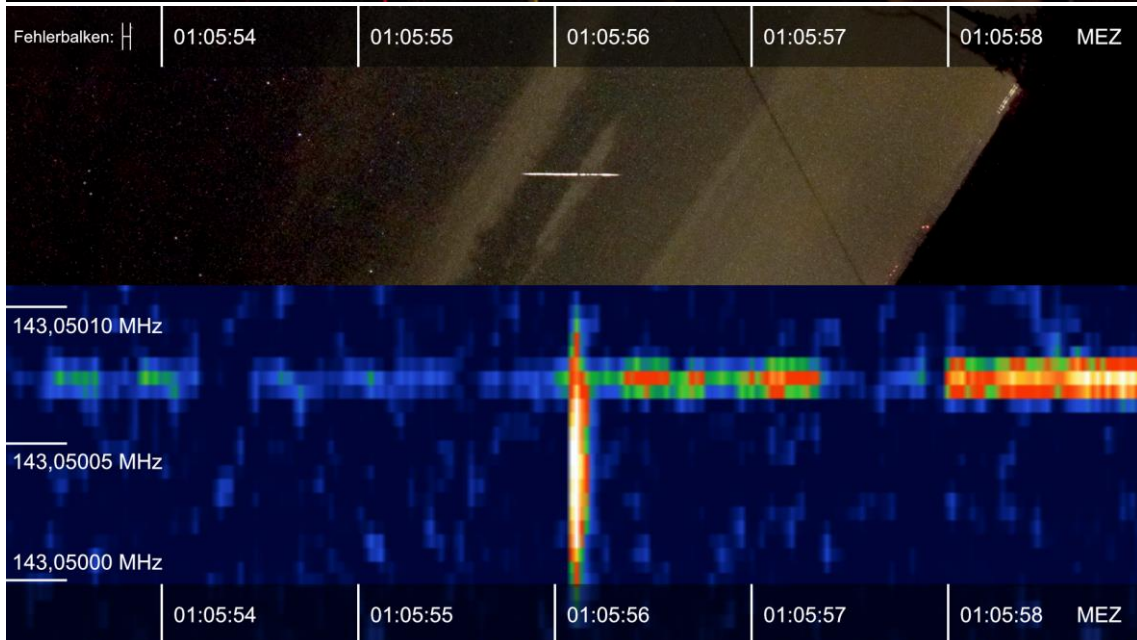


# Meteore

## Synchrone Video- und Radiobeobachtungen des Perseidenstromes



Linus Sorg und Till Eissler  
Jugend forscht 2022

## **Meteore – Synchrone Video- und Radiobeobachtungen des Perseidenstromes**

Linus Sorg (15), Till Eissler (16)

Progymnasium Rosenfeld, Schulstraße 9, 72348 Rosenfeld

Projektbetreuer: Herr Dipl.-Phys. Till Credner

Thema des Projekts: Meteore – Synchrone Video- und Radiobeobachtungen des  
Perseidenstromes

Fachgebiet: Geo- und Raumwissenschaften

Wettbewerbssparte: Jugend forscht

Bundesland: Baden - Württemberg

Wettbewerbsjahr: 2022

Im August 2021 wurden Meteore der Perseiden gefilmt und mit einer Yagi-Antenne Radiodaten empfangen und aufgezeichnet. Mit einer selbst programmierten Software wurden die Videos durch eine Künstliche Intelligenz ausgewertet und bei den 268 Videometeoren nach einem begleitenden Radiosignal gesucht.

Durch die sehr genaue Synchronisation konnte dieses bei 8,2 % der Meteore in einem Zeitraum von 5 s vor bis 5 s nach dem Meteor gefunden werden. Die gefundenen Radiosignale ließen sich alle in drei verschiedene Typen mit unterschiedlichen Eigenschaften einteilen. Anhand des beobachteten Doppler-Effekts bei den Radiosignalen einiger Meteore konnte das schnelle Abbremsen um bis zu  $5 \text{ km/s}^2$  beobachtet werden.

---

## **Gliederung der schriftlichen Arbeit**

Einleitung .....	1
Radiosignale bei Meteoren .....	1
Auswahl des Senders .....	1
Vorgehensweise, Materialien und Methoden .....	1
Technikaufbau .....	2
Radiotechnik.....	2
Videotechnik.....	3
Beobachtungsdurchführung.....	3
Wechsel der Antenne.....	3
Problem mit dem SDR-Empfänger .....	3
Synchronisation.....	4
Auswertung .....	4
Automatisierte Auswertung der Videodaten .....	4
Auswertung der Radiodaten .....	6
Ergebnisse.....	7
Zeitlicher Aktivitätsverlauf der Videometeore .....	7
Videometeore mit begleitendem Radiosignal.....	9
Veränderungen mit der Uhrzeit.....	9
Frequenzmittelwerte.....	9
Zeitstrahl-Montagen .....	10
Radiosignaltypen.....	11
Berechnung der Radialgeschwindigkeits-Differenz (Doppler-Effekt) .....	12
Ergebnisdiskussion .....	13
Ausblick.....	14
Quellen- und Literaturverzeichnis:.....	15
Unterstützung durch Personen und Institutionen .....	16

---

## Einleitung

In dieser Jugend-forscht-Arbeit soll unter Fortführung der letzten beiden Arbeiten der Zusammenhang zwischen Video- und Radiosignalen von Meteoren weiter untersucht werden. Dieses Jahr wurde unter anderem die Synchronisation und Auswertung der Daten verbessert, um gezielt einen zeitlichen Zusammenhang untersuchen zu können. Dementsprechend lautet die Leitfrage:

### **Welche zeitlichen Zusammenhänge lassen sich zwischen synchronisierten Video- und Radiodaten von Meteoren erkennen?**

Das heißt, es soll besonders mithilfe der genaueren Synchronisation untersucht werden, wie sich Beginn, Ende und Dauer von Video- und Radiometeoren miteinander vergleichen und in Zusammenhang bringen lassen. Auch soll die Auswertung weiterhin automatisiert ablaufen, allerdings durch eine Künstliche Intelligenz in der Lage sein, mehr Videometeore zu finden.

Nachdem im Meteorcamp 2018 überraschenderweise einige Audiosignale zu gefilmten Meteoren empfangen werden konnten, obwohl keinerlei Antenne angeschlossen war, wurde in den letzten beiden Forschungsjahren der Zusammenhang zwischen Video- und Radiosignalen von Meteoren untersucht, zuletzt mithilfe des französischen Radarsenders GRAVES, der zu ca. 30% der Videometeore ein Radiosignal im Zeitintervall von 5 s vor bis 5 s nach dem sichtbaren Meteor lieferte.

Die Weiterentwicklung der vorangegangenen Projekte beinhaltet u. a. die Wahl eines anderen Senders und eine deutlich verbesserte Synchronisation zwischen Video- und Radioaufnahmen, ermöglicht durch ein künstliches Radiosignal, dessen Sendezeitpunkt man auch im Video bestimmen kann, sodass die Genauigkeit im Bereich von der Länge eines Video-Einzelbildes liegt.

## Radiosignale bei Meteoren

Wenn ein Radiosignal auf die Ionisationsspur eines Meteors trifft, kann es reflektiert und bis über den Horizont hinaus übertragen werden. Eine Ionisationsspur tritt auf, wenn die Luft durch den Eintritt des Meteors in die Atmosphäre aufgrund hoher Reibung stark elektrisiert wird. Das vom Sender kommende Signal kann so an der Ionisationsspur reflektiert und auch noch hinter dem Horizont empfangen werden (Abb. 1).

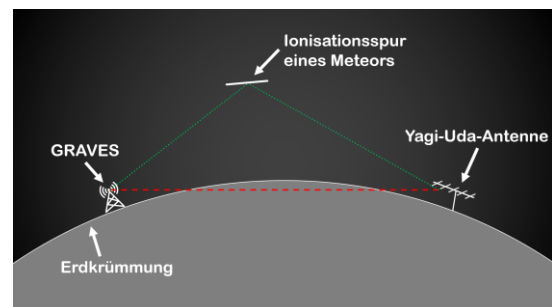


Abb. 1: Reflexion eines Radiosignals an der Ionisationsspur eines Meteors  
Grafik: Linus Sorg

## Auswahl des Senders

Im vorherigen Forschungsjahr war es das Ziel, den Sender GRAVES zu empfangen. Dieser erwies sich allerdings durch eine sich bewegende Sendeleuchte als nicht optimal geeignet, da nur ca. 30 % der Zeit das Sendesignal in eine bestimmte Richtung zeigte, und deshalb nur bei ca. 30 % der Meteore ein Radiosignal zu finden war. Nach weiterer Recherche wurde dann der Meteorsender BRAMS in Belgien ausgewählt. Da dieser jedoch mit 49,97 MHz im Vergleich zu GRAVES (143,05 MHz) eine ungefähr 3-fach größere Wellenlänge hat, muss auch die Empfangsantenne entsprechend proportional größer sein.

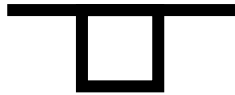
## Vorgehensweise, Materialien und Methoden

Untersucht wurde der Perseidenstrom im August. Die Aufnahmen wurden im Rahmen des Meteorcamps des Sterneparks Schwäbische Alb in der Vulkaneifel auf dem Observatorium Hoher List in der Zeit vom 10. - 15.08.2021 durchgeführt, wobei jede Nacht beobachtet wurde.

## Technikaufbau

### Radiotechnik

Als Antennentyp wurde eine selbst gebaute 4-Element Yagi-Uda-Antenne (Abb. 2) ausgewählt. Diese besteht aus einem Dipol, einem Reflektor und zwei Direktoren, die alle auf ein Trägerelement montiert werden, wobei der Dipol isoliert werden muss. Alle Einzelemente bestehen aus Aluminiumrohren mit einem Außendurchmesser von 12 mm und einem Innendurchmesser von 10 mm. Das Trägerelement besteht aus mehreren Aluminium-Quadratrohren, die mit Zwischenstücken zu einem langen Element verbunden werden und folgendes Profil haben:



Bauteil	Länge [mm]	Position auf dem Trägerelement [mm]
Reflektor	3046	100
Dipol	2782	1306
Direktor 1	2675	1941
Direktor 2	2578	3624
Trägerelement	3800	–



Abb. 2: Yagi-Uda-Antenne für BRAMS  
Foto: Antonio Schmusch

Zur Befestigung der Direktoren und des Reflektors auf dem Trägerelement werden 3D-gedruckte Teile verwendet (Abb. 3 und 4):

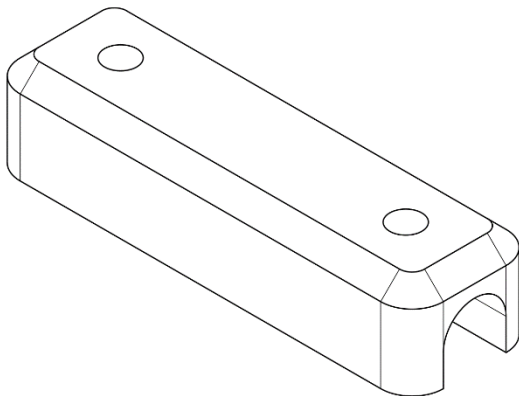


Abb. 3: Nicht-isolierende Halteklemme für Antennenelemente  
Grafik: Linus Sorg

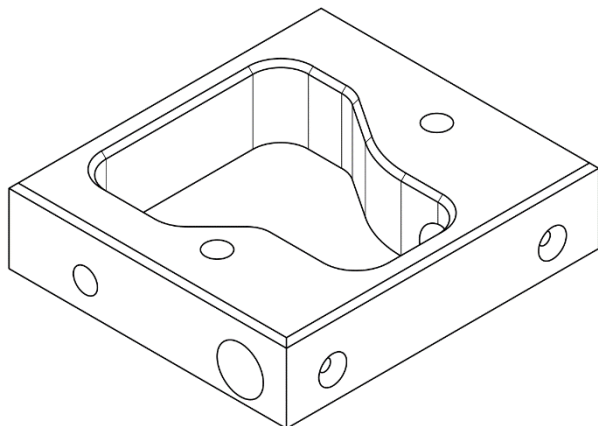


Abb. 4: Isolierende Dipolhalterung mit Kabelführung  
Grafik: Linus Sorg

Die 12-mm-Aluminium-Rohre für Direktoren und Reflektor werden in der Mitte geteilt, jeweils um 33,75 mm gekürzt und die Hälften dann jeweils auf ein ca. 16 cm langes Aluminiumrohr gesteckt, das einen Außendurchmesser von 10 mm hat und durch die Halteklemme am Trägerelement fixiert ist. Damit es unter die Halterung passt, muss zwischen den beiden Rohrhälften ein Abstand von 67,5 mm sein. Sowohl auf der Außenseite der 10-mm-Rohre als auch auf der Innenseite der 12-mm-Rohre muss die Eloxalschicht entfernt werden, um einen elektrischen Kontakt zu ermöglichen. Beim Dipol wird fast gleich verfahren, allerdings wird als Mittelstück ein nichtleitender Holzdübel



verwendet, die Rohre werden mit nur 5 mm Abstand montiert und an jeder der Hälften ist jeweils eine der beiden Adern des Koaxialkabels angeschlossen.

Die Yagi-Antenne wurde auf ein selbst gebautes Holzstativ mit einer Höhe von 6 m montiert, was Störsignale, die in der Nähe des Bodens auftreten können, minimiert. Die Antenne wird über ein Low-Loss Koaxialkabel und dessen SMA-Stecker an die SMA-Buchse eines SDR-Empfängers angeschlossen. Ausgewählt wurde zu diesem Zweck ein SDRplay RSP1A (Abb. 5), der mittels USB die Radiosignale an den Computer weitergibt. Dort werden mit der Software HDSDR die Radiodaten aufgezeichnet und als WAV-Datei gespeichert.



Abb. 5: SDRplay RSP1A  
Foto: Linus Sorg

## Videotechnik

Für die Videoaufnahmen wurde eine SONY Alpha 7s II (Abb. 6) und ein 24 mm f/1,4 Nikkor-Objektiv verwendet, befestigt auf einem vibrationsarmen Holzstativ.

Kameraeinstellungen:

Auflösung	4K Ultra HD (3840 x 2160 px)
Einzelbildrate	25 FPS
ISO	102.400 / 51.200 / 25.600
Weißabgleich	4000 K
Belichtungszeit	1/25 s
Blendenöffnung	f/1,4 (Nikkor)
Brennweite Objektiv	24mm (Nikkor)
Gesichtsfeld	73,7° x 45,7° (Nikkor)



Abb. 6: SONY Alpha 7s II (Abgebildetes Objektiv entspricht nicht dem verwendeten Objektiv)  
Foto: Linus Sorg

## Beobachtungsdurchführung

### Wechsel der Antenne

Nachdem in den ersten beiden Perseiden-Nächten keine Radiosignale von der BRAMS-Antenne empfangen wurden, wurde stattdessen die GRAVES-Antenne vertikal auf dem Stativ montiert und gemeinsam mit der Kamera auf Azimut 198° Elevation 30° ausgerichtet, um stattdessen GRAVES zu empfangen. Für den technischen Aufbau und die Richtcharakteristik der GRAVES-Antenne wird auf die Jugend forscht Arbeit von letztem Jahr verwiesen.<sup>1</sup> Die vertikale Ausrichtung wurde ausgewählt, da so die Richtcharakteristik der Antenne besser mit dem Sichtfeld der Kamera übereinstimmt.

### Problem mit dem SDR-Empfänger

Nachdem die BRAMS-Radiobeobachtungen in der Vulkaneifel nicht erfolgreich waren, wurde die gesamte Radioausstattung gemeinsam mit dem Amateurfunker Denis Mrsa umfassend geprüft und ein Problem mit der Konfiguration des SDR-Empfängers festgestellt. In den Hardwareeinstellungen, dem sog. „ExtIO“ war ein falscher Wert für den LNA (engl. „Low Noise Amplifier“) eingestellt. Der SDR-Empfänger war zu unempfindlich eingestellt und konnte schwächere Radiosignale nicht empfangen.

<sup>1</sup> [https://www.allthesky.com/articles/MeteoreJugendforscht2021\\_SorgEissler.pdf](https://www.allthesky.com/articles/MeteoreJugendforscht2021_SorgEissler.pdf)

## Synchronisation

Am Anfang jedes Videos wurde vor die Kamera eine laufende Uhr eines Smartphones oder Laptops gehalten, die vorher mit der Atomzeit synchronisiert wurde, so dass sie im Nachhinein auf der Aufnahme lesbar war (Abb. 7). Dadurch konnte die Anfangszeit des Videos sekundengenaue bestimmt werden.

Um das diesjährige Forschungsziel – die Untersuchung des zeitlichen Zusammenhang zwischen Video und Radiometeor – zu ermöglichen, musste die Synchronisation im Vergleich zum letzten Jahr deutlich verbessert werden. Um das zu erreichen, wurde das Stör-Radiosignal eines Netzteils (Abb. 8) ausgenutzt, um ein künstliches Radiosignal zur Antenne zu senden. Gleichzeitig gibt es am Netzteil ein Lämpchen, das anzeigt, ob es an oder ausgeschaltet ist, und direkt an die Stromzufuhr des Netzteils angeschlossen ist, so dass eine etwaige Verzögerung durch den im Netzteil verbauten Transformator ausgeschlossen ist. Wird nun das Netzteil ausgeschaltet empfängt die Antenne das erzeugte Störsignal und im Kamerabild ist klar zu erkennen, wann es ausgeschaltet wurde bzw. das Radiosignal entstanden ist. Bei der Auswertung können die Video- und Radiodaten dadurch sehr genau synchronisiert werden.

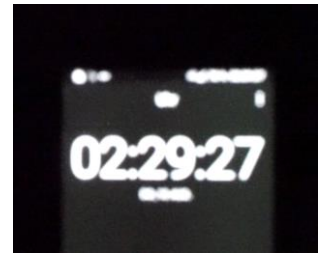


Abb. 7: Bestimmung der Uhrzeiten mithilfe einer laufenden Smartphone-Uhr  
Foto: Linus Sorg

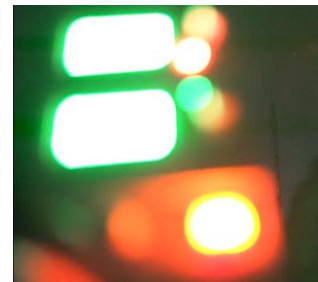


Abb. 8: Netzteil zur Synchronisation  
(Kamera ist auf den Sternenhimmel scharfgestellt)  
Foto: Till Eissler

## Auswertung

### Automatisierte Auswertung der Videodaten

Im letzten Forschungsjahr wurden die Videodaten mithilfe der selbstprogrammierten Software VAMOS (Video-Assisted Meteor Observation System) ausgewertet, die mithilfe von Differenzbildung sich bewegende Objekte in Videos erkennen und deren Daten bestimmen konnte. Doch im Vergleich zu einer visuellen Auswertung durch einen Menschen konnte die Erkennungsrate nicht mithalten, weshalb für das aktuelle Forschungsjahr eine Künstliche Intelligenz trainiert und in VAMOS integriert wurde. Das neue Programm wird aufgrund dieser Ergänzung „VAMOS+“ genannt.

Bei der KI handelt es sich um ein sog. „Konvolutionelles Neuronales Netzwerk“ (engl. „CNN“: „Convolutional Neural Network“), was eine spezielle Art von maschinellem Lernen darstellt. Diese Neuronalen Netze eignen sich besonders gut zur Analyse von Bild- oder Audiodaten.<sup>2</sup> Zum Training des Machine Learning Modells (ab jetzt einfach nur „Modell“) wurde das Object Detection API von Tensorflow benutzt, was von Google entwickelt wurde und neben „PyTorch“ das am weitesten verbreitete Werkzeug zum Erstellen solcher Modelle darstellt. Genau wie das gesamte VAMOS vom letzten Jahr verwendet auch Tensorflow die Programmiersprache Python.

Für den Trainingsprozess wurden ca. 2000 4K-Bilder von Meteoren gesammelt, diese stammen alle aus dem Videomaterial des letzten Jahres, also von Perseiden und Geminiden. Negativ-Samples, also Bilder ohne Meteor, waren nicht nötig, da das Modell keine Klassifikation, sondern Objekterkennung betreibt. Anschließend wurden die Bilder mit dem Open-Source-Programm „LabelImg“<sup>3</sup> gelabelt - darunter versteht man das Erzeugen einer Datei, die Angaben zur Klasse und Position der verschiedenen Objekte im Bild enthält. Im genannten Anwendungsfall der Meteorerkennung gibt es nur die „Meteor“-Klasse, es wäre aber z.B. auch eine Unterscheidung zwischen Meteor-Kopf und Leuchtspur möglich, sofern das beim Labeling berücksichtigt wird.

Anstatt das Modell von Grund auf neu zu trainieren - was wochenlanges Training auf sehr leistungsstarken Computern bedeuten kann - wurde die Technik des sog. „Transfer Learnings“ verwendet. Dabei wird nur die letzte Ebene eines bestehenden Neuronalen Netzes neu trainiert,

<sup>2</sup> <https://towardsdatascience.com/a-comprehensive-guide-to-convolutional-neural-networks-the-eli5-way-3bd2b1164a53>

<sup>3</sup> <https://github.com/tzutalin/labelImg>

welche sich auf bestimmte Objekte spezialisiert. Dadurch kann auf die bestehenden restlichen Ebenen zugegriffen werden, die allgemeiner arbeiten, z.B. als Erkennung von Kanten oder Formen. Die letzten Ebenen werden auf Muster trainiert, die Meteore von anderen Objekten unterscheiden.<sup>4,5</sup> Als Basismodell wurde das „SSD MobileNet V2 FPNLite 640x640“<sup>6</sup> verwendet, welches mit dem „COCO 2017“ Datensatz<sup>7</sup> trainiert wurde und einen für diesen Anwendungsfall geeigneten Kompromiss zwischen Genauigkeit und Geschwindigkeit besitzt.

Für jedes Objekt, das das Modell in einem Bild erkennt, werden folgende Daten ausgegeben:

- Koordinaten eines Rechtecks, welches das Objekt umschließt
- Prozentangabe, wie sehr das Objekt mit dem gelernten Muster übereinstimmt (engl. „Score“)

Durch den Score und die Fläche des Rechtecks, die sich aus den Koordinaten berechnen lässt, können die erkannten Objekte anschließend durch Schwellenwerte aussortiert werden. Objekte mussten mind. einen Score von 20% und abhängig von der Auflösung max. eine Fläche von 500 (Full HD) bzw. 2000 Pixel (4K) haben.

Nach der Analyse, die - je nach Hardware des Computers - unterschiedlich lange andauert, kann eine „\*.vamos“-Datei mit den Ergebnissen exportiert werden. Dabei werden die separaten Erkennungen eines Meteors auf verschiedenen Einzelbildern zu einem Meteor gruppiert, indem für jede Erkennung auf den letzten 10 Einzelbildern nach Erkennungen mit einer Entfernung von max. 100 (Full HD) bzw. 200 Pixeln (4K) gesucht wird.

Um Fehlerkennungen auszusortieren, werden alle gruppierten Erkennungen, die insgesamt länger als 5 Sekunden andauern, gelöscht. Wie auch beim VAMOS vom letzten Forschungsjahr können die Schwellen- und Grenzwerte über die Einstellungen angepasst werden.

Sind alle Berechnungen abgeschlossen, wird die „\*.vamos“-Datei abgespeichert. Diese enthält die berechneten Meteordaten und Informationen über das analysierte Video und kann später bei Bedarf wieder in VAMOS+ geöffnet werden, z.B. zur Kontrolle der Meteordaten oder dem Export in ein Dateiformat für eine Tabellenkalkulation wie Microsoft Excel.

Wird eine solche „\*.vamos“-Datei geöffnet, wird folgende Benutzeroberfläche angezeigt (Abb. 9):

The screenshot displays the VAMOS application interface with four main panels:

- PROJECTDETAILS (1):** Shows a file path and a 'GENERATE REPORT' button.
- VIDEODETAILS (2):** Displays a table with video analysis data.
- VIDEOVORSCHAU (3):** Shows a video preview of a meteor.
- METEORE (4):** Displays a table with meteor detection data.

MeteorID	VideoID	Position	Frames	Beginning CET	End CET	Beginning Video	End Video	Duration	max. Area	Date
M-0000001	V-0047	1498, 751	59	00:39:55.36	00:39:55.40	00:00:02.36	00:00:02.40	1 frames	150 px	14.08.2021
M-0000002	V-0047	1498, 751	59	00:39:55.36	00:39:55.40	00:00:02.36	00:00:02.40	1 frames	150 px	14.08.2021
M-0000003	V-0047	1500, 748	113, 115	00:39:57.52	00:39:57.64	00:00:04.52	00:00:04.64	3 frames	120 px	14.08.2021
M-0000004	V-0047	1498, 749	113, 115	00:39:57.52	00:39:57.64	00:00:04.52	00:00:04.64	3 frames	120 px	14.08.2021
M-0000005	V-0047	1500, 750	301, 305, 307, 310	00:40:07.68	00:40:07.76	00:00:14.68	00:00:14.76	75 frames	144 px	14.08.2021
M-0000006	V-0047	1501, 749	301, 305, 307, 310	00:40:07.68	00:40:07.76	00:00:14.68	00:00:14.76	75 frames	380 px	14.08.2021
M-0000007	V-0047	1500, 749	367, 368	00:40:07.68	00:40:07.76	00:00:14.68	00:00:14.76	2 frames	135 px	14.08.2021
M-0000008	V-0047	1500, 748	367, 368	00:40:07.68	00:40:07.76	00:00:14.68	00:00:14.76	2 frames	408 px	14.08.2021
M-0000009	V-0047	1501, 749	362, 365, 368, 391, 397, 403, 412, 4...	00:40:08.28	00:40:11.80	00:00:15.28	00:00:18.80	88 frames	135 px	14.08.2021
M-0000010	V-0047	1500, 749	362, 365, 368, 391, 397, 403, 412, 4...	00:40:08.28	00:40:11.80	00:00:15.28	00:00:18.80	88 frames	408 px	14.08.2021
M-0000011	V-0047	1501, 749	523	00:40:13.92	00:40:13.96	00:00:20.92	00:00:20.96	1 frames	128 px	14.08.2021
M-0000012	V-0047	1501, 749	523	00:40:13.92	00:40:13.96	00:00:20.92	00:00:20.96	1 frames	128 px	14.08.2021

Abb. 9: VAMOS-Bedienoberfläche des Ergebnis-Fensters  
Grafik: Linus Sorg

<sup>4</sup> <https://datasolut.com/was-ist-transfer-learning/>

<sup>5</sup> [https://www.tensorflow.org/tutorials/images/transfer\\_learning](https://www.tensorflow.org/tutorials/images/transfer_learning)

<sup>6</sup>

[https://github.com/tensorflow/models/blob/master/research/object\\_detection/g3doc/tf2\\_detection\\_zoo.md](https://github.com/tensorflow/models/blob/master/research/object_detection/g3doc/tf2_detection_zoo.md)

<sup>7</sup> <https://cocodataset.org/#home>



Im Bereich (1) findet man den Dateipfad des Ergebnis-Ordners, einen Knopf zum Exportieren in eine Tabellenkalkulation und einen Knopf zum Speichern der „\*.vamos“-Datei. Im Bereich (2) können Informationen über die Videos eingesehen und diese auch ggf. durch einen Klick in der Tabelle im Bereich (3) abgespielt werden. Der Bereich (4) beinhaltet alle Meteordaten, die während der Analyse gesammelt wurden:

- MeteorID: „Name“ des Meteors von M-0000001 bis M-9999999
- VideoID: Entspricht dem Namen des Videos, von „V-0001“ bis „V-9999“
- Position: Position der Mitte des Meteors in Pixeln von der oberen linken Ecke des Bilds aus
- Frames: Einzelbilder, auf denen der Meteor erkannt wurde
- Beginning CET: Uhrzeit in MEZ, bei der der Meteor erstmalig erkannt wurde
- End CET: Uhrzeit in MEZ, bei der der Meteor zuletzt erkannt wurde
- Beginning Video: Zeit im Video, bei der der Meteor erstmalig erkannt wurde
- End Video: Zeit im Video, bei der der Meteor zuletzt erkannt wurde
- Duration: Dauer des Meteors in Einzelbildern
- max. Area: Größte erkannte Fläche des Meteors in Pixeln
- Date: Datum, bei dem der Meteor erstmalig erkannt wurde

Wird auf einen der Meteore in der Tabelle geklickt, springt das Video im Bereich (3) an genau die Stelle im Video, an der der Meteor erkannt wurde, wodurch das Überprüfen der Meteore sehr schnell möglich ist. Findet man einen oder mehrere falsch positive Erkennungen, kann man sie mit „Delete Selected“ im Kontextmenü löschen. Oft kommt es allerdings vor, dass andere Himmelskörper wie Satelliten, Flugzeuge oder auch Sterne durch ihre lange Anwesenheit im Bild und ihre teils variierende Helligkeit in mehreren aufeinanderfolgenden Erkennungen vorkommen. Da bei diesen Erkennungen die Position bis auf wenige Pixel fast gleich ist, können mit „Delete Similar“ im Kontextmenü diese positionsähnlichen Erkennungen auf einmal gelöscht werden.

Für die Bestimmung von genauen Uhrzeiten, bei denen die Meteore auftreten, muss vor der Analyse die Anfangsuhrzeit des Videos ausgewählt werden. Zur Verfügung stehen zwei Möglichkeiten, zwischen denen auf dem Startbildschirm von VAMOS+ gewechselt werden kann. Entweder kann die Anfangsuhrzeit manuell eingegeben werden, oder mithilfe einer XML-Datei, die diese Information enthält. Eine solche XML-Datei wird bei der verwendeten SONY Alpha 7s II für jedes neue Video automatisch auf die Speicherkarte geschrieben. Allerdings verwendet die Kamera keine Internetzeit, weshalb VAMOS+ auch eine separate XML-Datei generieren kann, wo mithilfe der ins Kamerabild gehaltenen Smartphone-Uhr die Uhrzeit deutlich genauer bestimmt und für die Analyse verwendet werden kann.

## Auswertung der Radiodaten

Das Programm HDSDR speichert WAV-Dateien ab, die man später auch wieder dort öffnen und abspielen kann. Beim Abspielen mit HDSDR wird ein Spektrogramm angezeigt, mit der Zeit auf der Y-Achse, der Frequenz auf der X-Achse und einer Pixelfarbe von schwarz über blau und rot bis weiß, abhängig von der Signalstärke (Abb. 10).

An Zeitpunkten, bei denen Videometeore erkannt wurden, wurde anschließend das Spektrogramm auf Radiosignale untersucht, die sich im 10s-Intervall von 5 Sekunden vor bis 5 Sekunden nach dem Videometeor befinden. Wurde ein Radiosignal gefunden, wird zwischen vier Signalstärken unterschieden, die hier als Spektrogramme abgebildet sind (Abb. 11):

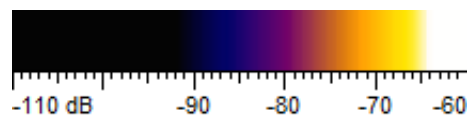


Abb. 10: Farbcodierte Signalstärke  
Grafik: Linus Sorg

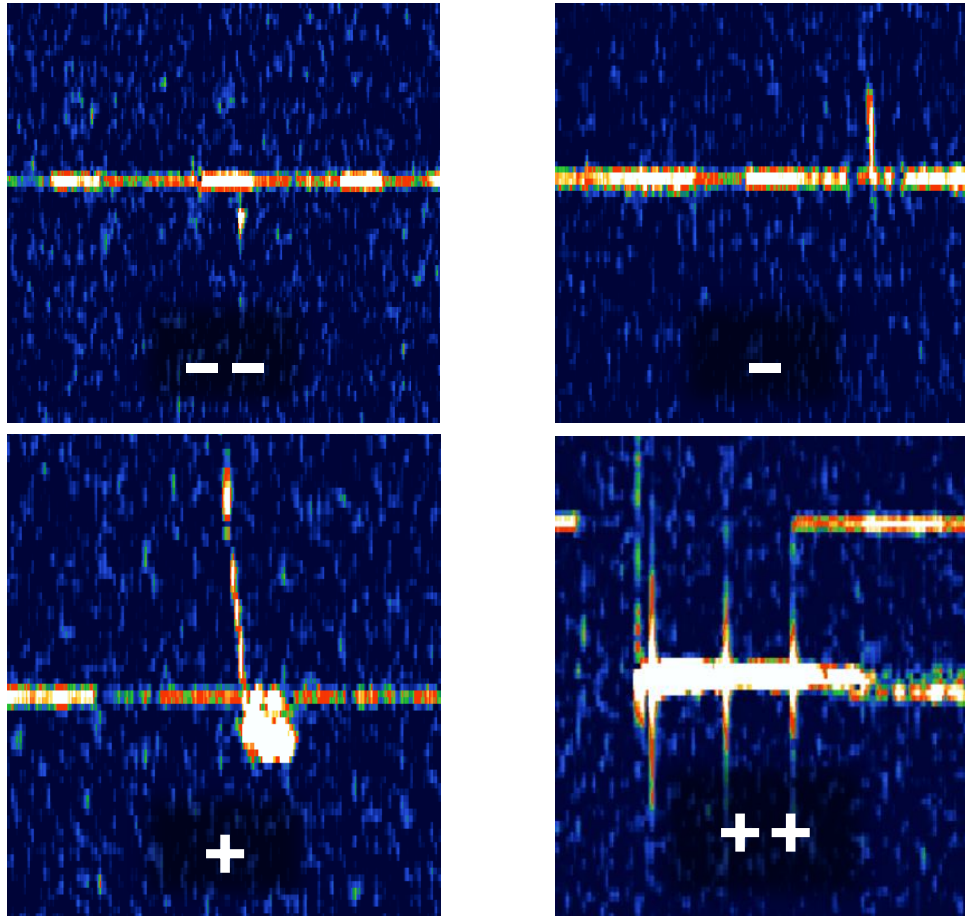


Abb. 11: Spektrogramm-Screenshots von Meteoren mit subjektiv zugeordneter Signalstärke  
*Das sichtbare horizontale Stör-signal wird durch den SDR-Empfänger verursacht.*  
 (X-Achse: Frequenz; Y-Achse: Zeit)  
 Grafik: Linus Sorg

## Ergebnisse

### Zeitlicher Aktivitätsverlauf der Videometeore

Da in den Nächten, in denen mit der BRAMS-Antenne aufgenommen wurde, keine Radiosignale empfangen werden konnten, wurden die Videos dieser Nächte auch nicht ausgewertet.

	Videometeore insg.	Aufnahmedauer der Nacht [hh:mm:ss]	Meteore pro Stunde
12.-13.08.	78	05:41:44	13,7
13.-14.08.	120	06:03:00	19,8
14.-15.08.	70	05:24:54	12,9
Alle Nächte	268	17:09:38	Ø 15,6

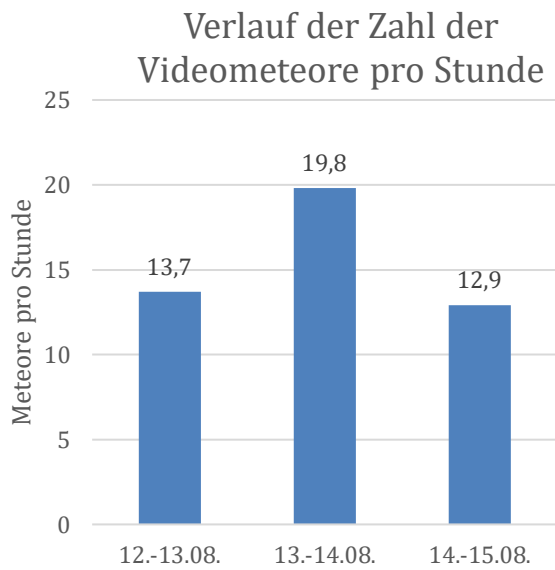


Abb. 12: Verlauf der Videometeore pro Stunde über alle Beobachtungsnächte  
Grafik: Linus Sorg

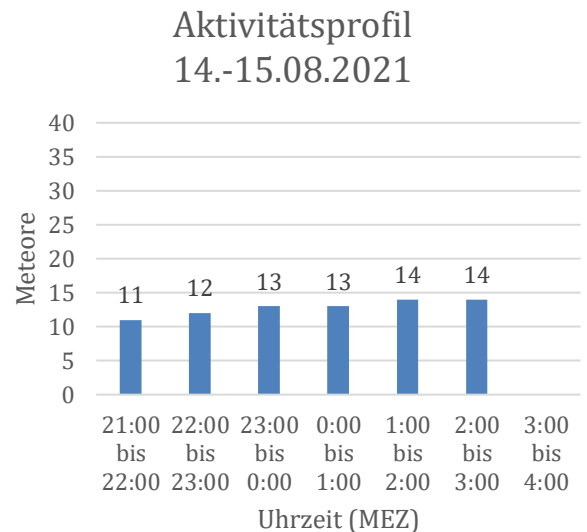
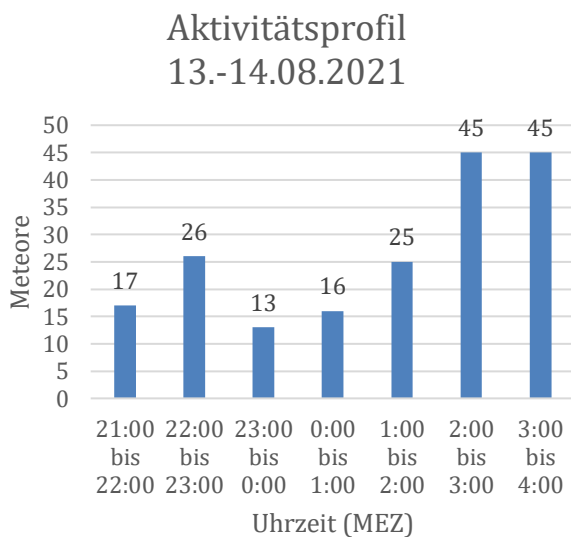
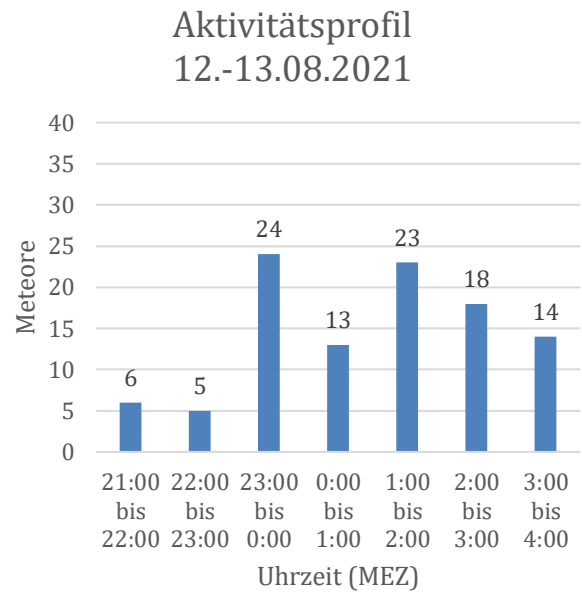


Abb. 13: Aktivitätsprofile aus den Videodaten der Beobachtungsnächte  
Grafik: Linus Sorg

Da zwischen manchen Videos Pausen von einigen Minuten waren, wurden die gezählten Meteore für die Aktivitätsprofile (Abb. 13) auf ganze Stunden hochgerechnet.

## Videometeore mit begleitendem Radiosignal

	Stärke des Radiosignals				Radiometeore insg.	Videometeore insg.	Anteil Videometeore mit Radiosignal
	--	-	+	++			
12.-13.08.	2	1	3	0	6	78	7,7%
13.-14.08.	3	3	2	3	11	120	9,2%
14.-15.08.	0	3	1	1	5	70	7,1%
Alle Nächte	5	7	6	4	22	268	8,2%

## Veränderungen mit der Uhrzeit

Vergleicht man nur die Uhrzeiten und deren Anteil von Videometeoren mit Radiosignal, fällt auf, dass sich der Anteil im Verlauf der Nacht fast nicht verändert (Abb. 15). Aufgrund der kleinen Anzahl der Radiometeore von zwei bis fünf ist die statistische Ungenauigkeit jedoch sehr groß.

Uhrzeit (MEZ)	12.-13.		13.-14.		15.-16.		Gesamt		
21 – 22 Uhr	2	6	0	10	0	11	2	27	7 %
22 – 23 Uhr	1	4	4	23	0	12	5	39	13 %
23 – 0 Uhr	0	16	2	12	1	13	3	41	7 %
0 – 1 Uhr	0	4	0	9	2	13	2	26	8 %
1 – 2 Uhr	1	19	0	5	2	14	3	38	8 %
2 – 3 Uhr	2	16	2	27	0	7	4	50	8 %
3 – 4 Uhr	0	13	3	34			3	47	6 %

Abb. 14: Absolute Häufigkeiten der Radiosignale, aufgeschlüsselt nach Stunde und Nacht  
(Pro Nacht: Radiosignale, Videometeore  
Gesamt: Radiosignale, Videometeore, Prozentualer Anteil der Videometeore mit Radiosignal)  
Grafik: Linus Sorg

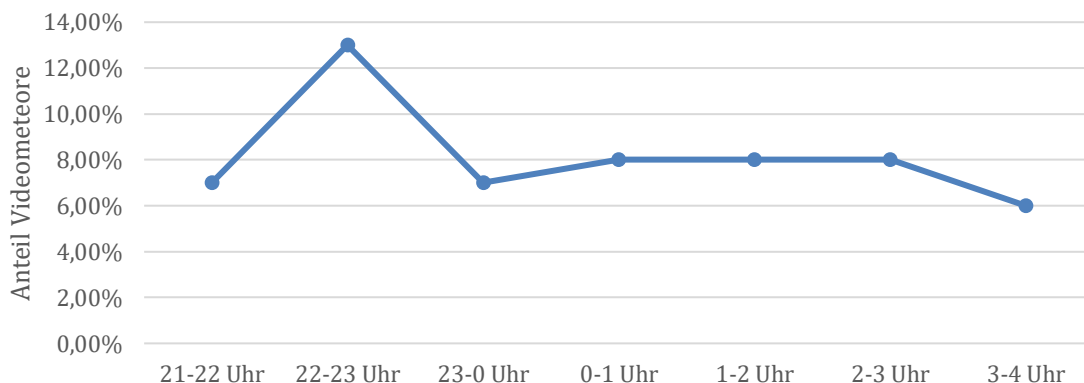


Abb. 15: Anteil von Videometeoren mit Radiosignal im Verlauf der Nacht  
Grafik: Linus Sorg

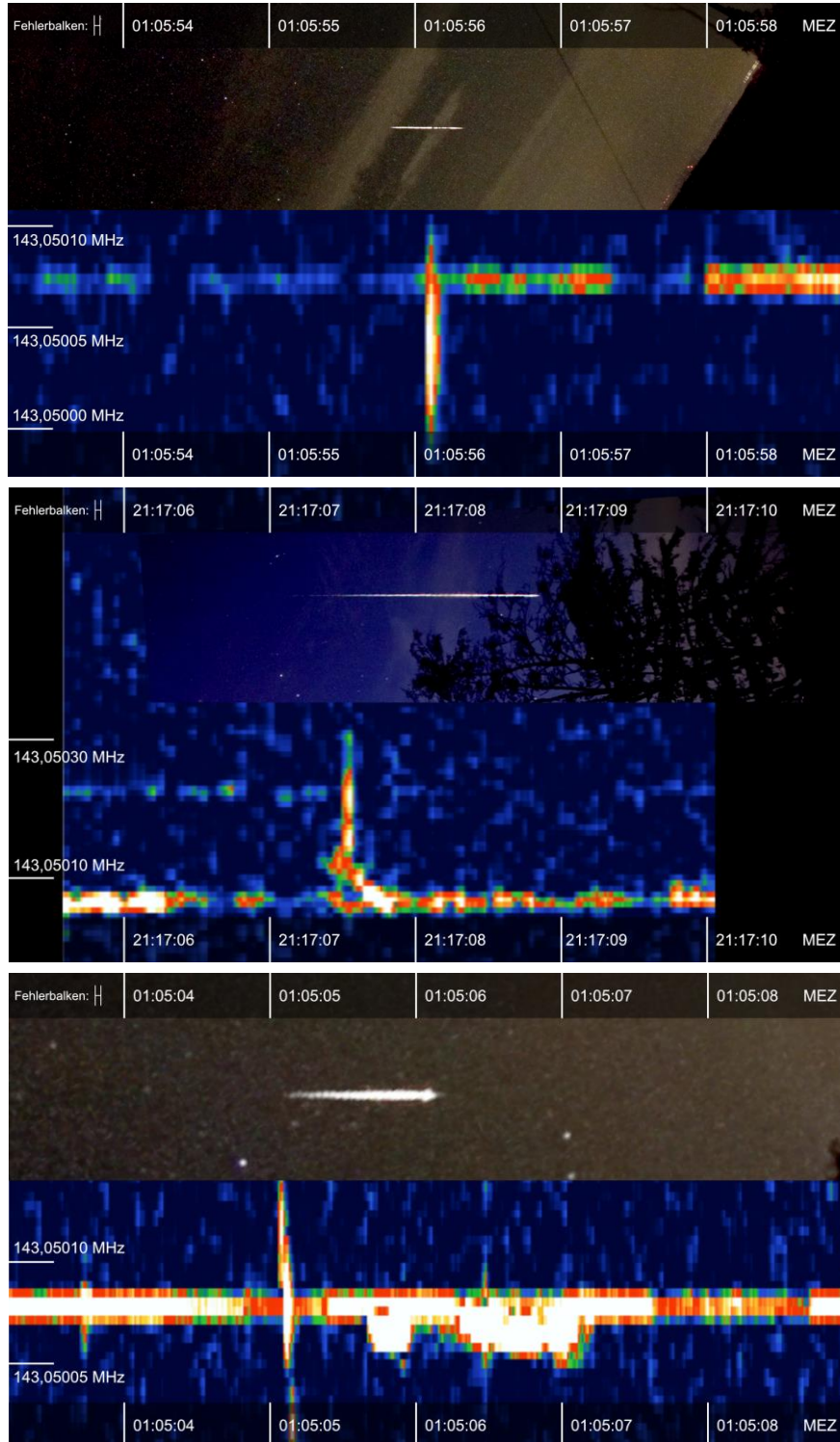
## Frequenzmittelwerte

Werden bei den gefundenen Radiosignalen die Frequenzmittelwerte bestimmt, ergibt sich ein Durchschnittswert von ca. 143.050.097 Hz, wobei Werte zwischen 143.050.010 und 143.050.200 ermittelt wurden.<sup>8</sup>

<sup>8</sup> Nach Entfernung der Extremwerte

## Zeitstrahl-Montagen

Zum Vergleich von Beginn, Ende und Dauer von Video- und Radiometeor können beide Daten auf einem gemeinsamen Zeitstrahl dargestellt werden. Dazu werden die Einzelbilder des Meteors mit dem Programm „DeepSkyStacker“<sup>9</sup> in ein einziges kombiniert, das dann den zeitlichen Verlauf seiner Helligkeit darstellt. Wird darunter noch das Spektrogramm aus HDSDR dargestellt, erhält man solche Grafiken (Abb. 16):



<sup>9</sup> <http://deepskystacker.free.fr/german/>



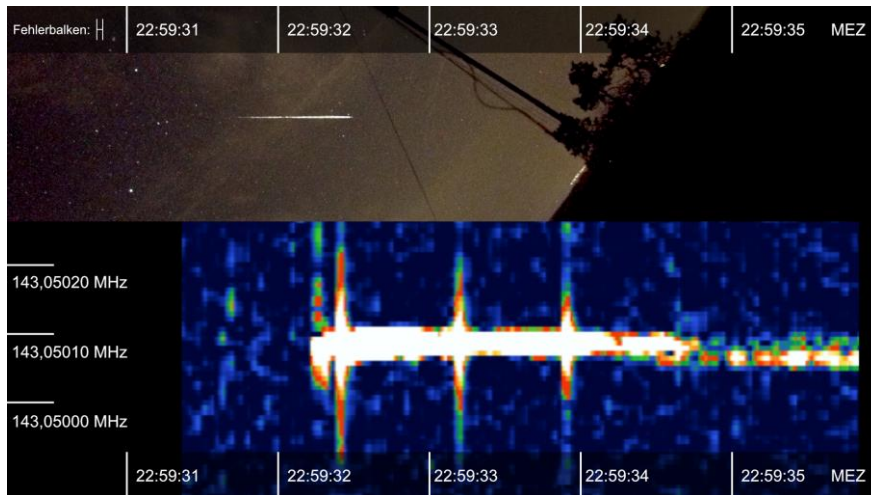


Abb. 16: Zeitstrahl-Montagen von Meteoren mit begleitendem Radiosignal  
 Der synchronisationsbedingte Fehlerbalken beträgt 0,04 Sekunden (1 Einzelbild)  
 Meteore von oben nach unten: 13.08.2021, 12.08.2021, 15.08.2021, 12.08.2021  
 Grafiken: Linus Sorg

## Radiosignaltypen

Alle gefundenen Radiosignale konnten in drei Typen mit unterschiedlichen Eigenschaften eingeteilt werden:

Bezeichnung	Typ 1	Typ 2	Typ 3
Merkmale	Kurze Dauer In Frequenzrichtung gestreckt	Sehr lange Dauer In Zeitrichtung gestreckt Besteht aus einem Hauptkörper und mehreren, in regelmäßigen Abständen auftretenden Pulsen	Lange Dauer In Zeitrichtung gestreckt
Verallgemeinerte Form			

Typ 2 kam bei den Radiosignalen von diesem Jahr nur einmal vor. Da aber auch Signale von letztem Jahr diesem Typ zuzuordnen sind, wird er als statistisch signifikant angesehen. Es ergibt sich folgende Verteilung (Abb. 17):

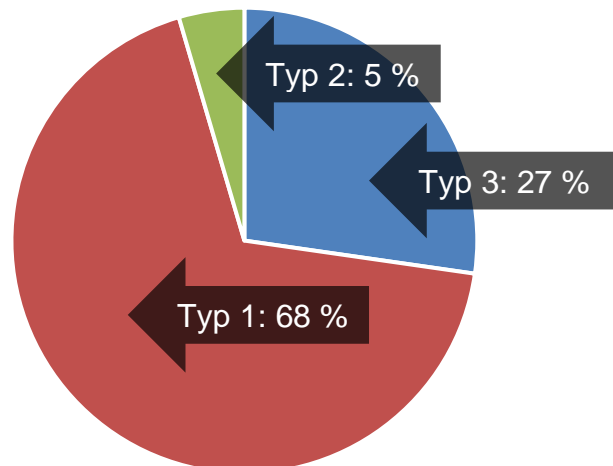


Abb. 17: Verteilung der Radiotypen auf alle gefundenen Radiosignale  
 Grafik: Linus Sorg

## Berechnung der Radialgeschwindigkeits-Differenz (Doppler-Effekt)

Bei 4 der 22 Radiosignale ist außerdem noch eine Frequenzverschiebung zu sehen (Abb. 18):

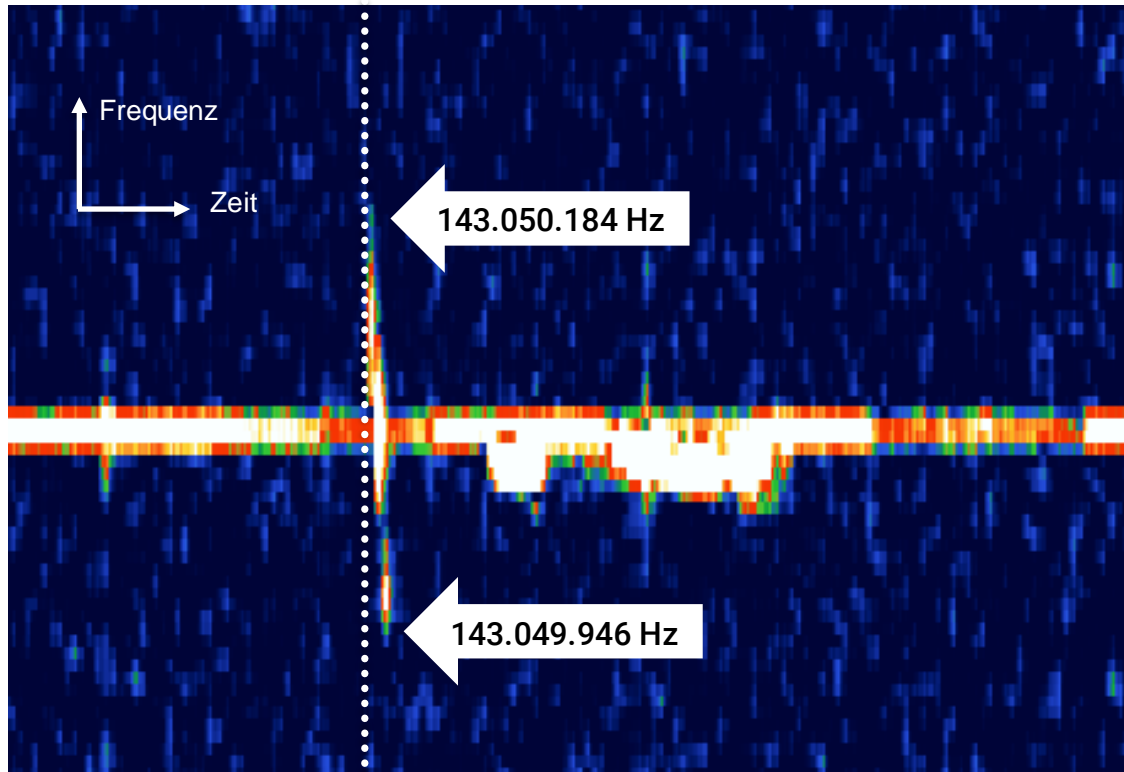


Abb. 18: Radiosignal mit Frequenzverschiebung (Gepunktete Linie nur zur Referenz)

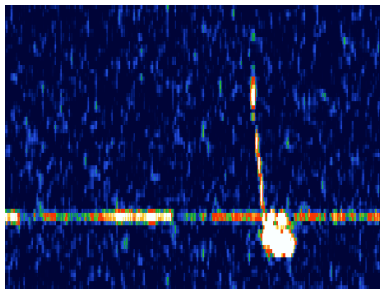
Grafik: Linus Sorg

Im oben gezeigten Beispiel ist in einem Zeitraum von 0,10 s eine Frequenzverschiebung um 238 Hz zu erkennen. Diese lässt sich mit dem Doppler-Effekt erklären, der immer auftritt, wenn ein sich bewegendes Objekt Wellen aussendet. Dadurch lässt sich auch berechnen, wie viel Radialgeschwindigkeit<sup>10</sup> der Meteor innerhalb dieser 0,1 s durch die Abbremsung in der Atmosphäre verloren hat:

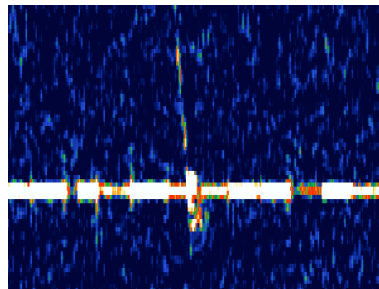
$$v = c \cdot \frac{\Delta f}{f} = 300000 \frac{\text{km}}{\text{s}} \cdot \frac{0,000238 \text{ MHz}}{143,05 \text{ MHz}} \approx 0,5 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Da nicht bekannt ist, wie breit das Signal zu einem bestimmten Zeitpunkt im Frequenzbereich ist, ist dieser Wert als Maximalwert anzusehen. Das heißt also, der oben gezeigte Radiometeor hat innerhalb von 0,1 s bis zu 0,5 km/s (Beschleunigung: -5 km/s<sup>2</sup>) an Radialgeschwindigkeit verloren.

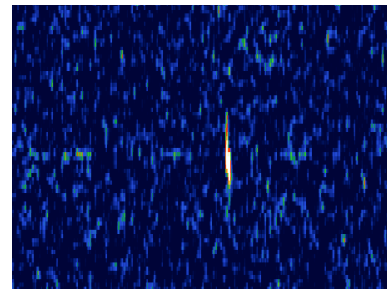
Bei den drei anderen Radiosignalen mit sichtbarer Frequenzverschiebung wurden ähnliche Abbremsungsgeschwindigkeiten bestimmt:



**0,63 km/s** Abbremsung in 0,22 s  
Beschleunigung: -2,86 km/s<sup>2</sup>



**0,53 km/s** Abbremsung in 0,19 s  
Beschleunigung: -2,79 km/s<sup>2</sup>



**0,25 km/s** Abbremsung in 0,09 s  
Beschleunigung: -2,78 km/s<sup>2</sup>

<sup>10</sup> Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Erdoberfläche

## Ergebnisdiskussion

Im Vergleich zu den letzten beiden Forschungsjahren wurden deutlich weniger Videometeore mit begleitendem Radiosignal gefunden (2020: 43%, 2021: 30%).

Da ein Radiosignal an der Ionisationsspur eines Meteors reflektiert wird, gibt es nur wenige Ausrichtungen der Ionisationsspur im Raum, bei der das Signal auch in Richtung der Yagi-Antenne reflektiert werden kann. Es ist also nur bei einem kleinen Teil der beobachteten Videometeore ein begleitendes Radiosignal zu erwarten.

Dies allein würde allerdings noch nicht den großen Unterschied zum letzten Jahr erklären, da dort ja die Radiotechnik in fast allen Merkmalen identisch war. Stattdessen spielt wahrscheinlich die vertikale Montierung der Antenne und die daraus resultierende Änderung der Polarisationssebene eine große Rolle, sodass die Antenne Radiosignale einer anderen Polarisationssebene nicht empfangen konnte.

Ein weiterer Grund für den geringen Anteil von Videometeoren mit Radiosignal könnte die vorher beschriebene Problematik mit dem SDR-Empfänger sein, dessen Empfindlichkeit zu niedrig eingestellt war. Der falsch konfigurierte SDR-Empfänger könnte auch der Grund dafür sein, dass keine Radiosignale von BRAMS empfangen werden konnten, da dessen Sendeleistung 3-mal kleiner als die von GRAVES ist und folglich die schwächeren BRAMS-Radiosignale eventuell nicht vom SDR-Empfänger aufgezeichnet werden konnten.

Da wieder GRAVES als Sender verwendet werden musste, bleibt auch das Problem der sich bewegenden Sendekeule bestehen, die in nur ca. 30% der Zeit ein Signal in eine bestimmte Richtung sendet.

Als Ursachen für die drei Typen von Radiosignalen lassen sich mehrere Gründe annehmen. Zum einen ist vermutlich der Sender dafür verantwortlich, dass es mehrere Pulse in regelmäßigem Abstand gibt. GRAVES wird zur Bahnbestimmung von künstlichen Erdsatelliten verwendet und arbeitet deshalb eventuell nicht mit einer konstanten Signalstärke.

Zum anderen kann die Zeit variieren, in der die Antenne ein Radiosignal empfangen kann, welches von der Ionisationsspur eines Meteors reflektiert wurde. Dies hat den Grund, dass sich auch während dem Auftreten der Ionisationsspur die Polarisationssebene so verändern kann, dass das Signal von der Antenne nicht mehr zu empfangen ist – Signale können dadurch auch nur sehr kurz andauern. Auch kann die Ionisationsspur vermutlich länger ein Radiosignal reflektieren, als der Videometeor für die Kamera sichtbar ist – was eine etwaige Zeitverschiebung beider Signale oder auch ein Radiosignal mit längerer Dauer als der Videometeor erklären könnte.

Um die gemessenen Abbremsungsbeschleunigungen zu überprüfen, wurde ein Vergleich mit bekannter Literatur durchgeführt. Allerdings konnte keine solche Literatur für die Perseiden gefunden werden, weshalb stattdessen ein Vergleich zu den Geminiden stattfand. In „Radar observations of meteor deceleration“ von J. V. Evans<sup>11</sup> wird der Radialgeschwindigkeitsverlauf einer Geminide gemessen. Etwa eine Sekunde nach Beginn der Messung gibt es eine Beschleunigung von ca.  $-5 \text{ km/s}^2$ , davor sind die Beschleunigungen geringer. Die von uns gemessenen Beschleunigungen der Perseiden scheinen im Vergleich dazu durchaus realistisch. Perseiden haben zwar in der Regel eine höhere Anfangsgeschwindigkeit als Geminiden, jedoch erscheint es auch hier gut möglich, dass Beschleunigungen von ca.  $-2,8$  bis  $-5 \text{ km/s}^2$  auftreten.

Ein Zusammenhang zwischen den Radiosignal-Typen und den zugehörigen Videometeoren konnte bei den Merkmalen subjektive Helligkeit, Flugrichtung und Dauer des Videometeors nicht hergestellt werden.

---

<sup>11</sup> Evans, J. V.: Radar observations of meteor deceleration, Smithsonian Contributions to Astrophysics, Aufl. 11, S.140; 1967  
(<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1967SCoA...11..133E/abstract>)

## **Ausblick**

Das langfristige Ziel dieser Forschungsarbeit wäre die Automatisierung der Aufzeichnung und Auswertung der Video- und Radiodaten. Durch eine fest installierte Kamera und Antenne könnten Aufzeichnungen außerhalb der Perseiden angefertigt werden, sodass auch Veränderungen im Jahresverlauf untersucht werden könnten. Für weitere Radioaufnahmen müsste allerdings folgendes verändert werden:

- Korrekte Konfiguration des „Low Noise Amplifier“ (LNA) des SDR-Empfängers, sodass auch schwächere Signale empfangen werden können
- Auswahl eines Senders ohne bewegliche Sendekeule, z.B. BRAMS
- Horizontale Montierung der Antenne, um Verluste durch die veränderte Polarisationssebene zu vermeiden
- Synchronisation mehrmals pro Video durchführen, dann wird das Ergebnis genauer

Zudem müsste zur konsequenten Auswertung der Radiodaten eine zuverlässige, schnelle und automatisierte Software ausgewählt bzw. entwickelt werden. Bisherige Ergebnisse der Radioauswertungssoftware „Spectrum Lab“ – die 2021 verwendet wurde – waren nicht ausreichend zuverlässig.

Es ist auch geplant, das Neuronale Netz zur Erkennung von Meteoren weiter zu optimieren, sodass mehr Meteore gefunden werden können, aber z.B. auch eine Auswertung von AllSky-Fotos möglich wird.

## **Quellen- und Literaturverzeichnis:**

Sorg, Linus; Eissler, Till: Meteore – Video- und Radiobeobachtungen des Perseidenstromes, Schüler experimentieren 2020;  
[https://www.allthesky.com/articles/MeteoreJugendforscht2020\\_SorgEissler.pdf](https://www.allthesky.com/articles/MeteoreJugendforscht2020_SorgEissler.pdf), Letzter Zugriff am 21.02.2022

Sorg, Linus; Eissler, Till: Meteore – Video- und Radiobeobachtungen von Meteorströmen, Jugend forscht 2021; [https://www.allthesky.com/articles/MeteoreJugendforscht2021\\_SorgEissler.pdf](https://www.allthesky.com/articles/MeteoreJugendforscht2021_SorgEissler.pdf), Letzter Zugriff am 21.02.2022

Huang J, Rathod V, Sun C, Zhu M, Korattikara A, Fathi A, Fischer I, Wojna Z, Song Y, Guadarrama S, Murphy K: Speed/accuracy trade-offs for modern convolutional object detectors - CVPR 2017

Towards data science, Sumit Saha: A Comprehensive Guide to Convolutional Neural Networks — the ELI5 way; <https://towardsdatascience.com/a-comprehensive-guide-to-convolutional-neural-networks-the-eli5-way-3bd2b1164a53>, Letzter Zugriff am 21.02.2022

Github: labellmg; <https://github.com/tzutalin/labellmg>, Zugriff 21.02.2022

Datasolut: Transfer Learning – Grundlagen und Einsatzgebiete; <https://datasolut.com/was-ist-transfer-learning/>, Letzter Zugriff am 21.02.2022

Tensorflow: Transferlernen und Feinabstimmung;  
[https://www.tensorflow.org/tutorials/images/transfer\\_learning](https://www.tensorflow.org/tutorials/images/transfer_learning), Letzter Zugriff am 21.02.2022

Github: Tensorflow Models;  
[https://github.com/tensorflow/models/blob/master/research/object\\_detection/g3doc/tf2\\_detection\\_zoo.md](https://github.com/tensorflow/models/blob/master/research/object_detection/g3doc/tf2_detection_zoo.md), Letzter Zugriff am 21.02.2022

COCO: Common Objects in Context; <https://cocodataset.org/#home>, Letzter Zugriff am 21.02.2022

Dr. Celnik, Werner; Bannuscher, Dietmar; Melchert, Sven; Riepe, Peter: Journal für Astronomie, Radioastronomie, Vereinigung der Sternfreunde e.V., Laudenbach 2019

<http://www.astrosurf.com/luxorion/qs1-meteor-scatter.htm>, Letzter Zugriff am 21.02.2022

Herrmann, Joachim: dtv-Atlas zur Astronomie, 11. Aufl., Deutscher Taschenbuch Verlag, München 1993

<https://www.imo.net/observations/methods/radio-observation/intro/>, Letzter Zugriff am 21.02.2022

Hyde, Paul: BBC Sky at Night Magazine; Ausgabe Juni 2014; Artikel: How to use radio signals to catch meteors, Part 1

Hyde, Paul: BBC Sky at Night Magazine; Ausgabe Juni 2014; Artikel: How to use radio signals to catch meteors, Part 2

<http://fallenangels2ndlife.dyndns.org/2017/12/06/247d-meteor-scatter-uberwachung-mit-hilfe-des-graves-radars/>, Letzter Zugriff am 21.02.2022

Rendtel, Jürgen und Arlt, Rainer: Handbook for Meteor Observers, International Meteor Organization, Potsdam 2009

Evans, J. V.: Radar observations of meteor deceleration, Smithsonian Contributions to Astrophysics, Aufl. 11, S.140; 1967;

Abrufbar unter <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1967SCoA...11..133E/abstract>, Letzter Zugriff am 24.02.2022



## Unterstützung durch Personen und Institutionen

Credner, Till: Projektbetreuer, Beratung Schriftliche Arbeit, Unterstützung bei den Videoaufnahmen der Perseiden, Progymnasium Rosenfeld

Eissler, Martin: Unterstützung bei der Planung und Umsetzung der Yagi-Uda-Antenne

Gaiselmann, Marianne und Sorg, Armin: Beratung Schriftliche Arbeit

Mrsa, Denis: Unterstützung bei der Fehlerbehebung der Radiotechnik

Smarsly, Lucien: Bereitstellung von Rechenkapazität zur Auswertung der Videodaten

Schuch, Sven-Alexander: Beratung Radiotechnik

Wettki, Klaus: Beratung Radiotechnik, Bereitstellung von Technik

Blickle Räder+Rollen Rosenfeld: Teil-Kostenübernahme der verwendeten Geräte und Materialien

Sparkasse Zollernalb: Teil-Kostenübernahme der verwendeten Geräte und Materialien

Verein der Freunde und ehemaligen Schüler des Progymnasiums Rosenfeld e.V.: Teil-Kostenübernahme der verwendeten Geräte und Materialien

Observatorium Hoher List – Nelles, Bruno und Johanna: Gastgeber Meteorcamp 2021

Baden-Württemberg Stiftung: Kostenübernahme des Kamerabody der SONY Alpha 7s II

Projekt Sternenpark Schwäbische Alb: Veranstalter des Meteorcamps



## **VIELEN DANK!**