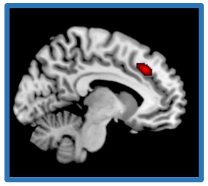
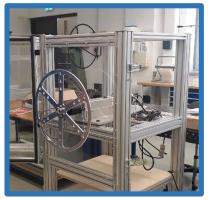
Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
Nationales Metrologieinstitut

Messen und Kalibrieren für den Infraschallfrequenzbereich

Christian Koch

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, www.ptb.de



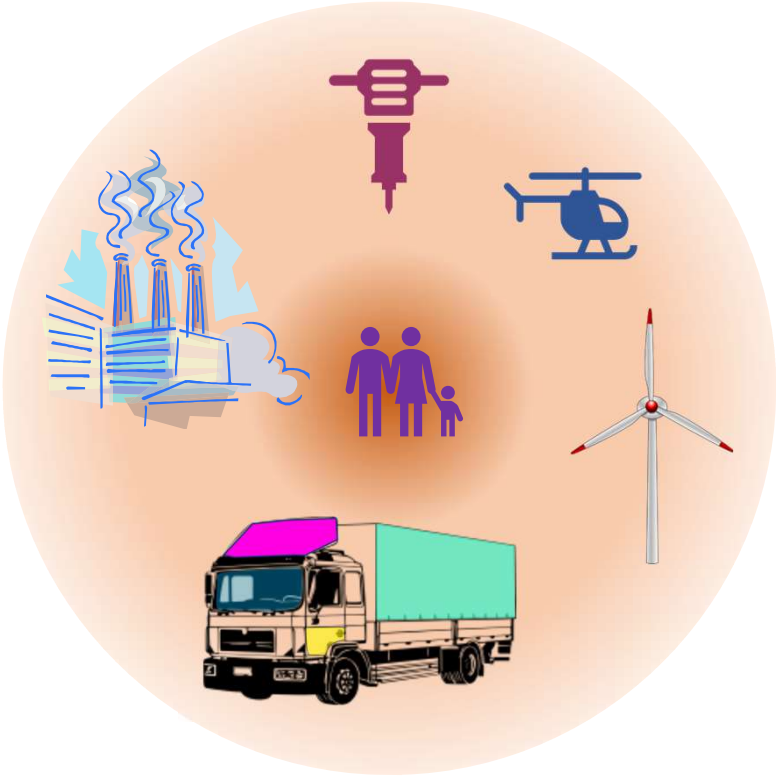


Infraschall: Aktuelle Situation

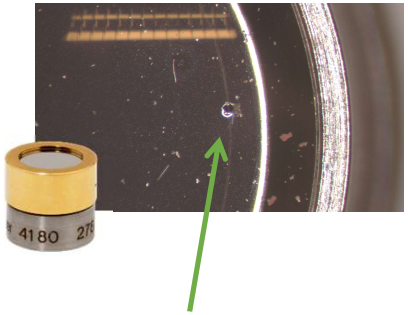
- Wir haben viele Infraschallquellen
- Kommen immer näher an Wohngebiete heran
- Eine zuverlässige, nachvollziehbare quantitative Analyse der Exposition und Bewertung der Immissionssituation ist eine wichtige Frage
- Es besteht Bedarf an methodischen und technischen Grundlagen für seriöse Messungen
- Sind die Grundlage für die aktuelle Diskussion angesichts der großen Herausforderungen des Klimawandels, die vor uns liegen

↓

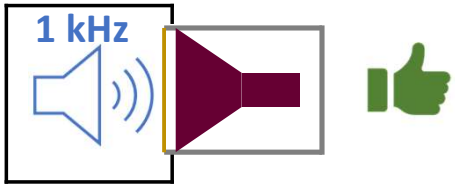
Wir brauchen zuverlässige Messungen

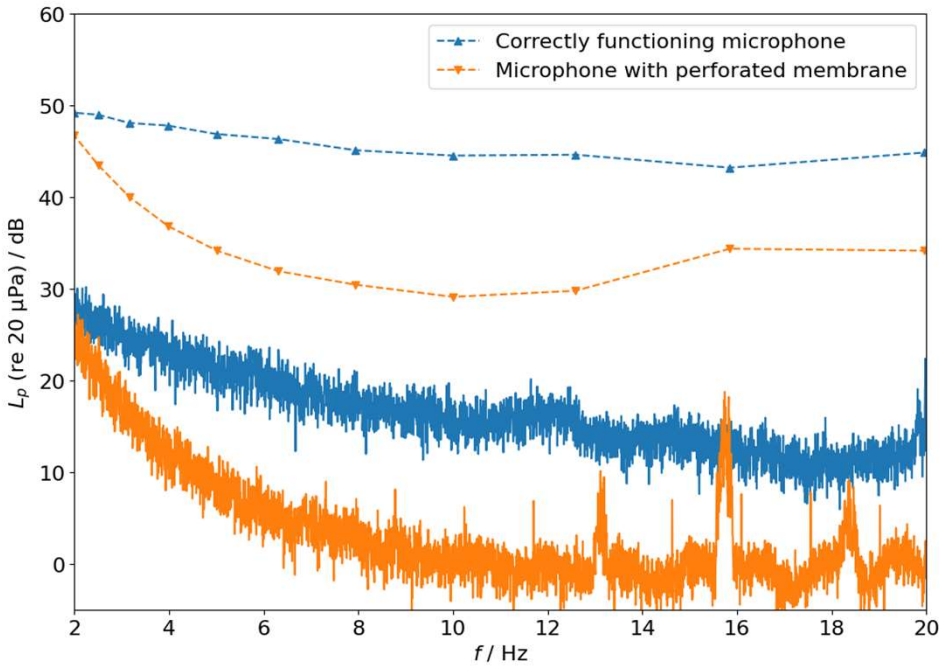


Gibt’s ein Problem? – Leider ja…



Perforation in der Membran





Rust, Marvin; Kling, Christoph; Koch, Christian; Barham, Richard (2023): Calibration and testing of measurement devices at infrasound frequencies: proof from malfunctioning devices at site. In: *Acta Acust.* 7, S. 50. DOI: 10.1051/aacus/2023048.

Infraschall: Was heißt „verlässliche Messungen“

- Nur korrekte Messungen überzeugen in Auseinandersetzungen
- Messung muss zu richtigen und nachvollziehbaren Ergebnissen führen
- Geeignete Technik:
  - Messung mit kalibrierten Sensoren
  - Kalibrierung muss rückführbar sein auf ein primäres (nationales) Normal
  - Messung mit geprüften Geräten: Baumusterprüfung im geschäftlichen Bereich
  - Geräte müssen *vor-Ort* kalibriert werden können

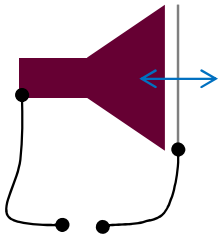
Infraschall: Was heißt „verlässliche Messungen“

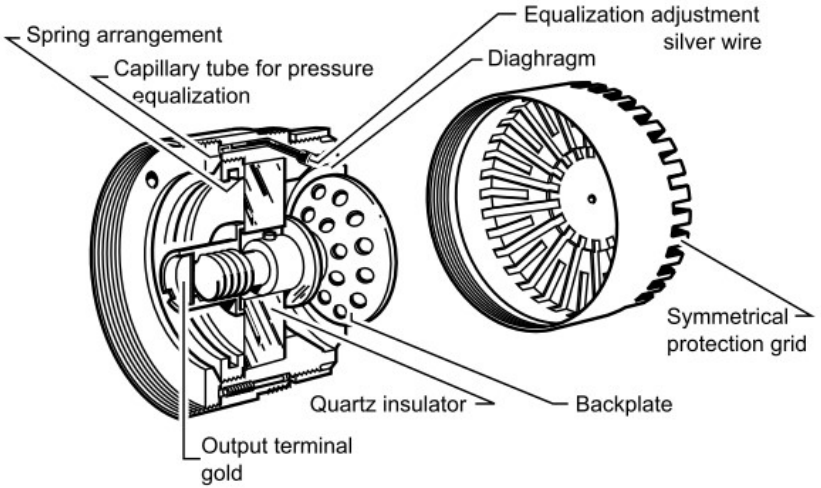
- Nur korrekte Messungen überzeugen in Auseinandersetzungen
- Messung muss zu richtigen und nachvollziehbaren Ergebnissen führen
- Geeignete Technik:
  - Messung mit kalibrierten Sensoren
  - Kalibrierung muss rückführbar sein auf ein primäres (nationales) Normal
  - Messung mit geprüften Geräten: Baumusterprüfung im geschäftlichen Bereich
  - Geräte müssen *vor-Ort* kalibriert werden können

- Neue Methoden und Technik entwickelt:
  - Primäre Kalibrierverfahren
  - Sekundäre Kalibrierverfahren
  - Methoden zur Prüfung der Geräte
  - Infraschall-Kalibrator

Messsensoren: Messmikrofone

Wichtigster Baustein: Kondensatormikrophon





LS2P:

- ø 0.5 inch: 12 mm
- Frequenzbereich: 0,1 Hz bis 100 kHz
- Noise equivalent power: $2\,\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Minimal detektierbarer Druck: 23 dB in BW = 20 kHz
- 3% distortion bei 160 dB
- Probleme: Materialien, Toleranzen, Alterung

© Neumann, Berlin

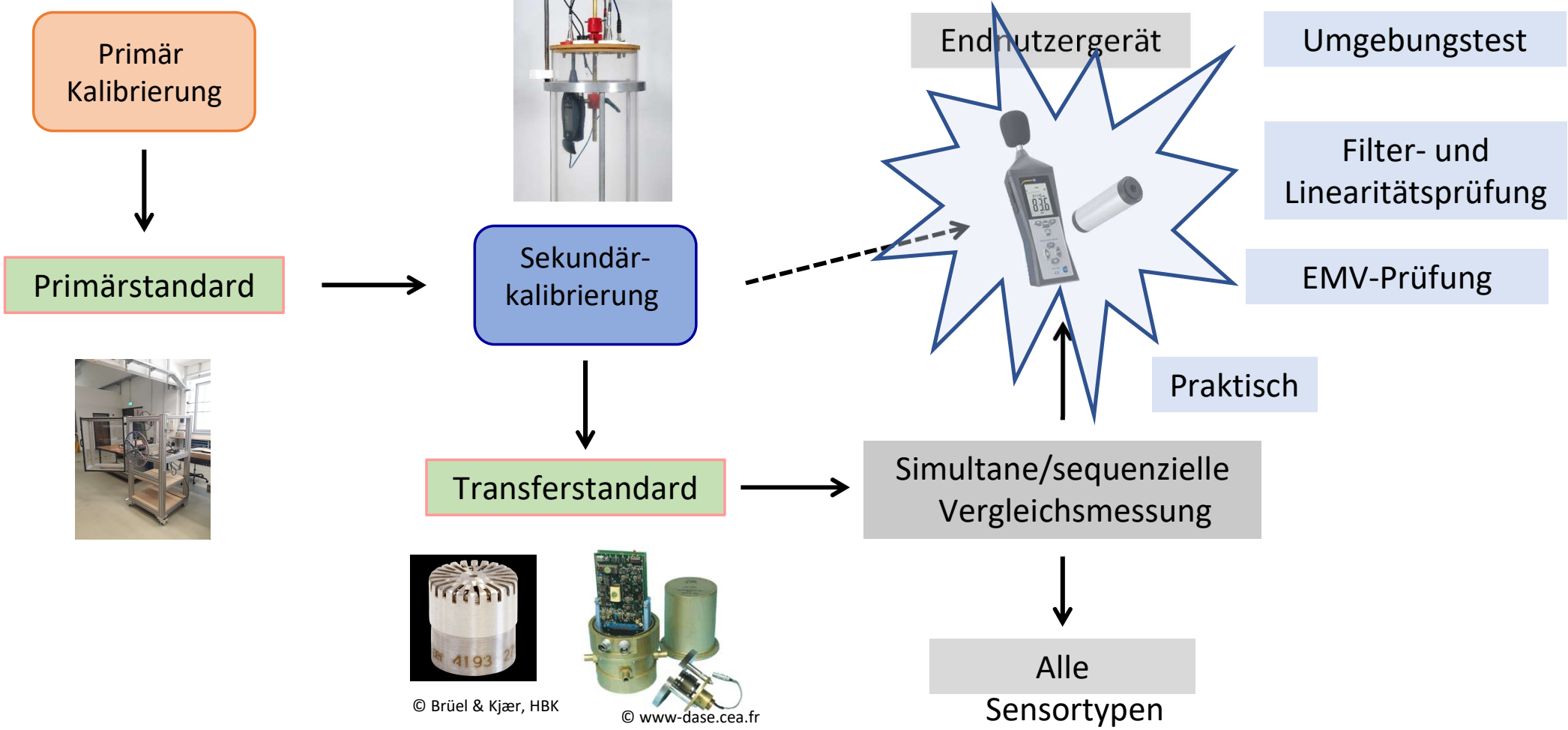
Messsensoren: Mikrobarometer

MB 2005:

- ø ca. 20 cm
- Frequenzbereich: 0,01 Hz bis 15 Hz
- Noise equivalent power: $4{,}5\ \mathrm{mPa} / \sqrt{\mathrm{Hz}}$
- Minimal detektierbarer Druck: 2 mPa in BW = 20 Hz
- Dynamikbereich: 108 dB
- Probleme: sehr groß, Temperaturabhängigkeit

© www-dase.cea.fr

Traceability chain



Traceability chain

Primär Kalibrierung

↓

Primärstandard

Unabhängige Technik für Kalibrierung: Das “Karussell”

Schätzung nach einer Idee von Ole-Herman Bjor:

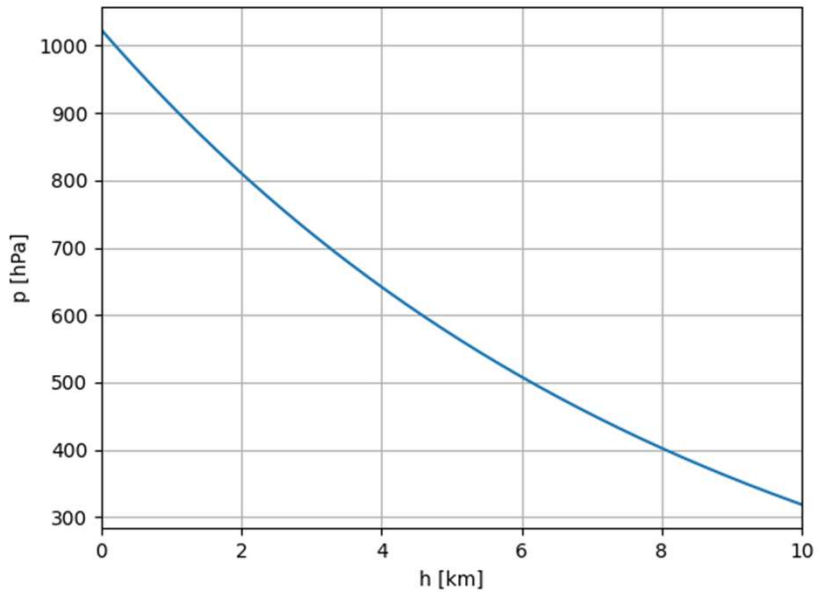
Welcher Wechseldruck wird von einem Mikrofon wahrgenommen, das auf und ab bewegt wird?

Barometrische Formel: $p = \rho \cdot g \cdot h$

$$\longrightarrow \quad \Delta p(t) = -\rho \cdot g \cdot \Delta h(t)$$

Aus Klimadaten (CIPM 2007)

$g = 9{,}8125\ \mathrm{m/s^2}$ (je nach Standort)



SPL:

$\Delta h = 1\ \mathrm{m}$ → $\Delta p = 11.6\ \mathrm{Pa}$

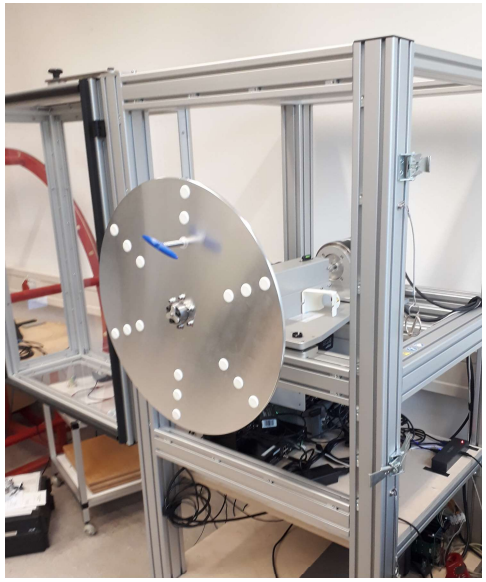
→ $L_p = 106.3\ \mathrm{dB}$

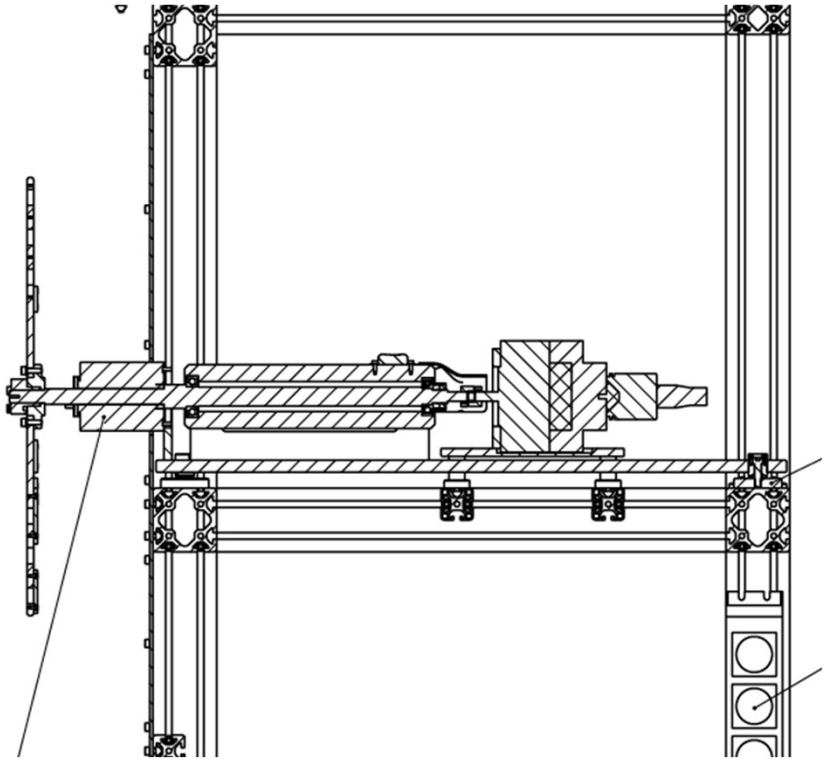
In der Messanordnung:

$\Delta h = 0.3\ \mathrm{m}$ → $L_p = 95.8\ \mathrm{dB}$

Unabhängige Technik für Kalibrierung: Das “Karussell”

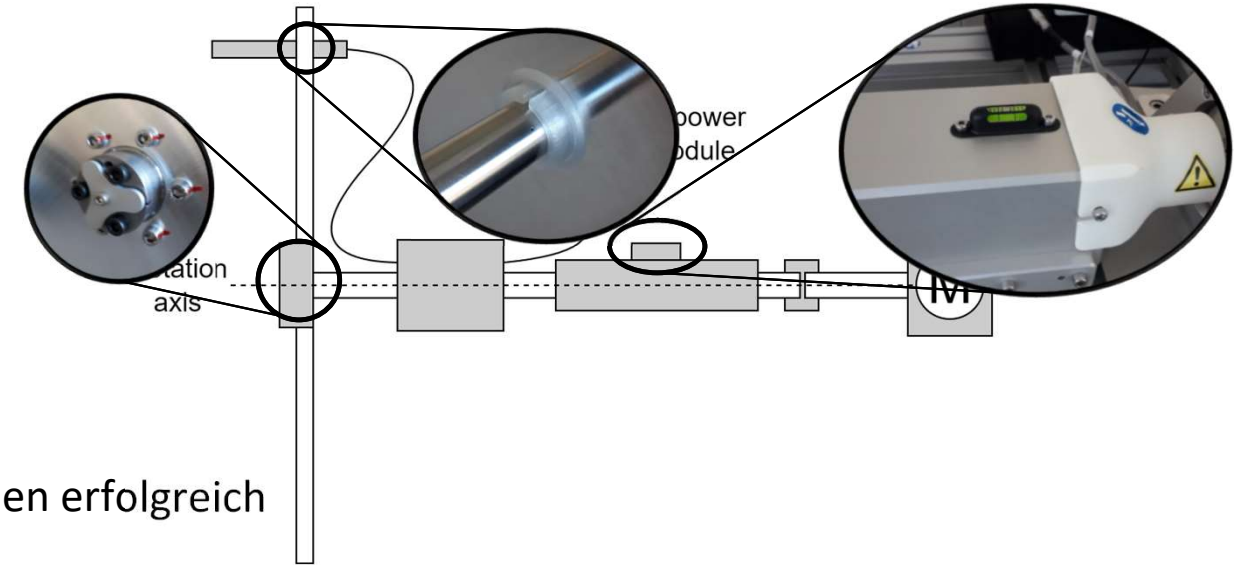
- Ein Freifeld simulierende Anordnung
- Aufbau mit vertikal rotierender Scheibe
- Kalibrierfrequenz f = Drehzahl der Scheibe
- Geeignet für Sensoren, die auf der Scheibe montiert werden können





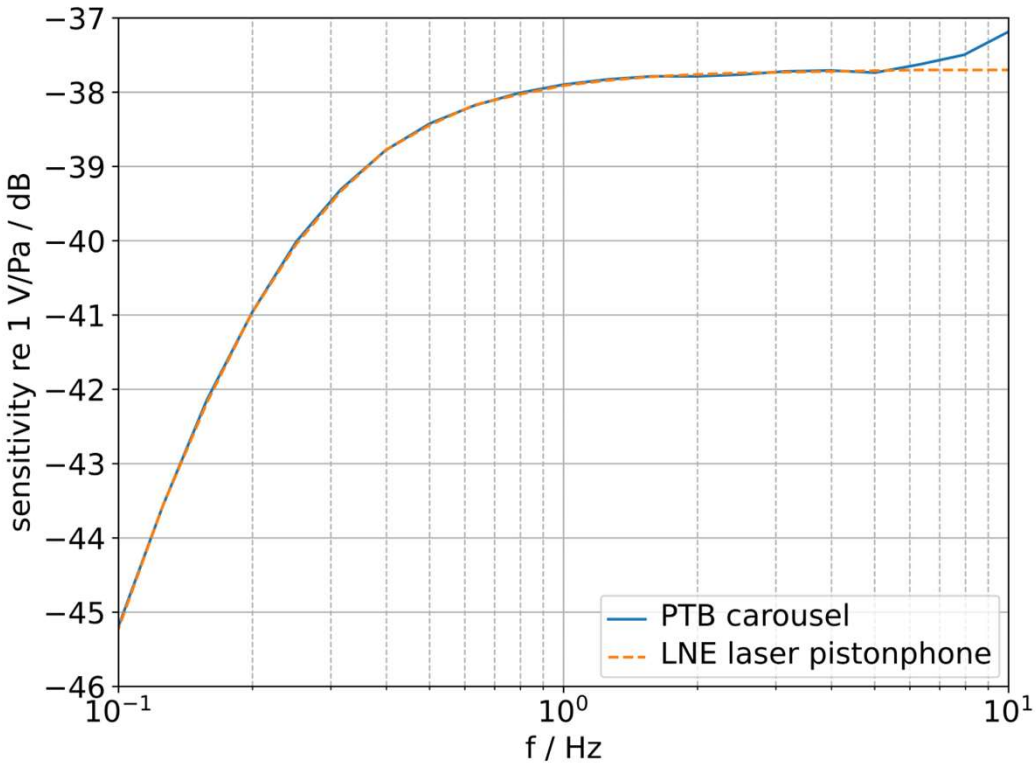
Unabhängige Technik für Kalibrierung: Das “Karussell”

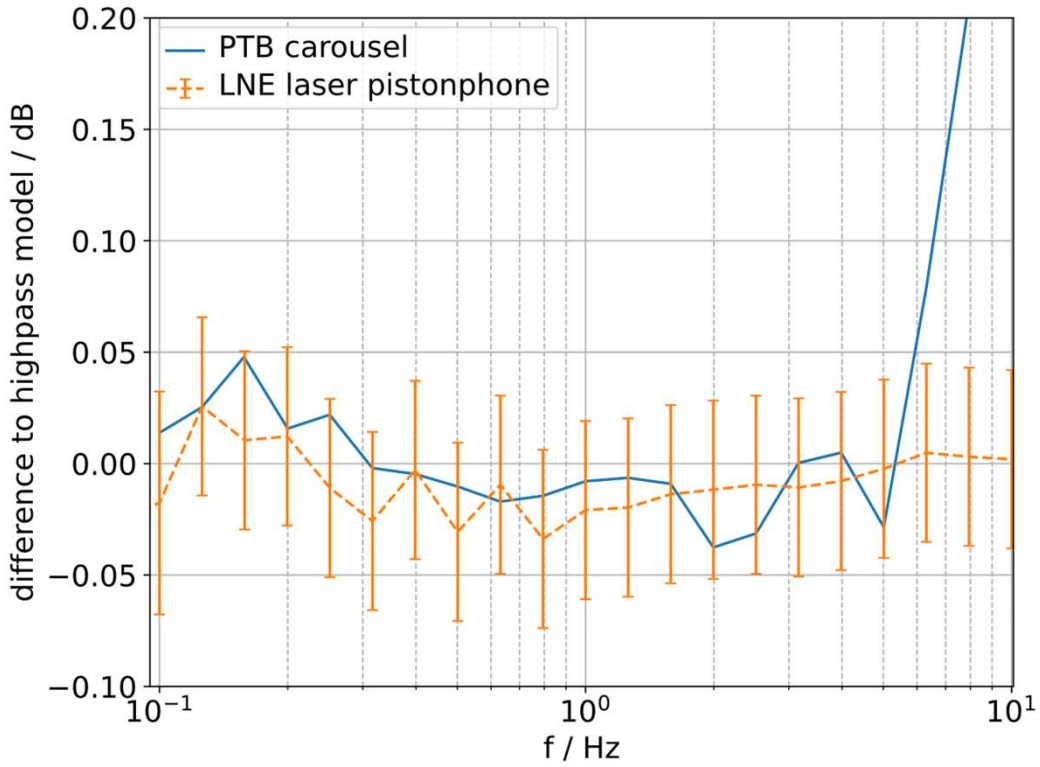
- Die Mechanik ist anspruchsvoll
- Vibrationsarm, präzise horizontal
- Selbstzentrierende Befestigungen
- Elektrisch rauscharme Au-Schleifringe
- Frequenzbereich: 0,1 Hz bis 5 (7) Hz
- Bei f = 0,1 Hz <0,2 dB Messunsicherheit
- Vergleichsmessungen mit anderen Methoden erfolgreich



Rust, Marvin; Kling, Christoph; Koch, Christian (2023): Primary calibration for airborne infrasound utilizing the vertical gradient of the ambient pressure. In: *Metrologia* 60 (4), S. 45001. DOI: 10.1088/1681-7575/acd941.

Beispiel für Ergebnisse

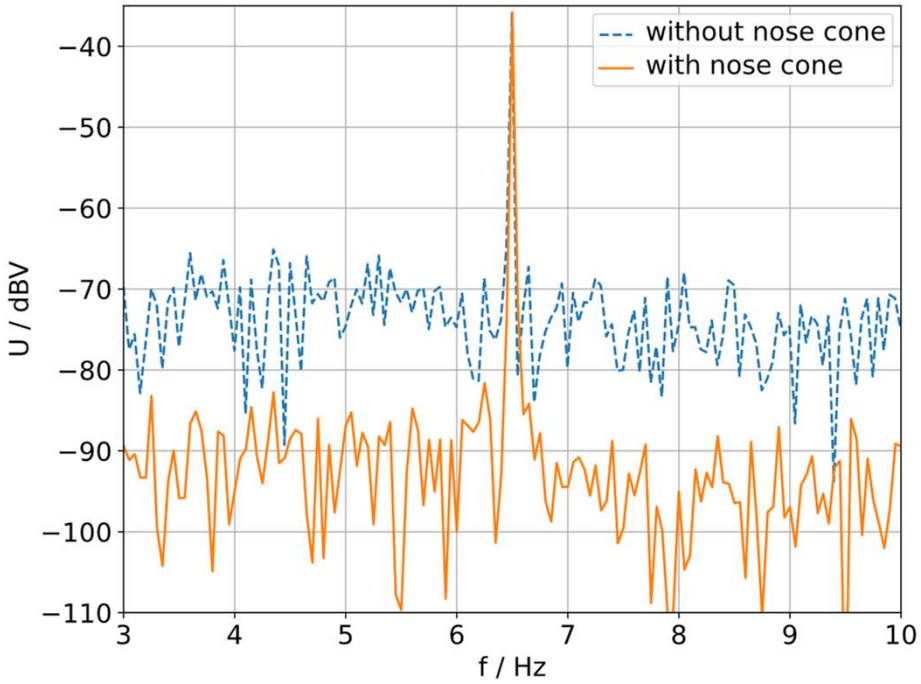




- Unsicherheiten: allgemein < 0,2 dB
- Niedrige Frequenzen (0,1 – 5 Hz): < 0,1 dB

Hauptproblem: Windgeräusche

- Starke Windgeräusche bei höheren Frequenzen
- Standard-Windschutz hilft nicht
- 3D-gedruckter Nasenkonus:
  - Windgeräusche werden um etwa 20 dB reduziert
  - Aeroakustisches Modell befindet sich in der Entwicklung
  - 10 Hz als obere Frequenzgrenze ist ein realistisches Ziel



Traceability chain

Primär Kalibrierung

Primärstandard

Sekundär-kalibrierung

Transferstandard

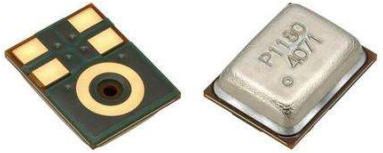
© Brüel & Kjær, HBK

© www-dase.cea.fr

Wie kann man die Vielfalt möglicher Sensor kalibrieren?

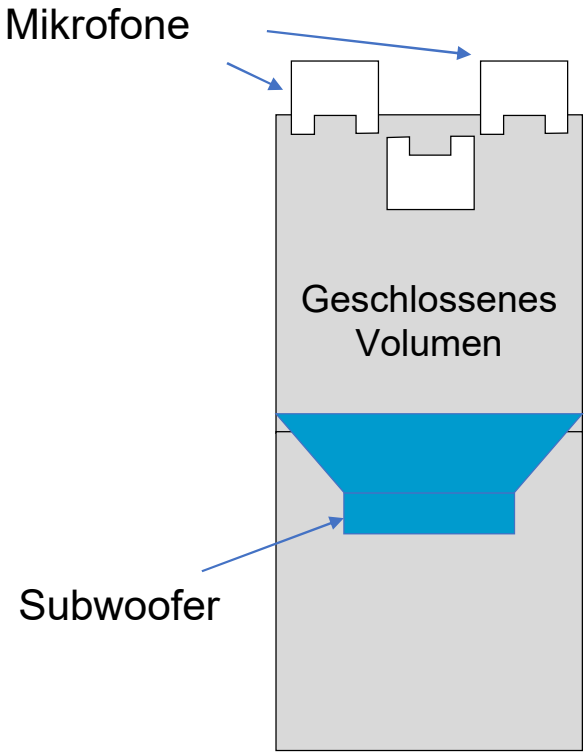
- Es gibt eine große Vielfalt an Sensoren
- Eine simple Kalibriertechnik zur „Weitergabe“ wird benötigt
- Sekundäre Kalibrierung: Vergleich mit einem primär kalibrierten Standard in einem geeigneten Schallfeld

© Brüel & Kjær, HBK



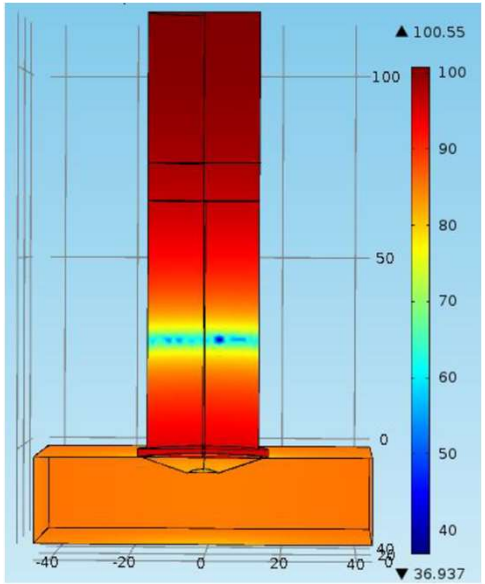
© https://img.deusm.com

© www-dase.cea.fr



Aufbau der Schallröhre

- Acrylglasrohr, Ø 30 cm, Höhe 110 cm
- Homogenes radial symmetrisches Schallfeld in der oberen Hälfte des Rohrs
- Obere Frequenzgrenze 100 Hz (durch Inhomogenität)
- Unterer Frequenzgrenzwert 0,1 Hz - aufgrund der begrenzten Dichtheit
- Wiederholbarkeit 0,03 dB
- → Unsicherheiten dominiert durch die primäre Kalibrierung der Referenzen



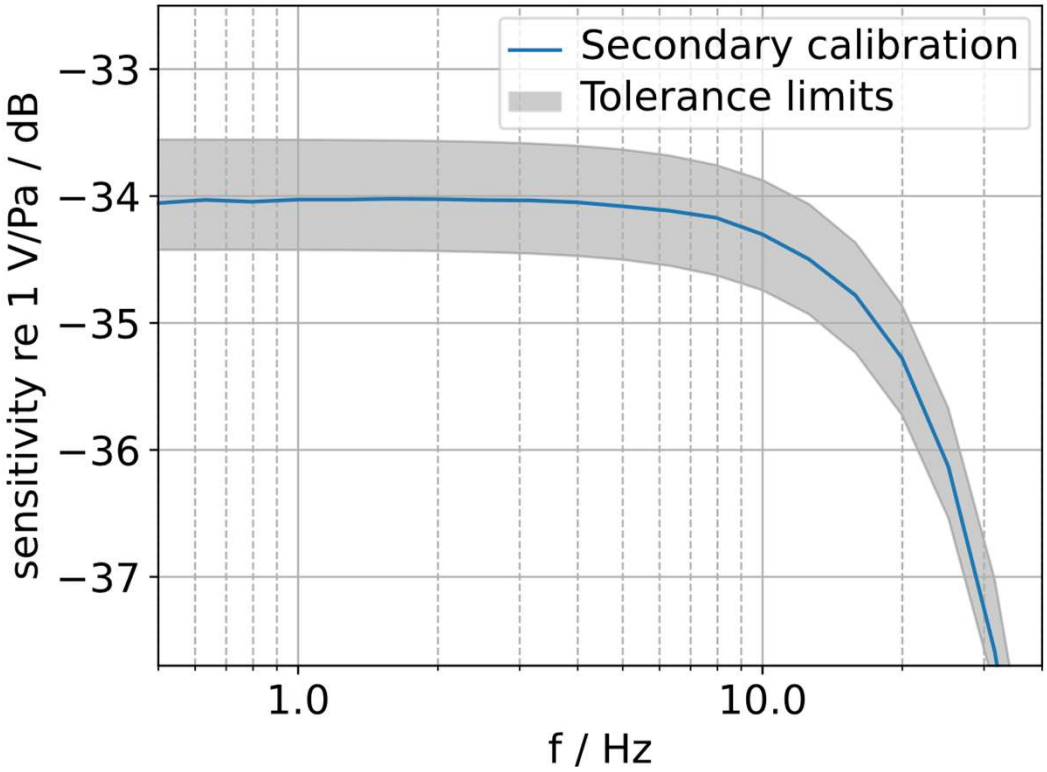
Schallfeldsimulation bei 100 Hz

Ergebnis einer Kalibrierung eines Mikobarometers

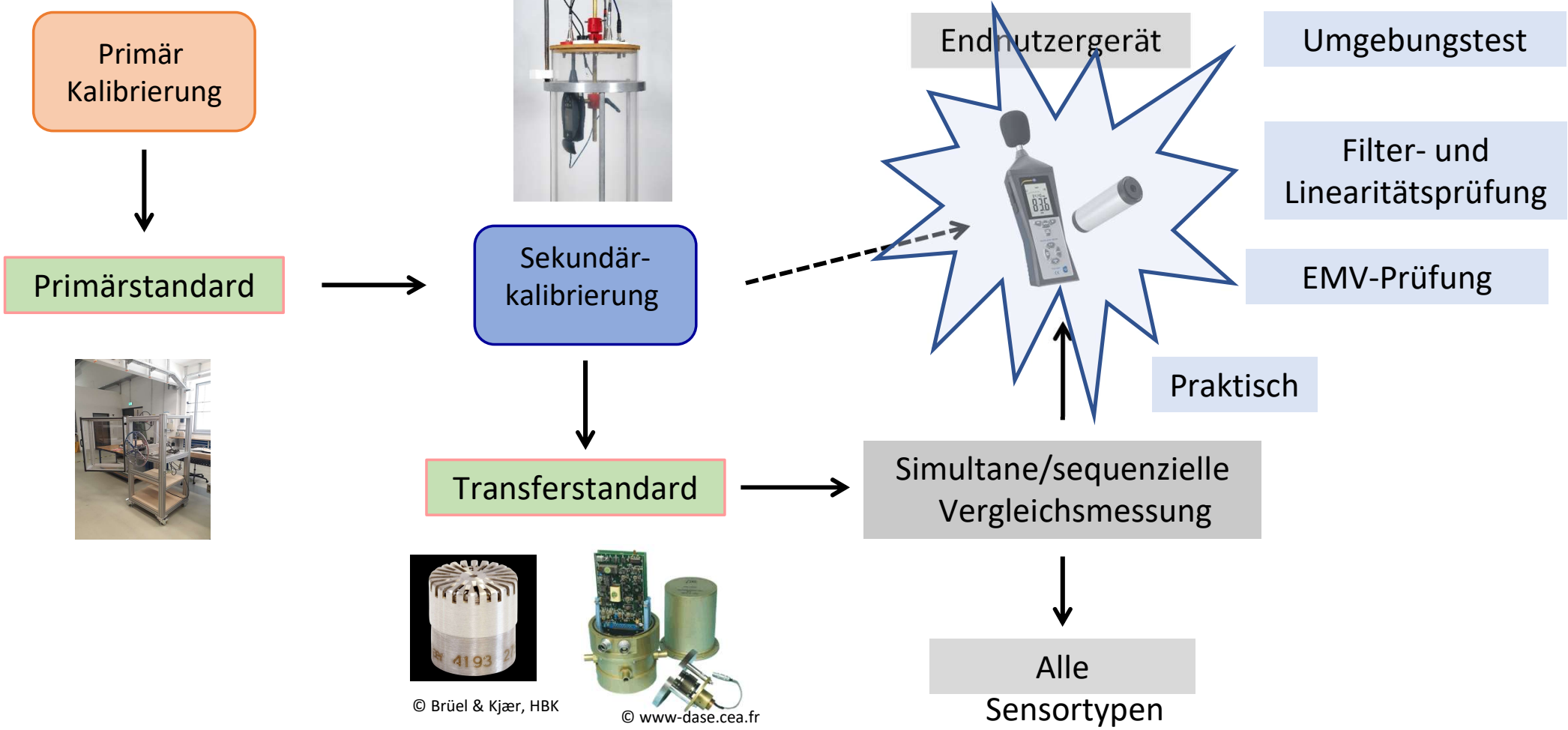
- Ergebnis für ein Mikrobarometer

$$S_{DUT} = \frac{S_{Ref}}{U_{Ref}} \times U_{DUT}$$

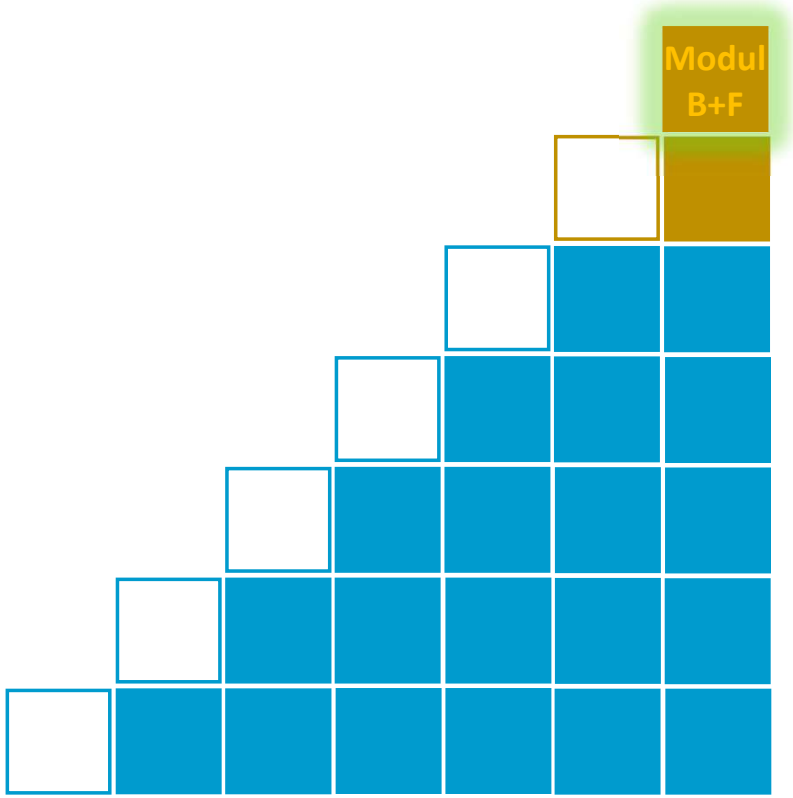
- Typisches Sensorsystem, das im Internationalen Überwachungssystem (IMS) verwendet wird



Traceability chain



Infraschall: Entwicklungsprozess für Baumusterprüfung



Typgenehmigung (Modul B) +
Produktprüfung (Modul F) + sequentielle Prüfung

In Deutschland: Formelle Genehmigung des Verfahrens und Definition der PTB-Anforderungen

Normung (IEC TC29)

Entwicklung sequenzieller Prüfverfahren

Entwicklung von Methoden für eine Typgenehmigung

Definition der grundlegenden Anforderungen

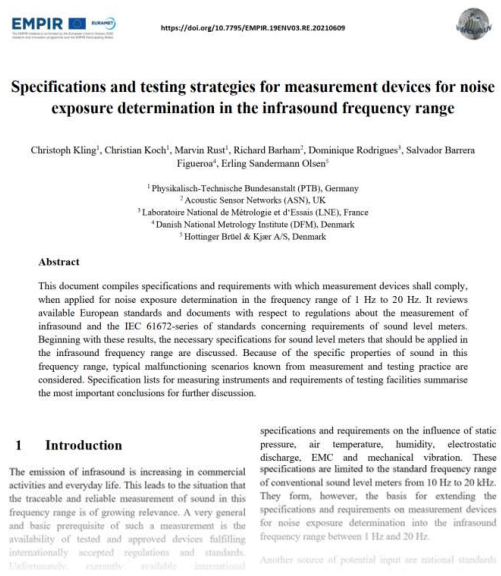
Messtechnische Rückführbarkeit/Kalibrierung

Schritt 2: Grundlegende Anforderungen

- Aufgabe in europäischem Projekt: Diskussion und erste internationale Vereinbarung über grundlegende Anforderungen für
  - Spezifikationen von Geräten
  - Methoden für eine Typgenehmigung
  - Methoden für sequenzielle/periodische Tests

Durch

- Überarbeitung nationaler/internationaler Normen, nationaler Vorschriften, wissenschaftlicher Arbeiten



https://doi.org/10.7795/EMPIR.19ENV03.RE.20210609

Specifications and testing strategies for measurement devices for noise exposure determination in the infrasound frequency range

Christoph Kling[1], Christian Koch[1], Marvin Rust[1], Richard Barham[2], Dominique Rodrigues[3], Salvador Barrera Figueroa[4], Erling Sandermann Olsen[5]

[1] Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Germany
[2] Acoustic Sensor Networks (ASN), UK
[3] Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE), France
[4] Danish National Metrology Institute (DFM), Denmark
[5] Hottinger Brüel & Kjær A/S, Denmark

Abstract

This document compiles specifications and requirements with which measurement devices shall comply, when applied for noise exposure determination in the frequency range of 1 Hz to 20 Hz. It reviews available European standards and documents with respect to regulations about the measurement of infrasound and the IEC 61672-series of standards concerning requirements of sound level meters. Beginning with these results, the necessary specifications for sound level meters that should be applied in the infrasound frequency range are discussed. Because of the specific properties of sound in this frequency range, typical malfunctioning scenarios known from measurement and testing practice are considered. Specification lists for measuring instruments and requirements of testing facilities summarise the most important conclusions for further discussion.

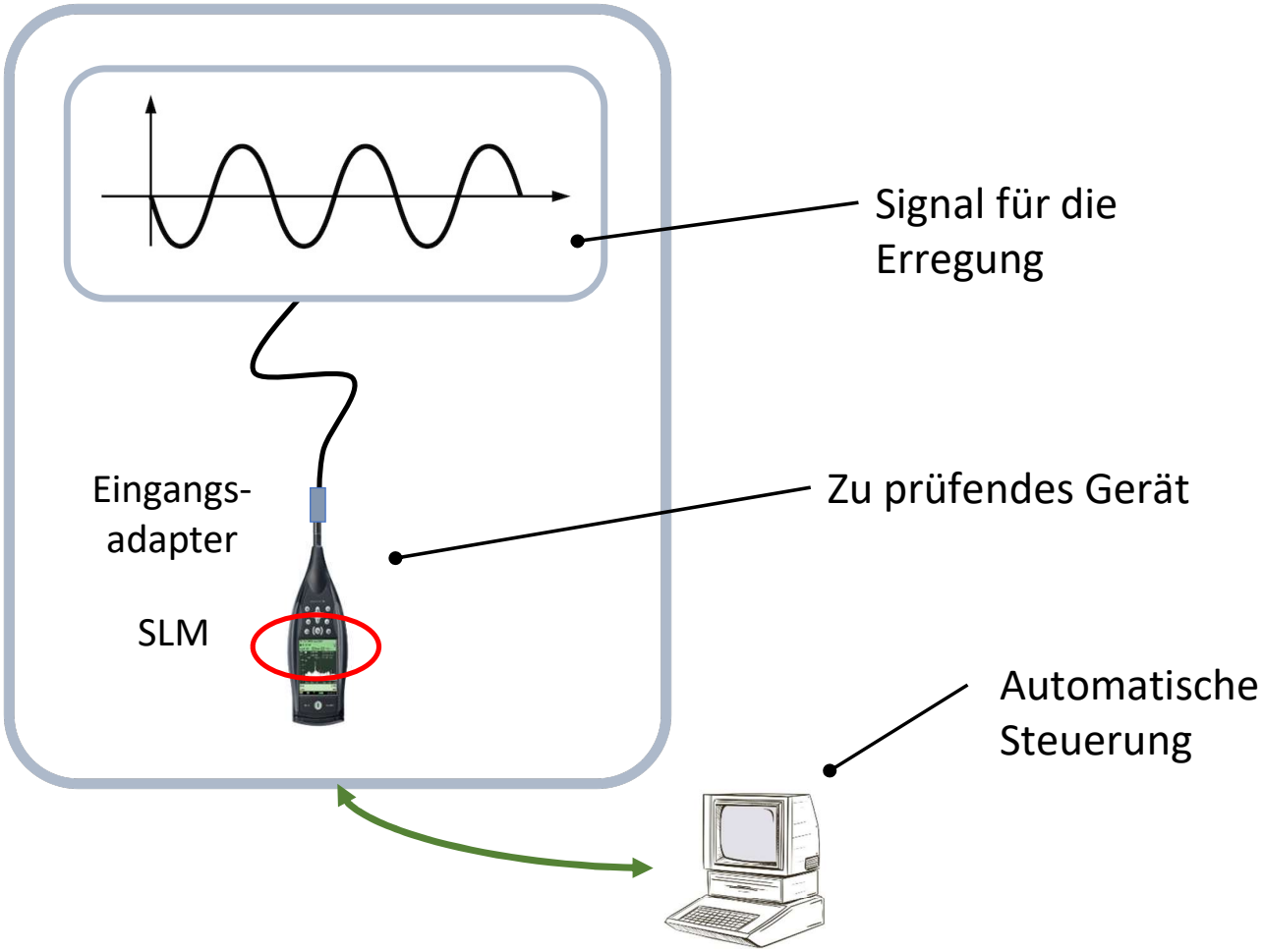
1 Introduction

The emission of infrasound is increasing in commercial activities and everyday life. This leads to the situation that the traceable and reliable measurement of sound in this frequency range is of growing relevance. A very general and basic prerequisite of such a measurement is the availability of tested and approved devices fulfilling internationally accepted regulations and standards. Unfortunately, currently available international specifications and requirements on the influence of static pressure, air temperature, humidity, electrostatic discharge, EMC and mechanical vibration. These specifications are limited to the standard frequency range of conventional sound level meters from 10 Hz to 20 kHz. They form, however, the basis for extending the specifications and requirements on measurement devices for noise exposure determination into the infrasound frequency range between 1 Hz and 20 Hz.

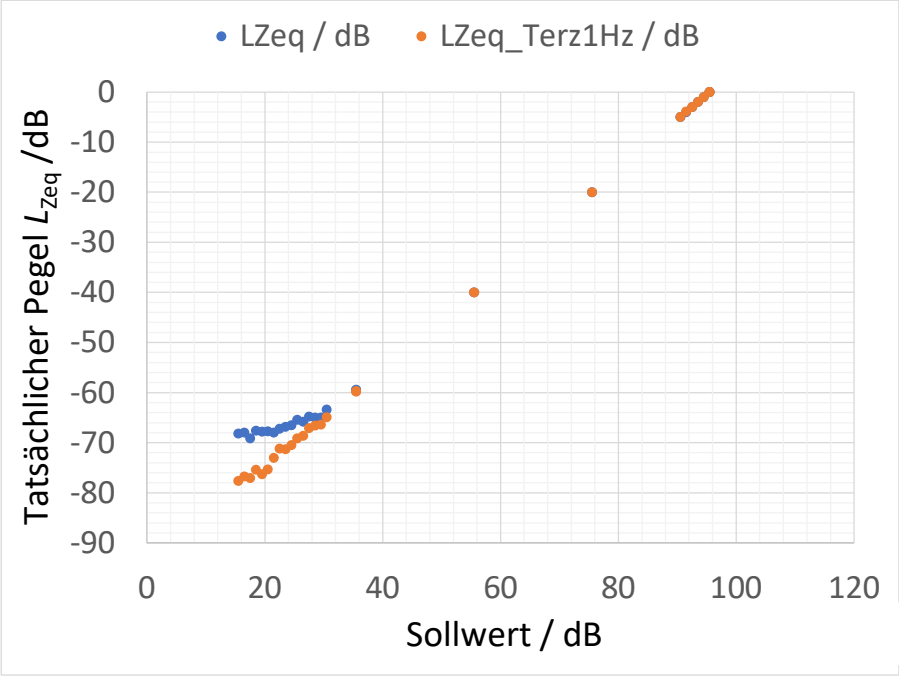
Another source of potential input are national standards

Kling, Christoph; Koch, Christian; Rust, Marvin; Barham, Richard; Rodrigues, Dominique; Barrera Figueroa, Salvador; Sandermann Olsen, Erling (2021): Specifications and testing strategies for measurement devices for noise exposure determination in the infrasound frequency range. https://oar.ptb.de/resources/show/10.7795/EMPIR.19ENV03.RE.20210609.

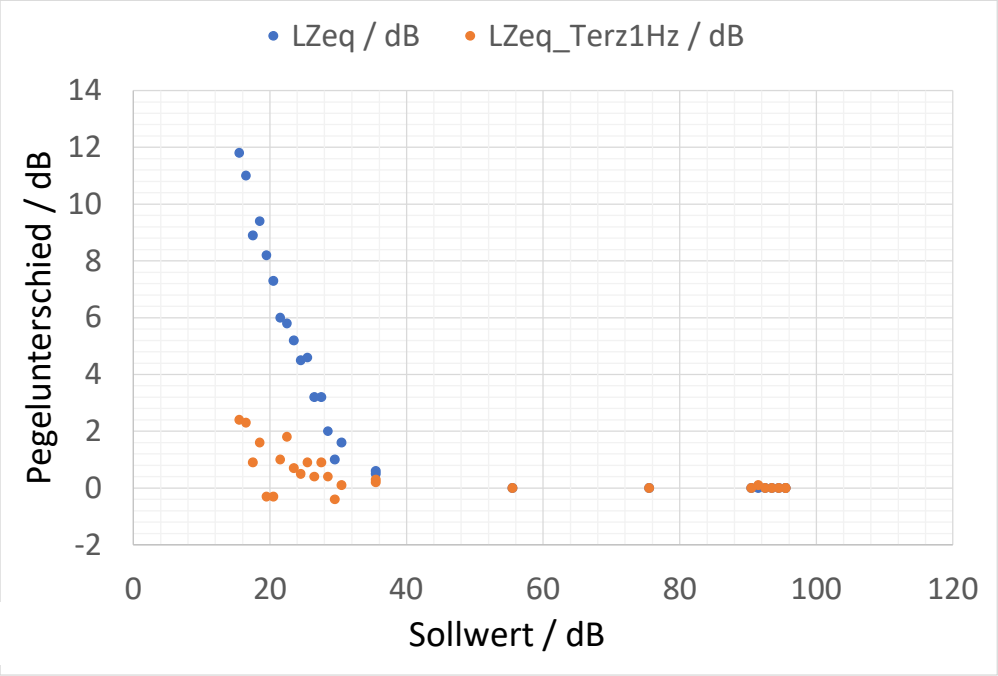
Schritt 3: Grundlegende Einrichtung für elektrische Prüfungen



Schritt 3 – Beispiel: Linearität des Pegels

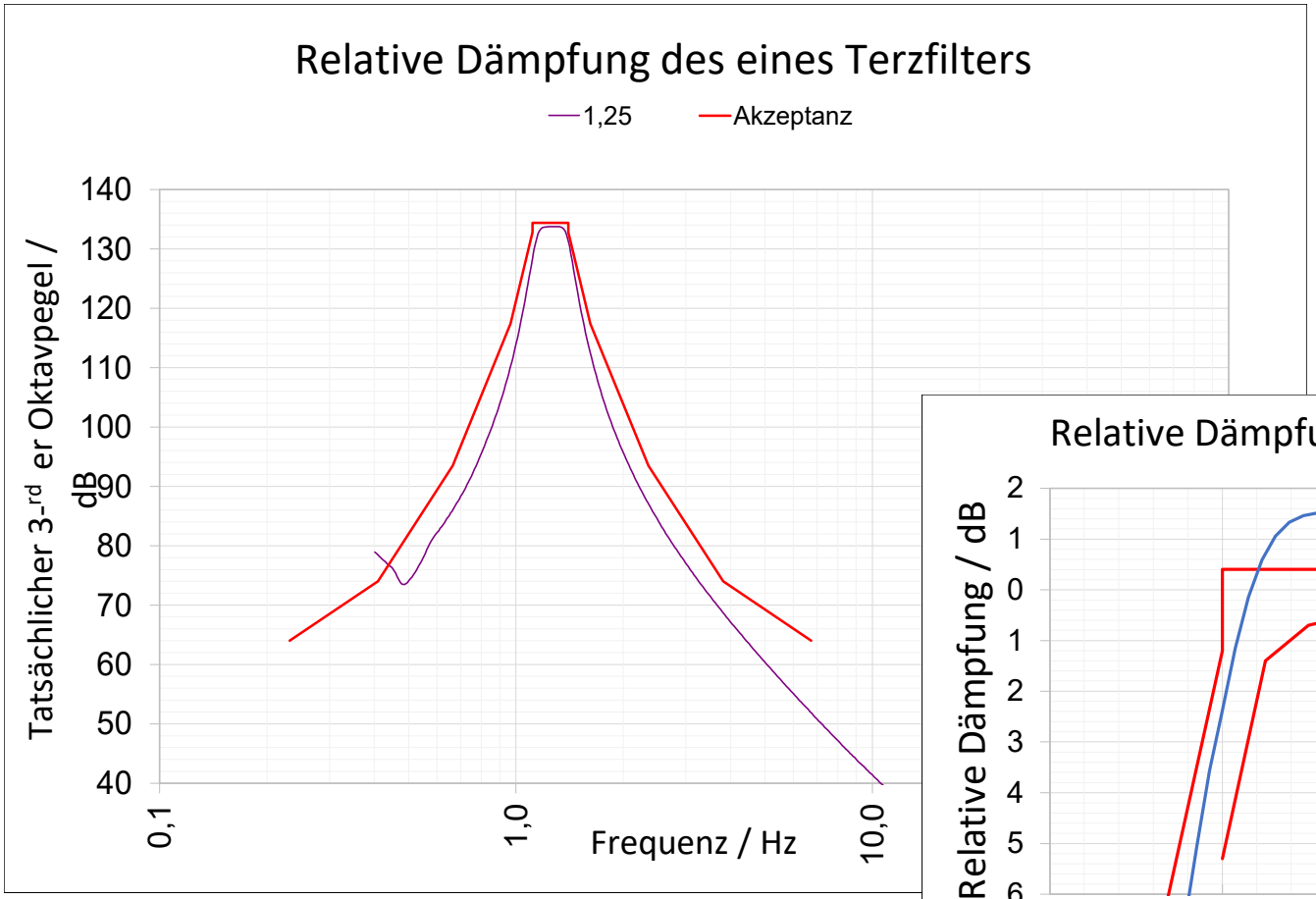


Absolute Linearität

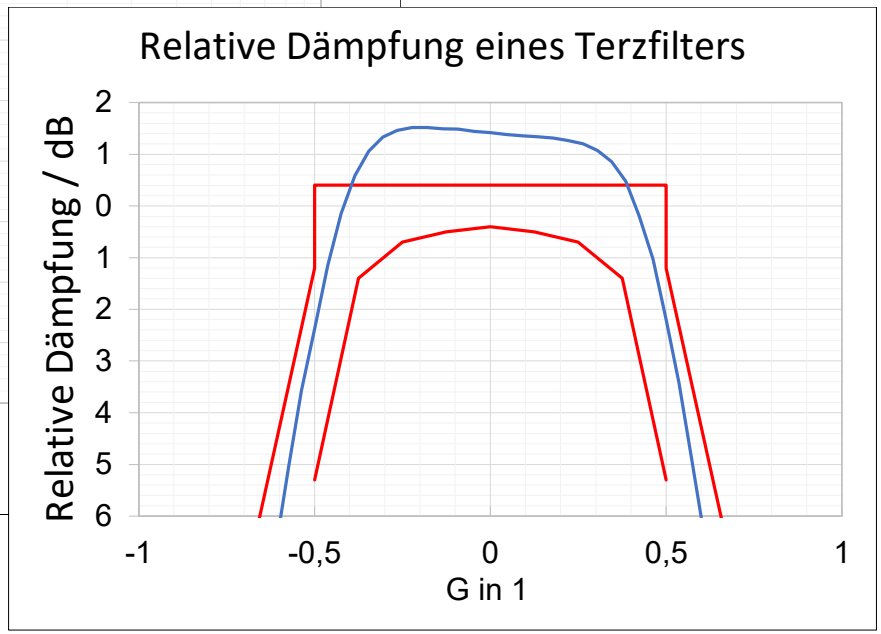


Differenz zwischen Soll- und Ist-Pegel

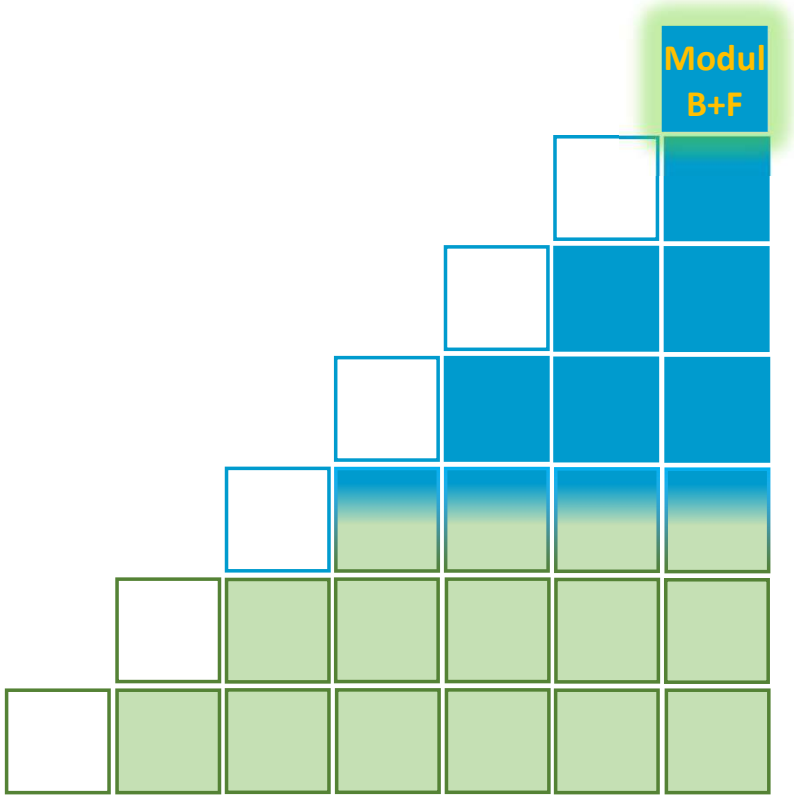
Schritt 3 – Beispiel: Test eines Filters



Zulässigkeitsgrenzen gemäß IEC 61620



Wo wir sind



Typgenehmigung (Modul B) +
Prüfung des Produkts (Modul F) + sequentielle Prüfung

In Deutschland: Formelle Genehmigung des
Verfahrens und Festlegung der PTB-Anforderungen

Normung (IEC TC29)

Entwicklung sequenzieller Prüfverfahren

Entwicklung von Methoden für eine
Typgenehmigung

Definition der grundlegenden Anforderungen

Messtechnische Rückführbarkeit / Kalibrierung

Beispiel: Messungen an einer Windkraftanlage

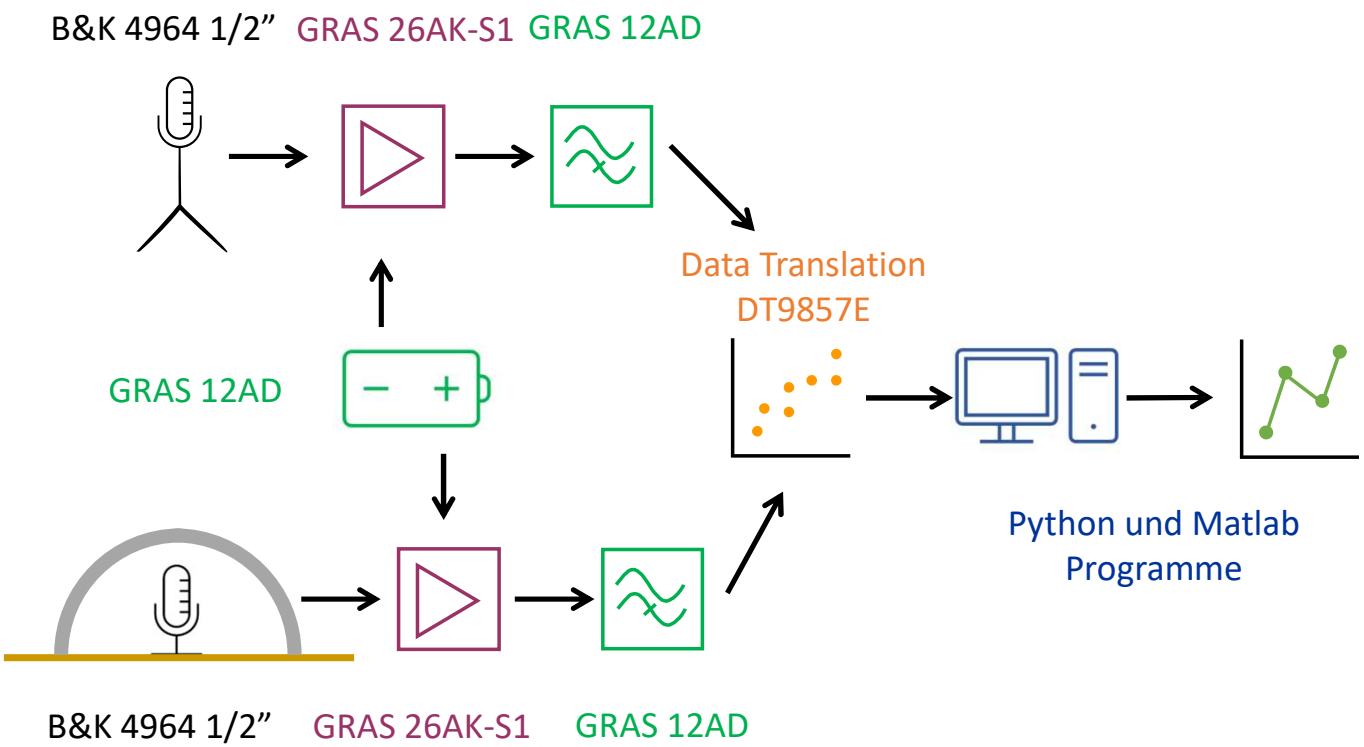
Ziele

- Messung von Infraschall mit verschiedenen Messgeräten und Methoden
- Untersuchung bzw. Unterdrückung des Einflusses des Windes
- Analyse aller Daten im Sinne der Norm DIN 45680 in der Fassung von 2011

Messkampagne

- Messungen
  - Messungen an zwei sehr unterschiedlichen Anlagen mit Mikrofonen und Mikrobarometern durchgeführt
  - Zwei-Mikrofonmethode entwickelt
  - Verschiedene Windverhältnisse und Abstände
- Auswertung
  - Schallpegel, Schmalband- und Terzspektren berechnet, wie DIN 45680 fordert
  - Einfluss des Windes quantitativ mit Messungen in einem Windkanal untersucht
  - Praktisches Kriterium erarbeitet für Einfluss des Windes

Messaufbau der Mikrofonmessung

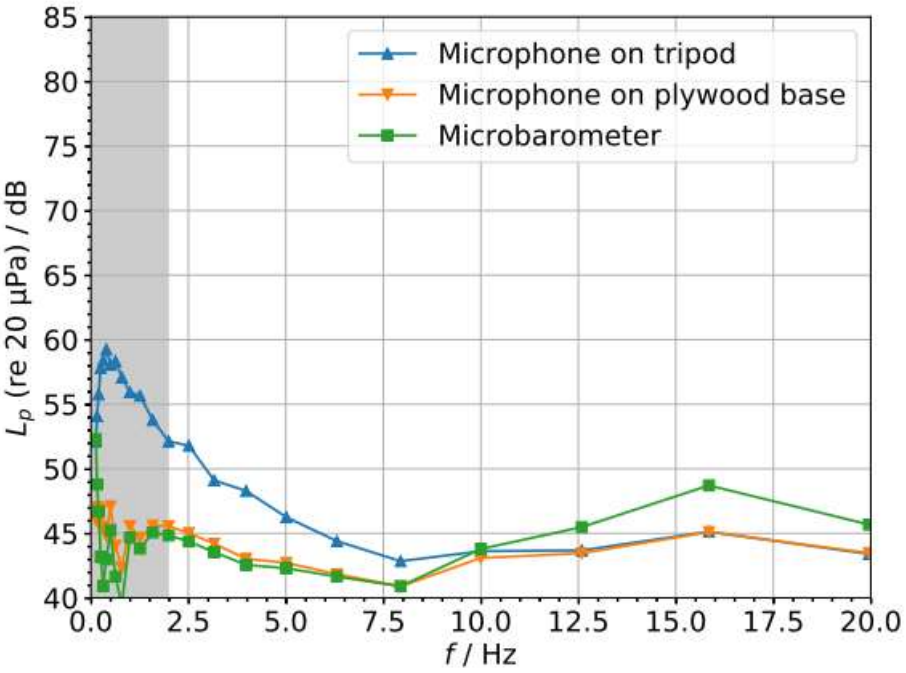


- Alle Geräte gewählt und sorgfältig getestet für Infraschallanwendung
- Mikrofone hinunter bis 2 Hz kalibriert

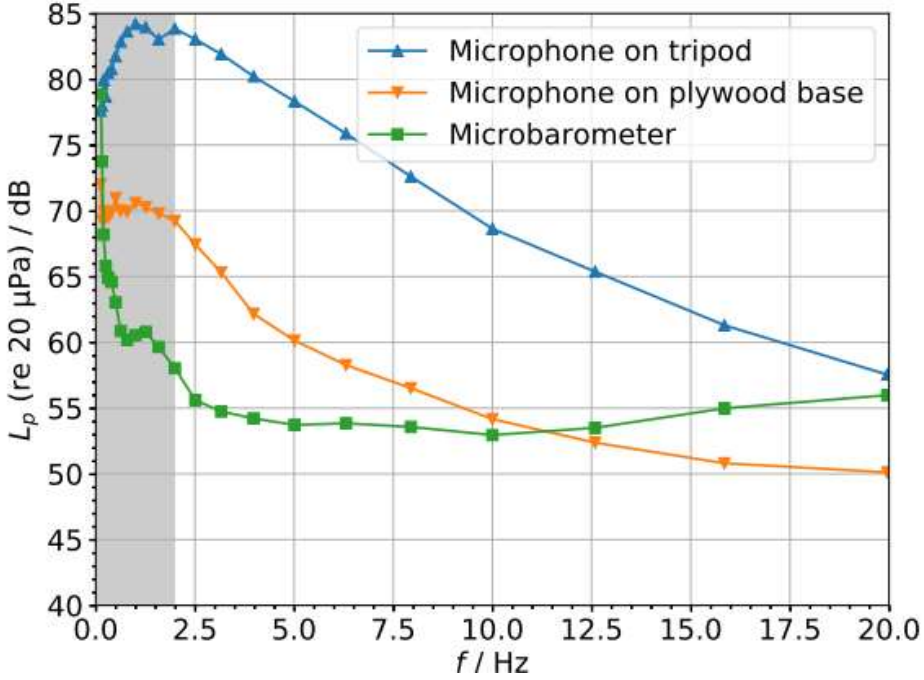
Rust, Marvin; Koch, Christian (2024): Performance comparison of measurement microphones and microbarometers for sound pressure measurements near wind power plants. In: *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control* 43 (1), Artikel 14613484231200852, S. 418–428. DOI: 10.1177/14613484231200852.

Ergebnisse: Terzspektren für 2 Beispiele

Mittlerer Wind*: 4,5 bis 7 m/s



Starker Wind*: 8,5 bis 12 m/s

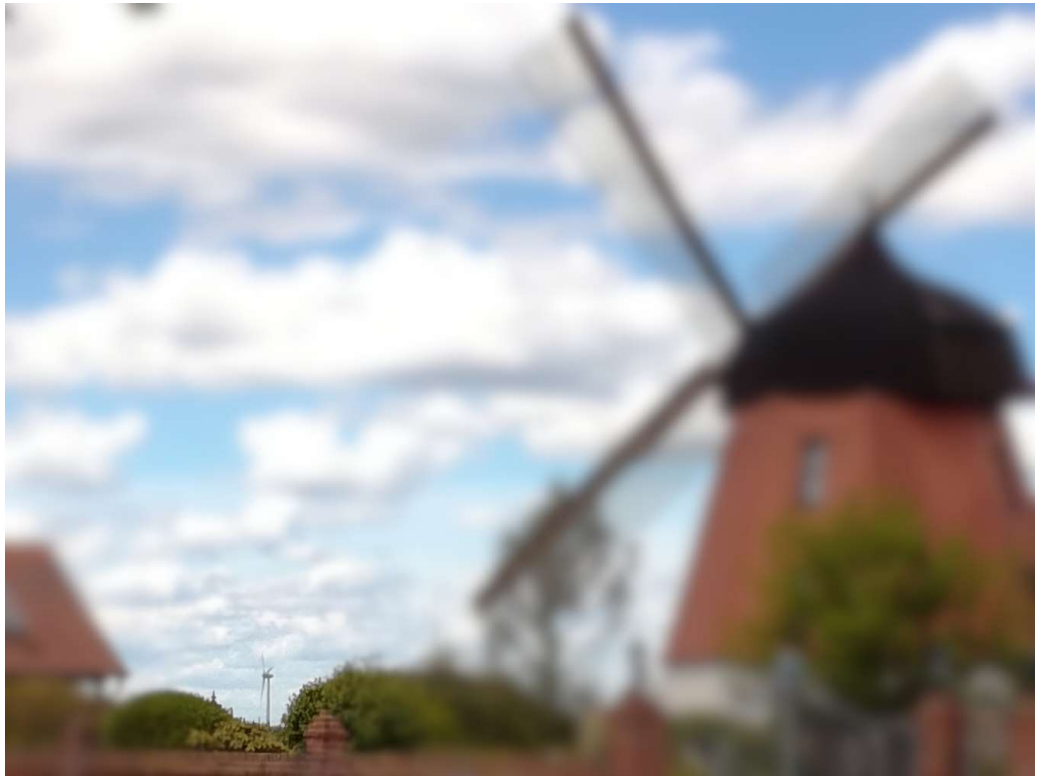


* Windgeschwindigkeit an der Gondel

Schlussfolgerungen

- Messungen und eine quantitative Analyse bilden die unabdingbare Basis aller Situationsbeurteilungen
- Nur verlässliche Messungen überzeugen
- Hausnummern verunsichern
- PTB bietet Kalibrierung im Infraschallfrequenzbereich als Dienstleistung an
- Auch Baumusterprüfungen werden bald möglich sein
- Damit können dann Geräte auch geeicht werden

97



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit