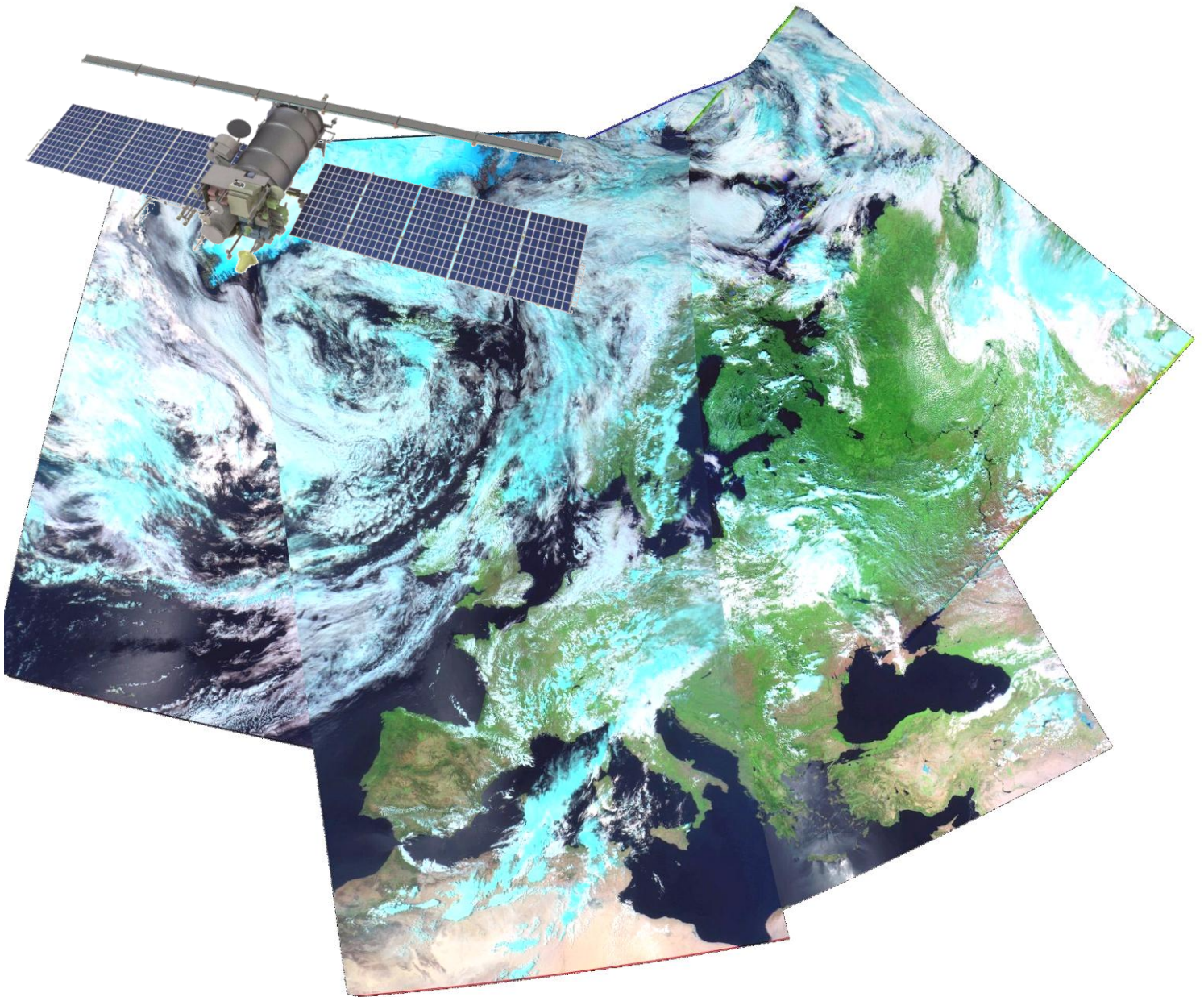


Empfang polumlaufender Wettersatelliten in der Schule

Matthias Borchardt



Inhaltsverzeichnis

Einleitung	3
Das Thema im schulischen Kontext	3
Wettersatelliten	5
Geostationäre Satelliten:.....	5
Polumlaufende Satelliten:	6
NOAA-Satelliten.....	7
Die Meteor M2 – Satelliten	9
SOFTWARE	15
Das Programm ORBITRON	15
Das Programm SATDUMP.....	18
Antennen und Empfänger	27
V-Dipol.....	27
Yagi-Antenne – 138 MHz	29
Bauanleitung für eine 4-Elemente-Yagi Antenne	30
Physikalisch-mathematische Kontexte	39
Geostationäre Wettersatelliten.....	39
Polumlaufende Satelliten	41
Eine Polarbahn als sonnensynchrone Umlaufbahn	41
Umlaufzeit der Satelliten	44
Bahngeschwindigkeit.....	44
Abtastgeschwindigkeit und Bildauflösung in Flugrichtung	44
Sichtbarkeit der Satelliten	45
Bahndrift	46
Das Problem der Bildverzerrung.....	48
Was ist eine „BIAS-T“ Schaltung und wie funktioniert sie?	55
Abschätzung der Wolkenhöhe	57
Links	62

Einleitung

Satellitenbilder der Erdoberfläche lassen sich mit verhältnismäßig geringem technischen und finanziellen Aufwand empfangen und aufzeichnen. Die beiden polumlaufenden russischen Wettersatelliten METEOR M2-3 und METEOR M2-4 senden nämlich die Daten ihrer Bild-Scanner auf einer Frequenz von etwas mehr als 137 MHz, was empfangstechnisch gut zu beherrschen ist. Mithilfe kostengünstiger Digitalempfänger-Sticks (SDR-Empfänger) und einfachen Selbstbau-Antennen gelingt so der Empfang beeindruckender Bilder der Erdoberfläche in Echtzeit.

Im Bereich der naturwissenschaftlichen Bildung (MINT) in der Schule eröffnet das Thema zahlreiche interessante Einsatzmöglichkeiten und weist zudem eine stark fächerverbindende Komponente auf. Im Folgenden sind einige Aspekte stichwortartig aufgelistet, welche die vielen Berührungspunkte des Themas mit den Fächern des MINT-Bereichs deutlich machen.

Das Thema im schulischen Kontext

- Das Themas **Raumfahrt** hat in den letzten Jahren enorm an Bedeutung gewonnen. Es sollte daher auch in der Schule auftauchen.
→ physikalisch-technische und gesellschaftspolitische Aspekte
- Motivierender und handlungsorientierter Zugang zu unterschiedlichsten **MINT**-Fächern
- Fachbereiche
 - Physik/Raumfahrt → Satellitenbewegung, Geschwindigkeiten, Umlaufzeiten, Höhe, geostationäre Bahn
 - Physik → Radiowellen (hier: VHF), Modulationsarten (AM, FM, Phase)
 - Physik → Empfangsantennen (Dipol, Yagi)
 - Physik → Wetter und Klima
 - Physik → Strahlung, Albedo, Spektralbereiche
 - Mathematik → Geometrie der perspektivischen Verzerrung, Bildentzerrung – Algorithmus
 - Informatik → digitale Bildbearbeitung (Umsetzung von Algorithmen zur Korrektur der Bildfeld-Wölbung, RGB-Bilder aus drei Spektralkanälen erstellen, Satellitenbahnen simulieren usw.)
 - Geographie → Lage und Bezeichnungen von Ländern, Städten, Flüssen, Seen, Meeren etc.
 - Geographie → Projektionen der Erdkugel auf zwei Dimensionen (Kartographie)

- Gesellschaftswissenschaften → Raumfahrt im Spannungsfeld von ziviler Nutzung und unsinnigen Prestigeprojekten, Probleme der extrem zugenommenen Nutzung des Weltraums (Weltraumschrott, Weltraumtourismus, Lichtverschmutzung durch Starlink etc.)
- Informatik/Nachrichtentechnik → moderne digitale Übertragungsarten (DAB-Radio usw.) → Phasenmodulation (hier: QPSK - Quadrature phase-shift keying (Quadraturphasenumtastung oder Vierphasen-Modulation))

Dieses Skript versucht möglichst viele Aspekte des Themas abzubilden und beruht auf meinen Erfahrungen, die ich in der Schule als Physik- und Mathematiklehrer über viele Jahre sammeln konnte.

Idealerweise eignet das Thema für einen Differenzierungskurs NW oder MINT in der Mittelstufe – aber natürlich auch für AG's, wobei es eigentlich keine Altersbeschränkung gibt.

Die **Kosten** für die Anschaffung der Materialien sind sehr überschaubar, wobei ich davon ausgehe, dass ein moderner Laptop bereits zu Verfügung steht. Die Software „SATDUMP“ ist frei im Internet erhältlich.

Material:

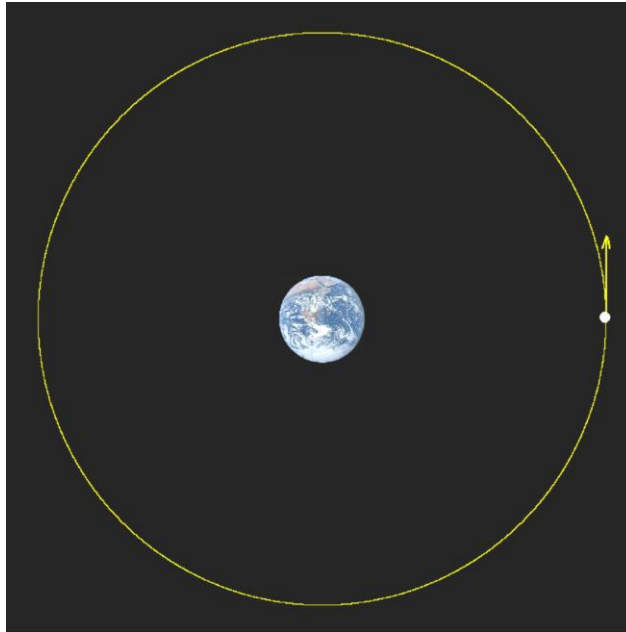
- Antennenmaterial (Kabel-Leerrohre, Rohrschellen, Alu-Rundrohre etc) → ca. 20–25 €
- SDR-Empfänger-USB-Sticks:
RTL-SDR.COM V4 oder Nooelec NESDR SMArTee → 45–50 €
- HF-Vorverstärker mit Bandpass: SAWBIRD+NOAA → 45–50 €
- Kleinteile (Adapter, Antennenkabel (RG 58) mit BNC-Stecker, USB-Kabel etc.) → 10-15 €

Die **Gesamtkosten** belaufen sich also etwa im Bereich von 130 € bis 140 €

Wettersatelliten

Geostationäre Satelliten:

METEOSAT umkreist die Erde parallel zum Äquator auf einer geostationären Bahn, Standort nahe dem Nullmeridian. Höhe ca. 35 800 km, Umlaufzeit 23h 56 min 4 s (mittlerer siderischer Tag)



Vor- und Nachteile geostationärer Wettersatelliten:

Vorteile:

- Eine Hälfte der Erdkugel wird komplett abgebildet und dies mehrmals pro Stunde
→ ermöglicht Wolkenfilme
- Zahlreiche Spektralkanäle (auch Wasserdampf)
- Stets gleicher Blick auf die Erde
- Antenne braucht nicht nachgeführt zu werden.

Nachteile:

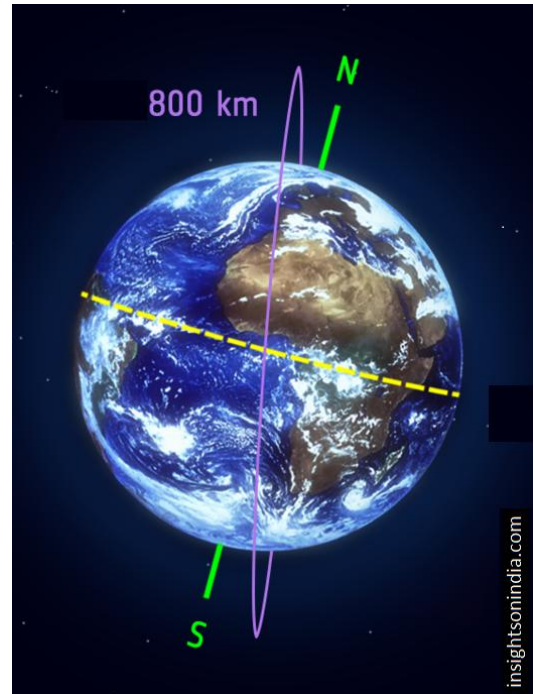
- Entfernung macht komplizierte und empfindliche Empfangstechnik erforderlich (Parabolantenne)
- Lizenzierte Zugang zu Meteosat-Daten nur über EUMET-Satelliten
- Blickwinkel auf Europa ungünstig, Nordeuropa aufgrund der Erdkrümmung stark verzerrt.
- Für den praktischen Einsatz (Empfang des Satelliten) in der Schule kommen die geostationären Satelliten wohl kaum infrage, da technischer und finanzieller Aufwand sehr groß sind.

Auch wenn der Empfang dieser Satelliten in der Schule wohl kaum gelingen wird, lassen sich dennoch einige interessante **physikalisch-mathematischen Aspekte** dieser geostationären Satelliten im schulischen Kontext behandeln

Einige Beispiele dazu finden Sie im **Anhang**.

Polumlaufende Satelliten:

Diese Satelliten umkreisen die Erde auf einer niedrigen Umlaufbahn (810 km – 830 km), die ungefähr über die Pole der Erde führt. Die Umlaufzeit beträgt etwa 101 Minuten. Damit eine sogenannte „sonnensynchrone Umlaufbahn“ entsteht, weicht die Bahn um einige Grad von einer reinen Polarbahn ab. Die Inklination liegt im Bereich von $98,7^\circ$. Da die Erde nicht genau kugelförmig ist, sondern mehr der Form eines leichten Rotationsellipsoids gleicht, bewirkt diese Abweichung eine Störung, die zu einer Präzessionsbewegung der Bahnebene führt. Diese dreht sich, wenn die Bahnparameter richtig gewählt wurden, im Laufe eines Jahres um 360° . So ist gewährleistet, dass der Einfallswinkel der Sonne auf die Bahnebene des Satelliten von Tag zu Tag erhalten bleibt und der Satellit ungefähr zur gleichen Tageszeit in etwa denselben Ort auf der Erdoberfläche überfliegt. Genauer zu diesem Thema mit den physikalisch-mathematischen Hintergründen finden Sie im **Anhang** dieses Skripts.



Für den schulischen Einsatz sind die polumlaufenden Wettersatelliten besonders geeignet, da sie auf einer einfach zu empfangenen Frequenz von etwas über 137 MHz senden, also etwas über dem bekannten UKW-Rundfunkband, das bis etwa 108 MHz reicht.

Da die amerikanischen NOAA-Satelliten (zuletzt NOAA 15 und NOAA 19) im August 2025 aufgrund ihrer veralteten (analogen) Technik abgeschaltet wurden, bleiben zurzeit (August 2025) zwei russische Wettersatelliten, deren Empfang mit einfachen Mitteln gut gelingt und die hervorragende Bilder der Erdoberfläche liefern.

Vor- und Nachteile der polumlaufenden Wettersatelliten:

Vorteile:

- Geringe Flughöhe, gut aufgelöste Bilder im Scannerbetrieb (1 – 4 km pro Pixel)
- An jedem Punkt der Erde ein- bis dreimal am Tag zu empfangen
- Nordeuropa ohne Verzerrung in Nord- Südrichtung
- Einfache Empfangstechnik → VHF 137 MHz → Antennenselbstbau billig und einfach (V-Dipol oder besser: 4-Elemente Yagi-Antenne)

- Digitaler Empfänger-USB Stick (SDR) für unter 50 Euro, Vorverstärker (mit Bandfilter) ebenfalls für unter 50 Euro erhältlich
- Sehr gute „All-Round“ Software (Empfang, Bilderzeugung, Bildentzerrung, Flischfarben-Kompositionen) alles in einem Programm (frei) → SATDUMP
- Didaktisch und im schulischen Kontext mit vielen Berührungspunkten zur Physik (Raumfahrt, Satellitenbewegung, Keplergesetze usw., Radiowellen, Modulationsarten, Antennen (Dipol, Yagi)), Mathematik (Geometrie der Satellitensichtbarkeit, Bildentzerrung, usw.), Erdkunde, Wetter und Klima, Nachrichtentechnik (Modulationsarten (AM, FM, Phasenmodulation), Informatik (digitale Bildverarbeitung)
- Schülerinnen und Schüler in der aktiven Rolle (Bau der Antenne, Nachführung der Antenne per Hand, Auswertung der Daten usw.)

Nachteile:

- Nur ein- bis dreimal am Tag zu empfangen, Empfangszeit jeweils 10 bis 15 Minuten, Kenntnis der Überflugzeiten erforderlich (z.B. bewährtes Programm ORBITRON), Zeitliche Planung erforderlich.
- Für kompletten Empfang eines Überflugs (also von Horizont zu Horizont) muss die Yagi-Antenne per Hand nachgeführt werden (in der Regel unproblematisch, aber man muss zur gegebenen Zeit vor Ort sein)
- Nur ein (lokaler) Streifen (Breite 2800 km, Länge bis über 5000 km) der Erdoberfläche wird abgebildet

NOAA-Satelliten

Zunächst noch ein kleiner „Nachruf“ auf die **NOAA-Satelliten**

Die amerikanischen NOAA-Satelliten haben über viele Jahrzehnte hinweg Wetterbilder in Echtzeit gesendet. Das analoge APT-Verfahren wurde so konstruiert, dass die gesendeten Daten mit einfachen Mitteln zu empfangen waren. Hintergrund war damals die Idee, dass man jeder Institution und jeder Privatperson der Erde einen einfachen Zugang zu Erderkundungsdaten gewähren wollte. Gesendet wurden in dem einfachen APT-Verfahren (**A**utomatic **P**icture **T**ransmission)



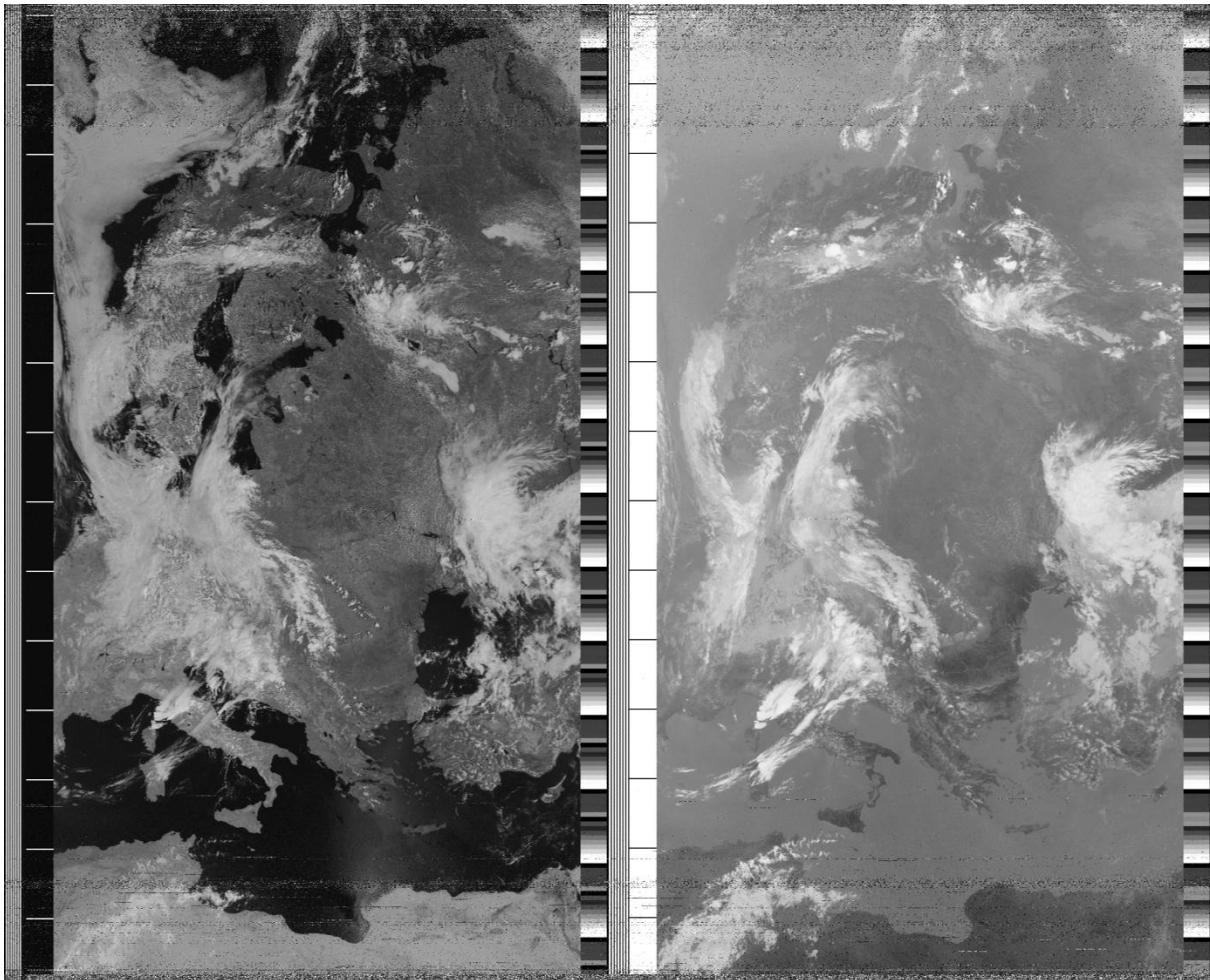
zwei nebeneinanderliegende Bilder: eines im visuellen Spektralbereich und eins im infraroten Spektralbereich. Der Empfang und die Dekodierung der gescannten Helligkeitswerte des

Satelliten beruhten auf einer rein analogen Technik und waren daher technisch recht einfach handhabbar und damit auch vom didaktischen Aspekt her ziemlich wertvoll. Die Auflösung der Bilder war allerdings geringer (ca. 4 km pro Pixel), als bei den beiden russischen Meteor-Satelliten (1 km pro Pixel), deren Technik digital ausgelegt ist.

Ab August 2025 wurde das NOAA-Satelliten Programm nun leider komplett eingestellt. Die NOAA-Satelliten der neuen Generation (zurzeit NOAA-20 und NOAA-21) senden nur noch auf dem X-Band (um die 8 GHz), was mit einfachen schulischen Mitteln technisch nicht umsetzbar ist. Die zuletzt verbliebenen NOAA-Satelliten können auf eine lange Lebenszeit zurückblicken: NOAA-15 hat 27 Jahre wertvolle Dienste geleistet, NOAA-18 kommt auf 20 Jahre und der letzte APT-fähige Satellit der Serie NOAA-19 auf 16 Jahre. NOAA-19 hätte man vielleicht noch einige Jahre in Betrieb lassen können – aber leider hat die NOAA-Administration anders entschieden. Die analoge Technik verschwindet sukzessive – nicht nur in diesem speziellen Bereich.

Die Abbildung zeigt eines der letzten Empfangsergebnisse eines NOAA-Satelliten.

Links das Bild im visuellen Spektralbereich und rechts das Infrarotbild. Die Streifen sind Synchronisationsmarkierungen und Graustufenkalibrierungen und die regelmäßigen dünnen Linien sind Minutenmarken.



Die einzigen Satelliten, die zurzeit noch auf Frequenzen um die 137 MHz, aber nun im digitalen LRPT-Verfahren (**L**ow **R**ate **P**icture **T**ransmission) senden und dies voraussichtlich noch viele Jahre tun werden, sind die russischen Wettersatelliten der **METEOR-M2** Serie.

Die Meteor M2 – Satelliten



Die russischen Meteor-Satelliten der M2 Serie sind die einzigen Wettersatelliten, die gut aufgelöste Bilder (deutlich besser als bei NOAA) der Erdoberfläche digital auf einer Frequenz im Bereich von 137 MHz senden – einer Frequenz, die technisch gut handzuhaben ist (Empfänger, Antenne). Alle anderen Wetter- oder Erderkundungssatelliten senden im Bereich von einigen GigaHertz. Der Empfang dieser hohen Frequenzen verlangt hohe Ansprüche an die Empfangstechnik (Antennen mit hoher Richtwirkung, exakte Nachführung usw.). Dies kommt für einen schulischen Einsatz daher kaum in Frage.



Meteor M2-3 und Meteor M2-4 senden beide zurzeit auf 137,9 MHz, wobei die digitalen Daten über das LRPT-Verfahren (Low Rate Picture Transmission), Phasenmodulation (QPSK Quadrature Phase Shift Keying) transportiert werden.

Die Bildauflösung beträgt im Nadir 1 km pro Pixel, an den Rändern des gescannten Bildstreifens ca. 3 – 4 km pro Pixel.

Gesendet werden in Echtzeit drei Bilder mit je unterschiedlichem Spektralbereich. Diese drei Spektralkanäle sind so gewählt, dass sie sich gut zu einem RGB-Bild (Falschfarbenbild) vereinen lassen.

Die Bildverzerrung aufgrund des Blickwinkels des Scanners und aufgrund der Erdkrümmung kann softwaremäßig korrigiert werden - allerdings mit einem Verlust der Auflösung in den Randbereichen. Auf dieses Problem wollen wir später noch detaillierter eingehen (**Anhang**).

Informationen über den Status der beiden Satelliten und die verwendeten Spektralkanäle (es gibt insgesamt sechs, im LRPT-Modus (137,9 MHz) werden drei ausgewählt, meist 1, 2 und 3, manchmal auch 1,2, und 4) findet man auf der Seite:

<https://usradioguy.com/meteor-satellite>

(APID 64, 65, 66, 67, 68 und 69 sind die Spektralkanäle 1, 2, 3, 4, 5 und 6)

MSU/MR No.	Central wavelength	Spectral interval
APID 64	0.60 μm	0.50 - 0.70 μm
APID 65	0.90 μm	0.70 - 1.10 μm
APID 66	1.70 μm	1.60 - 1.80 μm
APID 67	3.80 μm	3.50 - 4.10 μm
APID 68	11.00 μm	10.5 - 11.5 μm
APID 69	12.00 μm	11.5 - 12.5 μm

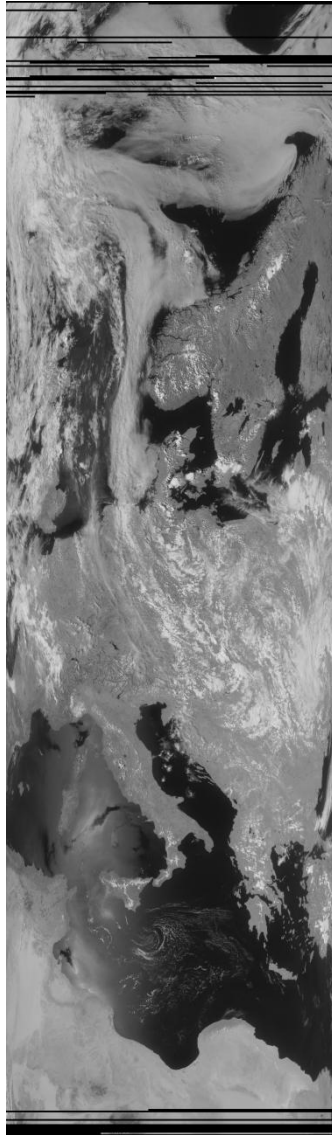
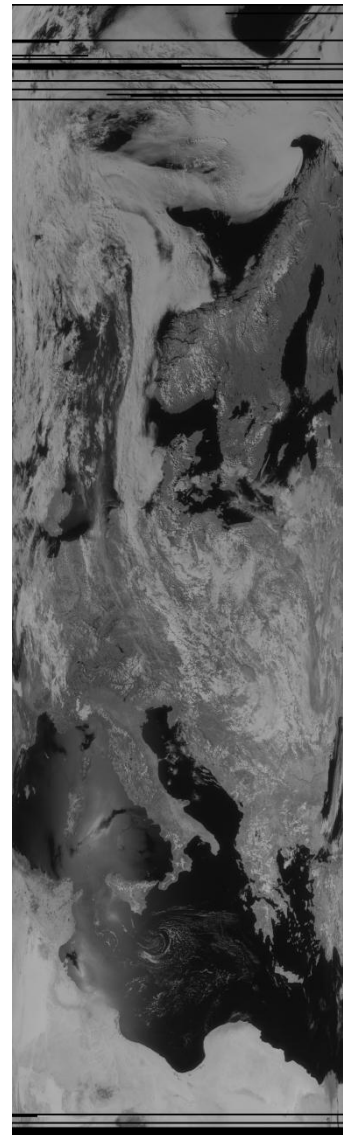
Beispiel: Statusmeldung im August 2025

Current Meteor M 2-3 AND Meteor M2-4 Status							
Meteor M 2-3 See Update notes below				Meteor M 2-4 See Update notes below			
FREQUEN CY	SYMBOL RATE	LRPT STATUS	HRPT STATUS	FREQUENC Y	SYMBOL RATE	LRPT STATUS	HRPT STATUS
137.900MHz	72K	Active	Active on 1700 Mhz	137.9 MHz	72 K	Active	Active on 1700 Mhz
APID 64	APID 65	APID 66		APID 64	APID 65	APID 66	
ON	ON	ON		ON	ON	ON	
APID 67	APID 68	APID 69		APID 67	APID 68	APID 69	
OFF	OFF	OFF		OFF	OFF	OFF	

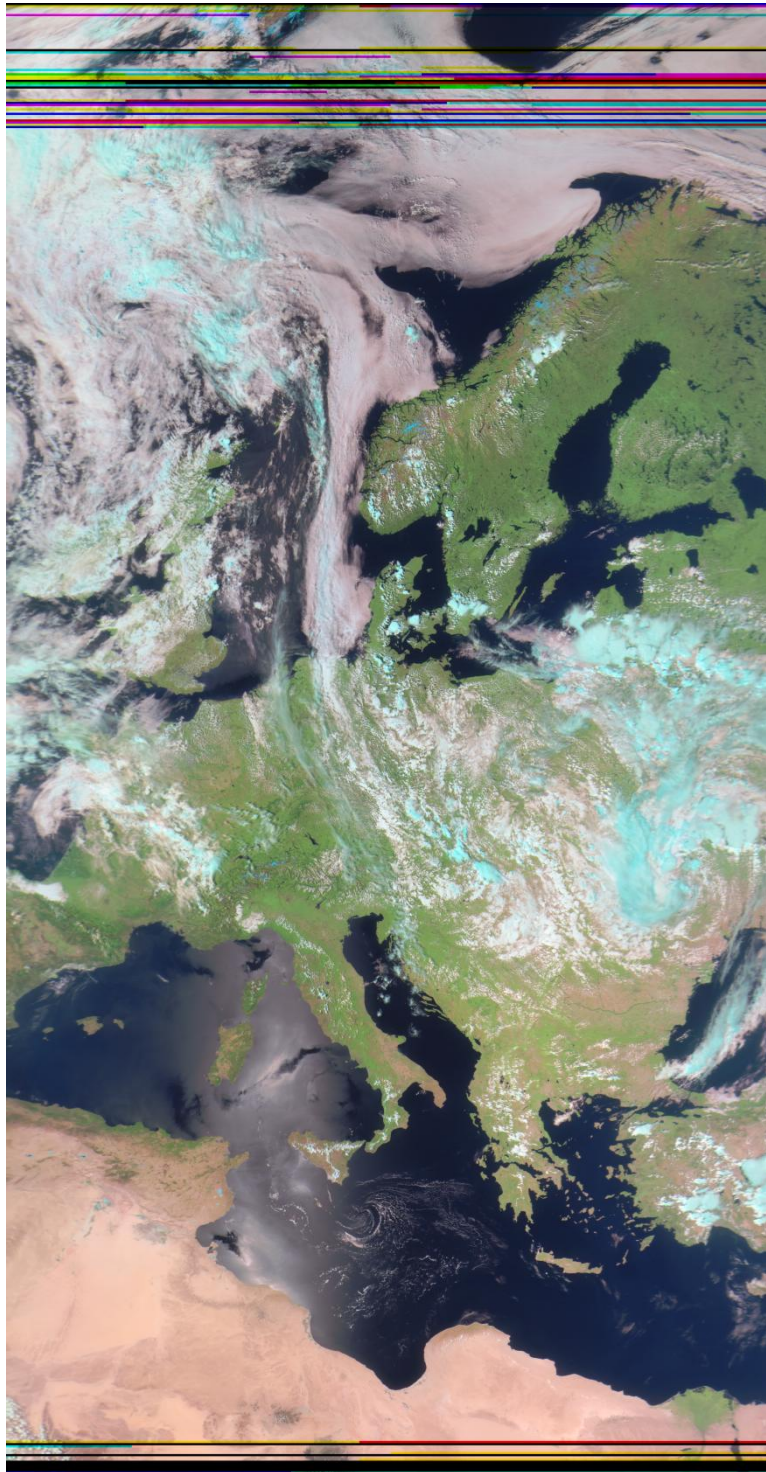
Der Multispectral Scanner „MSU-MR“ des Satelliten liefert also

- einen Spektralkanal im Sichtbaren (500 nm – 700 nm),
- einen im Übergangsbereich zum Infraroten (700 nm – 1100 nm)
- und vier Kanäle im Infraroten.

Im LRPT-Übertragungsmodus (Sendefrequenz 137,9 MHz) werden meist die beiden ersten drei Spektralbereiche ausgewählt, wie das untere Beispiel zeigt:

ch1: 500 nm – 700 nm**ch2:** 700 nm – 1100 nm**ch3:** 1600 nm – 1800

Für ein Falschfarbenbild (RGB) wird beispielsweise ch3, ch2 ch1 kombiniert, also für Rot die Grauwerte des dritten Kanals (ch3), für Grün die Grauwerte des zweiten Kanals (ch2) und für Blau die Grauwerte des ersten Kanals (ch1). Aber auch die Kombination ch2, ch2 ch1 ist möglich. Beide Versionen ergeben Falschfarbenbilder, die den realen Farben nahekommen, wie das untere Bild zeigt (ch3, ch2, ch1 und Bildverzerrung der Randbereiche softwaremäßig korrigiert).



Die schwarzen Linien in den Bildern entstehen immer dann, wenn der Empfang des Signals unter einen bestimmten Wert fällt. Das digitale Verfahren funktioniert ganz ähnlich wie beispielsweise das DAB-Radio: entweder man hat vollen Empfang mit gleichbleibender Qualität oder man hat überhaupt keine digitale Information. Im Gegensatz zur analogen Übertragung gibt es also keine Zwischenstufen, also keine Bildanteile, die mehr oder weniger verrauscht aber dennoch erkennbar sind (wie z.B. bei den NOAA-Bildern).

Wichtiger Hinweis:

Offenbar gibt es bei **Meteor M2-3** Probleme mit der LRPT-Antenne, die nicht korrekt ausgefahren werden konnte und daher eine falsche Neigung zur Erdoberfläche aufweist. Dies führt dazu, dass das Satellitensignal sehr ungleichmäßig und teilweise mit Ausfallerscheinungen zu empfangen ist. Meistens ist es so, dass der Empfang gut ist, wenn der Satellit aufgeht – also auf uns zukommt. Ausfälle und Schwund („Fading“) tauchen dann in der Phase auf, wenn der Satellit sich von uns entfernt – besonders, wenn er sich dem Horizont nähert.

Die Ausfälle beziehen sich allerdings eher auf einen kleinen Teil des jeweiligen Bildes (v.a. in Richtung Süden, wenn der Satellit von Norden kommt).

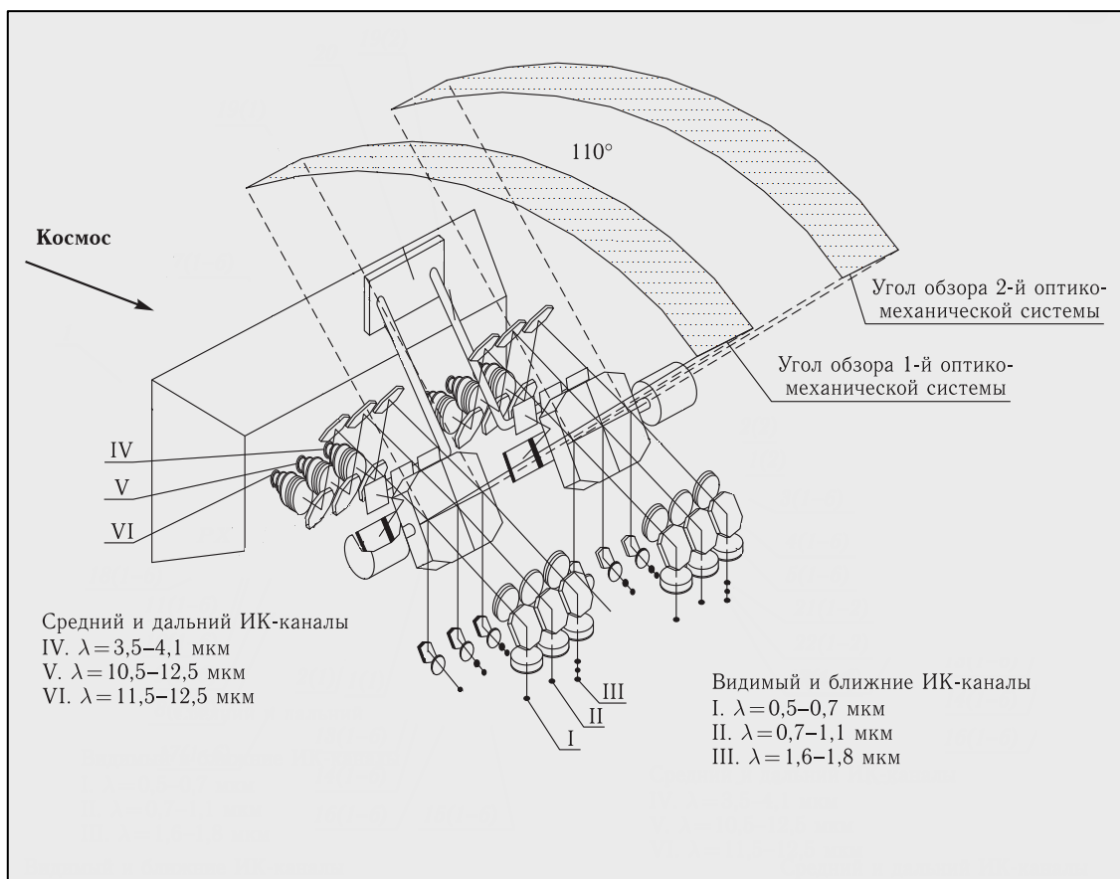
Meteor M2-4 funktioniert hingegen einwandfrei.

Der Bildscanner der Meteor-Satelliten

Es lohnt sich, einen Blick auf den Scanner (MSR-MU) der Meteor-Satelliten zu werfen. Die Scanner in den NOAA-Satelliten funktionierten übrigens auf ähnlicher Weise.

Der Scanner besteht aus zwei unabhängig voneinander rotierenden Spiegeln. Verwendet wird stets nur ein Spiegel – der andere ist ein Backup-System. Fällt ein System aus, wird auf das andere umgeschaltet. Ein Spiegel besteht aus einer speziellen Glaskeramik, ist 17,5 cm lang, 16,5 cm breit und 3,5 cm dick.

Der Spiegel rotiert 3,25-mal pro Sekunde, ist aber beidseitig beschichtet. Wenn der Spiegel sich einmal gedreht hat, hat er zweimal die Erde unter sich gescannt. Somit werden pro Sekunde 6,5 Bildzeilen aufgezeichnet (oder besser ausgedrückt: alle 2 Sekunden entstehen 13 Bildzeilen). Da die Optik aufgrund der Satellitenbewegung die Erdoberfläche mit einer Vorwärtsgeschwindigkeit von etwa 6580 m/s abtastet (s. Anhang), entsteht eine Bildauflösung von $\frac{6,580 \text{ km}}{6,5} = 1,01 \text{ km}$, also 1 km pro Bildzeile (bzw. pro Pixel in Vorwärtsrichtung).



<https://www.a-centauri.com/archivio/MSU-MR%20documentation.pdf>

Der Blickwinkel des Scanners nach links und rechts bzgl. der Flugrichtung beträgt 110°. Damit bildet eine Bildzeile eine Spanne von etwa 2800 km auf der Erdoberfläche ab. Dieser Wert variiert ein wenig – abhängig von der Flughöhe des Satelliten, die sich im Laufe der Jahre etwas absenkt. Genauer dazu im mathematischen Teil.

Kleinere (bewegliche) Spiegel, vor denen jeweils die Spektralfilter angebracht sind, leiten das Licht in die entsprechenden Sensoren (in der Abbildung mit den römischen Ziffern gekennzeichnet). Die Infrarot-Sensoren werden passiv gekühlt, indem Sie mit dem Metallmantel des Scanners thermisch gekoppelt sind

SOFTWARE

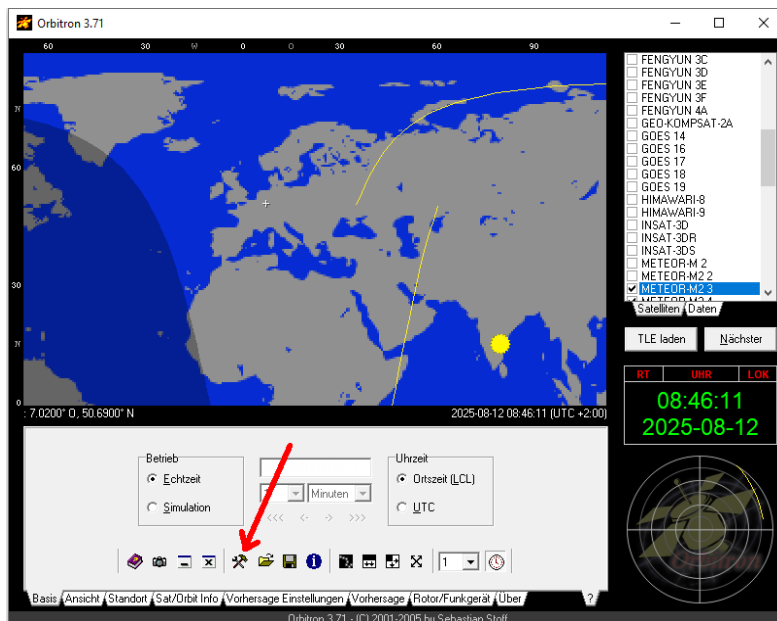
Das Programm ORBITRON

ORBITRON ist ein altbewährtes Satelliten-Tracking Programm, das sich zur Vorhersage der Überflugzeiten der polumlaufenden Satelliten bestens eignet. Entwickelt wurde es von Sebastian Stoff und lässt sich frei herunterladen von <https://www.stoff.pl>

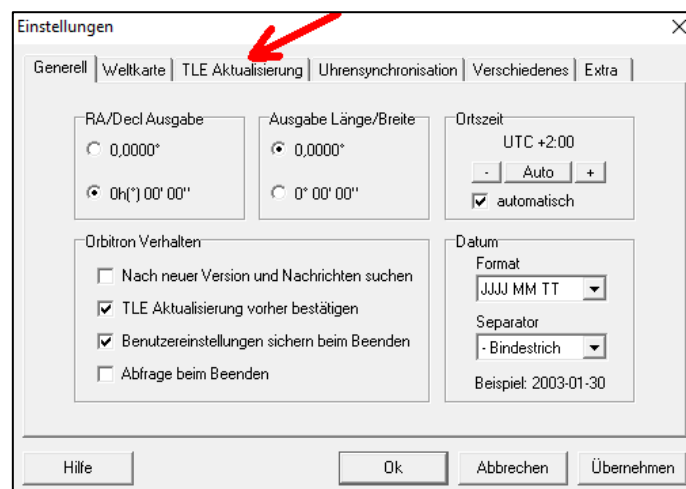
Als erstes sollte man die Koordinaten der Empfangsstation (Reiter: „Standort“) eintragen. Wichtig ist auch die regelmäßige Aktualisierung der Keplerdaten der Satelliten. Dies ist bei dem Programm ein wenig unübersichtlich geraten. Hier die einzelnen Schritte:

Aktualisierung der Kepler-Daten:

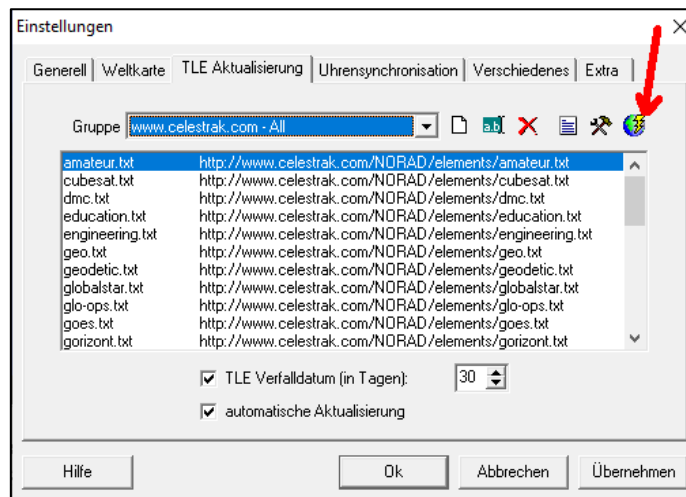
1. Das Werkzeug-Symbol anklicken



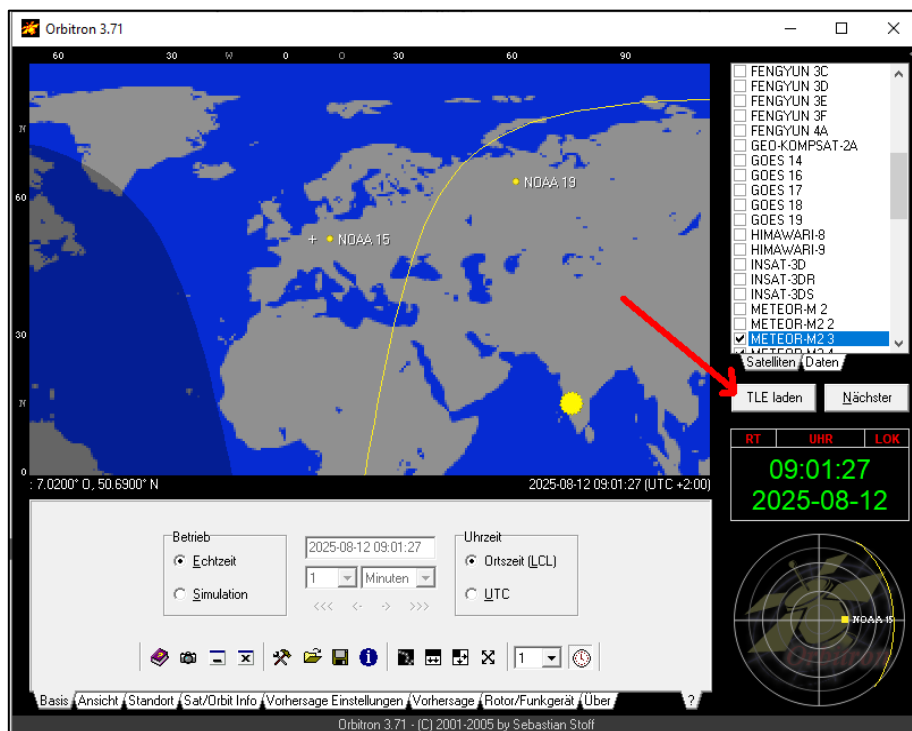
2. Es öffnet sich das folgende Fenster - dort TLE Aktualisierung anklicken



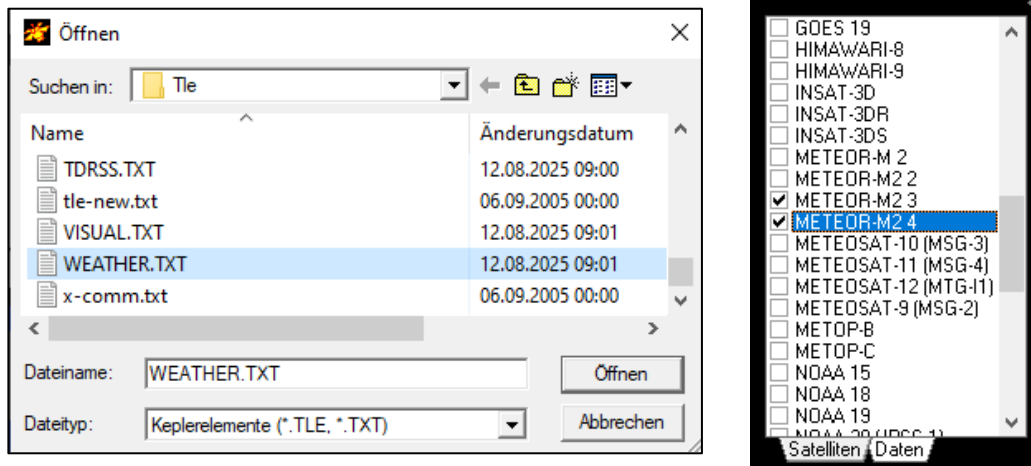
- Es öffnet sich ein Fenster mit einer Liste aller Satelliten. Dort auf das Symbol oben rechts klicken. Die aktuelle Liste der Keplerdaten wird dann geladen – von allen aufgelisteten Satelliten.



- Nachdem die Listen geladen wurden (dauert einige Sekunden) OK drücken und im Hauptprogramm den Button „TLE laden“ drücken.



- Es öffnet sich ein Fenster mit den Satelliten-Listen. Nach unten scrollen und „WEATHER.TXT“ auswählen. Es werden dann alle bekannten Wettersatelliten in das rechte längliche Fenster geladen. Dort kann man dann z.B. Meteor-M2-3 und Meteor-M2-4 auswählen.



Damit ist die Aktualisierung abgeschlossen. Sie sollte wöchentlich durchgeführt werden. Das Verfahren ist etwas umständlich – vielleicht gibt es einen schnelleren Weg. Für Hinweise wäre ich dankbar 😊.

Vorhersage:

Wenn Sie auf den Reiter „Vorhersage“ klicken, wird eine Liste der nächsten Überflüge derjenigen Satelliten, die Sie im rechten Fenster ausgewählt hatten, ausgegeben. Wenn Sie in dieser Liste einen Überflug anklicken, wird in der Graphik die Satellitenbahn gezeigt.

Wenn Sie dann den Reiter unten links „BASIS“ anklicken, können Sie im Simulationsmodus den Satelliten hin- und her wandern lassen.

Es dauert etwas, bis man sich mit dem Programm vertraut gemacht hat – aber es ist dann ein sehr nützliches und schnelles Werkzeug.

Das Programm SATDUMP

Dieses Programm ist wirklich ein **Geniestreich**. Es ermöglicht den Empfang von Satelliten mithilfe digitaler SDR-Empfänger-USB-Sticks, decodiert die einfließenden digitalen Daten in Echtzeit, erzeugt Bilder in vielen verschiedenen Versionen, ermöglicht die Verschmelzung von Bildern nebeneinanderliegender Bahndurchgänge eines Satelliten und vieles mehr. Das alles in einem Programm, das zudem frei verfügbar ist und stetig verbessert und aktualisiert wird. Die Software läuft auf Windows, macOS und Linux.

Herunterladen lässt sich die Software von <https://www.satdump.org>

Erste Schritte:

Öffnen Sie das Programm und wählen Sie den Reiter „**Settings**“ und dort „*General SatDump*“.

Geben Sie dort die Koordinaten ihres Standortes (QTH) ein (Latitude → geographische Breite, Longitude → geographische Länge) Beispiel für Bonn: 50.3 und 7.1)
„Save“ nicht vergessen.

Wechseln Sie zum Reiter „**Recorder**“.

- *Device:*

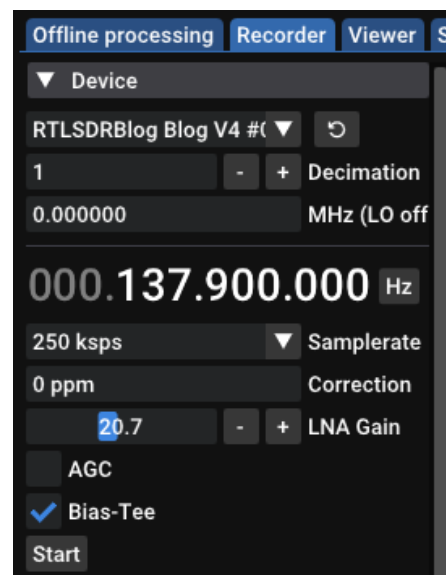
Wenn Sie zuvor den Treiber Ihres SDR-Empfänger-Sticks installiert haben und den Stick vor Öffnen des Programms mit dem Laptop verbunden haben, sollten Sie unter „File Source“ ihren Empfänger-Stick finden und auswählen.

(Hier: RTLSDRBlog Blog V4, oder auch Nooelec SMARTEE)

Stellen Sie die Frequenz ein: 137.900.000 Hz

Für die die Einstellung der Eingangsverstärkung (LNA) hat sich ein Wert um die 20 bewährt, wobei ein zusätzlicher HF-Verstärker (SAWBIRD+NOAA) über *Bias-Tee* mit 5V versorgt wird. Diese Spannungsversorgung, die durch den USB-Empfänger-Stick zum Vorverstärker durchgereicht wird, wird mit Bias-Tee ein- oder ausgeschaltet. Dies funktioniert aber nur bei SDR-Empfängern, die „Bias-T-fähig“ sind.

Wenn Sie „Start“ drücken, erscheint das Frequenzspektrum im rechten Fenster mit der „Wasserfall-Anzeige“. (Wie eine **BIAS-T Schaltung** funktioniert, wird im **Anhang** erklärt.)



- *FFT*

Mit dem Button „FFT“ können die Amplitude der Signale einstellen. Dies ist allein für die Optik des Spektrums interessant – das Signal an sich wird dadurch nicht verändert. Gleiches gilt für die Wasserfallanzeige, die man auch komplett ausblenden kann, wenn man möchte.

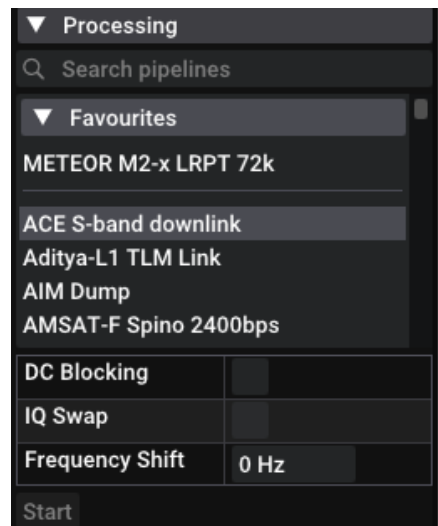


- *Processing*

Hier wird die Art der Dekodierung ausgewählt. Für die Meteor-Satelliten suchen Sie unter „Search-Pipeline“ die Einstellung *METEOR M2-x LRPT 72k*.

Wenn Sie dort doppelklicken, wird diese Einstellung als Favorit gespeichert und beim nächsten Öffnen des Programms angezeigt.

Wenn Sie den Empfang gestartet haben (Device → Start) und nun den Start-Button unten bei Processing drücken, beginnt die Dekodierung der empfangenen digitalen Daten – vorausgesetzt, das HF-Signal (Signal-rauschabstand) ist stark genug. Vorher sollten Sie jedoch das Tracking-Fenster öffnen und einstellen, damit sie die Bahn des Satelliten verfolgen können.

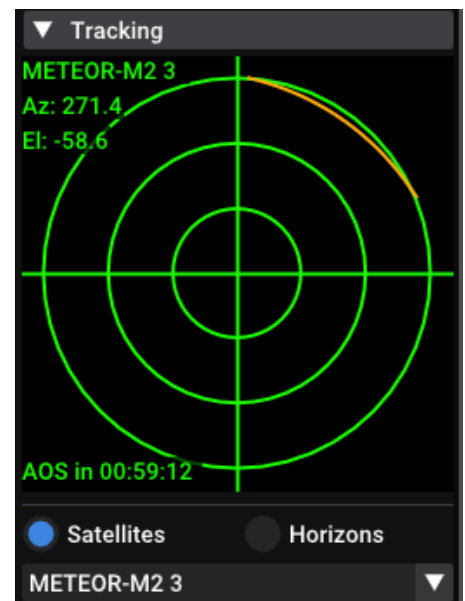


- *Tracking*

Meist ist dort als Satellit bereits NOAA 15 eingestellt. Um die Meteor-Satelliten auszuwählen, klicken Sie auf NOAA 15. Es öffnet sich eine Liste und darüber ein Suchfenster. Tippen Sie dort „Met“ ein und wählen Sie dann *METEOR-M2 3* oder *METEOR-M2 4* aus.

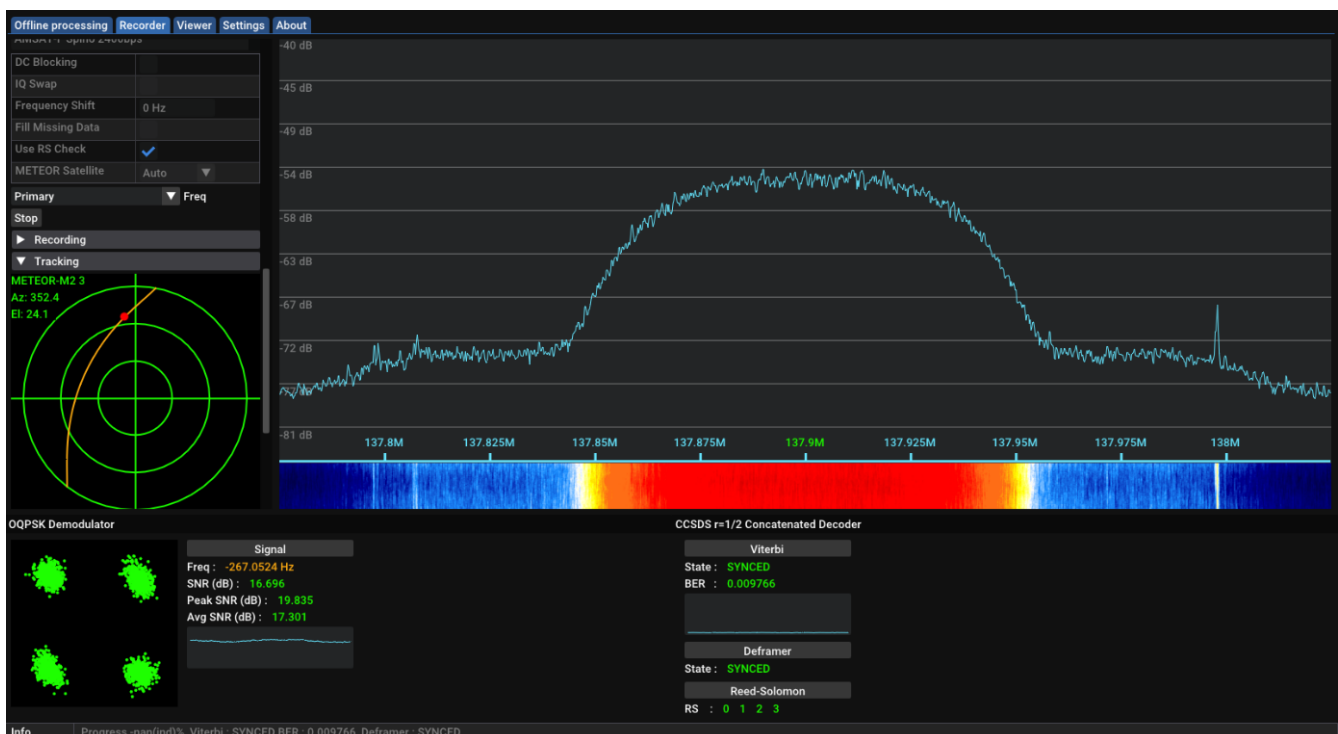
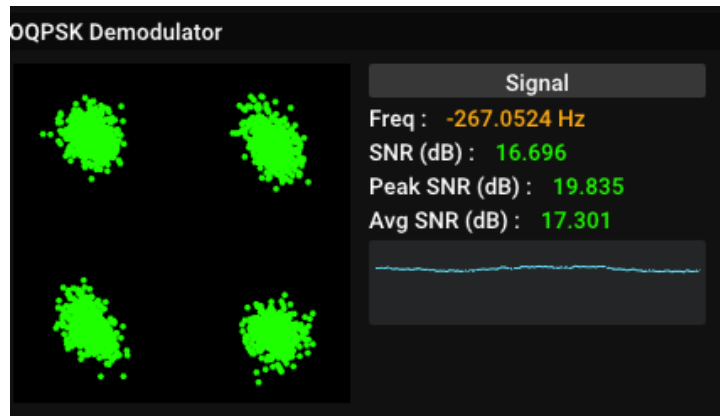
Die nächste Bahn des Satelliten wird im Fadenkreuz (oben Norden, links Westen) angezeigt und wenn der Satellit „sichtbar“ wird, erscheint er als roter Punkt auf dieser Bahnkurve. Dies hilft bei der Orientierung der Antenne und zeigt, welchen Neigungswinkel (Elevation) der Satellit zurzeit aufweist.

Die Dekodierung sollten Sie dann starten (Start-Button unten bei *Processing*), wenn der rote Punkt erscheint und im Frequenzspektrum die Hochfrequenz als deutlicher „Buckel“ zu erkennen ist.



Die untere Abbildung zeigt eine ideale Empfangssituation.

Wenn die vier Punktwolken unten links getrennt erscheinen, wird das Signal erkannt und dekodiert („Vier-Phasen_Kodierung). Im Frequenzspektrum ist das Empfangssignal deutlich zu sehen. Das Signal-Rausch Verhältnis (SNR) lag aktuell bei etwa 16,7db, der maximale Wert bei 19,8db. Das sind sehr gute Werte, obwohl der Satellit noch verhältnismäßig flach über dem Horizont war (Elevation: 24°). Die Bahn verlief von Nord nach Süd. Die Kreise geben eine Orientierung über dem Elevationswinkel (0°, 30° und 60°)



Wenn die vier Punktwolken zusammenbrechen (unter einem SNR von ca. 6 bis 7db) und sich zu einer großen Punktwolke vereinen, wird das Signal nicht erkannt – in der Bildaufzeichnung entstehen dann schwarze Linien.

Wenn das Signal komplett verschwindet, weil der Satellit nicht mehr sichtbar ist, drücken Sie den *Stop-Button* des Processing.

Wichtig: Dann etwa 1- bis 2 Minuten warten, denn in dieser Zeit nach Beendigung des Empfangs erzeugt das Programm automatisch die Bilder in verschiedenen Formaten und speichert diese auf den Laptop (Voreinstellung: Dokumente → live-Output.)

Dieser Prozess wird ganz unten im Programmfenster in einer Status-Anzeige gezeigt – allerdings sehr klein in grauer Schriftfarbe und bei heller Umgebung kaum zu erkennen. Wenn dort „Done Goodbye“ erscheint, ist alles fertig und sie können das Programm schließen und sich die Ergebnisse im Speicherordner ansehen.

Offline-Processing

Die digitalen Daten eines Satellitenempfangs wurde, wenn alles gut funktioniert hat, im Speicherort abgelegt und können zur Bilderzeugung verwendet werden.

Das kann sinnvoll sein, wenn Sie z.B. schwarze Linien in den Bildern „korrigieren“ lassen wollen.

Öffnen Sie dazu den Reite „Offline processing“

Hier ein Beispiel:

The screenshot shows the SatDump v1.2.2 application window. The 'Offline processing' tab is active. It features a search bar for pipelines, a list of favourites including 'METEOR M2-x LRPT 72k', and a list of available links: 'ACE S-band downlink', 'Aditya-L1 TLM Link', 'Aeolus Dump', and 'AIM Dump'. Below this, there are input fields for 'Input File' (C:\Users\borch\Documents\live_output\2025-08-13-10-28_meteor_m2-x_lrpt_137.9 MHz\meteor_m2-x_lrpt.cadu), 'Output Directory' (C:\Users\borch\Documents\live_output\Test), and 'Input Level' (cadu). A 'Start' button is located at the bottom left. On the right, a settings table allows configuration of various parameters.

Baseband Format	cs16
Samplerate	1 Msps
DC Blocking	☒
IQ Swap	☐
Frequency Shift	0 Hz
Fill Missing Data	☐
Use RS Check	☒
METEOR Satellite	Auto

Sollte ihr Bild einige schwarze Striche enthalten, weil das Signal während der Aufzeichnung zusammengebrochen war, können Sie auch „Fill Missing Data“ auswählen. Dann wird ein zweiter Bildordner angelegt, bei dem die schwarzen Linien durch Interpolation der Nachbar-Pixel ersetzt werden. Bei wenigen schwarzen Linien ist das sinnvoll und fällt kaum auf – bei vielen schwarzen Linien oder sogar schwarzen Balken ist das weniger sinnvoll. Aber das ist Geschmackssache. Bei der letzten Zeile können Sie anstatt „Auto“ auch konkret den Satellitennamen auswählen.

Wenn Sie nun Start drücken, werden die erzeugten Bilder in den angegebenen Speicherort erzeugt – dauert aber ein wenig.

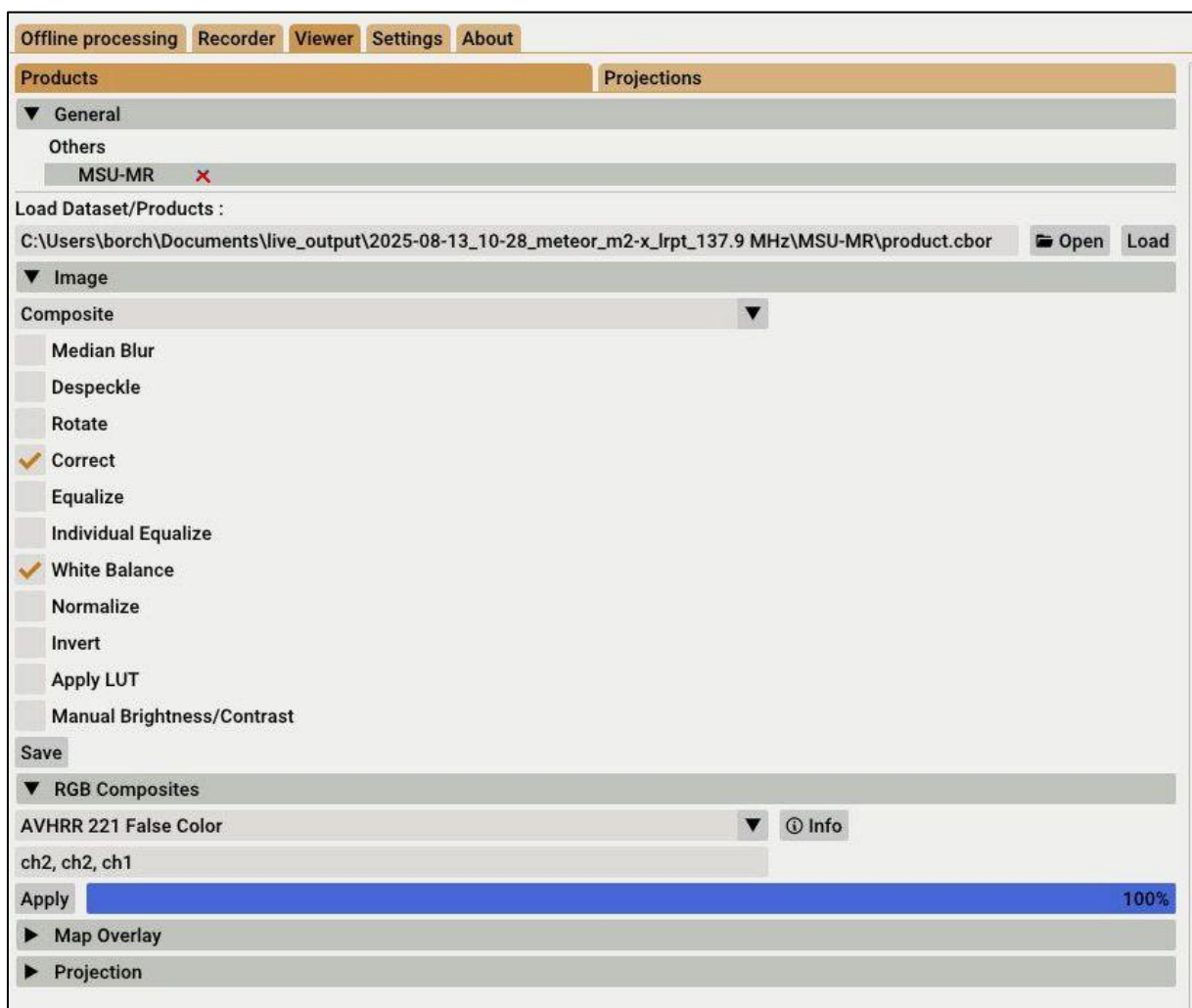
Viewer

Der Viewer bietet interessante Möglichkeiten. Zum einen können Sie aus den gespeicherten digitalen Daten die Bilder individueller erzeugen (z.B. bestimmte Spektralkanäle auswählen). Zum anderen bietet sich die Möglichkeit, nebeneinanderliegende Satellitenpassagen zu einem Gesamtbild zu verschmelzen.

Bilder individuell erzeugen

Wählen Sie im MSU-MR Ordner die Datei „*product*“ aus.

Unter „Image“ können Sie nun verschiedene Optionen wählen. Im Beispiel wurde RGB Composite gewählt, um ein Falschfarbenbild aus den Spektralkanälen 2,2,1 zu erzeugen. Sie können aber auch nur die Kanäle einzeln auswählen und bearbeiten. Es ist auch möglich, Landesgrenzen, Städte usw. eintragen zu lassen (→ Map Overlay)



Satellitenpassagen verschmelzen

Sie haben beispielsweise zwei nebeneinanderliegende Satellitenpassagen aufzeichnen können und wollen nun die beiden Bilder der Erdoberfläche nahtlos aneinanderfügen.

Wählen Sie wie oben beschrieben im Viewer unter „Products“ eine Aufzeichnung aus und erzeugen z.B. ein RGB-Bild, das Sie noch bearbeiten können. Aber auf keinen Fall „Correct“ auswählen. Das Bild muss verzerrt bleiben. Die Korrektur führt das Programm automatisch durch, wenn es die Bilder zusammenfügt.

Drücken Sie dann den untersten Button „Projection“ und wählen Sie dort „Add to Projections“.

Um das nächste Produkt zu laden, müssen Sie das aktuelle löschen. Drücken Sie dazu das kleine rote Kreuz oben bei MSR-MU. Das aktuelle Produkt verschwindet und Sie können die nächste Satellitenbahn auswählen und laden und das Bild möglichst genauso bearbeiten, wie das vorherige.

Wählen Sie auch hier wieder unten „Projection“ und „Add to Projections“.

Nun wechseln Sie oben den Reiter und wählen dort „Projektions“

Wenn Sie dort „Layers“ auswählen, erscheinen dort die Thumbnails der ausgewählten Bilder. Bei *Mode* können Sie festlegen, ob die beiden Bilder transparent verschmolzen werden sollen („Blend“, wird dadurch manchmal etwas unschärfer, aber die Trennlinie zwischen den beiden Bildern verschwindet deutlicher) oder das eine Bild über das andere gelegt wird. Die Reihenfolge, ob das linke über dem rechten liegt oder andersherum, hängt von der Reihenfolge der Thumbnails ab. Die Reihenfolge können Sie ändern, indem Sie die Vorschau-Bilder mit dem Cursor einfach gegenseitig verschieben.

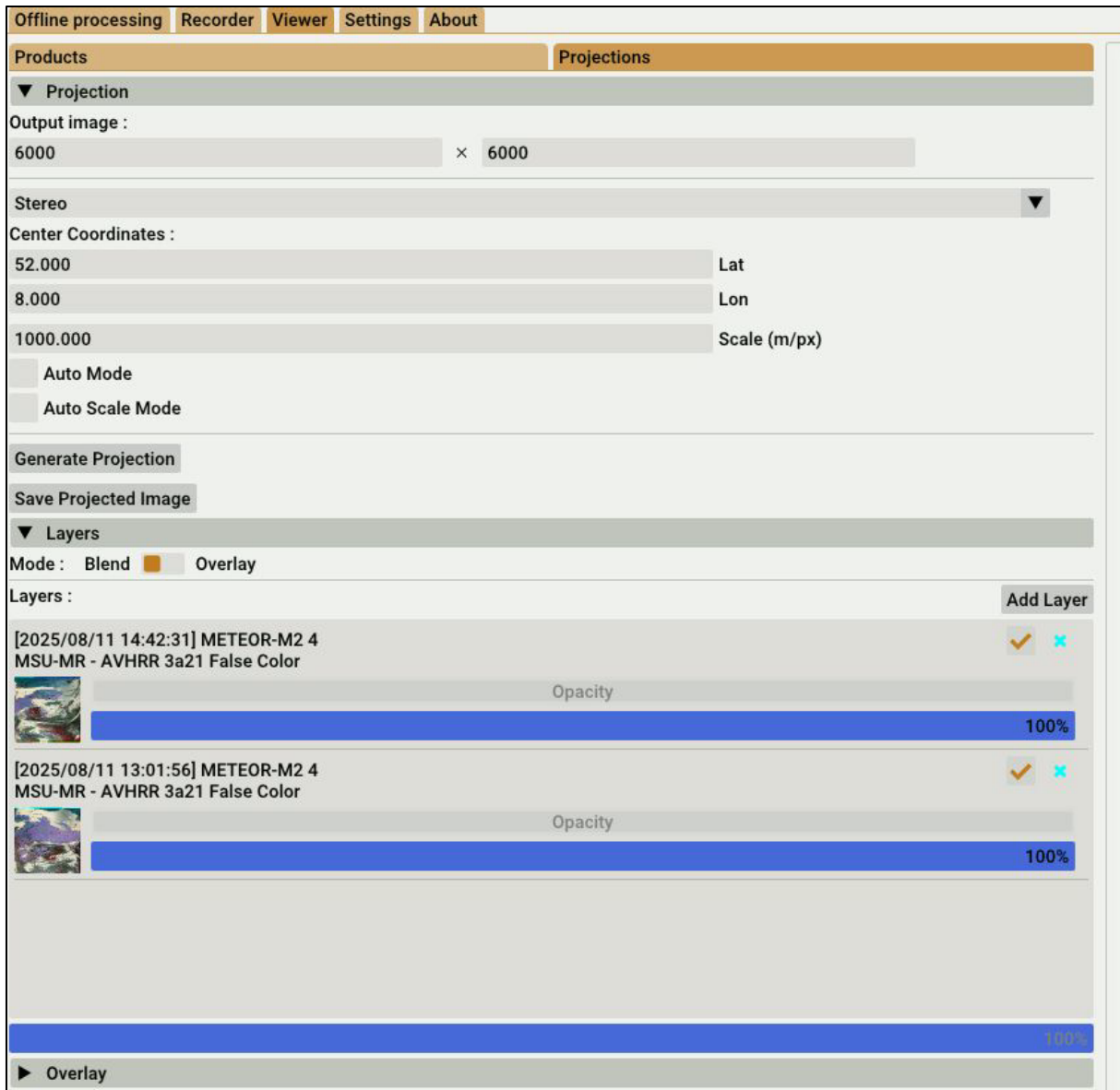
Wählen Sie als Projektionsart „Stereo“ (stereographische Projektion). Latitude und Longitude sollte in etwa die Koordinaten des Gesamtbildes sein. Wenn Sie 1000 m pro Pixel (also 1 km/px) als Auflösung wählen, müssen Sie die Bildgröße ungefähr angeben. Die Bildstreifen sind ja 2800 px breit und können über 6000 px lang sein – je nach Aufnahmedauer der Satellitenbahnen. In dem Beispiel liegt die Bildmitte wahrscheinlich im Bereich 52 / 8 (geschätzt) und als Bildgröße wurde 6000x 6000 (Pixel) gewählt.

Bei dem Button Overlay wurde bei dem Beispiel alles deaktiviert.

Wenn Sie auf „Generate Projection“ klicken, startet die Bildverarbeitung, die einige Zeit in Anspruch nehmen kann.

Die Abbildungen zeigen die Einstellungen, die beiden Rohbilder und das zusammengefügte Bild.

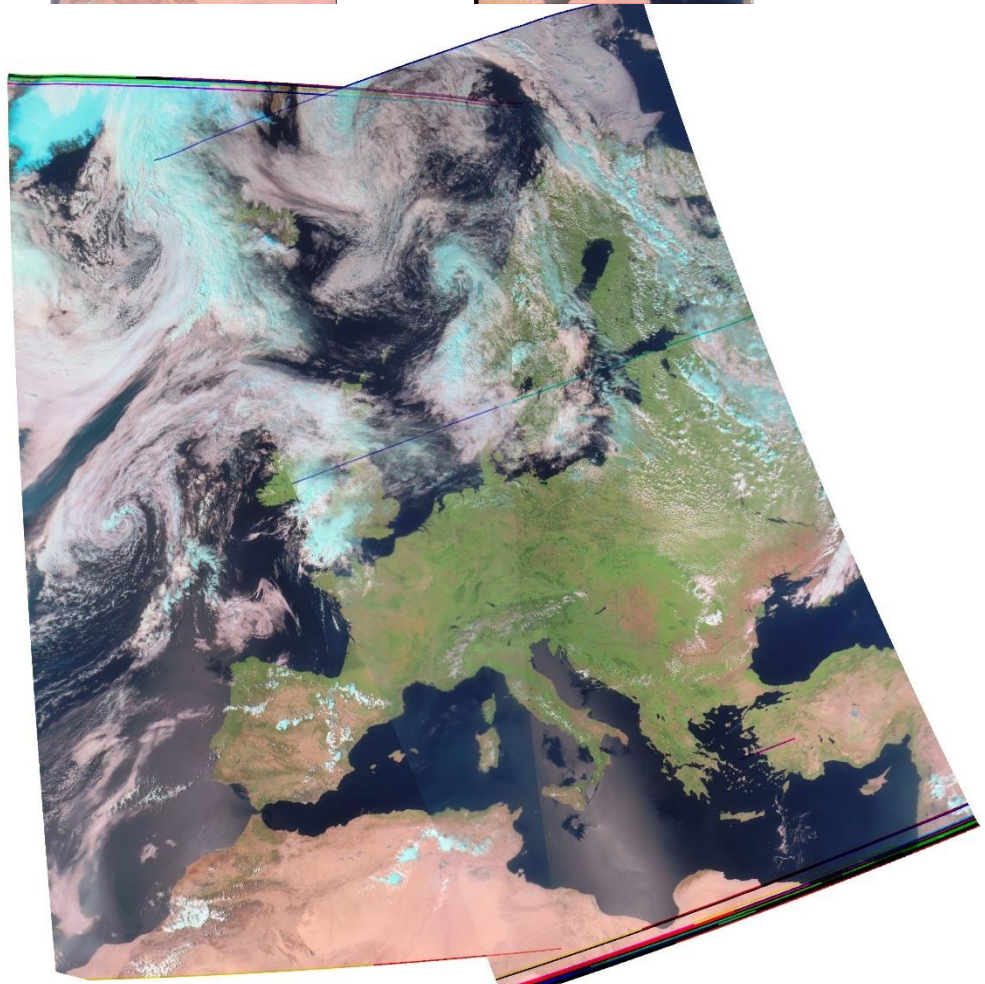
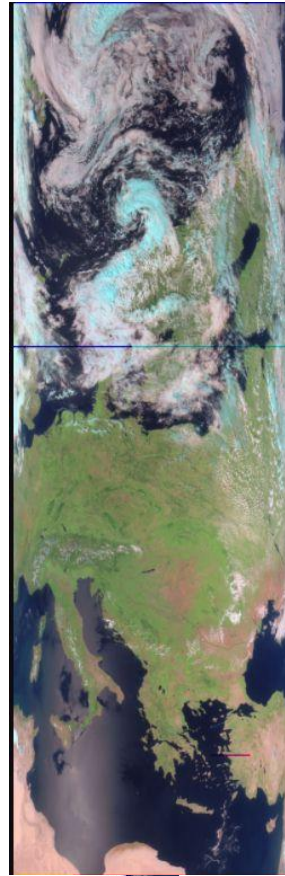
Dieses Verfahren lässt sich natürlich auch mit drei oder sogar mit vier Bildstreifen durchführen, falls man tatsächlich drei oder vier nebeneinanderliegende Satellitendurchgänge aufnehmen konnte.



Mit den Einstellungen *Auto Mode* und *Auto Scale* bin ich nicht zurechtgekommen. Die besten Ergebnisse wurden daher mit dem oben beschriebenen Verfahren erzielt.

TIPP:

Noch ein Hinweis zum **Empfang** und Aufzeichnung der Satelliten-Signale: In der Regel geht man mit der Antenne und dem Laptop nach draußen und sucht sich einen Platz, von dem man eine möglichst störungsfreie Sicht auf die Satellitenbahn hat. Wenn allerdings die Sonne scheint und es (besonders im Hochsommer) sehr hell draußen ist, lassen sich die Ereignisse auf dem Laptop-Display kaum noch erkennen. Es ist aber wichtig, dass man die Empfangsqualität im Programm SATDUMP gut erkennt, da man danach ständig die Orientierung Antenne per Hand optimieren sollte. Daher ist u.U. eine Abschattung (z.B. ein großer Karton) sinnvoll.

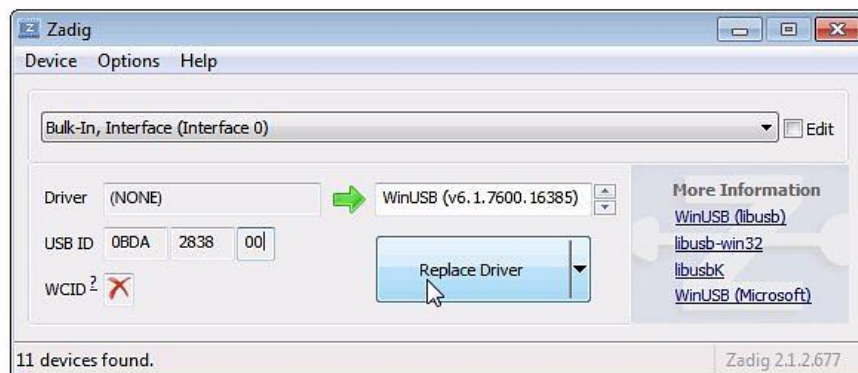


Hinweis:

Nicht alle SDR-Empfänger-Sticks werden von der Software automatisch erkannt. Manchmal müssen die Treiber von Hand installiert werden. Ich selbst verwende einen RTL-SDR-V4 Dongle, der sehr gut funktioniert. Wie man einen Treiber dafür installiert, wird z.B. auf der Seite <https://www.rtl-sdr.com/rtl-sdr-quick-start-guide> erklärt.

Installing Zadig drivers

1. Purchase an RTL-SDR dongle. The cheapest and best for most applications is the R820T/R820T2/R860 dongle. Information on purchasing one [can be found here](#).
2. Plug in your dongle and do not install any of the software that it came with, but ensure you let plug and play finish trying to install it. If you've already installed the software drivers it came with previously, uninstall them first.
3. Go to zadig.akeo.ie and download Zadig.
4. In Zadig, go to **Options->List All Devices** and make sure this option is checked.
5. Select "**Bulk-In, Interface (Interface 0)**" from the drop down list. Note on some PCs you may see something like **RTL2832UHIDIR** or **RTL2832U** or **Blog V4** instead of the bulk in interface. This is also a valid selection. Double check that USB ID shows "0BDA 2838 00" as this indicates that the dongle is selected.
WARNING: Do not select anything else or you will overwrite that device's driver! DO NOT click around randomly on Zadig. If you do you are likely to overwrite your mouse, keyboard, printer, soundcard etc drivers.



6. **Make sure the box to the right of the arrow shows WinUSB.** You might get a warning that the publisher cannot be verified, but just accept it by clicking on Install this driver software anyway. This will install the drivers necessary to run the dongle as a software defined radio. Note that you may need to run zadig.exe again if you move the dongle to another USB port, or want to use two or more dongles together.



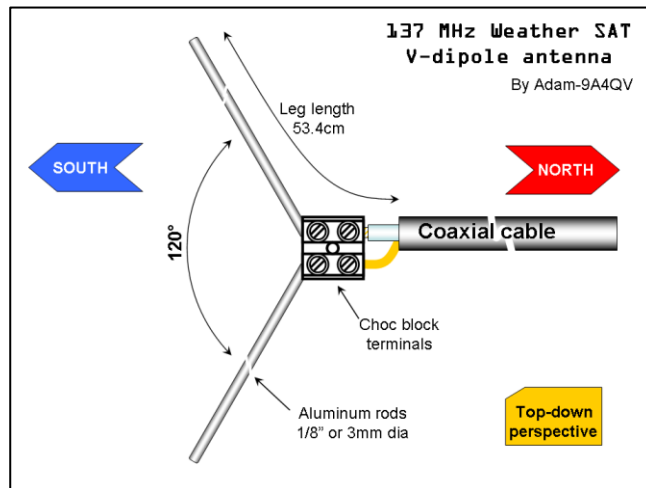
Antennen und Empfänger

V-Dipol

Einfach zu bauen, wobei die Empfangsergebnisse erstaunlich gut sind – vorausgesetzt, die Satellitenbahn verläuft nicht zu flach. Für erste Versuche also gut geeignet.

Eine Internet-Bauanleitung:

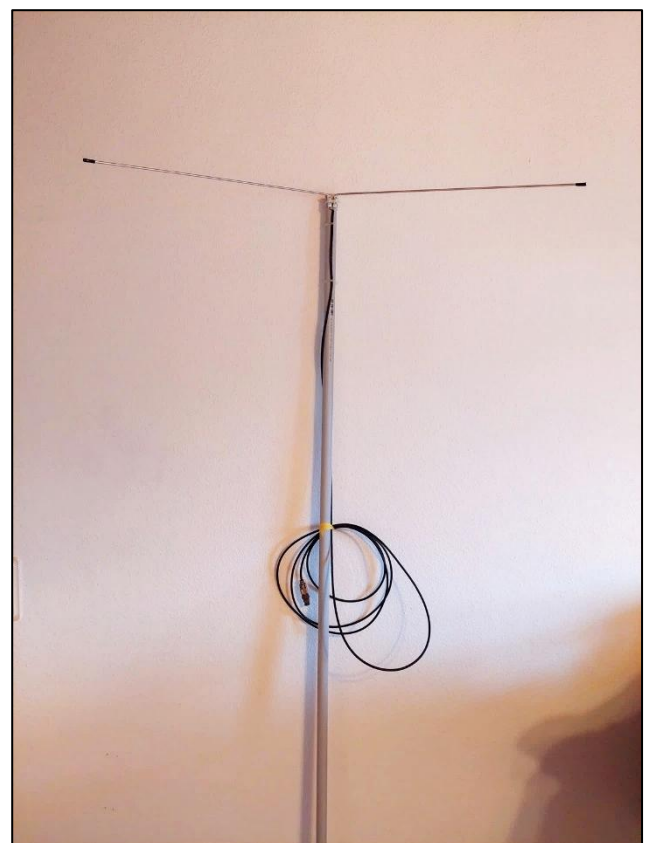
<https://lna4all.blogspot.com/2017/02/diy-137-mhz-wx-sat-v-dipole-antenna.html>

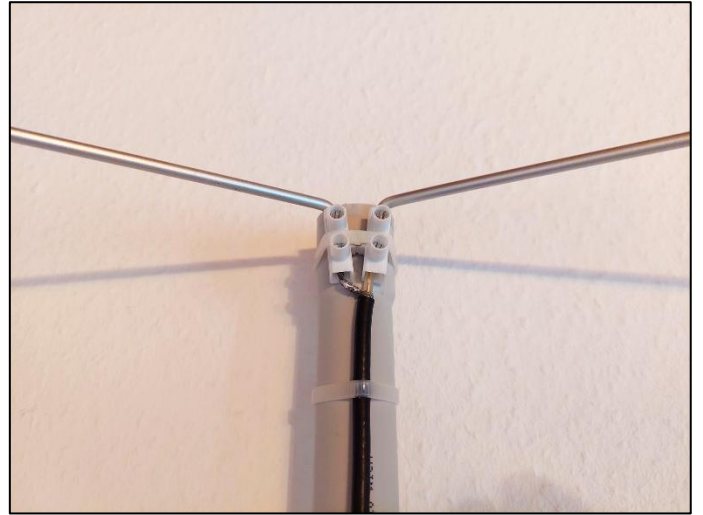


Anmerkungen:

- Der Winkel von 120° sorgt dafür, dass der Dipol, der normalerweise eine Impedanz von etwa 72 Ohm hat, auf das Koaxialkabel (RG 58) mit 50 Ohm angepasst wird.
- Die Länge der beiden Dipolhälften reicht bis zur Ummantelung des Koaxialkabels
- Aluminiumstäbe mit 3 bis 5 mm Durchmesser sind gut geeignet
- Die Enden der Dipolstäbe unbedingt mit Plastik- oder Gummikappen versehen (oder Isolierband), um Augenverletzungen oder ähnliches zu vermeiden.

Hier einige Bilder der eigenen Konstruktion:
25 mm Kabel-Leerrohr, Alu-Stäbe 4mm massiv (lässt sich besser biegen), passende Lüsterklemme, Koaxialkabel (RG 58 – 50 Ohm) mit BNC-Stecker.



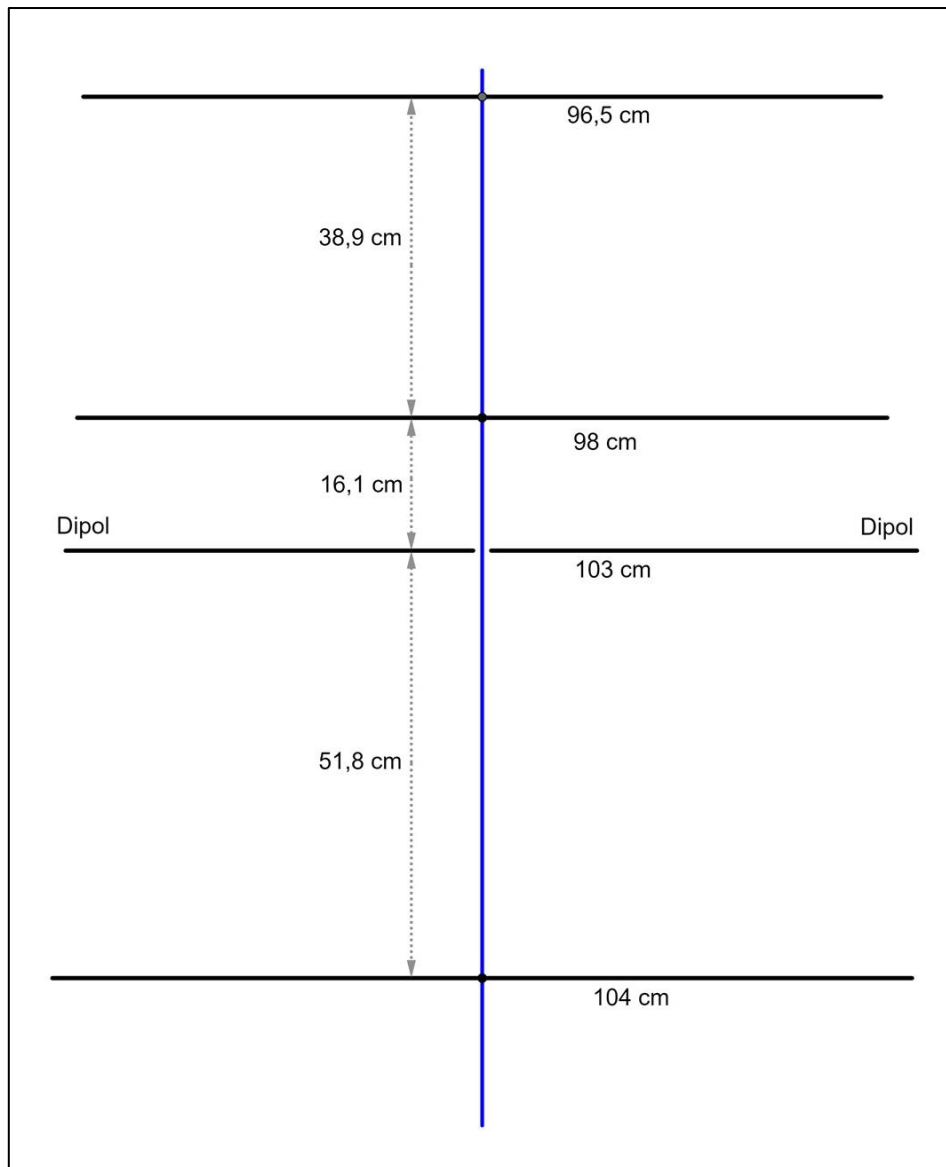


Yagi-Antenne – 138 MHz

Auch diese Antenne ist nicht schwierig zu bauen. Materialkosten (Baumarkt) unter 20 Euro, Koaxialkabel (RG 58) mit BNC-Buche müsste online bestellt werden falls nicht bereits vorhanden

Vorteile:

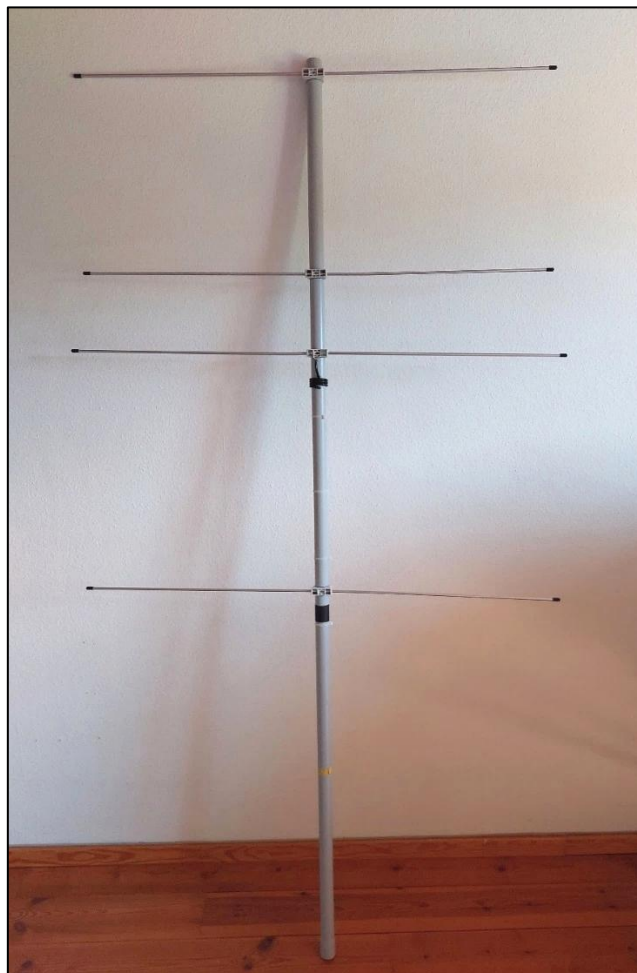
- Eine Richtwirkung und daher ein Gewinn von bis zu 6 bis 7 db gegenüber einem Einfach-Dipol. Die Richtwirkung ist nicht kritisch – bei einer Nachführung per Hand liegen die Toleranzen bei ca. $\pm 40^\circ$ - 50°
- Satelliten sind auch noch in Horizontnähe gut zu empfangen (Voraussetzung: freie Sicht Richtung Satellit. Gebäude, Bäume usw. erschweren den Empfang oder machen ihn sogar unmöglich. Aber teilweise hat man noch guten Empfang auch vom Dachboden (freistehendes Haus) aus. (Solarpanel auf dem Dach schirmen allerdings das Satellitensignal fast vollständig ab)

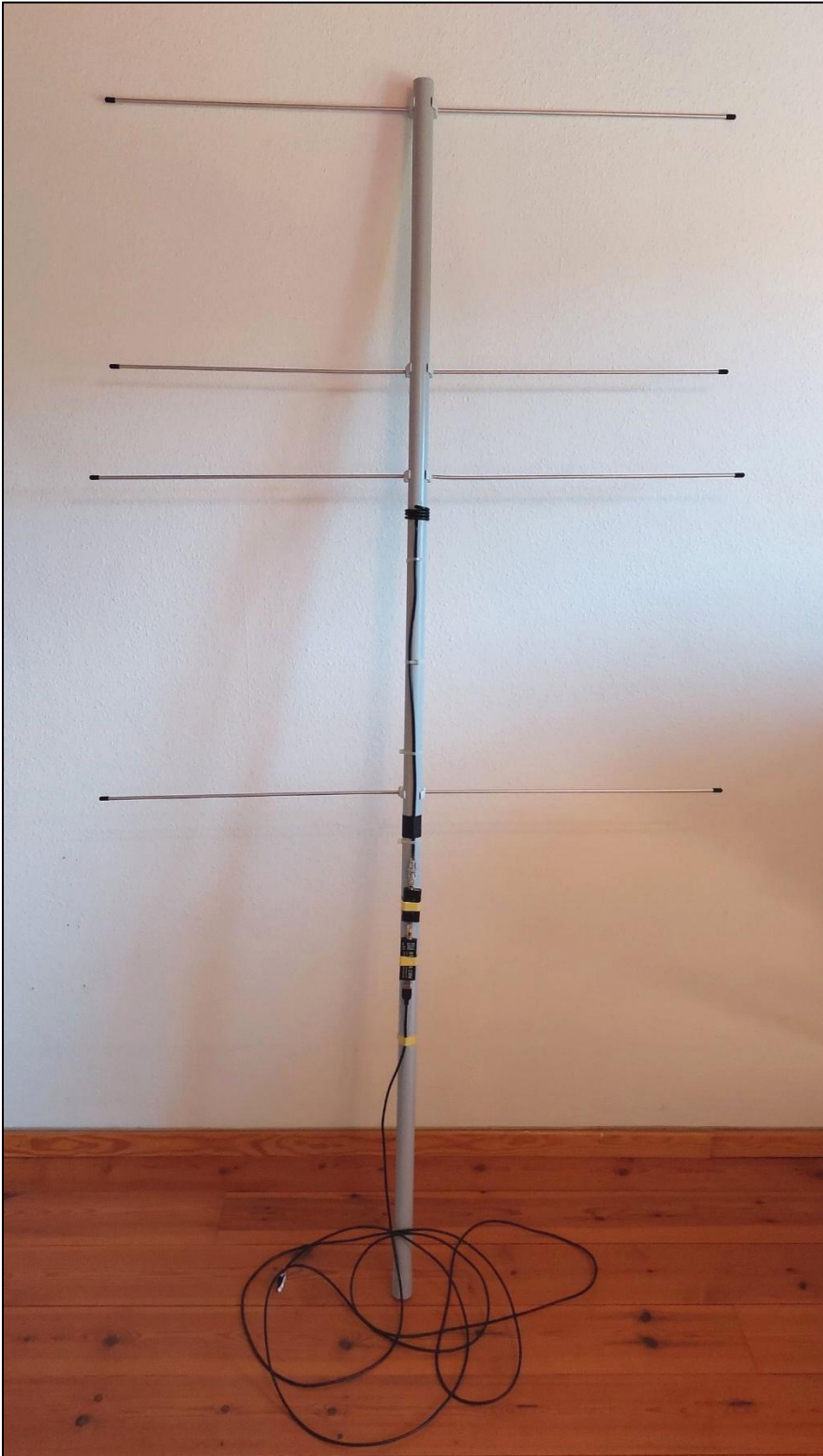


Eine etwas andere Dimensionierung (deutlich kürzere Bauform) der Antenne finden Sie auf Seite 38.

- Aluminium-Rundrohre (innen hohl), 6mm
(Da zwei Stäbe über 1 m lang sein sollen, müsste man zweimal 2 m-Rohre kaufen, was einiges an Verschnitt ergibt. In manchen Baumärkten (Bauhaus?) gibt es aber auch 2,5-m lange Aluminiumrohre. Die wären dann ideal)
- Kabel-Leerrohr (32 mm Durchmesser und 2 m Länge)
- Rohrschellen (Wandbefestigungen für die Leerrohre)
- Kabelbinder, Isolierband
- Koaxialkabel (RG 58, 50 Ohm) mit BNC-Stecker
- Die Enden der Dipolstäbe unbedingt mit Plastik- oder Gummikappen versehen (oder Isolierband), um Augenverletzungen oder ähnliches zu vermeiden.
- Achtung: Da die Dipolhälften in der Halterung einen Abstand von ca. 10 mm haben, müssen sie beiden Hälften etwas kürzer gewählt werden (je 5mm kürzer). Die Gesamtlänge ist dann 103 cm.

Bauanleitung für eine 4-Elemente-Yagi Antenne



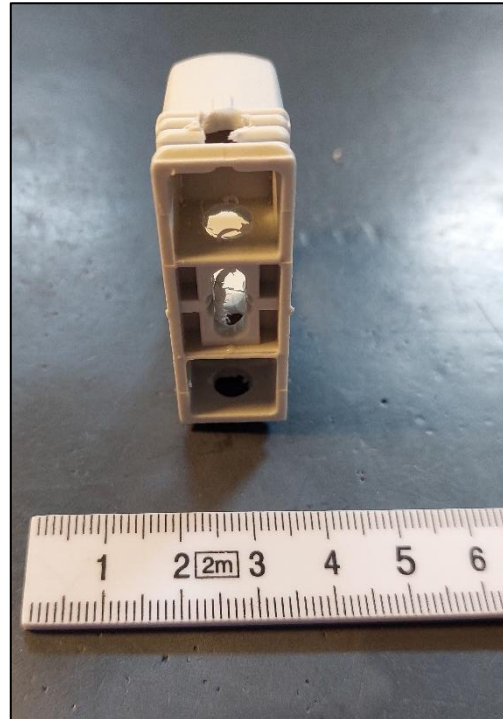
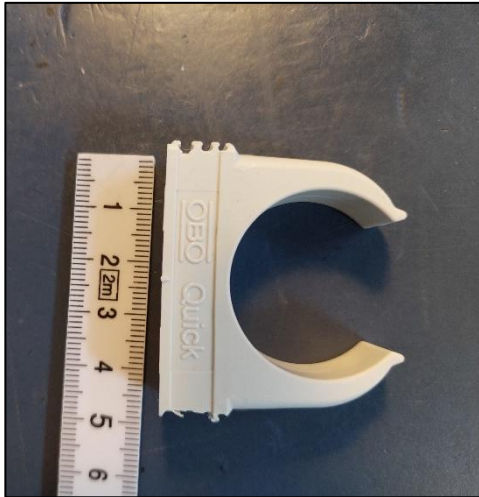


Die Klammern (Rohrschellen) werden mit einem 6mm Bohrer für die Aufnahme der Aluminiumstäbe durchbohrt. Allerdings sind nicht alle im Handel erhältlichen Rohrschellen geeignet. Sie müssen nämlich einen Steg aufweisen, der hoch genug ist, die Bohrungen für die Aluminiumstäbe aufzunehmen. Als geeignet haben sich beispielsweise die abgebildeten erwiesen (Bauhaus). Aber sicher gibt es vergleichbare, die ebenfalls für das Projekt geeignet sind.

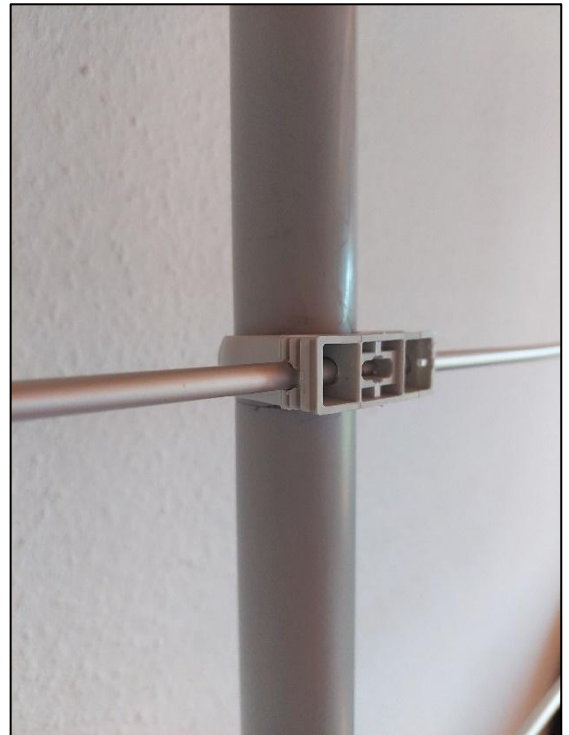
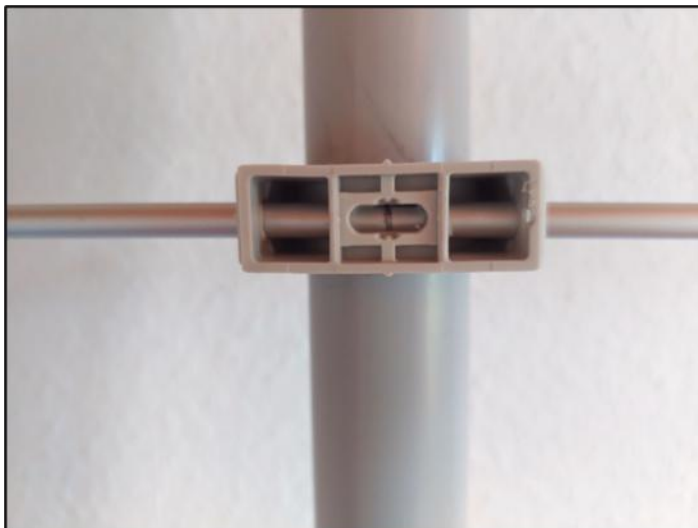


Achtung: Sicherheit beim Bohren mit der Maschine

- Rohrschellen in einem Schraubstock oder Ähnliches einklemmen – auf keinen Fall das Werkstück beim Bohren in der Hand halten.
- Bei langen Haaren besteht die Gefahr, dass sich die Haare im Bohrer verfangen, was üble Verletzungen nach sich ziehen kann. Daher unbedingt lange Haare so zusammenbinden, dass sie nicht in die Nähe der Bohrmaschine kommen können.
- Augenschutz tragen

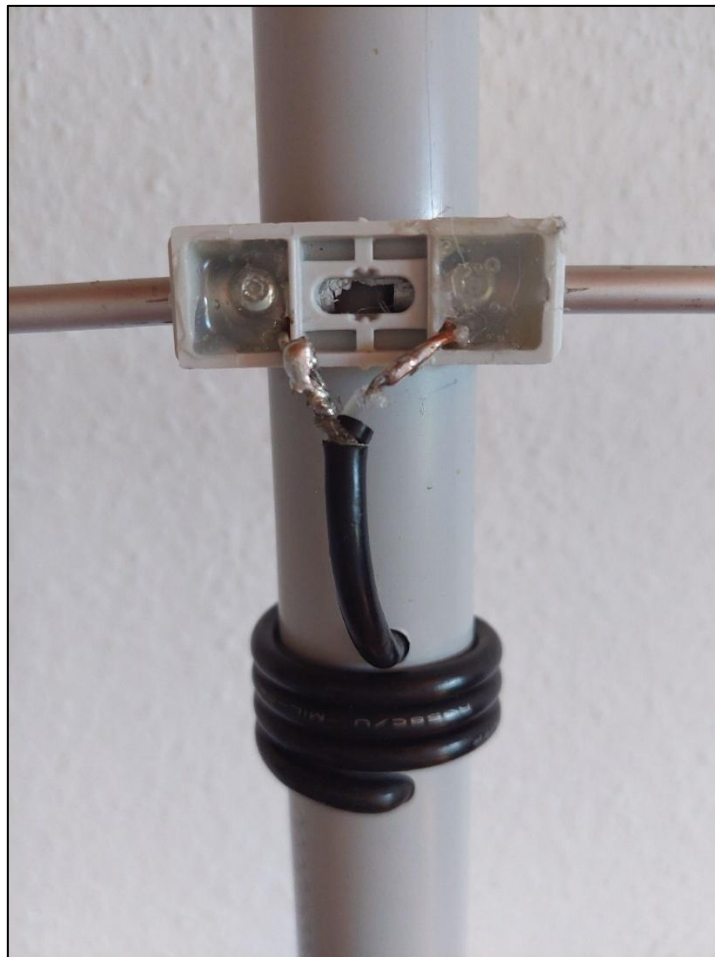


Reflektorstab (hintere Alustange) und die beiden Direktorstäbe (die beiden vorderen Alustangen) in der Mitte markieren und in die Rohrschellen schieben. Falls sie nicht von alleine halten, kann man sie mit Heißkleber oder ähnlichem fixieren.



Die beiden **Dipolhälften** in die Rohrschellen schieben, bis sie einen Abstand von etwa 10 mm voneinander haben. Dann mit einem Stift markieren, wo die Löcher für die beiden Schrauben hinkommen sollen. Die Stäbe wieder herausnehmen und die Stäbe an den Markierungen mit einem dünnen Bohrer (1 bis 2 mm) komplett durchbohren.

Stäbe wieder einbauen und zwei Lötflächen (oder dickeren Kupferdraht zu einer Öse biegen) mit zwei Schrauben befestigen. Die Schrauben können Holzschrauben sein, die etwas größeren Durchmesser als die beiden Löcher haben. Die Schrauben fressen sich beim Hineindreihen in das Aluminium. Wenn alles festsitzt, die beiden Dipolstäbe gerade ausrichten (nicht ganz einfach), fixieren und in der Rohrschelle mit Heißkleber oder Zweikomponentenkleber fixieren. Die beiden Löt-Ösen (oder Kupferdraht-Ösen) müssen mit ihren freien Enden lang genug sein, damit sie aus der Klebestelle heraussehen können. Dort wird später das Koaxialkabel (RG 58) angelötet.

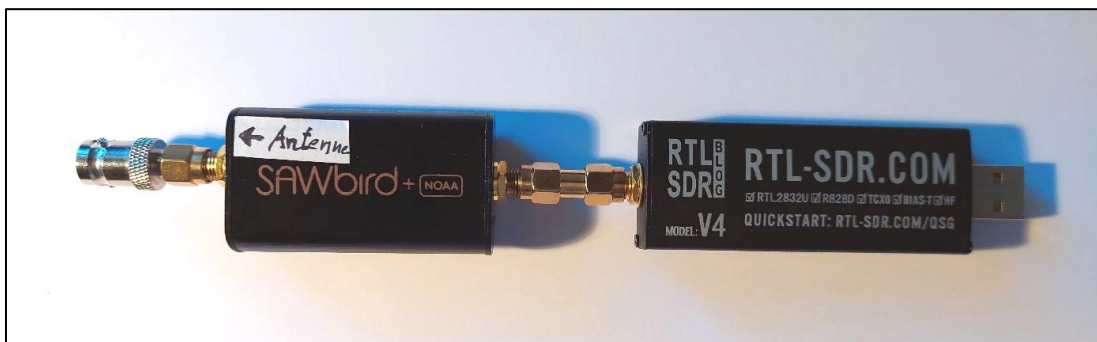


Das Koaxialkabel sollte, bevor es an die Dipolstäbe gelötet wird, mit 3 bis 4 Windungen um das Tragerohr gewickelt werden. Dies sorgt für eine bessere Anpassung der Impedanzen. Der Dipol hat nämlich etwa 72 Ohm Wellenwiderstand, das Koaxialkabel RG 58 aber 50 Ohm. Die Windungen kann man so anlegen, wie in der Abbildung. Die Löcher nicht zu klein wählen, da sonst die Durchführung und das Wickeln des starren Antennenkabels schwierig wird. Unter Umständen kann man das Ganze noch mit einem breiten Klebeband fixieren.

Als SDR-Empfänger haben sich die abgebildeten USB-Dongle (RTL-SDR.com V4 und Nooelec NESDR SMARTEE) bestens bewährt. Aber sicher funktionieren auch andere Empfänger-Sticks ähnlicher Bauart. Allerdings sollte man darauf achten, dass diese über eine BIAS-Funktion verfügen, damit die Spannungsversorgung für einen Antennenverstärker durch den USB-Stick durchgeschleift werden kann.

Sehr zu empfehlen ist der HF-Vorverstärker SAWBIRD+NOAA. Dieser rauscharme Verstärker hat außerdem einen Bandpass, der auf den Bereich von 137 MHz zugeschnitten ist. Damit blendet er Frequenzen aus der Nachbarschaft (also links und rechts des 137 MHz-Bandes) gut aus, was zu deutlich weniger Störungen führt. Der Vorverstärker wird mit 5 Volt betrieben, die von außen zugeführt werden können (was recht umständlich ist) oder besser direkt vom Laptop durch das USB-Kabel geschickt werden. Der SDR-Empfänger-Stick muss dafür die sogenannte „BIAS“-Möglichkeit aufweisen, also in der Lage sein, die 5 Volt „durchzureichen“. Die Empfangs- und Auswertesoftware SATDUMP ermöglicht dann das Einschalten der BIAS-Funktion des Empfänger-Sticks.

Wenn man Vorverstärker und SDR-Empfänger bestellt, sollte man entsprechende Adapter und Zwischenstücke nicht vergessen.

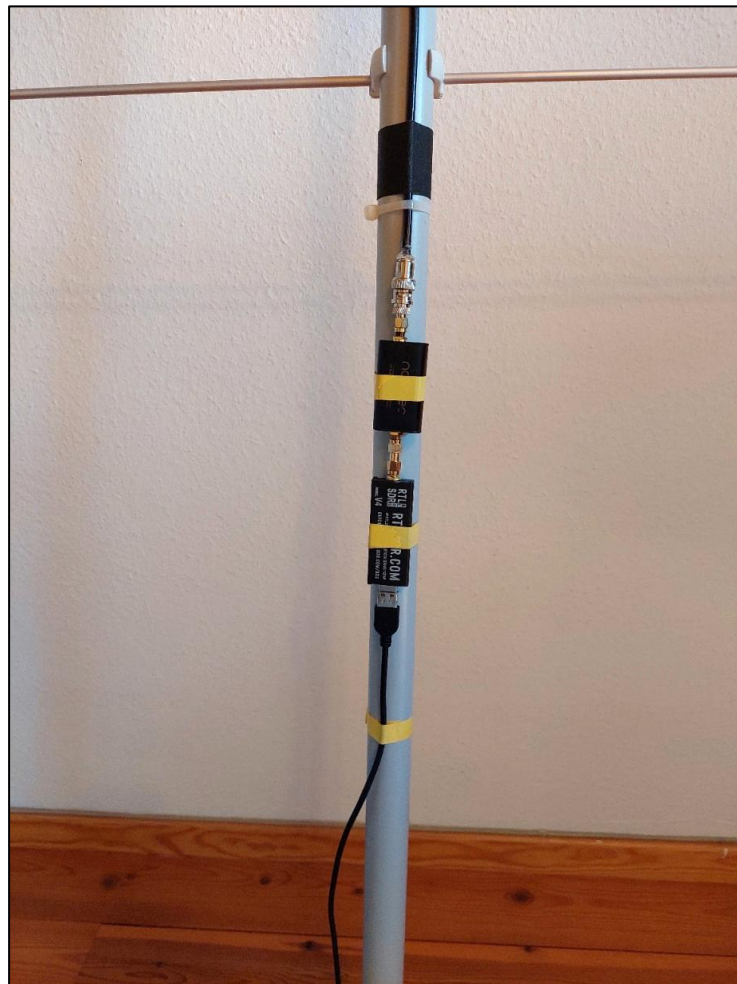


...oder mit dem ebenfalls sehr guten und empfehlenswerten SDR-Empfänger „SMARTEE“



Daran denken, den Antenneneingang des Vorverstärkers deutlich zu markieren, denn es passiert sonst leicht, dass der Verstärker falsch herum eingebaut wird. Vermutlich würde der so etwas nicht überleben.

Es ist sinnvoll, Vorverstärker und Empfänger-Stick möglichst nahe an der Antenne anzubringen, um Übertragungsverluste der Hochfrequenz und Störungen zu minimieren. Vom SDR-Empfänger geht es dann mit einem 3 oder 5 m langen USB-Verlängerungskabel zum Laptop. Das USB-Kabel sollte man mit einem Streifen Isolierband auch an dem Trägerrohr fixieren – nichts ist ärgerlicher, als wenn während der Aufnahme der Satelliten-Signale beim Drehen oder Schwenken der Antenne das Kabel aus dem BNC-Stecker des Empfängers rutscht.



Noch zwei Hinweise:

1. Einen BNC-Stecker an das Koaxialkabel (RG 58) zu löten, ist nicht einfach und die Gefahr besteht, dass der Stecker zu lose sitzt oder intern Kurzschlüsse entstehen. Diese Montage sollte daher nur von Personen mit entsprechenden Lötverfahren gemacht werden. Eine Alternative wäre: Man kauft ein 2m- RG58 Kabel, das bereits zwei BNC-Anschlüsse hat und schneidet einen BNC-Stecker ab - so etwas tut dem Elektroniker weh, aber dann ist man auf der sicheren Seite. Wenn man zwei Antennen bauen

möchte, empfiehlt es sich, das Koaxial-Kabel länger zu kaufen und in der Mitte zu durchtrennen – dann hat man zwei Kabelstücke mit BNC-Stecker.

2. Den Laptop im Akku-Betrieb auf maximale Leistung einstellen. Das Programm SAT-DUMP muss enorm viel auf einmal verarbeiten, wenn es die Satellitensignale in Echtzeit dekodiert.

Erfahrungen:

Diese Bauart der Antenne hat sich bestens bewährt, denn der Aufbau ist nicht allzu kompliziert und das Material kostet nicht viel. Zudem lässt sich die Antenne zwecks Transports auch wieder auseinandernehmen. (Dipol vorsichtig abnehmen und zu Seite drehen, damit die Lötstellen zum Koaxialkabel nicht brechen.) Die Antenne ist leicht und lässt sich gut in der Hand halten, was die Nachführung der Antenne erleichtert.

Die Antenne bringt einen deutlichen Gewinn (ca. 6 db) – muss allerdings per Hand ungefähr in Richtung des Satelliten mitgeführt werden. Diese Richtungseigenschaft ist aber nicht kritisch – es reicht, wenn man die Antenne in die Richtung hält, in der man den Satelliten vermutet (wird im SATDUMP-Programm zur Orientierung angezeigt)

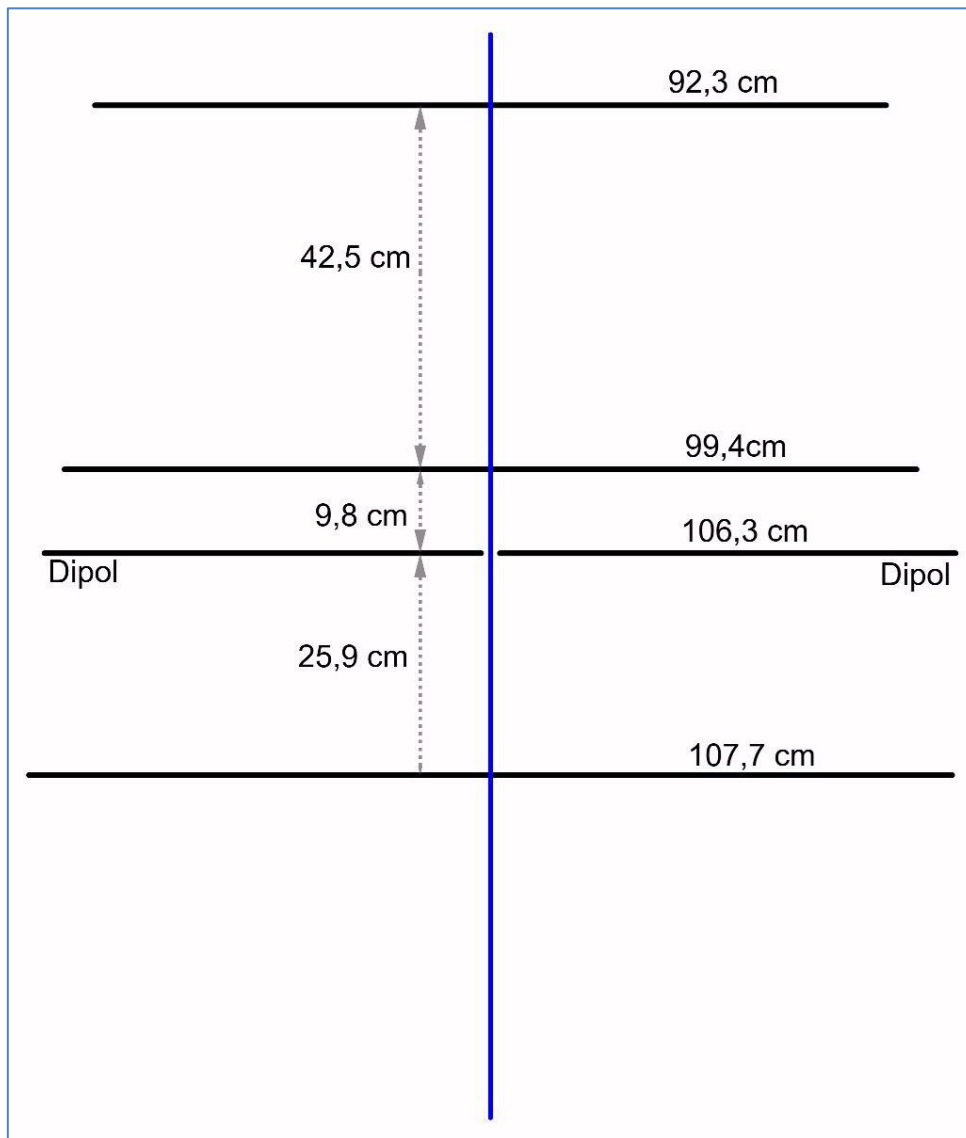
Günstig ist ein weites Feld, Acker oder Schulhof mit möglichst freier Sicht im Bereich Nord-Süd. Häuser oder Bäume verschlechtern das Signal deutlich. Dann bekommt man von der Satellitenbahn meist nur den Teil aufgezeichnet, der frei zu empfangen ist. Schöner ist es natürlich, eine möglichst lange Passage aufzuzeichnen.

Bei den Längen und Abstände der Alu-Rohre dieser Antenne habe ich mich an dem Online-Antennenrechner orientiert

https://www.changpuak.ch/electronics/yagi_uda_antenna_DL6WU.php

und die Werte (theoretisch) ein wenig optimiert mit der Software <https://www.eznec.com>

Eine andere Dimensionierung für eine Yagi-Antenne zeigt die folgende Abbildung. Diese Bauform funktioniert ebenfalls sehr gut. Ihr Gewinn („gain“) ist ein wenig geringer als bei der oben vorgestellten Bauform. Dafür hat sie einen etwas breiteren Öffnungswinkel, ihre Impedanz-Anpassung und das Stehwellenverhältnis sind günstiger und sie weist eine etwas kürzere Gesamtlänge auf.



Physikalisch-mathematische Kontexte

Geostationäre Wettersatelliten

1. In welcher Höhe umkreist *METEOSAT* die Erde und welche Geschwindigkeit hat der Satellit auf seiner geostationären Bahn?

Gemäß dem dritten Gesetz von Kepler gilt: $r^3 = \frac{G \cdot M_E}{4\pi^2} \cdot T^2 \Leftrightarrow r = \left(\frac{G \cdot M_E}{4\pi^2} \cdot T^2 \right)^{\frac{1}{3}}$.

Die Umlaufzeit der Erdkugel und somit auch eines geostationären Satelliten beträgt 23 Stunden, 56 Minuten und 4 Sekunden (siderischer Tag). Das sind 86164 Sekunden.

Damit ergibt sich:

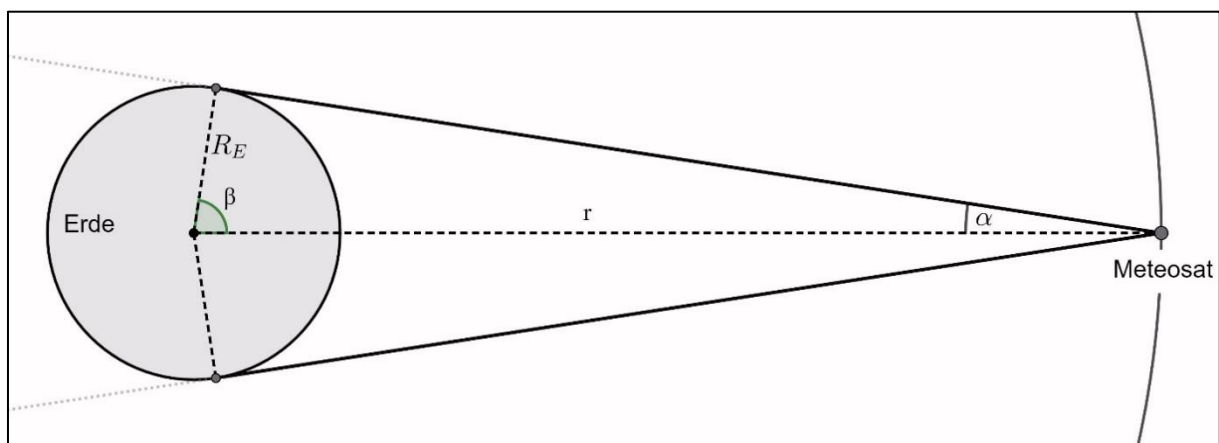
$$r = \left(\frac{G \cdot M_E}{4\pi^2} \cdot T^2 \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{6,674 \cdot 10^{-11} \cdot 5,972 \cdot 10^{24}}{4\pi^2} \cdot 86164^2 \right)^{\frac{1}{3}} \text{ m} = 42163 \text{ km}.$$

Der Äquatorradius der Erde beträgt 6378 km, sodass wir eine Höhe des Satelliten von $42163 \text{ km} - 6378 \text{ km} = 35785 \text{ km}$ erhalten – also rund 36.000 km.

Die Bahngeschwindigkeit beträgt $v = \frac{2\pi \cdot r}{T} = \frac{2\pi \cdot 42163 \text{ km}}{86164 \text{ s}} = 3,075 \frac{\text{km}}{\text{s}}$,

also rund 3 km/s.

2. Bis zu welcher maximalen geographischen Breite sieht *METEOSAT* die Erdoberfläche?



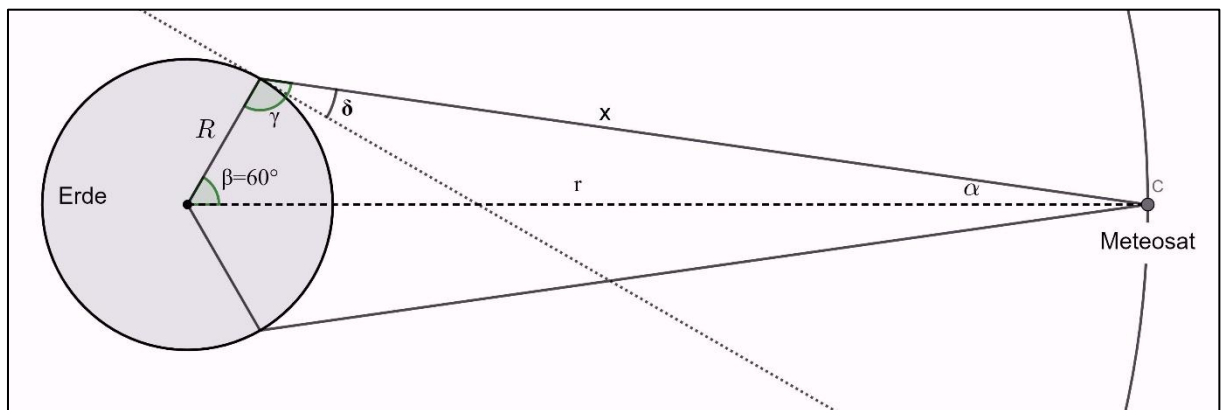
Der Sehwinkel des Satelliten wird durch die Tangenten an die Erdkugel bestimmt. Diese Tangenten stehen senkrecht auf dem Erdradius. Das so entstandene rechtwinklige Dreieck liefert:

$$\cos(\beta) = \frac{R_E}{r} \rightarrow \beta = \arccos\left(\frac{R_E}{r}\right) = \arccos\left(\frac{6378}{42163}\right) = 81,3^\circ$$

Der Winkel α beträgt dann $8,7^\circ$, bzw. der maximale Sehwinkel des Satelliten $17,4^\circ$.

Da sich die Verzerrungen aufgrund der Erdkrümmung bereits bei wesentlich kleineren geographischen Breiten störend bemerkbar machen, wertet METEOSAT methodologische Daten nur bis **60°** nördlich und südlich des Äquators aus. Somit werden beispielsweise Skandinavien, Island, Grönland nahezu komplett ausgeklammert.

3. Unter welchem Winkel sieht METEOSAT die Erdoberfläche bei einer geographischen Breite von 60°?



Kosinussatz: $x^2 = R^2 + r^2 - 2 \cdot r \cdot R \cdot \cos(60^\circ)$

$$x = \sqrt{R^2 + r^2 - 2 \cdot r \cdot R \cdot \cos(60^\circ)}$$

$$= \sqrt{6378^2 + 42163^2 - 2 \cdot 6378 \cdot 42163 \cdot \cos(60^\circ)} \text{ km} = 39363,5 \text{ km}$$

Da der Winkel γ ein stumpfer Winkel ist, gilt wegen $\sin(\gamma) = \sin(180^\circ - \gamma)$ der Sinussatz in der Form:

$$\frac{\sin(\gamma)}{r} = \frac{\sin(180^\circ - \gamma)}{r} = \frac{\sin(60^\circ)}{x} \Leftrightarrow \sin(180^\circ - \gamma) = \frac{r}{x} \cdot \sin(60^\circ).$$

$$\gamma = 180^\circ - \arcsin\left(\frac{r}{x} \cdot \sin(60^\circ)\right) = 180^\circ - \arcsin\left(\frac{42163}{39363,5} \cdot \sin(60^\circ)\right) = 112^\circ$$

Der Winkel δ ergibt sich dann zu $\delta = 112^\circ - 90^\circ = 22^\circ$

Der Blickwinkel auf den Bereich um den 60-sten Breitengrad beträgt lediglich 22°. Das ist sehr flach. Die Bildauflösung ist in diesem Bereich deutlich schlechter als beispielsweise über Zentralafrika.

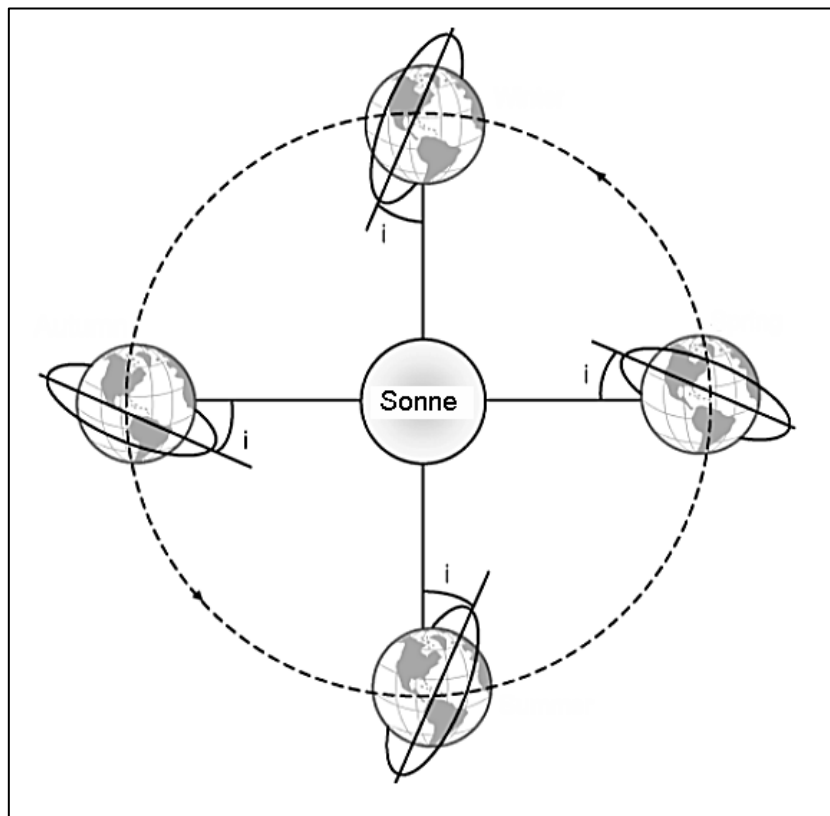
Polumlaufende Satelliten

Eine Polarbahn als sonnensynchrone Umlaufbahn

Wäre die Erde eine homogene und symmetrische Kugel, würde die Ebene der Satellitenbahn fest im Raum stehen. Die Orientierung der Bahnebene würde sich auch über große Zeiträume hinweg nicht ändern. Die Erdkugel weicht allerdings von der Kugelsymmetrie ab. Der Abstand der Pole zum Erdmittelpunkt beträgt 6357 km während der Äquator 6378 km entfernt liegt. Die Form der Erde gleicht daher eher einem Rotationsellipsoid als einer perfekten Kugel.

Da die polumlaufenden Satelliten eine geringe Höhe von etwa 820 km aufweisen und somit der Erde recht nahe sind, macht sich die Abweichung von der Kugelform auf die Satellitenbahn als Störung bemerkbar – es kommt zu einer langsamen Drehung der Bahnebene (Präzession).

Die Drehgeschwindigkeit der Bahnebene ist umso größer, je mehr die Inklination von einer reinen Polarbahn abweicht und je geringer die Bahnhöhe ist. Wenn man die Neigung (Inklination) der Bahnebene und die Flughöhe des Satelliten richtig wählt, dreht sich die Bahnebene innerhalb eines Jahres genau um 360° . Somit bleibt der Einstrahlungswinkel der Sonne auf die Erdbahn von Tag zu Tag immer gleich und der Satellit erscheint ungefähr zur gleichen Ortszeit an der gleichen Position.



Formelmäßig lässt sich die Präzessionsbewegung durch

$$\omega_p = 1,5 \cdot \left(\frac{R_E}{R_E + h} \right)^2 \cdot J_2 \cdot \omega_{\text{Sat}} \cdot \cos(i) \text{ darstellen.}$$

(https://de.wikipedia.org/wiki/Sonnensynchrone_Umlaufbahn)

Dabei bedeuten:

$$\omega_p = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t} : \text{Winkelgeschwindigkeit der Bahnebenen-Drehung}$$

R_E : Erdradius am Äquator (6378 km)

$R_E + h$: Radius der Satellitenbahn

J_2 : Koeffizient, der die Ausprägung des Rotationsellipsoids beschreibt

$$(J_2 = 1,082 \cdot 10^{-3})$$

$$\omega_{\text{Sat}} = \frac{2\pi}{T_{\text{sat}}} : \text{Winkelgeschwindigkeit des Satelliten}$$

i : Inklination der Bahnebene (90° wäre eine Bahn direkt über die beiden Pole
0° über dem Äquator)

Um eine sonnensynchrone Bahn zu erhalten, müssen Inklination und Bahnhöhe genau aufeinander abgestimmt werden. Aus der oberen Formel lässt sich dieser Zusammenhang wie folgt herleiten:

Die Winkelgeschwindigkeit ω_{Sat} des Satelliten wird durch dessen Umlaufdauer T bestimmt, welche wiederum durch das dritte Keplersche Gesetz mit dem Radius der Bahn verknüpft ist:

$$\omega_{\text{Sat}} = \frac{2\pi}{T_{\text{Sat}}} \quad \text{und} \quad T_{\text{Sat}}^2 = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_E} \cdot (R_E + h)^3 \quad \Leftrightarrow \quad T_{\text{Sat}} = \frac{2\pi}{\sqrt{G \cdot M_E}} \cdot (R_E + h)^{\frac{3}{2}}$$

$$\rightarrow \omega_{\text{Sat}} = \frac{\sqrt{G \cdot M_E}}{(R_E + h)^{\frac{3}{2}}}, \text{ eingesetzt in die Präzessionsformel (oben):}$$

$$\omega_p = 1,5 \cdot \left(\frac{R_E}{R_E + h} \right)^2 \cdot J_2 \cdot \cos(i) \cdot \frac{\sqrt{G \cdot M_E}}{(R_E + h)^{\frac{3}{2}}} = 1,5 \cdot J_2 \cdot \sqrt{G \cdot M_E} \cdot \cos(i) \cdot \frac{R_E^2}{(R_E + h)^{\frac{7}{2}}}$$

$$\Leftrightarrow (R_E + h)^{\frac{7}{2}} = 1,5 \cdot J_2 \cdot \sqrt{G \cdot M_E} \cdot \frac{R_E^2}{\omega_p} \cdot \cos(i)$$

$$\Leftrightarrow h = \left(1,5 \cdot J_2 \cdot \sqrt{G \cdot M_E} \cdot \frac{R_E^2}{\omega_p} \cdot \cos(i) \right)^{\frac{2}{7}} - R_E$$

In der Klammer stehen nur konstante Werte, denn auch ω_p ist festgelegt durch

$$\omega_p = \frac{2\pi}{365,25 \cdot 24 \cdot 3600 \text{s}} = 1,991 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\text{s}}. \text{ Wenn wir die Klammer ausrechnen, erhalten}$$

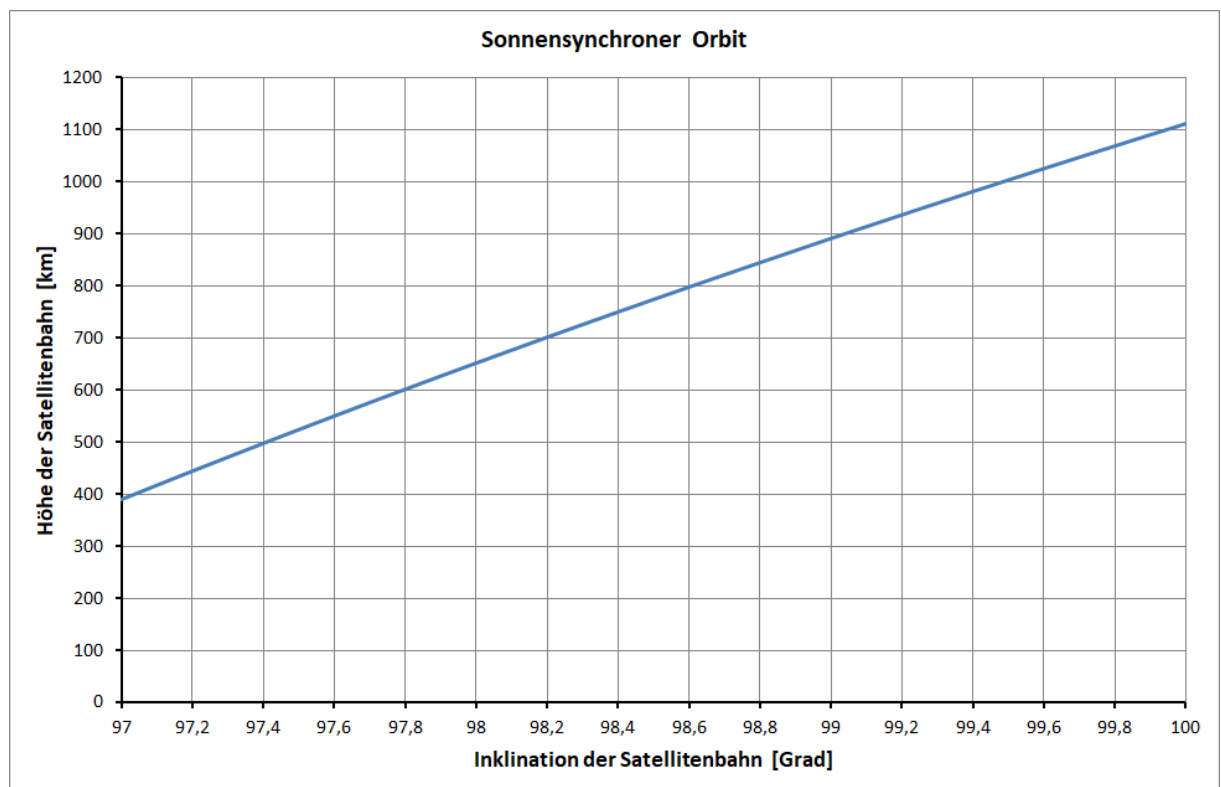
wir die Funktion, die zeigt, wie die Inklination und die Höhe der Satellitenbahn für eine sonnensynchrone Bahn voneinander abhängen:

$$h(i) = 12350 \text{ km} \cdot \cos(i)^{\frac{2}{7}} - 6378 \text{ km}.$$

Das Diagramm zeigt diesen Zusammenhang graphisch.

Beispielsweise müsste für eine Satellitenbahn in 800 km Höhe eine Inklination der Bahnebene von 98,6° gewählt werden, damit der Satellit sonnensynchron die Erde umkreist.

Im Laufe der Zeit ändert sich übrigens die Bahnhöhe geringfügig, was mit Bremseffekten der sehr dünnen Restatmosphäre und anderen Störeffekten zusammenhängt. Dadurch wird die Bahn dann nicht mehr perfekt sonnensynchron verlaufen. Die Abweichungen bleiben in der Regel jedoch gering.



Umlaufzeit der Satelliten

Die Umlaufbahnen sind nahezu kreisförmig.

Welche Umlaufzeit hat der Satellit, wenn er die Erde in einer Höhe von typischerweise 822 km umkreist?

$$\text{Drittes Keplergesetz: } T^2 = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_E} \cdot (R_E + h)^3 \Leftrightarrow T = \sqrt{\frac{4\pi^2}{G \cdot M_E} \cdot (R_E + h)^3}$$

$$T = \sqrt{\frac{4\pi^2}{6,674 \cdot 10^{-11} \cdot 5,972 \cdot 10^{24}} \cdot (6371 \cdot 10^3 + 822 \cdot 10^3)^3} \text{ s} = 6071 \text{ s} = 101,19 \text{ min}$$

Die Umlaufzeit der der polumlaufenden Satelliten beträgt etwa 101 Minuten.

Bahngeschwindigkeit

Welche Geschwindigkeit hat der Satellit auf seiner Bahn?

$$v = \frac{2\pi \cdot (R_E + h)}{T} = \frac{2\pi \cdot (6371 \cdot 10^3 + 822 \cdot 10^3)}{6071} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 7444,4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 26800 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Die Bahngeschwindigkeit beträgt etwa 26.800 km/h (entsprechend 7444 m/s)

Abtastgeschwindigkeit und Bildauflösung in Flugrichtung

Mit welcher Geschwindigkeit bewegt sich der „Abtaststrahl“ des Satelliten über den Erdboden (projizierte Bahngeschwindigkeit des Satelliten auf die Erdoberfläche)?

$$v = \frac{2\pi \cdot R_E}{T} = \frac{2\pi \cdot 6371 \cdot 10^3}{6071} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 6593,7 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 23737 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Pro Sekunde bewegt sich der „Abtaststrahl“ etwa 6,6 km weiter.

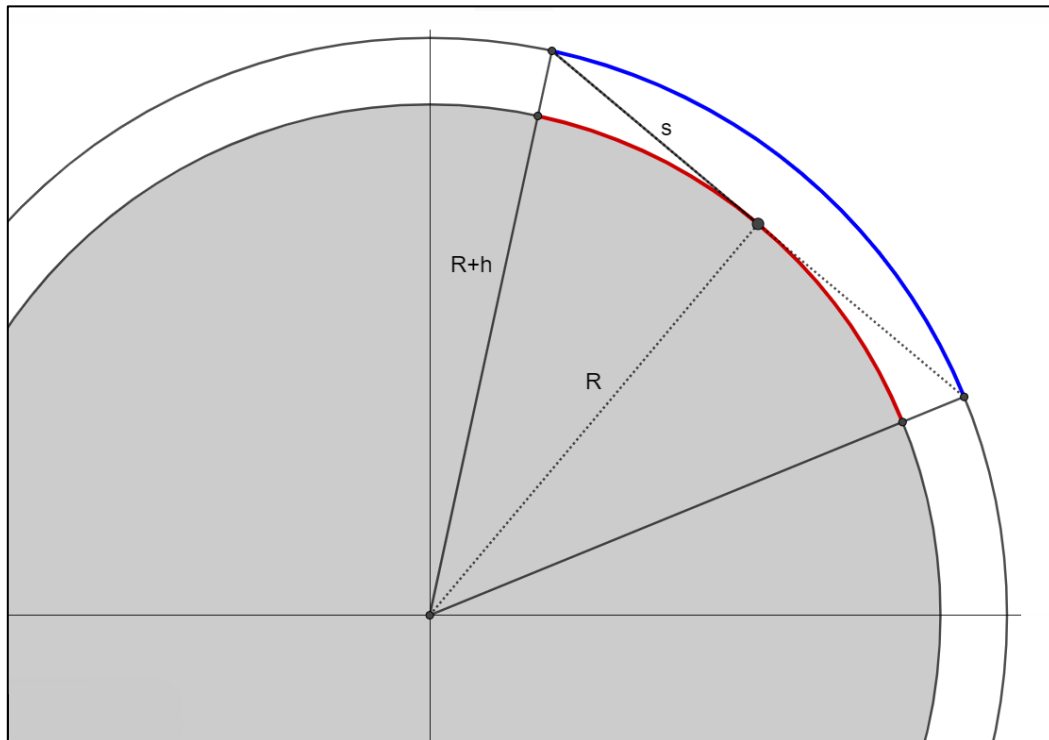
Bei den **NOAA-Satelliten** werden im APT-Modus pro Sekunde zwei Bildzeilen (Pixelzeilen) erzeugt. Die Auflösung in Flugrichtung daher etwa 3,3 km pro Pixel.

Bei den **Meteor-M2 Satelliten** werden pro Sekunde 6,5 Bildzeilen erzeugt. Die Bildauflösung in Flugrichtung beträgt daher $\frac{6,594 \text{ km}}{6,5} = 1,014 \text{ km}$, also 1 km pro Pixel. Das erzeugt längere

Bildstreifen mit einer sehr guten Auflösung - verglichen mit den NOAA-Satelliten (APT).

Sichtbarkeit der Satelliten

Wie lange dauert maximal ein Satellitendurchgang und wie viele Kilometer der Erdoberfläche werden dabei gescannt und wie weit ist der Satellit vom Beobachter entfernt?



Während der Satellit den blau gezeichneten Kreisbogen durchläuft ist der Satellit sichtbar (maximale Sichtbarkeit, von Horizont zu Horizont, Beobachter Höhe Null, Bahn genau über Kopf).

Die maximale Entfernung des Satelliten zum Beobachter (wenn der Satellit am Horizont erscheint) beträgt nach Pythagoras:

$$s = \sqrt{(R+h)^2 - R^2} = \sqrt{(6371+822)^2 - 6371^2} \text{ km} = 3339 \text{ km}$$

Wenn der Satellit den blauen Kreisbogen durchlaufen hat, hat er den rot gezeichneten Abschnitt der Erdoberfläche gescannt. Wie groß ist also der rote Abschnitt im Verhältnis zum Erdumfang?

Der Winkel β beträgt: $\cos(\beta) = \frac{R}{R+h} \rightarrow \beta = \arccos\left(\frac{R}{R+h}\right) = 27,66^\circ$.

Der gesamte Winkel des Kreissegments ist doppelt so groß, also $55,56^\circ$.

Die Länge des roten Kreisbogens ergibt sich daher: $\frac{55,56^\circ}{360^\circ} \cdot (2\pi \cdot R) = 6178 \text{ km}$.

Der maximal abbildbare Streifen der Erdoberfläche beträgt demnach 6.178km.

Wie lange ist der Satellit maximal zu empfangen?

$T = \frac{55,32}{360} \cdot 101,19 \text{ min} = 15,55 \text{ min}$. Die theoretisch maximal erreichbare Empfangszeit beträgt also 15,55 Minuten. Das sind 933 Sekunden.

Bei den NOAA Satelliten (2 Bildzeilen pro Sekunde) würden sich somit 1.866 Bildzeilen ergeben.

Bei den Meteor-Satelliten (6,5 Bildzeilen pro Sekunde) würde sich ein bedeutend längerer Bildstreifen ergeben, nämlich 6.065 Zeilen (Pixel).

In der Realität sind diese Werte kleiner, da die maximale Beobachtungslinie nur selten erreichbar ist – es sei denn, man befindet sich mit der Richtantenne auf einem Berg mit freier Sicht nach Norden und Süden. Ist die Bahn nicht genau über Kopf (overhead) sondern seitlich versetzt (was in der Regel der Fall ist), wird die Berechnung des Sichtbarkeitsfensters deutlich komplizierter und verlangt dezidierte Kenntnisse im Bereich der Kugelgeometrie, was im schulischen Kontext nicht leistbar ist.

Bahndrift

Um wieviel Grad hat sich Erde weitergedreht, wenn der Satellit einen Umlauf vollendet hat?

Wir gehen davon aus, dass die Umlaufzeit 101,4 Minuten beträgt ($T_s = 6071$ s, wie bereits oben berechnet). Die Erde benötigt für eine volle Umdrehung 23 h, 56 min, 4 s. Das sind 86164

Sekunden. Daher gilt: $\frac{6071}{86164} \cdot 360^\circ = 25,37^\circ$.

Die Erde dreht sich also von Umlauf zu Umlauf des Satelliten um $25,37^\circ$ weiter. Die Satellitenbahn hat sich am Äquator um $25,37^\circ$ nach Westen verschoben. Am Äquator entspricht das einer Strecke von $\frac{6081}{86164} \cdot (2\pi \cdot 6371 \text{ km}) = 2820 \text{ km}$. Da die Scannerbreite auf der Erdoberfläche

etwa 2800 km abdeckt, entsteht bereits am Äquator eine fast vollständige Abdeckung der Erdoberfläche von Umlauf zu Umlauf. Jenseits des Äquators, also bei nördlichen oder südlichen Breitengraden überlappen sich die Bildstreifen immer mehr, je weiter man in Richtung der Pole geht.

Wie groß ist der Bahnversatz nach genau 24 Stunden?

Innerhalb von 24 Stunden macht der Satellit etwa 14 Umläufe, denn es gilt: $\frac{24 \cdot 3600}{6071} = 14,23 \approx 14$.

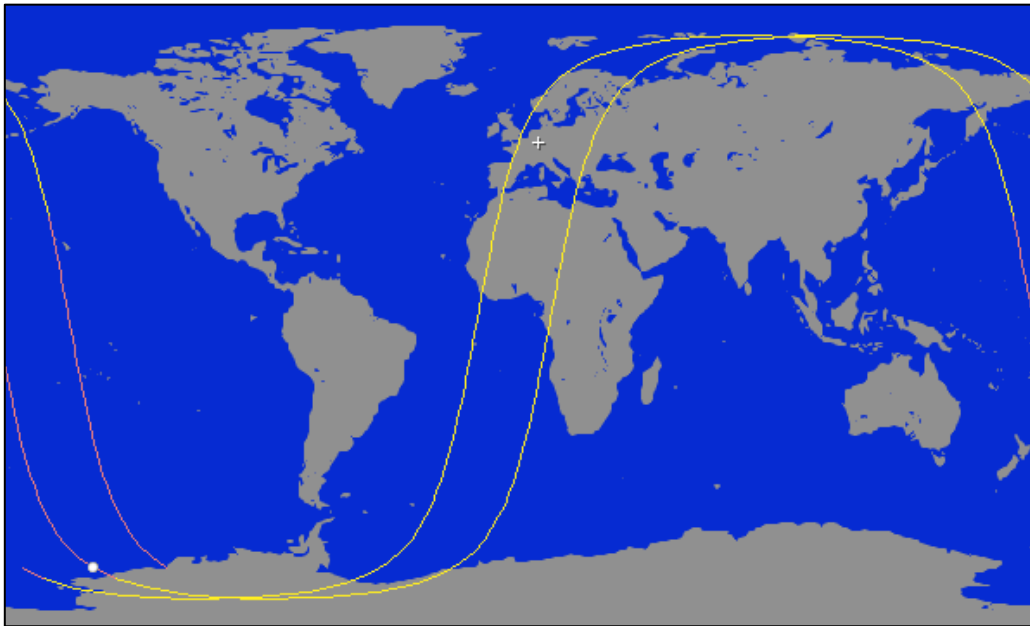
Die Bahn ist also 14-mal um $25,37^\circ$ nach Westen gewandert (Äquatorüberflug). Das sind $355,18^\circ$. Nach einem Tag überquert der Satellit den Äquator daher gegenüber dem Vortag um $4,82^\circ$ nach Osten verschoben. Hinzu kommt noch die Drehung der Bahnebene um etwa 1 Grad pro Tag aufgrund des Präzessionsmechanismus der Erde-Bahn Kopplung (sonnensynchrone Umlaufbahn). Insgesamt driftet der Äquatorüberflug pro Tag um ca. $5,8^\circ$ nach Osten ($\rightarrow$ Ostdrift).

Dabei überfliegt der Satellit den Äquator um $24 \cdot 60 \text{ min} - 14 \cdot 101,9 \text{ min} \approx 23$ Minuten früher als am Vortag.

Die Rechnungen sollen zeigen, dass die Satellitenbahnen von einem Tag auf den anderen stets etwas wandern und daher die Überflüge nur ungefähr zur gleichen Zeit und unter anderem Beobachtungswinkel stattfinden. Daher sind Vorhersageprogramme wie beispielsweise „ORBITRON“ unerlässlich, um den Empfang der Satelliten zu planen.

Die zwei nebeneinanderliegenden Satellitenbahnen zeigen, dass die Satelliten – je nach Tageszeit – uns mal von Norden nach Süden überqueren und mal von Süden nach Norden. Die Bahnen verlaufen dann jeweils etwas anders.

NORD-SÜD Überflüge

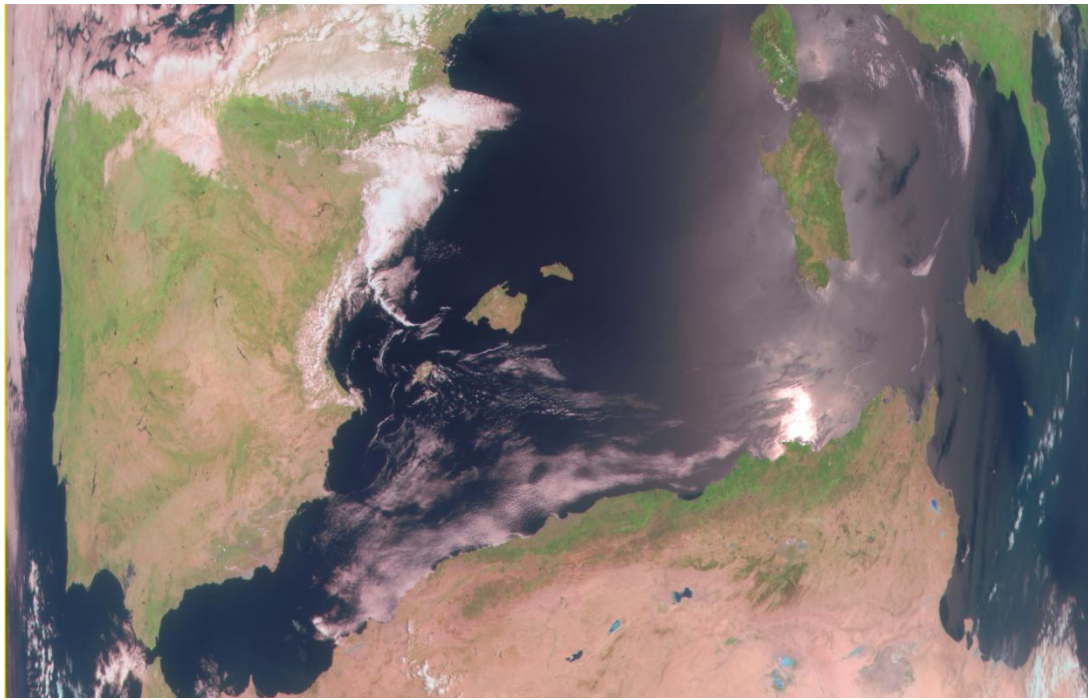


SÜD-NORD Überflüge



Das Problem der Bildverzerrung

Betrachtet man die drei Rohbilder, die der Satellit im LRPT-Modus sendet, fallen die verzerrten Bildränder auf. Als Beispiel hier ein Ausschnitt aus einem Bildstreifen (in Falschfarbendarstellung):



Die Deformationen vor allem in den Randbereichen des Bildes entstehen aufgrund der perspektivischen Verzerrung durch den flachen Blickwinkel, unter dem der Scanner die Erdoberfläche links und rechts bzgl. seiner Flugrichtung sieht. Dies hängt zum einen mit der geringen Flughöhe (im Vergleich zur Breite des gescannten Bodenstreifens) und zum anderen mit der Erdkrümmung zusammen. Bei maximaler Auslenkung des Scannerspiegels (Rand des Bildstreifens bei 55° Spiegeldrehung bzw. Blickwinkel) sieht der Sensor die Erdoberfläche unter einem flachen Winkel von nur etwa 22° .

Ein Entzerrungsalgorithmus

Um die Stauchung der Rohbilder zu korrigieren, ist die Anwendung eines Algorithmus erforderlich, der eine Streckung des Bildes quer zur Flugrichtung des Satelliten berechnet. Das Allround-Programm SATDUMP bietet eine automatische Bildkorrektur oder eine auf Knopfdruck an. Der Algorithmus, der dahintersteckt, wird allerdings nicht ersichtlich und leider wird man auch im Internet nicht fündig. Im didaktisch-schulischen Kontext wäre es aber schon interessant zu erfahren, wie ein solcher Algorithmus aussieht. Die folgenden Herleitungen beruhen daher auf eignen Überlegungen. Überraschenderweise stellt sich dabei die angewendete Mathematik als durchaus überschaubar heraus und sollte auch von Schülerinnen und Schülern der Oberstufe gut nachvollziehbar sein.

Der maximale Blickwinkel des Multispektral-Scanners beträgt 110° - eher sogar etwas weniger. Die Literaturangaben sind bzgl. dieses Wertes nicht ganz eindeutig (Werte zwischen 108° und 110°). Wir rechnen im Folgenden mit 110° .

Eine Bildzeile des Rohbildes beträgt genau 1568 Pixel. Verteilt auf 110° ergibt sich eine Winkelauflösung von $\frac{110^\circ}{1568} = 0,07^\circ = 1,22 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$.

Da der Spiegel sich mit konstanter Geschwindigkeit dreht, wird alle $0,07^\circ$ ein Bildpixel gesetzt. Der Winkel α und die Pixelzahl (gemessen von der Mitte der Bildzeile) können wir daher als proportional zueinander ansehen.

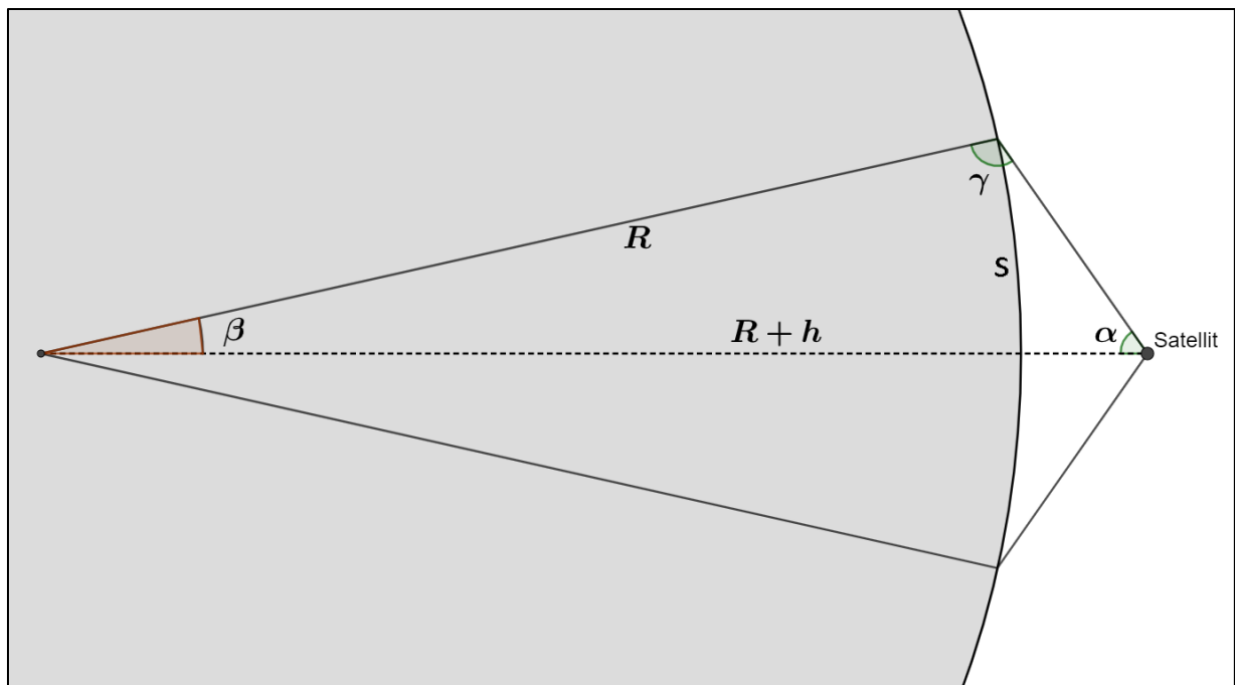
Die Frage lautet nun:

Wie hängt die Entfernung s auf der Erdoberfläche (gemessen vom Nadir) von der entsprechenden Pixelzahl px (gemessen von der Mitte der Bildzeile) ab? Gesucht ist also eine Funktion $s(px)$ bzw. $s(\alpha)$, die diese Größen miteinander verknüpft. Ist diese Funktion bekannt, können wir die Bildverzerrung rückgängig machen – das Bild also horizontal entsprechend der Funktion $s(\alpha)$ strecken („rectification“).

Der Winkel α (im Bogenmaß) ergibt sich aus der Pixelzahl der Bildzeile (die Hälfte einer Zeile sind 784 Pixel).

Es gilt $\alpha = px \cdot \frac{55^\circ}{784} \cdot \left(\frac{\pi}{180^\circ} \right)$ und ausgerechnet: $\alpha = 1,2244 \cdot 10^{-3} \cdot px$.

Der Winkel α ist somit jeweils aus der Pixel-Position einer Bildzeile berechenbar, also bekannt. Um die Bogenlänge s auf der Erdoberfläche berechnen zu können, benötigen wir den Winkel β .



Dazu berechnen wir zunächst den Winkel γ , den wir über den Sinussatz ermitteln:

Da der Winkel γ aber ein stumpfer Winkel ist, gilt wegen $\sin(\gamma) = \sin(\pi - \gamma)$ der Sinussatz in der Form:

$$\frac{\sin(\alpha)}{R} = \frac{\sin(\gamma)}{R+h} = \frac{\sin(\pi-\gamma)}{R+h} \Leftrightarrow \sin(\pi-\gamma) = \frac{R+h}{R} \cdot \sin(\alpha). \text{ Dies lösen wir nach } \gamma \text{ auf:}$$

$$\pi - \gamma = \arcsin\left(\frac{R+h}{R} \cdot \sin(\alpha)\right) \Leftrightarrow \gamma = \pi - \arcsin\left(\frac{R+h}{R} \cdot \sin(\alpha)\right).$$

Der Winkel β ergibt sich nun über die 180° Innenwinkelsumme:

$$\alpha + \beta + \gamma = \pi \rightarrow \alpha + \beta + \pi - \arcsin\left(\frac{R+h}{R} \cdot \sin(\alpha)\right) = \pi$$

$$\Leftrightarrow \beta = \arcsin\left(\frac{R+h}{R} \cdot \sin(\alpha)\right) - \alpha$$

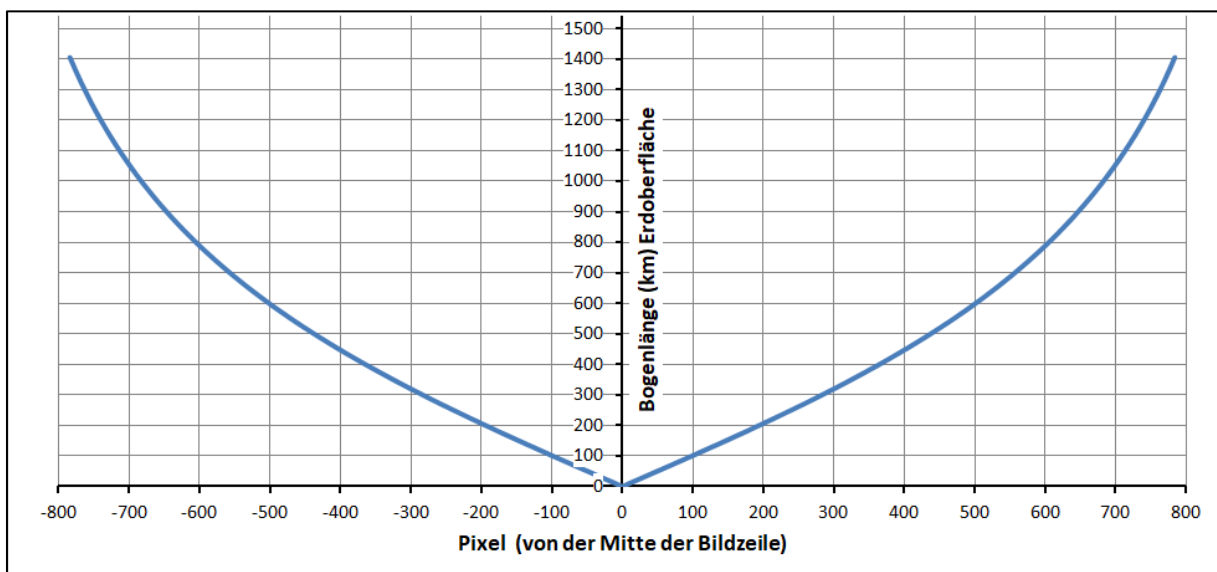
Das Bogenstück s ergibt sich nun aus der Definition des Bogenmaßes: $s = \beta \cdot R$.

Somit erhalten wir:

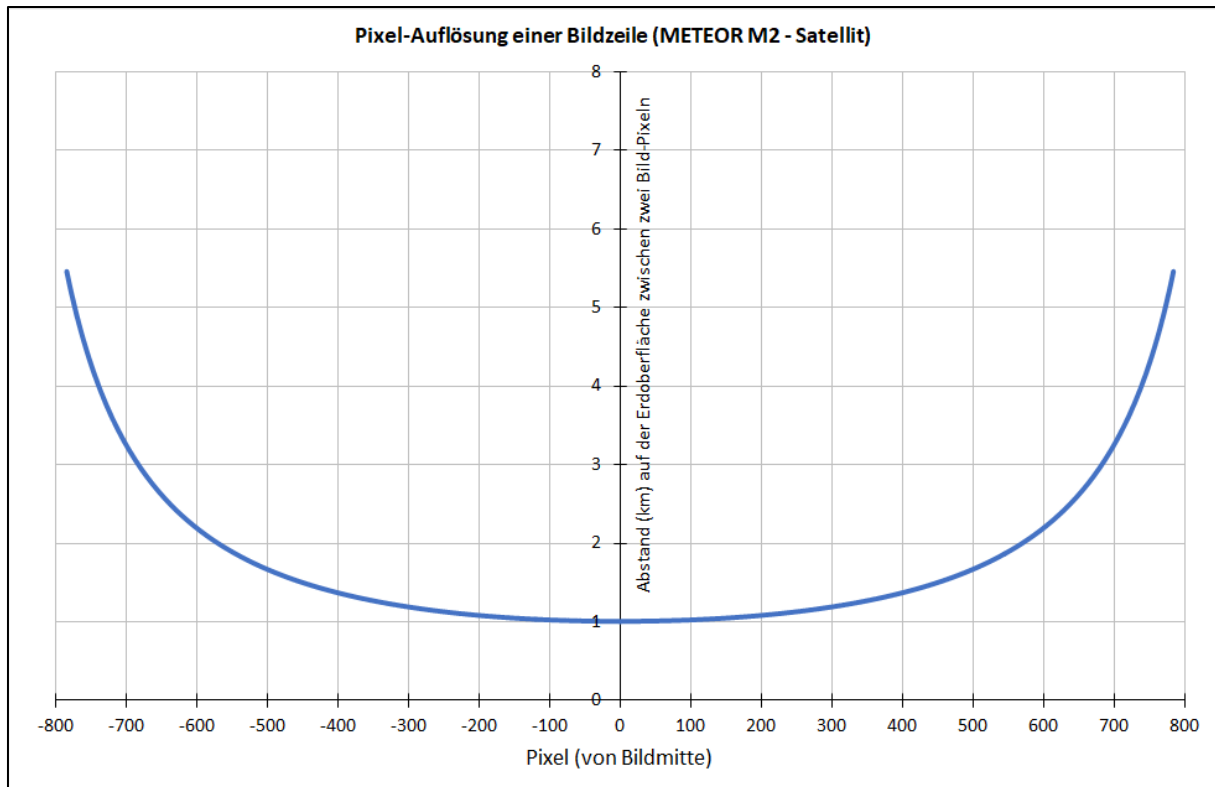
$s = R \cdot \left(\arcsin\left(\frac{R+h}{R} \cdot \sin(\alpha)\right) - \alpha \right)$ und mit der Beziehung $\alpha = 1,2244 \cdot 10^{-3} \cdot px$ schließlich die Funktion

$$s(px) = R \cdot \left(\arcsin\left(\frac{R+h}{R} \cdot \sin(1,2244 \cdot 10^{-3} \cdot px)\right) - 1,2244 \cdot 10^{-3} \cdot px \right)$$

Diese Funktion rechnet eine bestimmte Pixelposition px in der gesendeten Bildzeile in die reale Bogenlänge auf der Erdoberfläche um. Der Funktionsgraph zeigt deutlich die Nichtlinearität zwischen den Pixelpositionen der Bildzeilen und den tatsächlichen Längen auf der Erdoberfläche.



Noch deutlicher wird der Verzerrungseffekt in Richtung der Bildränder, wenn man die Orts-Auflösung der Pixel betrachtet. Diese Auflösung nimmt von der Zeilenmitte (Bildmitte) zum Rand hin deutlich ab. In der Bildmitte beträgt die Auflösung 1 km pro Pixel. Dieser Wert verschlechtert sich erst wenig – nimmt dann aber zu den Rändern hin schnell zu. In den Randbereichen beträgt die Auflösung dann nur noch 4 km pro Pixel, ganz am Rand sogar 5 km pro Pixel, wie das folgende Diagramm zeigt.



Korrektur (Entzerrung) der Rohbilder

Die Entzerrung der Rohbilder wird gemäß der oben hergeleiteten Funktion $S(px)$ vorgenommen: Die Pixel jeder Bildzeile des Rohbildes werden neu verteilt. Beispielsweise würde das Pixel 500 (von der Zeilenmitte gezählt) im korrigierten Bild auf den Platz 598 gesetzt.

$$s(500) = R \cdot \left(\arcsin \left(\frac{6371 + 822}{6371} \cdot \sin \left(1,2244 \cdot 10^{-3} \cdot 500 \right) \right) - 1,2244 \cdot 10^{-3} \cdot 500 \right) = 598$$

Das Pixel 720 würde aber bereits an die Stelle 1123 im korrigierten Bild wandern, also 1123 km vom Nadir-Punkt entfernt.

Wenn wir nun in die Funktion die **maximale Pixelposition** 784 (Rand) einsetzen, was einem maximalen Scanwinkel von $\alpha = 55^\circ$ entspricht, erhalten wir 1406 km.

Das bedeutet: Wenn der Scanspiegel des Satelliten einen vollen Schwenk von 110° gemacht hat (Blickwinkel 110°), wurde eine Bildzeile aufgezeichnet, die auf der Erdoberfläche einer Breite von 2812 km entspricht. Dieser Wert passt gut zu den offiziellen Angaben zum MultispektralScanner (MSU-MR), für den eine Scanbreite von 2800 km angegeben wird. Dieser Wert hängt aber auch von der Höhe des Satelliten über der Erdoberfläche ab und ändert sich im Laufe der Zeit ein wenig, da sich die Satellitenbahn durch Reibungseffekte mit der Restatmosphäre und anderer Störeinflüsse leicht absenkt.

Durch diese Entzerrung entstehen im korrigierten besonders im Randbereich Lücken von bis zu 4 Pixel. Diese Lücken müssen gefüllt werden. Das einfachste Verfahren ersetzt diese Leerstellen durch die Nachbapixel oder etwas komplizierter durch eine Interpolation der

Nachbarpixel. Das korrigierte Bild erscheint so auf den ersten Blick vollkommen. Erst bei einer vergrößerten Darstellung fällt auf, dass die Randbereiche des korrigierten Bildes deutlich unschärfer erscheinen als der mittlere Bereich.

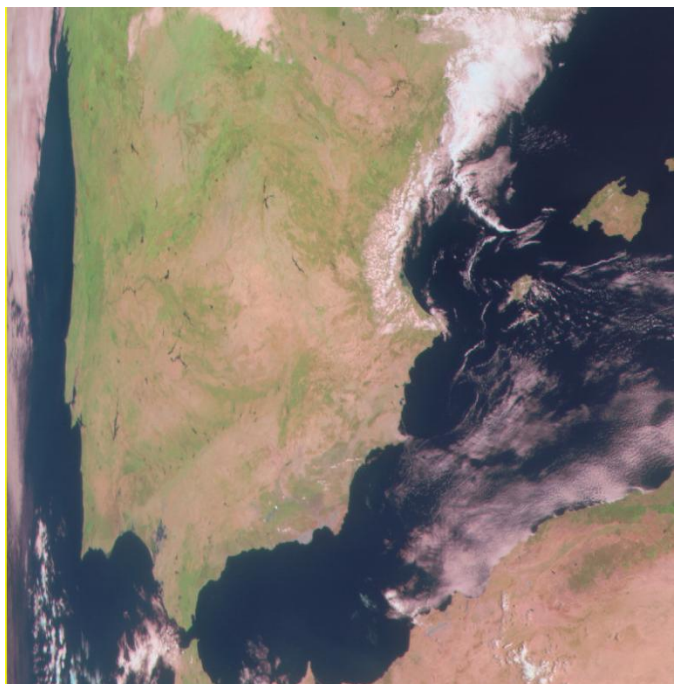
Aus dem Rohbild mit einer Breite von 1568 Pixel wird so ein entzerrtes Bild mit 2800 Pixel Breite (entsprechend 2800 km).

Die folgenden Bilder zeigen das Verfahren (hier nur an der linken Bildhälfte) in zwei Schritten: Zunächst die Umverteilung der Pixel (es entstehen weiße Lücken zwischen den Pixel) und danach die Auffüllung der Lücken durch Informationen der Nachbarpixel.

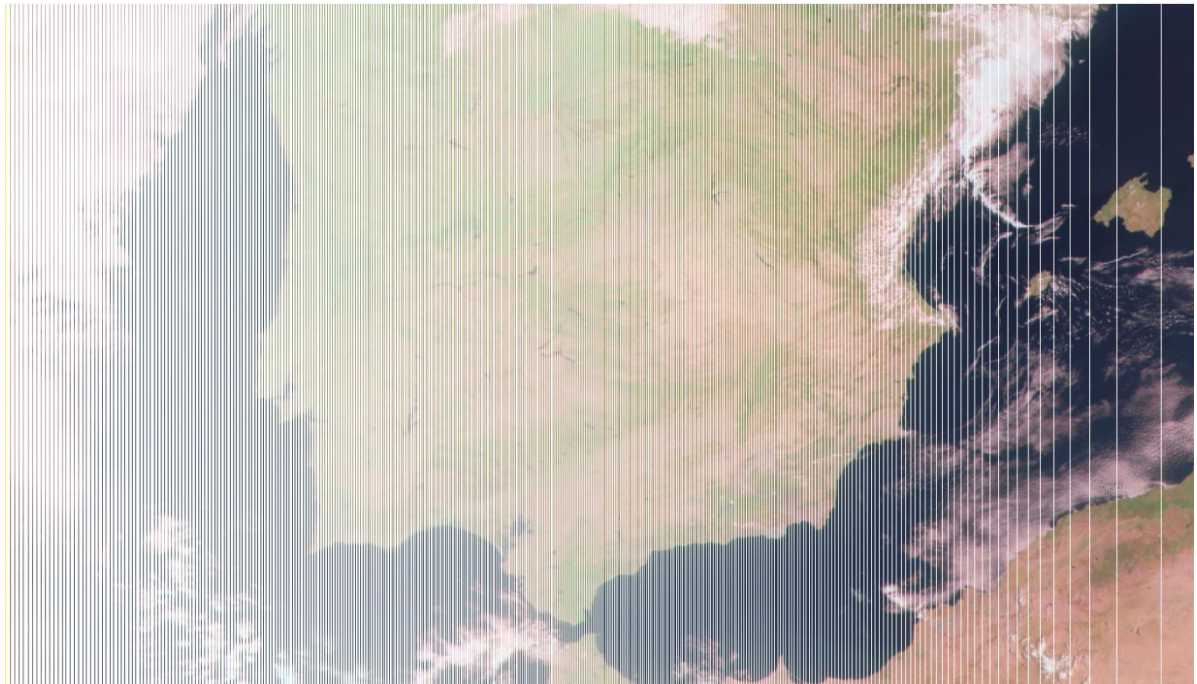
Ich habe mal versucht, den oben entwickelten Algorithmus $s(px)$ in ein kleines Programm (programmiert mit Delphi) umzusetzen.

Wie man sieht, funktioniert die Korrektur der Rohbilder ganz gut. Allerdings läuft das Programm extrem langsam, da ich die einfachen Delphi-Canvas Befehle verwendet habe, um auf die einzelnen Pixel zuzugreifen. Das geht sicher wesentlich geschickter, aber es sollte ja nur gezeigt werden, ob die geometrische Entzerrung mithilfe der Funktion $s(px)$ tatsächlich funktioniert – und das tut sie offenbar.

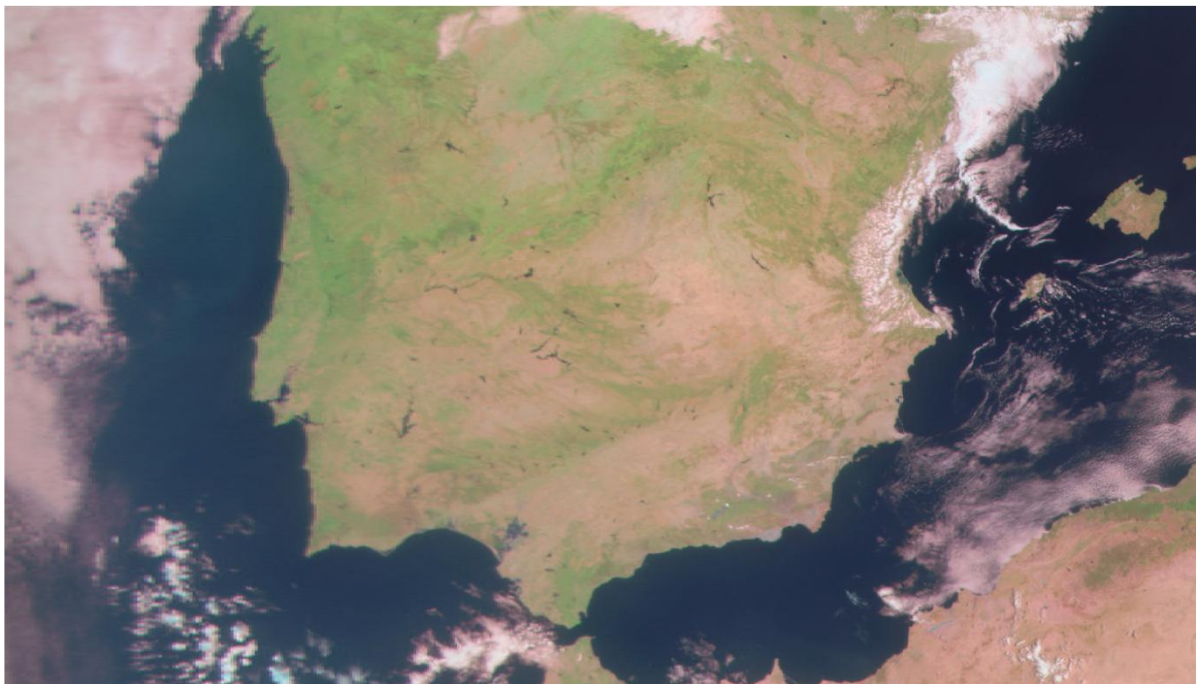
Die linke Hälfte des Rohbildes



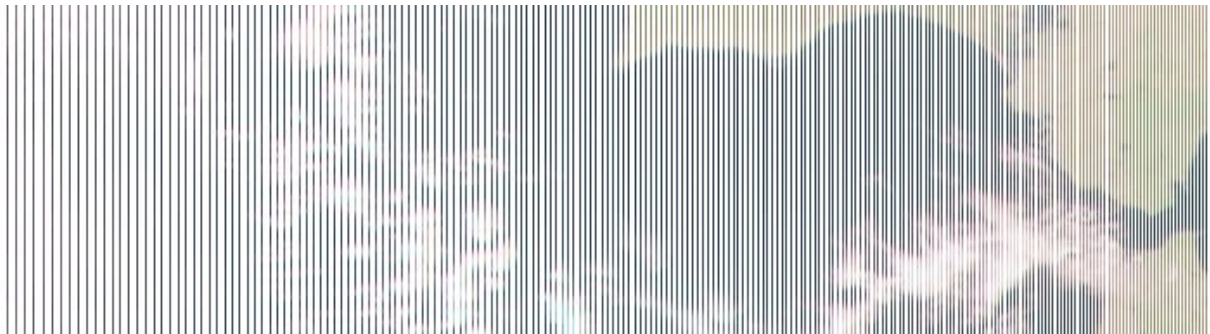
Entzerrung der Pixelpositionen



Auffüllung der Leerstellen mit Informationen der Nachbarpixel (zeilenweise)



Die vergrößerten Ausschnitte des ganz linken Bildrandes machen das Auseinanderziehen der Pixel und das Ersetzen der Lücken besonders deutlich.



Bildkorrektur mit SATDUMP

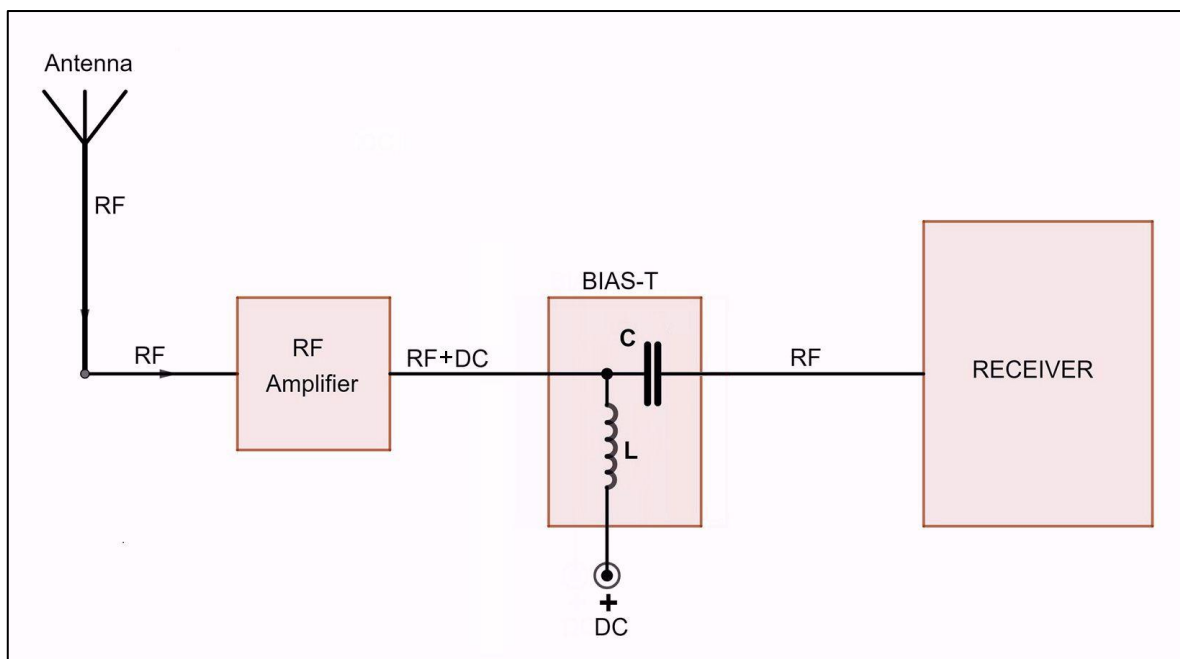


Vergleicht man diese selbsterstellte Bildkorrektur mit der von SATDUMP, erkennt man auf den ersten Blick kaum Unterschiede. Erst bei stärkerer Vergrößerung sieht man Unterschiede, wie die Leer-Pixel ersetzt werden. Im Programm SATDUMP erscheinen die Übergänge glatter – vermutlich wurden die fehlenden Pixel durch Interpolation mithilfe der Nachbarpixel erzeugt, während mein kleines Testprogramm einfach die Farbwerte der benachbarten Zeilenpixel verwendet.

Was ist eine „BIAS-T“ Schaltung und wie funktioniert sie?

Das englische Wort „bias“ bedeutet in der technischen Anwendung so viel wie „Vorspannung“. Eine „Bias-T“ Schaltung dient dazu, eine Hochfrequenz (engl. RF) und eine Gleichspannung (engl. DC), die beide durch dasselbe Kabel (Antennenkabel) laufen, voneinander zu trennen.

In der Abbildung soll das Antennensignal mithilfe eines HF-Verstärkers angehoben werden. Dieser Verstärker erhält seine Stromversorgung (DC) über eine Spule mit hoher Induktivität und somit auch mit einer hohen HF-Impedanz. Die verstärkte Hochfrequenz soll ja nicht in die Gleichspannungsquelle ablaufen, sondern fließt weiter zum Kondensator, der eine sehr kleine HF-Impedanz aufweist und das Signal zum Empfänger durchreicht. Der Kondensator stellt gleichzeitig eine Sperre für die Gleichspannung dar. Das Schaltbild mit Kondensator und Spule hat die Form eines „T“ - daher spricht man von einer BIAS-T Schaltung.



Rechenbeispiel:

Das Antennenkabel hat eine Impedanz von 50 Ohm. Für die Wechselstromwiderstände der passiven Bauelemente gelten die Formeln:

Spule: $R_L = 2\pi \cdot f \cdot L$

Kondensator: $R_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$

Als Frequenz wählen wir $f = 137 \text{ MHz}$, für die Spule $L = 5,81 \mu\text{H}$ und für den Kondensator $C = 2,32 \text{ nF}$.

Dann erhalten wir die Wechselstromwiderstände:

$$R_L = 2\pi \cdot f \cdot L = 2\pi \cdot 137 \cdot 10^6 \cdot 5,81 \cdot 10^{-6} \Omega \approx 5000 \Omega$$

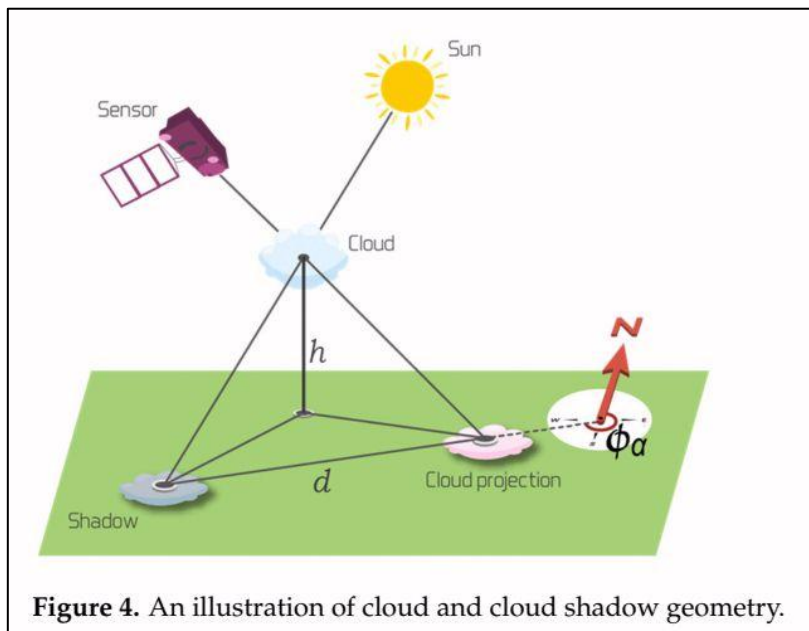
$$R_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 137 \cdot 10^6 \cdot 2,32 \cdot 10^{-9}} = 0,5 \Omega$$

Das bedeutet, der Wechselstromwiderstand der Spule für die Hochfrequenz ist 100-mal so groß wie der Widerstand der Antennenleitung (50 Ohm). Aber der Kondensator stellt der Hochfrequenz einen sehr kleinen Widerstand entgegen, nämlich lediglich einhundertstel des Antennenkabelwiderstands. Das Antennensignal wird daher den Weg durch den Kondensator „wählen“.

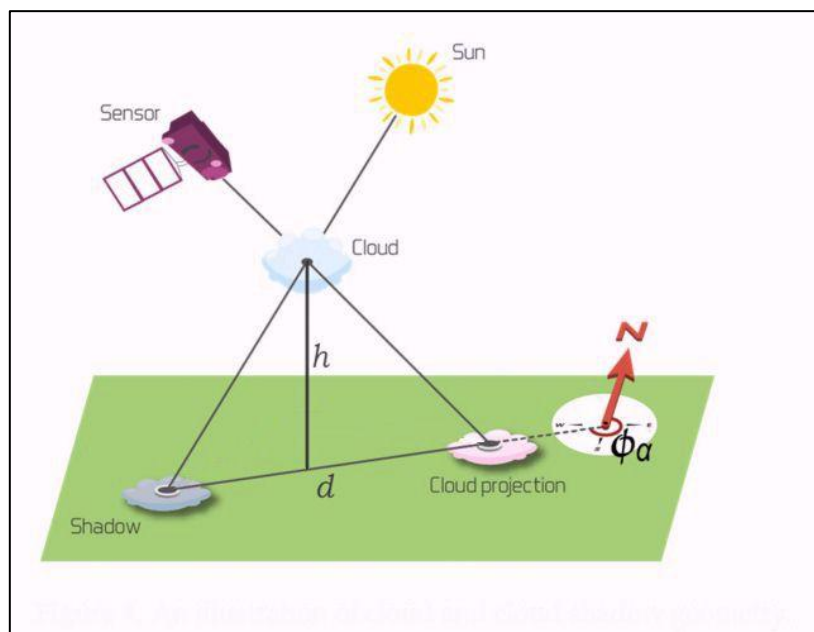
Bei unserer Empfangssituation mit dem SDR-USB Empfänger und dem SAWBIRD-Verstärker kommen die 5 Volt Versorgungsspannung vom Laptop. Diese speisen den SDR-Empfänger, werden aber auch durchgeschleift und zum HF-Verstärker (SAWBIRD) geleitet. Die BIAS-T Schaltung befindet sich dabei im SDR-USB Stick. Dies ist damit gemeint, wenn man sagt, dass der Empfänger-Stick „BIAS-fähig“ ist.

Abschätzung der Wolkenhöhe

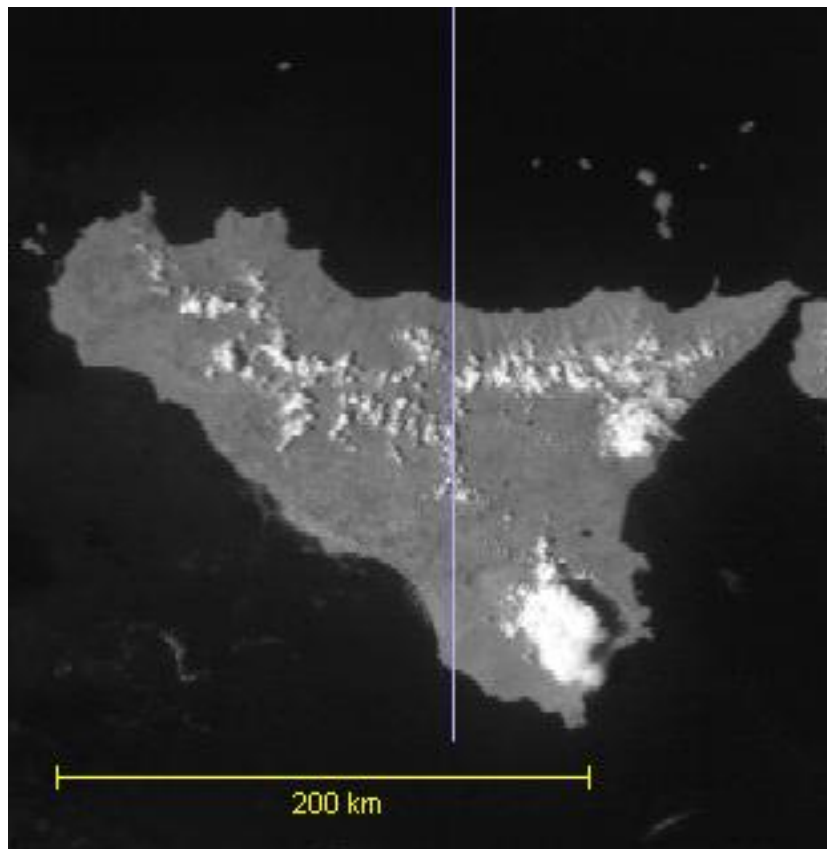
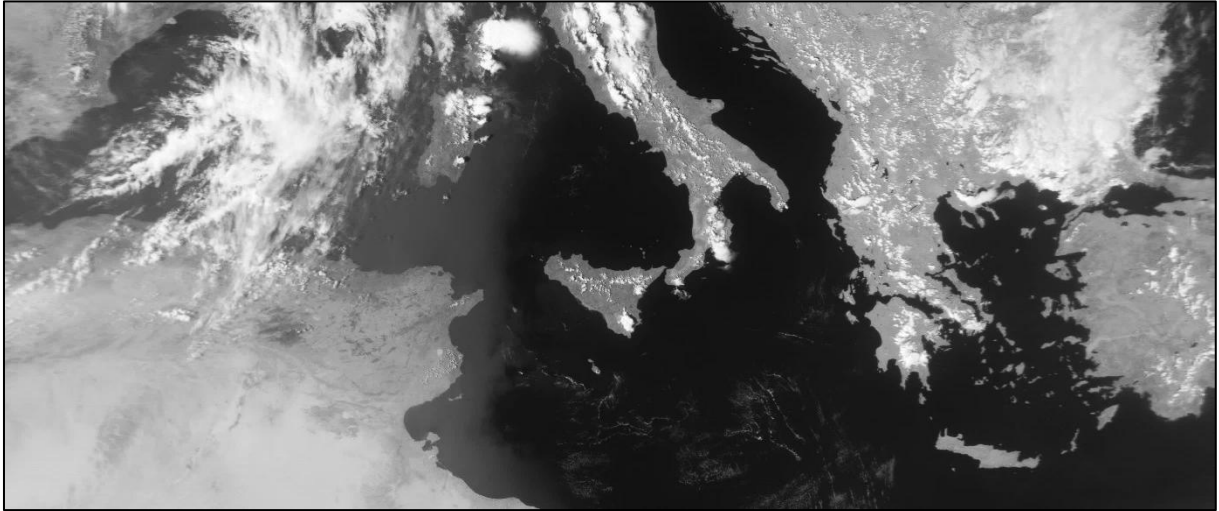
Manchmal ist auf den Satellitenbildern ein deutlicher Schatten der Wolke zu sehen – also die Sonnenprojektion der Wolke auf die Erdoberfläche. Die Wolkenhöhe ist dann prinzipiell aus der perspektivischen Verschiebung des Schattens bestimmbar. Dies ist jedoch alles andere als einfach, da die Geometrie des Schattens vom Einstrahlwinkel der Sonne und dem Blickwinkel des Satelliten-Scanners abhängt, wie die untere Abbildung zeigt (entnommen aus <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/4/736>).



Einfacher wird die Situation, wenn wir annehmen, dass die Projektionen von Satelliten und der Sonne in etwa auf einer Linie liegen. Wenn man Wolkenschatten auswählt, die möglichst weit im Süden liegen und der Zeitpunkt der Aufnahme im Sommer liegt (am 21. Juni erreicht die Sonne ihre größte geographische Breite), ist der Fehler nicht allzu groß.



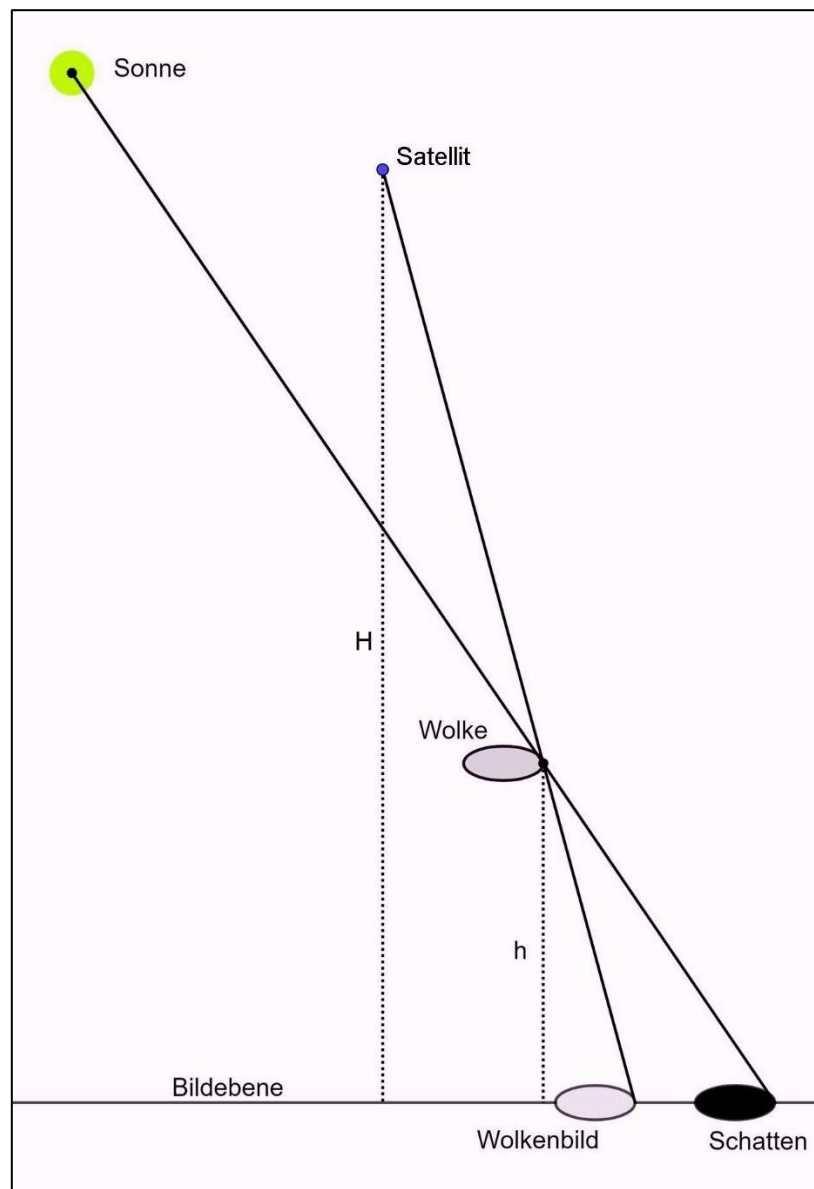
Als Beispiel wählen wir eine Aufnahme von METEOR M2-4 vom 19. August 2025. Das Bild hat eine Breite von 2800 Pixeln – die Auflösung beträgt 1 km pro Pixel. Somit lässt sich mit einem Graphikprogramm leicht ein Maßstab finden, der in dem Bildausschnitt eingetragen wurde (200 km). Auf dem Bildausschnitt betrachten die ausgeprägte Wolke über Süd-Sizilien, die einen deutlichen Schattenwurf zeigt.

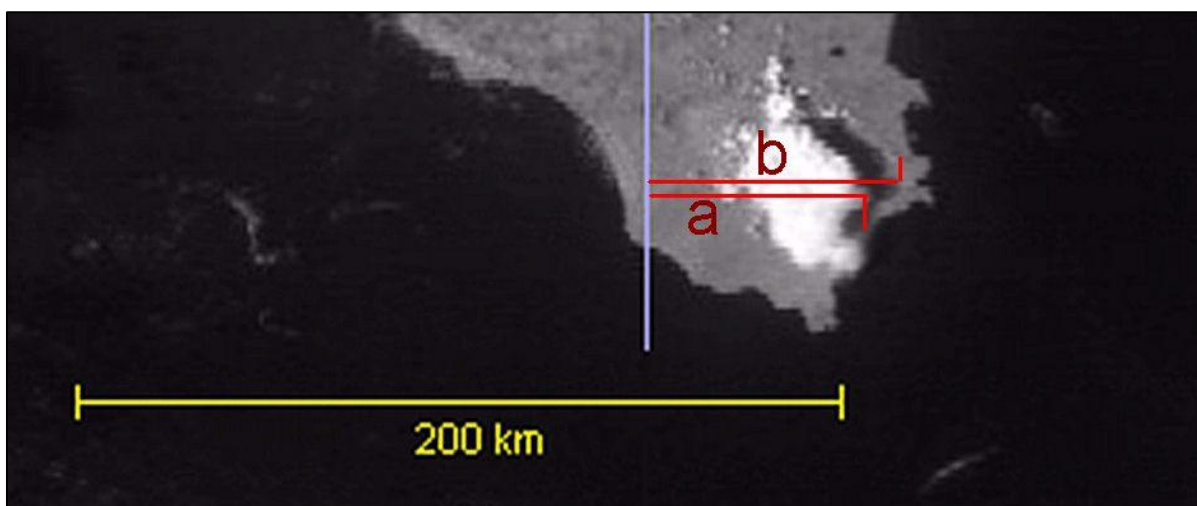
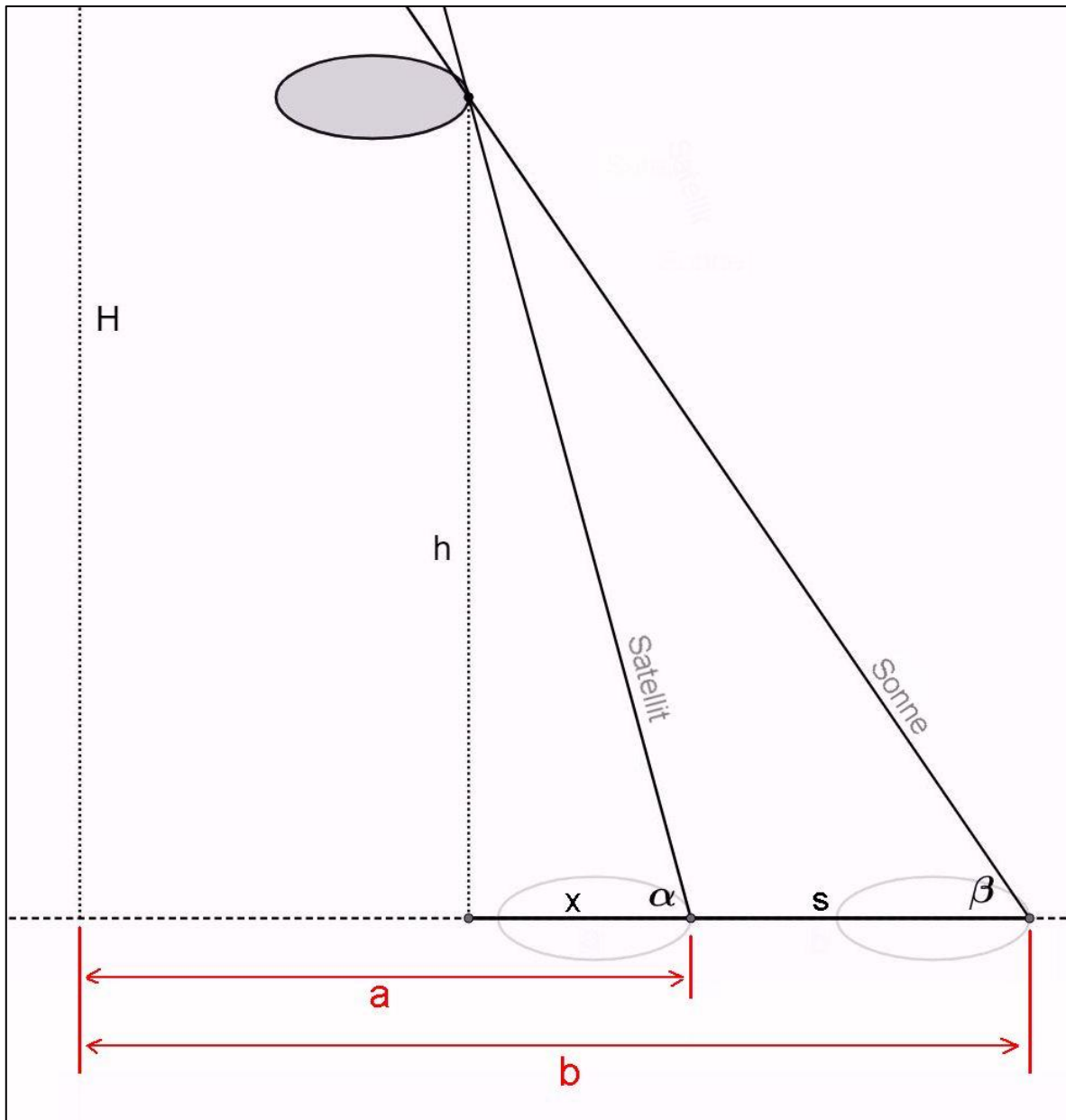


Die hellblaue Linie in der Abbildung oben zeigt die Flugbahn des Satelliten. Die Sonne befindet sich schräg unten, wie auf dem Tracking-Bild von ORBITRON zu erkennen ist. Dort ist die Satellitenbahn in Gelb eingezeichnet.



Die Geometrie der Situation:





Die Längen **a** und **b** lassen sich durch Ausmessen mit einem Lineal (oder Ermittlung der Pixelzahlen) unter Verwendung des abgebildeten Maßstabes ermitteln. Die Höhe **H** des Satelliten ist bekannt.

Gesucht wird die Höhe **h** der Wolke.

Durch Ausmessen mit einem Lineal (oder man verwendet in einem Graphikprogramm die ausgemessenen Pixelzahlen) ergeben sich die folgenden Werte:

$a = 56 \text{ km}$ und $b = 65 \text{ km}$. Der Satellit hat eine Höhe von $H = 820 \text{ km}$.

Die Strecke **s** (Schattenlänge) ist dann $s = b - a = 9 \text{ km}$

Der Einstrahlwinkel der Sonne zur gegebenen Zeit am gegebenen Ort lässt sich z.B. hier ermitteln: <https://www.sonnenverlauf.de>

In unserem Beispiel ergibt sich ein Sonnenwinkel von ziemlich genau $\beta = 50^\circ$.

$$\text{Dann gilt: } \tan(\alpha) = \frac{H}{a} \quad \text{und} \quad \tan(\alpha) = \frac{h}{x}, \text{ also folgt: } \frac{H}{a} = \frac{h}{x} \Leftrightarrow x = \frac{h \cdot a}{H}$$

$$\text{Weiter gilt für den Winkel } \beta: \tan(\beta) = \frac{h}{x + s} = \frac{h}{\frac{h \cdot a}{H} + s} = \frac{h \cdot H}{h \cdot a + H \cdot s}$$

$$\text{Auflösen nach } h: \tan(\beta) = \frac{h \cdot H}{h \cdot a + H \cdot s} \Leftrightarrow h = \frac{H \cdot s \cdot \tan(\beta)}{H - a \cdot \tan(\beta)}$$

$$\text{Rechnung: } h = \frac{H \cdot s \cdot \tan(\beta)}{H - a \cdot \tan(\beta)} = \frac{820 \cdot 9 \cdot \tan(50^\circ)}{820 - 56 \cdot \tan(50^\circ)} \text{ km} = 11,7 \text{ km}.$$

Die Wolke über Süd-Sizilien hat eine Höhe im Bereich von **11 bis 12 km**.

Vielleicht gibt es einen einfacheren Lösungsweg – für Hinweise bin ich immer dankbar.

Links

Eigene Homepage: <https://mabo-physik.de>

Software

ORBITRON: <https://www.stoff.pl>

SATDUMP: <https://www.satdump.org/download>

Treiber: <https://www.rtl-sdr.com/rtl-sdr-quick-start-guide>

Yagi-Antenne (Abmessungen):

https://www.changpuak.ch/electronics/yagi_uda_antenna_DL6WU.php

<https://www.rtl-sdr.com/building-a-diy-portable-137-mhz-yagi-antenna-for-lrpt>

V-Dipol: <https://lna4all.blogspot.com/2017/02/diy-137-mhz-wx-sat-v-dipole-antenna.html>

Status der METEOR M2 Satelliten:

<https://usradioguy.com/meteor-satellite/#status>

Empfang – Antennen – Meteor M2 - SATDUMP

<https://www.a-centauri.com/articoli/meteor-satellite-reception>

<https://usradioguy.com/satdump-for-meteor-noaa-decoding/>

<https://github.com/NAP3XD/Setup-Meteor-M-N2-N2-2-with-LRPT-Decoder-and-Meteor-GIS?tab=readme-ov-file>

<https://docs.satdump.org/composites.html>

Veränderungen der Umlaufbahnen im Laufe der Zeit

Meteor M2-3: <https://isstracker.pl/en/satellites/57166>

Meteor M2-4: <https://isstracker.pl/en/satellites/59051>