

EIN INFRASCHALLSENSOR IM EIGENBAU

Wolfgang Haas Langenmosen



Bilder: commons.wikimedia.org „Public Domain“

--Die Motivation

In unserer Gemeinde sollte bis vor kurzem eine Windkraftanlage mit 2 MW und 100 m Nabenhöhe errichtet werden - gerade mal 600 m entfernt von der Wohnbebauung. Nun kennt jeder der auch nur einmal an einer solchen Anlage vorbei gegangen ist das enorme Rauschen, das die Rotorblätter produzieren. Dies ist nur der hörbare Anteil des erzeugten Akustikspektrums. Über den nicht hörbaren INFRASCHALL unterhalb der menschlichen Wahrnehmungsgrenze von etwa 20 Hz gibt es im Internet unzählige Artikel, die auf mögliche Gesundheitsgefahren hinweisen. Auch geologische und meteorologische Phänomene erzeugen ständig Infraschallwellen, die - nebenbei bemerkt - kaum durch klassischen Schallschutz von Wohnräumen fernzuhalten sind. Ferner gibt es Hinweise wonach an der Wetterfühligkeit vieler Menschen niederfrequente Luftdruckschwankungen beteiligt sind. Das sind genügend Gründe um sich mit diesem Randbereich der Atmosphärenphysik näher zu befassen. Hierfür kommt man an einem Messinstrument, das den Druckbereich bis hinab in den Millihertz- und Mikrobar-Bereich erfasst nicht vorbei. Die Anzahl kommerzieller Hersteller solcher Sensoren ist weltweit äußerst überschaubar. Zudem wären diese Geräte von einem Amateur mit Preisen ab 3.000€ kaum bezahlbar, sind es doch Instrumente der "ganz edlen Sorte", die meist aus renommierten Forschungslaboren kommen. Es bleibt also nichts Anderes übrig, als eine Eigenkonstruktion.

--Die Voraussetzung

Ohne maschinelle Metallbearbeitung und Elektronikfahrung ist das Projekt nicht realisierbar. Die Materialbeschaffung ist - Internet und Baumarkt sei Dank - kein Problem. Die Elektronik enthält KEINE schwer beschaffbaren Exoten. Fast alle elektronischen Bauteile sind sowohl in bedrahteter als auch SMD-Bauform bei REICHELT ELEKTRONIK erhältlich und hätten bequem auf einer Europakarte Platz. Die gibt es allerdings noch nicht. Die Gesamtkosten dürften geschätzt bei 200€ liegen.

--Die Auswahl der Erfassungsmethode

Ein kleines bisschen "Internet-Spionage" bei den kommerziellen und bei den wenigen Amateurveröffentlichungen verdeutlicht: viele Möglichkeiten zur Erfassung feinsten Luftdruckschwankungen gibt es nicht. Verwendung finden barometerähnliche Druckdosen oder Metallbalge, die zur Kompensation von langzeitigen Druckschwankungen über ein Kapillarrohr mit dem Umgebungsdruck korrespondieren. Sogar ein Zweistrahl-Laserinterferometer wird beschrieben. Die meisten Halbleiter-Drucksensoren kommen wegen ihres breitbandigen Rauschens nicht in Frage oder scheiden wegen des Preises und der Verfügbarkeit aus.

Im Interesse der Ehrlichkeit sollen auch die erlittenen Bauchlandungen nicht verschwiegen werden.

EIN INFRASCHALLSENSOR IM EIGENBAU

-Der 1. Versuch:

Mit einem selbst geprägten und verlöteten 10-stufigen Aneroidsatz mit berührungslosem Induktivaufnehmer wurde folgendes Ergebnis erzielt: Er erfasst Druckschwankungen unter 1 μ Bar bis über 10 mBar. Leider ist der Aufbau thermisch ausgesprochen instabil und reagiert mit sagenhafter Ausdauer auf seismische Erschütterungen.... Projekt gestorben (gezahltes Lehrgeld 1 Woche Arbeit).



Trotz Aufwand nicht erfolgreich

-Der 2. Versuch:

Ein 7-teiliges Aneroid aus einem Trommel-Barographen (im Internet ersteigert) wurde zuerst mit Differenzialtransformator, dann mit Differenzialkondensator versehen und lief von Anfang an sehr stabil - so "stabil", dass er wohl auf Millibar reagierte aber für Mikrobar zu störrisch war... Projekt auch gestorben (gezahltes Lehrgeld 50€).

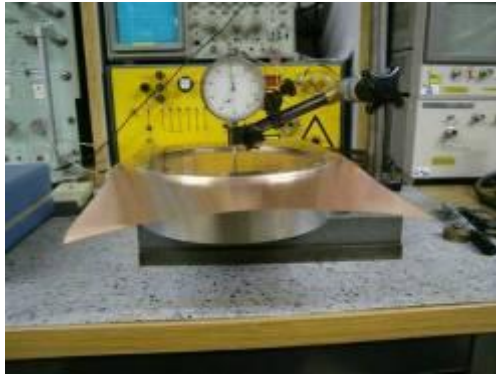


Aneroid zu unnachgiebig

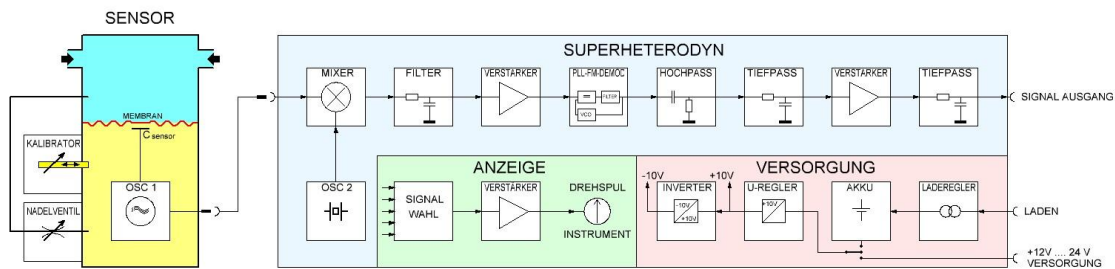
-Der 3. Versuch:

Diverse Berechnungen und ein Biegeversuch mit einer großflächigen Metallmembran sahen sehr viel versprechend aus. Eine solche Anordnung ist auch prädestiniert, um als elektrischer Kondensator zu arbeiten. Allerdings ist der zu erwartende Hub der Membran im μ m-Bereich angesiedelt, die Kapazitätsänderungen sind somit sehr klein. Um eine ausreichende Empfindlichkeit und Zuverlässigkeit zu erreichen, findet ein Schaltungsprinzip Anwendung, das der Funkamateur als [Superheterodyn](#) kennt. Das sind variabler und fester Oszillator, Mischer, Zwischenfrequenz, Filter und Demodulator.

EIN INFRASCHALLSENSOR IM EIGENBAU



Elastizitätsmessung an einer Metallmembran



Blockschaltbild

--Die Membran

Zunächst fiel die Auswahl auf CuZn37-Folie, die war allerdings derart unkooperativ, dass man ihr eine angemessene Reaktion auf Mikrobar und Pascal nicht zutraute. Eine Kupferfolie ([OPITEC](#) Artikel-Nr. 821540) ist da wesentlich gutmütiger. Auch das Prägen in eine Matrize mit konzentrischen Wellen gelang mit Cu auf Anhieb, während sich die Ms-Folie "irreversibel aus dem Elastischen Bereich verabschiedete" (gezahletes Lehrgeld 8€). Auch eine nur leichte Wellenstruktur erhöht die Elastizität und damit die Empfindlichkeit nach den durchgeführten Messungen um mehr als 40%. Zu dem wirkt das Prägen als Voralterung und Härtung der metallurgischen Struktur. Rechnerisch ergab sich einen Hub von $1\mu\text{m} / \mu\text{Bar}$. Gerne hätte ich auch Experimente mit Neusilberfolie und Alu-99,5 gemacht, konnte aber nichts in etatgerechter Kleinmenge auftreiben. Anmerkung: Die Schnittkanten der Metallfolien sind messerscharf (auch hier bestraft Gott kleine Sünden sofort - mit blutenden Fingern).

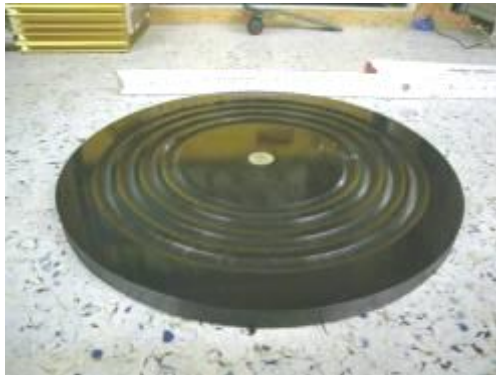


Gerissene Ms-Folie (kurz vor der Verschrottung)

EIN INFRASCHALLSENSOR IM EIGENBAU

--Das Prägen

Dazu ist eine Scheibe aus Kunststoff, hier Polyethylen 10mm, mit dem Durchmesser der Membran auf der Drehbank mit konzentrischen Wellen zu versehen. Die detaillierten Maße sind im Teil „Mechanik“ abgebildet. Zur Bearbeitung wurde die Scheibe mit einem zentralen Aufspanndorn im Backenfutter befestigt. Die Zentralbohrung ist danach mit Schmelzkleber vergossen. Zusammen mit 8 mm feinporigem Moosgummi etwa Shore-Härte 20 als Gegenstück wurde die Cu-Folie in einer Schlossereiwerkstatt mit einer Hydraulikpresse geformt, wobei eine Auflast von 20 Tonnen nicht übertrieben waren. Die Matrize wird später weiter verbaut. Die Löcher am Rand der Membran, durch die später die Schrauben führen sind mit einem Bürolocher hergestellt.



Matrize, später als Deckel verwendet



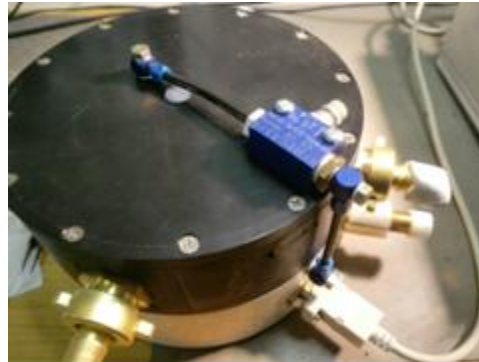
Cu-Membran nach Prägung

--Der untere Topf

Die Verwendung einer Membran führt zwangsläufig zu einem topfähnlichen Behälter auf jeder Membranseite. Beide Behälter sind pneumatisch durch einen einstellbaren Bypass miteinander verbunden, so werden langzeitige Druckänderungen ausgeglichen. Ein einstellbares Nadelventil (FESTO Typ GRO-M5 oder 1/8) erlaubt es die pneumatische Zeitkonstante bis in den Minutenbereich einzustellen. Wenn auf die Einstellbarkeit verzichtet wird, wäre auch eine vorsichtig gequetschte Injektionskanüle verwendbar. Der untere Topf sollte wegen der elektrischen Abschirmung und der mechanischen Stabilität aus Metall sein. Er ist mit einer 5mm-Al-Platte unten hermetisch dicht verschlossen. Das verwendete Alu-Rohr ist vom eBay-Shop "[Technik-Tools-HS](#)", er bietet ein Alu-Rohr 180mm x 10mm ab 5cm Länge zum akzeptablen Preis an. Dies war übrigens mit 160mm der größte Innendurchmesser, der aufzutreiben war.



Unterer Topf mit Kondensatorplatte



Bypass Anordnung des Nadelventils

EIN INFRASCHALLSENSOR IM EIGENBAU



Membran auf unterem Topf

--Der Kalibrator

Der Kalibrator ist fest am unteren Topf angebaut und hat einen Kolben, der über ein Feingewinde M14x1 verstellbar ist. Die Verdrängung ist exakt an das freie untere Topfvolumen angepasst, hier 806 cm³. Mit 80,6 mm² Kolbenfläche erzeugt er 100 µBar pro Umdrehung Unter- oder Überdruck. Das vereinfacht die Kalibrierung erheblich und macht das Gerät zu jeder Zeit überprüfbar. Auch die pneumatische Zeitkonstante lässt sich durch die Sprungantwort sauber justieren. Die Kolbenoberfläche ist hochglanzpoliert. Zur Gleitabdichtung ist ein O-Ring unter einer Schlitzmutter eingebaut.



Kalibrator Einzelteile (mit Schlitzmutternschlüssel)

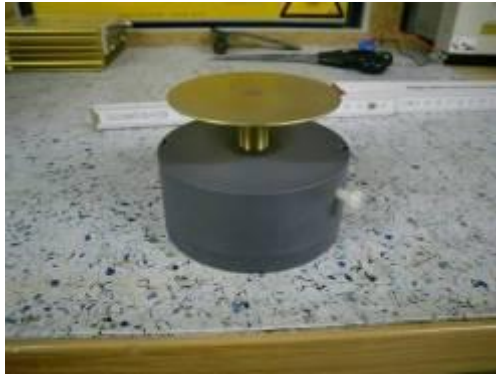


Einbaufertig mit Skala

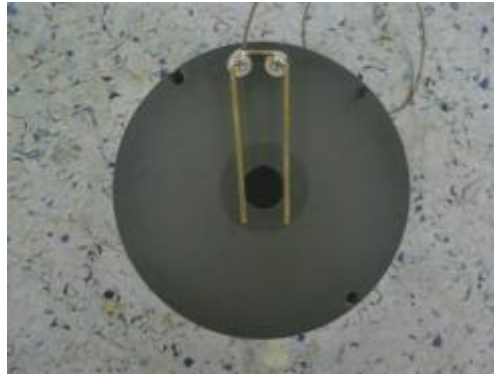
--Die feste Kondensatorplatte

Im Zentrum der Bodenplatte befindet sich auf einem Kunststoffzylinder die feste Kondensatorplatte. Der Aufbau ist rotationssymmetrisch und ist via Feingewinde M12x0,5 im Abstand zur Membran justierbar. Sie besteht aus 1 mm Ms mit ca. 70 mm Durchmesser. Um die Drehung beim Einstellen nicht zu behindern, ist die Platte über einen federnden Schleifer kontaktiert. Eine Messung mit Membran ergab 35 pF. Für die Justage nach dem Zusammenbau ist der M12-Gewindestift unten geschlitzt und durch eine verschleißbare Bohrung im Zentrum der Bodenplatte zugänglich.

EIN INFRASCHALLSENSOR IM EIGENBAU



Der Kondensatorsockel mit PA-Klemmschraube



Der Schleifkontakt

--Der obere Topf

Material, Geometrie und Bauart des oberen Topfes sind im weitesten Sinne unkritisch. Das Oberteil hier besteht aus einem Polyethylenrohr, das aus der Abwassertechnik stammt (ungebraucht!) und oben mit der nun übrigen Matrize als Deckel verschraubt wird. Es enthält kreuzförmig 4 Schlauchanschlüsse mit $\frac{3}{4}$ Zoll Anschlussgewinde für den Messeingang. Eine Abdichtung mit O-Ringen wäre angesichts der niedrigen Drücke übertrieben. Hier hat sich Montagepaste MOLYKOTE Typ D auf allen Dichtflächen und Pneumatikgewinden bewährt. Die Paste ist neutral gegenüber allen verwendeten Materialien und hat etwa die Konsistenz einer bekannten Hautcreme im dunkelblauen Döschen (wahrscheinlich ginge die auch). Dem Kolben und dem Gewinde des Kalibrators verleiht die Paste langzeitige Abdichtung und Leichtgängigkeit.



Oberer Topf mit aufgetragenem Abdichtmittel

--Die Oszillatoren

Die ersten Versuche wurden mit dem meist verkauften IC des Universums - dem 555 - durchgeführt. Weil ihm trotz CMOS-Version ein massives Phasenrauschen auch mit Aufwand nicht auszutreiben war folgten Experimente mit anderen Schaltungen. Ein Oszillator mit dem Schmitt-Trigger 4093 lief am saubersten auf 1,92 MHz. Er ist sinniger Weise direkt in die Sensormechanik eingebaut und hat als zeitbestimmenden Kondensator nur die Membran (Massepotential) und die feste Platte in Topfmitte. Um neben C auch R von außen verändern zu können dient ein Spindelpoti mit abgedichteter Achse (der Mini-O-Ring stammt aus einem Gasfeuerzeug). Mit dem Poti wird später die Mittenspannung des Demodulators auf 5 Volt eingestellt. Ein hermetischer (von hinten vergossener) SUBD-9-Steckverbinder überträgt das Signal aus- und die Betriebsspannung in den unteren Topf. Die Steckerbelegung ist an die mittlerweile überflüssigen RS-232-Kabel angepasst. Der zweite - feste - Oszillator schwingt mit Quarz auf 2,00 MHz.

EIN INFRASCHALLSENSOR IM EIGENBAU



Unterer Topf mit Oszillator



Topf mit Kondensatorplatte und Kalibrator

--Der Mischer

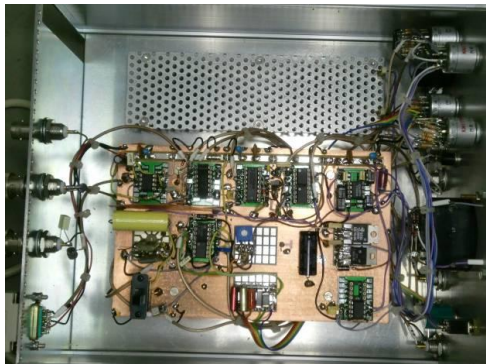
Beide Oszillatoren werden in einem Exclusive-Nor-Gatter 4077 überlagert. Die daraus resultierende "Zwischenfrequenz" von 80 kHz benötigt nur einen RC-Tiefpass als Filter. Der folgende Komparator verstärkt das sinusähnliche Signal bis auf den 10V-CMOS-Pegel.



Elektronik, Frontplatte von Innen

--Der PLL-FM-Demodulator

Als FM-Demodulator wurde der PLL-Schaltkreis 4046 eingesetzt. Er verarbeitet das Komparatorsignal zusammen mit seinem VCO und seinem Phasenvergleich zu einer Abstimmspannung mit etwa 5 Volt bei 80 kHz. Der Synchronisationsbereich reicht von gut 30 bis 130 kHz.



Elektronik Draufsicht mit Platz für Akku

EIN INFRASCHALLSENSOR IM EIGENBAU

--Die Filter

Die Abstimmungsspannung des VCO von 1 bis 9 Volt ist das Nutzsignal. Der DC-Anteil wird in einem Langzeit-Hochpass mit 5 bis 100 s abgetrennt, so dass nur noch das AC-Signal übrig bleibt. Zum Abkürzen der Einschwingzeit dient ein Taster, der den 10 μ F-Kondensator gewaltsam auflädt und zugleich die elektrische NULL am Messausgang einstellt (der OpAmp davor ist dauer-kurschlussfest). Zusammen mit der pneumatischen Zeitkonstante des Topfvolumens wird hier die untere Grenzfrequenz von circa 1 bis 30 mHz festgelegt. Der folgende Tiefpass beseitigt das Rauschen des PLL-FM-Demodulators oberhalb 100 Hz. Die obere Grenzfrequenz wird durch einen schaltbaren Tiefpass auf 1 bis 100 Hz bestimmt. Das Kalibrierpoti ist in die Frontplatte integriert. Ein schaltbarer Attenuator liefert den Messausgang zu Registriergerät, Soundkarte, AD-Wandler, FFT-Analyzer.....

--Die Anzeige

Zum Abgleich, zur Inbetriebnahme und zum "Rumspielen" wurde eine Zehnerpackung BNC-Buchsen geopfert, welche alle markanten elektrischen Signale zugänglich machen. Zum Einstellen der Demodulatormitte, für Diagnosezwecke und Direktanzeige des Messwertes dient ein Drehspulinstrument mit Mittelstellung. Durch 2 Drehschalter und eine Hand voll Widerstände wurde es zum "Multimeter". Die Betriebsanzeige durch eine LED-Zeile (war im früheren Leben im Handydisplay) beleuchtet die Messwerkskala. Die LEDs erhöhen den Gesamtstromverbrauch von etwa 50 auf 60 mA.



Drehspulmesswerk mit Beleuchtung

--Die Stromversorgung

Um den Betrieb im Gelände mit Batterie zu ermöglichen ist ein SwitchCap-Wandler eingebaut. Er liefert die Minusspannung für die OpAmps. Die Siebung der Spannungen des ICL7662 an Ein- und Ausgang verdient etwas Aufwand, um Rückwirkungen auf die Schaltung zu vermeiden. Stützkondensatoren an allen IC's sind ohnehin obligatorisch. Auch ein Stück Kupferrest von der Membran schadet nicht als Abschirmung der sensibleren Schaltungsteile. Bei Verwendung eines Low-Dropout-Spannungsreglers LM2940T-10 oder L4810 kann das Gerät mit 12 Volt-Akku oder KFZ-Bordnetz betrieben werden. Wegen der geringen Verlustleistung von <1Watt benötigt der TO-220-Typ keine Kühlung. Selbstverständlich muss die Ladeschaltung individuell an den Akku angepasst werden. Nachdem die meisten Netzgeräte - egal ob linear oder Switchmode - kleine Störfeldterroristen sind wurde bewusst auf ein internes Netzteil verzichtet, irgendein Steckernetzteil mit 12 bis 24VDC ist meist irgendwo vorhanden (Abstand ist eben der beste Strahlenschutz). An das Gehäuse sind keine besonderen Ansprüche zu stellen. Hier kam eine großzügige 19-Zollkassette mit 42 Teileinheiten zum Einsatz, sie bietet auch noch Raum für den Pb-Akku. Die Beschriftung der Frontplatte mit selbstklebender Laserfolie hat sich auch bei vielen anderen Projekten bewährt. Eine Tabelle mit wichtigen Daten ist oben auf dem Gehäuse aufgeklebt. Ein Muster ist im Teil Mechanik zu finden.

EIN INFRASCHALLSENSOR IM EIGENBAU



Rückwand (Laden – Betrieb – Ausgang – Sensor)

--Erste Messungen im Keller

Die Empfindlichkeit scheint mit $20 \text{ mV} / \mu\text{Bar}$ bei $0,05 \mu\text{Bar}$ Grundrauschen akzeptabel. Ein versuchsweise angeschlossener NF-Verstärker mit Lautsprecher hatte sofortige Rückkopplung mit geschätzten 100 Hz zur Folge. Die niederfrequenten Druckschwankungen zeigen eine etwas eigensinnige Korrelation mit dem Anemometer der Wetterstation. Das Öffnen und Schließen von Türen im gesamten Haus ist als Peak sichtbar. Die Luftsäule, welche man beim Betreten eines Raumes vor sich her schiebt, erzeugt eine Veränderung um $10 \mu\text{Bar}$ - mit Richtungserkennung. Die Mikrofonie beim Anklopfen ist vertretbar. Das Anwärmen des unteren Topfes mit der Hand führt sofort zu Zeigerausschlag, die Physik ist eben nicht auszutricksen. Interessant ist auch das Anheben und Absenken des Sensors um einen ausgemessenen Meter, eine gute Kalibriermethode, ich messe $120 \mu\text{Bar}$. Der Druckunterschied ist schon bei wenigen Millimetern Höhenveränderung messbar.

Die [allgemeine Gasgleichung](#) und die [barometrische Höhenformel](#) aus Wikipedia stimmen also doch!



Grundrauschen Y $0,1 \mu\text{Bar}/\text{Div}$. X $5\text{s}/\text{Div}$.



Raum verlassen und betreten Y $5\mu\text{Bar}/\text{Div}$. X $5\text{s}/\text{Div}$.

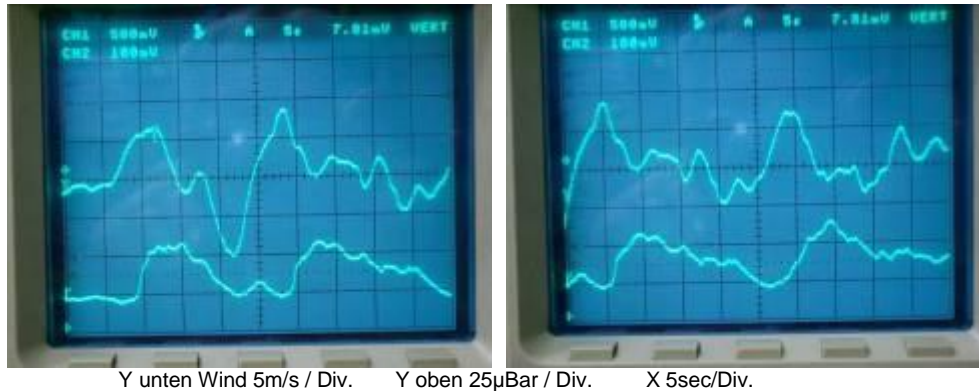


Kalibrator $\pm 100 \mu\text{Bar}$



Sensor 1 Meter anheben $50\mu\text{Bar}/\text{Div}$.

EIN INFRASCHALLSENSOR IM EIGENBAU



--Feldmessung an einer Windkraftanlage

Am 3. Juli 2013 fielen endlich folgende vier Faktoren zusammen:

1. Urlaub
2. Eine für bayerische Verhältnisse steife Briese
3. Kein Regen
4. Lust, die Messungen zu machen

Die WKA hat Folgende Daten:

- Hersteller AN-BONUS Typ SWT-1.3-62 (von Siemens geschluckt) Baujahr 2002
- Generatorleistung 1,3 MW bei 1500 U/min
- Rotordurchmesser 62m in 68m über Grund
- Getriebe 3-stufig 1 : 78
- Standort 48.6669°N 11.0889°E in 483m über NN am Westrand des [Bayerischen Donaumooses](#)

Der Infraschallsensor wurde auf der Leeseite der Anlage am Boden aufgestellt. Das hörbare Rauschen der Rotorblätter in 100m Entfernung vom Turm ist laut genug, um dort nicht wohnen zu wollen. Was weiter auffiel, ist das Getriebegeräusch aus der Maschinengondel, welches bei neueren Anlagen wesentlich besser isoliert ist oder mangels Getriebe völlig entfällt. Die Druckänderungen beim Vorbeistreichen der Rotorblätter am Turm waren mit etwa 1 µBar und 200 ms messbar. Das Yt-Diagramm entstand mit ProfiLab-Expert 4.0 und USB-ADC von [ABACOM](#). Die Spektren wurden mit der DC-gekoppelten Soundkarte eines Laptops und dem (absolut genialen) [SpectrumLab](#) V2.78 von DL4YHF aufgenommen. Es ist das einzige Freeware-Programm, das bis in den Millihertz-Bereich rechnet. In der spektralen Zeit-Frequenz-Analyse sind die Harmonischen um etwa 10dB kräftiger zu erkennen als die Flügelfrequenz von 0,96Hz. Oberhalb 20 Hz war nur noch ein homogenes Rauschen messbar. Eine kaum sichtbare Spektrallinie bei 32 Hz wird vermutlich durch das Getriebe verursacht. Die Windgeschwindigkeit in 2 Metern Höhe betrug in Böen bis 4m/s.

--Der Drucksammler

Ohne einen großflächigen Drucksammler wären die Messungen wegen der bodennahen Windturbulenzen unmöglich. Er besteht aus vier porösen Beregnungsschläuchen GARDENA Nummer 1968 mit je 3,75 Metern Länge. Diese Länge ergab sich aus einem Bund mit 15 Metern aus dem Baumarkt. Weil die Schläuche ein ausgeprägtes Eigenleben haben sind sie am Ende mit schweren Metallrundlingen verschlossen. Sie weigern sich sonst hartnäckig, dort zu bleiben, wo man sie ausgelegt hat.

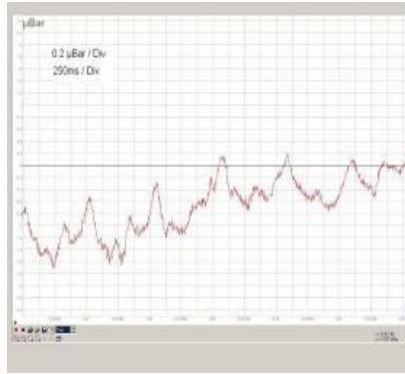
Anmerkung zur Interpretation der Messergebnisse:

Nach der allerersten Messung im Freiland ist es unangebracht eine Bewertung über das Gut und Böse von WKA's abgeben. Ich möchte zu diesem brandheißen Thema erst mehr ideologiefreie Erfahrung sammeln.

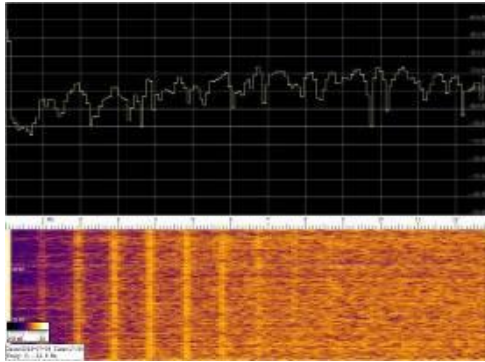
EIN INFRASCHALLSENSOR IM EIGENBAU



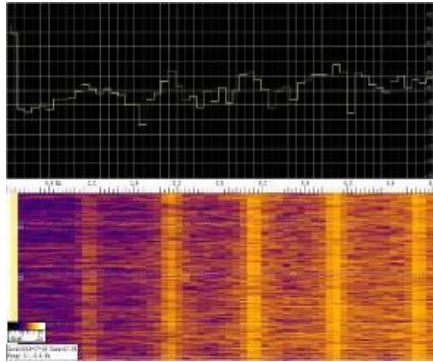
Messaufbau mit Drucksammler



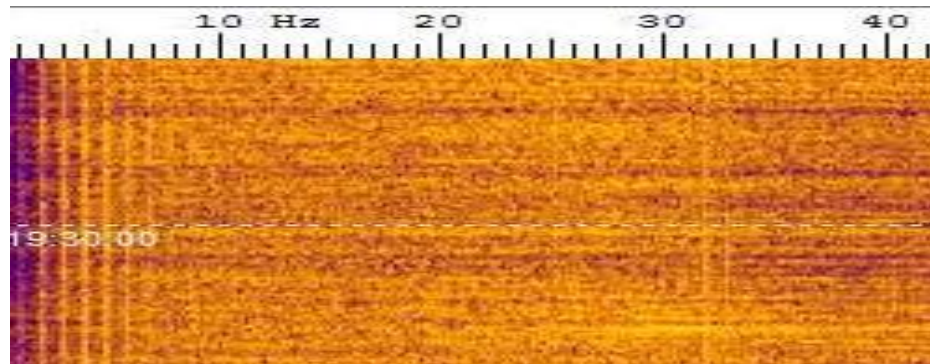
Yt-Diagramm bei 1,04s Flügelperiode



Spektrum 0-20 Hz, Messdauer 15 Minuten



Spektrum 0-5 Hz



Schwache Linie bei 32 Hz

EIN INFRASCHALLSENSOR IM EIGENBAU

--Schlussbemerkung

Erst möchte ich Niklas vom Forum der [GAG untertage.com](http://GAG.untertage.com) danken. Entgegen meiner Skepsis überzeugte er mich, diese Beschreibung überhaupt zu verfassen und zu veröffentlichen. Der Dialog mit ihm ist ausgesprochen kompetent und produktiv. Von ihm stammt die Idee trägheitsarme Membranen aus metallisierten Kunststoffen und Silikonen anzufertigen und das ganze Sensorsystem als vorgespanntes "Kondensatormikrofon" zu betreiben. Dies sind geniale Gedanken, die es wert sind, weiter verfolgt zu werden.

Sollte die Anzahl der Interessenten ein gewisses Maß erreichen werde ich gerne eine Leiterplatte entflechten und im Gerberformat oder [Sprint-Layout](#) zu Verfügung stellen. Der momentane Aufbau in Laborqualität ist in MINIMOUNT-Technik (selbstklebende Rasterplättchen auf Cu-Leiterplatte) erstellt.

Der CA3140 ist mein Lieblings-OpAmp, dessen vollständiges Datenblatt ausfallsicher im Gehirn eingraviert ist. Er ist durch viele andere FET-Eingangstypen ersetzbar. Außer dem 10µF Kondensator C24 können alle C's Keramik-Typen sein. Er muss ein leckstromarmer Folien-C sein. Da die Preisunterschiede bei Widerständen minimal sind, empfehlen sich auch wegen des Rauschens niedertolerierte Matallschichttypen. Vielleicht wirkt die Anwendung der alten Grundeinheit Bar etwas unwissenschaftlich, ich habe dafür aber einfach mehr Gefühl als für die SI-Einheit Pascal. Und erlaube sich bitte keiner über die rustikale Verdrahtung oder die kitschig bunte Frontplatte zu meckern!



Wolfgang Haas DG 5 MKQ
Langenmosen, Januar 2013

HAAS punkt LA ät NEUSOB punkt DE