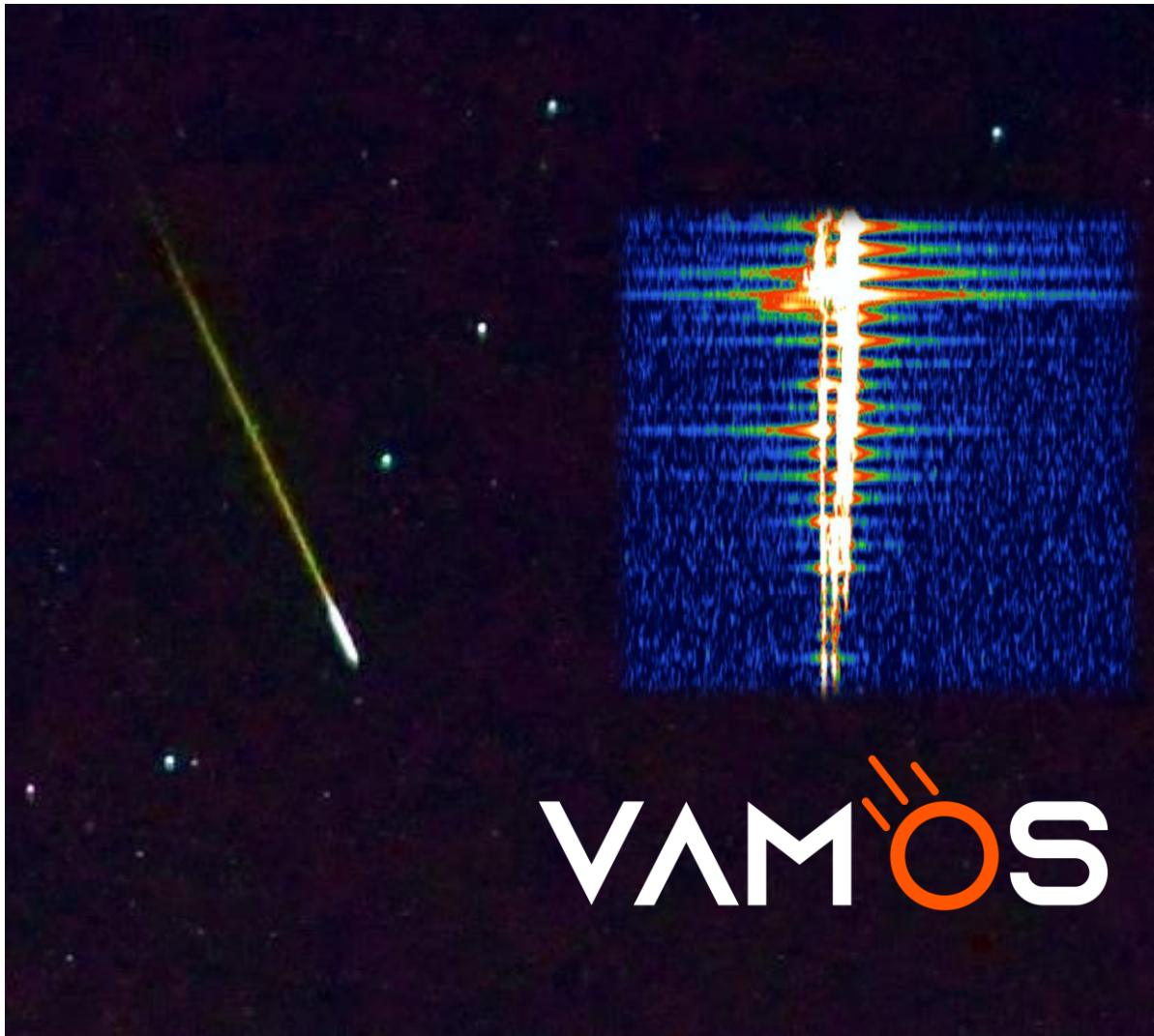


Meteore

Video- und Radiobeobachtungen von
Meteorströmen



Linus Sorg und Till Eissler
Jugend forscht 2021

Meteore – Video- und Radiobeobachtungen von Meteorströmen

Linus Sorg (14), Till Eissler (15)

Progymnasium Rosenfeld, Schulstraße 9, 72348 Rosenfeld

Projektbetreuer: Herr Dipl.-Phys. Till Credner

Thema des Projekts: Meteore – Video- und Radiobeobachtung von Meteorströmen

Fachgebiet: Geo- und Raumwissenschaften

Wettbewerbssparte: Jugend forscht

Bundesland: Baden - Württemberg

Wettbewerbsjahr: 2021

Im August und Dezember 2020 wurden Meteore der Perseiden und Geminiden gefilmt und mit einer Yagi-Antenne Radiodaten empfangen und aufgezeichnet. Mit einer selbst programmierten Software wurden die Videos ausgewertet und bei Videometeoren nach einem begleitenden Radiosignal gesucht. Dies konnte bei 30% der Meteore im Zeitraum von 5 s davor bis 5 s danach gefunden werden. Es war ein Zusammenhang zwischen der Größe eines Meteors und der Stärke seines Radiosignals erkennbar. Im Vergleich zu den Perseiden wiesen die Geminiden eine ähnliche Häufigkeit von Meteoren auf.

Gliederung der schriftlichen Arbeit

Einleitung	4
Radiosignale bei Meteoriten	4
Auswahl des Senders	5
Vorgehensweise, Materialien und Methoden	5
Technikaufbau	5
Videotechnik.....	5
Radiotechnik.....	6
Beobachtungsdurchführung	7
Videobeobachtung	8
Auswertung	8
Automatisierte Auswertung der Videodaten	8
Auswertung der Radiodaten	11
Ergebnisse	13
Zeitlicher Aktivitätsverlauf der Videometeore	13
Fehlerbetrachtung	14
Videometeore mit begleitendem Radiosignal.....	15
Fehlerbetrachtung	15
Ergebnisdiskussion	15
Zusammenfassung.....	17
Quellen- und Literaturverzeichnis	17
Unterstützung durch Personen und Institutionen	18

Einleitung

In dieser Arbeit wird das Jugend-forscht-Projekt von 2020 fortgeführt, bei dem mit einer Kamera und zwei einfachen Teleskopantennen Video- und Radiosignale von Meteoren untersucht wurden¹. Dieses Jahr wurde insbesondere die Radiotechnik verbessert, um mit einer gerichteten Antenne und einem SDR-Empfänger (Software Defined Radio), welche beide auf die Frequenz des Radarsenders GRAVES justiert wurden, noch besser Radiodaten von Meteoren empfangen zu können. Die Leitfrage aber bleibt:

Welche Zusammenhänge lassen sich zwischen synchronen Video- und Radiodaten von Meteoren erkennen?

Das heißt, es sollen auch die Ergebnisse mit denen des letzten Jahres verglichen werden, um zu erkennen, wie sehr eine aufwendige Radioausstattung sich auf die Qualität und Häufigkeit von Radiosignalen während der Videometeore auswirkt. Außerdem soll die Videoauswertung diesmal automatisiert ablaufen, um mehr Videomaterial zu verwerten.

Die ursprüngliche Forschungsidee ist aufgekommen, als wir erstaunlicherweise beim Meteorcamp im Jahr 2018 einige Audiosignale zu gefilmten Meteoren mit der Kamera empfangen haben. Die Vermutung war, dass es sich um Radiosignale handelt, die mit den Audiokabeln empfangen wurden. In der letzten Jugend-forscht-Arbeit sind wir diesem mit Teleskopantennen nachgegangen und konnten bei 43% der Meteore ein begleitendes Radiosignal im Zeitraum von 2 s vor bis 8 s nach dem Meteor feststellen.

Für dieses Jahr entschieden wir uns dazu, unser Projekt von letztem Jahr weiterzuentwickeln und es mit besserer Radiotechnik zu optimieren. Wir konstruierten eine frequenzgenaue Richtantenne, um das Empfangen der Radiosignale auf den durch die Kamera abgedeckten Bereich zu begrenzen. Hiermit sollen Radiosignale besser den Videometeoren zugeordnet werden, um genauere Ergebnisse zu erzielen.

Radiosignale bei Meteoren

Radiosignale können über den Horizont hinaus übertragen werden, wenn ein Radiosignal auf die Ionisationsspur eines Meteors trifft (Abb. 1). Die Ionisationsspur entsteht, da die Luft durch den Eintritt des Meteors in die Atmosphäre aufgrund der hohen Reibung sehr stark elektrisiert wird. An dieser Ionisationsspur wird das vom Sender kommende Signal gestreut und kann vom Empfänger hinter dem Horizont empfangen werden.²

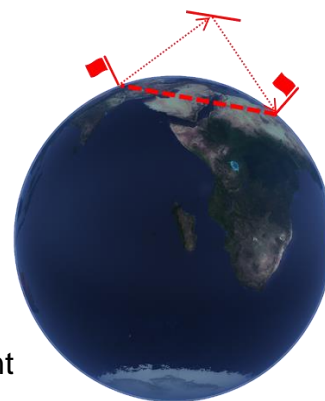


Abb. 1: Streuung eines Radiosignals an der Ionisationsspur eines Meteors
Grafik: Linus Sorg

¹ Sorg, Linus; Eissler, Till: Meteore – Video- und Radiobeobachtungen des Perseidenstromes, Schüler experimentieren 2020;
https://www.allthesky.com/articles/MeteoreJugendforscht2020_SorgEissler.pdf,
05.03.2021

² <https://www.imo.net/observations/methods/radio-observation/intro>, 03.01.2020

Auswahl des Senders

Beim sogenannten „Meteor-Scattering“, bei dem mithilfe von Radiosignalen Meteore auch bei Wolken und bei Tag erfasst und gezählt werden können, ist die Radarstation GRAVES in Frankreich sehr beliebt. GRAVES sendet mit einer Frequenz von 143,05 MHz und scannt den südlichen Himmel nach künstlichen Erdsatelliten ab. Dabei schwenkt seine Sendekeule kontinuierlich über den Himmel, der sich südlich von ihm befindet. Das kontinuierliche Signal von GRAVES eignet sich besonders, da unterbrochene Signale beim korrekten und vollständigen Erfassen der Meteore stören.³

Vorgehensweise, Materialien und Methoden

Wie bei den Aufnahmen im letzten Jahr auch, wurde der Perseidenstrom im August für die Beobachtungen ausgewählt. Beobachtet wurde auch wieder während des Meteorcamps, das dieses Jahr allerdings wegen der Corona-Pandemie auf dem Georgenhof in Pfrontstetten stattfand.

Dieses Mal haben wir aber auch noch zusätzlich im Dezember die Geminiden beobachtet. Auch hier wurde unsere Forschung wieder durch Corona beeinträchtigt, denn aufgrund einer verhängten Ausgangssperre und einem Kontaktverbot mussten wir die Aufnahmen von zwei getrennten Standorten aus durchführen, die Videoaufnahmen durch unseren Projektbetreuer Till Credner in Tübingen und die Radioaufnahmen in Binsdorf.

Technikaufbau

Videotechnik

Gefilmt wurde immer mit einer SONY Alpha 7s II (Abb. 2) und zwei verschiedenen Objektiven, einem 50mm f/1,3 Canon-Objektiv bei den Perseiden und einem 24mm f/1,4 Nikkor-Objektiv bei den Geminiden. Die Kamera wurde auf einem Holzstativ befestigt, um Vibrationen zu vermeiden.

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/1,3 (Canon); f/1,4 (Nikkor)
Brennweite Objektiv	50mm (Canon); 24mm (Nikkor)
Gesichtsfeld (Abb. 3)	39,6° x 22,9° (Canon); 73,7° x 45,7° (Nikkor)



Abb. 2: Sony Alpha 7s II
(Objektiv und Stativ entsprechen nicht der Beobachtungsausstattung)
Foto: Linus Sorg

³ Dr. Celnik, Werner; Bannuscher, Dietmar; Melchert, Sven; Riepe, Peter: Journal für Astronomie, Radioastronomie, Vereinigung der Sternfreunde e.V., Laudenbach 2019

Die verschiedenen Brennweiten führen dazu, dass im Dezember bei den Geminiden ein ca. 4-mal größeres Feld beobachtet wurde (Abb. 3).



Abb. 3: Gesichtsfeld der Kamera mit den zwei unterschiedlichen Objektiven
*FoV: Gesichtsfeld (engl. „Field of View“)
Grafik: Linus Sorg



Abb. 4: Yagi-Uda-Antenne auf dem 2-Meter-Stativ. Zur Beobachtung wurde die Antenne noch auf ca. 27° über den Horizont hochgeschwenkt.
Foto: Linus Sorg

Radiotechnik

Als Antenne wurde eine selbst gebaute Yagi-Uda-Antenne gewählt. Diese besteht aus einem Dipol, mehreren Direktoren, einem Reflektor und einem Boom als Trägerelement (Abb. 5). Der Dipol, der Reflektor und die Direktoren sind nur über ein elektromagnetisches Feld gekoppelt. Die Länge des Dipols beträgt ca. die halbe Wellenlänge, die Direktoren sind etwas kürzer und der Reflektor etwas länger. Die Länge des Booms, also des Mittelstücks, berechnet sich aus den Abständen der verschiedenen oben angebrachten Aluminiumrohre. Der Abstand der Rohre muss ca. ein Viertel der Wellenlänge betragen.⁴ Die Antenne steht auf einem selbst gebauten Holzstativ, das die Antenne mehr als zwei Meter über den Boden bringt (Abb. 4).

Der Dipol der Yagi-Uda-Antenne wird über ein Low-Loss Koaxialkabel mit SMA-Stecker an die SMA-Buchse eines SDR-Empfängers, in unserem Fall ein SDRplay RSP1A (Abb. 6), angeschlossen. Dieser wird über USB mit einem Laptop verbunden, auf dem mit der Software HDSDR die Radiodaten aufgezeichnet und als WAV-Datei abgespeichert werden.



Abb. 5: Bestandteile einer Yagi-Uda-Antenne
Grafik: Linus Sorg



Abb. 6: SDRplay RSP1A
Foto: Linus Sorg

⁴ Hyde, Paul: BBC Sky at Night Magazine; Ausgabe Juni 2014; Artikel: How to use radio signals to catch meteors, Part 1

HDSDR-Einstellungen:

Mode	USB (Upper Side Band) ⁵
LO	143.047.500 Hz ⁵
Tune	143.048.662 Hz ⁵
Input	SDRplay RSP1A

Jede Antenne hat eine bestimmte Richtung, in der sie am besten Signale empfängt. Allerdings gibt es unter anderem in der entgegengesetzten Richtung meist eine viel kleinere „Nebenkeule“, bei der aber trotzdem Signale empfangen werden können. Um herauszufinden, wie die Haupt- und Nebenkeulen unserer Yagi-Uda-Antenne aussehen, haben wir das mit dem MATLAB Antenna Toolkit⁶ simuliert (Abb. 7).

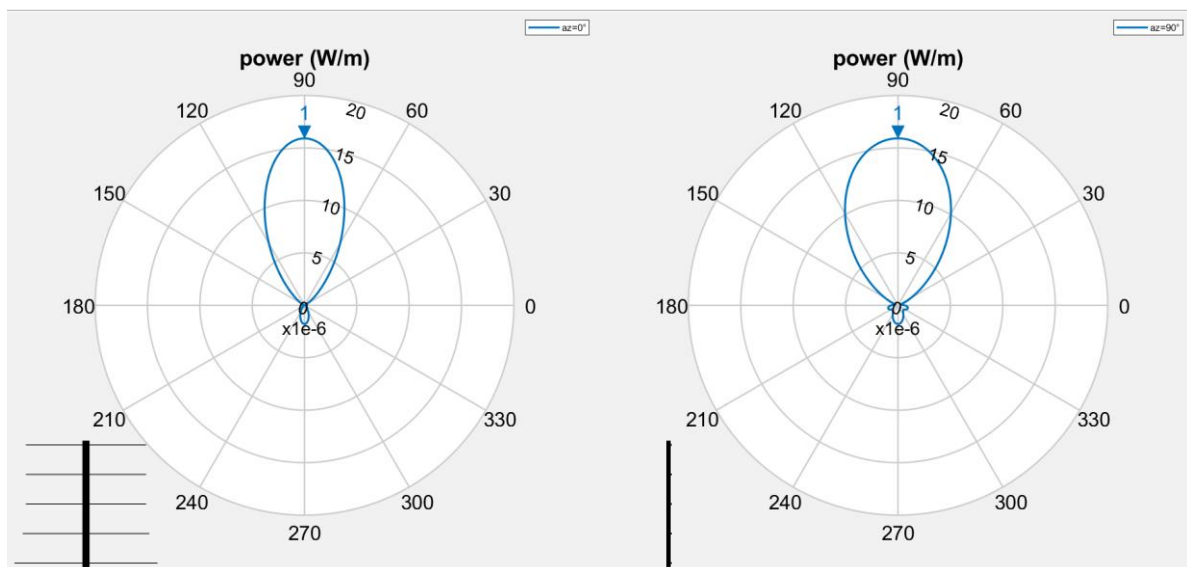


Abb. 7: Antennenleistung der Yagi-Uda-Antenne in zwei Ebenen
(Antennenausrichtung jeweils unten links)
Grafik: Linus Sorg

Aus einer solchen Grafik (Abb. 7) lässt sich die sogenannte Halbwertsbreite ablesen. Bei wieviel Grad Abweichung von der Hauptrichtung hat eine Antenne noch die Hälfte ihrer Empfangs- und Sendeleistung? Dies ist in der linken Grafik ca. $\pm 25^\circ$, in der rechten Grafik $\pm 35^\circ$. Die Halbwertsbreite ist dann in der Ebene der Dipole ca. 50° und in der senkrecht zu allen Dipolen stehenden Ebene ca. 70° .

Das heißt, bei unserem Canon-Objektiv deckt die Antenne das Gesichtsfeld problemlos ab, beim Nikkor-Weitwinkel-Objektiv ist die Empfindlichkeit der Antenne am Video-Bildrand schon schwächer als 50 %.

Beobachtungsdurchführung

Wir haben in sechs Nächten insgesamt ca. 27 Stunden Video- und Radiodaten aufgezeichnet. Während der Perseiden in fünf Nächten vom 11.-16.08.2020 und während der Geminiden vom 13.-14.12.2020.

⁵ <http://fallenangels2ndlife.dyndns.org/2017/12/06/247d-meteor-scatter-uberwachung-mit-hilfe-des-graves-radars/>, 08.08.2020

⁶ <https://de.mathworks.com/products/antenna.html>

Kamera und Yagi-Antenne wurden parallel zueinander ausgerichtet, der Azimut betrug ca. 200° und die Elevation ca. 27° gegen die Waagerechte.

Videobeobachtung

Am Anfang jedes Videos wurde vor die Kamera eine laufende Uhr eines Smartphones oder Laptops gehalten, die vorher mit der Atomzeit synchronisiert wurde, sodass sie im Nachhinein auf der Aufnahme lesbar war (Abb. 8). Dadurch konnten wir die Anfangszeit des Videos sekundengenau bestimmen, was für die Synchronisierung zwischen Radio- und Videodaten sehr wichtig war. Es wurde versucht, die Videos möglichst lückenlos aufzunehmen, deswegen wurde die Aufnahme nach dem Ende ihrer Aufnahmezeit (ca. 30 min.) direkt wieder manuell neu gestartet.

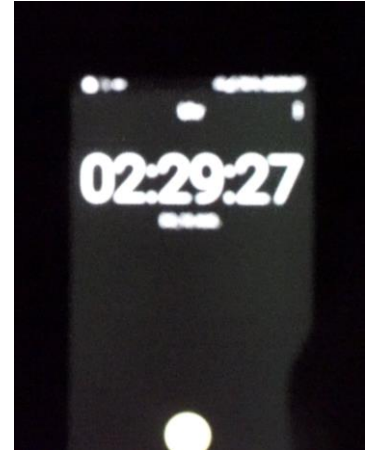


Abb. 8: Synchronisation zwischen Radio- und Videodaten mithilfe einer laufenden Smartphone-Uhr
Grafik: Linus Sorg

Auswertung

Automatisierte Auswertung der Videodaten

Anders als im Vorjahr wollten wir die Videodaten diesmal nicht per Auge auswerten. Vielmehr wollten wir die Möglichkeit haben, auch in Zukunft in größerem Maßstab vereinfacht Meteordaten auswerten zu können. Auf der Suche nach einer geeigneten Meteorerkennungssoftware waren wir leider erfolglos. Deshalb beschlossen wir, eine eigene Software zu programmieren. Diese sollte Meteore erkennen, verfolgen und anschließend die Ergebnisse in Tabellenform ausgeben. Die Programmentwicklung nahm zwar viel Zeit in Anspruch, aber im Hinblick auf die nächsten Jahre und unter Berücksichtigung des Lerneffekts hat es sich doch gelohnt.



Abb. 9: VAMOS – Video-Assisted Meteor Observation System
Grafik: Linus Sorg

Das Programm zur Auswertung wurde mit der Programmiersprache Python entwickelt und „VAMOS“ genannt. Das steht für „Video-Assisted Meteor Observation System“ (Abb. 9).

Um Meteore zu erkennen, werden immer zwei Bilder von einander abgezogen, um herauszufinden, ob es ein veränderliches Objekt gibt. Dabei gibt es ein Referenzbild, welches immer wieder neu gesetzt wird und von dem immer das aktuelle Einzelbild abgezogen wird. Gibt es einen neuen Meteor, war er vorher auf dem Referenzbild nicht enthalten und der Meteor wird, sofern der Helligkeitsunterschied größer als 20 Zählwerte (von 256 Graustufen, 8-bit) ist, als Änderung der Helligkeit einzelner Pixel registriert. Jede solche Änderung wird mit einem Rechteck umrandet und als „Detection“ bezeichnet, denn es ist noch nicht klar, ob es sich wirklich um einen Meteor handelt oder nicht. Einzelbilder mit „Detections“ werden im vom Benutzer ausgewählten Ergebnis-Ordner auf der Festplatte als Screenshot abgespeichert.

Nach der zeitaufwendigen automatischen Analyse kann eine „*.vamos“-Datei mit den Ergebnissen exportiert werden. Dazu entscheidet ein weiterer Algorithmus, welche „Detections“ zusammen einen einzelnen Meteor bilden. Bei jeder „Detection“ werden die darauffolgenden drei Einzelbilder auf „Detections“ untersucht, die sich im gleichen Bereich des Bildes befinden. Ist die Suche in den Folgebildern erfolgreich,

werden die gefundenen „Detections“ der ersten zugeordnet. Wird keine weitere zugehörige „Detection“ gefunden, wird der Meteor abgeschlossen und bei der nächsten „Detection“ gleich verfahren. Dieser gesamte Prozess kann aufgrund der großen Datenmengen viel Zeit in Anspruch nehmen.

Sind alle „Detections“ in einzelne mutmaßliche Meteore gruppiert, werden die falsch positiven Erkennungen aussortiert. Da Satelliten und Flugzeuge ebenfalls sich bewegende, leuchtende Himmelskörper sind und auch Sterne und teilweise Wolken erkannt werden, wurden basierend auf typischen echten Meteoren folgende Grenzen gesetzt:

- Ein Meteor muss zwischen 0,08 und 10 Sekunden lang sein.
- Ein Meteor muss eine Fläche zwischen 20 und 750 Pixel haben.
- Die Fläche eines Meteors muss sich auf zwei aufeinanderfolgenden Bildern mindestens um 125 Pixel verändert haben, sonst wird das Einzelbild „markiert“. Wenn ein Meteor solche „markierten“ Einzelbilder hat, müssen folgende Bedingungen erfüllt werden, damit er nicht gelöscht wird:
 - Der Meteor muss insgesamt mindestens 3 Einzelbilder andauern.
 - Es dürfen maximal 10 Einzelbilder „markiert“ werden.
 - Es dürfen maximal 25% der Einzelbilder „markiert“ werden.

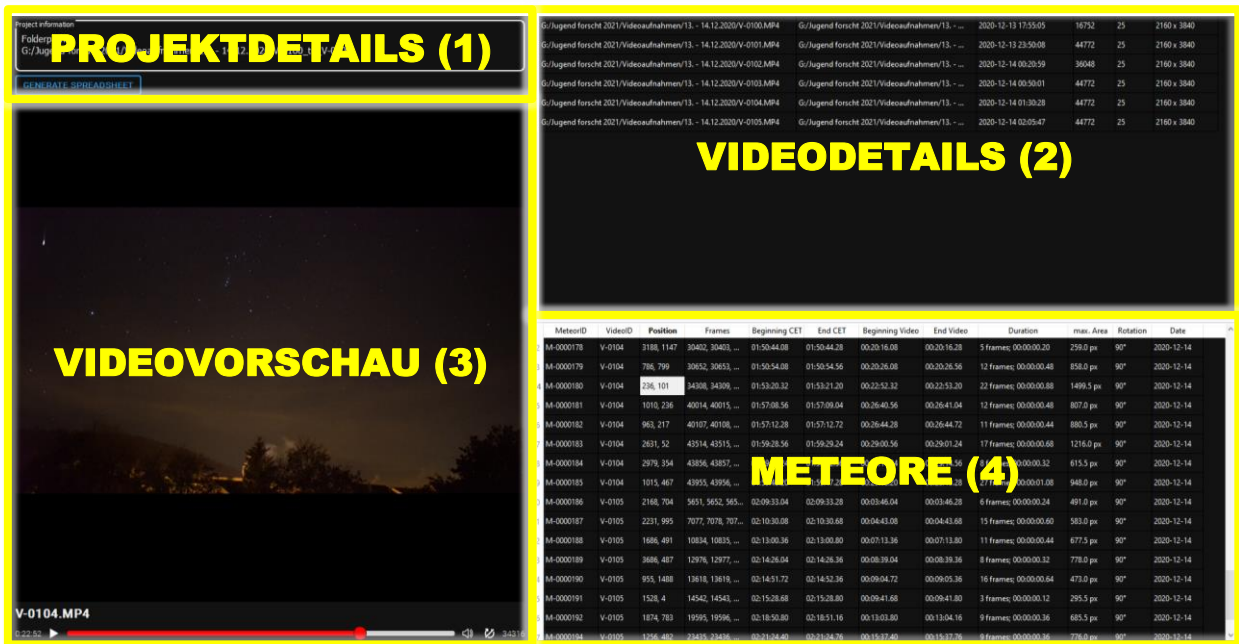
Wird eine dieser Grenzen überschritten, wird die „Detection“ gelöscht.

Längen und Flächenwerte sind auflösungsabhängig, die oben dargestellten Werte gelten für Full HD. Wird also z.B. ein 4K-Video analysiert, werden automatisch alle Längenwerte mit zwei und alle Flächenwerte mit vier multipliziert.

Durch Experimentieren wurde für jede Einstellung ein guter Wert ermittelt, die Werte können aber trotzdem über die Einstellungen der Software angepasst und verändert werden. VAMOS kann so relativ sicher einen Meteor von einem anderen, sich bewegendem Himmelskörper unterscheiden.

Ist das Berechnen der einzelnen Meteore abgeschlossen, wird eine „*.vamos“-Datei auf die Festplatte geschrieben. Diese enthält Informationen über das analysierte Video und alle Meteordaten und kann später jederzeit wieder von VAMOS geöffnet und angezeigt werden.

Das Anzeigen einer „.vamos“-Datei sieht dann folgendermaßen aus:



PROJEKTDDETAILS (1)

VIDEODETAILS (2)

VIDEOVORSCHAU (3)

METEORE (4)

MeteorID	VideoID	Position	Frames	Beginning CET	End CET	Beginning Video	End Video	Duration	max. Area	Rotation	Date
M-0000178	V-0104	3188, 1147	30402, 30403, ...	01:50:44.08	01:50:44.28	00:20:16.08	00:20:16.28	5 frames; 00:00:00.20	259.0 px	90°	2020-12-14
M-0000179	V-0104	786, 799	30652, 30653, ...	01:50:54.08	01:50:54.56	00:20:26.08	00:20:26.56	12 frames; 00:00:00.48	858.0 px	90°	2020-12-14
M-0000180	V-0104	236, 101	34308, 34309, ...	01:53:20.32	01:53:21.20	00:22:52.32	00:22:53.20	22 frames; 00:00:00.88	1499.5 px	90°	2020-12-14
M-0000181	V-0104	1010, 236	40014, 40015, ...	01:57:08.56	01:57:09.04	00:26:40.56	00:26:41.04	12 frames; 00:00:00.48	807.0 px	90°	2020-12-14
M-0000182	V-0104	963, 217	40107, 40108, ...	01:57:12.28	01:57:12.72	00:26:44.28	00:26:44.72	11 frames; 00:00:00.44	880.5 px	90°	2020-12-14
M-0000183	V-0104	2831, 52	43314, 43315, ...	01:59:28.56	01:59:29.24	00:29:00.56	00:29:01.24	17 frames; 00:00:00.68	1216.0 px	90°	2020-12-14
M-0000184	V-0104	2979, 354	43896, 43897, ...	01:59:33.04	02:00:33.28	00:03:46.04	00:03:46.28	6 frames; 00:00:00.24	491.0 px	90°	2020-12-14
M-0000185	V-0104	1015, 467	43955, 43956, ...	02:10:30.88	02:10:30.88	00:04:43.68	00:04:43.68	15 frames; 00:00:00.60	583.0 px	90°	2020-12-14
M-0000186	V-0105	1886, 491	10834, 10835, ...	02:13:00.80	02:13:00.80	00:07:13.36	00:07:13.36	11 frames; 00:00:00.44	677.5 px	90°	2020-12-14
M-0000189	V-0105	3686, 487	12976, 12977, ...	02:14:26.04	02:14:26.36	00:08:39.36	00:08:39.36	8 frames; 00:00:00.32	778.0 px	90°	2020-12-14
M-0000190	V-0105	955, 1488	13618, 13619, ...	02:14:51.72	02:14:52.36	00:09:04.72	00:09:05.36	16 frames; 00:00:00.64	477.0 px	90°	2020-12-14
M-0000191	V-0105	1526, 4	14542, 14543, ...	02:15:28.80	02:15:28.80	00:09:41.68	00:09:41.68	3 frames; 00:00:00.12	285.5 px	90°	2020-12-14
M-0000192	V-0105	1874, 783	19595, 19596, ...	02:18:50.80	02:18:51.16	00:13:03.80	00:13:04.16	9 frames; 00:00:00.36	685.5 px	90°	2020-12-14
M-0000194	V-0105	1756, 493	23435, 23436, ...	02:21:04.40	02:21:04.76	00:15:17.36	00:15:17.76	8 frames; 00:00:00.36	778.0 px	90°	2020-12-14

Abb. 10: VAMOS-Bedienoberfläche des Ergebnis-Fensters
Grafik: Linus Sorg

Im Bereich (1) der VAMOS-Bedienoberfläche (Abb. 10) findet man Informationen zum Projekt, also z.B. den Dateipfad des Ergebnis-Ordners. Der Bereich (2) besteht aus einer Tabelle, wo zu jedem analysierten Video der XML-Dateipfad, der Videobeginn, die Dauer in Einzelbildern, die Einzelbildrate (FPS) und die Auflösung eingesehen werden können. Indem der Benutzer auf ein Video in der Tabelle klickt, kann im Bereich (3) dieses Video abgespielt werden. Das Wichtigste befindet sich allerdings im Bereich (4), denn dort sind alle erkannten Meteore in einer Tabelle aufgelistet. In jeder Zeile findet man die folgenden Informationen über einen Meteor:

- MeteorID: „Name“ des Meteors von M-00000001 bis M-99999999
- 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 auftaucht
- End CET: Uhrzeit in MEZ, bei der der Meteor verschwindet
- Beginning Video: Zeit im Video, bei der der Meteor auftaucht
- End Video: Zeit im Video, bei der der Meteor verschwindet
- Duration: Dauer des Meteors in Einzelbildern und im Zeitformat
- max. Area: Größte Fläche, die der Meteor hatte, in Pixeln
- Rotation: Richtung des Meteors in Grad (oft fehlerhaft)
- Date: Datum, bei dem der Meteor zu sehen war

Durch Klicken auf einen Meteor in der Tabelle springt das Video im Bereich (3) an genau die Stelle, an der der Meteor vorkommt, sodass das Überprüfen der Meteore

sehr schnell geht. Findet man einen einzelnen falsch positiven Eintrag, kann man ihn mit „Delete Meteor“ im Rechtsklick-Menü löschen. Bei Satelliten oder Flugzeugen kommt es oft vor, dass sie durch ihre lange Anwesenheit im Video mehrere Einträge verursachen. Da bei diesen Einträgen auffällig ist, dass die Position fast gleich bleibt, kann VAMOS durch „Delete Similar“, ebenfalls im Rechtsklick-Menü, diese aufeinanderfolgenden ähnlichen Einträge auf einmal löschen. Beim weiteren Auswerten fiel zudem auf, dass fast alle Fehlerkennungen im Bereich ca. 8px um den linken und oberen Bildschirmrand auftraten und in diesem Bereich echte Meteore nur sehr selten auftraten. Deshalb wurde die Funktion „Border Cleanup“ hinzugefügt, mit der nach der Angabe eines Pixelradius alle Einträge gelöscht werden, bei denen der X- oder Y-Positionswert kleiner als dieser Radius ist.

Für die Bestimmung der genauen Uhrzeit, bei der ein Meteor erscheint, muss vor der Analyse die Anfangszeit des Videos ausgewählt werden. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder man stellt die Anfangszeit manuell ein, oder man wählt eine XML-Datei mit dieser Information aus. Eine solche XML-Datei wird bei unserer SONY Alpha 7s II mit jedem neuen Video automatisch auf die Speicherkarte geschrieben. Ist das bei einer anderen Kamera nicht der Fall oder ist wie in unserem Fall die Anfangszeit in der XML-Datei zu ungenau, kann VAMOS auch eine eigene XML-Datei generieren. Es muss nur das Datum, die Uhrzeit und der Speicherort für die neue XML-Datei ausgewählt werden und VAMOS schreibt diese Datei dann in der entsprechenden XML-Syntax auf die Festplatte. Die genaue Uhrzeit wurde in unserem Fall mithilfe der ins Video gehaltenen Uhrzeit bestimmt und anschließend für jedes Video eine XML-Datei generiert.

Auswertung der Radiodaten

Das Programm HSDR speichert WAV-Dateien ab, die man später auch wieder dort öffnen und abspielen kann. Beim Abspielen mit HSDR 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,

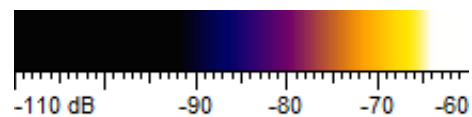


Abb. 11: Farbcodierte Signalstärke
Grafik: Linus Sorg

abhängig von der Signalstärke (Abb. 11). Da das manuelle Auswerten auch hier wieder viel Zeit gebraucht hätte, wurde es automatisiert erledigt. Da es hier schon mit Spectrum Lab⁷ eine passende Software gab, musste keine eigene programmiert werden. In den „Conditional Actions“ kann angegeben werden, was z.B. passieren soll, wenn bei der Signalstärke ein Unterschied von 10 Dezibel überschritten wird. Wir haben es so eingestellt, dass dann ein paar Sekunden später ein Screenshot des Spektrogramms abgespeichert und in einer speziellen Logdatei ein neuer Eintrag mit Angaben zur Zeit, Signalstärke, Rauschen, Frequenz und Dauer hinzugefügt wird.

Mithilfe von „Analyse Audio File (without DSP)“ kann dann die Analyse einer WAV-Datei gestartet werden. Es dauert ca. 5 Minuten, eine Audiodatei zu analysieren, die ca. 30 Minuten lang ist. Da jede Datei einzeln gestartet werden muss, kann die Analyse einer Reihe von Audiodateien leider nicht wie bei VAMOS unbeaufsichtigt – z.B. über Nacht - ablaufen.

⁷ <https://www.qsl.net/dl4yh/spectra1.html>

Anschließend können die Screenshots des Spektrogramms mit den Einträgen der Videometeor-Tabelle verglichen werden, um festzustellen, bei welchen Meteoren ein begleitendes Radiosignal zu finden ist. Wir haben wie im letzten Jahr in einem 10s-Intervall nach Radiosignalen gesucht, allerdings nicht von 2 s vor bis 8 s nach, sondern von 5 s vor bis 5 s nach dem Videometeor. Durch diese Anpassung sollen unsere Ergebnisse gleichmäßiger werden. Ist ein Radiosignal zu finden, wird zwischen vier Signalstärken unterschieden, die hier als Spektrogramme aus Spectrum Lab zu sehen sind (Abb. 12):

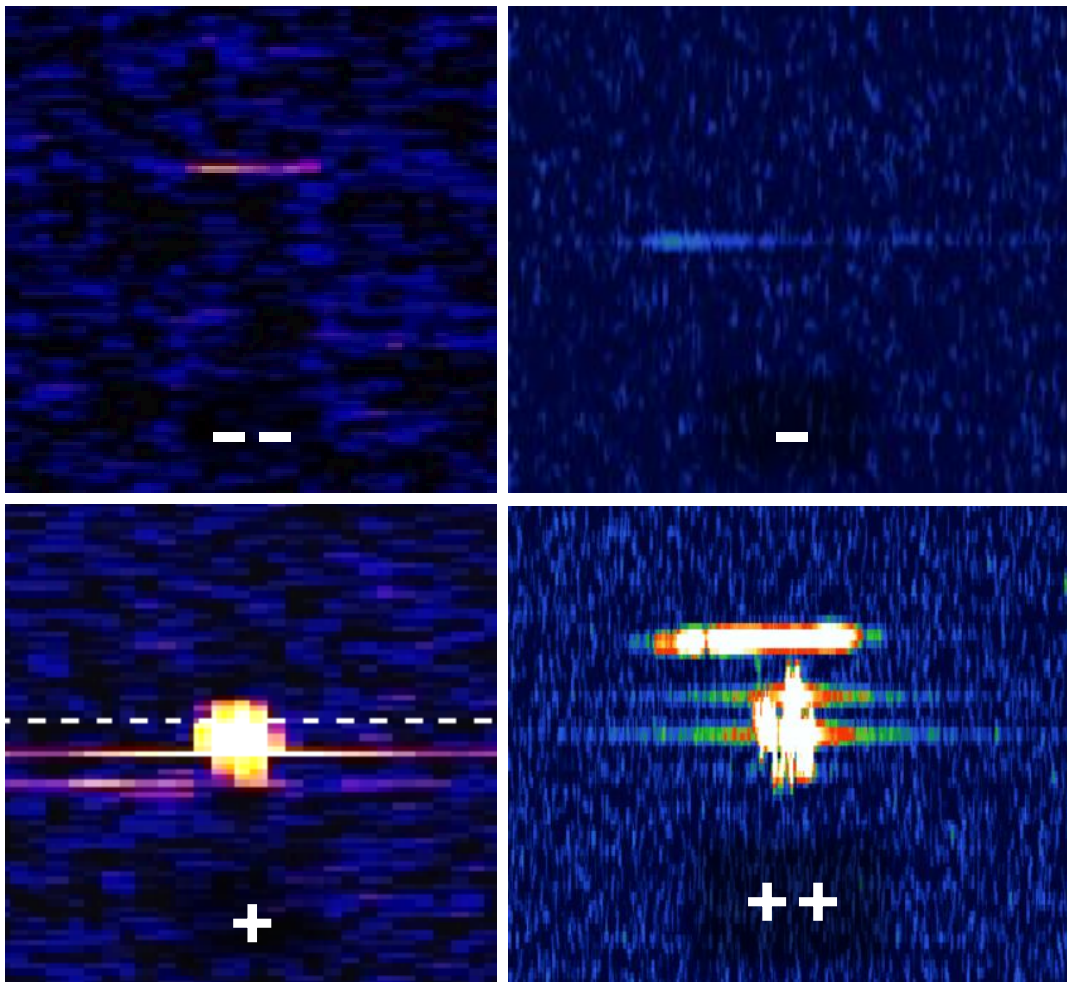


Abb. 12: Spektrogramm-Screenshots von Meteoren mit subjektiv zugeordneter Signalstärke
(X-Achse: Frequenz; Y-Achse: Zeit)
Grafik: Linus Sorg

Ergebnisse

Zeitlicher Aktivitätsverlauf der Videometeore

	Videometeore insg.	Aufnahmedauer der Nacht [hh:mm:ss]	Meteore pro Stunde	Bewölkung geschätzt	korrigierte Meteore/h ohne Bewölkung
11.-12.08.	30	03:13:18	9,3	30%	13,3
12.-13.08.	68	05:57:46	11,4	35%	17,5
13.-14.08.	106	06:02:59	17,5	5%	18,4
14.-15.08.	12	03:40:08	3,3	80%	16,5
15.-16.08.	63	05:33:05	11,3	25%	15
13.-14.12.	89	02:34:35	34,5	25%	46
Alle Nächte	371	27:01:51	Ø 14,6	Ø 35%	Ø 22

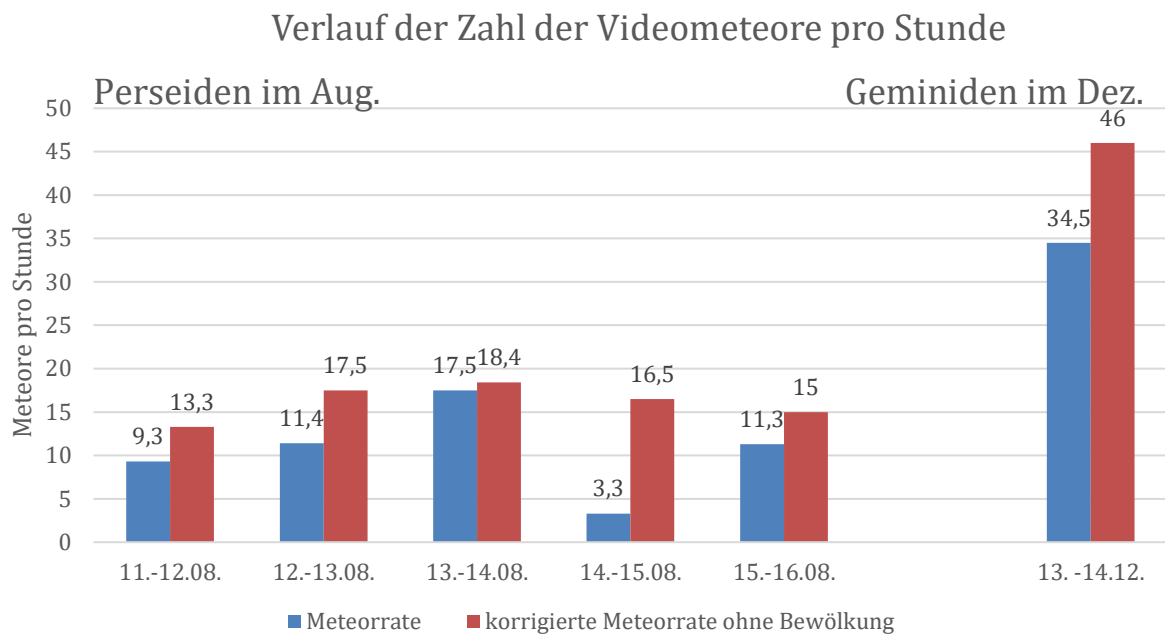
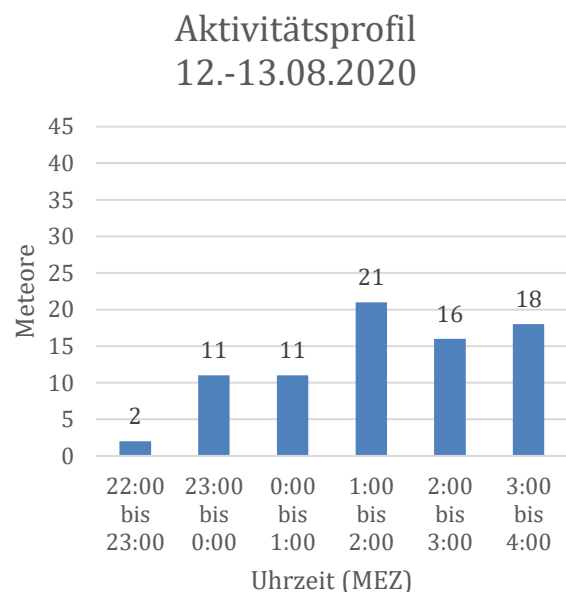
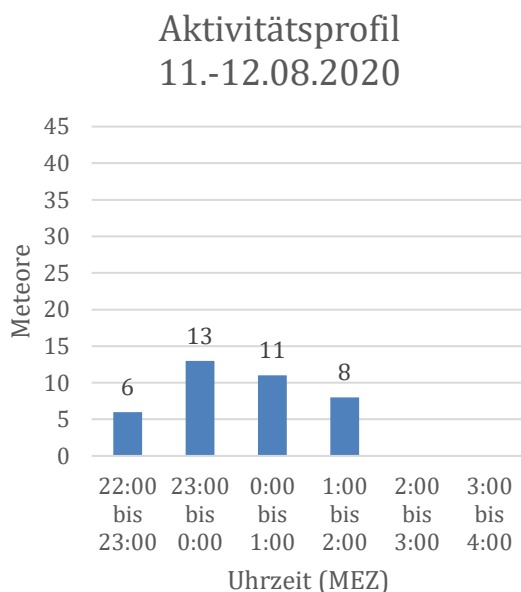


Abb. 13: Verlauf der Videometeore pro Stunde über alle Beobachtungsnächte
 Grafik: Linus Sorg



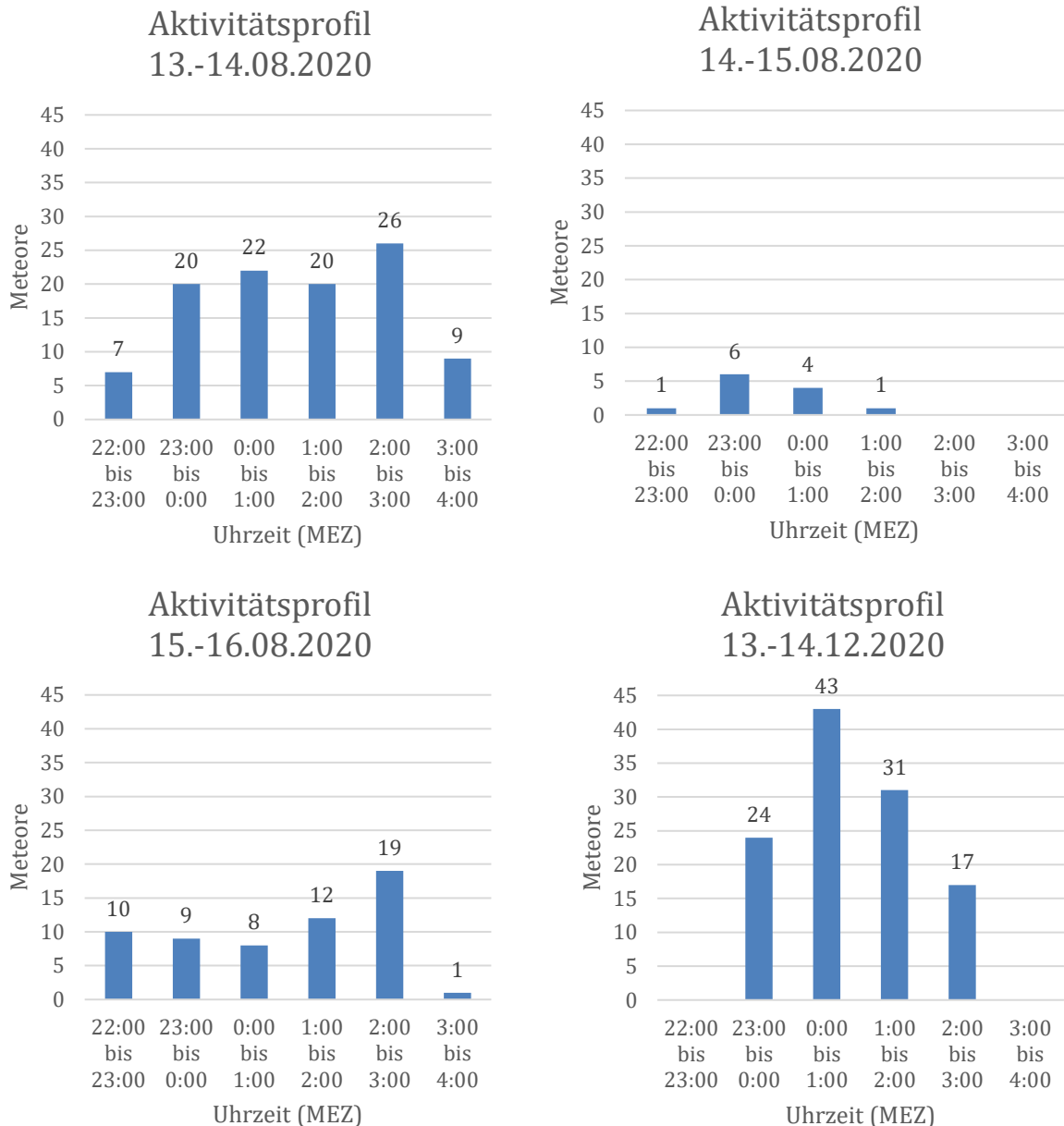


Abb. 14: Aktivitätsprofile aus den Videodaten der Beobachtungsnächte, nicht auf Bewölkung korrigiert
Grafik: Linus Sorg

Da zwischen manchen Videos Pausen von einigen Minuten waren, wurden die gezählten Meteore für die Aktivitätsprofile (Abb. 14) auf ganze Stunden hochgerechnet.

Fehlerbetrachtung

Ein großer Störfaktor der Anzahl der Videometeore ist die teilweise Bewölkung des Himmels. Dies haben wir bei der Videometeortabelle und dem Verlaufsdiagramm (Abb. 13), aber nicht bei den Aktivitätsprofilen (Abb. 14), durch eine geschätzte Bewölkung ausgeglichen.

Zu beachten ist zusätzlich auch noch, dass VAMOS als automatisierte Software bei der Auswertung zwangsläufig nicht alle Meteore erkannt hat, sondern manche auch ausgelassen wurden. VAMOS sollte uns für unser Projekt die Möglichkeit geben, eine große Menge an Videoaufnahmen schnell und unkompliziert auszuwerten. Dabei war das Ziel nicht, jeden einzelnen Meteor zu finden, sondern VAMOS sollte

uns als Werkzeug bei unseren Forschungen helfen. Die meisten der schwachen Meteore, die ein Mensch aber noch sehen kann, wurden von VAMOS „übersehen“, da sie nicht hell genug waren. In seltenen Ausnahmefällen wurde ein sehr heller Meteor auch wegen seiner zu großen Fläche aussortiert. Die zahlreichen automatisch erkannten Meteore waren eine valide Datenbasis für unser Forschungsziel, dem Erkennen von Zusammenhängen zwischen Video- und Radiodaten von Meteoren. Zur Qualitätssicherung unserer Ergebnisse haben wir alle von VAMOS erkannten Meteore manuell überprüft, sodass die Ergebnisse keine falsch positiven Meteore enthalten.

Videometeore mit begleitendem Radiosignal

	Stärke des Radiosignals				Radiometeore insg.	Videometeore insg.	Anteil Videometeore mit Radiosignal
	--	-	+	++			
11.-12.08.	1	2	5	2	10	22 (30)*	45% (33%)*
12.-13.08.	3	3	6	1	13	68	19%
13.-14.08.	17	7	2	2	28	78 (106)*	36% (26%)*
14.-15.08.	0	2	1	0	3	12	25%
15.-16.08.	7	3	6	0	16	61 (63)*	26% (25%)*
13.-14.12.	9	9	7	3	28	89	31%
Alle Nächte	37	26	27	8	98	330 (371)*	30% (26%)*

* Zahl beinhaltet Meteore, bei denen das Radiosignal entweder massiv gestört war, z.B. durch Fehlkontakt zwischen Antennenkabel und SDR-Empfänger, oder gar keine Radiodaten aufgezeichnet wurden.

Fehlerbetrachtung

Es gibt sowohl bei der Anzahl an Radio- als auch an Videometeoren große Schwankungen, die sich allerdings einfach erklären lassen.

Die Zahl an Videometeoren wurde durch die Bewölkung und die Dauer des Videos beeinflusst. So wurde z.B. in der Nacht vom 14./15.08. nur 03:40:08 beobachtet und die geschätzte Bewölkung lag bei 80%, deshalb wurden auch nur 12 Meteore gezählt. In der Nacht vom 13./14. liefen die Aufnahmen mehr als sechs Stunden und der Himmel war sehr klar, die Meteoranzahl lag hier bei 106 Meteoren.

Die Zahl der Radiometeore hängt auch stark von Beobachtungsdauer und Störungen der Aufnahmen ab.

Ergebnisdiskussion

Im letzten Jahr haben wir bei 43% der Videometeore ein begleitendes Radiosignal gefunden, dieses Jahr bei 30%. Das liegt wahrscheinlich an der Tatsache, dass die gerichtete Yagi-Uda-Antenne im Gegensatz zu den nicht gerichteten Teleskopantennen aufgrund eines kleineren Empfangsfeldes weniger Signale, aber vor allem auch weniger Störsignale empfangen hat. Die Radiosignale von letztem Jahr können aus unterschiedlichen Quellen stammen, dieses Jahr war es vermutlich nur GRAVES, was sich dank der genauen Frequenz der Antenne festmachen lässt. Ein weiterer Grund könnte sein, dass GRAVES sich beim Scannen des Himmels bewegt und sich somit seine Sendekeule nicht immer dort befindet, wo gerade ein Meteor erscheint. Bei den Radiometeoren, die wir gefunden haben, war GRAVES also im Moment des Auftretens des Videometeors so ausgerichtet, dass das

Radiosignal gestreut werden konnte. Um unsere Theorie zu überprüfen, haben wir nach Bildern gesucht, die zeigen, wie es aussieht, wenn die ISS ein von GRAVES gesendetes Signal streut. Ein solches Bild haben wir in einem Artikel zu „Meteor-Scattering“ aus dem BBC Sky at Night Magazine⁸ gefunden. Auf diesem Bild, aufgenommen in England, ist ein Raster zu sehen, an dem man die Uhrzeit in 2-Sekunden-Abständen ablesen kann. Es müsste sich, wenn GRAVES stillstehen würde, eine durchgezogene Linie ergeben. Das ist aber nicht der Fall. Stattdessen ist eine gestrichelte Linie zu sehen, die sich von oben links nach unten rechts erstreckt. Die einzelnen Zeitspannen der Radiosignale können zu einer Summe von 8,9 Sekunden zusammengerechnet werden. Teilt man das durch die gesamte beobachtete Zeitspanne von 28,5 s, erhält man einen Anteil von 31%. Das bedeutet, dass nur in 31 % der Zeit ein von der ISS gestreutes Radiosignal von GRAVES empfangen werden kann. Dieser Prozentsatz deckt sich erstaunlich gut mit den von uns beobachteten 30 % Videometeoren mit Radiosignal. Die Zeitlücken von GRAVES dauern ca. 3 s an, was ausreicht, dass die deutlich kürzeren Meteore komplett hineinfallen.

Wir haben unsere Aktivitätsprofile mit denen der IMO⁹ („International Meteor Organization“) verglichen. In den Aktivitätsprofilen der IMO ist der Höhepunkt der Perseiden am 12. August gegen 10 Uhr, bei uns ist es in der Nacht vom 13. auf den 14. August. Da die Nacht vom 12./13.08. mit ca. 35% bewölkt war, die Nacht vom 13./14.08. aber mit 5% ziemlich klar, erklärt das wahrscheinlich diese Verschiebung des Höhepunkts. Mithilfe einer korrigierten Meteorrate ohne Bewölkung haben wir versucht, unsere Ergebnisse der Realität anzunähern.

Die Werte zur Anzahl der Meteore pro Stunde unterscheiden sich ebenfalls zu den Angaben der IMO, doch da VAMOS nicht alle Meteore erkennt und wir nur einen kleinen Teil des Himmels gefilmt haben, ist das auch verständlich.

Wenn man unsere Ergebnisse der Perseiden mit den Geminiden vergleicht, fällt auf, dass die Zahl der Meteore pro Stunde höher ist als bei den Perseiden. Das lässt sich mit der Tatsache begründen, dass unser Geminiden-Objektiv verglichen zum Perseiden-Objektiv ein Weitwinkelobjektiv war und deshalb etwa die 4-fache Fläche des Himmels gefilmt wurde. Auch lag der Radiant, also der scheinbare Ursprung der Geminiden, bei unserer Beobachtung besonders hoch am Himmel. Dadurch ist die Wahrscheinlichkeit für einen Meteor höher, den sichtbaren Himmelsausschnitt zu treffen.

Im Gegensatz zum letzten Jahr wurde mit der verbesserten Radiotechnik ein Zusammenhang zwischen der Helligkeit bzw. Größe eines Video-Meteors und der Ausdehnung seines Radiosignals in Frequenz, Zeit und Signalstärke festgestellt. Fast alle sehr stark ausgeprägten Radiosignale traten mit einem sehr hellen Meteor auf und die schwachen Radiosignale wurden von einem ebenfalls schwachen Meteor begleitet. Der hellere Meteor hat vermutlich aufgrund der größeren Masse auch eine ausgedehntere Ionisationsspur und damit eine stärkere Streuung des Radiosignals. Die größere Ausdehnung im Frequenzbereich liegt am Doppler-Effekt. Es gibt viel

⁸ Hyde, Paul: BBC Sky at Night Magazine; Ausgabe Juni 2014; Artikel: How to use radio signals to catch meteors, Part 2

⁹ <https://www.imo.net/>

mehr geladene Teilchen mit unterschiedlichsten Geschwindigkeiten bei den hellen Meteoriten. Und da hellere und größere Meteorite auch länger andauern als kurze und schwache, wird das Signal auch in der Zeitdimension gestreckt. Dieser neu entdeckte Zusammenhang kommt wahrscheinlich zuerst einmal von der verbesserten Radioaufnahmetechnik, aber vermutlich lässt es sich auch auf die dritte Dimension unserer Empfangsmethode zurückführen. Damit ist gemeint, dass bei den Radioaufnahmen im letzten Jahr nur Aussagen zur Zeit und Signalstärke gemacht werden konnten, dieses Jahr durch den SDR-Empfänger und die neue Yagi-Uda-Antenne aber noch die Frequenz als dritte Dimension hinzugekommen ist. Diesen Zusammenhang wollen wir noch weiter und in Zukunft auch zahlenmäßig untersuchen, sodass wir für unsere Aussage Belege haben.

Den Zusammenhang zwischen der Dauer des Videometeors und der Dauer des Radiosignals konnten wir wegen Limitierungen bei der Auswertung der Radiodaten durch Spectrum Lab in diesem Projekt leider noch nicht untersuchen, obwohl VAMOS diese Informationen bereitgestellt hätte. Doch es ist geplant, diese Zusammenhänge bei der Weiterentwicklung dieses Projekts zu erforschen. Ebenfalls soll die Auswertung der Videodaten durch VAMOS in Zukunft genauer erfolgen. Das könnte beispielsweise durch Verwendung einer künstlichen Intelligenz erfolgen, die darauf trainiert ist, Meteorite zu erkennen.

Zusammenfassung

Wir haben einen ziemlich wahrscheinlichen Zusammenhang zwischen Video- und Radiodaten festgestellt, ca. 30% der Videometeore wiesen ein begleitendes Radiosignal im Zeitraum von 5 s davor bis 5 s danach auf. Dieser Anteil deckt sich sehr gut mit einem Prozentsatz aus der Literatur, bei dem ein von der ISS gestreutes Radiosignal empfangen werden konnte. Durch die richtungsgenaue Antenne können wir ziemlich sicher sagen, dass die Radiosignale wirklich von Meteoriten stammen. Bessere Radiodaten durch eine optimierte Empfangsausstattung ermöglichen Aussagen zur Relation zwischen der Größe eines Videometeors und der Stärke eines Radiosignals. In Zukunft soll durch optimierte Auswertung auch noch die Dauer von Video- und Radiosignal verglichen werden. Zusätzlich soll die Auswertung durch VAMOS verbessert werden, etwa durch eine trainierte künstliche Intelligenz.

Quellen- und Literaturverzeichnis

- Sorg, Linus; Eissler, Till: Meteorite – Video- und Radiobeobachtungen des Perseidenstromes, Schüler experimentieren 2020; https://www.allthesky.com/articles/MeteoriteJugendforscht2020_SorgEissler.pdf, 05.03.2021
- 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>, 10.01.2020
- Herrmann, Joachim: dtv-Atlas zur Astronomie, 11. Aufl., Deutscher Taschenbuch Verlag, München 1993
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Meteor>, 02.01.2020

- <https://www.imo.net/observations/methods/radio-observation/intro>, 03.01.2020
- https://fireballs.imo.net/members/imo_view/browse_reports, 10.01.2020
- J. F. Benzenberg und W. H. Brandes, „Annalen der Physik 6“, 1800, S. 224
- 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
- https://www.imo.net/members/imo_live_shower?shower=PER&year=2020, 17.01.2021
- <http://fallenangels2ndlife.dyndns.org/2017/12/06/247d-meteor-scatter-uberwachung-mit-hilfe-des-graves-radars/>, 08.08.2020

Unterstützung durch Personen und Institutionen

- Credner, Till: Projektbetreuer, Beratung schriftliche Arbeit, Unterstützung bei den Videoaufnahmen der Perseiden, Durchführung der Videoaufnahmen der Geminiden, Progymnasium Rosenfeld
- Eissler, Martin: Unterstützung bei der Planung und Umsetzung der Yagi-Uda-Antenne
- Schuch, Sven-Alexander: Beratung und Ausstattung von Radiotechnik
- Gaiselmann, Marianne und Sorg, Armin: Beratung schriftliche Arbeit
- Baden-Württemberg Stiftung: Kostenübernahme des Kamerabody der SONY Alpha 7s II
- Projekt Sternenpark Schwäbische Alb: Veranstalter des Meteorcamps