

Meteore und Infraschall

Martin Dubs

AGG, FMA

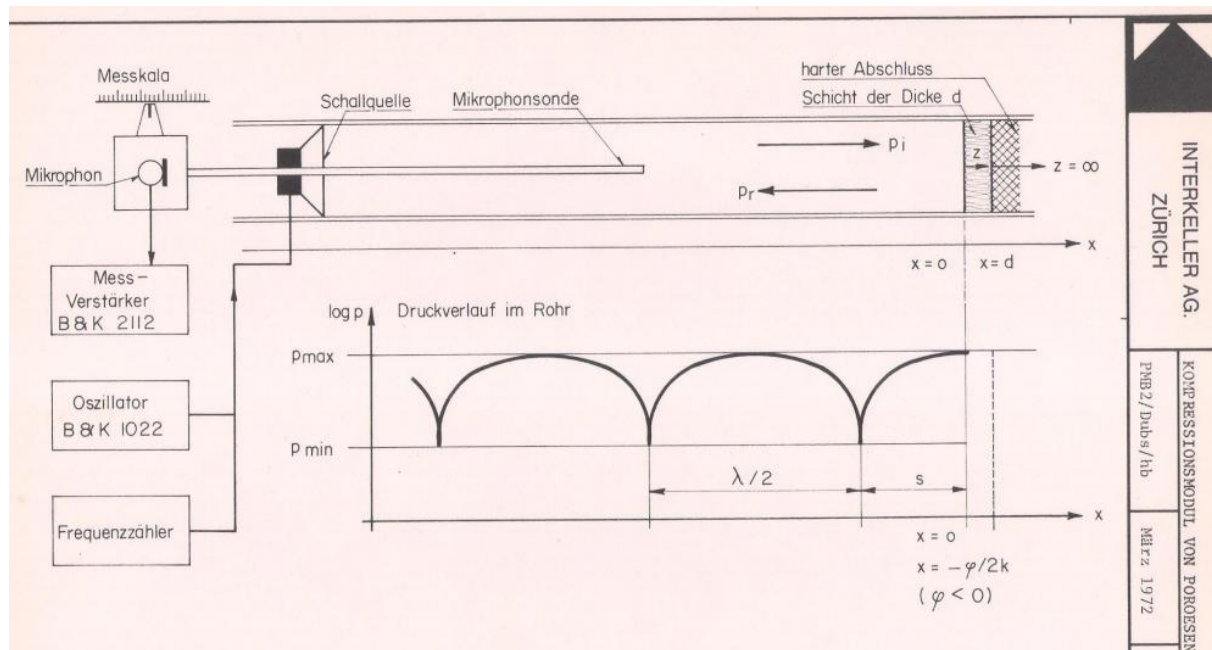
Bern, 28. April 2018

Inhalt

- Einleitung
- Akustik, Schallgeschwindigkeit
- Schallausbreitung
 - Atmosphäre (Wasser)
 - Refraktion
 - Dämpfung
- Explosion und Überschallknall
- Beispiele
- Messung
- Störquellen
- Literatur

Einleitung

- Diskussionen mit Anwendern: Roger, Jochen, Modell Jonas, Beat
- Vor langer Zeit: Automobilakustik, Schalldämmung, Vibrationsdämpfung



Schallwellen

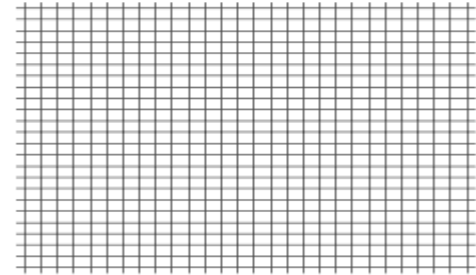
- Longitudinale Wellen, Dichteschwankungen
- Ideales Gasgesetz $p \cdot V = N \cdot k \cdot T$
- Schallgeschwindigkeit:

$$c = \sqrt{\frac{K_s}{\rho}},$$

– Für ideales Gas: $c_{\text{Ideales Gas}} = \sqrt{\kappa \frac{RT}{M}}$ $\kappa = 1.4$ für Luft

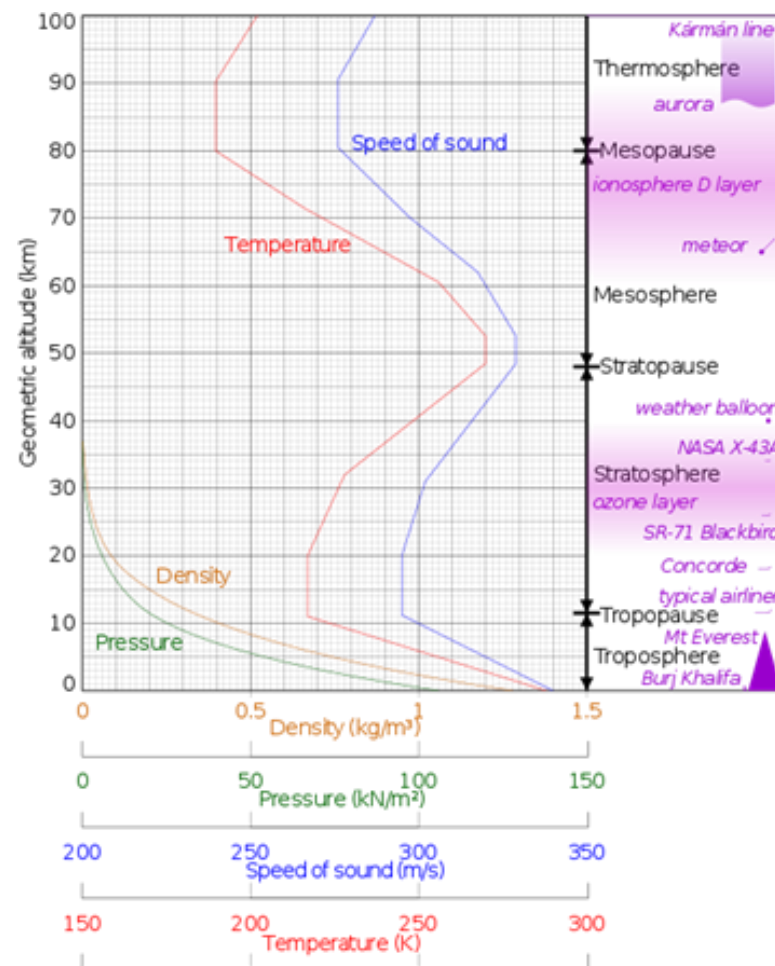
– Für Luft: $c_{\text{Luft}} = 20.05 \cdot \sqrt{T}$

- Temperaturabhängig, unabhängig vom Druck



Schallgeschwindigkeit Atmosphäre

- Temperaturabhängigkeit
- Temperaturprofil der Atmosphäre
- Höhenabhängigkeit
- Standardprofil
- Windstill



Schallausbreitung in der Atmosphäre

- Wellenleitereffekt: Schall bleibt in Gebiet niedriger Schallgeschwindigkeit gefangen

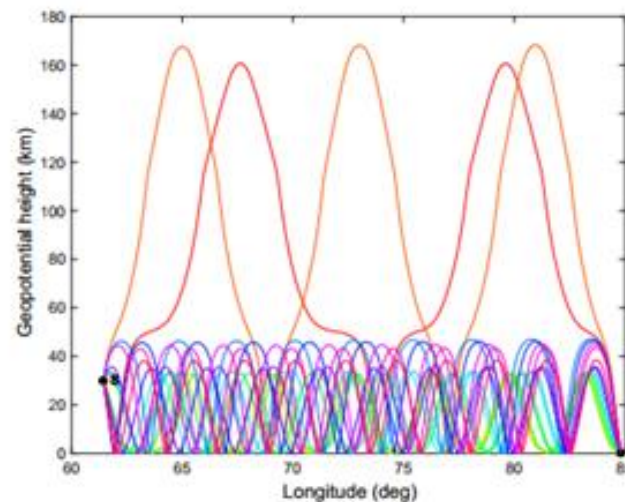
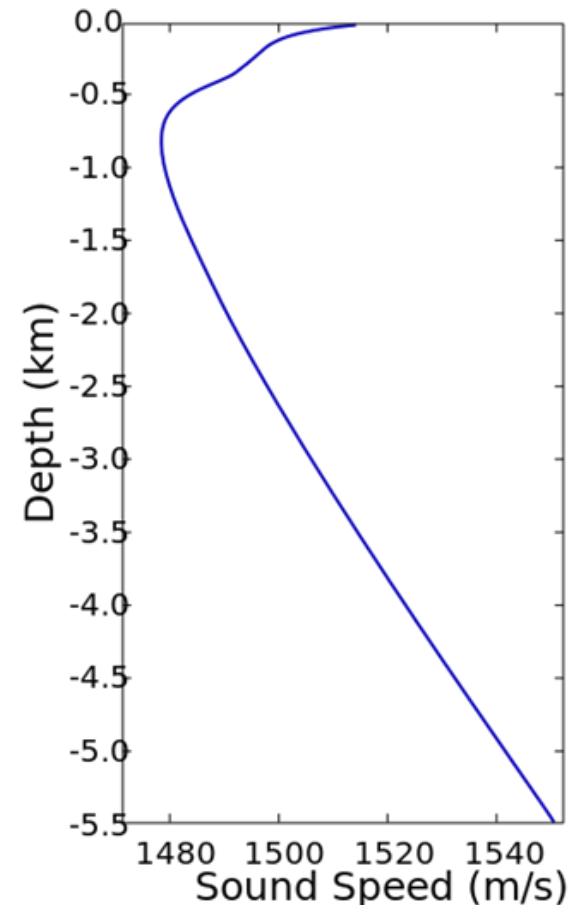


Fig 4: An example of a height – longitude cut along the great-circle path showing a raytracing plot with all eigenrays emitted from a source height of 30km (left hand side of the plot) reaching the station IS46 for the Chelyabinsk event.

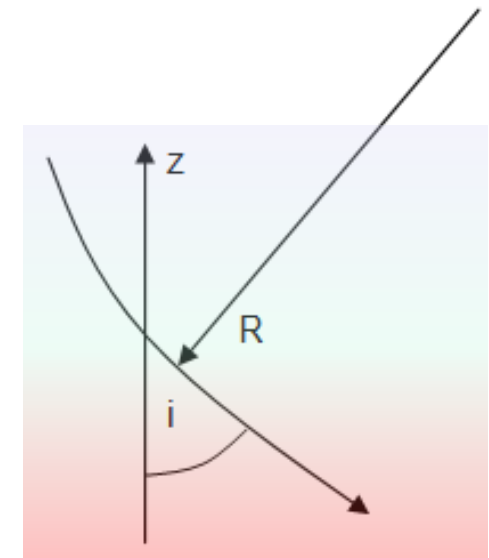
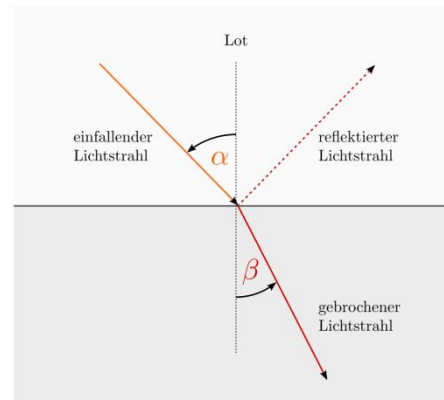
Schallausbreitung im Wasser

- Schallkanal, minimale Schallgeschwindigkeit in ca. 0.5 – 1 km Tiefe
- Wichtig z. B. für U-Boot Ortung



Refraktion von Schallwellen

- zum Vergleich Optik: Brechungsgesetz $\sin i / \sin i_0 = n_0 / n$
- Akustik: keine Temperatursprünge, Temperaturgradient: kontinuierliche Änderung der Schallgeschwindigkeit und des Einfallswinkels $\rightarrow$ Krümmung der Ausbreitungsrichtung
 $\sin i / \sin i_0 = c / c_0$ gilt bis $c_{\max} = c_0 / \sin i_0$
- Krümmungsradius, horizontale Ausbreitung: $R = -2 \cdot T / (\partial T / \partial z)$,
mit Einfallswinkel i : $R = -2 \cdot T / (\partial T / \partial z) / \sin(i)$
 - $-5\text{K/km} \rightarrow R = 100 \text{ km}$
 - Funktioniert auch für horizontale Ausbreitung



Temperaturgradient

- Schalltote Zone falls Temperatur mit Höhe abnimmt

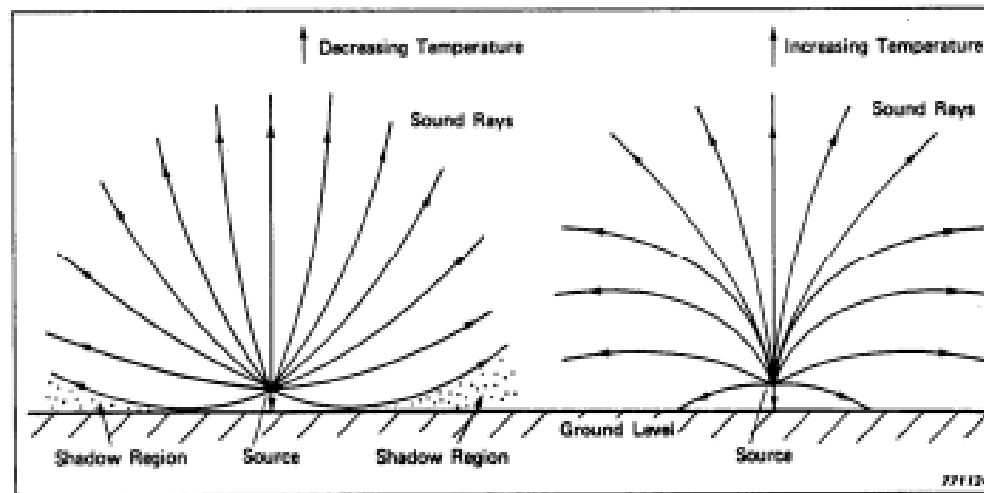


Figure 4. Refraction of sound with temperature gradients a) on left, normal lapse rate (decreasing temperature with altitude) b) on right, inverted lapse rate (temperature increases with altitude)

Aus: J. S. Lamancusa Penn State 7/20/2009 Outdoor Sound Propagation

Windgradient

- Windstärke mit Höhe zunehmend, $R = \pm c / (\partial u / \partial h) / \sin(i)$

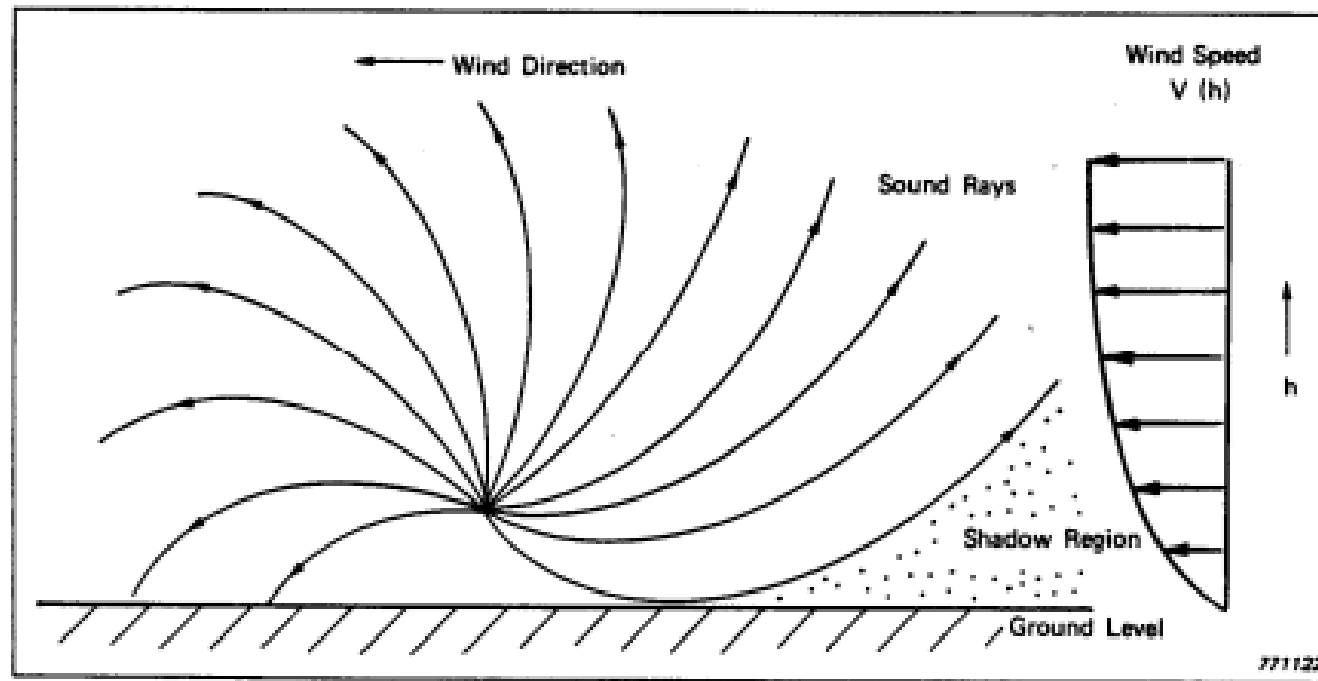
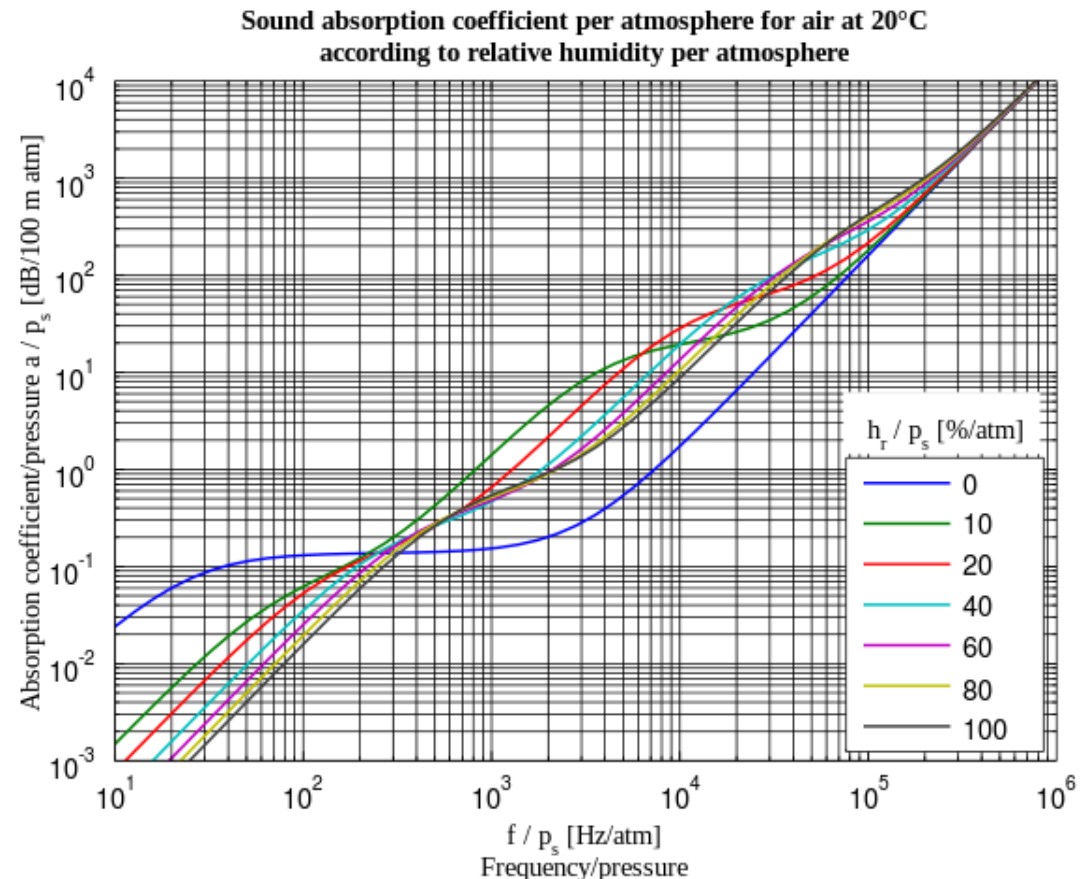


Figure 3. Refractive effects caused by wind

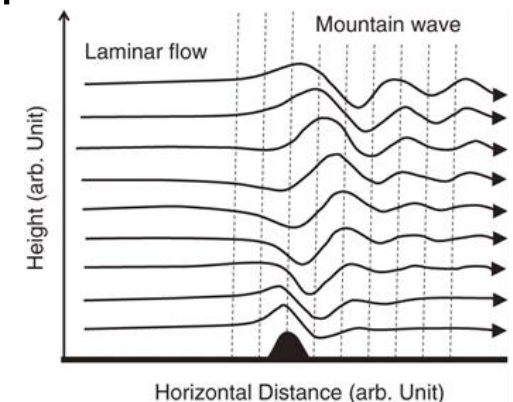
Schallabsorption

- Inelastische Stösse von Molekülen (N₂, O₂, H₂O)
- Abhängig von Luftfeuchtigkeit
- Abhängig von Druck



Zusammenfassung

- Schallausbreitung, -geschwindigkeit beeinflusst durch
 - Temperaturgradienten
 - Wind und Windgradienten(z.B. Jetstream)
 - Luftfeuchtigkeit
 - Turbulenzen, Schwerewellen (Föhnlinen)
- Ohne gutes Modell nur grobe Voraussagen möglich
- Über grössere Distanzen tiefe Frequenzen bevorzugt beobachtet, hohe Frequenzen werden absorbiert



Explosion und Überschallknall

- Explosion
 - Fragmentierung



20170602 LOC

- Überschallknall
 - $V_{\text{met}} \gg c$
 - Kegel $\rightarrow$ Zylinder

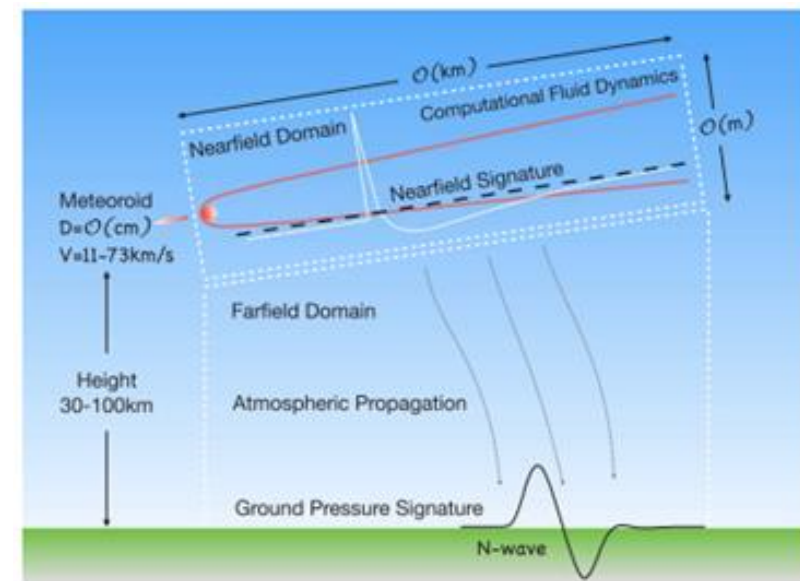
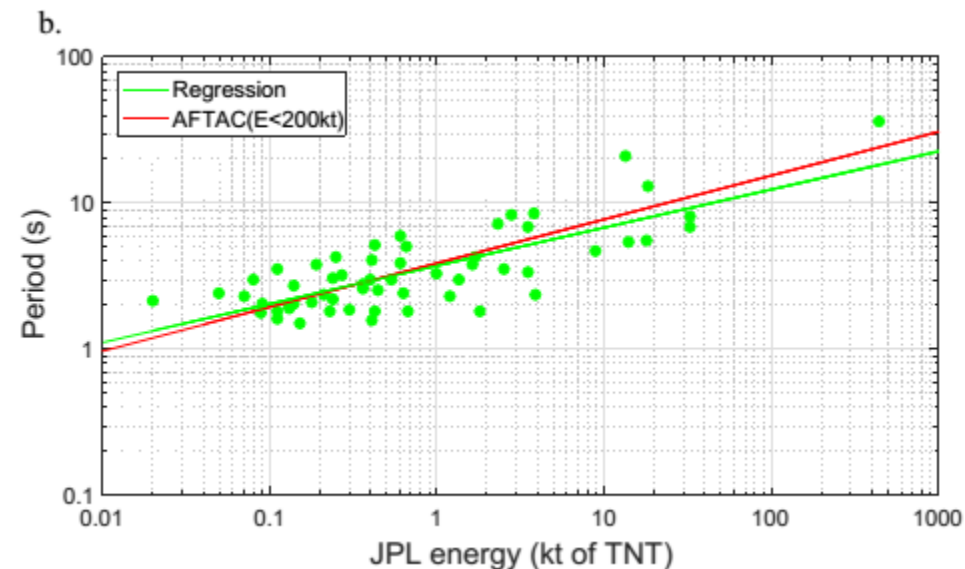


Fig. 1. Sketch of meteoroid entry generating a strong, cylindrical, blast-like pressure pulse that attenuates as it propagates to ground.

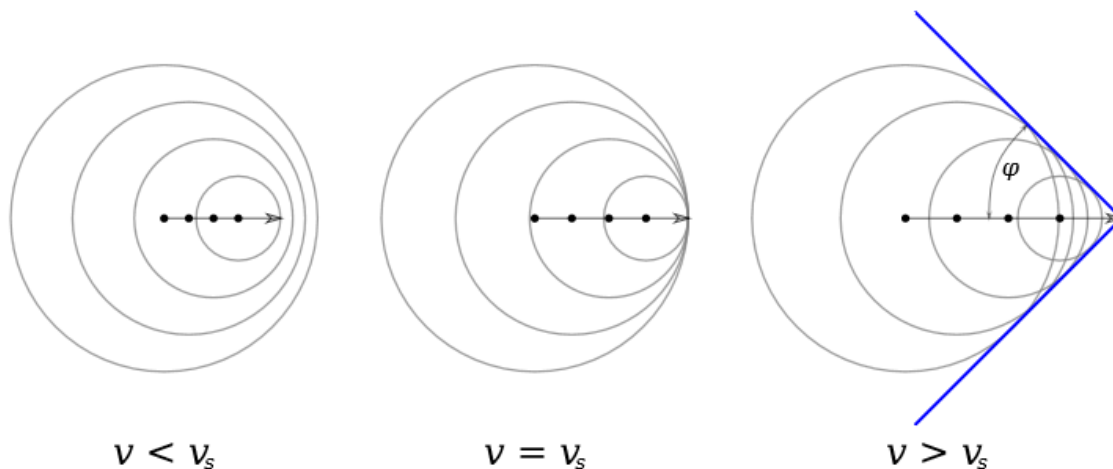
Explosion

- Grosse Gasmenge hohe Temperatur, hoher Druck → kugelförmige Schockwelle
- Bis zum Explosionsradius mit Überschall, nichtlinear
- Schockwelle hat oft mehrfache Peaks, oft kombiniert mit Überschallknall
- Schallperiode ca. proportional mit $E^{1/3}$
(Nayeob Gi, Peter Brown
Bolide characteristic Infrasound
Arxiv1704.07794)



Überschallknall 1

- Ausbreitung der Schockwelle mit c
- $\sin \varphi = c/v$
- Meteor $c \ll v$ (300 m/s , 11 – 70 km/sec)
 $\varphi < 2^\circ$, Kegel $\rightarrow$ Zylinder



$v \cong c$

Überschallknall 2

- Ausbreitung praktisch senkrecht zur Meteorbahn
- Ray launch angle $\beta \approx 90^\circ \pm 20^\circ$ UFO Orbit: Qr1, Qr2
(Nayeob Gi, Peter Brown, Meteor Infrasound Arxiv1407.6331)

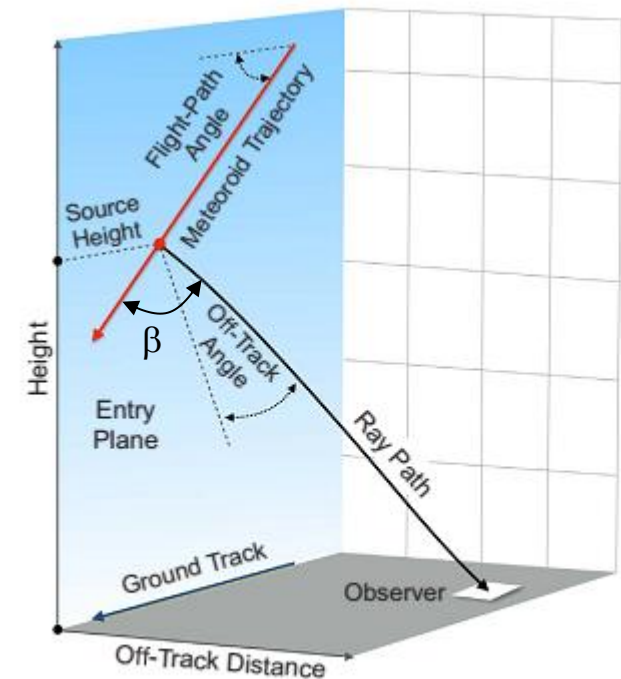
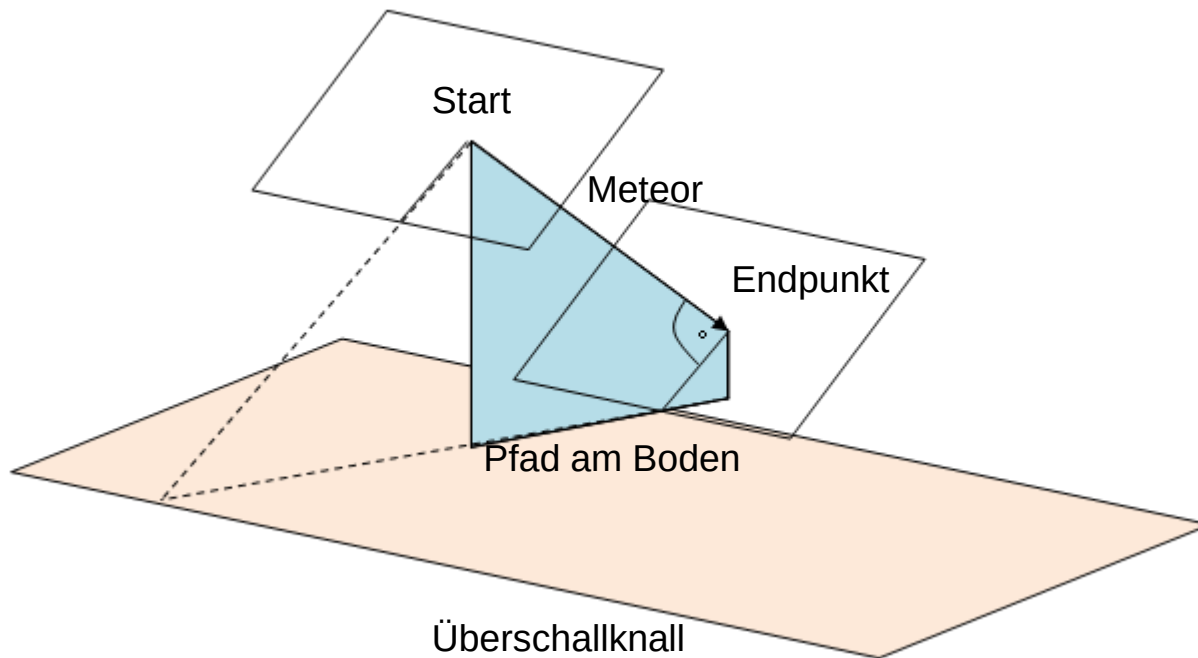
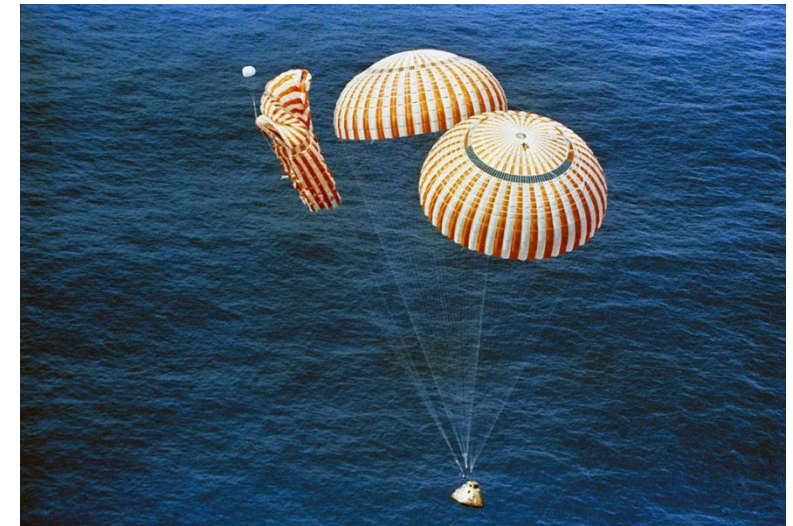
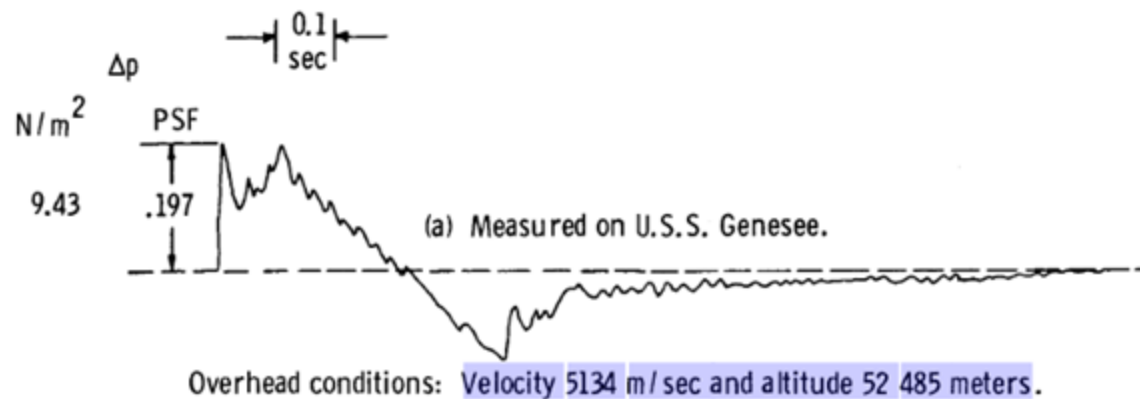


Fig. 3. Ray path from a source point on the trajectory to the observer.

Beispiele

- Apollo 15, 7. August 1971, Wiedereintritt
- Form, Masse, Geschwindigkeit exakt bekannt
- USS Genesee, Distanz 500 km
D.A. Hilton et. al., Sonic Boom Ground Pressure Apollo 15
NASA TN D-6950, 1972



Stardust

- Komet 81P/Wild-2
- Reentry 15. Januar 2006, 12.9 km/sec
- 6.4 km/sec:

M. Nemec et al.

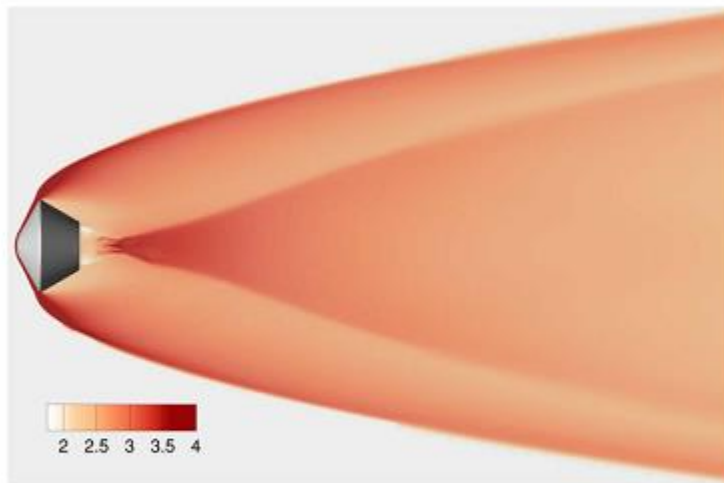


Fig. 4. Pressure contours around the Stardust capsule ($\log_{10} p$, $M_\infty = 19.4$, $H = 50.4$ km, $p_\infty = 72.2$ Pa, $D = 0.81$ m, equilibrium air model).

0.4



162 sec

Planetary and Space Science 140 (2017) 11–20

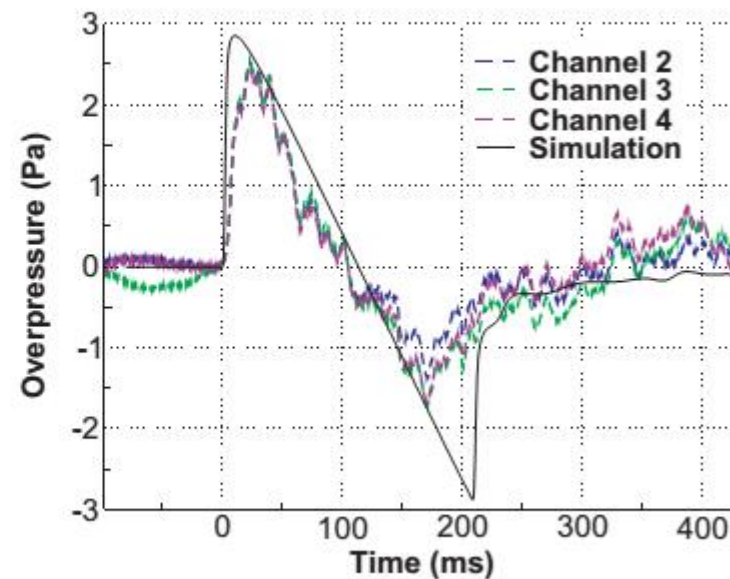


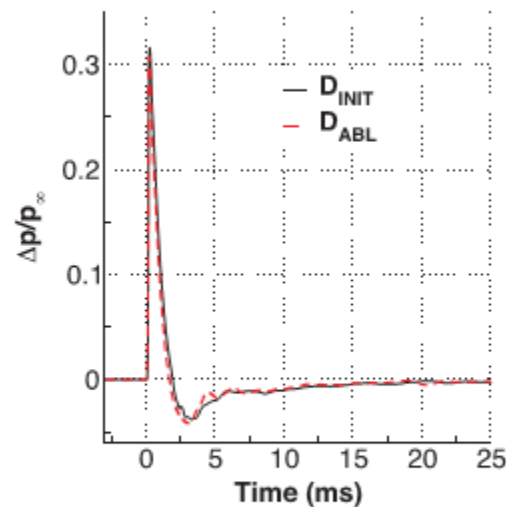
Fig. 7. Observed and computed ground pressure signatures for the Stardust capsule.

Meteor 20081028

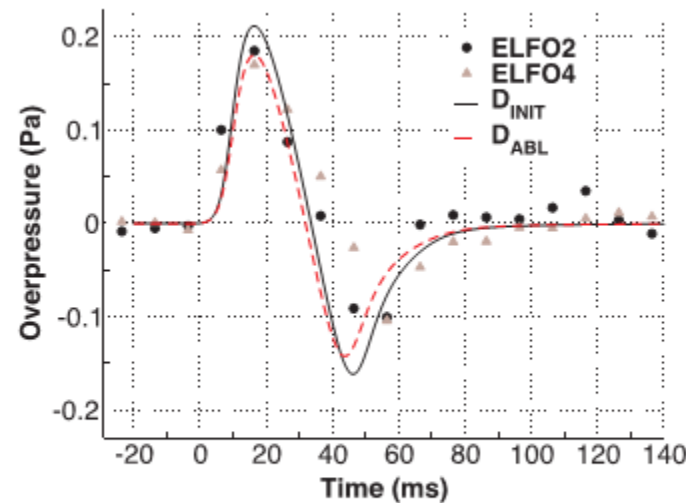
- Rechnung: Kugel, $\varnothing$ 4.2 cm, 2 g/cm³, Mach 45.6, Höhe 53.7 km, T = 236 sec

M. Nemec et al.

Planetary and Space Science 140 (2017) 11–20



(a) Nearfield pressure signature



(b) Ground pressure signature

Fig. 9. Nearfield and ground pressure signatures for Meteor 20081028. Results for the initial and ablated shapes are shown, as well as observations from two ELFO sensors. Nearfield signature extracted at distance of $40D$ ($M_\infty = 45.6$ and $H = 53.7$ km).

Meteor 20090428

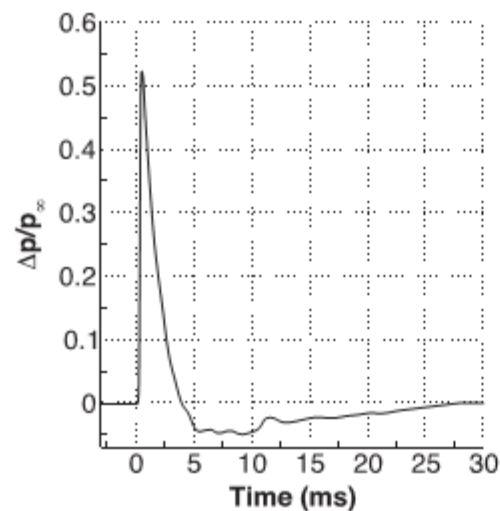
- 21.1 km/sec, Mach 72,
Kugel $\varnothing$ 6.1 cm
- Fragmentierung

M. Nemec et al.

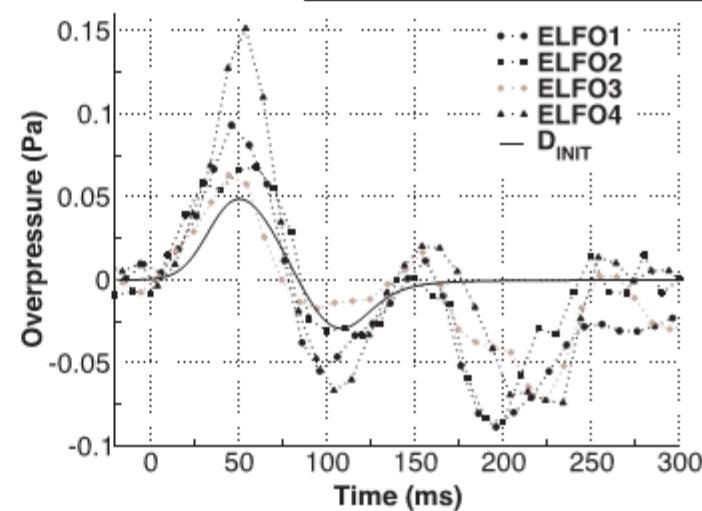
Table 3

Computed source heights and travel times.

Date	Source Height (km)	Off-track Angle (deg.)	ΔFPA^a (deg.)	Travel Time (s)	% Diff
20080325	61	50°	-16.8°	341.1	0.03
20081028	53.7	36.5°	0	236	-1.7
20090428	58.7	55°	0	455	-0.2
20090428	70.9	50.5°	-19.2°	459.9	-0.02
20111005	72.4	25.8°	0	405.7	-0.3



(a) Nearfield pressure signature



(b) Ground pressure signature

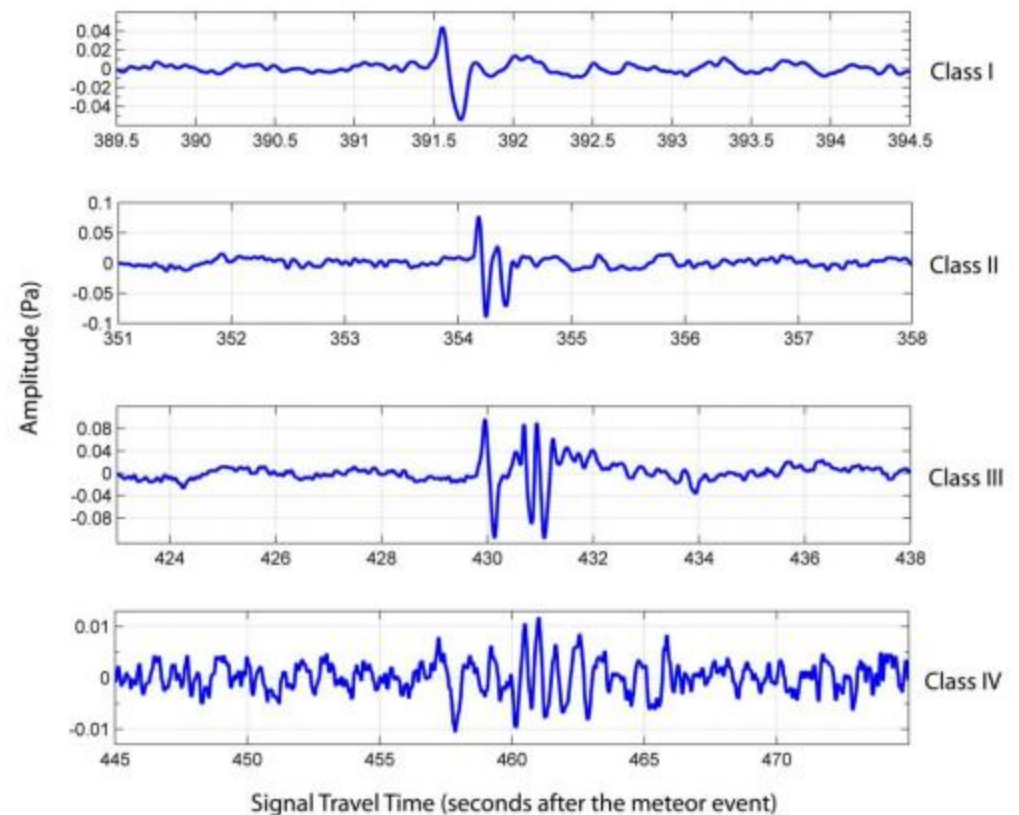
Fig. 11. Nearfield and ground pressure signatures for the second arrival from Meteor 20090428. Results for the initial (nonablated) shape and ELFO measurements are shown. Nearfield signature extracted at distance of $40D$ ($M_\infty = 72.1$ and $H = 70.9$ km).

Signalformen

■ Klassifizierung

E:A: Silber, P.G. Brown,
Meteor Infrasound Arxiv1407.6331

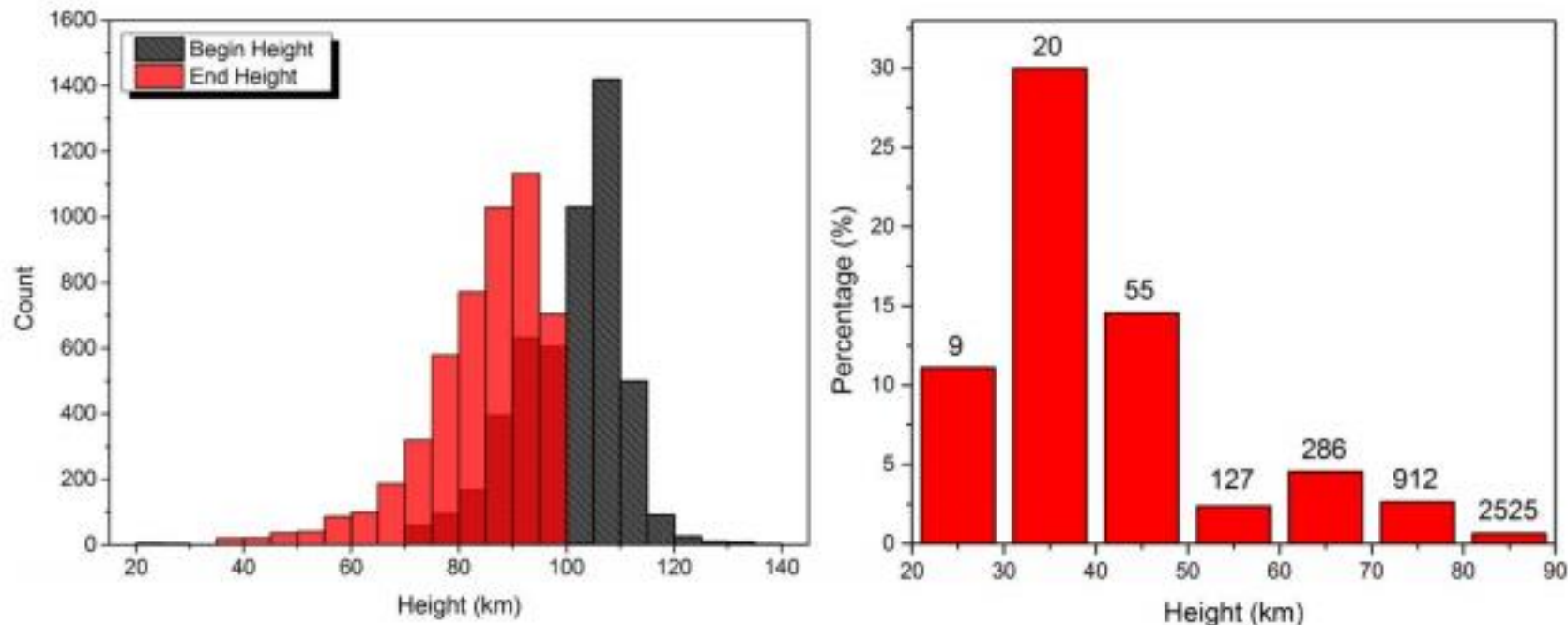
Figure 2: Examples of each taxonomic class.



Vergleich optische - Infrasound Meteore

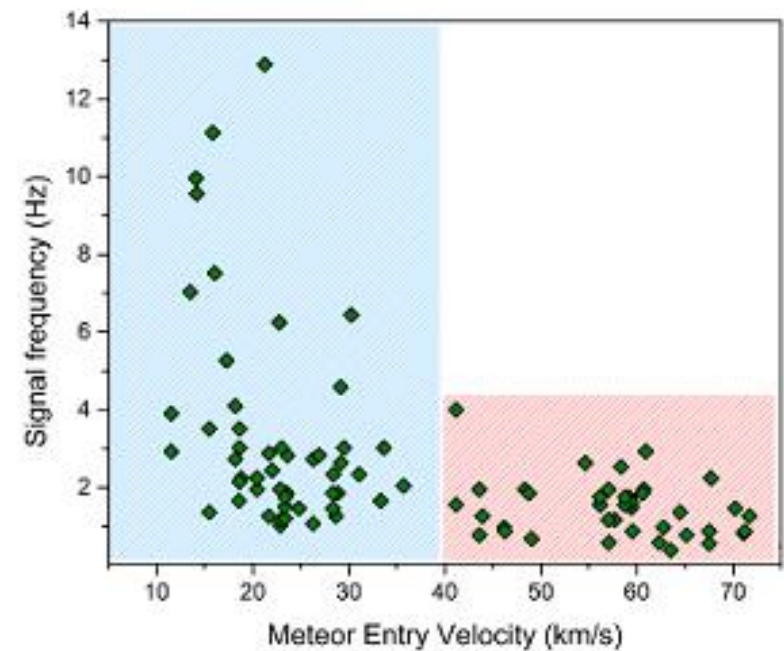
- Endhöhen 71 Meteore Infrasound und optische Daten
- Optisch: Endhöhe Mehrzahl > 80 km
- Infraschall: Endhöhe Mehrzahl < 50 km

E:A: Silber, P.G. Brown, Meteor Infrasound Arxiv1407.6331



Geschwindigkeitsabhängigkeit

- Niedere Geschwindigkeiten:
Asteroidenursprung, fest
höhere Frequenzen
- Hohe Geschwindigkeiten:
Kometenursprung,
neigt zu Fragmentierung
tiefe Frequenzen
E:A: Silber, P.G. Brown,
Meteor Infrasound Arxiv1407.6331
- Zusätzlich: Distanzabhängigkeit



Messung

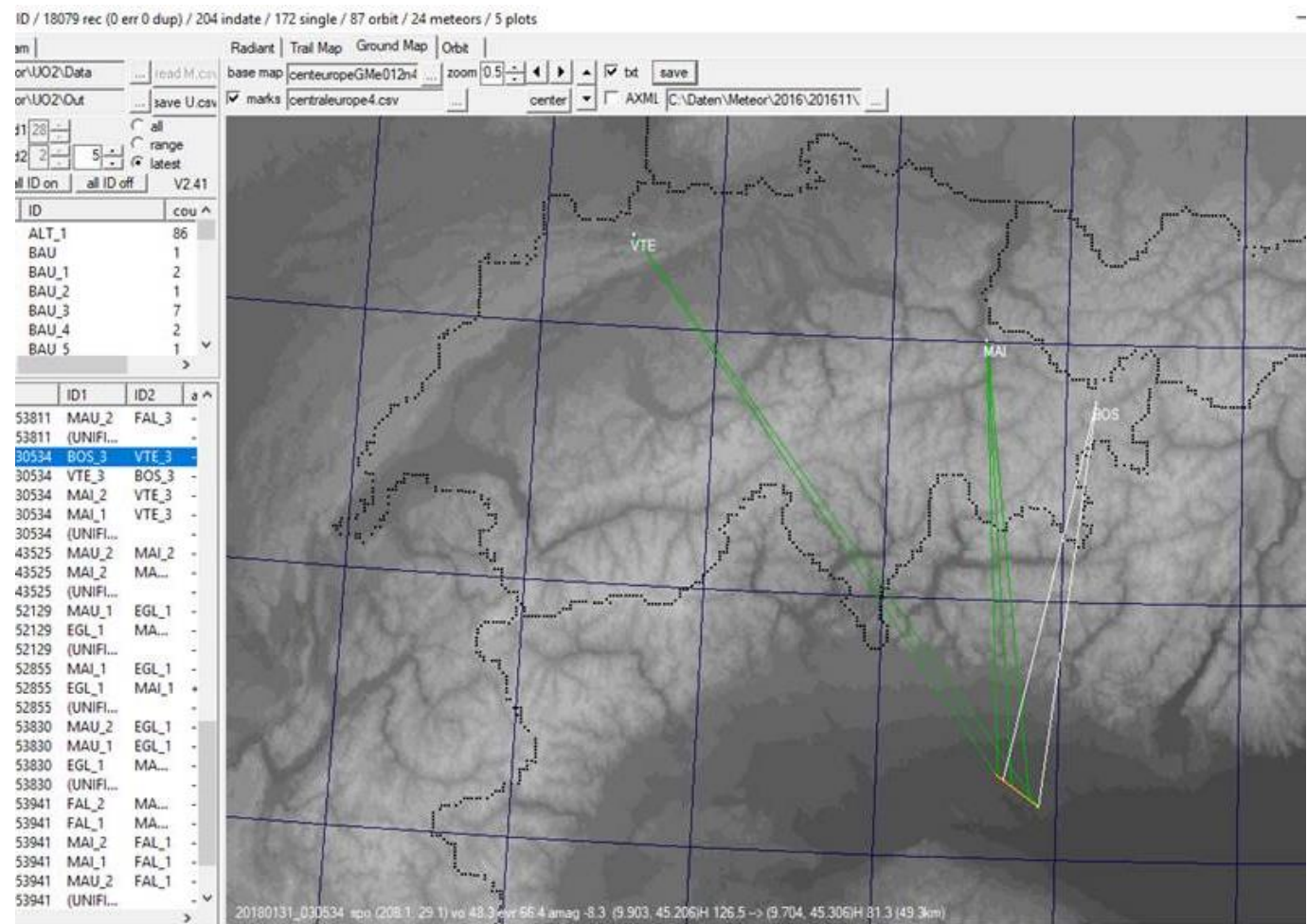
- Hardware: Infra20-Mikrobarometer
 - 0.001 Pa resolution
 - 0.05 – 20 Hz Frequenzbereich
- Software:
 - AmaSeis Datalogging
 - WinQuake Datenanalyse



Aktuelles Beispiel M20180131_030534

■ UFO Orbit

- QR $\sim 45 - 55^\circ$
- LD2:187 km BOS
- 292 km VTE
- $\rightarrow$ Laufzeit ca. 600, resp. 950 sec



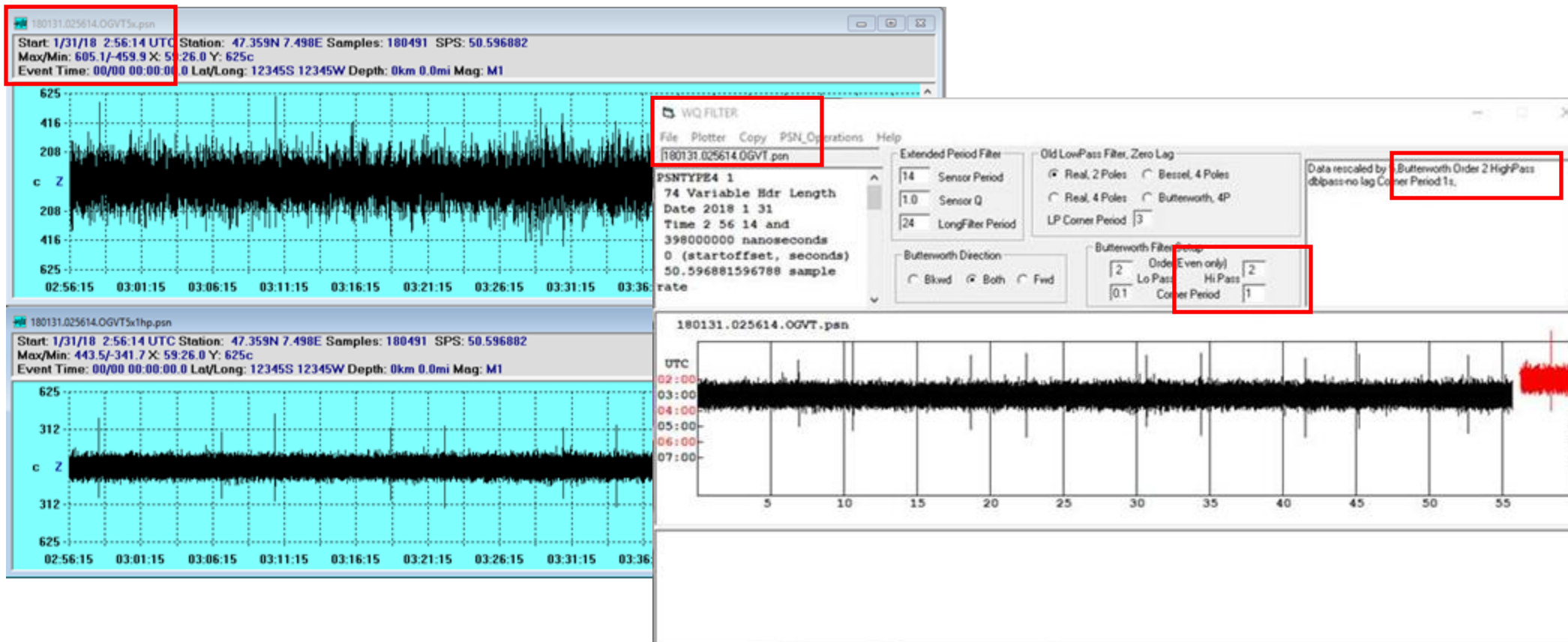
Meteorsignal?

- Meteor M20180131_030534, VTE, -6m



Signalfilterung

- Niederfrequentes Rauschen des Detektors ($1/f$ – Noise)
- Reduziert mit Hochpassfilter (Durchlass $> 1\text{Hz}$)



Filter

■ Butterworth Hochpassfilter

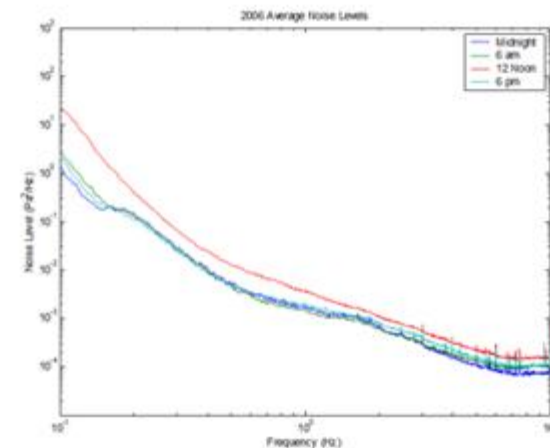
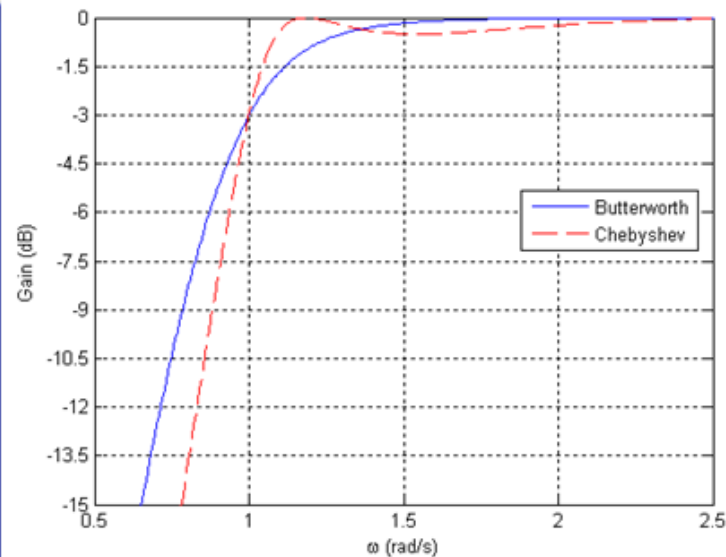
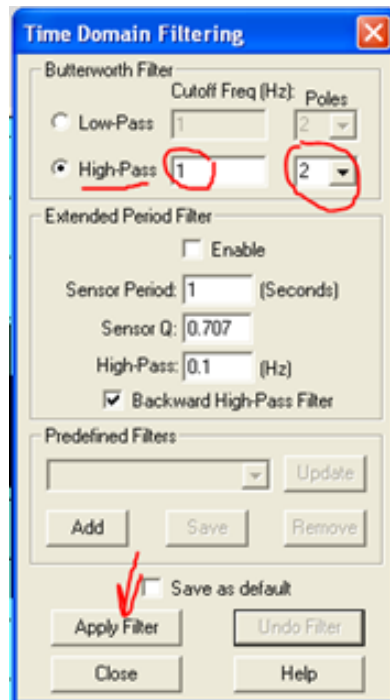


Figure S5.2: A power spectral density (PSD) plot for the entire array for the summer 2006 showing the noise levels as a function of day/night hour. The average noise levels at ELFO at 10 Hz, 1 Hz and 0.1 Hz are $\sim 10^{-4} \text{ Pa}^2/\text{Hz}$, $\sim 10^{-3} \text{ Pa}^2/\text{Hz}$ and $\sim 10^{-1} \text{ Pa}^2/\text{Hz}$, respectively.

Elizabeth A. Silber, Peter G. Brown: Meteor Infrasound, Arxiv1407.6331

Verbesserung Setup

- Isolation
- Windschutz
- Mehrere Anschlüsse
- Schlauch mit Löchern
(Erhöhung Anzahl Messungen)
vermeidet Resonanzen
- Mehrere Stationen
 - Richtungsbestimmung

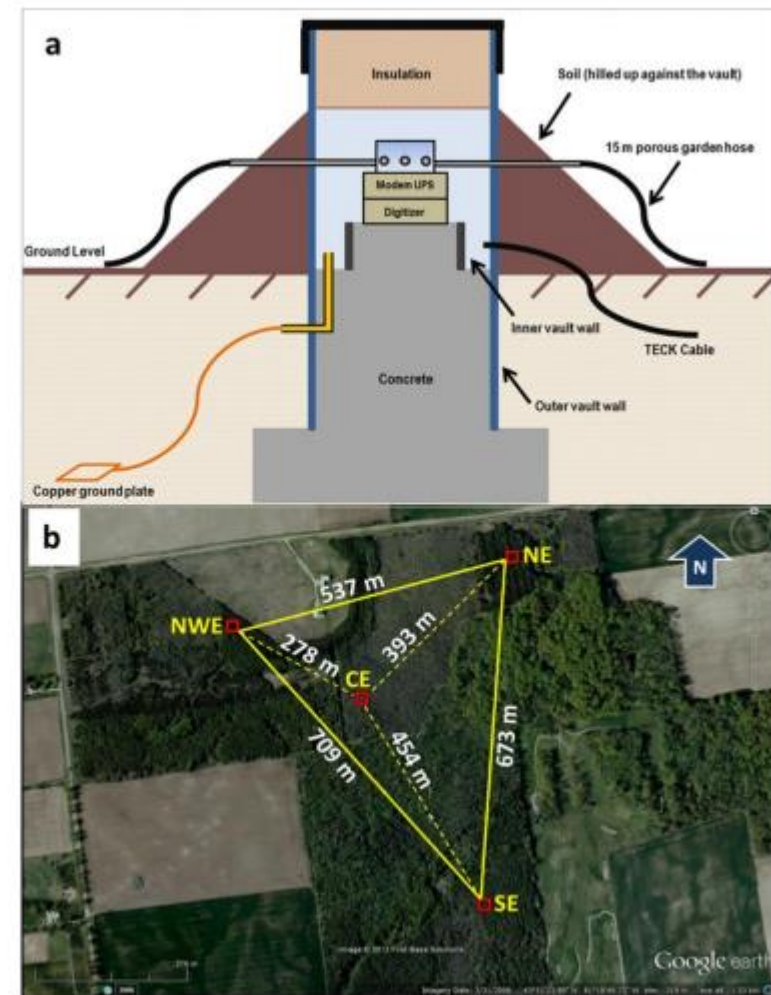


Figure S5.1: (a) ELFO vault diagram; (b) plane view of the array configuration of ELFO.

Zusammenfassung

- Schallausbreitung relativ kompliziert
 - Beeinflusst durch Temperatur,
 - Wind, Turbulenz
 - Intensität nur mit gutem Atmosphärenmodell
- Detektion bevorzugt für Meteore mit Endhöhe < 40 km
- Überschallknall bei $QR = 90 \pm 20^\circ$, Flugrichtung senkrecht zu Beobachter
- Detektion von Explosionen
- Elimination von Störsignalen (Hardware, Software)

Literatur

- Gute Übersicht: Elizabeth A. Silber, Peter G. Brown Arxiv1407.6331, Optical Observations of Meteors Generating Infrasound – I: Acoustic Signal Identification and Phenomenology
- Grossereignisse (Cheliabinsk etc) IMS CTBTO
Infrasound detection of meteors, M.N. ElGabry et.al.
- Vergleich Boliden Infrasound IMS, Liste 2002 - 2016
Refinement of Bolide Characteristics from Infrasound measurements
Nayeob Gi, Peter Brown, Arxiv1704.07794
- J. S. Lamancusa Penn State 7/20/2009 Outdoor Sound Propagation
- D.A. Hilton et. al., Sonic Boom Ground Pressure Apollo 15
NASA TN D-6950, 1972
- Vergleich Rechnung Experiment: Numerical prediction of meteoric infrasound signatures, Marian Nemec et. al. Planetary and Space Science 140 (2017) 11–20
- Link zu allen verwendeten Papers (bis Ende Mai 2018):
<https://www.dropbox.com/sh/g5b0oxdrv7is5n/AAC8fXczZTN8hy5bW6Xbp0g2a?dl=0>

Dank

- Alle, die mit Diskussionen beigetragen haben
- Roger, Jochen, Jonas, Beat etc.