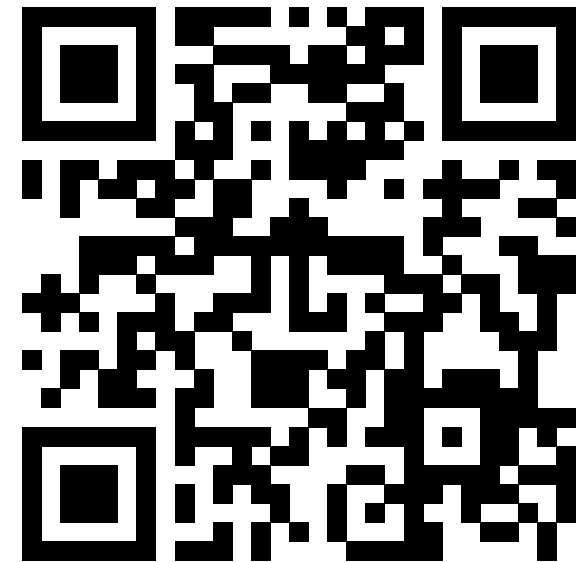


Frequenzmessung unhörbarer Signale

Folien stehen zur Verfügung auf
https://dj3ei.famsik.de/2026-FMT_Vortrag
siehe auch QR-Code.

α – Version (Release Candidate)
2026-04-01 20:59 UTC



Alle Rechte an diesen Präsentationsfolien
außer Graphik Maximum Usable Frequency (MUF) und Bild Yak:
Andreas Krüger, DJ3EI, dj3ei@famsik.de, 2026.

Bis auf die MUF-Graphik darf dieses Material genutzt werden
unter der Lizenz CC BY-SA 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



Vortragsankündigung EH 2026

Vier Amateurfunk-Kurzwellensignale. Laut Ankündigung müssten sie da sein, aber zu hören ist: Nichts. Nur Rauschen. Trotzdem schaffe ich, von dreien dieser vier Signale die Frequenz auf ein Hz genau zu bestimmen! Ein persönlicher Bericht von einem Nerdvergnügen und nebenbei eine von vielen möglichen Antworten auf: "Was machen diese Funkamateure eigentlich so?"

Zweimal im Jahr veranstalten Funkamateure in den USA eine Ostereiersuche der besonderen Art: Den [Frequency Measurement Test](#). Auf vorher nur ungefähr bekannten Frequenzen im Kurzwellenbereich bei 3,5 und 7 MHz senden sie insgesamt vier Signale. Jedes dieser Signale stellt ein Osterei dar: Gefunden hat es, wer die Frequenz auf ein Hz genau misst.

Diese Ostereiersuche zielt also auf eine Messgenauigkeit bei 10^{-7} . Das ist ungefähr um einen Faktor 20 besser als alles, was auf Kurzwelle im normalen Amateurfunk jemals gebraucht wird. (Eine Uhr mit Genauigkeit 10^{-7} würde im Jahr etwa 3 Sekunden falsch gehen.) Aber Ostereiersuche dient schließlich nicht dem Nahrungserwerb, sondern soll Spaß machen! So etwa 60-100 Verrückte folgen normalerweise der Einladung und suchen mit.

Einige nutzten cooles Zeug wie GPS-stabilisierte Oszillatoren oder Rubidium-Frequenznormale. Ich trat als "Underdog" an mit sowieso vorhandenen Bordmitteln: Brauchbares Funkgerät, mäßige Antenne, Laptop - und, als mein Ass im Ärmel: FLOSS!

Als die Ostereiersuchzeit kam, war die Enttäuschung groß: Es herrschte gerade schlechtes "Funkwetter", zu hören war nur Rauschen. Aber aus Aufnahmen des Rauschens (Sounddateien) konnte passende Software die Signale dann doch noch herausfischen. Schlussendlich hatte ich drei der vier Ostereier gefunden und war glücklich wie ein Osterhase!

Und es wurde noch besser: Neuerdings gibt es neben den etablierten Eiern aus den USA auch [neue aus Polen](#), die gesucht werden können, zur Zeit einmal im Monat. Hier sollen einerseits auch Frequenzen gemessen werden, aber obendrein auch die Dauer von Impulsen und sogar (möglichst millisekundengenaue) Zeitstempel. Die Signalstärke war besser, die Sendung aus dem Lautsprecher klar hörbar. Die Sache mit der Impulslänge und den Zeitstempeln erforderte deutlich mehr Aufwand an Software, aber nun hatte mich das Suchfieber gepackt! Buchstäblich Minuten vor dem Abgabetermin hatte ich die drei Eier zusammen und diesmal waren alle richtig gefunden 😊!

Der Vortrag ist eine sehr persönliche Schilderung einer verrückt-nerdigen Aktion. Funk-KnowHow wird nicht vorausgesetzt; das Wenige, das gebraucht wird, wird erklärt. Neugier genügt!

Euer Erklärbar

Andreas Krüger (DJ3EI)

Selbstvorstellung aus der EH Vortragsankündigung

- Funkamateurler seit 2001
- Handdampf in vielen Gassen
- als Funkamateurler **kleine Erfolge** trotz beschränkter Möglichkeiten in der Großstadt-Mietwohnung
- früher Softwareentwickler, inzwischen Rentner
- schreibt auf seiner **Homepage** und im **Fediverse**.
- Frontperson, Mitgründer und Webmaster des **AfuBarcamps**
- Hat noch **mehr Antworten** darauf, was Funkamateure eigentlich so machen.

Die Aufgabe

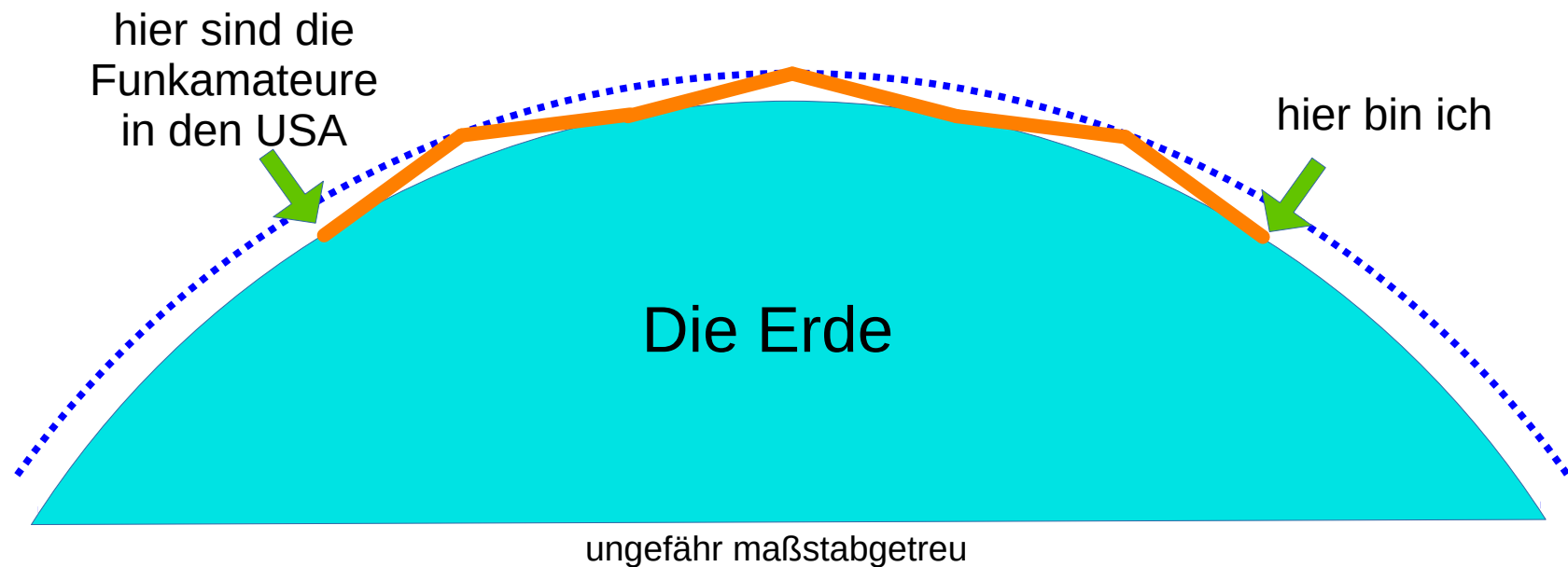
Funkamateure in den USA senden viermal je ein Signal auf der Kurzwelle, eine Minute lang.

Ich (oder wer sonst Lust hat) ist aufgerufen, die genauen Frequenzen dieser vier Signale zu bestimmen.



Wie kann das gehen?

UV-Strahlung von der Sonne (UV und Röntgen)
ionisieren hohe Luftschichten (200-400 km).
Es entsteht Plasma: Die Ionosphäre.
An ihr kann Kurzwellenstrahlung reflektiert werden.



Das funktioniert auf Kurzwelle

- Radiowellen höherer Frequenzen (UKW) durchstoßen die Ionosphäre und verschwinden im Weltraum.
- Je flacher die Wellen auf die Ionosphäre treffen, um so höhere Frequenzen können noch reflektiert werden.
- “Maximum Usable Frequency“ MUF
 - entfernungsabhängig
 - tageszeitabhängig
 - abhängig von der Sonnenaktivität

Ausbreitungslotterie

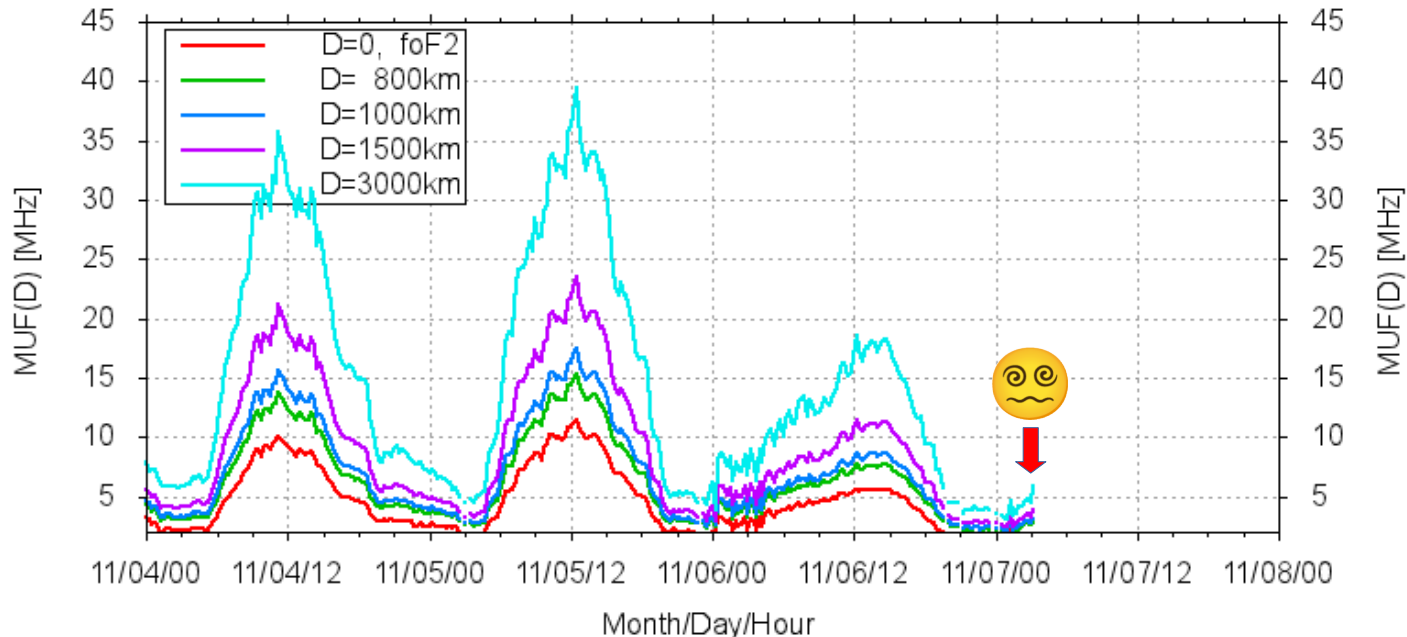
Chronik meines Morgens 7.11.2025

- 3:00 MEZ = 2:00 UTC der Wecker klingelt.
- 2:30 UTC: Erstes Signal nahe 7064 kHz: nichts zu hören, nur Rauschen.
- 2:45 UTC: Zweites nahe 7065 kHz: auch nichts
- 3:00 UTC: Drittes nahe 3598 kHz: auch nichts
- 3:15 UTC: Viertes nahe 3599 kHz: auch nichts



Am 7.11. um 3 UTC morgens: Ionosphäre schwach: Pech gehabt.

JR055, Maximum Usable Frequency, up to 3000km



Am 6.11.
vergleichsweise
schwache
Ionosphäre durch
Sonnensturm, die
sich am 7.11. um
3 Uhr UTC noch
nicht erholt hatte.

Quelle: Leibnitz-Institut für
Atmosphärenphysik an der
Universität Rostock e.V.,
Ionosonde Juliusruh

Alle Rechte an der Graphik
liegen dort, hier veröffentlicht
mit freundlicher Genehmigung.

Das Leibnitz-Institut legt Wert
auf die Feststellung: „Die
Angaben haben operationellen
Charakter.“

Übersetzt:
“... sind nur Schätzungen.“

Diese Folie ist grob
vereinfachend:
Ionosphärenphysik
ist ein veritables
Kaninchenloch!

Chronik meines Morgens 7.11.2025

- 3:00 MEZ = 2:00 UTC der Wecker klingelt.
- 2:30 UTC: Erstes Signal nahe 7064 kHz: nichts zu hören, nur Rauschen.
- 2:45 UTC: Zweites nahe 7065 kHz: auch nichts
- 3:00 UTC: Drittes nahe 3598 kHz: auch nichts
- 3:15 UTC: Viertes nahe 3599 kHz: auch nichts



Aber ich habe von allen vier Signalen
Tonaufnahmen gemacht!

Helfen Tonaufnahmen, die Frequenz eines Senders genauer zu bestimmen?

Die am Radio / Funkgerät eingestellte Frequenz
wird gebraucht, klar.

Bei normalem Radioempfang
hilft eine Tonaufnahme nicht,
die Frequenz des Radiosenders
noch näher zu bestimmen.

Im Amateurfunk manchmal schon.

Dazu ein wenig Yakshaving.



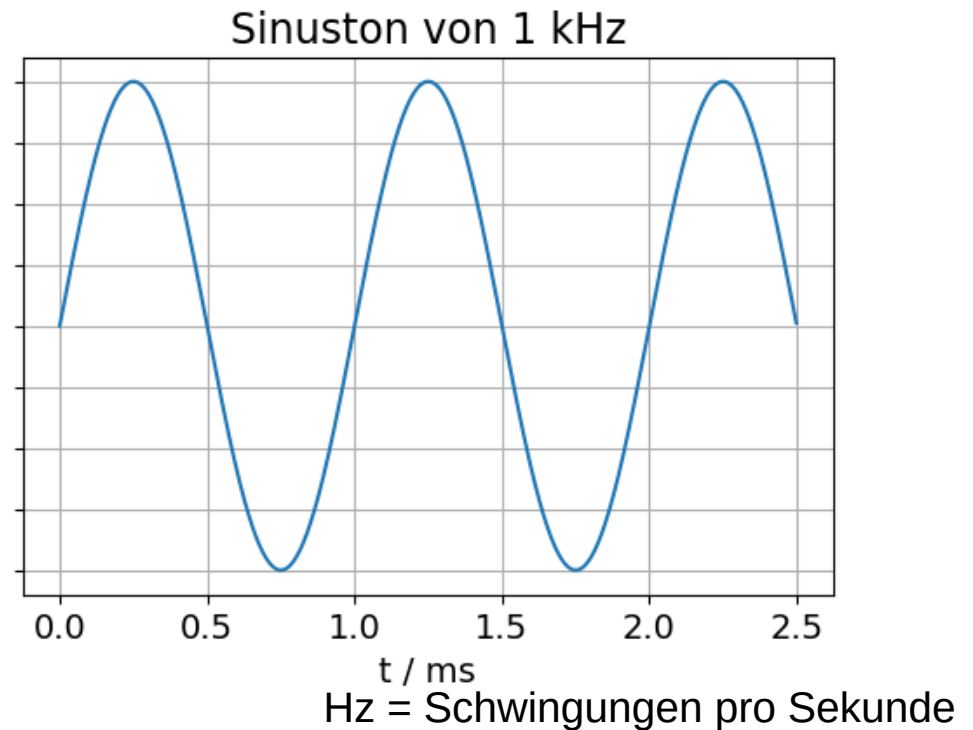
Ausschnitt aus einem [Bild](#)
CC BY-SA 4.0 [Alexandr frolov](#)

Amateurfunk-Übertragungsverfahren
Upper Side Band (USB)
ein von zwei Spielarten von Single Side Band (SSB)

Wer Amateurfunk (Sprechfunk) auf Kurzwelle abhören will,
(was streng erlaubt ist)
braucht einen SSB-fähigen Empfänger.

Sinus als die Mutter aller Signale

Jean Baptiste
Joseph Fourier



Allgemeine Signale lassen sich in Sinussignalen zerlegen:
Fouriertransformation ergibt das Spektrum eines Signals.
Ein Kaninchenloch!

Manchmal filtern akustische Gegebenheiten "Obertöne" aus einem Klang.

Beispiele, die das voraussetzen:

- Menschliches Hören (junge Ohren): ca. 16-20000 Hz
- Musikequipment macht häufig Angaben über den eigenen Frequenzgang, z.B. 40-16000 Hz
- **Für Sprachverständlichkeit reichen 300-2700 Hz** (oder **noch weniger**, wenn es keine Hintergrundgeräusche gibt).

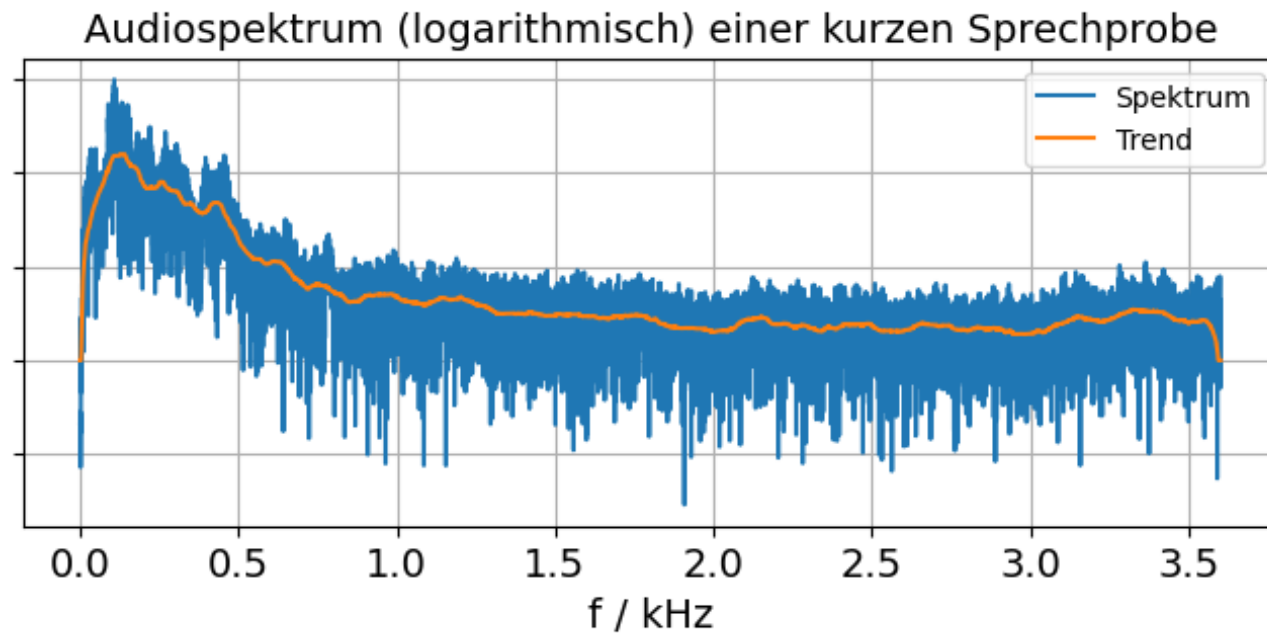
Im Amateurfunk übertragen wir für Sprechfunk nur Frequenzen im Bereich 300 – 2700 Hz!

Nix HiFi.

Sprachspektrum

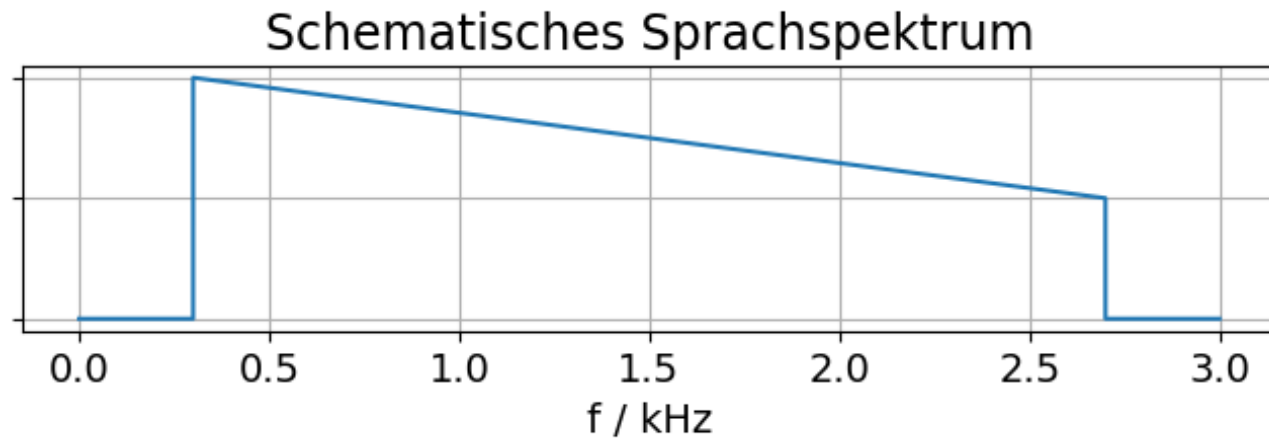
Wie das Spektrum tatsächlich aussieht,
hängt sehr davon ab,
was gerade gesagt wird und wer es sagt.

Hier ein konkretes Beispiel (relativ tiefe Männerstimme):



Sprachspektrum

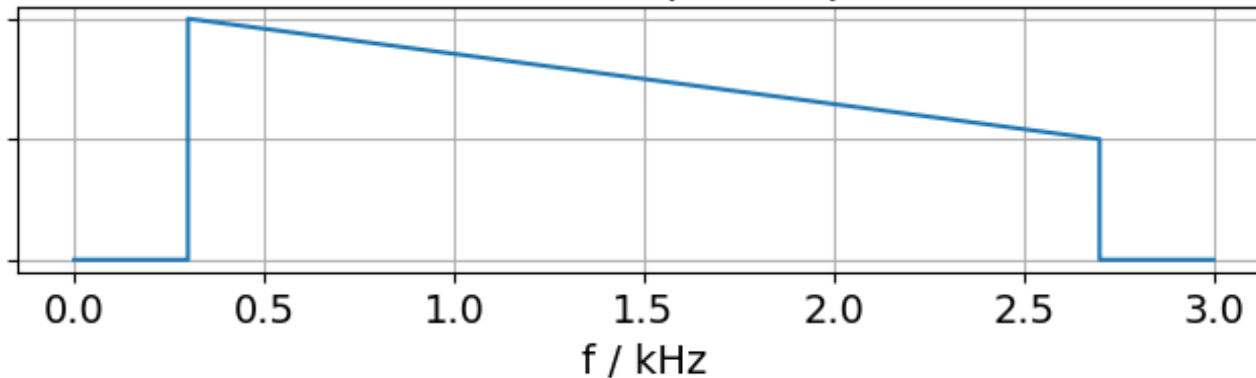
Übliche grob vereinfachte Darstellung:



USB „Upper Side Band“ Sender

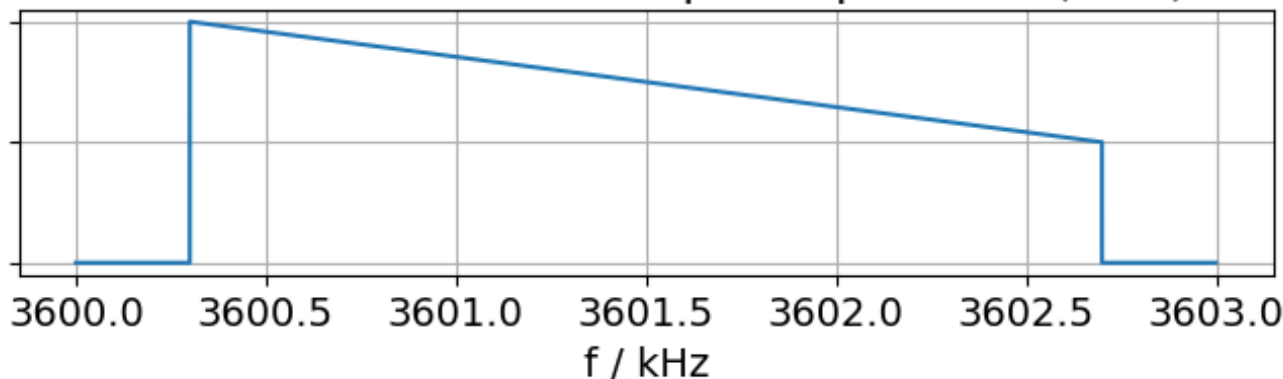
z.B. auf 3600 kHz eingestellt

Schematisches Sprachspektrum



Jede Sprachfrequenz wird
um die eingestellten 3600 kHz erhöht:

Schematisches Hochfrequenzspektrum (USB)

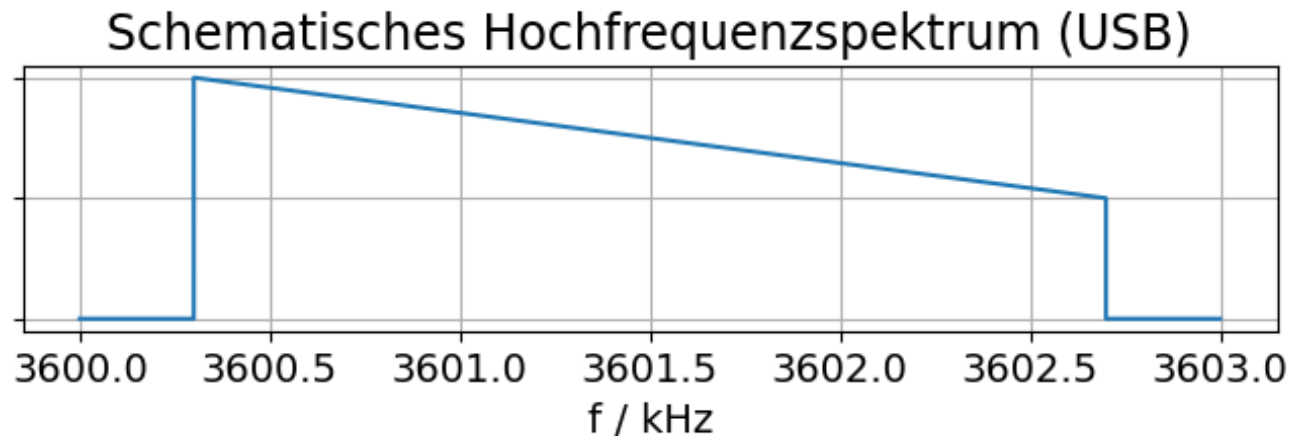


und ab zur
Sendeantenne
damit!

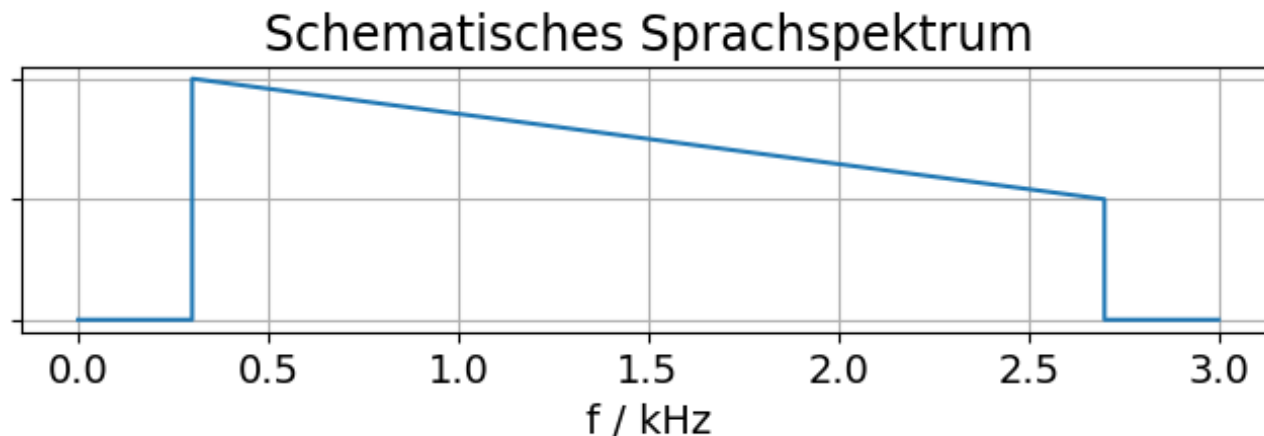
USB „Upper Side Band“ Empfänger

z.B. auf 3600 kHz eingestellt

Eingehendes
Signal von der
Empfangs-
antenne:



Jedes eingehende Signal wird
um die eingestellten 3600 kHz erniedrigt:



Angekündigung eines der vier Signale:

Nahe 3598 kHz:

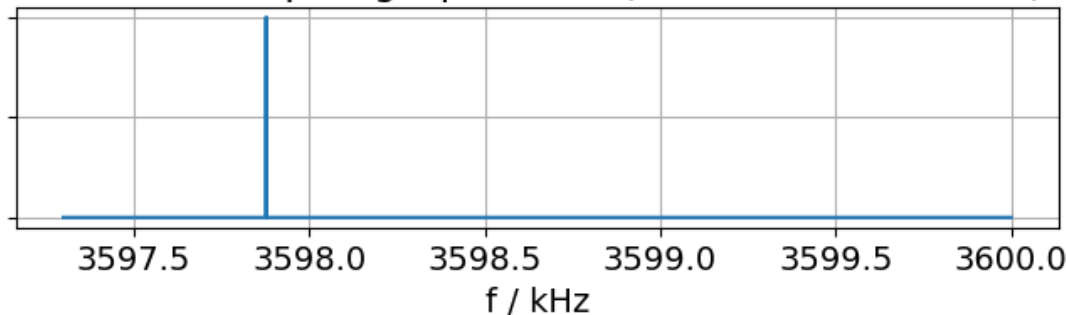
3:00 UTC Station meldet sich, gemorste Stationskennung W8RKO

3:05-3:06 UTC eine Minute zu messendes Signal

Mein ursprünglicher FMT-Plan

USB-Empfänger auf 3597,3 kHz

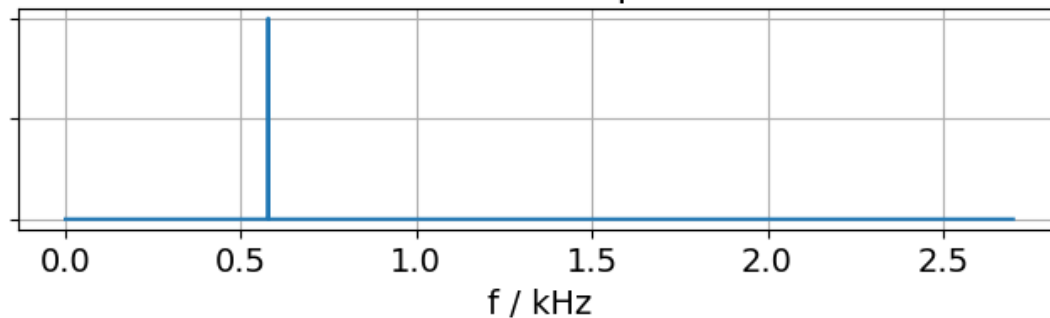
erhofftes Empfangsspektrum (USB bei 3597.3 kHz)



Empfangsfrequenz 3597.3 kHz war etwas unüberlegt.

3596.5 kHz hätte breiteren Frequenzbereich um 3598 kHz herum abgedeckt.

erhofftes Audiospektrum



Davon Audioaufnahme.

Später Frequenz des Audiotons messen.

Management Summary

- Funkgerät auf USB stellen
- Frequenz einstellen
ein paar 100 Hz unterhalb der erwarteten
- Audiofrequenz messen
- Eingestellte und Audiofrequenz addieren:
Signalfrequenz!

Fragen hierzu?

Der Plan ist noch nicht verloren!

Fourier-Transformation FTW!
Ergibt das Spektrum eines Signals!

Oft können aus dem Rauschen noch Signale herausgefischt werden, die mit menschlichem Gehör nicht mehr wahrnehmbar sind.

Fourier-Transformation

ergibt das Spektrum eines Signals

- Das gibt es fertig als Software!
- Mehrere FLOSS Implementierungen verfügbar
- für verschiedene Programmiersprachen
- z.B. Für Python: [scipy.signal.ShortTimeFFT](#)

Damit:
Jede Sekunde
das gerade vorhandene Spektrum
bestimmen.

Technisches Kaninchenloch: Windowing Functions

Fourier-Transformation

ergibt das Spektrum **meiner Aufnahme!**

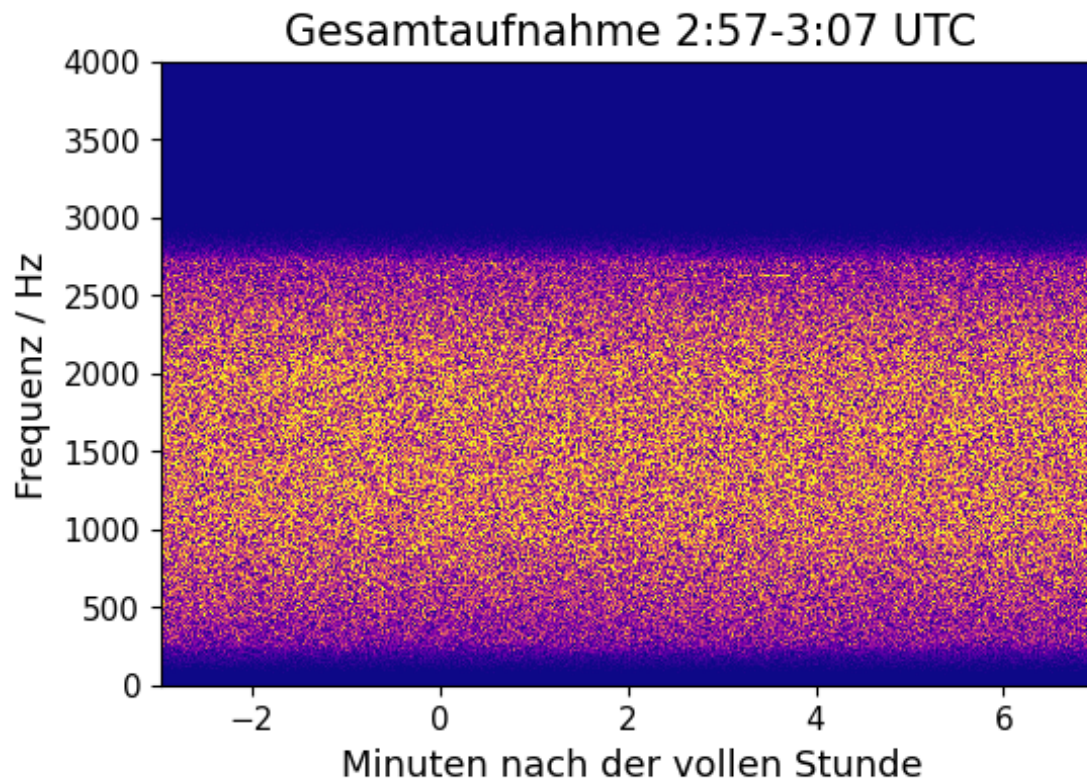
Jede Sekunde
das gerade vorhandene Spektrum
bestimmen.

Technisches Kaninchenloch:
Windowing Functions

Das braucht ca. 2 Sekunden auf meinem Laptop.
Das Ergebnis ist ein Wust von Zahlen:
1200 Spektre von je 4000 Frequenzen.

Wie das darstellen?

So darstellen:

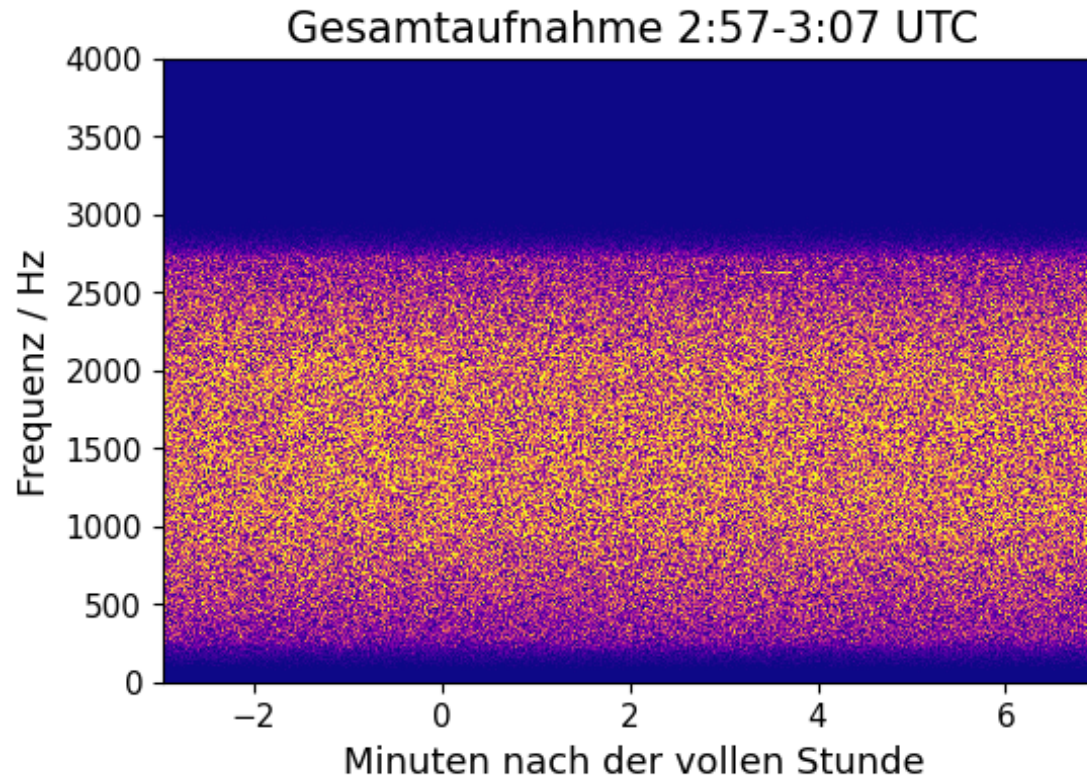


FLOSS [matplotlib](#), Funktion [pcolormesh](#) FTW!

Solche Darstellungen sind im Amateurfunk üblich.
Zeit läuft oft von unten nach oben, Frequenz von links nach rechts,
dann „Wasserfall“-Display.

Bei meiner Originalanalyse waren die Achsenbeschriftungen noch nicht so komfortabel.

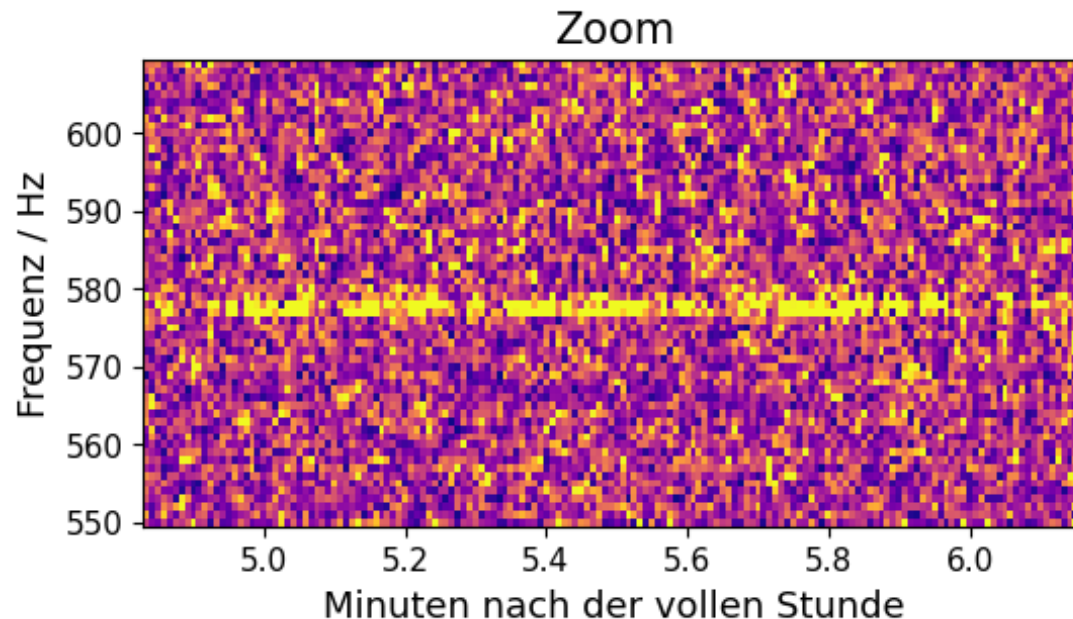
Was ist zu sehen?



Die Empfängerempfindlichkeit ist so groß,
dass das Umweltrauschen sichtbar wird.

So sieht Rauschen aus!

Reinzoomen: 3:05-3:06 UTC und in der Frequenz suchen: **Signal gefunden!**



Keine neue
Fouriertransformation,
die Darstellung zoomt
in die schon
vorhandenen Daten.

Das Signal ist pünktlich: 3:05 bis 3:06 UTC.

Bei der tatsächlichen Analyse hatte ich
einen dünneren Strich in einem größeren Bild gesehen.
Nach Kopieren hier in diese Präsentation hinein
war der Strich nicht mehr erkennbar.

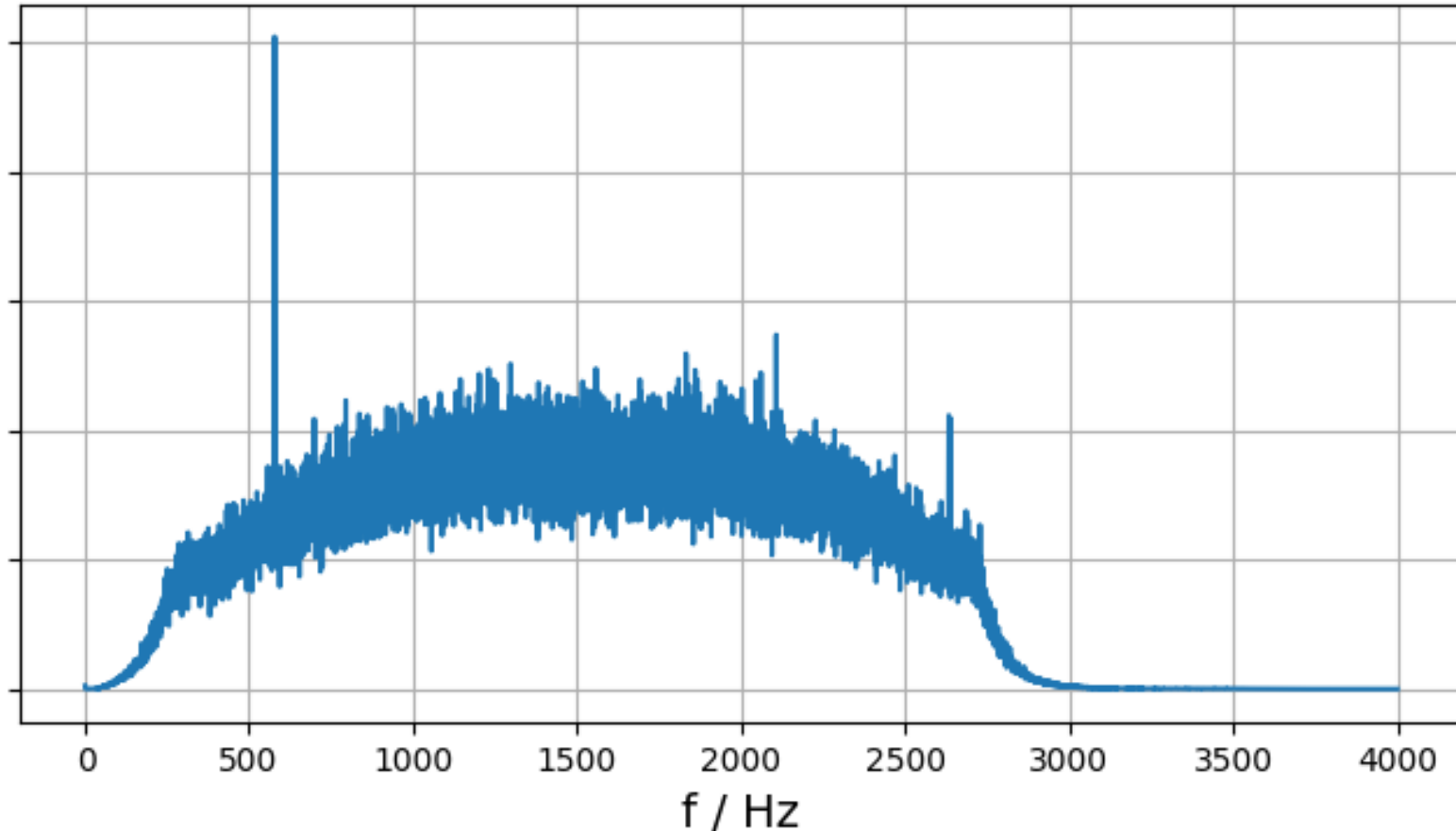
Daher nochmal neu stärker gezoomt; das Bild ist insofern nicht ganz original.

Genauer hinschauen mit neuer Fouriertransformation

- Jedes Spektrum analysiert 5 Sekunden, dadurch weniger Spektren, aber Auflösung von 1 Hz auf 0,2 Hz verbessert.
- Zeitbereich genau 3:05 bis 3:06.

Simplere Darstellung

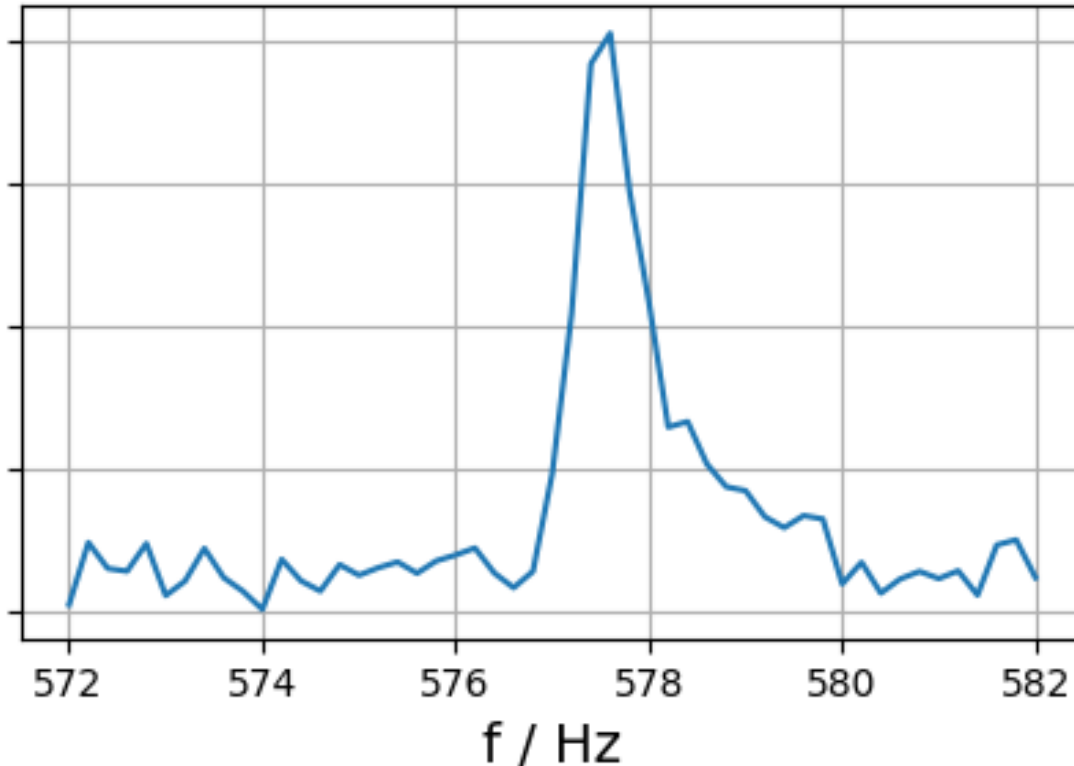
Durchschnittsamplitude der Spektren



Der Peak ist deutlich zu erkennen!

Zoomen wir hinein!

Durchschnittsamplitude der Spektren



f	Amplitude
577.0	9.806074e+05
577.2	1.540586e+06
577.4	2.417659e+06
577.6	2.524478e+06
577.8	1.969963e+06
578.0	1.581743e+06

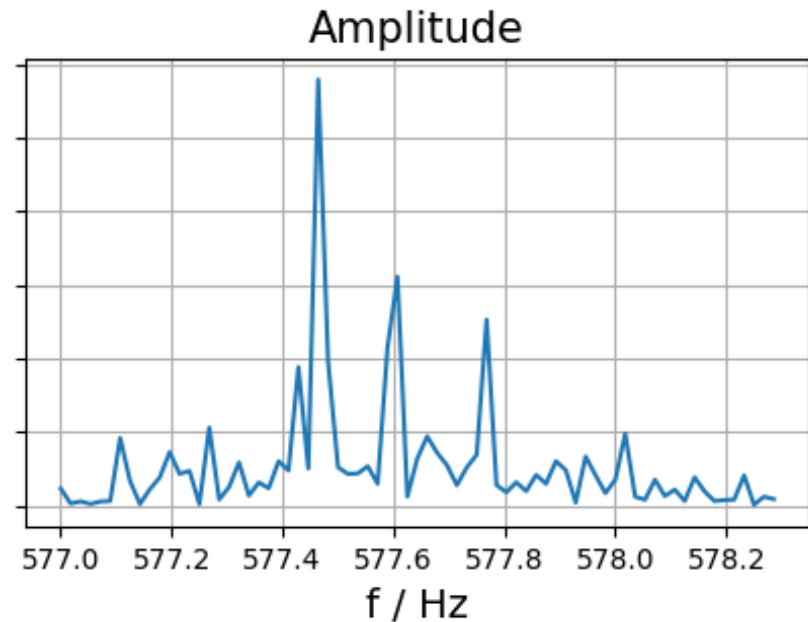
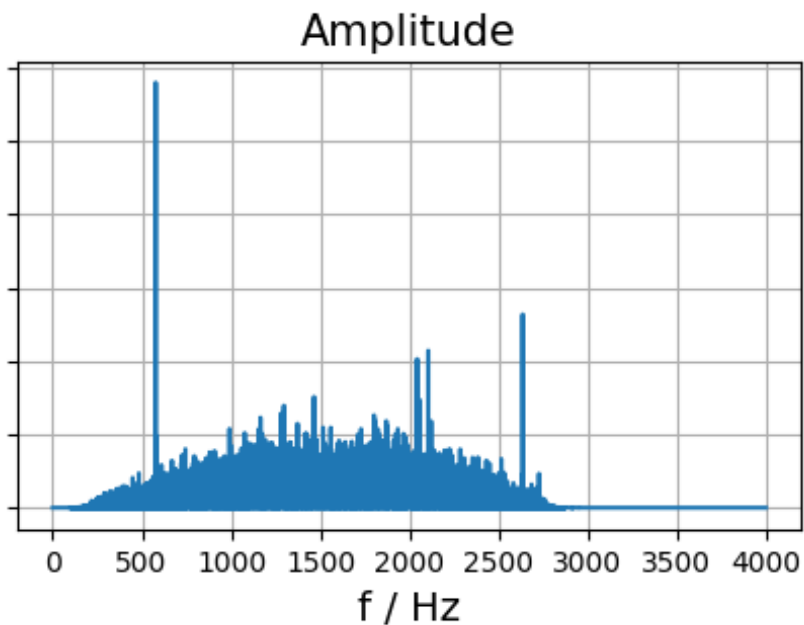
Ich habe mich nur an den beiden Maximalwerten orientiert.
Dazwischen liegt 577,5 Hz.

Aber der Wert sollte näher an 577.5 liegen, also 577,55.

(Nachher schlauer: Richtig wäre gewesen: 577.70 Hz.)

Neue Erkenntnisse

Inzwischen nutze ich `scipy.signal.periodogram`



Höchster Peak hier bei 577,46 Hz.

Wenn es Fragen gibt,
zu meinem grundsätzlichen Vorgehen oder so
gerne jetzt stellen.

Übrigens:

Die Software im Hintergrund

- Ich nutze die Entwicklungsumgebung Jupyter Notebook, um meine Auswertung zu fahren.
- Die Graphen in diesen Folien wurden mit `pandas.DataFrame` aus dem Pandas – Softwarepaket erstellt.

Nutzt noch jemand im Raum regelmäßig Pandas?

DataFrame Livehack: Schrift auf Präsentationsgröße

```
foo_bar_df = pandas.DataFrame(und so weiter)           relative kleine figsize!  
ax = foo_bar_df.plot(grid=True, legend=False, figsize=(5,3))  
  
ax.set_title("Foo über Bar", fontdict={"fontsize": 15})  
ax.set_xlabel("Bar", fontdict={"fontsize": 14})  
ax.set_ylabel("Foo", fontdict={"fontsize": 14})
```

Aber...

Wie genau ist eigentlich mein Funkgerät?

**Stimmen die eingestellten
3597,3 kHz?**

Jede Abweichung hier
schlägt 1:1 durch aufs Endergebnis!

Zeitzeichensender FTW

- Es gibt auf Kurzwelle Sender für Zeitzeichen.
- Gut zu empfangen ist der russische **RWM** bei Moskau auf 4996, 9996 und 14996 kHz.
- Frequenzgenauigkeit besser als 10^{-11}
(meine Genauigkeit bei 10^{-7} , mit Glück 10^{-8})

Damit kann ich meine Empfangsausrüstung kalibrieren.

Frequenz messen wie gehabt,
bei Abweichungen mein Funkgerät nachjustieren.

Ganz neu: FMTLab aus Warschau!

Unterschiede

- Rund einmal pro Monat (FMT zweimal im Jahr)
- Vor der eigentlichen Sendung wochenlang Testsendungen mit bekannten Parametern
- Jede einzelne Sendung wird sechsmal wiederholt (Sendeschleife)
- Das ganze Programm läuft viermal zu verschiedenen Tageszeiten auf verschiedenen Bändern; eine der vier auswertungen reicht für die Teilnahme.

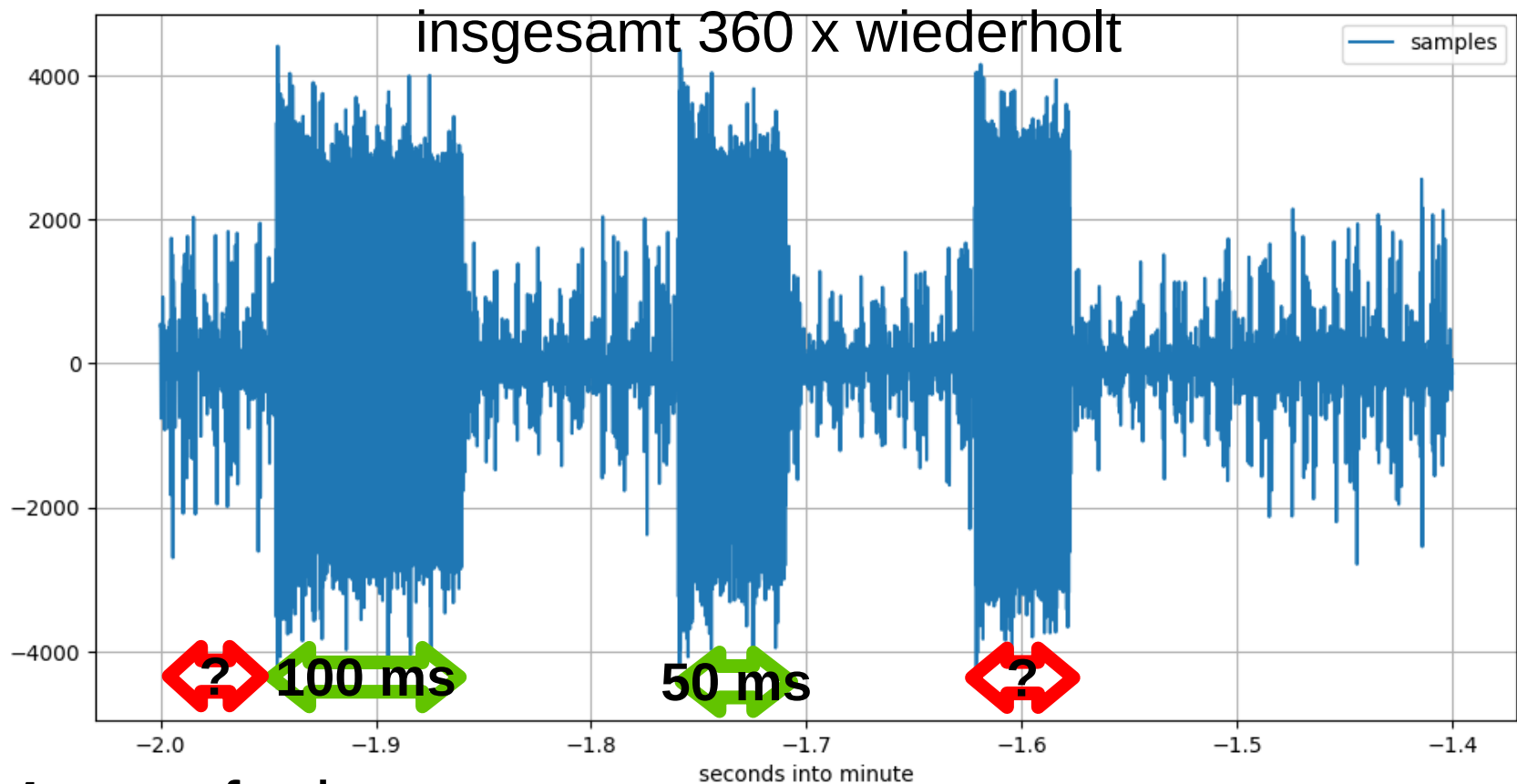
Jeder Durchgang der Sendeschleife (15 Minuten)

- 60 Pulsgruppen mit je drei Impulsen, Wiederholung jede Sekunde ein Minute lang, zwei neue Zeit-Messaufgaben
- 60 Sekunden Dauerträger, Frequenz-Messaufgabe wie gehabt
- Morse-Stationsidentifikation

Vor der gesamten Sendeschleife:

- Morse-Stationsidentifikation
- 60 Sekunden Dauerträger bekannter Frequenz.

Impulsgruppe aus drei Impulsen



Messaufgaben:

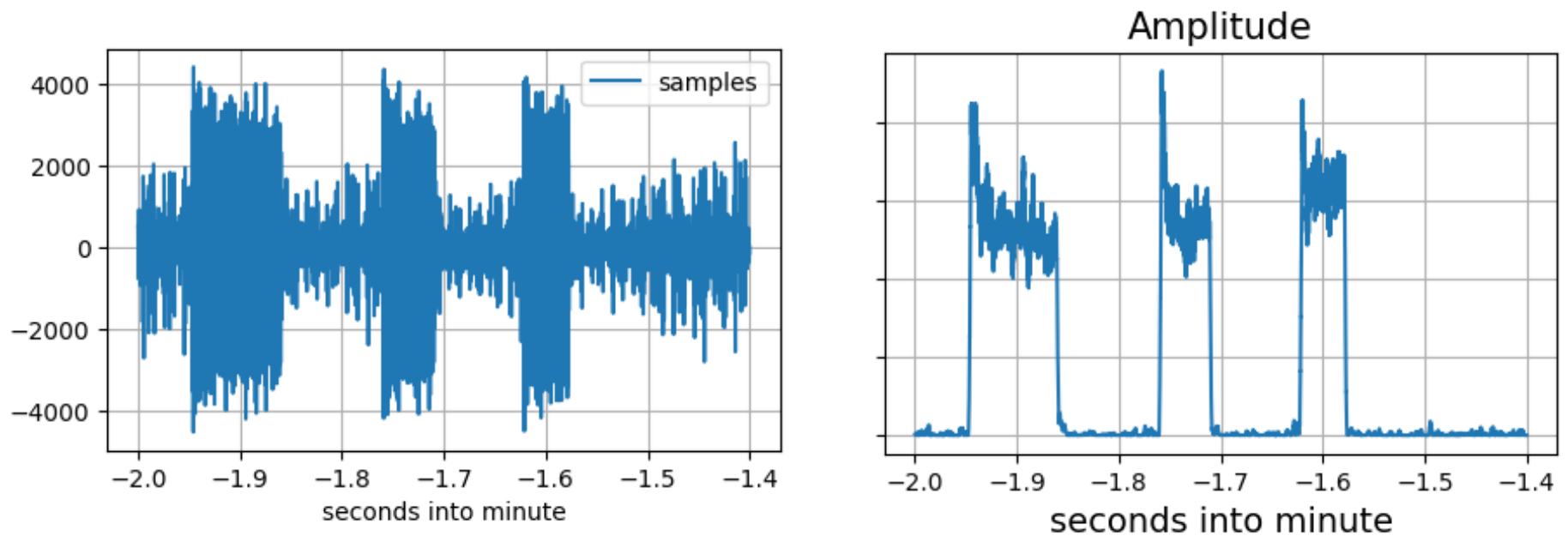
- Wie lange nach der vollen Sekunde fängt der erste Impuls an?
- Wie lange dauert der dritte Impuls?

Absolute Zeit?

- Rechneruhr durch NTP synchronisiert (Linux-Software chronyd)
- Mit C++ - Programm die Samples selbst bei der Soundkarte abholen, jedes Mal, wenn Samples kommen, Zeitstempel schreiben.
- Damit lässt sich für jedes Sample angeben, wann es reinkam.

Wie programmatisch die Kante eines Impulses finden?

Erster Schritt: Amplitude der passenden Sinus-Spektrallinie:



Amplitude finden: Konvolution!

Grob gesagt ergibt die Konvolution ein Maß dafür, wie ähnlich sich zwei Funktionen sind.

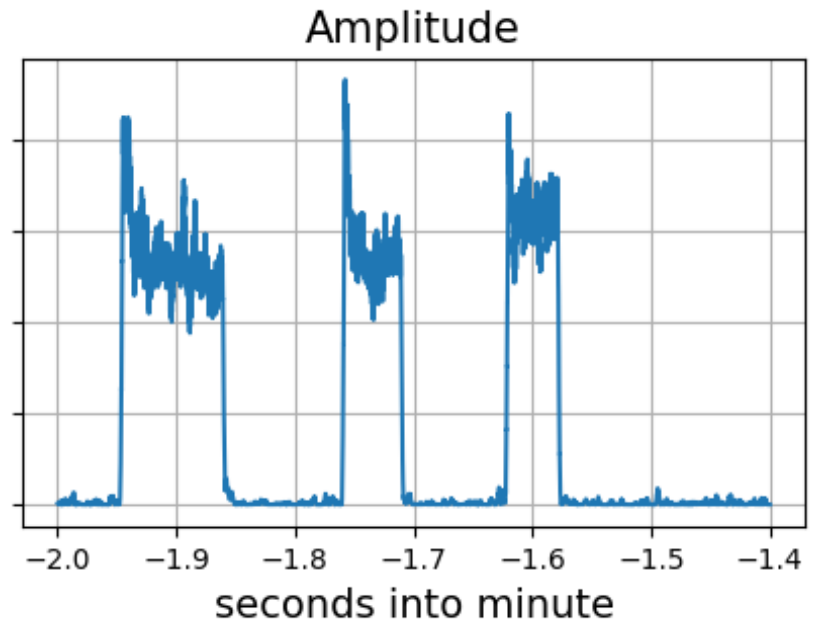
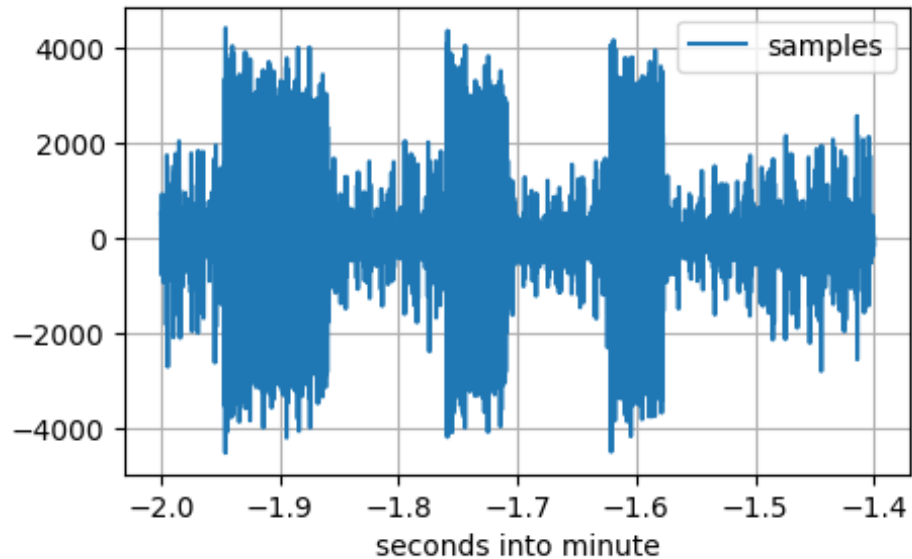
(Ich kriege es im Rahmen dieses Vortrags nicht besser erklärt.)

Die Konvolution von Sinuswellen ist phasenabhängig, aber da gibt es einen Trick:

Mit Sinus und mit Cosinus, dann kombinieren!

```
def convolve(self, samples, mode="full"):
    """Find amplitude of the frequency component."""
    sin_cor = scipy.signal.convolve(
        samples, self.sin_samples, mode=mode)
    cos_cor = scipy.signal.convolve(
        samples, self.cos_samples, mode=mode)
    ampl2 = sin_cor**2 + cos_cor**2
    return ampl2 / self.num_of_samples
```

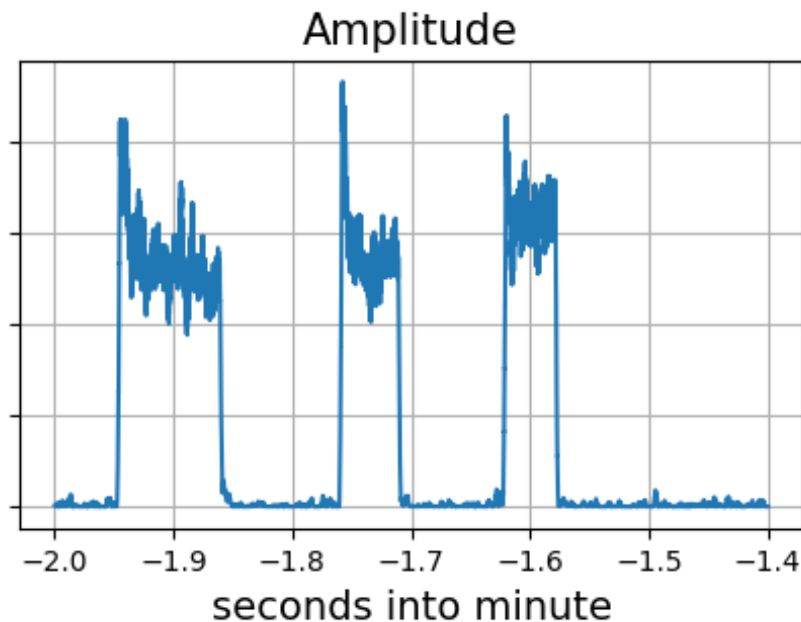
Interpretation:



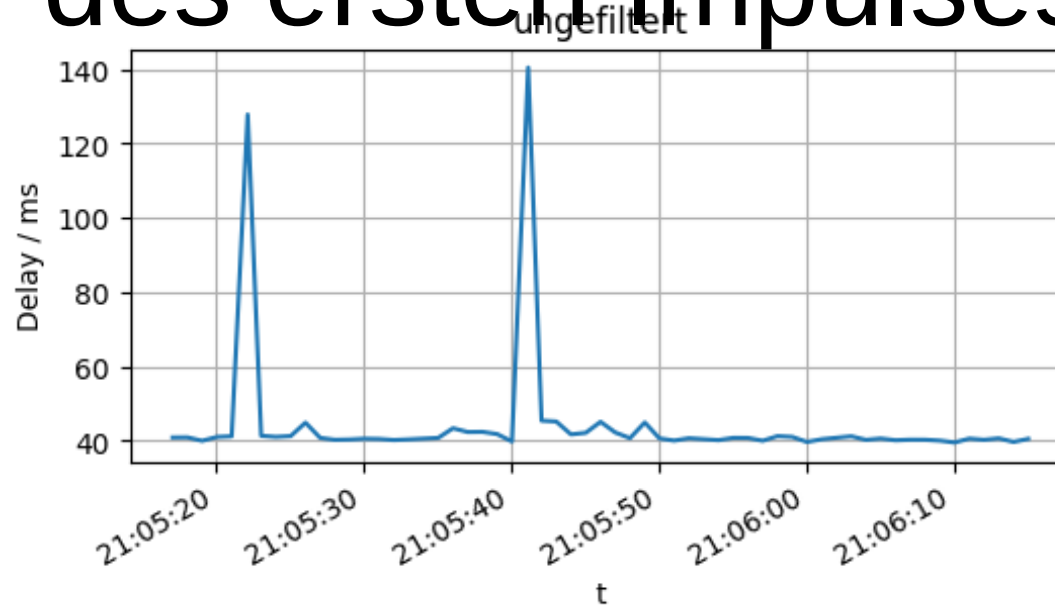
Die rechte Graphik gibt an, ob das Signal (zumindest teilweise) zu dem Zeitpunkt so aussieht wie ein Sinussignal der passenden Frequenz.

Wie da die Impulsanfänge finden? Noch eine Konvolution!

Wo sieht die Amplitudengraphik so ähnlich aus
wie die ideale Impulskante?



Die Startverzögerung des ersten Impulses

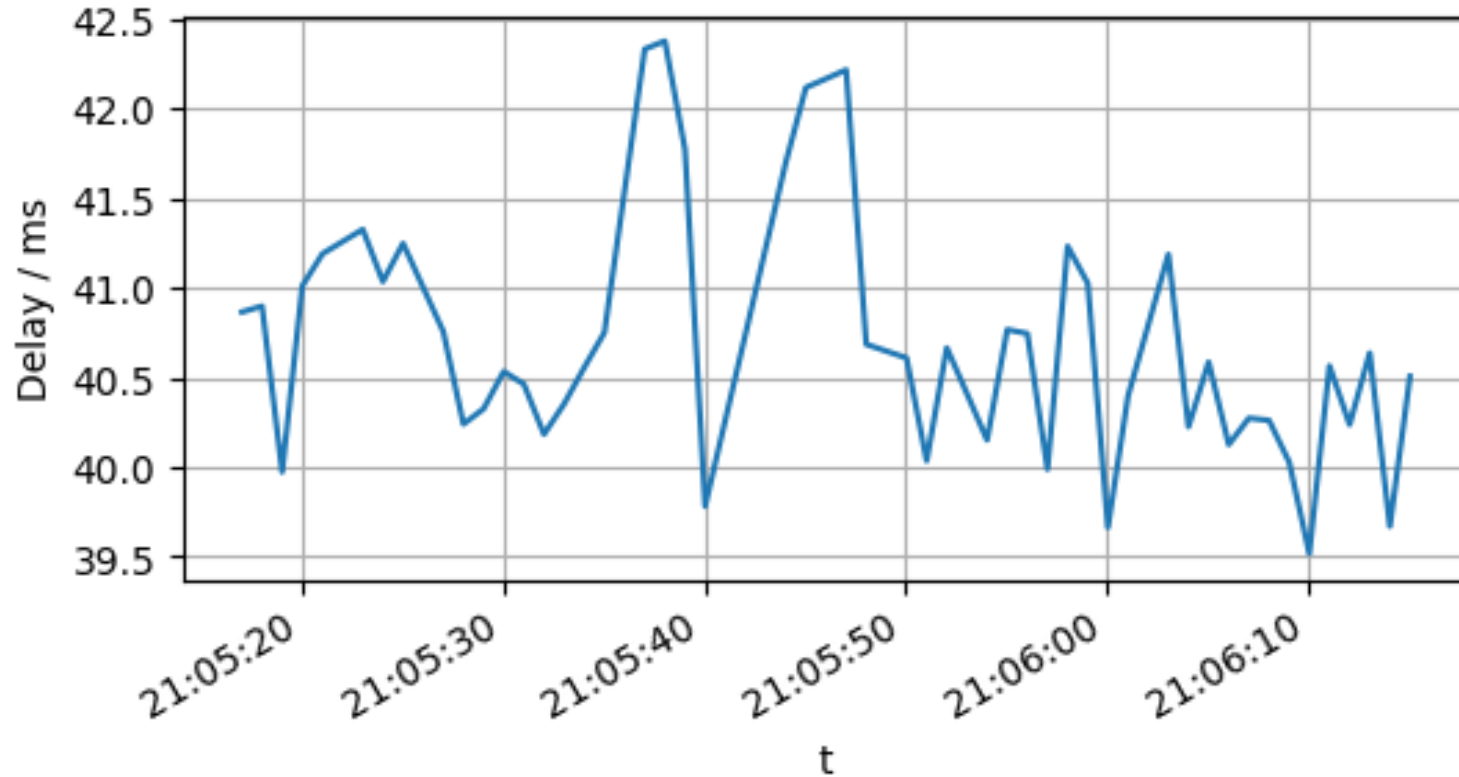


Über die Zeit aufgetragen
(ein Schleifendurchlauf von einer Minute).

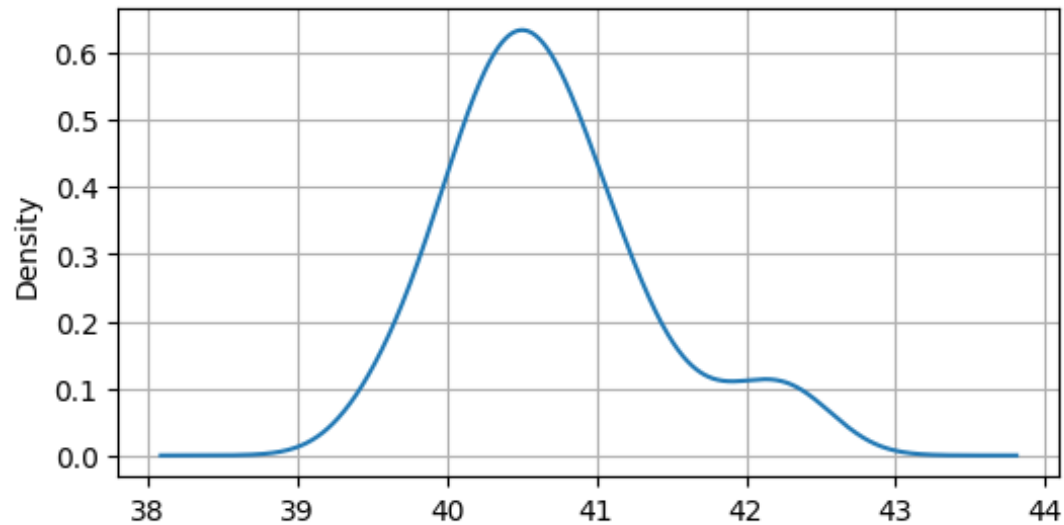
Der gesuchte Wert liegt kurz über 40 ms,
aber einige Ausreißer stören.

Filtern: Median bilden und alles rauswerfen,
was weiter als mehr als ± 2 ms abweicht.

Die Startverzögerung des ersten Impulses, gefiltert.



Wie oft kommt welcher Wert vor?



```
pandas.DataFrame.plot(kind="kde", ...)
```

Zwischenergebnis:

Durchschnitt aller gefilterten Werte
aus 6 Schleifendurchgängen:

Der erste der drei Impulse kommt
40,66 ms nach der vollen Sekunde
in meinem C++ - Programm an.

Was fehlt?

- Kompensation Laufzeit
- Kompensation Verarbeitungszeit

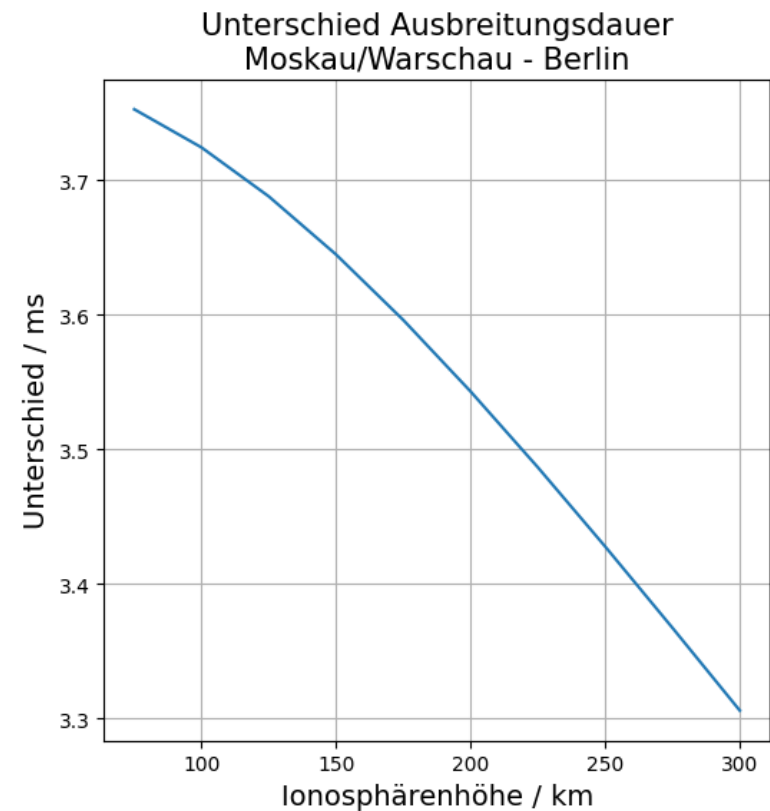
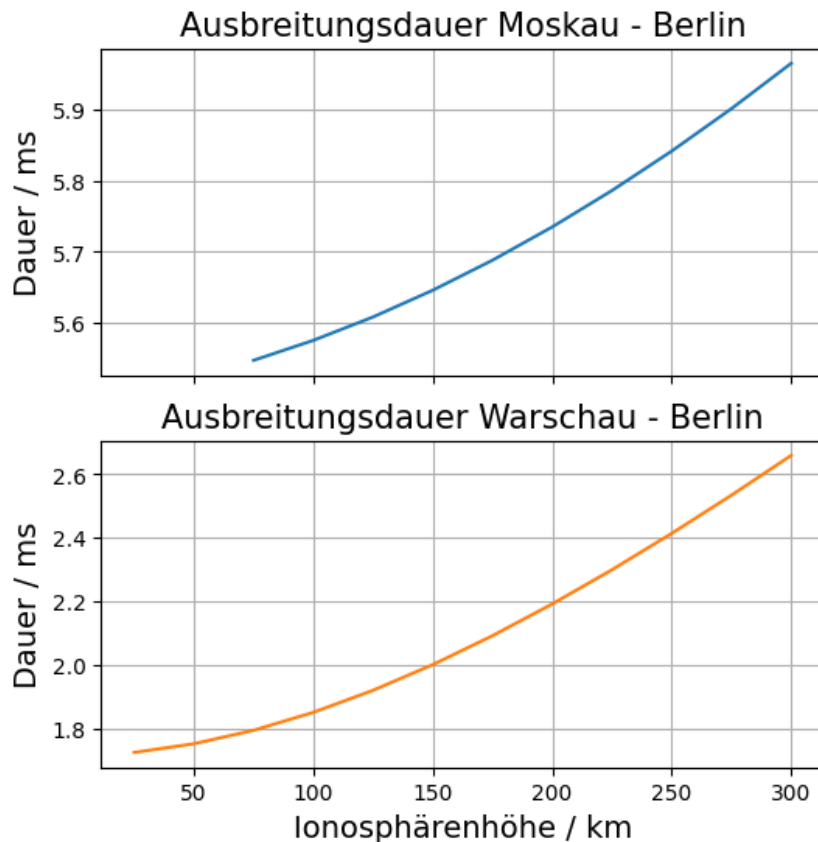
Eine FMTLab Testsendung
um die Summe beider zu messen
hatte ich leider verpasst!

Zeitzeichensender RWM!

- RWM sendet 10:00 bis 19:55 nach jeder vollen halben Stunde Sekundenimpulse.
- **Die fangen genau zur Sekunde an!**
- Eine ähnliche Auswertung wie die obige ergab:

Die Signale kommen
 $31,9 \pm 0,7$ ms
nach der vollen Sekunde
in meinem C++-Programm an.

Von Moskau bzw. Warschau schaffen die Radiowellen es mit einer Ionosphärenreflektion



Wann sendete Warschau?

- Gemessen Moskau: 31,9 ms
- Verzögerung Entfernung Moskau: 5,9 ms

Verzögerung Funkgerät + Sound System: 26 ms

- Verzögerung Entfernung Warschau: 2,5 ms

Gesamtverzögerung Warschau:

$$26 \text{ ms} + 2,5 \text{ ms} = 28,5 \text{ ms}$$

- Gemessene Verzögerung Warschau: 40,7 ms

Gesendete Verzögerung Warschau:

$$40,7 \text{ ms} - 28,5 \text{ ms} = 12,2 \text{ ms}$$

(eingereicht hatte ich 12,159 ms \pm 3 ms)

Richtig laut FMTLab: 11,4 ms

Impulslänge des dritten Impulses

Einfacher zu messen,
da hier Impulsanfang und Impulsende
gleiche Verzögerungen haben.

Mein Ergebnis: $44,239 \text{ ms} \pm 2 \text{ ms}$

Richtig laut FMTLab $44,3 \text{ ms}$.

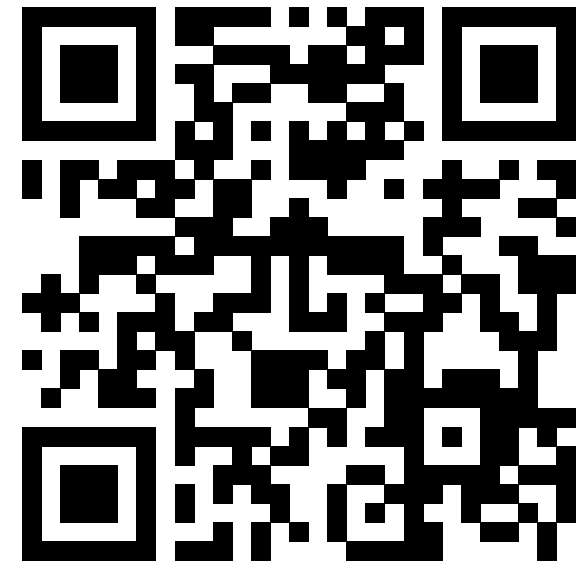
Vielen Dank!

Fragen? Fragen!

Jetzt.

Oder später. Geht auch.

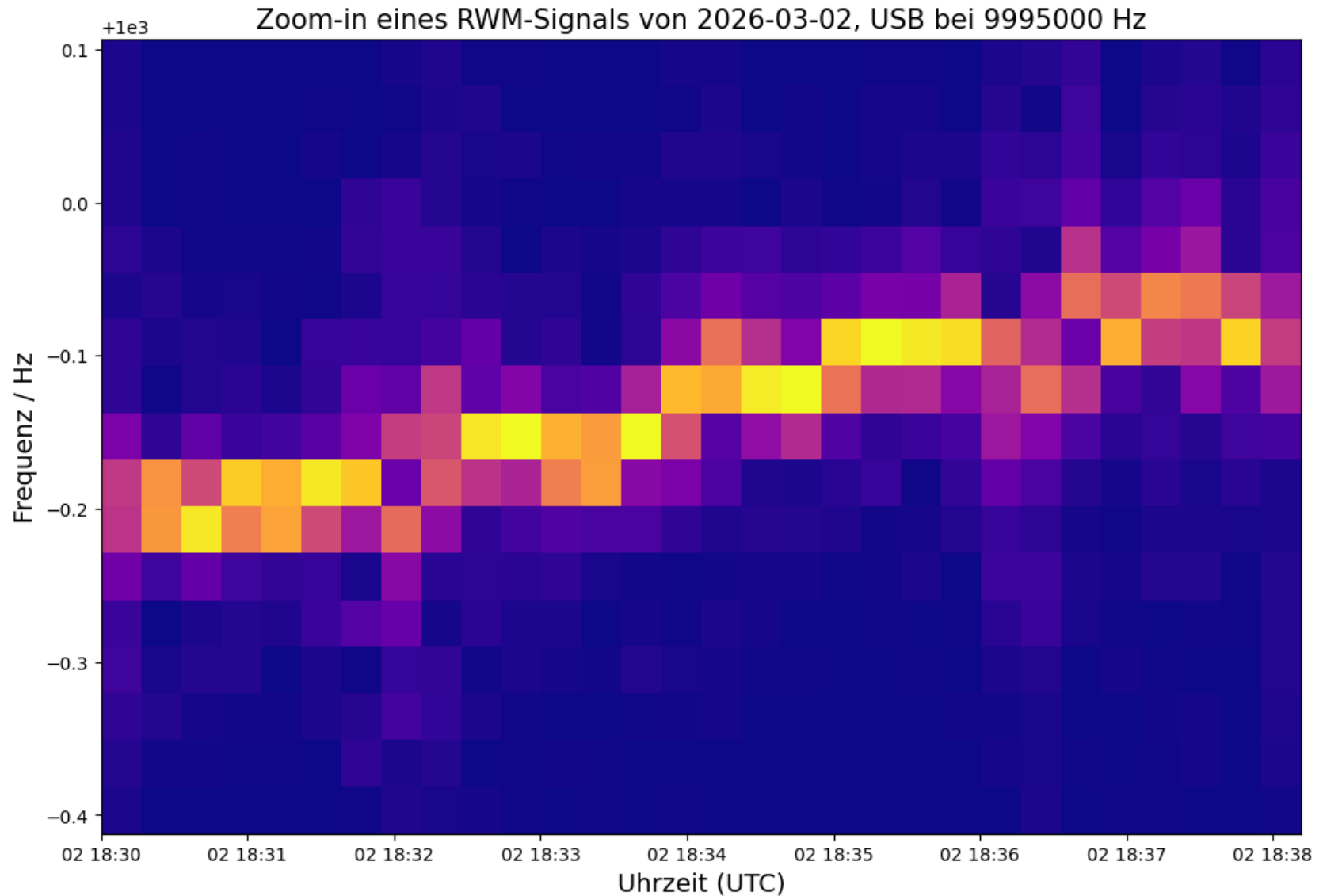
Folien stehen zur Verfügung auf
https://dj3ei.famsik.de/2026-FMT_Vortrag
siehe auch QR-Code.



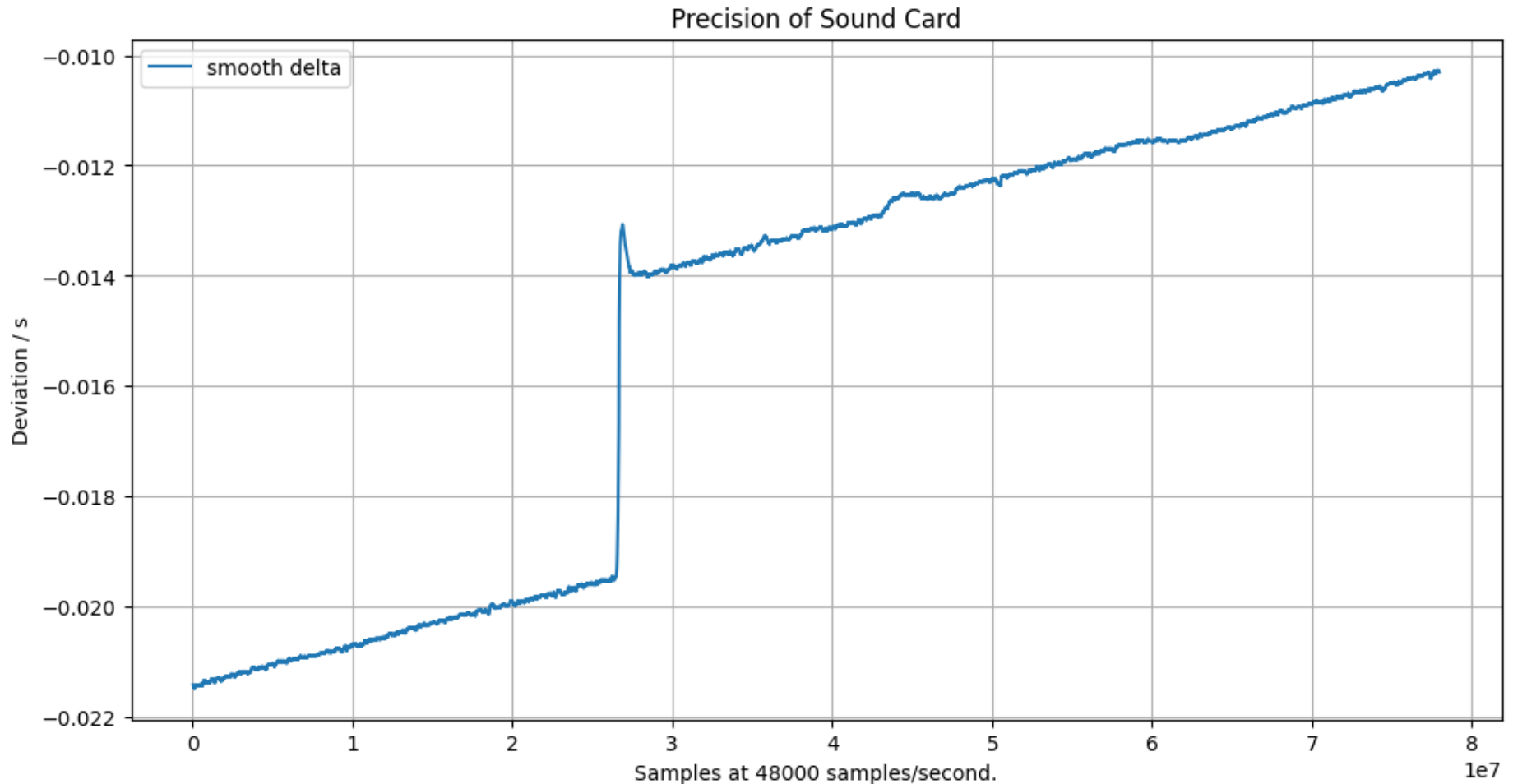
Bonusmaterial

Fällt Himmel uns auf den Kopf?

Oder läuft nur die Frequenz meines Funkgerätes weg?



Genauigkeit Soundkarte



Vergleich geglättete Zeitstempel / nominelle 48000 Samples / s.