

Fachbereich RADIOASTRONOMIE

SOFIE – Systemdokumentation

DI Erich Schubert

2. Juni 2025

Inhaltsverzeichnis

1	Projektgeschichte und Datenbereitstellung	2
1.1	Funktionsprinzip und ionosphärischer Einfluss	2
2	Ionosphärenverhalten der 45,9 kHz-Frequenz	2
2.1	Reflexionsschicht und Reflexionshöhe	2
2.2	D-Region-Absorption und Signalstärke	3
2.2.1	Nacht-Reflexion und Leitkanal	3
2.2.2	Einfluss solarer Flares (SID-Effekte)	3
2.2.3	Sporadische-E-Schichten und Störsporadizitäten	4
2.2.4	Horizontale Leitkanal-Dämpfung	4
2.2.5	Langfristige Variationen (Jahresgang und Sonnenzyklus)	4
2.2.6	Zusammenfassung	4
3	Senderstandort	6
3.1	Langwellensender 45,9 kHz	6
4	Messmethodik	6
4.1	Signal und Typische Signalveränderungen	6
4.2	Datenzugriff und Aufbereitung	6
4.3	Zielsetzung	6
5	Systemübersicht	7
5.1	Komponenten im Überblick	7
6	Hardwarekomponenten	7
6.1	Standort und Verkabelung	7
6.2	Rahmenantenne (Loop-Antenne)	7
6.3	Vorverstärker und Filtersystem	8
7	Softwarearchitektur	8
8	Betriebshandbuch	8
8.1	Inbetriebnahme	8
8.2	Routinemäßiger Betrieb	8

9	Wartung und Erweiterungen	8
9.1	Regelmäßige Wartung	8
9.2	Geplante Erweiterungen	9
10	Zusammenfassung	9

SOFIE-Projektseite: <https://www.projectlab-neustrelitz.de/site/de/charts.html>.

1 Projektgeschichte und Datenbereitstellung

Das von Fritz Lensch initiierte Langwellenprojekt zur Beobachtung der Sonnenaktivität, das vom DLR ¹ betreut wird, ging im Jahr 2013 in Betrieb. Seitdem senden wir automatisch unsere Messdaten an den DLR-Server in Neustrelitz. Auf diese Daten kann auch der Ionosphärendienst SWACI (<http://swaciweb.dlr.de/>) zugreifen. Dort werden unsere Daten gemeinsam mit weiteren Beobachtungen ausgewertet und Anwendern zur Verfügung gestellt.

1.1 Funktionsprinzip und ionosphärischer Einfluss

Radiowellen sind elektromagnetische Wellen mit Frequenzen von einigen Kilohertz bis einigen Gigahertz. Von der Erde ausgesendet werden sie – je nach ihrer Frequenz – von verschiedenen Schichten der Ionosphäre reflektiert. Bei hochfrequenten Radiowellen erfolgt die Reflexion bereits an der Unterkante der Ionosphäre. Je höher die Frequenz, desto tiefer dringt die elektromagnetische Welle in die einzelnen Schichten der Ionosphäre ein.

Aufgrund kosmischer Quellen und insbesondere solarer Einflüsse unterliegt die Ionosphäre ständigen Änderungen. Diese Variationen bewirken wiederum Veränderungen von Radiosignalen in Amplitude, Phase und Polarisation sowie in deren Ausbreitungsrichtung. Im ungünstigsten Fall kann das empfangene Signal sogar vollständig ausgelöscht werden. (Quelle: DLR)

2 Ionosphärenverhalten der 45,9 kHz-Frequenz

Bei einer Frequenz von 45,9 kHz (Langwellenbereich) verhält sich die Ausbreitung so, dass das Signal in erster Linie an der unteren Ionosphäre (D-Region, etwa 60–90 km Höhe) reflektiert wird. Die wesentlichen Aspekte dieses Reflexionsverhaltens sind im Folgenden beschrieben.

2.1 Reflexionsschicht und Reflexionshöhe

- Langwellen mit circa 45 kHz dringen tief in die D-Region ein und werden dort bei kritischer Elektronendichte zurückgeworfen.
- Die effektive Reflexionshöhe liegt tagsüber typischerweise bei etwa 65 km, nachts hingegen eher zwischen 80 km und 85 km, da die Ionisation der D-Region stark von der Sonneneinstrahlung abhängt.
- Tagsüber, wenn die Sonne die D-Region intensiv ionisiert, ist die Elektronendichte höher, sodass die Reflexion näher an 65 km erfolgt. Nachts, wenn die Ionisation stark abnimmt, steigt die Reflexionshöhe auf etwa 80–85 km.

¹Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

2.2 D-Region-Absorption und Signalstärke

- Die D-Region fungiert nicht nur als Spiegel, sondern absorbiert auch einen Teil der Energie. Bei 45,9 kHz ist diese Absorption tagsüber deutlich größer, weil die D-Region dichter ionisiert ist.
- Tagsüber liegt die empfangene Feldstärke häufig 10–15 dB unter dem nächtlichen Niveau. Nachts, wenn die D-Region rekombiniert und die Elektronendichte stark abnimmt, sinkt die Absorption und die Feldstärke steigt entsprechend an.

Tagesgang-Charakteristik

- Bereits vor Sonnenaufgang (etwa 04:00–05:30 UTC, abhängig von Jahreszeit und Standort) beginnt die D-Region abzubauen, sodass die Reflexionshöhe nach oben rückt und die Absorption sinkt. Man beobachtet ein langsames Ansteigen der Signalstärke („Sonnenaufgangselevation“).
- Um Sonnenaufgang herum (etwa 06:00–07:00 UTC in Mitteleuropa) fällt die D-Region nahezu vollständig zusammen, und das Langwellensignal wird fast verlustfrei geführt (Sky-Wave). Dadurch kann es über große Distanzen mit minimaler Dämpfung ankommen.
- Tagsüber (ungefähr 08:00–17:00 UTC) ist die D-Region stark ionisiert, die Absorption am größten und die Reflexionshöhe am niedrigsten. Die Feldstärke sinkt kontinuierlich ab und erreicht meist ein Minimum gegen Mittag (höchste D-Region-Ionisation).
- Am späten Nachmittag/Abend (etwa 17:00–19:00 UTC) beginnt die D-Region abzubauen, das Signal steigt wieder an, bis es nach Einbruch der Dunkelheit (etwa 19:00–20:00 UTC) sein nächtliches Maximum erreicht.

2.2.1 Nacht-Reflexion und Leitkanal

- Nachts, wenn die D-Region praktisch verschwunden ist, wird die Reflexion vorwiegend an der E-Region (90–130 km) wirksam. Die E-Region ist weniger dicht als die D-Region, daher nimmt die Absorption weiter ab.
- Bei sehr niedrigem E-Region-Ionisationsniveau (z. B. in ruhigen Nächten) kann das Signal sogar direkt an der F-Region (ca. 200–300 km) reflektiert werden, was eine nahezu verlustfreie Übertragung über mehrere tausend Kilometer ermöglicht.
- In dieser Phase beobachtet man nachts oft deutliche Phasenverschiebungen, weil der effektive Laufweg (Reflexionspunkt in der F-Region) deutlich höher liegt. Die Phasenänderung kann mehrere zehn bis hundert Grad betragen, abhängig von Sender–Empfänger-Distanz.

2.2.2 Einfluss solarer Flares (SID-Effekte)

- Intensive Röntgen- und UV-Ausbrüche während Solar-Flares erhöhen kurzfristig die Elektronendichte in der unteren D-Region (Sudden Ionospheric Disturbance).
- Innerhalb von Sekunden bis Minuten nach Beginn des Flares steigt die D-Region-Ionisation so stark an, dass die Reflexion an sehr niedriger Höhe erfolgt und die Absorption extrem zunimmt.

- Dadurch fällt die empfangene Feldstärke bei 45,9 kHz abrupt um mehrere dB ab (sogeannter *signal dropout*). Gleichzeitig tritt eine schlagartige Phasenverschiebung auf, weil die effektive Reflexionshöhe sehr kurzzeitig absinkt.
- Nach dem Ende des Flares dauert es typischerweise 5–15 Minuten, bis sich D-Region und Signalpfad wieder normalisieren.

2.2.3 Sporadische-E-Schichten und Störsporadizitäten

- Im Sommer treten in Mitteleuropa häufig *Sporadic-E*-Schichten (E_s) in 95–125 km Höhe auf. Diese Schichten können lokale Reflexions-“Hotspots” erzeugen, in denen ein 45,9 kHz-Signal zeitweise deutlich stärker reflektiert wird.
- Für den Empfänger bedeutet dies plötzliche Signalanstiege um 3–6 dB, oft begleitet von heftiger Phasenmodulation, wenn sich der Leitkanal kurzfristig von D-Region- auf Sporadic-E-Reflexion umlegt.
- Diese Effekte sind typisch für die Sommermonate (Mai bis August) und treten bevorzugt in den Abendstunden auf, wenn eine frühe Sporadic-E-Ausbildung stattfindet.

2.2.4 Horizontale Leitkanal-Dämpfung

- Das 45,9 kHz-Signal läuft im Erdatmosphäre-Wellenleiter zwischen Erdoberfläche und Ionosphäre. Die Dämpfung pro 1000 km beträgt im Mittel nachts nur etwa 1–3 dB, tagsüber hingegen 5–8 dB.
- Entfernungen größer als 7000 km sind nachts mit noch akzeptabler Dämpfung möglich; tagsüber hingegen neigt der Pfad zu hoher Dämpfung (mehr als 15 dB pro 1000 km).
- Ein Beispielpfad Niscemi → Kiel (ca. 9085 km) zeigt nachts eine Dämpfung von unter 2 dB pro 1000 km, tagsüber jedoch 5–7 dB pro 1000 km, sodass der Empfang in Kiel vor allem in der Dämmerungs- und Nachtphase zuverlässig gelingt.

2.2.5 Langfristige Variationen (Jahresgang und Sonnenzyklus)

- Im Jahresgang beobachtet man im Winterhalbjahr (Dezember bis Februar) generell höhere Signalstärken, da die D-Region schwächer ausgebildet ist und die Nächte länger sind.
- Im Sommerhalbjahr (Juni bis August) sind die Tage länger und die D-Region dichter, sodass tagsüber stärkere Dämpfung herrscht und auch die Nachtphasen (aufgrund von Sporadic-E) zu instabiler Reflexion führen können.
- Über den 11-Jahres-Sonnenzyklus hinweg korreliert die durchschnittliche D-Region-Ionisation mit der Sonnenfleckenanzahl: In Sonnenmaximumjahren ist die D-Region tagsüber dichter, die nächtlichen Reflexionsphasen kürzer, und Signalstärken sinken insgesamt um 2–4 dB im Vergleich zum Zyklusminimum.

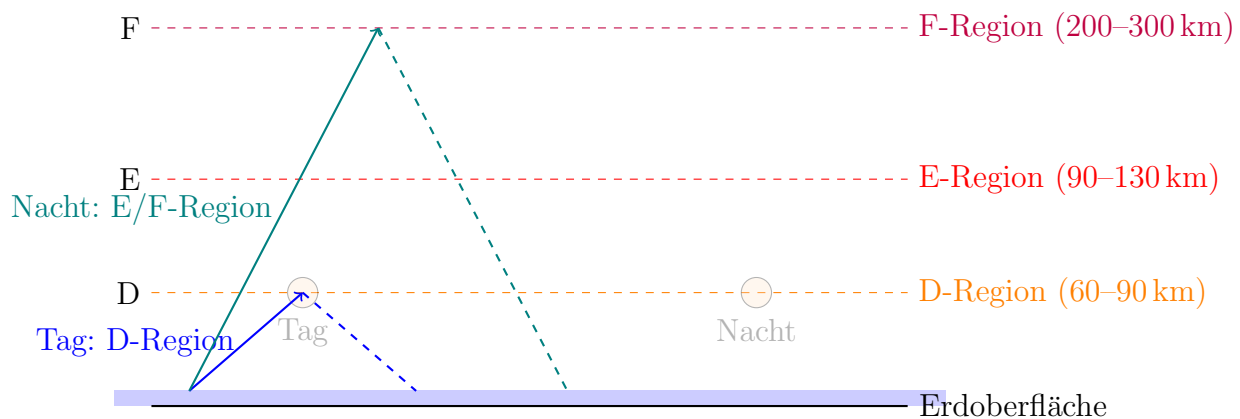
2.2.6 Zusammenfassung

Für das 45,9 kHz-Signal des Senders NSY gilt:

- **Reflexion:** Überwiegend in der D-Region, deren Ionisation stark vom Sonnenlichteinstrahlungswinkel abhängt.

- **Tagesgang:** Tagsüber hohe Absorption und niedrige Reflexionshöhe (ca. 65–75 km) \Rightarrow geringe Signalstärke. Nachts geringe Absorption und höhere Reflexionshöhe (ca. 80–90 km) \Rightarrow maximale Signalstärke.
- **Solar-Flare-Effekt:** Plötzliche, kurzzeitige Signalabsenkungen (mehrere dB) und Phasenverschiebungen, da die D-Region durch Röntgen-/UV-Strahlung sofort dichter wird.
- **Sporadic-E-Einfluss:** Im Sommer kann Sporadic-E vorübergehend die Hauptreflexion übernehmen, was starke Amplituden- und Phasenänderungen verursacht.
- **Dämpfung:** Nachts < 2 dB/1000 km, tagsüber 5–8 dB/1000 km, daher sind lange Pfade (z. B. 9085 km) vor allem nachts zuverlässig.
- **Langfristige Effekte:** Jahresgang (Winter besser als Sommer) und Sonnenzyklus (Minimum besser als Maximum) modulieren die mittleren Signalpegel um einige dB.

Dieses Reflexionsverhalten macht 45,9 kHz-Longwellen zu einer idealen Quelle, um sowohl den täglichen Ionosphärenzustand als auch plötzliche Solar-Flares mit einfachen Empfängersystemen (z. B. SOFIE-Empfänger) zu detektieren.



Legende	
\rightarrow (blau)	Tag: D-Region
\rightarrow (grün)	Nacht: E/F-Region
--- (orange)	D-Region
--- (rot)	E-Region
--- (rosa)	F-Region

Erläuterungen:

- Die Erdoberfläche ist als horizontale Linie bei $y = 0$ dargestellt.
- D-Region, E-Region und F-Region sind schematisch als horizontale gestrichelte Linien bei unterschiedlichen Höhen (1,5; 3; 5 Einheiten) dargestellt. In der Realität liegen diese Schichten etwa bei 60–90 km (D), 90–130 km (E) und 200–300 km (F).
- Der *Tagespfad* (blau) reflektiert bei etwa $y = 1,5$ (D-Region), da die D-Region tagsüber dicht ionisiert ist.

- Der *Nachtpfad* (türkis) zeigt eine Reflexion an einer höheren Schicht (E/F), da die D-Region nachts weitgehend rekombiniert ist und kaum noch Ionisation enthält.
- Die schraffierten Kreise markieren ungefähr die effektive Reflexionshöhe tagsüber (D-Region ca. 65 km) und nachts (D-Region ca. 85 km bzw. Übergang zu E/F).
- Gestrichelte Fortsetzungen der Strahlen veranschaulichen den Verlauf nach Reflexion.

3 Senderstandort

Der Langwellensender, dessen Reflexionsspektren wir auswerten, befindet sich in Sizilien (Call-sign: NSY).

3.1 Langwellensender 45,9 kHz

Der Langwellensender, dessen Reflexionen wir kontinuierlich beobachten, sendet auf **45,9 kHz**. Die Eckdaten sind im Zusatzdokument ² zu finden.

4 Messmethodik

Im Rahmen des Projekts „Sonnenbeobachtung via Langwellenreflexion“ wird das 45,9 kHz-Signal, über einen zur Verfügung gestellten Empfänger folgendermaßen erfasst und ausgewertet.

4.1 Signal und Typische Signalveränderungen

- **Tagesgang** – bei Sonnenaufgang und -untergang (D-Region wird ionisiert bzw. rekombiniert) treten Schwankungen in der Übertragungsdämpfung von bis zu +8 dB bzw. –6 dB auf, welche sich in der Amplitude eines ausgegebenen Tonsignales zeigen.
- **Sonneneruptionen (Flares)** – plötzliche Peaks in der D-Region führen zu kurzzeitigen Amplitudenabsenkungen (Sudden Ionospheric Disturbances, SID), die innerhalb von Sekunden bis Minuten auftreten.
- **Geomagnetische Stürme** – längerfristige Phasenschwankungen und Amplitudenschwankungen über Stunden, messbar in den Langzeitdaten.

4.2 Datenzugriff und Aufbereitung

Die erfassten Rohdaten werden täglich automatisch an den DLR-Server übermittelt. Im SWACI-Portal (siehe <http://swaciweb.dlr.de/>) werden sie mit anderen Messreihen zusammengeführt und in Echtzeit-Trenddiagrammen bereitgestellt. Kurzzeitig konnte auch auf die gespeicherten Rohdaten per FTP-Zugang zugegriffen werden (aktuell eingestellt). Vor-Ort erfolgt der Datenzugriff auf das signalproportionale Tonsignal am NF-Ausgang (die NF-Amplitude ist analog der Empfangsfeldstärke). Die Messsignalerfassung erfolgt über den Soundeingang des RasPi.

4.3 Zielsetzung

Die Zielsetzung bei Projektgründung war eine einfache Datenauswertung für Schüler bereitzustellen. Die ursprüngliche Antares-Intension war „mitmachen“.

²Sender NSY auf 45.9kHz

5 Systemübersicht

Ausgewertet wird der Einfluss der Sonnenaktivität auf das Reflexionsverhalten der D-Schicht in der Ionosphäre.

5.1 Komponenten im Überblick

- **Rahmenantenne**
 - Quadratischer Rahmen aus Holz, senkrecht montiert auf einem Holzmast.
- **Empfänger**
 - Beistellempfänger aus der Projektumgebung
 - Alternativ: eigener Empfänger mit Datenaufbereitung
- **Steuerungsrechner**
 - Raspberry-PI mit eigener Auswertesoftware
- **Datenverarbeitung und Speicherung**
 - Python-basierte Pipeline
 - * `capture.py`: Erfasste Daten, in einer SQL-Datenbank, im 1sec-Raster, abgelegt

6 Hardwarekomponenten

6.1 Standort und Verkabelung

- **Standort:** Antares-Gelände Michelbach, Freifläche mit minimalem elektrischen Störpegel.
- **Erdung:** Eigenbau Rahmenantenne
- **Kabelwege:** .. m Koaxkabel (RG-..) von Antenne zum Vereinshaus, Dämpfung dB/100 m bei kHz.
- **Blitzschutz:** Überspannungsableiter unmittelbar an Antennenabgang. ???????????

6.2 Rahmenantenne (Loop-Antenne)

- **Mechanik:**
 - Selbstbau Rahmenantenne auf Holzquadrat
 - Rahmen auf Holzmast
- **Impedanzanpassung:** TODOvorhanden/notwendig???

6.3 Vorverstärker und Filtersystem

7 Softwarearchitektur

8 Betriebshandbuch

————— TODOist zu erstellen —————

8.1 Inbetriebnahme

1. NF-Ausgang des SOFIE-Empfängers an den Soundeingang des RASPI
2. Erfassungsrechner einschalten.
3. `sudo systemctl -----`
4. `sudo systemctl -----`
5. Status prüfen: -----

8.2 Routinemäßiger Betrieb

- **Täglicher Check (08:00 UTC): Wunsch**
 - Visuelle Kontrolle Antenne (Vogelnester, Beschädigungen).
- **Benachrichtigungen:**
 - Skript `xxxxxx.py` sendet E-Mail, wenn SNR plötzlich um > 5 dB abfällt.
 - Telegram-Bot-Integration (Chatgruppe für Alarmmeldungen).
- **Langzeitarchivierung:**
 - Automatisches tar-gz-Archiv jede Woche (Rohdaten + Analyseplots).
 - Sende Archiv via SFTP an ein Backupsystem

9 Wartung und Erweiterungen

9.1 Regelmäßige Wartung

- **Monatlich:**
 - Kontrolle der Rahmenantenne.
 - Überprüfung der Empfangsanlage
- **Jährlich:**
 - Datensicherung.

9.2 Geplante Erweiterungen

- eigener Empfänger.
- **Machine Learning Baseline-Correction and Activity-Check:**
 - Implementierung eines neuronalen Netzes zur automatischen Detektion von Flares.
 - Online-Training anhand von bekannten CME-Ereignissen (NASA-Tagungsdatenbank, SOFOE-History-Plots).

10 Zusammenfassung

Diese Systemdokumentation beschreibt das DLR-geführte Projekt „Sonnenbeobachtung via Langwellenreflexion“ mit Rahmenantenne. Die Kombination aus Resonanz-Loop, Empfänger und maßgeschneiderter Software erlaubt die hochgenaue Detektion von ionosphärischen Variationen und indirekte Rückschlüsse auf Solaraktivitäten. Durch modulare Hardware und skalierbare Softwarearchitektur ist eine langfristige Erweiterung jederzeit möglich.

TODO:

- diese Doku korrigieren, homogenisieren und ergänzen
- Skizze zur Kabelverlegung
- Steckerdoku