

## WCOM2 Praktikum

### Software Defined Radio (SDR)

#### 1. Einleitung

In diesem Praktikum können Sie erste Schritte in der Empfängerimplementation mit Software Define Radios (SDR) unternehmen. Im Extremfall besteht die Hardware eines SDR nur aus einer Antenne und einem ADC, sämtliche Filterungs- und Demodulationsaufgaben werden in Software ausgeführt, wie in Abbildung 1 gezeigt.

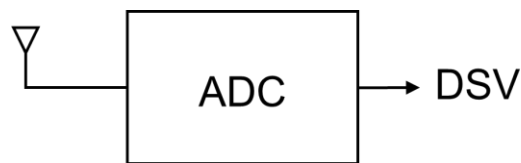


Abbildung 1: Ideale SDR Implementation

In Realität sind üblicherweise weitere Komponenten nötig, z.B. ein low-noise Amplifier (LNA) als Vorverstärker sowie ein Bandpassfilter zwischen Antenne und ADC. Aufgrund der limitierten Abtastrate von ADCs muss bei höheren Frequenzen zudem das Empfangssignal vor dem ADC auf eine tiefere Zwischenfrequenz (ZF) runtergemischt werden.

Die in diesem Praktikum zur Verfügung gestellten IQ Signale wurden mit einem RTL SDR USB Stick aufgenommen. Diese sind kostengünstige SDRs welche für den DVB-T und DAB Empfang entwickelt wurden. Eine Vielzahl möglicher Anwendungen als SDR finden Sie in [1]. Das Blockschaltbild eines RTL SDR ist in Abbildung 2 gezeigt.

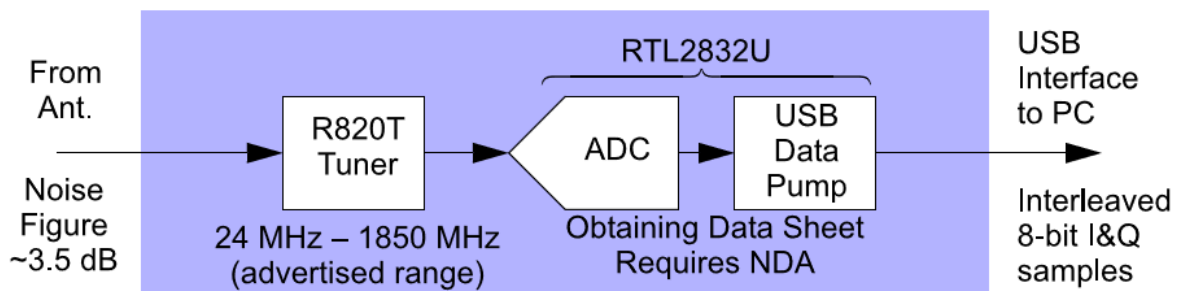


Abbildung 2: RTL SDR Blockschaltbild gemäss [2]

Die Hauptbestandteile sind ein Tuner Chip R820T2 (LNA, Filter, Mixer um 4.57 MHz ZF zu erzeugen) sowie ein IQ Demodulator RTL2832U (8 bit ADC mit IQ Demodulation und USB Interface). Über die USB Schnittstelle liefert der RLT SDR einen IQ Datenstrom mit einer maximaler Samplingrate von 2.56 MS/s (komplexwertiges Zeitsignal zentriert bei der Frequenz null Hz). Somit beträgt die instantane Bandbreite im Empfangsbereich 24 bis 1850 MHz maximal 2.56 MHz.

## UKW-Rundfunk (FM)

Im ersten Teil der Aufgabenstellung werden Sie in Matlab einen SDR basierten UKW Empfänger implementieren, als Datenquelle dient ein mit einem RTL SDR aufgezeichnetes IQ Signal einiger Sekunden Dauer. In Abbildung 3 ist das Basisbandspektrum (also Spektrum des Signales vor der FM Modulation) eines UKW Signals gezeigt: dieses enthält neben dem audio Monosignal (L+R) auch noch höhere Frequenzkomponenten, namentlich: Stereo Differenzsignal (L-R), 19 kHz Pilotton für die Demodulation des Stereo Differenzsignals und den RDS Datenkanal.

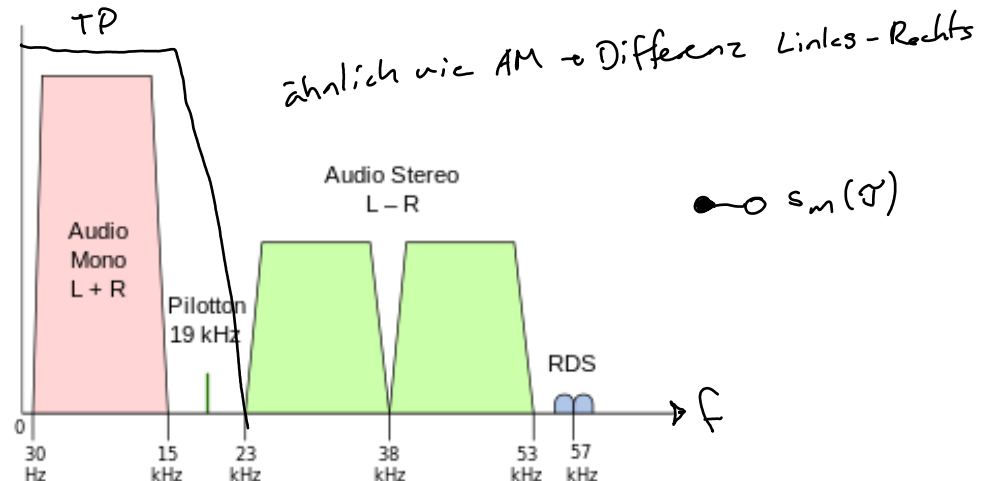


Abbildung 3: UKW Basisbandsignal. Quelle: wikipedia.org

In diesem Praktikum wird nur das audio Monosignal L+R demoduliert. In einem ersten Schritt muss das IQ Signal auf den gewünschten Kanal Bandpass gefiltert und anschliessend FM Demoduliert werden, um das Basisbandsignal aus Abbildung 3 zu erhalten. Ein FM Moduliertes Signal kann über die Momentanphase folgendermassen beschrieben werden (siehe WCOM1):

$$y_{FM}(t) = \cos[\theta(t)] = \cos[\omega_0 t + k_{FM} \int_0^t s_m(\tau) \cdot d\tau]$$

wobei

$\omega_0$ : Trägerfrequenz

t: Zeit

$k_{FM}$ : FM-Konstante

$s_m$ : Nachrichtensignal

Der Demodulator muss das Nachrichtensignal  $s_m(t)$  wiederherstellen. Dies kann durch Differentiation des Winkels  $\theta(t) = \text{angle}[y_{FM}(t)]$  nach der Zeit erreicht werden um die Momentankreisfrequenz  $\omega_{FM}(t)$  zu bestimmen, welche proportional zur Amplitude des Nachrichtensignals ist:

$$\omega_{FM}(t) = d\theta(t)/dt = \omega_0 + k_{FM} \cdot s_m(t)$$

*Beim ungeraden aufgabe*

Beim IQ Basisbandsignal  $y_{FM\_BB}(t)$  ist  $\omega_0 = 0$  rad/s, weil im SDR das Empfangssignal auf 0 Hz runtergemischt wird mithilfe der Lokaloszillator-Frequenz  $f_{LO} = \omega_0$ . Somit erhält man durch Differentiation des Winkels  $\theta_{BB}(t) = \text{angle}[y_{FM\_BB}(t)]$  des IQ Signals direkt das (skalierte) Nachrichtensignal:

*ändert nur amplituden*

$$\omega_{FM\_BB}(t) = d\theta_{BB}(t)/dt = k_{FM} \cdot s_m(t)$$

Für ein digitales IQ Signal  $y_{\text{FM\_BB}}(k)$  kann die Ableitung des Winkels über die Winkeldifferenz zweier benachbarten Samples approximiert werden:

$$\omega_{\text{FM\_BB}}(k) \approx \Delta\theta_{\text{BB}}(k) / T_{\text{sampling}} = \text{angle}[y_{\text{FM\_BB}}(k) \cdot y_{\text{FM\_BB}}^*(k-1)] / T_{\text{sampling}} \approx k_{\text{FM}} \cdot s_m(k)$$

Das FM demodulierte Signal  $\omega_{\text{FM\_BB}}(k)$  entspricht (bis auf einen Skalierungsfaktor) dem Basisbandsignal aus Abbildung 3. Um numerische Probleme bei der Implementation zu verhindern kann der Quotient  $1/T_{\text{sampling}}$  weggelassen werden. Das audio Monosignal L+R erhält man nun durch Tiefpassfilterung mit einer Grenzfrequenz von 15 kHz. Schlussendlich muss noch die sogenannte Präemphasis des Audiosignals durch einen weiteren Tiefpassfilter rückgängig gemacht werden (siehe WCOM1).

Das nachfolgende Funktionsblockdiagramm fasst den gesamten Softwareteil des UKW Empfängers zusammen, wobei der RTL SDR das IQ Basisbandsignal liefert. Die Tuning-Offsetkorrektur ist nötig, weil der SDR beim Aufzeichnen des IQ Signals  $f_{\text{LO}}$  auf 50 kHz neben der Trägerfrequenz eingestellt war um den Einfluss des DC Peaks wegen LO-Leakage zu verringern.

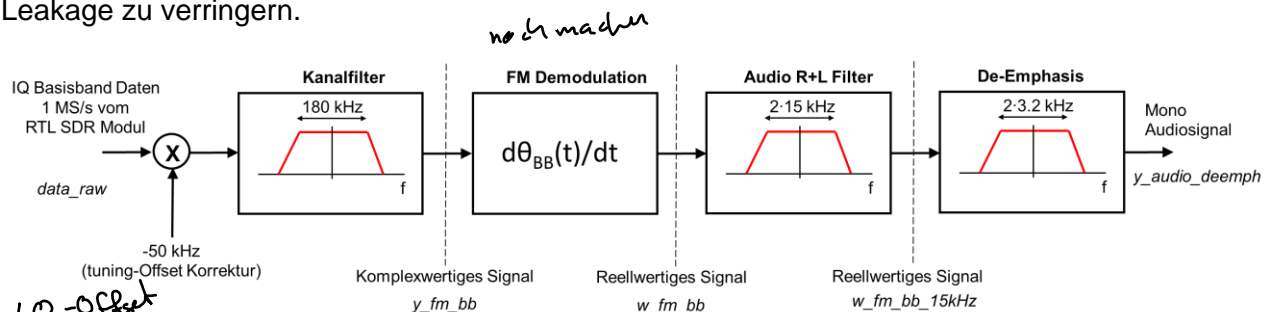


Abbildung 4: Funktionsblockdiagramm UKW Empfänger.

## Sekundärradar

Neben traditionellen impuls-echo Radars (Primärradars) werden zur Überwachung des Luftraums auch Radarsysteme eingesetzt, welche ein aktives Ziel benötigen (Sekundärradar). Wie in Abbildung 5 gezeigt fragt dabei ein Interrogator am Boden einen Transponder im Flugzeug ab, welcher mit einer Liste von Parametern antwortet.

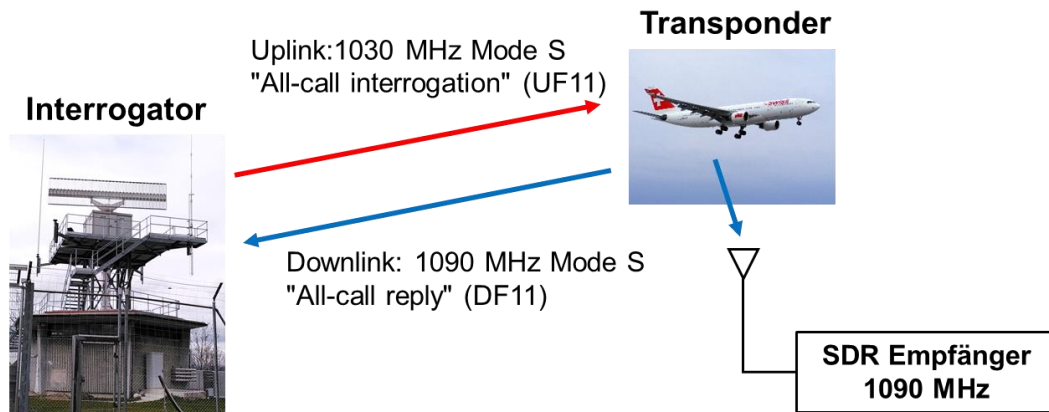


Abbildung 5: Funktionsweise Sekundärradar

Konkret werden wir die "All-call reply" Antworten der Transponder empfangen und decodieren. Diese Pakete verwenden das Mode S Protokoll und werden auch als Downlink Format 11 (DF11) Pakete bezeichnet. Die DF11 Pakete dienen der ersten Erfassung der Flugzeuge im Abdeckungsbereich eines Radars, anschliessend können durch direkte Adressierung einzelne Flugzeuge abgefragt werden. Weitere optionale Hintergrundinformationen zu Mode S Sekundärradars finden Sie in [4].

Die Mode S DF11 Pakete verwenden die Pulse Position Modulation (PPM). Dabei ist jeweils nur entweder die erste oder zweite Symbolhälfte mit dem Träger moduliert. Ein Symbol dauert  $1\ \mu\text{s}$  und enthält ein bit Information, siehe Abbildung 6. Der Datenblock besteht aus 56 Symbolen (bits) und dauert somit  $56\ \mu\text{s}$ . Zu Beginn des DF11 Paketes wird eine  $8\ \mu\text{s}$  lange Präambel zur Synchronisation des Empfängers vorangesetzt, welche aus vier einzelnen Pulsen besteht.

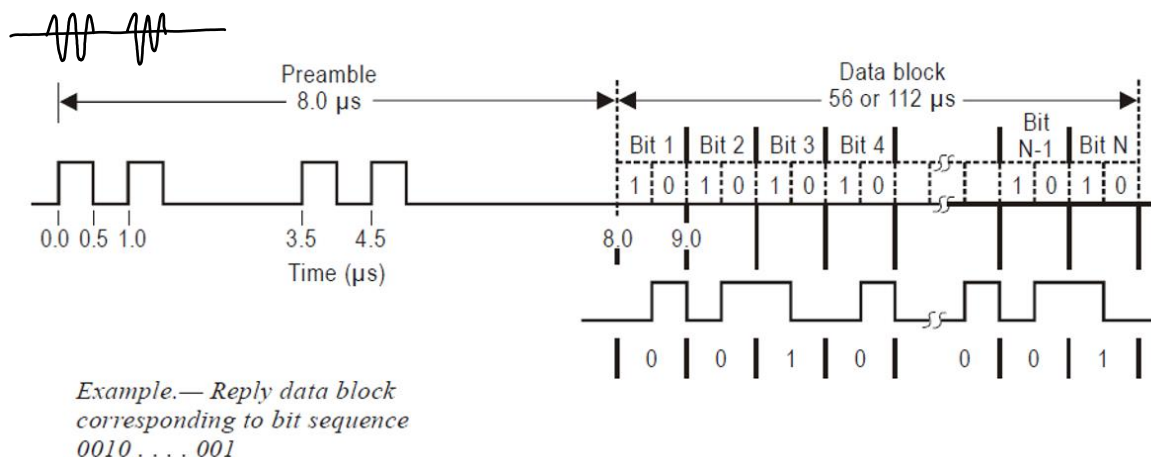


Abbildung 6: Mode S All-call reply (DF11) Paketformat [3]

Im Datenblock sollen die in Abbildung 7 rot markierten Felder decodiert werden:

- Feld DF (Downlink Format), muss für DF11 Pakete "01011" sein
- Feld AA (Address Announced), fixe Flugzeug-Adresse

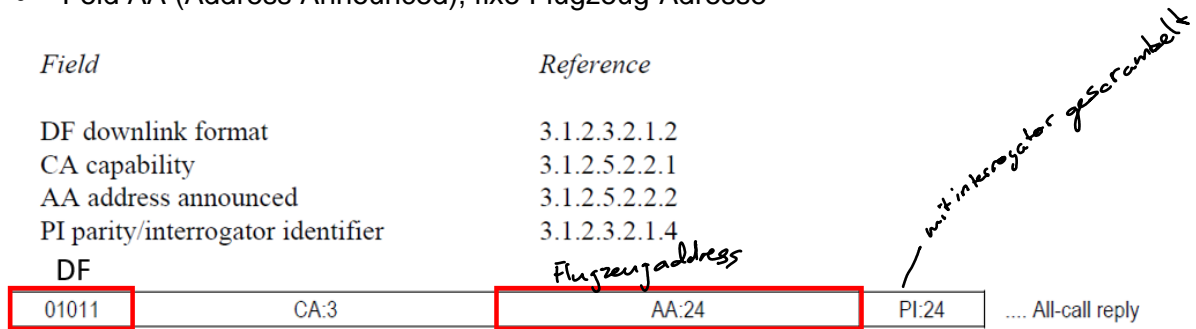


Abbildung 7: Mode S All-call reply (DF11) Datenfelder (56 bits) [3]

Bemerkungen:

- Das Parity/Interrogator Identifier (PI) Feld wird nicht verwendet, weil die Prüfsumme mit der Interrogator ID maskiert ist. Diese ist nur bekannt, wenn das zum DF11 Paket gehörige UF11 Paket (Interrogator Abfrage) decodiert wird.
- Es gibt weitere Downlink Formate, einige werden ohne Triggerung durch einen Interrogator regelmässig vom Transponder gesendet. Die Informationen der Automatic Dependent Surveillance (ADS-B) Pakete werden z.B. auf den Webseiten <https://www.flightradar24.com/> oder <http://waikiki.zhaw.ch/radar.zhaw.ch/home.html> dargestellt.

Um die PPM zu demodulieren muss der Empfänger die Pulsposition innerhalb eines Symbols bestimmen. Dies kann mit dem folgenden Matched Filter erfolgen, welches den kombinierten Puls für eine logische "1" sowie für eine logische "0" (mit negativem Vorzeichen) enthält, siehe Abbildung 8. Das Matched Filter erzeugt am Ausgang einen positiven Wert, wenn eine "1" übertragen wurde und einen negativen Wert, wenn eine "0" übertragen wurde.

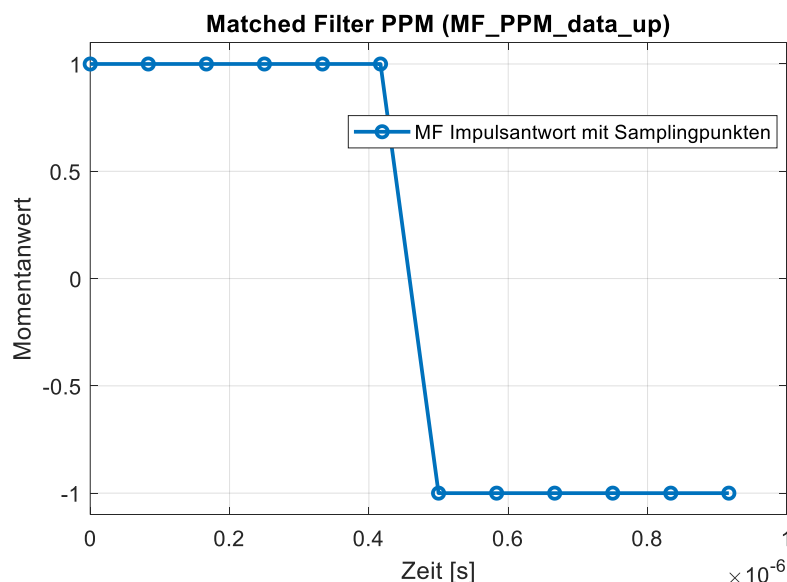


Abbildung 8: Matched Filter Pulsform für PPM Symbole des Datenblocks mit einer Samplingrate von 12 MS/s

Um die übertragene Bitsequenz zu bestimmen wird der Betrag (Envelope) des IQ Basisbandsignals in das Matched Filter eingespeist. Der nachfolgende Entscheider bestimmt zum korrekten Abtastzeitpunkt (Zeitpunkt zu dem die Korrelation zwischen Eingangssignal

und Pulsform gemäss Zeitsynchronisation durch die Präambel maximal sein sollte) das übertragene bit, wie in Abbildung 9 gezeigt.

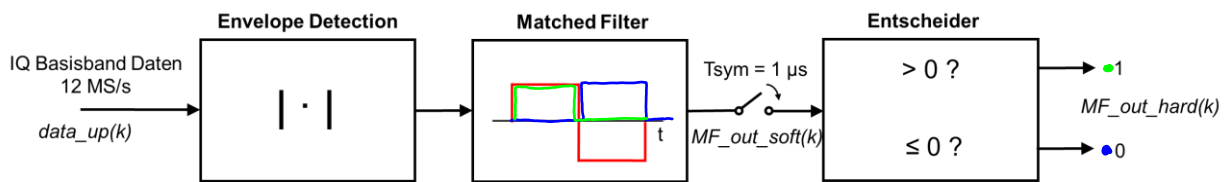


Abbildung 9: PPM Demodulation

## 2. Aufgabenstellung UKW Rundfunk

Verwenden Sie das Matlabskript FM\_Receiver\_IQ.m zusammen mit den aufgezeichneten IQ Daten in IQ\_Data\_SRF1.mat, welche mit einem RTL SDR Stick auf 94.6 MHz mit einer Bandbreite von 1 MHz aufgezeichnet wurden. Die FM Demodulation ist noch nicht implementiert.

- Studieren Sie den Code in FM\_Receiver\_IQ.m und studieren Sie im Code die zum Funktionsblockdiagramm in Abbildung 4 zugehörigen Blöcke.
- Betrachten Sie den zeitlichen Verlauf der IQ Daten. Wie ist der prinzipielle Verlauf der Amplituden und was würden Sie aufgrund der Frequenzmodulation erwarten?
- Bestimmen Sie im Leistungsdichtespektrum-Plot des IQ Signals mit dem Cursor die -40 dB FM Signalbandbreite. Verwenden sie dazu die Max. Hold Kurve. Vergleichen Sie diese mit der Carson-Bandbreite (siehe WCOM1), mit Frequenzhub  $\Delta f = 75$  kHz und maximaler Frequenz im Basisbandsignal  $f_m = 15$  kHz. Diskutieren Sie Gründe bei einer Allfälligen Abweichung.

Bemerkungen: Die Aufzeichnung enthält nur ein Sprachsignal welches mono gesendet wurde, daher ist im Basisband das Stereo Differenzsignal (L-R) praktisch null und  $f_m \approx 15$  kHz ist eine gute Approximation der maximalen Frequenz im Nachrichtensignal. Pilotton und RDS Signale haben eine relativ tiefe Leistung und können vernachlässigt werden. Der Leistungsdichte-Peak bei der Trägerfrequenz 94.6 MHz entsteht in den Sprechpausen wenn das Trägersignal unmoduliert ist.

- Addieren Sie die FM Demodulation auf der entsprechend markierten Zeile. Um hohe numerische Werte zu verhindern (erzeugen Clipping im Audiosignal), sollten Sie den Quotient  $1/T_{\text{sampling}}$  bei der Demodulation weglassen, wie oben beschrieben. Sie sollten nun auf dem Default Audiodevice die Radiosendung hören, ausserdem wird das Leistungsdichtespektrum des Audiosignals geplottet.
- Prüfen Sie ob im Leistungsdichtespektrum des Audiosignals der Pilotton bei 19 kHz trotz Tiefpassfilterung noch sichtbar ist.

### 3. Aufgabenstellung Sekundärradarempfänger für DF11 Pakete

Verwenden Sie das Matlabskript SSR\_DF11\_Receiver\_IQ.m zusammen mit den aufgezeichneten IQ Daten in Q\_Data\_DF11.mat, welche mit einem RTL SDR Stick auf 1090 MHz mit einer Bandbreite von 2.4 MHz aufgezeichnet wurden. Der Empfänger ist bereits vollständig implementiert. Das Skript läuft bis ein DF11 Paket empfangen und decodiert wurde, dies wiederholt sich nach einem Tastendruck.

- Studieren Sie den Code in SSR\_DF11\_Receiver\_IQ.m und erstellen Sie ein Funktionsblockdiagramm für den Empfang eines DF11 Paketes. Die for-Schleifen zum Empfang mehrerer DF11 Pakete müssen Sie nicht berücksichtigen.
- Bestimmen Sie im Plot mit dem Betrag (Envelope) des IQ Basisbandsignals die Länge des DF11 Paketes inkl. Präambel und vergleichen Sie diese mit Abbildung 6.
- Die im Plot des Matched Filter (soft) Ausgangssignals (vor dem Entscheider) eingezeichneten Abtastzeitpunkte entsprechen den Zeitpunkten zu denen der Entscheider jeweils ein bit bestimmt. Bestimmen Sie für das Address Announced (AA) Feld mithilfe dieses Plots manuell den hexadezimalen Wert und vergleichen Sie diesen mit der Ausgabe auf der command-line im Matlab.
- Lassen Sie das Skript alle enthaltenen DF11 Pakete decodieren (mehrmaliger Tastendruck nötig). Von wie vielen Flugzeugen wurden DF11 Pakete empfangen? Könnte es zu Decodierungsfehlern gekommen sein?
- Wie könnten Decodierungsfehler vermindert werden?
- Bestimmen Sie mithilfe von [5] die Flugzeuge, von denen sie den hexadezimalen AA Wert decodiert haben.

*Präambel suchen  
überprüfen  
Daten decodieren  
Prüfen → Präambel?*

### 3. Referenzen

[1]	RTL-SDR (RTL2832U) and software defined radio news and projects, abgerufen 24.03.2021, <a href="https://www.rtl-sdr.com/category/tutorial/">https://www.rtl-sdr.com/category/tutorial/</a>
[2]	University of Colorado, "Software Defined Radio and the RTL-SDR USB Dongle", abgerufen 19.03.2020, <a href="http://www.eas.uccs.edu/~mwickert/ece4670/lecture_notes/Lab6.pdf">http://www.eas.uccs.edu/~mwickert/ece4670/lecture_notes/Lab6.pdf</a>
[3]	ICAO, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Volume 4, Edition 5, July 2014
[4]	Radartutorial, abgerufen 24.03.2021, <a href="https://www.radartutorial.eu/13.ssr/sr20.de.html">https://www.radartutorial.eu/13.ssr/sr20.de.html</a>
[5]	Flightradar24, Suchfunktion (Feld ICAO 24-bit address), abgerufen 24.03.2021, <a href="https://www.flightradar24.com/data">https://www.flightradar24.com/data</a>