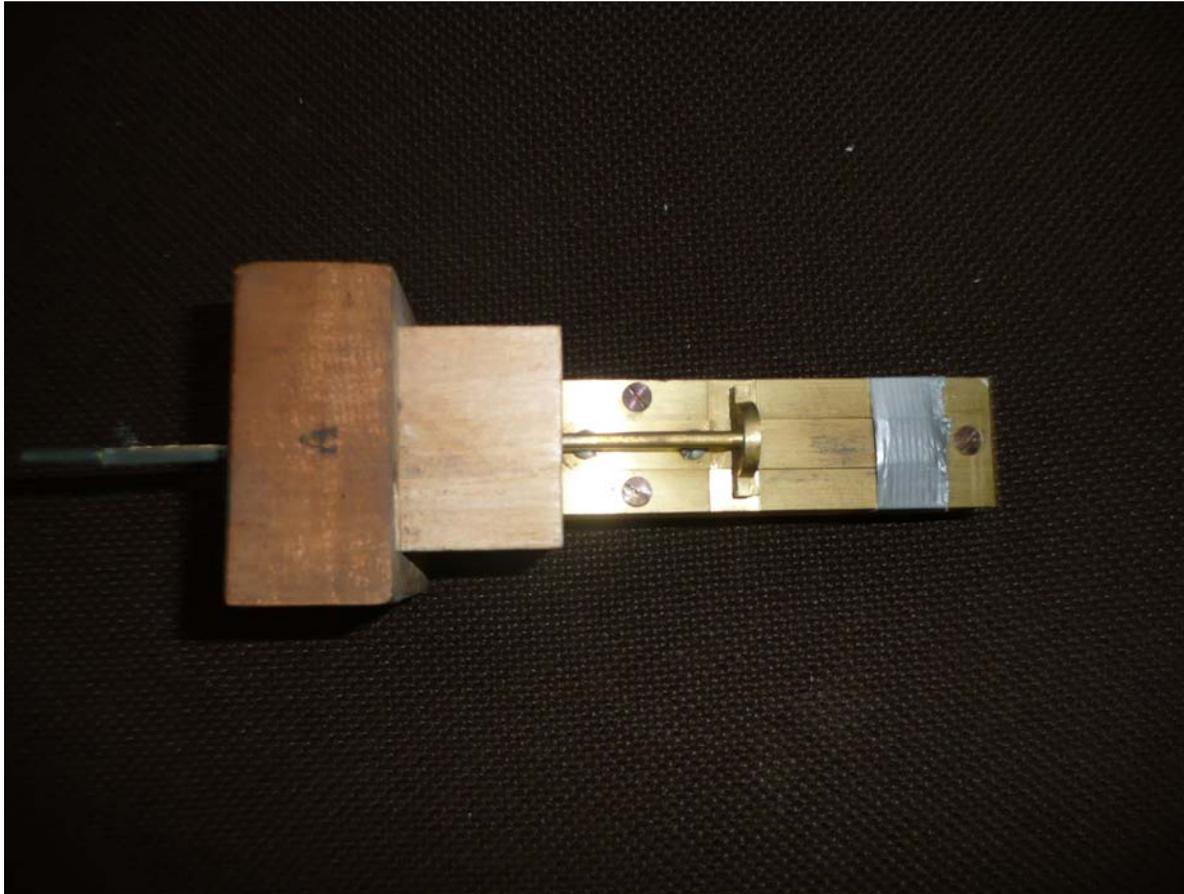
Die Pfeife klingt kaum stärker, als das Geräusch

Die durchschlagende Zungenpfeife E“ mit Resonator im großen Windkanal



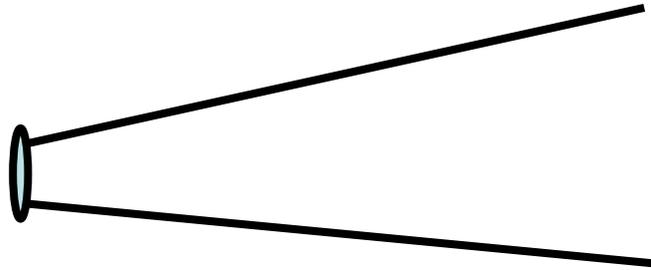
Resonator → viel stärkerer klang!
Schönes Spektrum, keine breite Linien!
Erstes gutes Ergebnis!

Stillegung des Klanges



Zunge abgeklebt - funktioniert gut!

Stilleung des Klanges



Resonator abgeklebt - **funktioniert gut!**

Schallerregung mit Staudruck – neue Aufgabe!

Viele Quellmöglichkeiten wurden getestet

Winddruckänderungen verhindern einen guten musikalischen Klang (f-Änderungen)!

Windradumdrehung konstant, aber Wind → Fluktuationen

Bei der Lippenpfeife:

- Schneidenton-f ändert sich mit dem Winddruck
- Resonator hält den f Konstant,
aber besser bei einer engen Lippenpfeife
- Enge Pfeife ist leiser!

Die durchschlagende Zunge funktioniert gut!!

- Die Frequenz ist unabhängig vom Winddruck
- Große Schalleistung könnte erreicht werden

- Durschlagende Zungenpfeifen müssten für Windradzwecke entwickelt werden
- Konstruktionsentwicklung mit Mühleisen und Herrn Günzelt (eine Pfeife)
- Akustische Optimierung mit Mühleisen und Herrn Günzelt (eine Pfeife)
- Konstruktionsentwicklung und akustische Optimierung von max. 25 Pfeifen
- Konstruktionsentwicklung mit H. Liersch und H. Heuss (Magnetventil an der Pfeife)
- Herstellungsmöglichkeiten aus Glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) (mit Herrn Liersch)
- Befestigungsmöglichkeiten (mit Herrn Liersch)
- Entwicklung der Spielbarkeit mit Fernsteuerung (H. Heuss)

Laborbesichtigung