Frequenzmessung unhörbarer Signale

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

Version (minimale Korrektur)
2026-09-28 21:43 UTC

Hilfe zur Sitzplatzwahl:
Leider habe ich gelegentlich recht kleine Schrift nicht vermeiden können.

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 Erklärbär 🐻
Andreas Krüger (DJ3EI)

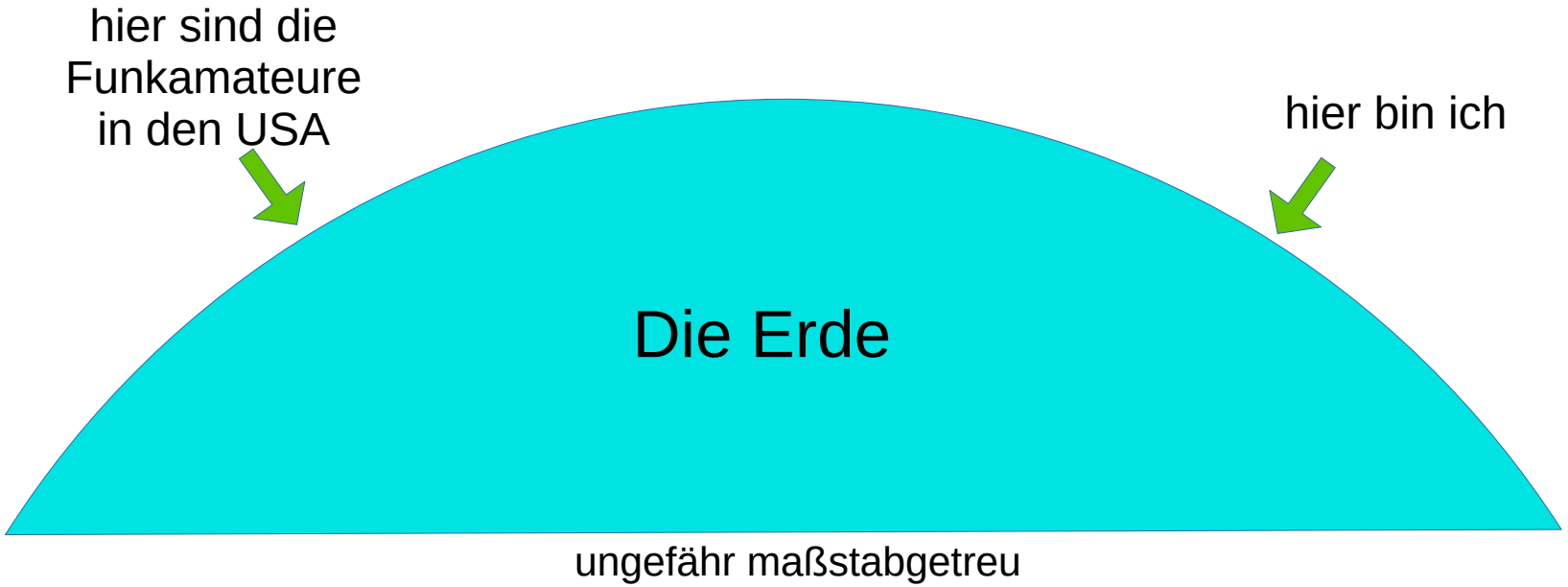
Selbstvorstellung aus der EH Vortragsankündigung

- Funkamateur seit 2001
- Hansdampf in vielen Gassen
- als Funkamateur 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

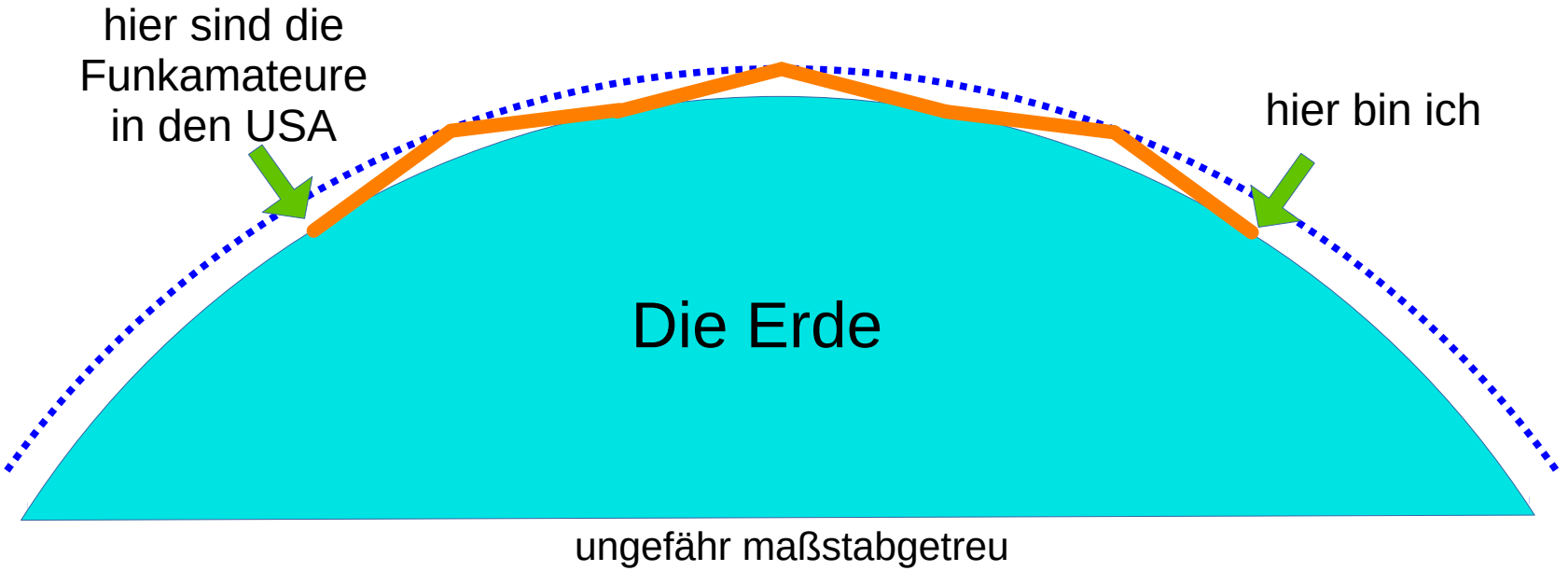
Funkamateure in den USA senden viermal je ein Signal
auf der Kurzwelle, eine Minute lang.

Wer Lust auf so etwas hat, ist aufgerufen,
die genauen Frequenzen dieser vier Signale zu bestimmen.



Wie kann das gehen?

Harte 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 noch 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

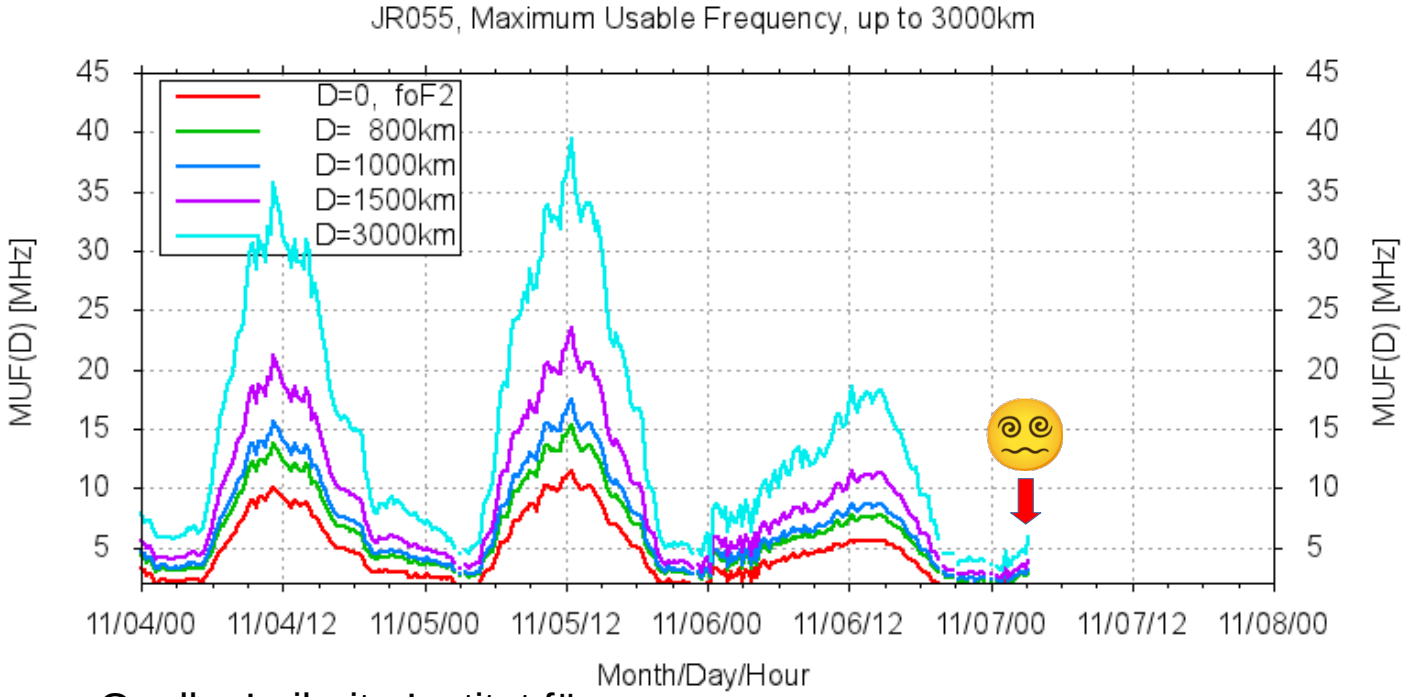
Ausbreitungslotterie

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.



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.“

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

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!

Frequenz eines Senders 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 frolow

Amateurfunk-Übertragungsverfahren

Upper Side Band (USB)

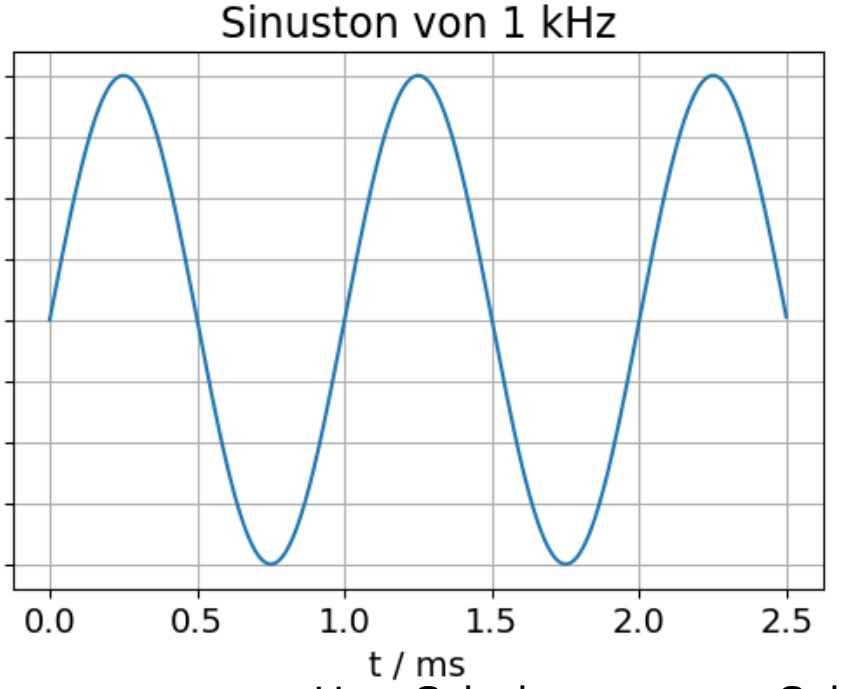
ein von zwei Spielarten von Single Side Band (SSB)

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

Physikalische Grundlage:

Sinus als die Mutter aller Signale

Jean Baptiste
Joseph Fourier



Hz = Schwingungen pro Sekunde

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).

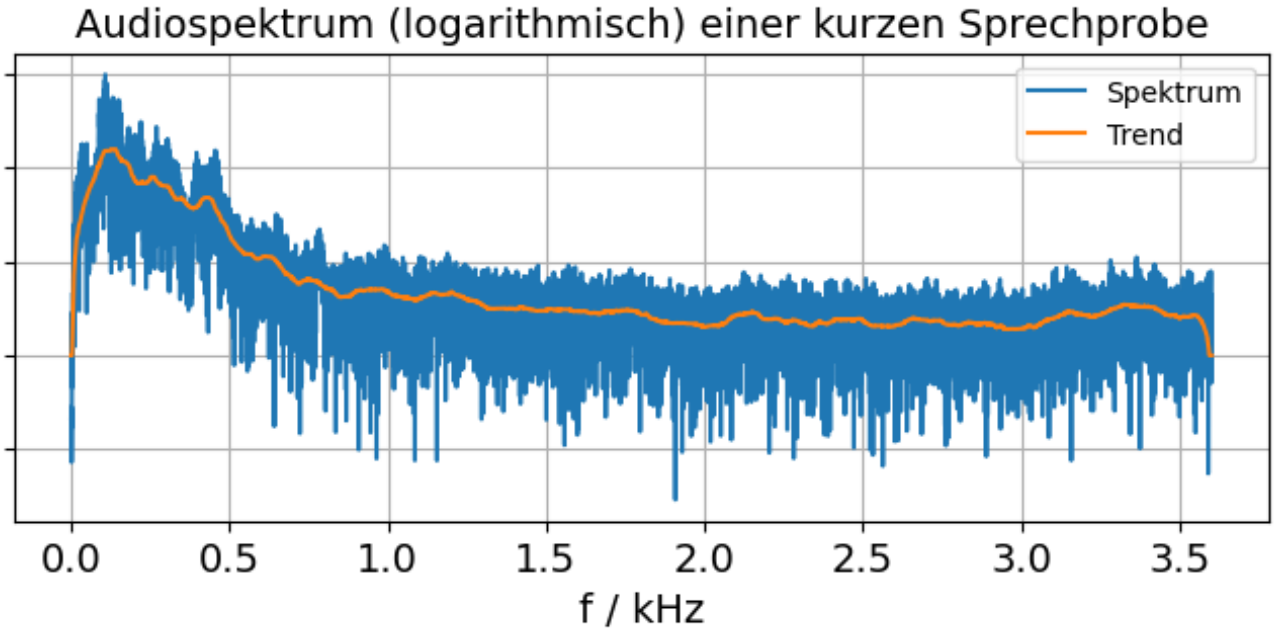
Im Amateurfunk übertragen wir für Sprechfunk nur Frequenzen im Bereich 300 – 2700 Hz!

Nix HiFi.

Sprachspektrum

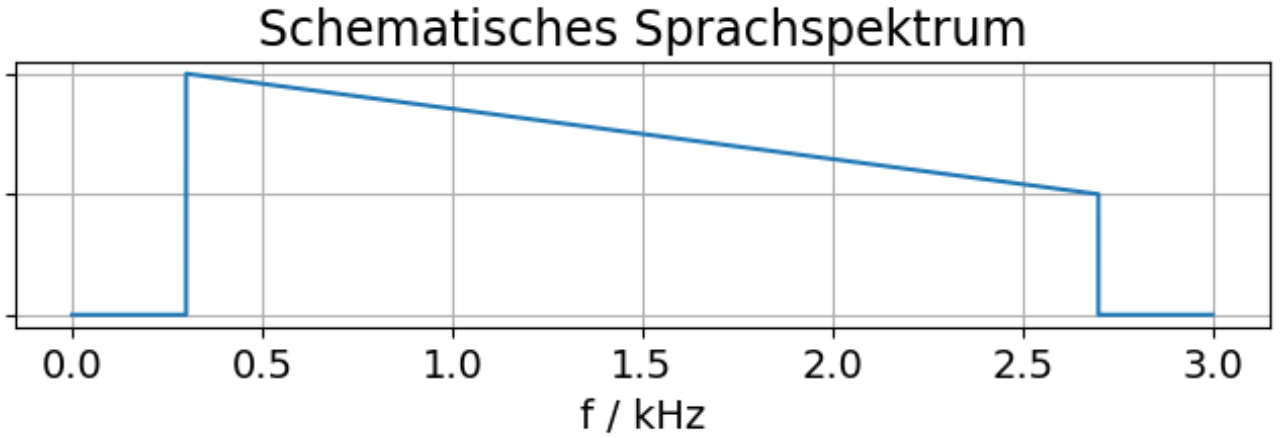
Wie das Spektrum tatsächlich aussieht,
hängt sehr davon ab,
was gerade gesagt wird und wer es sagt.

Hier ein konkretes Beispiel (relativ tiefe Männerstimme):



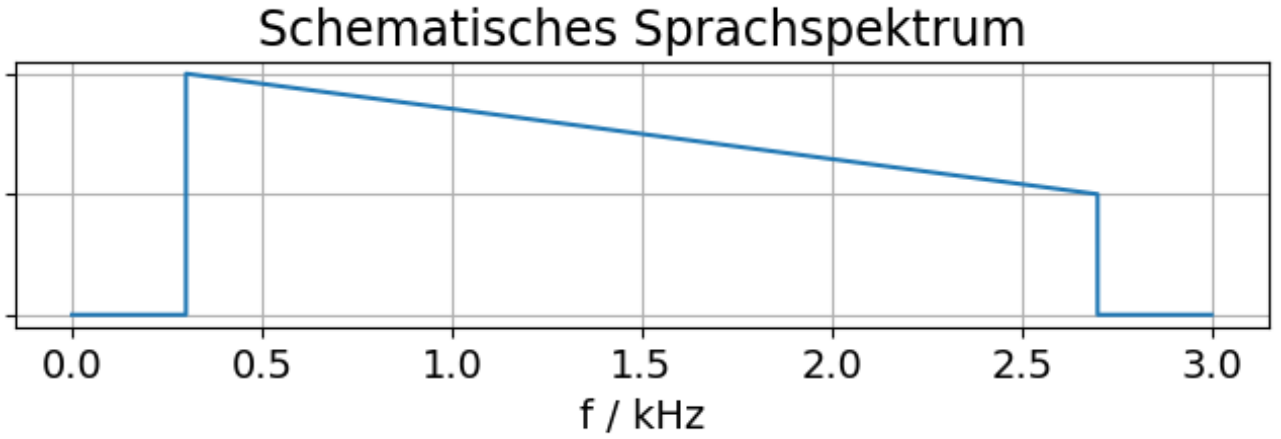
Sprachspektrum

Übliche grob vereinfachte Darstellung:

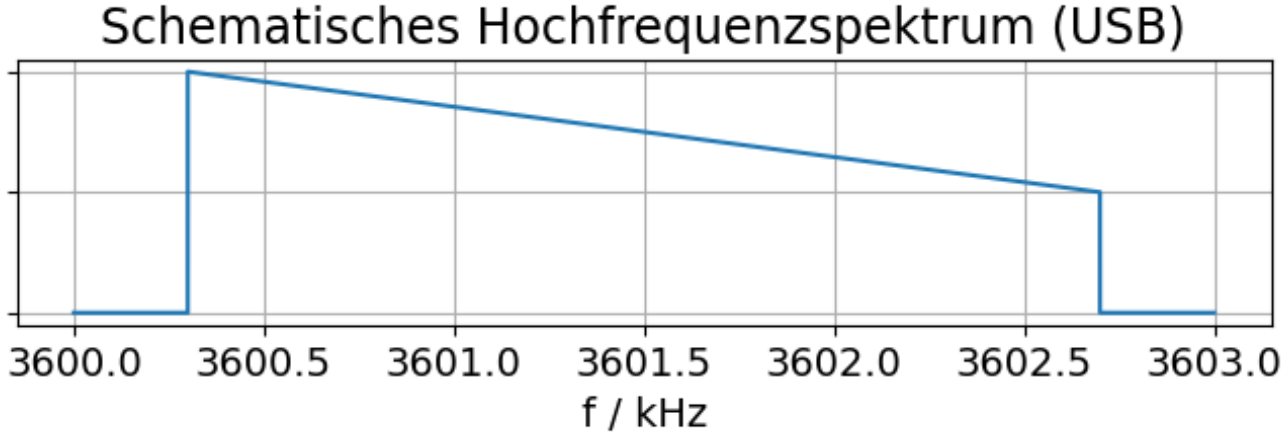


USB „Upper Side Band“ Sender

z.B. auf 3600 kHz eingestellt



Jede Sprachfrequenz wird
um die eingestellten 3600 kHz erhöht:

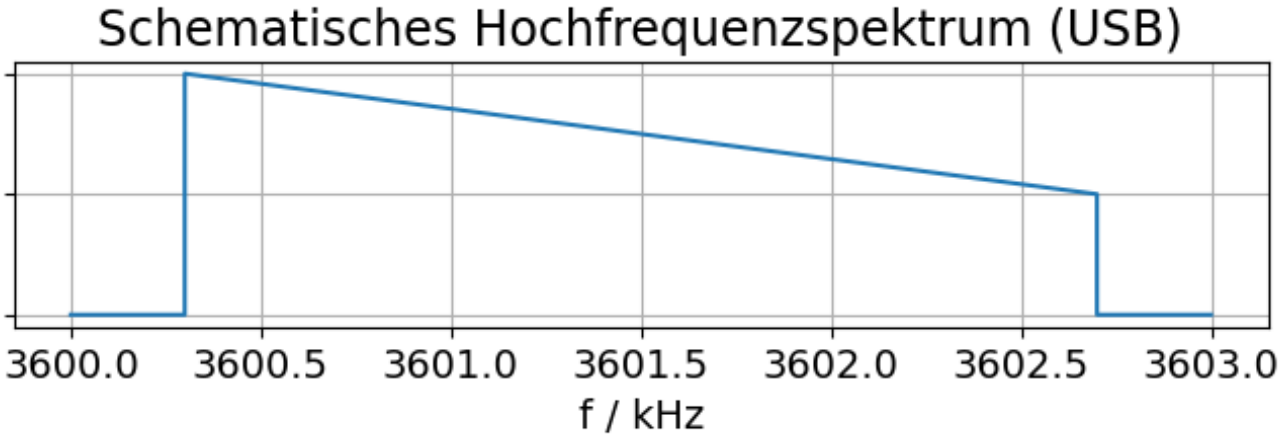


und ab zur
Sendeantenne
damit!

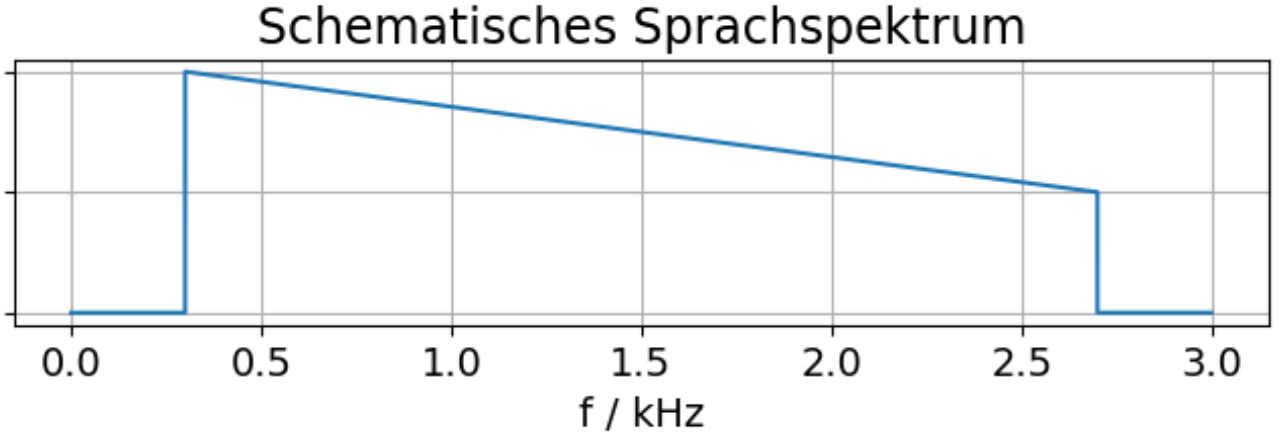
USB „Upper Side Band“ Empfänger

z.B. auf 3600 kHz eingestellt

Eingehendes Signal von der Empfangs-antenne:



Jedes eingehende Signal wird
um die eingestellten 3600 kHz erniedrigt:

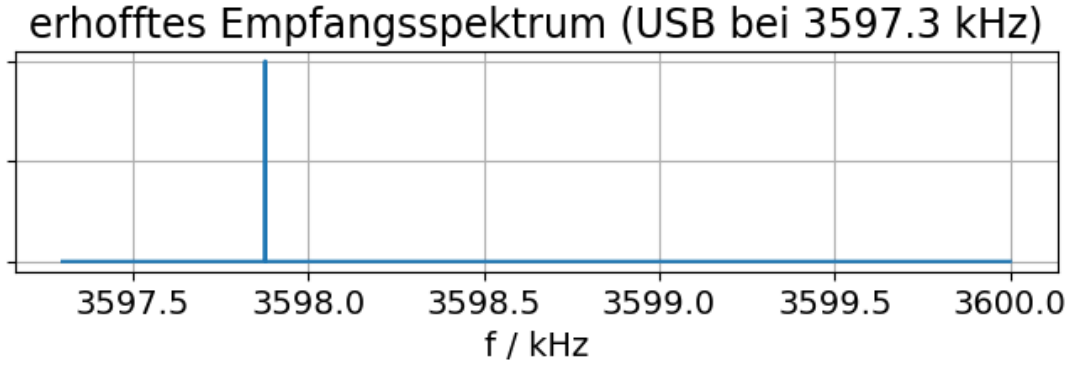


Angekündigung eines der vier Signale:

Nahe 3598 kHz:
3:00 UTC Station meldet sich, gemorste Stationskennung W8RKO
3:05-3:06 UTC eine Minute zu messendes Signal

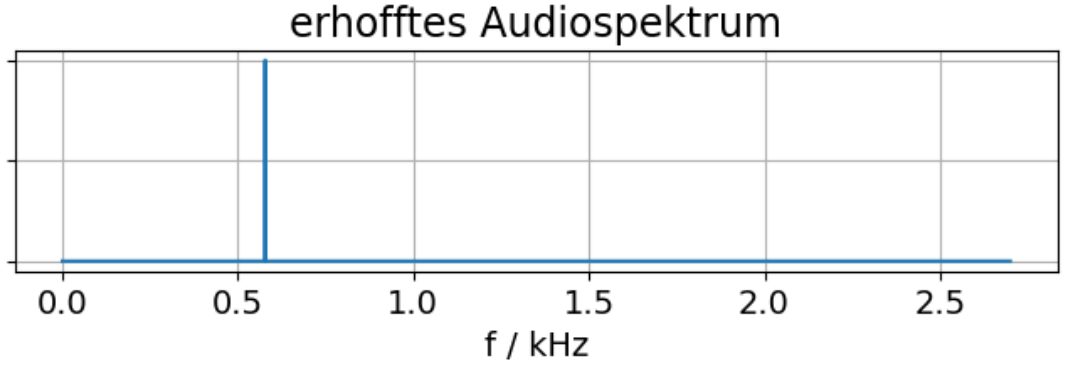
Mein ursprünglicher FMT-Plan

USB-Empfänger auf 3597,3 kHz



Empfangsfrequenz 3597.3 kHz war etwas unüberlegt.

3596.5 kHz hätte breiteren Frequenzbereich um 3598 kHz herum abgedeckt.



Davon Audioaufnahme.

Später Frequenz des Audiotons messen.

Management Summary

mein Ansatz (es gibt viele ganz andere)

- 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 (überlappend)
das gerade vorhandene Spektrum
bestimmen.

Technisches Kaninchenloch: Windowing Functions

Fourier-Transformation

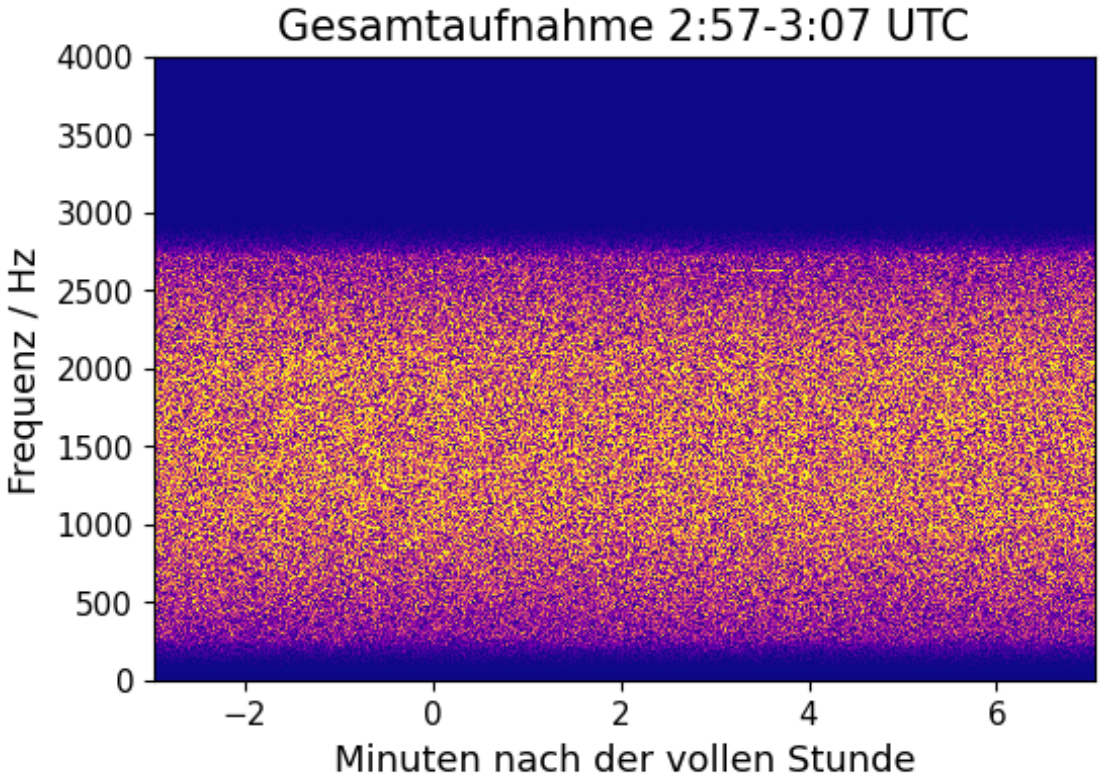
die Spektrum **meiner Aufnahme** (ca. 10 Minuten)**!**

Das braucht ca. 2 Sekunden auf meinem Laptop.

Das Ergebnis ist ein Wust von Zahlen:
1200 Spektra von je 4000 Frequenzen.

Wie das darstellen?

So darstellen:



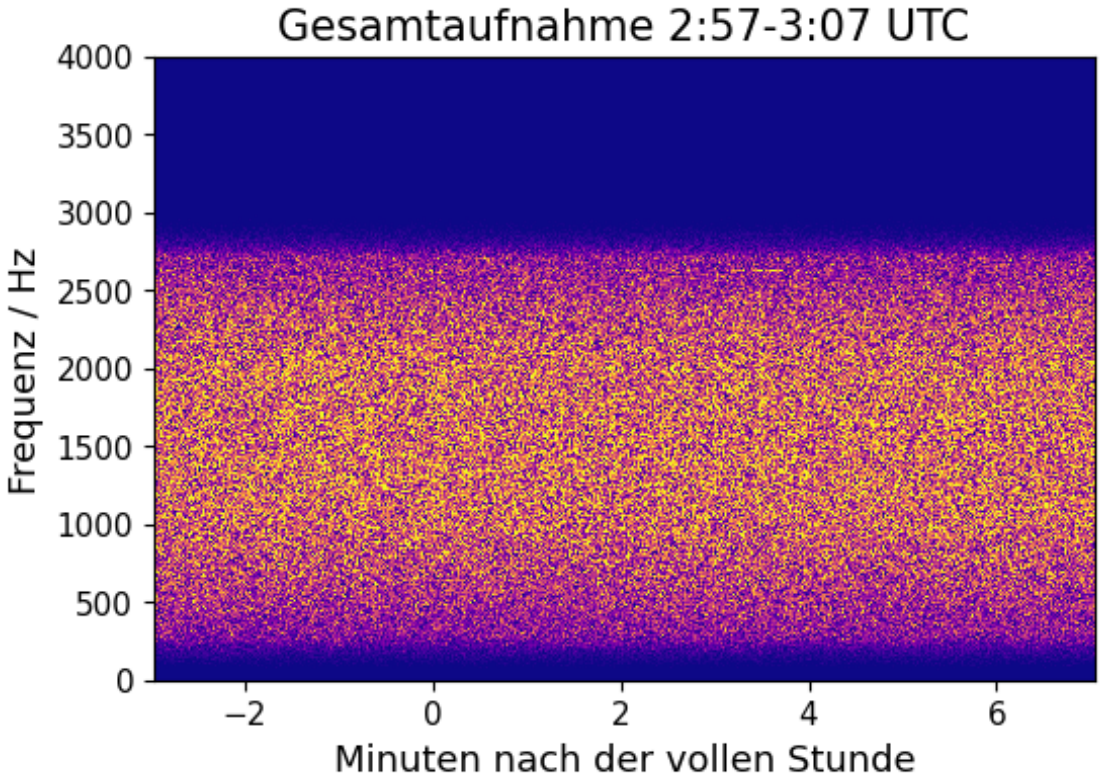
FLOSS matplotlib, Funktion pcolormesh FTW!

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.

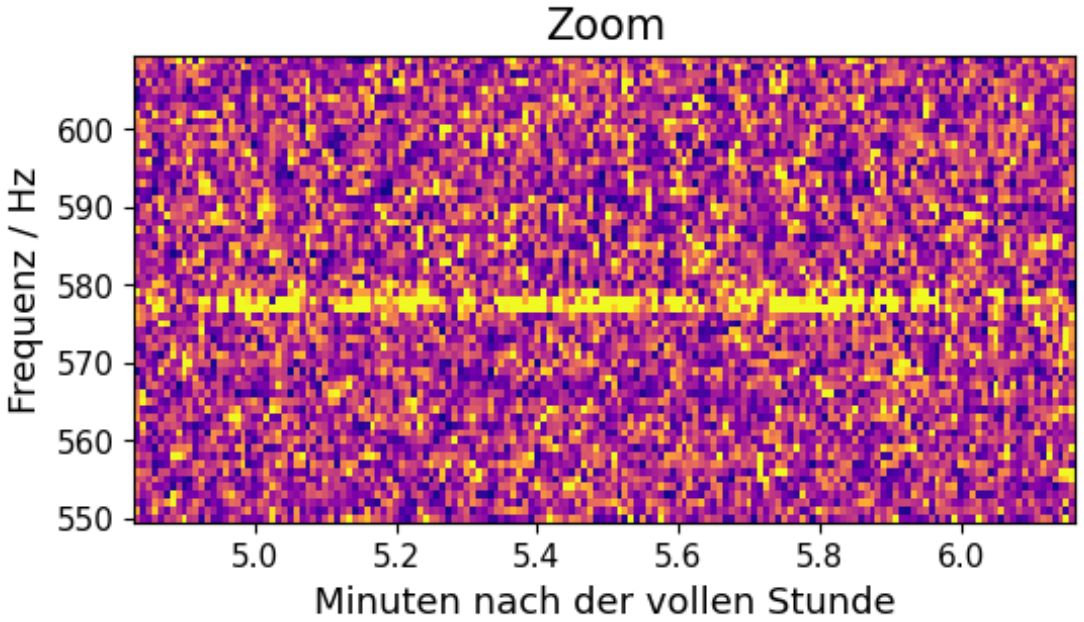
Was ist zu sehen?



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.

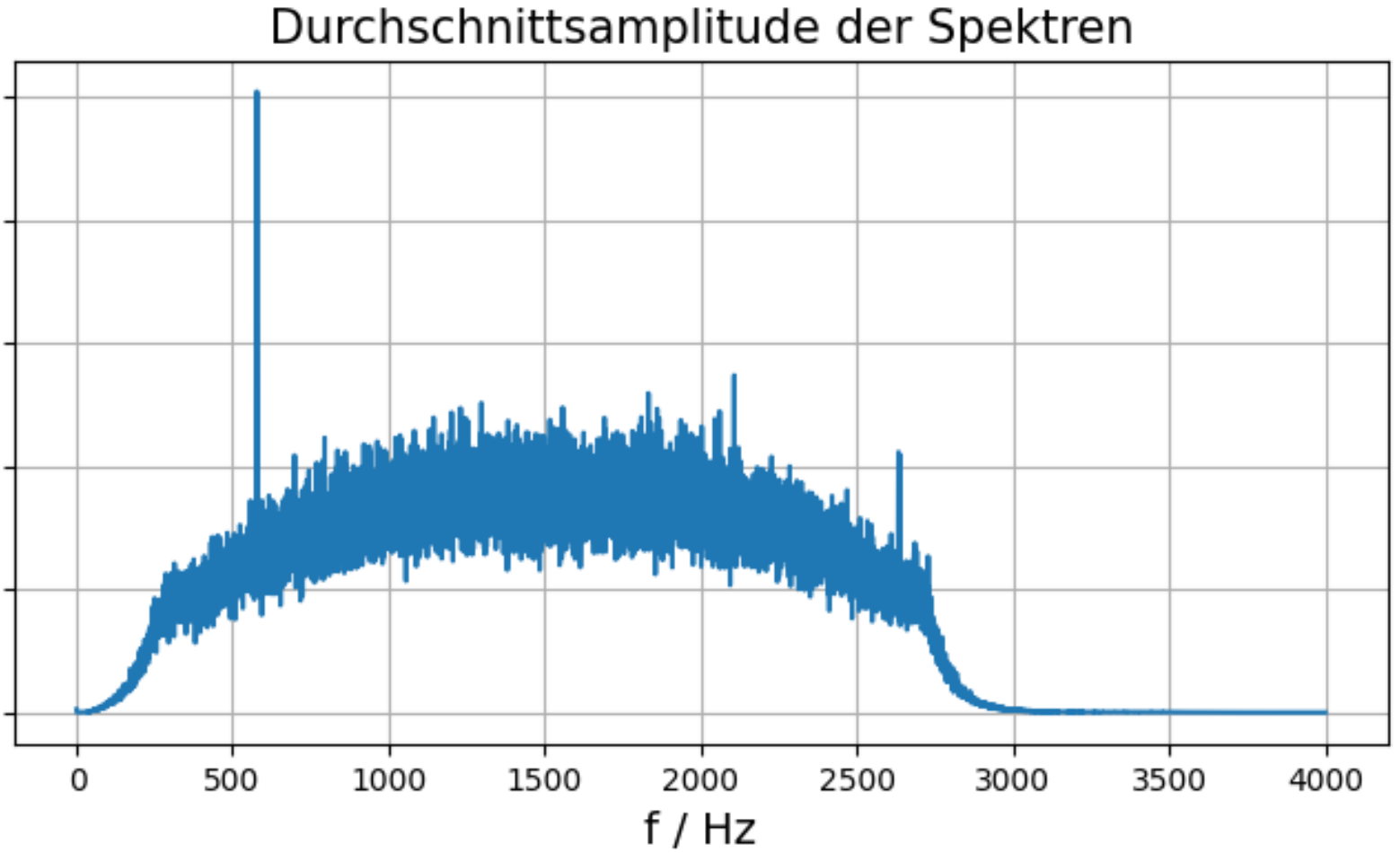
Das Signal ist pünktlich: 3:05 bis 3:06 UTC.

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

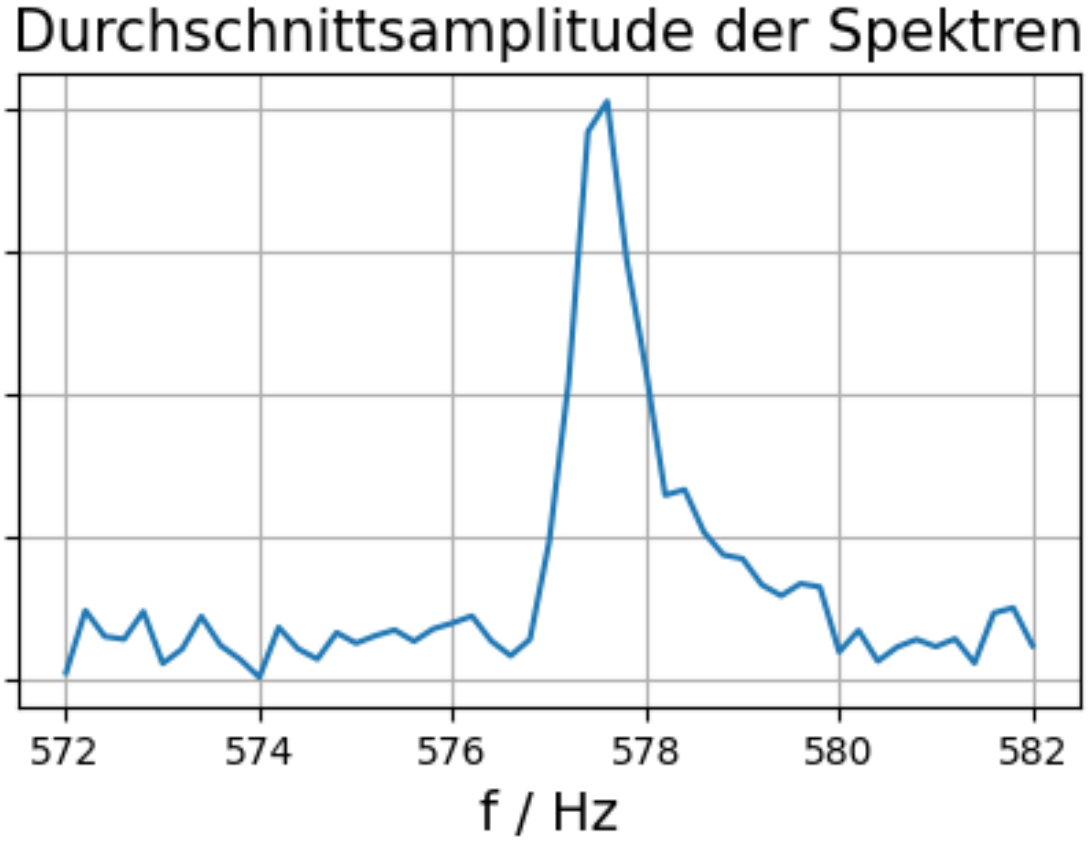
- Jedes Spektrum analysiert 5 Sekunden, dadurch weniger Spektren, aber Auflösung von 1 Hz auf 0,2 Hz verbessert.
- Zeitbereich genau 3:05 bis 3:06.

Simplere Darstellung



Der Peak ist deutlich zu erkennen!

Zoomen wir hinein!



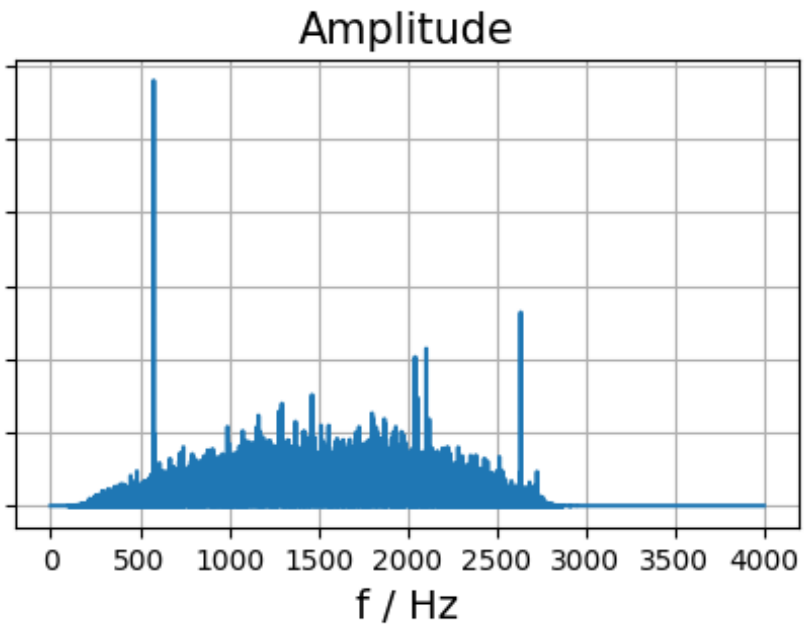
f	Amplitude
577.0	9.806074e+05
577.2	1.540586e+06
577.4	2.417659e+06
577.6	2.524478e+06
577.8	1.969963e+06
578.0	1.581743e+06

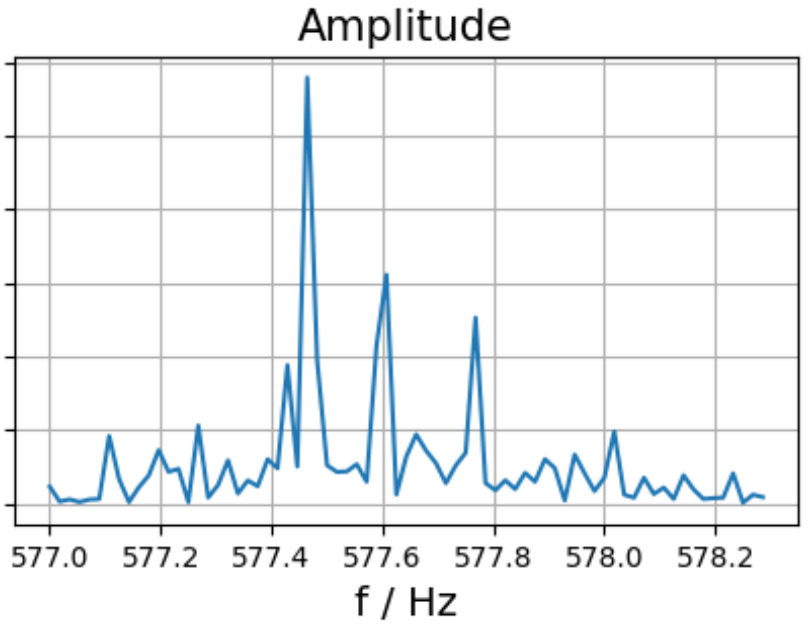
Ich habe mich nur an den beiden Maximalwerten orientiert.
Dazwischen liegt 577,5 Hz.
Aber der Wert sollte näher an 577.5 liegen, also 577,55.

(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 meisten Graphen in diesen Folien wurden mit pandas.DataFrame aus dem Pandas – Softwarepaket erstellt.

Nutzt noch jemand im Raum Pandas?

DataFrame Hack: Schrift auf Präsentationsgröße

relative kleine figsize!

```
foo_bar_df = pandas.DataFrame(und so weiter)
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!

⇨ **Kalibrieren!**

Woher bekannte gute Frequenz nehmen?

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.

Frequenz gemessen!
Mission accomplished!

Was als Nächstes?

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; eins der vier auswerten reicht für die Teilnahme.

Jeder Durchgang der Sendeschleife

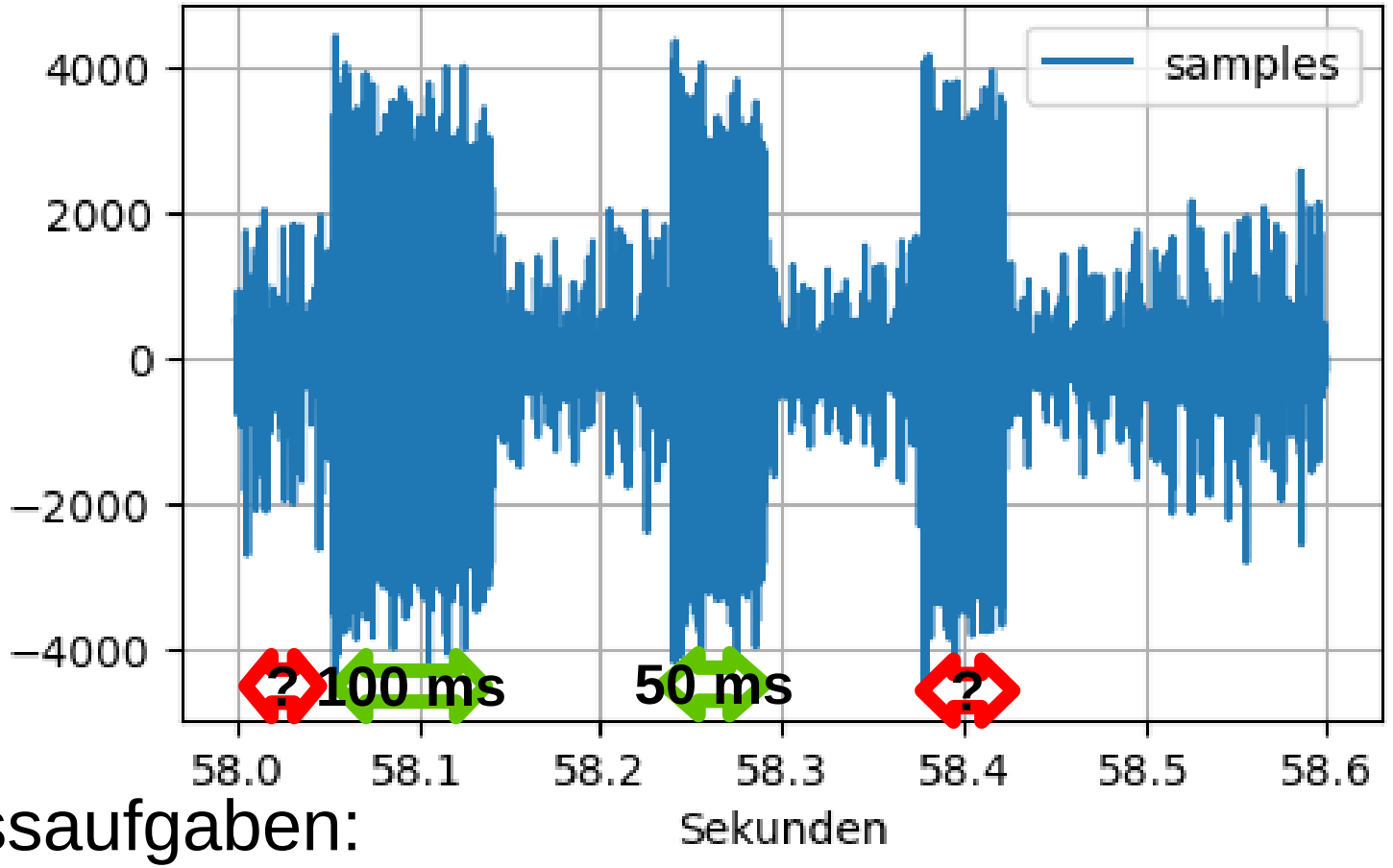
- 60 Pulsgruppen mit je drei Impulsen, Wiederholung jede Sekunde ein Minute lang, zwei neue Zeit-Messaufgaben
- 60 Sekunden Dauerträger, Frequenz-Messaufgabe wie gehabt
- Morse-Stationsidentifikation

Vor der gesamten Sendeschleife:

- Morse-Stationsidentifikation
- 60 Sekunden Dauerträger bekannter Frequenz.

Impulsgruppe aus drei Impulsen

insgesamt 360 x wiederholt



Messaufgaben:

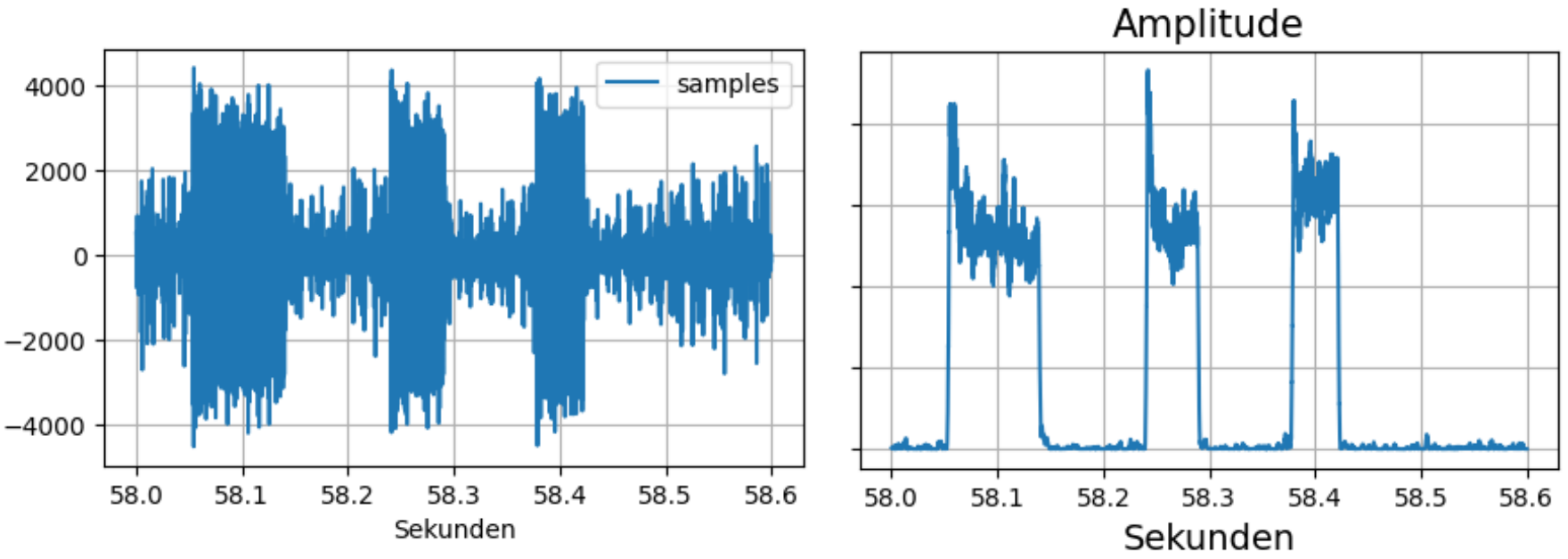
- Wie lange nach der vollen Sekunde fängt der erste Impuls an?
- Wie lange dauert der dritte Impuls?

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.

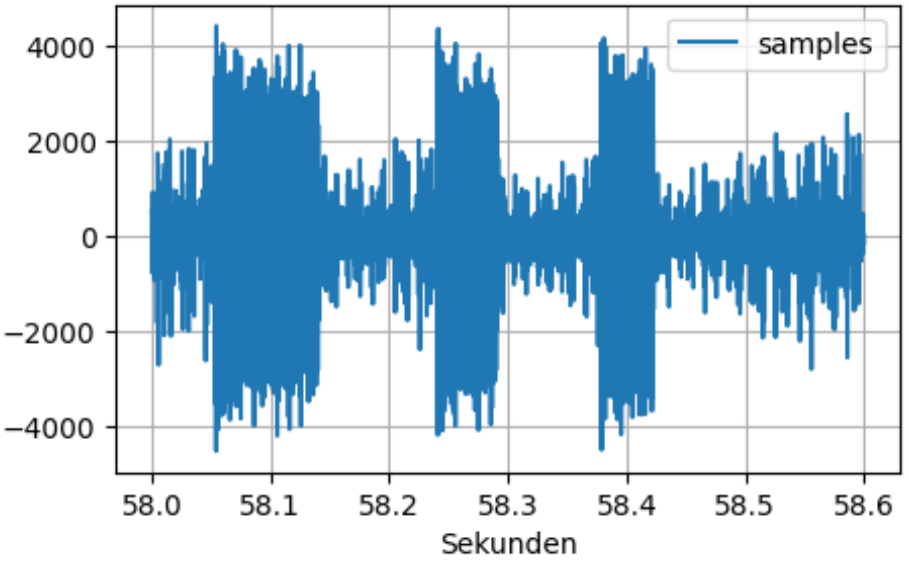
(Ich kriege es im Rahmen dieses Vortrags nicht besser erklärt.)

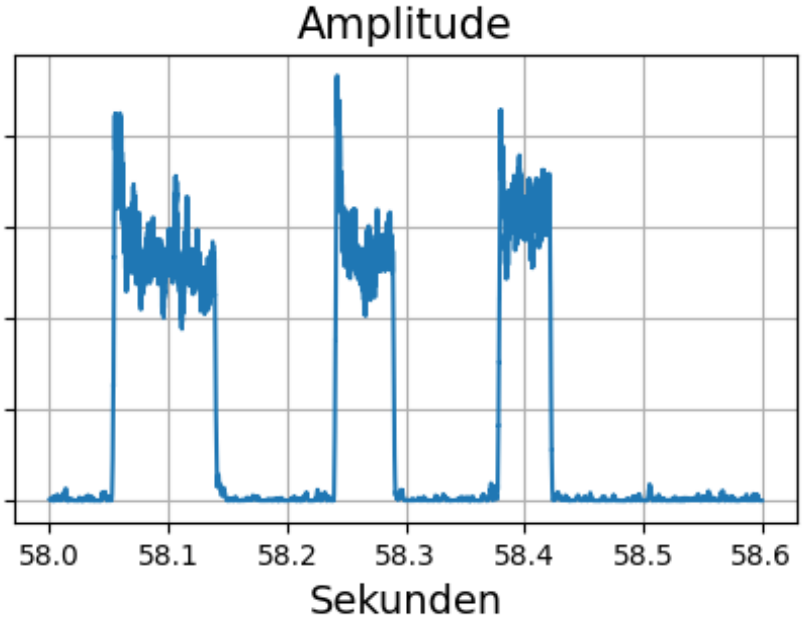
Die Konvolution von Sinuswellen ist phasenabhängig, aber da gibt es einen Trick:

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
```

Ergebnis:

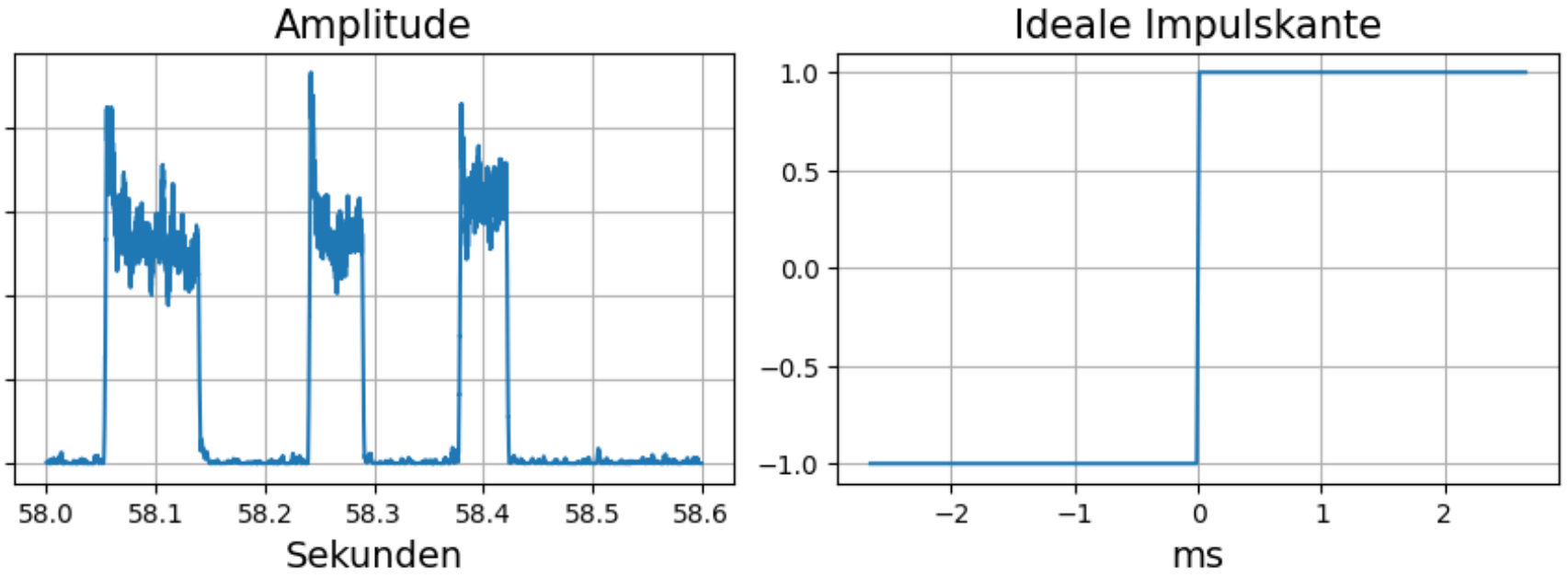




Die rechte Graphik gibt an, ob das Signal
(zumindest teilweise) zu dem Zeitpunkt
so aussieht wie ein Sinussignal
der passenden Frequenz.

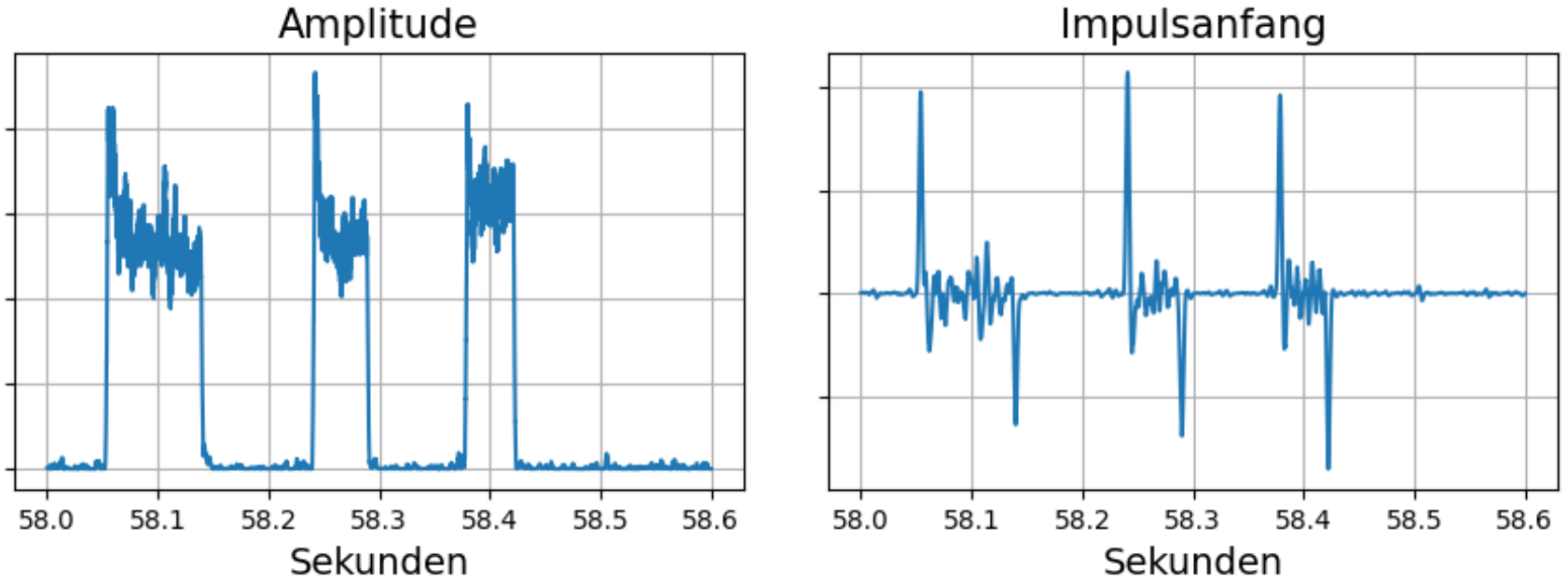
Wie da die Impulsanfänge finden? Noch eine Konvolution!

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



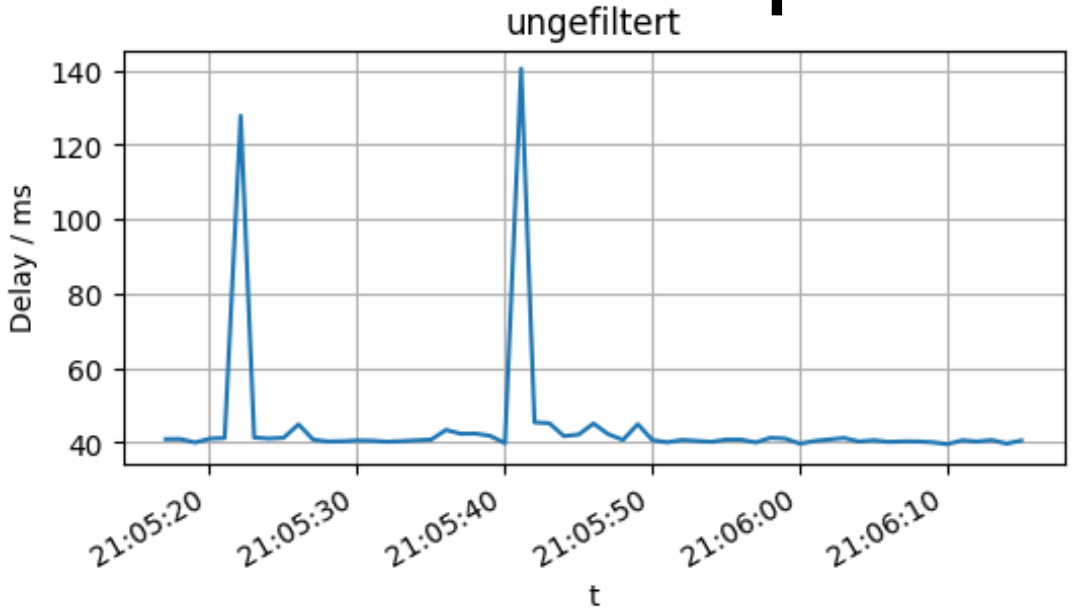
Noch eine Konvolution!

Hier, was die Konvolution ergibt:



So kann ich die Impulsanfänge
der jeweils ersten Impulse aller Dreierfolgen messen.

Die Impulsanfangsverzögerungen der ersten Impulse

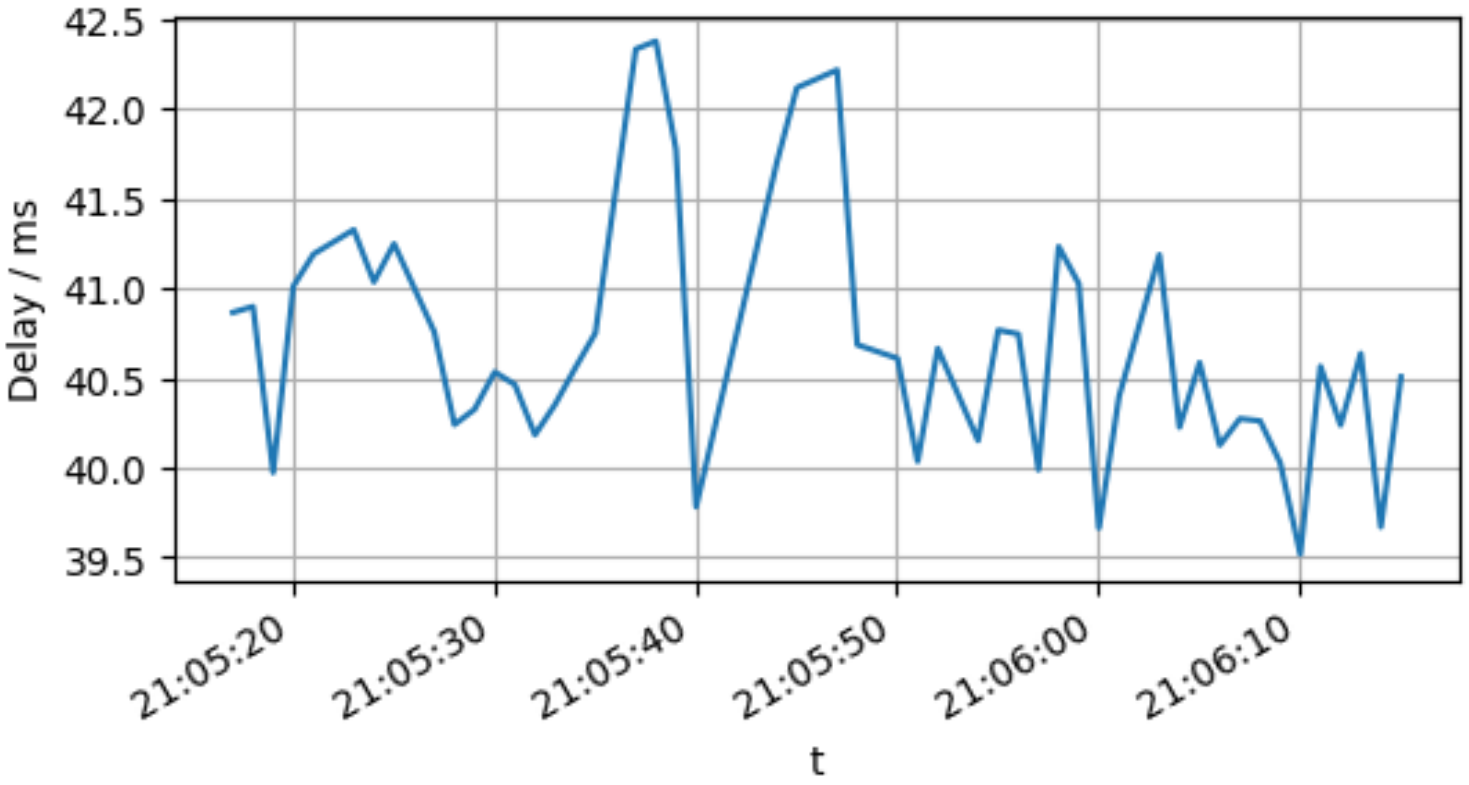


Über die Zeit aufgetragen
(ein Schleifendurchlauf von einer Minute).

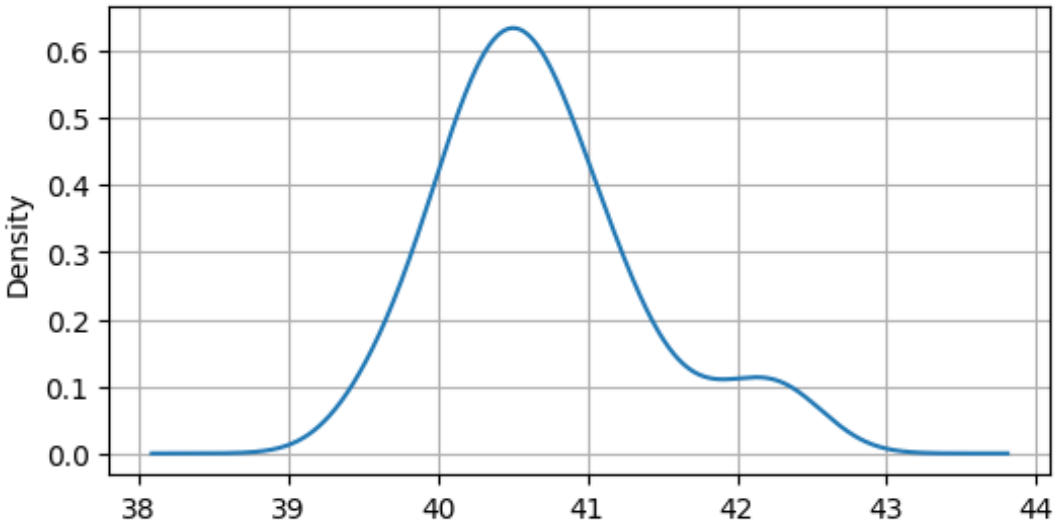
Der gesuchte Wert liegt kurz über 40 ms,
aber einige Ausreißer stören.

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

Die Startverzögerung der ersten Impulse, gefiltert.



Wie oft kommt welcher Wert vor?



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

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

Was fehlt?

- Kompensation Laufzeit Warschau-Berlin

  Ich bin ein Berliner.

- Kompensation Verarbeitungszeit

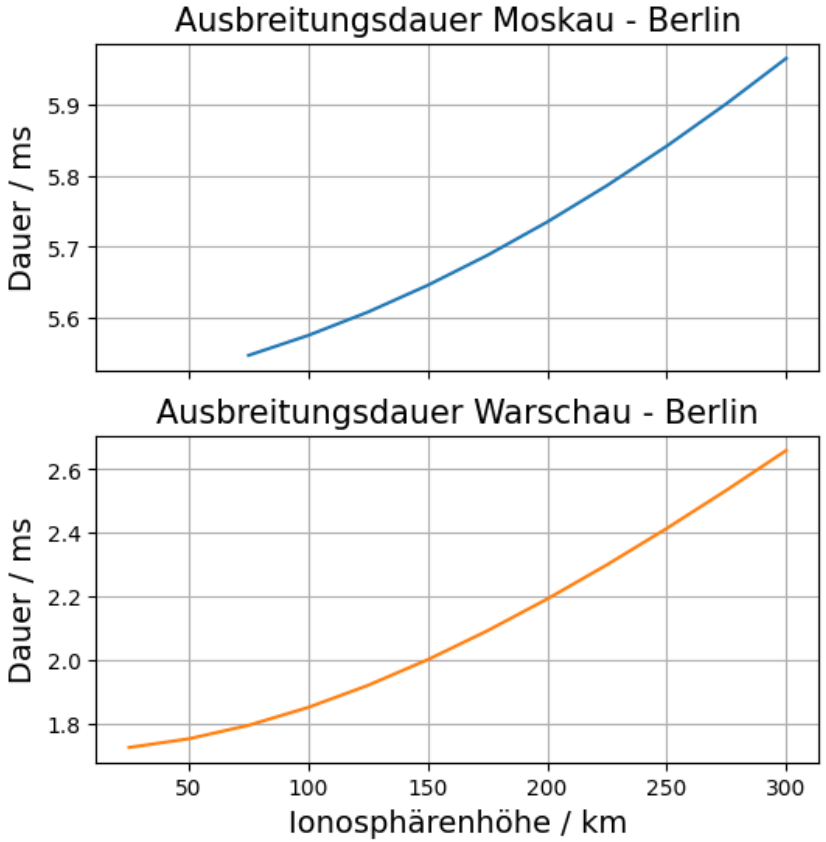
Eine FMTLab Testsendung
um die Summe beider zu messen
hatte ich leider verpasst!

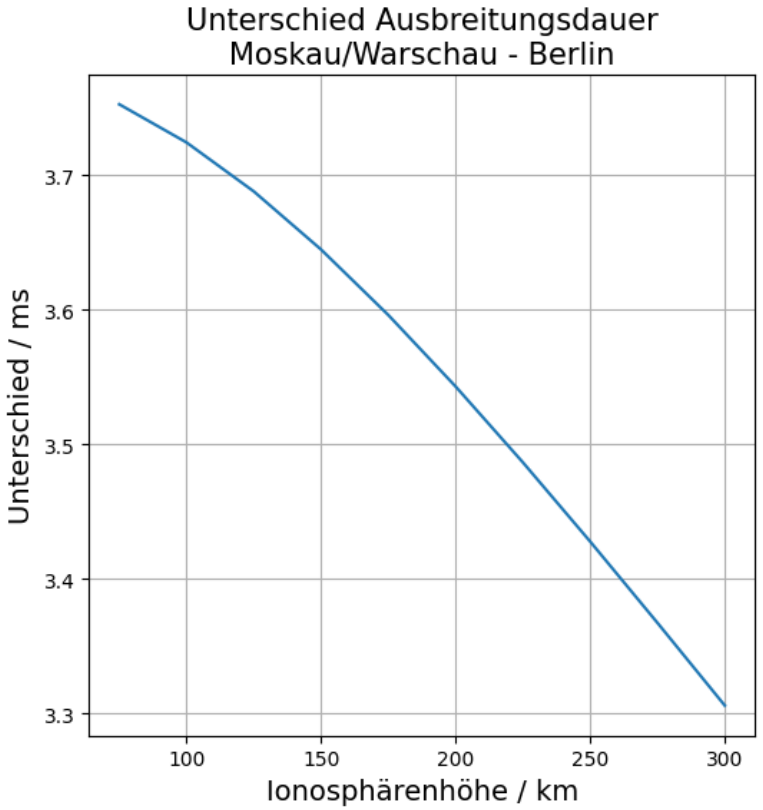
Zeitzeichensender RWM!

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

Die Signale kommen
31,9 ± 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 ms + 2,5 ms = 28,5 ms

- Gemessene Verzögerung Warschau: 40,7 ms

⇨ Gesendete Verzögerung Warschau:
40,7 ms - 28,5 ms = 12,2 ms

(eingereicht hatte ich 12,159 ms ± 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 ms ± 2 ms

Richtig laut FMTLab 44,3 ms.

Vielen Dank!

Fragen? Fragen!

Jetzt.

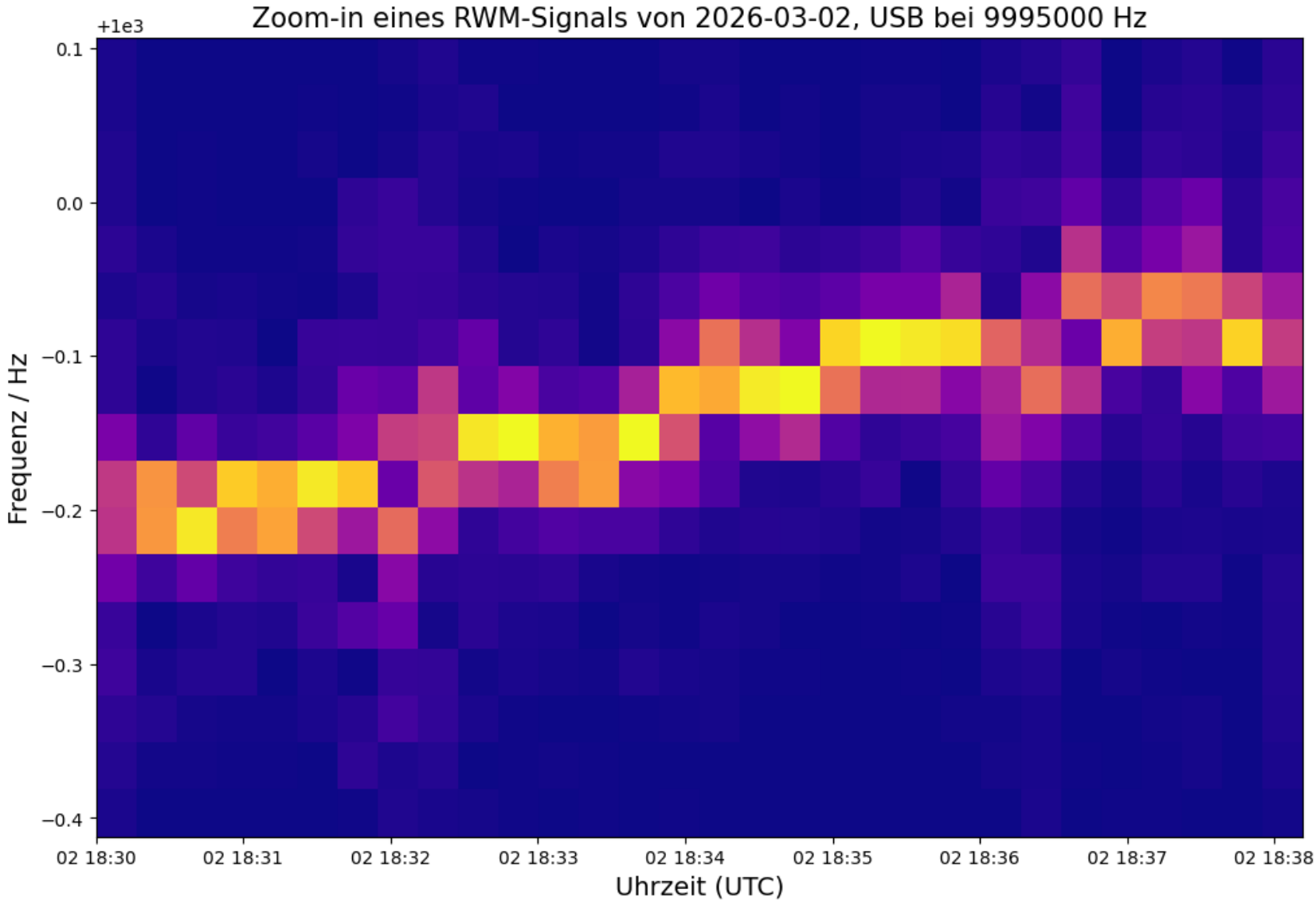
Oder später. Geht auch.

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

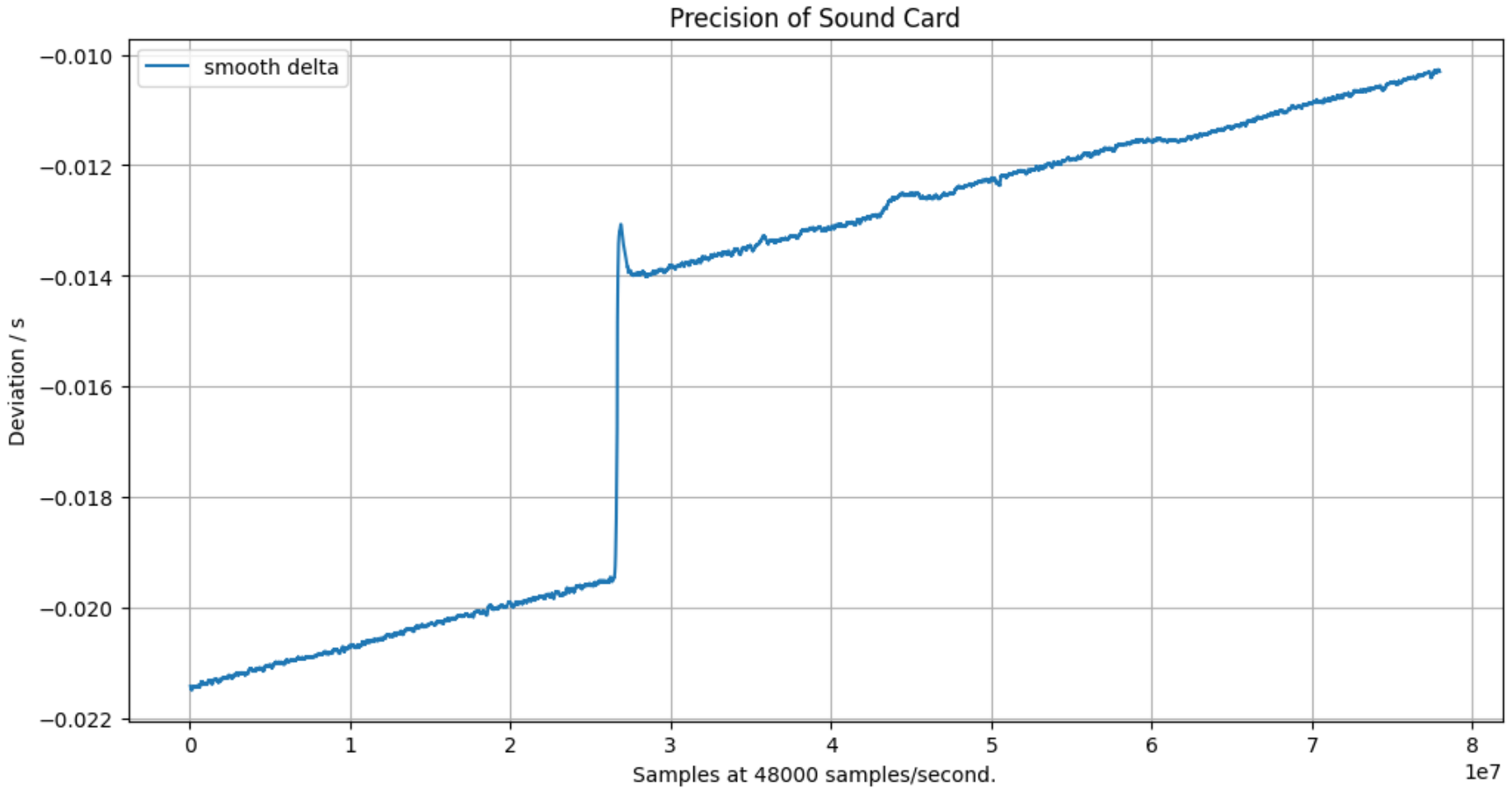
Bonusmaterial

Fällt der Himmel uns auf den Kopf?

Oder läuft nur die Frequenz meines Funkgerätes weg?



Genauigkeit Soundkarte



Vergleich geglättete Zeitstempel / nominelle 48000 Samples / s.