

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

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

Zusammenfassung

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

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 Schallleistung) 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.

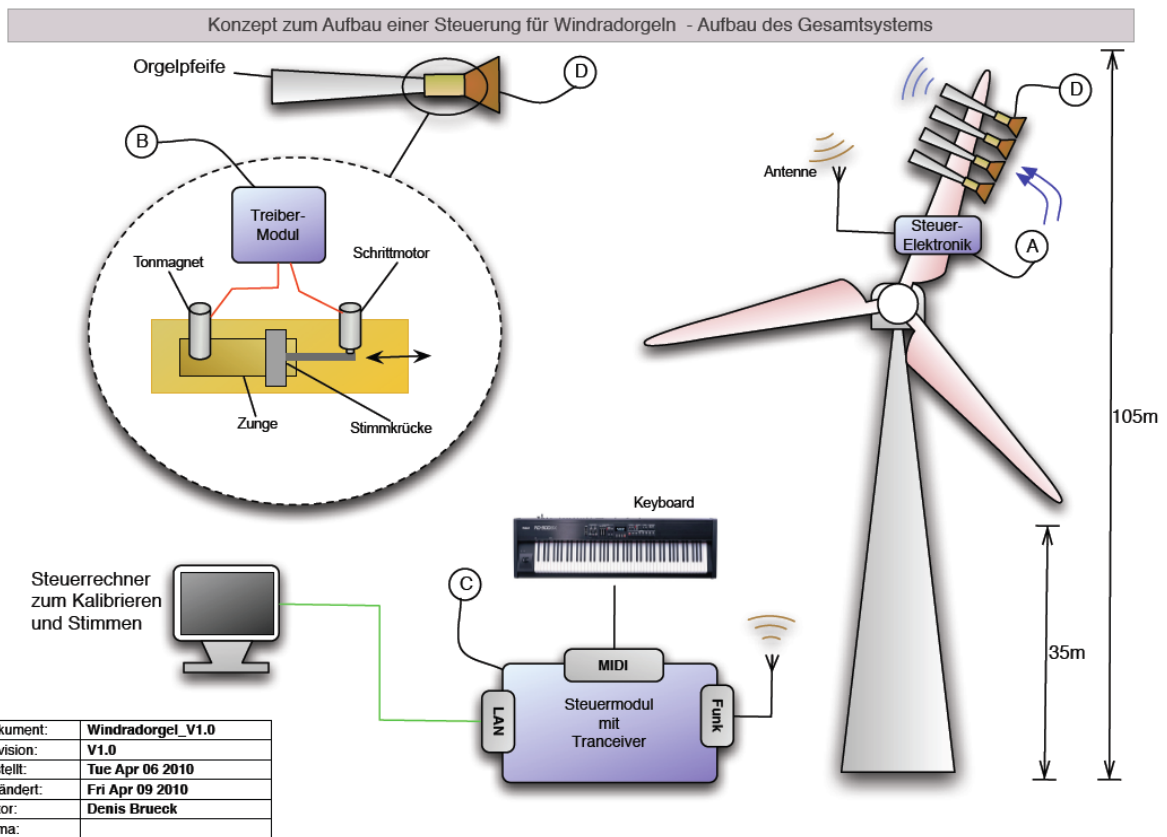


Bild 1 Konzept zum Aufbau des Gesamtsystems (Entworfen von H. Brück, i. A. O. Heuss GmbH) Orgelpfeifen nicht maßstäblich

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

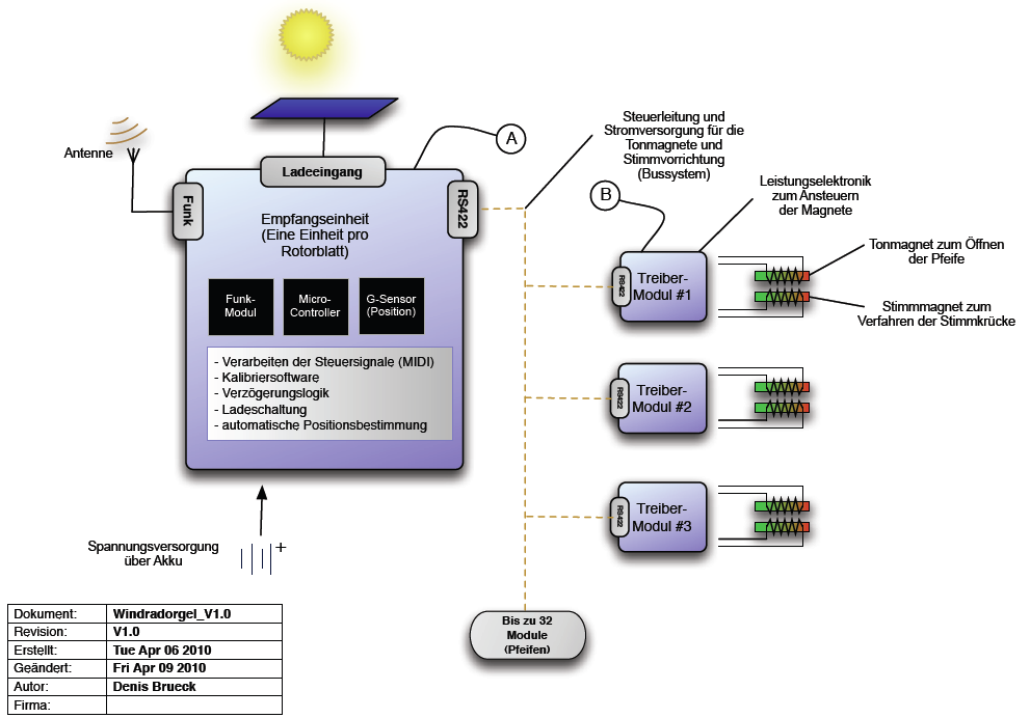


Bild 2 Konzept zur Ansteuerung der Pfeifen (Entworfen von H. Brück, i. A. Otto Heuss GmbH)

Konzept zum Aufbau einer Steuerung für Windradorgeln - Steuereinheit

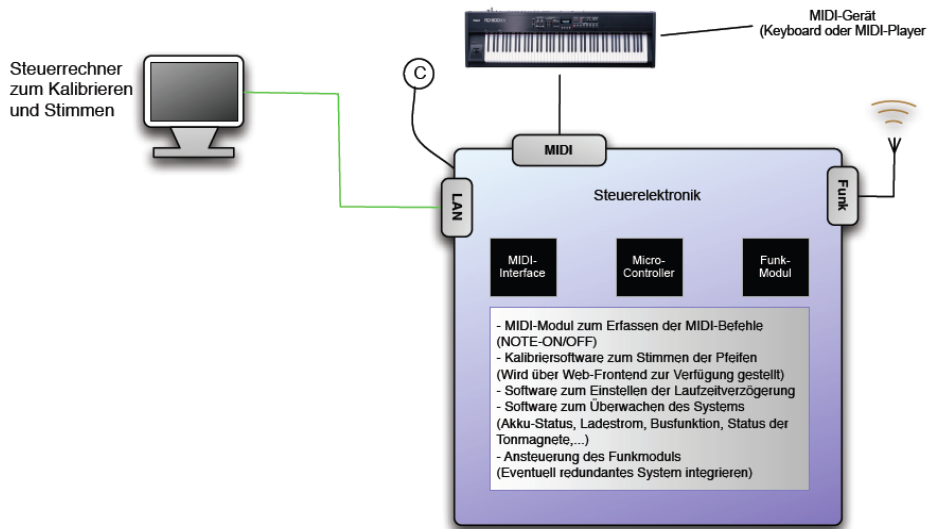


Bild 3 Konzept zur Steuereinheit (Entworfen von H. Brück, i. A. Otto Heuss GmbH)

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.