

Universität Rostock  
Fakultät für Informatik und Elektrotechnik

# Bachelorarbeit

*im Studiengang* **Elektrotechnik**  
*Schwerpunkt* **Mikroelektronik und Kommunikationstechnik**

**Thema:** Detektion und Identifikation von mit Hilfe des  
MMARIA Konzepts gewonnenen Specular-Meteor-Echos

*Detection and Identification of specular meteor echoes  
obtained with the MMARIA approach*

**Autor:** Matthias Clahsen  
matthias.clahsen@uni-rostock.de  
MatNr. 209204575

**Version vom:** 14. September 2015

**Betreuer:** Prof. Dr. Jorge Luis Chau  
Prof. Dr.-Ing. habil. Tobias Weber  
M.Sc. Karsten Wiedmann



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Der Meteor-Trail . . . . .	3
2.2	Das Specular-Meteor-Echo . . . . .	4
2.3	Das MMARIA-Konzept . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Detektion</b>	<b>10</b>
3.1	Präprozessierung der Rohdaten . . . . .	10
3.2	Die Detektion . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Identifikation</b>	<b>18</b>
4.1	Selektion der underdense-Meteor-Echos . . . . .	18
4.2	Bestimmung von Abklingkonstante und Dopplerfrequenz . . . . .	19
4.2.1	Entwicklung der Modellfunktion . . . . .	19
4.2.2	Die Bestimmung der Anfangswerte . . . . .	21
4.2.3	Der Fit . . . . .	22
4.3	Bestimmung des Angle-of-Arrival (AoA) . . . . .	22
4.3.1	Die Modellfunktion . . . . .	22
4.3.2	Abschätzung eines Anfangswerts . . . . .	23
4.3.3	Der Fit . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>28</b>
	<b>Literatur- / Quellenverzeichnis</b>	<b>I</b>
	<b>Selbständigkeitserklärung</b>	<b>II</b>



# 1 Einleitung

Das Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik in Kühlungsborn (IAP) hat seinen Forschungsschwerpunkt in der Erforschung der mittleren Atmosphäre. Die Hauptthemen in diesem Bereich sind:

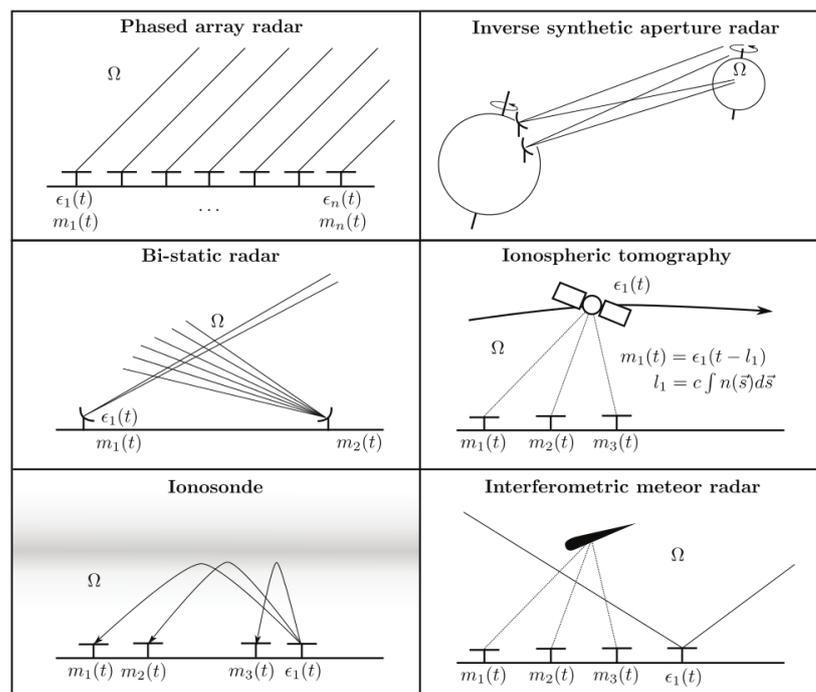
- *Erforschung der Mesosphäre und unteren Thermosphäre*
- *Kopplung der atmosphärischen Schichten*
- *langfristige Veränderungen in der mittleren Atmosphäre*

Dazu werden Beobachtungen der Atmosphäre bis hinauf in die Ionosphäre, einer Höhe von etwa 600km, durchgeführt. Hierzu werden vor allem Wetterballons, LIDAR (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging), Höhenforschungsraketen und RADAR (**R**adio **D**etection **A**nd **R**anging) verwendet. Auf Grundlage dieser Beobachtungen sollen bestehende Modelle ausgebaut, verbessert und eventuell neue Modelle entwickelt werden.

Aus diesem Grund untergliedert sich das IAP in drei Abteilungen:

- *Abteilung Optische Sondierungen*
- *Abteilung Theorie und Modellierung*
- *Abteilung Radar-Sondierungen und Höhenforschungsraketen*

Diese Arbeit ist dabei mit ihrem Thema in der Abteilung Radar-Sondierungen und Höhenforschungsraketen angesiedelt. Sie beschäftigt sich im Speziellen mit dem Specular-Meteor-Radar, welches eines von vielen Radarsystemen ist mit deren Hilfe physikalische Prozesse in der Atmosphäre beobachtet werden können.



**Abb. 1:** Übersicht über Radarsysteme zur Beobachtung der Atmosphäre (Quelle: [Vierinen(2012), S. 61])

Eine Übersicht über verschiedene Radarsysteme ist in Abb. 1 dargestellt. Der Fall oben rechts und rechts in der Mitte kommen am IAP nicht unmittelbar zum Einsatz und sollen hier daher nicht weiter beschrieben werden. Oben links ist ein sogenanntes Phased-Array abgebildet, welches z.B. bei Mesosphere-Stratosphere-Troposphere-(MST)-Radaren zum Einsatz kommt. Ein solches MST-Radar ist MAARSY (siehe Abb. 2), welches vom IAP in Alomar (Nordnorwegen) betrieben wird [IAP Website (2015)].



**Abb. 2:** Middle Atmosphere Alomar Radar System - MAARSY  
(Quelle: [IAP Website (2015)])

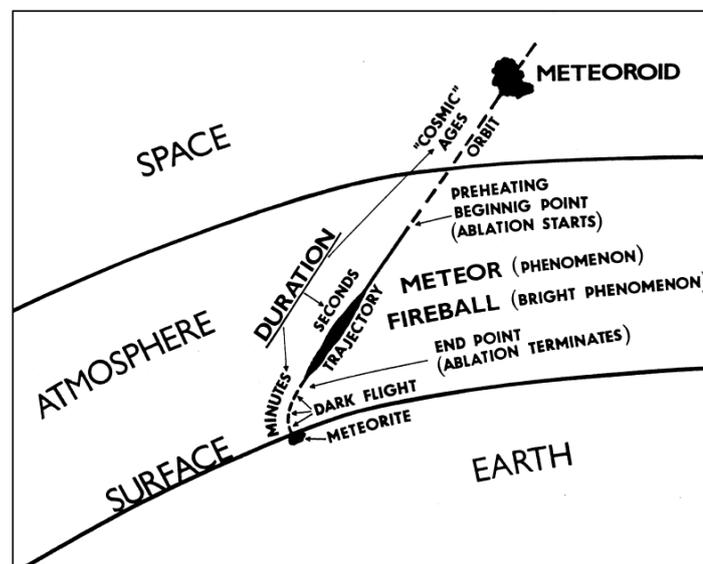
Eine Ionosonde wie in Abb. 1 unten links dargestellt besteht aus einem Sender und einem oder mehreren Empfängern, welche die Reflektionshöhe an der Ionosphäre bei unterschiedlichen Frequenzen vermessen.

Bei dem in Abb. 1 in der Mitte links dargestellten System handelt es sich um ein bistatisches Radarsystem, dass sich durch örtlich von einander getrennten Sender und Empfänger auszeichnet. Diese Art von Radaren arbeitet mit Vorwärtsstreuung. Dies erfordert eine genaue Synchronisierung der Sende- und Empfangssysteme. Dieses Verfahren wird in Kombination mit dem interferometrischen Meteorradar (Abb. 1 unten rechts) im vom IAP entwickelten MMARIA (Multistatic/Multifrequency Agile Radar for Investigations of the Atmosphere) System eingesetzt.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Der Meteor-Trail

Der Meteor tritt mit einer hohen Geschwindigkeit von mehreren km/s in die dichter werdende Atmosphäre ein. Je dichter die Atmosphäre wird und je schneller der Meteor ist, desto stärker erhitzt er sich während seines Fluges zur Erde. Bei einer Höhe von etwa 120 km bis 70 km wird die Hitze-Entwicklung so stark, dass es zu einer Ionisation des durch die Reibung und Hitze vom Meteor abgetragenen Materials sowie der den Meteor umgebenden Luft kommt. Durch diese Ionisation entsteht hinter dem Meteor in seiner Flugbahn ein Plasma-Trail (Schweif), der in der Regel aus Metallionen, Gasionen sowie Elektronen besteht. Der initiale Radius dieses Trails entspricht etwa der freien Weglänge der Gasteilchen in der Atmosphäre. Diese freie Weglänge ist von der Dichte der Luft und somit exponentiell von der Höhe über dem Erdboden sowie von der Temperatur abhängig. Der entstehende Schweif weitet sich durch Diffusion mit der Zeit immer weiter auf, bis sich der Trail wieder der Hintergrundatmosphäre angepasst hat. Das am Meteor entstehende Plasma das den Schweif ausbildet, nimmt schon sehr kurze Zeit nach seiner Entstehung die Geschwindigkeit der Hintergrundatmosphäre an. Dadurch kann durch Beobachtung des Trails auf Luftbewegungen in der Atmosphäre geschlossen werden.

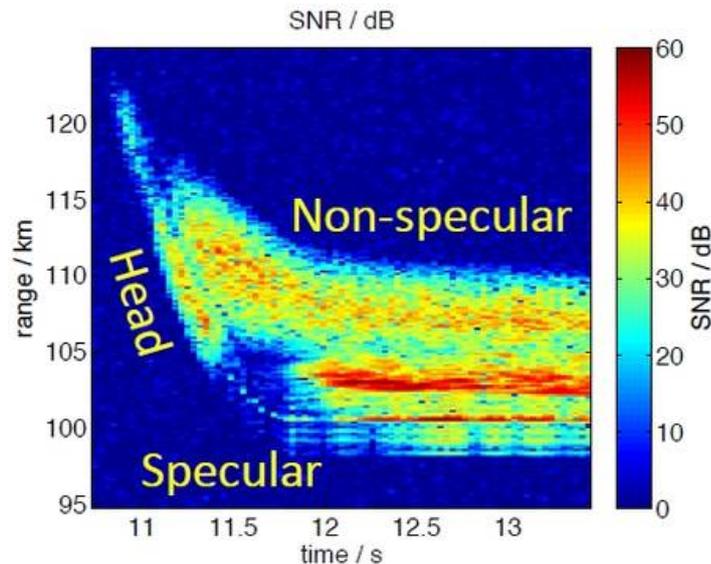


**Abb. 3:** Die Phasen eines Meteors bei der Wechselwirkung mit der Atmosphäre  
(Quelle: [Ceplecha et al. (1998), S. 4])

Die einzelnen Phasen, die ein Meteor beim Eintritt in die Atmosphäre durchläuft, sind schematisch in Abb. 3 dargestellt.

## 2.2 Das Specular-Meteor-Echo

Ein Meteor kann während seines Fluges durch die Atmosphäre bei Beobachtung durch Radarsysteme unterschiedliche Arten von Echos erzeugen. Ein Beispiel, in dem alle möglichen Echoformen gezeigt werden, ist in Abb. 4 dargestellt. Dass alle Arten von Echos eines Meteoren gleichzeitig beobachtet werden können ist allerdings sehr selten, meistens kann nur ein Effekt beobachtet werden.



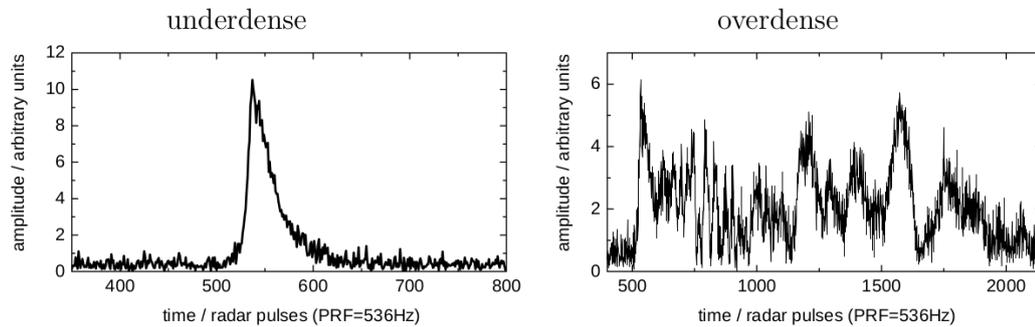
**Abb. 4:** Range-Time-Intensity(RTI)-Plot (gemessen von MAARSY), zeigt alle Echotypen, welche bei Meteoren beobachtet werden können (Quelle: [IAP Website (2015)])

Mit den in dieser Arbeit verwendeten Systemen können in der Regel nur Specular-Meteor-Echos beobachtet werden, daher werden die anderen Arten der Echos hier nicht weiter besprochen.

Specular-Meteor-Echos können in zwei Klassen unterteilt werden, die underdense- und die overdense-Echos. Bei overdense-Echos ist die Ladungsdichte auf dem Meteor-Trail so hoch, dass komplexe Streuprozesse innerhalb des Trails stattfinden. Außerdem kann hier auch Totalreflexion am Meteor-Trail auftreten. Durch die komplexen Streuprozesse ist die Modellbildung für diese Echos recht aufwendig. Da diese nur einen kleinen Anteil an den gesamten zu beobachtenden Echos haben, werden diese overdense-Meteor-Echos im Weiteren nicht betrachtet.

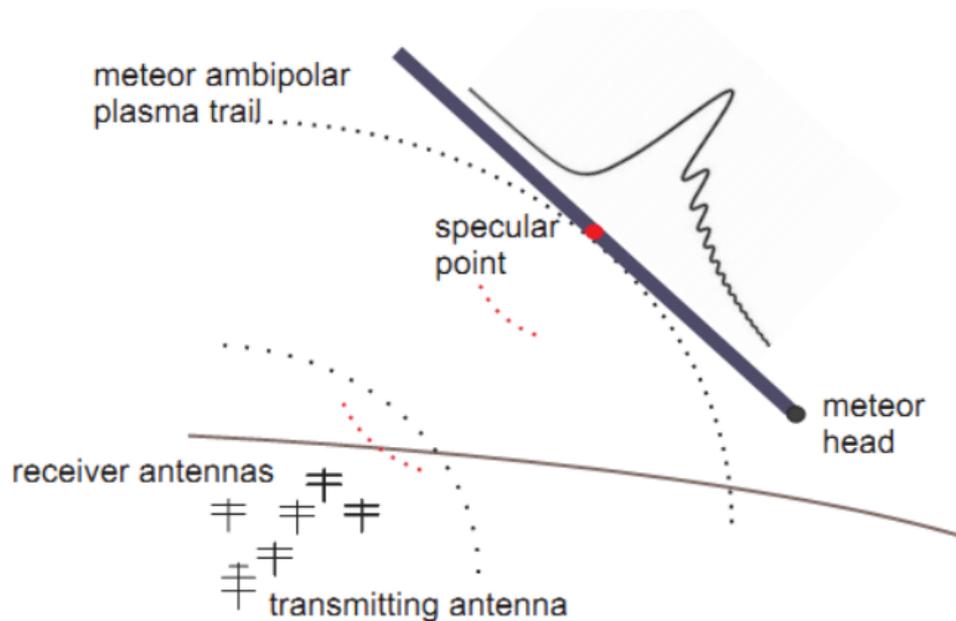
Die underdense-Echos, welche einen Großteil der zu beobachtenden Specular-Meteor-Echos umfassen, werden durch Meteor-Trails mit einer geringeren Ladungsdichte verursacht. Hier tritt keine Totalreflexion auf. Gleich nach dem Erreichen der maximalen Empfangsleistung fällt hier die empfangene Signalleistung exponentiell ab. Das exponentielle Abklingen des Signals wird dabei durch Diffusion und Rekombination des Plasmas verursacht.

Zur Verdeutlichung der Unterschiede zwischen den beiden Echoformen und der Komplexität des overdense-Echos sind zwei Beispiele in Abb. 5 dargestellt.



**Abb. 5:** Beispiele für gemessene Meteor-Echos (Quelle: [Stober(2009), S.13])

Der Meteor-Trail kann nur dann beobachtet werden, wenn er orthogonal zur Sichtlinie des Radarsystems liegt (im monostatischen Fall). Der Trail wirkt wie ein Spiegel. Im bistatischen Fall muss die einfallende Welle den gleichen Winkel mit der Achse des Meteor-Trails einschließen, wie die reflektierte Welle. Die Rückstreugeometrie für den monostatischen Fall eines Meteorradars wird in Abb. 6 gezeigt.



**Abb. 6:** Rückstreugeometrie eines Meteor-Trails für den monostatischen Fall (Quelle: [Stober(2009), S. 11])

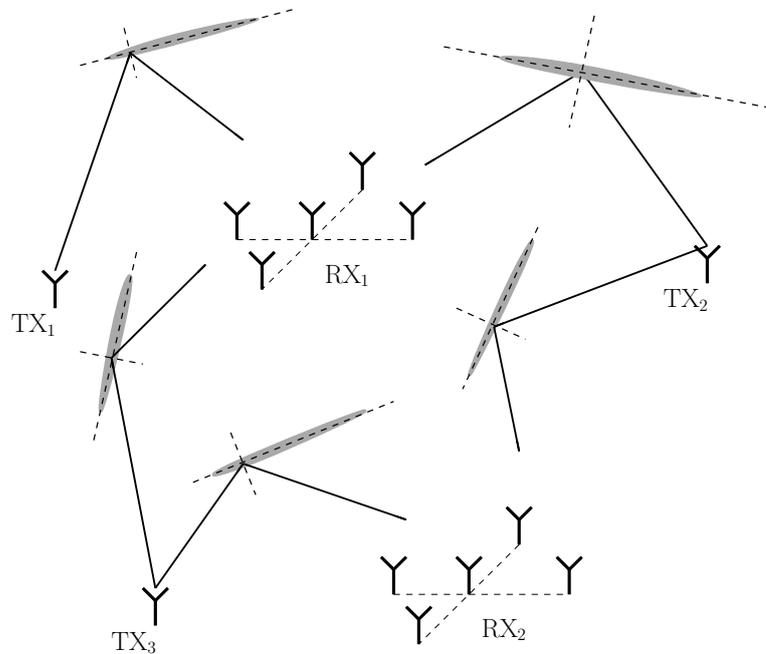
Die Radargleichung für die empfangene Leistung des vom underdense-Meteor-Trail zurück gestreuten Signals im monostatischen Fall kann nach [Sugar(1964)] wie folgt beschrieben werden:

$$P_R = P_T \cdot \frac{G_T G_R \lambda^3 q^2 r_e^2}{32\pi^2 R^3} \cdot \exp\left(-\frac{8\pi^2 r_0^2}{\lambda^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{32\pi^2 D t}{\lambda^2}\right) \quad (1)$$

Hierbei wird der underdense-Meteor-Trail zur Beschreibung des Rückstreuerverhaltens als sich ausdehnender, mit Elektronen gefüllter, unendlich langer Zylinder angenähert. Der Durchmesser des Zylinders wird als sehr klein im Vergleich zur Wellenlänge des beobachtenden Radarsystems angesehen. Die Elektronendichte innerhalb des Trails soll so gering sein, dass die einfallende Welle den Trail ohne große Veränderung passieren kann. Hierbei wird ein Teil des Signals an beiden Grenzflächen des Trails durch Unterschiede in der Elektronendichte zwischen Trail und umgebender Atmosphäre reflektiert. Mit zunehmendem Durchmesser des Trails wird das zurück reflektierte Signal durch destruktive Interferenz zwischen der von der Vorderseite und Rückseite des Trails Reflektierten Signale geschwächt. Dadurch kommt ein exponentielles Abklingen der empfangenen Leistung zustande. Weitere Details sowie die Herleitung des verwendeten Modells und Korrekturen für den bistatischen Fall können dem Paper [Sugar(1964)] entnommen werden.

### 2.3 Das MMARIA-Konzept

MMARIA (Multistatic/Multifrequency Agile Radar for Investigations of the Atmosphere) ist ein im Aufbau befindliches multistatisches Radarsystem zur großflächigen Bestimmung von Windfeldern durch Beobachtung von Meteor-Trails.



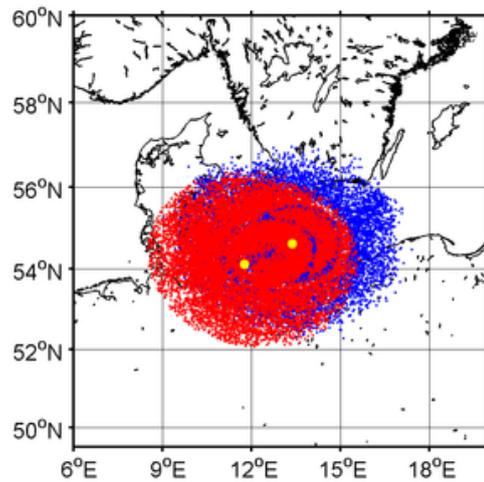
**Abb. 7:** Exemplarische Darstellung des Aufbaus von MMARIA (freundlicherweise zur Verfügung gestellt von N. Pfeffer)

Dieses System soll aus einem Netzwerk von räumlich getrennten Sende- und Empfängersystemen bestehen, welche mit Hilfe von GPS-Zeitgebern sehr präzise synchronisiert werden. Hierbei kann an einem Standort sowohl Sender als auch Empfänger betrieben werden (monostatischer Fall). Neben dem monostatischen Fall wird auch eine Vorwärtsstreuung zwischen zwei Standorten verwendet (bistatischer Fall). Der Aufbau des Systems ist exemplarisch in Abb. 7 dargestellt.

Aktuell sind an drei Standorten Systeme aufgebaut die zum Testen dieses Systems verwendet werden:

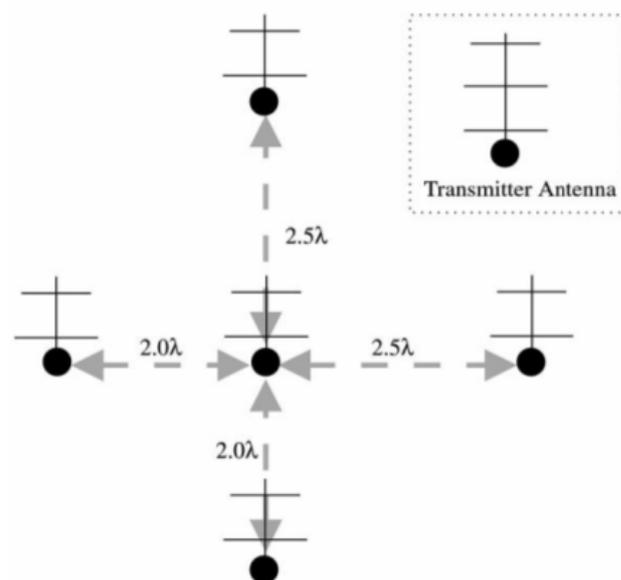
- Colm (bei Leipzig) Sender und Empfänger
- Juliusruh Sender und Empfänger
- Kühlungsborn nur Empfänger

Die Radarsysteme senden bei einer Frequenz von 36.2 MHz bzw. 32.55 MHz. Es handelt sich um Pulsradarsysteme welche mit einer Pulswiederholfrequenz  $f_{\text{PRF}}$  von 625 Hz arbeiten. Es wird ein kodierter Puls (meist 7-Bit Barkercode) mit einer Bitdauer  $T_{\text{Bit}}$  von 10  $\mu\text{s}$  verwendet. Die Entfernungsauflösung des Systems ist somit  $\frac{c_0 \cdot T_{\text{Bit}}}{2} = 1.5 \text{ km}$ . Die maximale Range beträgt  $\frac{c_0}{2 \cdot f_{\text{PRF}}} = 240 \text{ km}$ . Diese Werte gelten für den monostatischen Fall.



**Abb. 8:** Horizontale Projektion der detektierten Meteore. Schwarz ist die Küstenlinie dargestellt. Die blauen Punkte markieren die Positionen von Meteordetektion des Meteorradars in Juliusruh. Die roten Punkte sind Detektionen des bistatischen Systems (Sender in Juliusruh, Empfänger in Kühlungsborn)(Quelle: [IAP Website (2015)])

Kreuzpolarisierte Yagi-Antennen, deren einzelne Dipole um  $90^\circ$  phasenverschoben angesteuert werden, senden bzw. empfangen ein zirkular polarisiertes Signal. Dies dient der Eliminierung der Nullstellen in der Richtcharakteristik eines einzelnen Dipols. Jedes Empfangssystem besteht jeweils aus fünf Empfangsantennen, welche wie in Abb. 9 dargestellt angeordnet sind. Dadurch kann mit Hilfe von Interferometrie auf die Position des Meteor-Trails geschlossen werden.



**Abb. 9:** Darstellung der Antennenkonfiguration eines SKiYMET Meteorradars, die Position der Sendeantenne ist dabei unkritisch.  $\lambda$  entspricht hier bei der Wellenlänge des Radars (Quelle: [Hocking et al. (2001)])

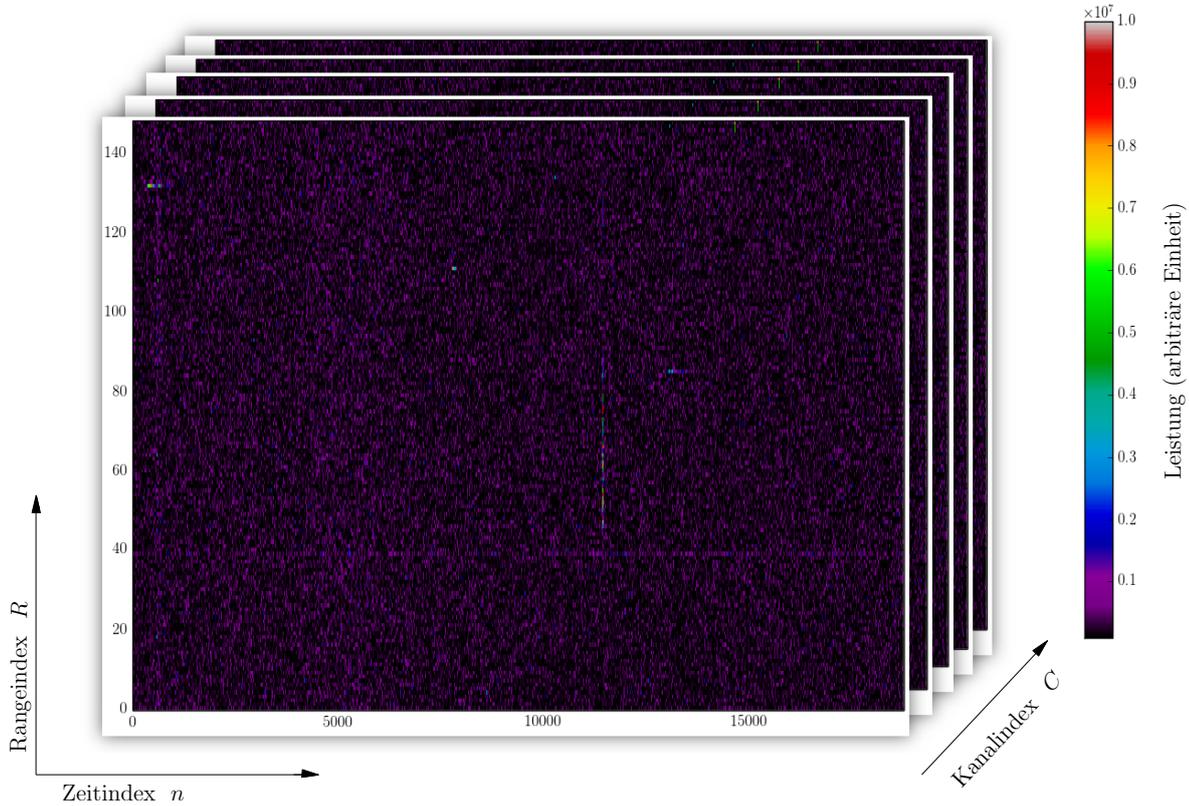
---

Eine direkte Positionierung der Antennen im Abstand von  $\frac{\lambda}{2}$  ist aufgrund von gegenseitiger Beeinflussung der Antennen bei zu geringem Abstand nicht möglich. Daher wird dieser aus der gegebenen Geometrie während der Analyse zurückgerechnet. Die Ausgabe eines Empfangssystems besteht aus jeweils einer komplexen Zeitreihe pro Empfangskanal (insgesamt 5). Diese wird, da es sich um ein Pulsradarsystem handelt, in einer Range-Time Darstellung interpretiert. Bei dieser Darstellung beträgt der Abstand der Zeitsamples  $\frac{1}{PRF} = IPP$  (langsame Zeitachse), der Abstand zwischen den Rangesamples beträgt  $T_{\text{Bit}}$  (schnelle Zeitachse) bzw. entspricht der Rangeauflösung des Radarsystems. IPP entspricht hierbei dem zeitlichen Abstand zwischen dem Beginn zweier Radarpulse (InterPulsePeriod).

### 3 Detektion

Ziel der Detektion ist es, underdense-Meteor-Echos in den gewonnenen Rohdaten zu finden und zu extrahieren. Hierdurch kann eine starke Datenreduktion erreicht werden. Durch die Detektion werden Daten für weitergehende Analysen zur Verfügung gestellt.

Leistung der empfangenen Rohdaten



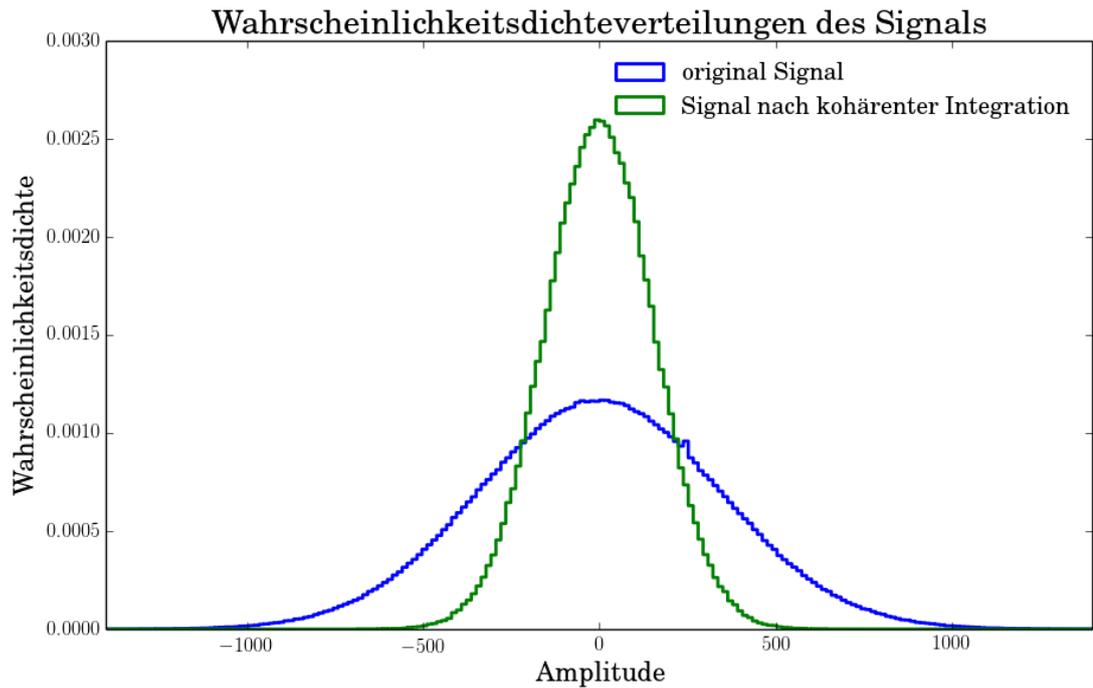
**Abb. 10:** Darstellung der Struktur der empfangen Rohdaten (Range-Time-Darstellung der empfangenen Leistung)

In Abb. 10 wird das Format der Rohdaten dargestellt. Die Grundlage für das hier vorgestellte Detektionsverfahren liefern [Hocking et al. (2001)] und [Holdsworth et al. (2004) a] sowie Verfahren aus der digitalen Bildbearbeitung.

#### 3.1 Präprozessierung der Rohdaten

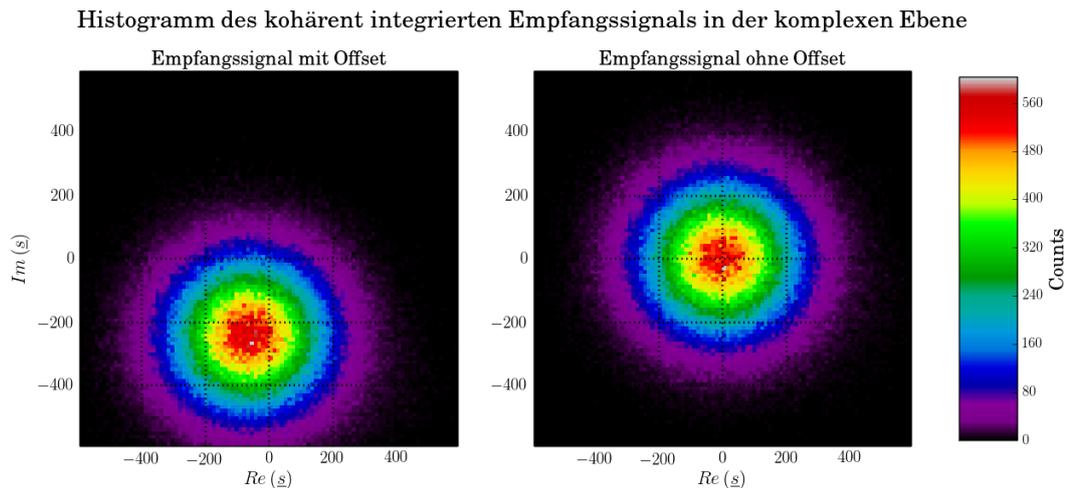
Um die Meteor-Echos für die Detektionsroutine besser sichtbar zu machen, werden die Rohdaten zunächst vorbearbeitet.

Hierzu wird zunächst eine kohärente Integration (Mittlung über mehrere Radarpulse) des komplexen Basisband-Empfangssignals  $\underline{s}$  zur Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses durchgeführt. In diesem speziellen Fall wurde der Mittelwert über jeweils fünf aufeinander folgende Radarpulse gebildet.



**Abb. 11:** Histogramm des Realteils des komplexen Empfangssignals  $\underline{s}$  vor und nach der kohärenten Integration

Durch die Reduzierung der Signalbandbreite wird hierbei die Rauschleistung des Signals verringert. Bei der Wahl des Integrationsfaktors ist darauf zu achten, dass die Signalbandbreite groß genug bleibt, um die Doppler-verschobenen Empfangssignale noch darstellen zu können.



**Abb. 12:** Histogramm des komplexen Empfangssignals  $\underline{s}_{coh}$  vor und nach der Offsetkorrektur

Anschließend wird für jeden Kanal der komplexe Gleichspannungsoffset des empfangenen kohärent integrierten Basisbandsignals  $\underline{s}_{\text{coh}}$  über Mittelwertbildung bestimmt und vom Signal subtrahiert.

$$\begin{aligned} \underline{DC}[C] &= \text{median} \{ \underline{s}_{\text{coh}}[C = C, R, n_{\text{coh}}] \}, \\ \underline{s}_{\text{DC}_r}[C, R, n_{\text{coh}}] &= \underline{s}_{\text{coh}}[C, R, n_{\text{coh}}] - \underline{DC}[C]. \end{aligned}$$

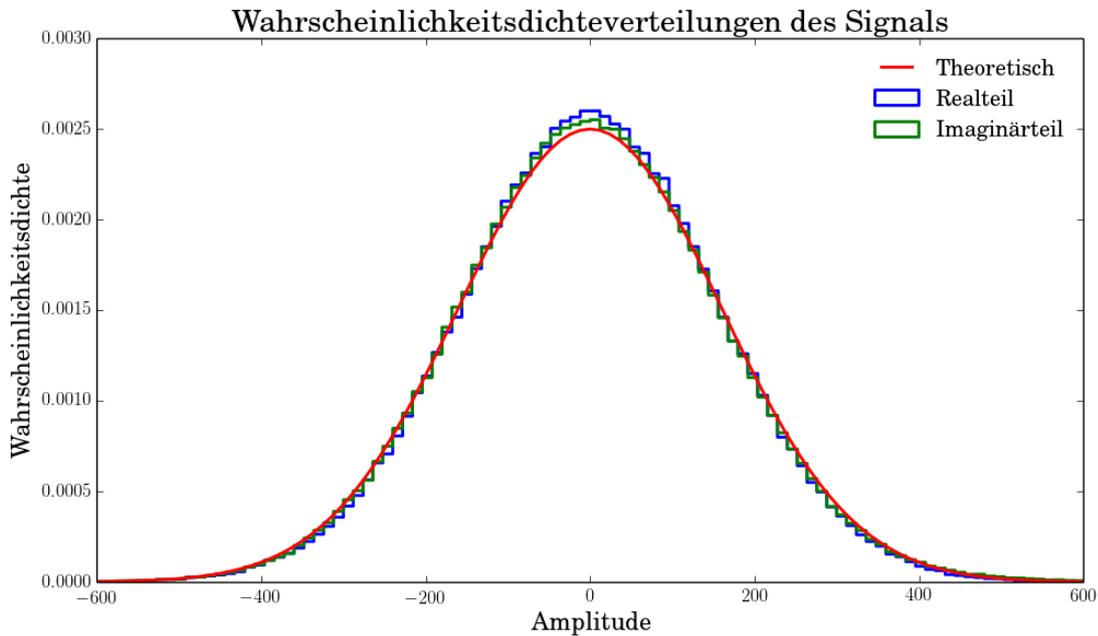
Danach wird die Rausleistung  $P_{N,\text{coh}}$  des Signals durch Berechnung des Medians der Leistung abgeschätzt.

Mit  $\underline{s}_{\text{DC}_r}$  als mittelwertfreie, kohärent integrierte, komplexe Spannung des empfangenen Signals gilt:

$$P_{N,\text{coh}} = \overline{|\underline{s}_{\text{DC}_r}[C, R, n_{\text{coh}}]|^2} = 2\sigma_{\text{Re}/\text{Im},\text{coh}}^2 = 2 \cdot \frac{\text{median} \{ |\underline{s}_{\text{DC}_r}[C, R, n_{\text{coh}}]|^2 \}}{1.386}. \quad (2)$$

$\sigma_{\text{Re}/\text{Im},\text{coh}}^2$  ist hierbei die abgeschätzte Varianz des Rauschens.

Die Wahrscheinlichkeitsdichten des Mittelwert-freien Signals sowie die theoretische Wahrscheinlichkeitsdichte für das abgeschätzte  $\sigma_{\text{Re}/\text{Im},\text{coh}}$  sind in Abb. 13 dargestellt. Hier ist erkennbar, dass das der Schätzwert für das Rauschen sehr gut mit den Messwerten überein stimmt.



**Abb. 13:** Darstellung der Wahrscheinlichkeitsdichten für Real- und Imaginärteil des empfangenen Signals sowie der theoretischen Gaußschen Wahrscheinlichkeitsdichte mit abgeschätztem  $\sigma_{\text{Re}/\text{Im}}$  und  $\mu = 0$

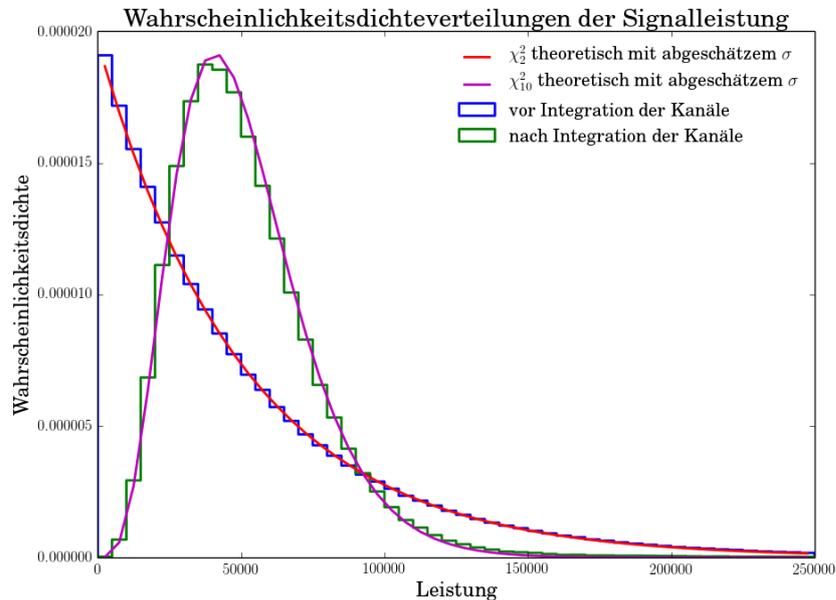
Die Wahrscheinlichkeitsdichte der Leistung entspricht einer  $\chi^2$ -Verteilung mit einem Freiheitsgrad von 2. Der Quotient 1.386 aus Gl. 2 entspricht dem 0.5-Quantil (Me-

dian) dieser Verteilung. Der Median wird hier angewendet, da er robuster gegenüber Ausreißern (wie z.B. Echos) als die einfache Mittelwertbildung ist.

Anschließend werden die Leistungen aller fünf Kanäle auf-integriert:

$$P_{ci}[R, n_{\text{coh}}] = \frac{1}{5} \cdot \sum_{C=0}^4 |\underline{s}_{\text{DC}_r}[C, R, n_{\text{coh}}]|^2.$$

Hierbei wird das zwischen den Kanälen unkorrelierte Rauschen angeglichen; dadurch nimmt die Varianz des Rauschens ab. Auch wenn sich die Rauschleistung selber hier nicht reduziert, wird der Rauschteppich gleichmäßiger; dadurch ist es möglich schwache Echos besser zu detektieren. Die integrierte Leistung ist  $\chi_{10}^2$ -Verteilt.



**Abb. 14:** Darstellung der Wahrscheinlichkeitsdichte der Leistung vor und nach der Integration über die Kanäle

Analytisch lässt sich die Wahrscheinlichkeitsdichte der  $\chi^2$ -Verteilung für einen bestimmten Skalierungsfaktor  $\sigma$  wie folgt beschreiben:

$$f_{\chi_k^2}(x, k, \sigma) = \frac{\left(\frac{x}{\sigma^2}\right)^{\frac{k}{2}-1} \cdot e^{-\frac{x}{2\sigma^2}}}{2 \cdot \Gamma\left(\frac{k}{2}\right) \cdot \sigma^2}. \quad (3)$$

Wobei  $x$  der Zufallsvariablen (z.B. die Leistung eines normal-verteiltern Rauschens) und  $k$  dem Freiheitsgrad der Verteilung entspricht.  $\sigma^2$  entspricht in unserem Fall der Varianz der zugrunde liegenden Signalspannung  $\underline{s}_{\text{coh}}$ . Da bei der Integration über die

Kanäle durch die Anzahl der Kanäle geteilt wird, muss man hier noch einen Faktor 5 berücksichtigen. Es gilt also:

$$\begin{aligned} p\{P_{\text{coh}}\}(x) &= f_{\chi_2^2}(x, k = 2, \sigma = \sqrt{\frac{P_{\text{N,coh}}}{2}}), \\ p\{P_{\text{ci}}\}(x) &= f_{\chi_2^2}(x, k = 10, \sigma = \sqrt{\frac{P_{\text{N,coh}}}{2 \cdot 5}}). \end{aligned}$$

$P_{\text{N,coh}}$  entspricht hierbei der zuvor abgeschätzten Rauschleistung. Die theoretischen Wahrscheinlichkeitsdichten sowie die dazugehörigen Histogramme sind in Abb. 14 dargestellt.

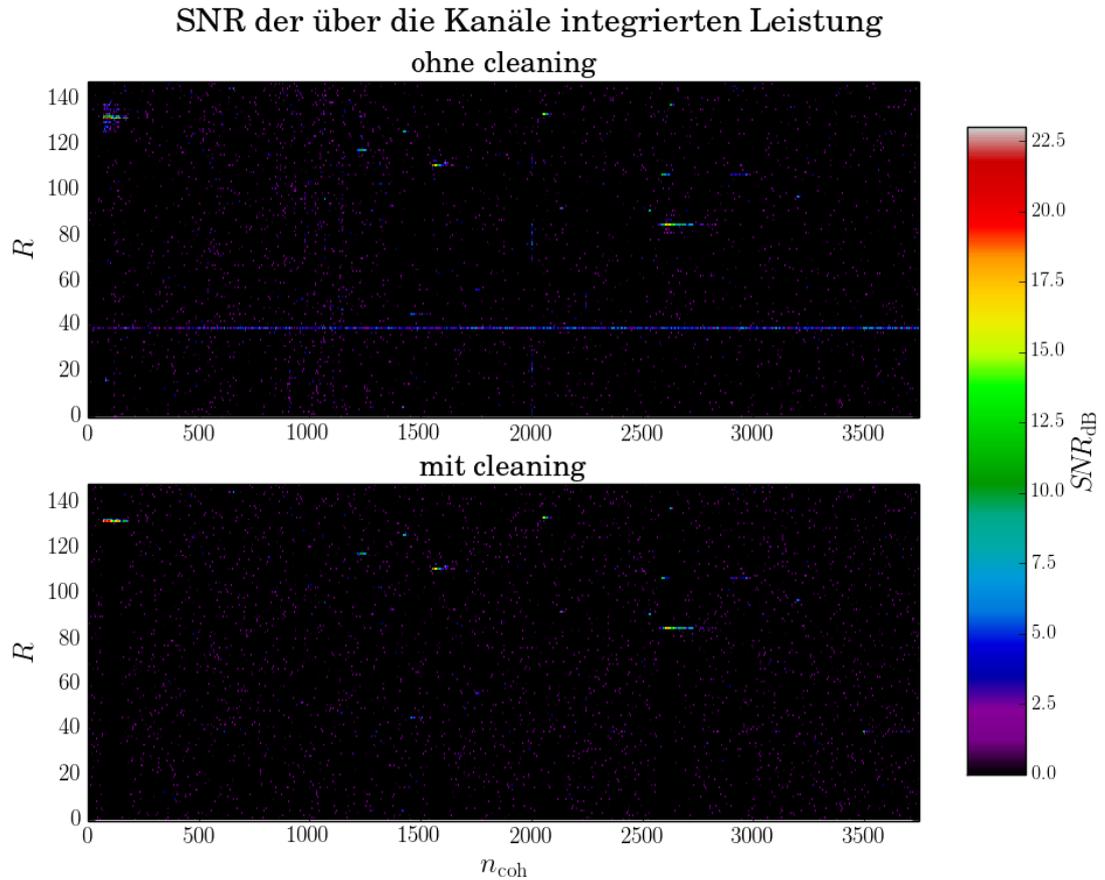
Um Störungen sowie zeitliche Schwankungen der Rauschleistung und lange Echos wie z.B. die von Flugzeugen zu reduzieren bzw. zu entfernen, werden die Daten nun einer Reinigung (cleaning) unterzogen. Dies wird einmal in Range-Richtung und einmal in Zeit-Richtung durchgeführt. Hierbei wird ausgenutzt, dass die gewünschten Meteor-Echos nur von kurzer Zeitdauer sind und deren Range konstant bleibt. Für das cleaning in Zeitrichtung, welches zur Reduzierung von lange anhaltenden Echos verwendet wird, wird für jede Range das 0.9-Quantil  $Q_{0.9,n}[R]$  berechnet und von der Zeitreihe abgezogen. Anschließend wird das theoretisch aus dem zuvor abgeschätzten Rauschen errechnete 0.9-Quantil  $Q_{0.9,N}$  wieder hinzu addiert. Analog wird beim cleaning in Range-Richtung verfahren, hier wird allerdings für jeden Radarpuls das 0.99-Quantil  $Q_{0.99,R}[n_{\text{coh}}]$  in Range-Richtung ermittelt, da die gewünschten Meteor-Echos in der Regel nur in einer Range gleichzeitig auftreten:

$$P_{\text{clean}}[R, n_{\text{coh}}] = P_{\text{ci}}[R, n_{\text{coh}}] - Q_{0.9,n}[R] - Q_{0.99,R}[n_{\text{coh}}] + Q_{0.9,N} + Q_{0.99,N}. \quad (4)$$

In Abb. 15 wird die Wirkung dieses cleanings deutlich, hier wird ein Meteor-Echo sichtbar, welches vorher von einem anderen Echo verdeckt wurde.

Um eine Detektionsschwelle unabhängig von der Rauschleistung definieren zu können, wird das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) mit Hilfe der zuvor geschätzten Rauschleistung berechnet:

$$\begin{aligned} \text{SNR}[R, n_{\text{coh}}] &= \frac{P_{\text{clean}}[R, n_{\text{coh}}] - P_{\text{N,coh}}}{P_{\text{N,coh}}}, \\ \text{SNR}_{\text{dB}}, n_{\text{coh}}] &= 10 \cdot \log_{10}(\text{SNR}[R, n_{\text{coh}}]). \end{aligned}$$



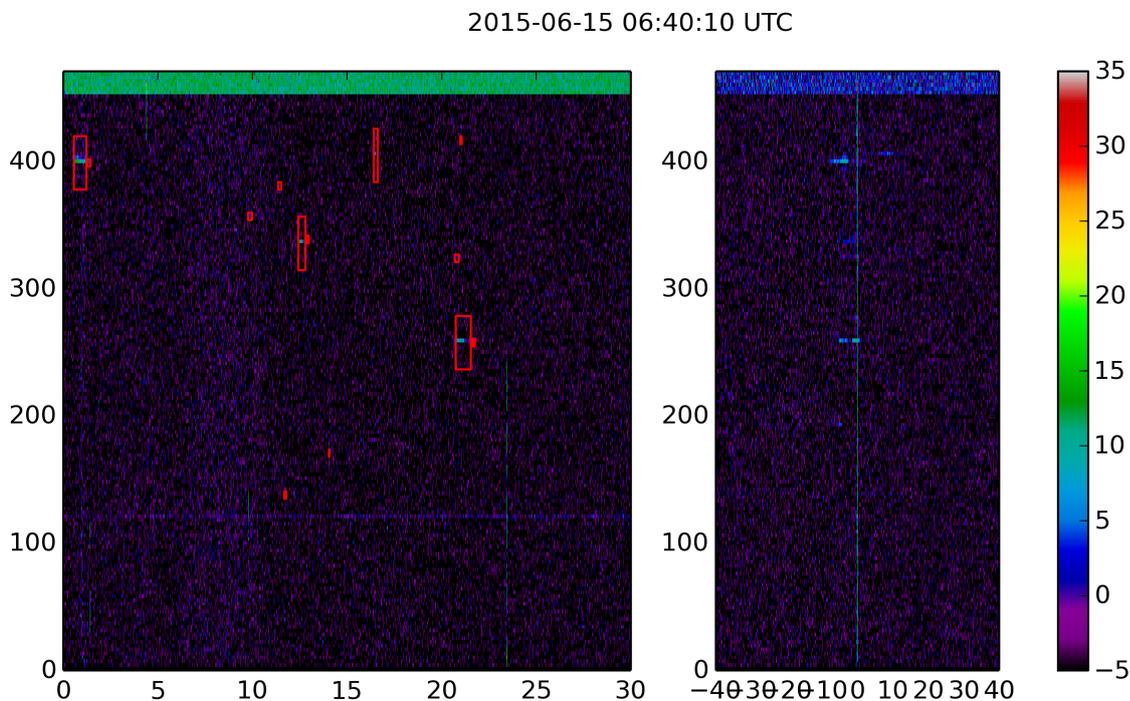
**Abb. 15:** Darstellung von  $SNR[R, n_{\text{coh}}]$  in Range-Time-Darstellung; zum Vergleich einmal mit und einmal ohne durchgeführtes cleaning

Das Ergebnis der bisherigen Bearbeitung ist in Abb. 15 zu erkennen. Hier ist der gleiche Datenabschnitt dargestellt wie in Abb. 10. Es sind im Vergleich zu den Ausgangsdaten jetzt deutlich mehr Echos erkennen, die vorher durch das Rauschen verdeckt waren.

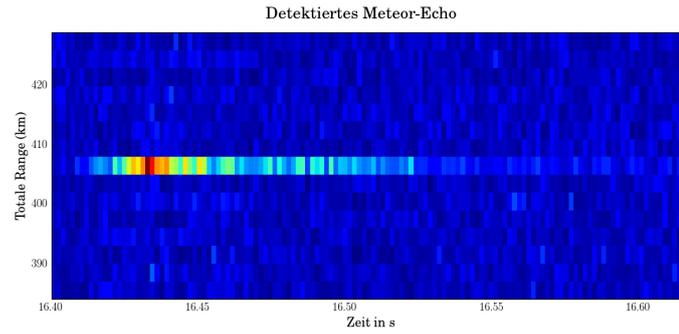
### 3.2 Die Detektion

Nach der aufwendigen Vorbearbeitung der Daten folgt nun die eigentliche Detektion. Hierfür wird zunächst eine Detektionsschwelle definiert ab der Echos als solche erkannt werden sollen, diese Schwelle wurde hier bei 0 dB festgelegt. Alle Datenpunkte, welche unterhalb dieser Schwelle liegen, werden auf einen minimal Wert gesetzt. Um die vom Rauschen noch vorhandenen, einzeln heraus stehenden Spitzen zu entfernen, wird jetzt ein Median-Filter eingesetzt. Durch diesen Filter verbleiben nahezu nur die gewünschten potentiellen Meteor-Echos in dem bearbeiteten Datensatz. Um nun die Position der einzelnen Echos zu bestimmen, wird nun nach dem maximalen SNR gesucht und anschließend alle Punkte in Zeit-Richtung um diesen herum erfasst, welche den Schwellwert übersteigen. Danach wird die Position des gerade gefundenen Echos abgespeichert und das Echo selber aus den Daten entfernt, um eine erneute Detektion zu verhindern. Um hierbei die Mehrfach-Detektion eines Meteors durch Nebenkeulen (hervor-

gerufen durch die Kodierung der gesendeten Pulse) zu verhindern, werden bei Echos, deren Maximalwert eine bestimmte Grenze überschreitet, die eventuell vorhandenen Nebenkeulen ebenfalls entfernt und später mit abgespeichert. Der Grenzwert für das Auftreten der Nebenkeulen sowie die Anzahl sind abhängig von der verwendeten Kodierung. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis sämtliche Datenpunkte unterhalb der Detektionsschwelle liegen. Mit Hilfe der von den detektierten Echos gespeicherten Koordinaten werden nun diese potentiellen Meteor-Echos aus den unbearbeiteten, aber vom Offset befreiten Rohdaten herausgeschnitten und mit zusätzlichen Informationen, wie z.B. Zeitstempel und Range für die weitere Verarbeitung abgespeichert. Außerdem wird die nach Gl. 2 geschätzte Rauschleistung  $P_N$  dieses Mal vom original Signal mit gespeichert, da diese später noch benötigt wird.



**Abb. 16:** Darstellung des SNR der unbearbeiteten Rohdaten mit roten Kästen um die ausgewählten Bereiche sowie eine Ausschnitt des Spektrums in Zeitrichtung. Auf der y-Achse ist die totale Range und auf der x-Achse die Zeit in s abgetragen.



**Abb. 17:** Beispiel für ein detektiertes Echo

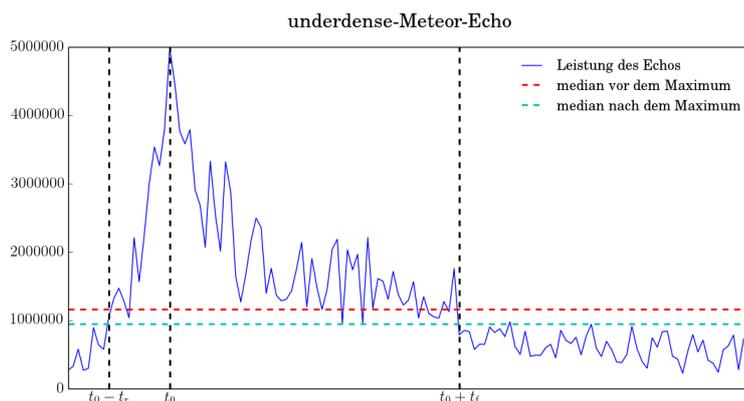
Ein Beispiel für ein detektiertes Echo ist in Abb. 17 dargestellt. Die Zeit bezieht sich hierbei auf den Beginn des verarbeiteten Datenblocks, die totale Range entspricht der gesamten vom Radarsignal zurückgelegten Strecke (Sender -> Rückstreuer -> Empfänger). In diesem Fall überstieg die Maximalleistung des Meteor den Grenzwert für die Nebenkeulen und es wurden zusätzliche Range-Gates mit ausgeschnitten.

## 4 Identifikation

Bei der Identifikation werden die während der Detektion gefundenen Echos weiter verarbeitet. Es werden Parameter, im Speziellen der underdense-Meteor-Echos, abgeschätzt. Dies betrifft besonders Parameter, welche für eine spätere Abschätzung des Windes nötig sind, wie z.B. die Dopplerfrequenz.

### 4.1 Selektion der underdense-Meteor-Echos

Zunächst werden nach empirisch bestimmten Kriterien, ähnlich denen von [Holdsworth et al. (2004) a], die für die weiteren Schritte notwendigen underdense-Meteor-Echos aus den zuvor detektierten Echos heraus sortiert. Dazu werden zuerst die Anstiegszeit sowie die Abfallzeit des Echos betrachtet. Da ein underdense-Meteor-Echo sich durch eine sehr kurze Anstiegszeit und einen exponentiellen Abfall auszeichnet, darf hier die Anstiegszeit eine vorher definierte und empirisch bestimmte Zeit nicht überschreiten. Zum einen werden hier alle Echos, deren Anstiegszeit länger als 0.3 s beträgt und zum anderen alle, deren Anstiegszeit mehr als die Hälfte der Abfallzeit beträgt, aussortiert. Um die Anstiegs- bzw. Abfallzeit zu bestimmen, wird zunächst der Median der Leistung einmal vor dem Peak und einmal nach dem Peak bestimmt und der kleinere der beiden ausgewählt. Dann wird die Anstiegszeit, über die Zeit, welche das Signal benötigt um von diesem Wert aus den Peak zu erreichen, bestimmt. Für die Bestimmung der Abfallzeit, wird die Zeit bestimmt, die das Signal benötigt um vom Maximalwert wieder auf den zuvor bestimmten Grenzwert abzufallen. Diese Werte sind zur Veranschaulichung in Abb. 18 grafisch dargestellt.



**Abb. 18:** Für die Auswahl der underdense-Meteor-Echos wichtige Parameter

Außerdem wird die maximale Leistung des Meteor-Echos mit dem Median der Leistung vor dem Maximalwert verglichen. Um sicher zu stellen, dass das Signal aus dem Rauschen heraus schnell ansteigt, werden alle Echos, deren Maximalleistung kleiner als das doppelte des Medians beträgt, ebenfalls aussortiert.

## 4.2 Bestimmung von Abklingkonstante und Dopplerfrequenz

Zur Bestimmung der Windfelder mit Hilfe eines Meteorradars ist es notwendig, die Dopplerverschiebung des empfangenen Signals zu bestimmen. Diese Dopplerverschiebung  $f_d$  kommt durch den Winddrift des Meteor-Trails zustande. Hierdurch kann die Geschwindigkeit des Meteor-Trails radial zum Radar und damit der Hintergrundwind bestimmt werden. Die Bestimmung der Abklingkonstante ermöglicht es z.B. Rückschlüsse auf Temperatur bzw. Dichte der Hintergrundatmosphäre zu ziehen.

### 4.2.1 Entwicklung der Modellfunktion

Nach [Kang et al. (2007)] kann das empfangene underdense-Meteor-Echo nach dem Peak wie folgt beschrieben werden:

$$\underline{s}(t) = A \cdot e^{-\alpha t} \cdot e^{j(\varphi + 2\pi f_d t)}. \quad (5)$$

Während die Amplitude  $A$  sowie der Phasenoffset  $\varphi$  für jeden Empfangskanal unterschiedlich sein können, werden die Abfallrate  $\alpha$  sowie die Dopplerfrequenz  $f_d$  für jeden Kanal als gleich angenommen. Damit kann das Empfangssignal für einen Kanal wie folgt beschrieben werden:

$$\underline{s}_C(t) = A_C \cdot e^{-\alpha t} \cdot e^{j(\varphi_C + 2\pi f_d t)}. \quad (6)$$

Das empfangene Signal ist diskret abgetastet mit der Interpulsperiode  $T_{\text{IPP}} = \frac{1}{f_{\text{PRF}}}$ , daher gilt mit  $t = n \cdot T_{\text{IPP}}$  sowie den normierten Größen  $\alpha_N = \alpha \cdot T_{\text{IPP}}$  und  $f_N = f_d \cdot T_{\text{IPP}}$  für das empfangene Signal eines Kanals:

$$\underline{y}_C[n] = \underline{s}_C[n] + \underline{w}[n] \quad \text{mit } n = 0, 1, \dots, (N - 1), \quad (7)$$

$$\underline{s}_C[n] = A_C \cdot e^{-\alpha_N n} \cdot e^{j(\varphi_C + 2\pi f_N n)}. \quad (8)$$

$\underline{w}[n]$  beschreibt das dem Signal überlagerte komplexe Rauschen, welches weiß, gaußverteilt und mittelwertfrei ist.  $N$  entspricht der Anzahl der Datenpunkte des endlichen Signals.

Um das Rauschen des Echos für das spätere Fitten und eine Zusammenfassung der Daten ohne Phasenoffsets zu ermöglichen, wird nicht das Echo direkt sondern dessen Autokorrelation gefittet. Bei Berechnung der Autokorrelation der einzelnen Kanäle entfällt deren Phasenoffset, so können die Kanäle ohne destruktive Interferenz kombiniert werden. Die Endlichkeit des empfangenen Echos lässt sich mit der Multiplikation ei-

nes Rechteckfensters beschreiben. Damit ergibt sich das Signal für die Berechnung der Autokorrelation wie folgt:

$$\underline{y}_C = (\underline{s}_C[n] + \underline{w}[n]) \cdot (\mathbf{1}[n] - \mathbf{1}[n - N]), \quad (9)$$

mit der Sprungfunktion:

$$\mathbf{1}[n] = \begin{cases} 1, & n \geq 0 \\ 0, & n < 0 \end{cases}. \quad (10)$$

Hieraus lässt sich die Autokorrelation des diskreten endlichen Modells herleiten:

$$\begin{aligned} \Psi_{\underline{y}_C, \underline{y}_C}[k] &= akf \{ \underline{y}_C[n] \} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \underline{y}_C^*[n] \cdot \underline{y}_C[n+k] \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} [(\underline{s}_C^*[n] + \underline{w}^*[n]) \cdot (\mathbf{1}[n] - \mathbf{1}[n - N]) \cdot \\ &\quad (\underline{s}_C[n+k] + \underline{w}[n+k]) \cdot (\mathbf{1}[n+k] - \mathbf{1}[n+k - N])], \end{aligned} \quad (11)$$

mit  $k \geq 0$  folgt:

$$(\mathbf{1}[n] - \mathbf{1}[n - N]) \cdot (\mathbf{1}[n+k] - \mathbf{1}[n+k - N]) = \mathbf{1}[n] - \mathbf{1}[n+k - N]$$

und damit:

$$\Psi_{\underline{y}_C, \underline{y}_C}[k] = \sum_{n=0}^{N-k-1} ((\underline{s}_C^*[n] + \underline{w}^*[n]) \cdot (\underline{s}_C[n+k] + \underline{w}[n+k])). \quad (12)$$

Wenn man nun Gl. 8 in die obige Gl. 12 einsetzt und ausmultipliziert, erhält man für  $k \geq 0$ :

$$\begin{aligned} \Psi_{\underline{y}_C, \underline{y}_C}[k] &= A_C^2 \cdot e^{-\alpha_N k} \cdot e^{j2\pi f_N k} \cdot \sum_{n=0}^{N-k-1} e^{-2\alpha_N n} \\ &\quad + \sum_{n=0}^{N-k-1} A_C \cdot e^{-\alpha_N n} \cdot e^{-j(\varphi_C + 2\pi f_N n)} \cdot \underline{w}[n+k] \\ &\quad + \sum_{n=0}^{N-k-1} A_C \cdot e^{-\alpha_N(n+k)} \cdot e^{j(\varphi_C + 2\pi f_N(n+k))} \cdot \underline{w}^*[n] \\ &\quad + \sum_{n=0}^{N-k-1} \underline{w}^*[n] \cdot \underline{w}[n+k]. \end{aligned} \quad (13)$$

Hierbei werden die beiden Mischterme vernachlässigt, da der Erwartungswert von  $\underline{w}[n] = 0$  ist. Die Summe über das Rauschen ergibt nur für  $k = 0$  einen Beitrag, da das Rauschen unkorreliert ist. Hieraus folgt:

$$\Psi_{\underline{y}_C, \underline{y}_C}[k] = A_C^2 \cdot e^{-\alpha_N k} \cdot e^{j2\pi f_N k} \cdot \sum_{n=0}^{N-k-1} e^{-2\alpha_N n} + N \cdot P_N \cdot \delta[k]. \quad (14)$$

$P_N$  entspricht dabei der schon während der Detektion bestimmten Rauschleistung des Signals. Die noch übriggebliebene Summe ist der Endlichkeit des Signals geschuldet und lässt sich auch wie folgt ausdrücken:

$$K[k] = \sum_{n=0}^{N-k-1} e^{-2\alpha_N n} = \frac{e^{-2\alpha_N(N-k)} - 1}{e^{-2\alpha_N} - 1}. \quad (15)$$

Da die Rauschleistung des Signals vorher bestimmt wurde, kann diese von  $\Psi_{\underline{y}_C, \underline{y}_C}[0]$  abgezogen werden. Außerdem wird die Funktion normiert, da die Amplitude in unserem Fall nicht von Interesse ist. Es wird jedoch eine Konstante  $A' \approx 1$  mit gefittet, diese soll Auskunft darüber geben, wie gut das Modell mit den realen Daten übereinstimmt. Daraus folgt das theoretische Modell, welches für den Fit verwendet wird:

$$Y[k] = A' \cdot e^{-\alpha_N k} \cdot e^{j2\pi f_N k} \cdot \frac{K[k]}{K[0]}. \quad (16)$$

#### 4.2.2 Die Bestimmung der Anfangswerte

Um den Fit möglichst effizient und stabil zu gestalten ist es nötig, vorher Anfangswerte der zu fittenden Parameter zu bestimmen. Je näher die Anfangswerte an den realen Werten liegen, desto besser funktioniert der Fit.

Zur Bestimmung eines Anfangswerts für die Abfallkonstante  $\alpha$  wird die über alle Kanäle gemittelte Leistung des detektierten Echos ab dem Maximalwert betrachtet. Diese wird normiert und lässt sich dann wie folgt beschreiben:

$$\frac{P_E[n]}{P_E[0]} = e^{-2\alpha_N n}. \quad (17)$$

Diese Funktion nach  $\alpha_N$  umgestellt und an der Stelle  $n = N/2$  ausgewertet ergibt den Anfangswert für  $\alpha_N$ :

$$\alpha_N \approx \frac{1}{N} \cdot (\ln(P_E[0]) - \ln(P_E[N/2])). \quad (18)$$

Die Bestimmung des Anfangswerts der Dopplerfrequenz geschieht über die Phase der über alle Kanäle gemittelten Autokorrelationen. Die Sprünge der Phase bei  $\pm\pi$  wer-

den heraus gerechnet, um einen konstanten Anstieg der Phase zu erreichen. Aus der Phasenänderung lässt sich dann die Dopplerfrequenz herleiten:

$$\begin{aligned}\varphi[k] &= 2\pi f_N k, \\ \varphi[0] - \varphi[N/2] &= 0 - 2\pi f_N \cdot \frac{N}{2}, \\ f_N &\approx \frac{\varphi[N/2]}{\pi N}.\end{aligned}\tag{19}$$

### 4.2.3 Der Fit

Gefittet wird nun die Autokorrelation des Signals. Dazu wird zunächst für jeden Kanal die Autokorrelation des Echos ab dem Maximalwert bestimmt. Diese werden dann über die Kanäle gemittelt und es wird vom nullten Bin der Autokorrelation, mit Hilfe der zuvor abgeschätzten Rauschleistung, der Peak des Rauschens abgezogen. Anschließend wird diese auf 1 normiert und kann nun mit Gl. 16 gefittet werden.

## 4.3 Bestimmung des Angle-of-Arrival (AoA)

Der AoA beschreibt den Winkel, unter dem der Radarempfänger das Echo beobachtet hat. Er ist wichtig, um später zusammen mit der Range die Position des Meteors abschätzen zu können. Der AoA kann mit Hilfe der Phasenunterschiede sowie der Abstände zwischen den einzelnen Empfangsantennen bestimmt werden.

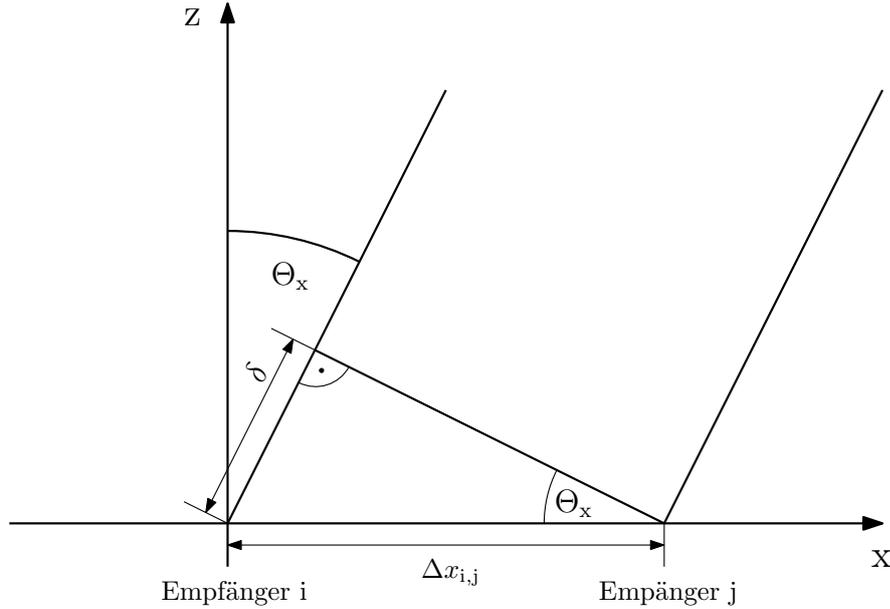
### 4.3.1 Die Modellfunktion

Analog zu Gl. 13 kann man die Kreuzkorrelation zwischen zwei Kanälen herleiten:

$$\Psi_{y_i, y_j}[k] = A_i A_j \cdot e^{-\alpha_N k} \cdot e^{j2\pi f_N k} \cdot e^{(\varphi_j - \varphi_i)} \cdot K[k].\tag{20}$$

Der Rauschterm fällt hierbei weg, da das Rauschen zwischen den Kanälen als unkorreliert angenommen wird. Mit Hilfe der Kreuz- sowie Autokorrelation lässt sich nun die Kohärenz  $\rho_{i,j}$  zwischen den Kanalpaaren berechnen:

$$\begin{aligned}\rho_{i,j} &= \frac{\Psi_{y_i, y_j}[0]}{\sqrt{(\Psi_{y_i, y_i}[0] - NP_N) \cdot (\Psi_{y_j, y_j}[0] - NP_N)}} \\ &= \frac{A_i A_i \cdot e^{-\alpha_N k} \cdot e^{j2\pi f_N k} \cdot e^{(\varphi_j - \varphi_i)} \cdot K[k]}{\sqrt{A_i^2 A_j^2 \cdot e^{-2\alpha_N k} \cdot e^{j4\pi f_N k} \cdot K[k]}} \\ &= e^{j(\varphi_j - \varphi_i)} \\ &= e^{-j\Delta\varphi_{i,j}}.\end{aligned}\tag{21}$$



**Abb. 19:** Geometrie der Angle-of-Arrival Bestimmung

In Abb. 19 ist die Geometrie der AoA Bestimmung für den eindimensionalen Fall dargestellt. Es gilt:

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{\lambda \cdot \Delta\varphi_{i,j}}{2\pi} \\ \sin(\Theta_x) &= \frac{\delta}{\Delta x_{i,j}} = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi_{i,j}}{\Delta x_{i,j}} \\ \sin(\Theta_y) &= \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi_{i,j}}{\Delta y_{i,j}}.\end{aligned}$$

Für den zweidimensionalen Fall gilt:

$$\rho_{i,j} = e^{-j\Delta\varphi_{i,j}} = e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(\sin\Theta_x \cdot \Delta x_{i,j} + \sin\Theta_y \cdot \Delta y_{i,j})}. \quad (22)$$

Diese Funktion wird als Modell für die Kohärenz zwischen zwei Empfangskanälen verwendet.

#### 4.3.2 Abschätzung eines Anfangswerts

Auch hier muss dem Fitting-Algorithmus ein Anfangswert übergeben werden. Dieser wird aus der Kombination der kurzen und langen Basislinien des Radars bestimmt (siehe dazu Abb. 9). Hierdurch wird virtuell ein Antennenabstand von  $\frac{\lambda}{2}$  erreicht (siehe

dazu auch [Jones et al. (1998)], was ein Abschätzen der Winkel ohne Mehrdeutigkeiten ermöglicht.

$$\begin{aligned}
\sin \Theta_x &= \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi_{i,j}}{\Delta x_{i,j}} \\
&= \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi_{\text{lang},x} - \Delta\varphi_{\text{kurz},x}}{0.5 \cdot \lambda} \\
&= \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\arg\{\rho_{\text{lang},x} \cdot \rho_{\text{kurz},x}^*\}}{0.5 \cdot \lambda} \\
&= \frac{1}{\pi} \cdot \arg\{\rho_{\text{lang},x} \cdot \rho_{\text{kurz},x}^*\}, \\
\text{analog: } \sin \Theta_y &= \frac{1}{\pi} \cdot \arg\{\rho_{\text{lang},y} \cdot \rho_{\text{kurz},y}^*\}.
\end{aligned} \tag{23}$$

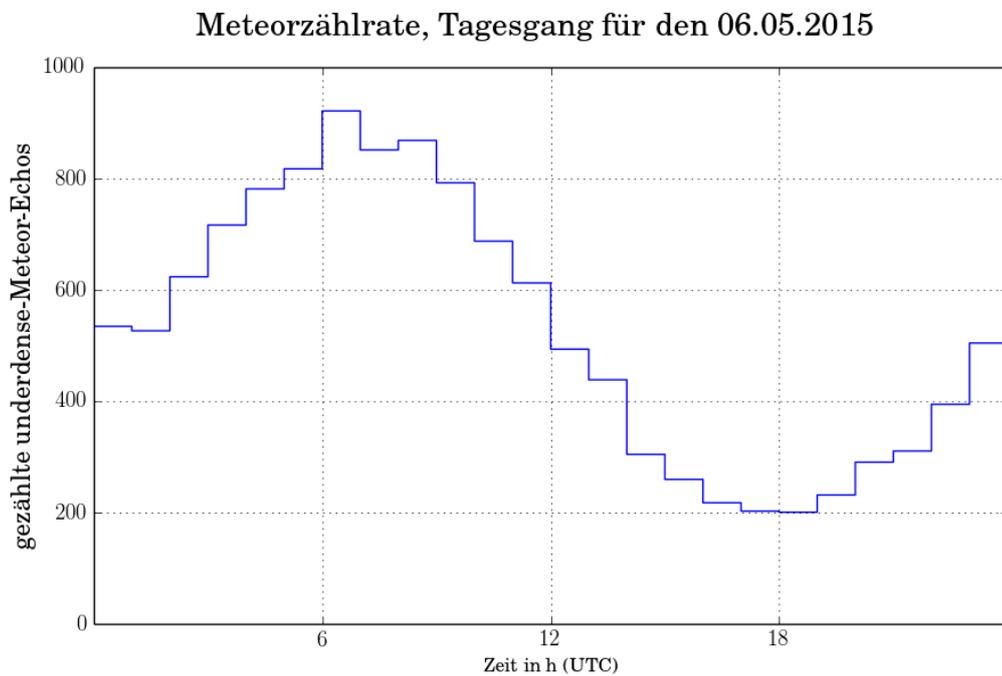
Hierbei entspricht  $\arg$  dem Argument (Winkel),  $\rho_{\text{lang}}$  bzw.  $\rho_{\text{kurz}}$  entspricht der Kohärenz des Empfangskanalpaares für den Antennenabstand von  $2.5\lambda$  bzw.  $2\lambda$  der entsprechenden Achse. Das Koordinatensystem in dem die Berechnung stattfindet ist so gedreht, dass die Achsen des Empfangssystems auf den Koordinatenachsen liegen. Durch die Verwendung der Kohärenz anstelle der Phasendifferenz vermeidet man Probleme durch die Unstetigkeit der Phase.

### 4.3.3 Der Fit

Für den Fit werden alle mit dem Empfangssystem möglichen Antennenpaare bestimmt, dies sind in diesem Fall 10 Paare. Für diese Paare werden mit Hilfe der Antennenpositionen die Antennenabstände sowie deren Kohärenzen bestimmt. Gefittet werden die Kohärenzen für alle Antennenpaare gleichzeitig mit der Modellfunktion aus Gl. 22.

## 5 Ergebnisse

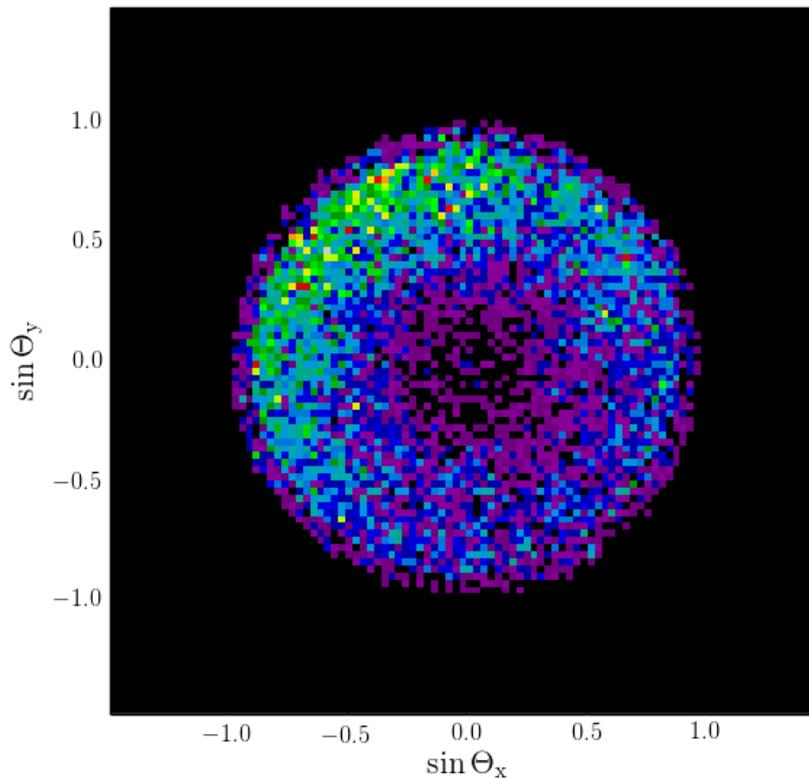
Die Ergebnisse des in dieser Arbeit erstellten Verfahrens zur Detektion und Identifikation von underdense-Meteor-Echos deckt sich zu großen Teilen mit dem kommerziell vom IAP eingesetzten System, weist jedoch etwas geringere Meteor-Zählraten als dieses auf. In Abb. 20 lässt sich der typische Meteor-Tagesgang deutlich erkennen. Hierbei ist die höchste Detektionszahl während der Morgendämmerung und die niedrigste Detektionszahl während der Abenddämmerung zu beobachten. Dies hängt mit der Bewegungsrichtung der Erde zusammen, welche bei Morgendämmerung in die Meteore hinein fliegt und diese dadurch beim Eintritt in die Erdatmosphäre tendenziell eine höhere Geschwindigkeit erreichen als während der Abenddämmerung.



**Abb. 20:** Tagesgang der Meteor-Zählrate (über Juliusruh)

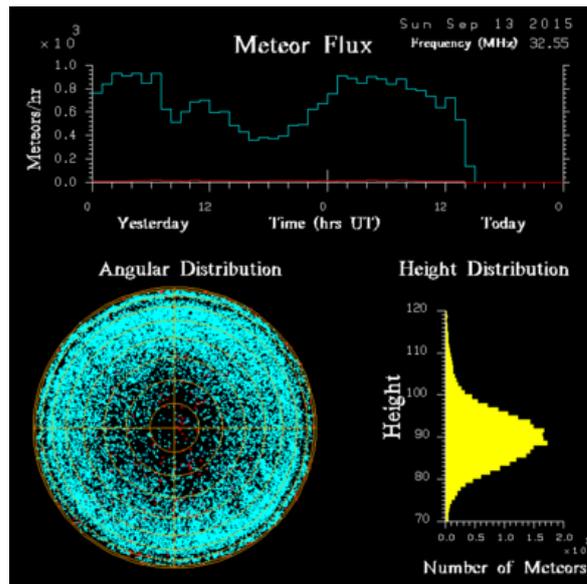
Die Winkelverteilung des geschätzten AoA der Meteor-Echos, welche in Abb. 21 dargestellt ist, entspricht wie erwartet etwa der des kommerziellen Systems. Die geringe Anzahl der detektierten Echos bei kleinen Winkeln wird dadurch verursacht, dass ein Meteor, welcher unter diesem Winkel beobachtet werden könnte nahezu waagrecht direkt über das Radarsystem fliegen müsste. Dies ist nur selten der Fall.

## Winkelverteilung



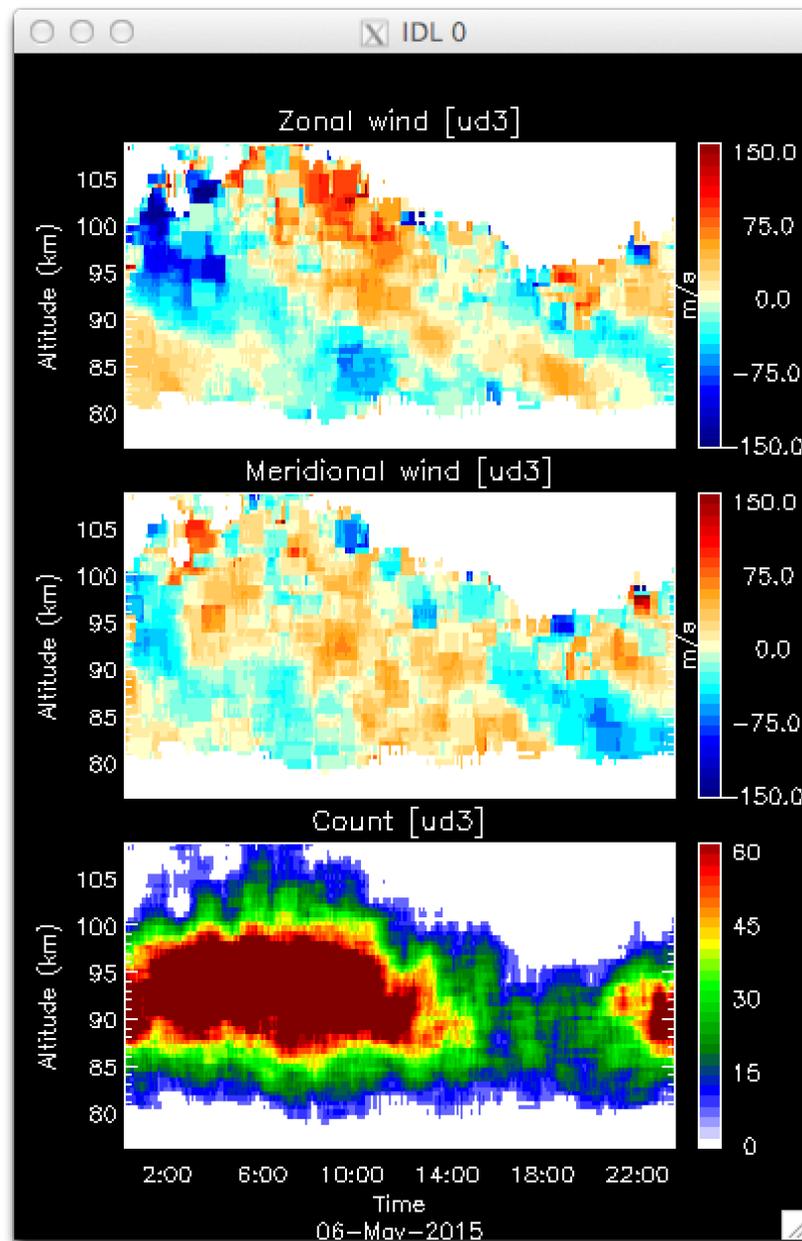
**Abb. 21:** Winkelverteilung der detektierten Meteore (über Juliusruh)

Zum Vergleich sind in Abb. 22 aktuelle Meteorzählraten sowie die Winkelverteilung des kommerziellen Systems dargestellt.



**Abb. 22:** Tagesgang der Meteor-Zählrate mit kommerziellem System (über Juliusruh)(Quelle: [IAP Website (2015)])

Die in dieser Arbeit bestimmten Parameter sollen hauptsächlich der Bestimmung des Windes in der oberen Atmosphäre in einer Höhe von etwa 70 km bis 120 km dienen. Eine Darstellung des Windes, welche mit den in dieser Arbeit bestimmten Parametern angefertigt wurde, wird in Abb. 23 gezeigt.



**Abb. 23:** Wind bestimmt aus Daten, welche mit dem in dieser Arbeit entwickelten Verfahren erstellt wurden (mit freundlicher Genehmigung von Prof. Chau)

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die in dieser Arbeit entwickelten Verfahren geben dem Anwender die Möglichkeit, underdense-Meteor-Echos aus den Rohdaten eines Meteor-Radars zu detektieren und dann zu extrahieren. Dadurch wird eine große Einsparung von Speicherplatz erreicht, da uninteressante Bereiche der Rohdaten wegfallen. Außerdem werden zur Bestimmung physikalischer Größen wichtige Parameter dieser Echos bestimmt. Mit diesen können dann z.B. Winde in der oberen Atmosphäre bestimmt werden, was nicht Teil dieser Arbeit war. Dies soll unter anderem der Beobachtung von Schwerewellen sowie der Erforschung der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Atmosphärenschichten dienen.

Das hier angewandte empirische Verfahren zur Detektion und Erkennung der underdense-Meteor-Echos könnte durch den Entwurf eines idealen Detektors sowie durch den Entwurf eines Klassifikators für underdense-Meteor-Echos optimiert werden. Außerdem könnte sich eine Detektion durch Ansätze des maschinellen Lernens anbieten. Diese Ansätze wurden aufgrund des begrenzten Zeitrahmens dieser Arbeit sowie der Komplexität der Themen in dieser Arbeit nicht weiter aufgegriffen und könnten Themen nachfolgender Arbeiten werden.

---

## Literatur- / Quellenverzeichnis

- [Ceplecha et al. (1998)] W.G. Elford, D.O. Revelle, R.L.Hawkes Z. Ceplecha, J. Borovicka, W.G. Elford, D.O. Revelle, R.L.Hawkes, V. Porubcan, M. Simek *Meteor Phenomena and Bodies* Space Science Reviews, 1998
- [Hocking et al. (2001)] W.K. Hocking, B. Fuller, B. Vandeppeer *Real-Time determination of meteor-related parameters utilizing modern digital technology* Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 63, 2001
- [Holdsworth et al. (2004) a] David A. Holdsworth, Ian M. Reid, Manuel A. Cervera *Buckland Park all-sky interferometric meteor radar* Radio Science, Volume 39, 2004
- [IAP Website (2015)] Leibnitz-Institut für Atmosphärenphysik in Kühlungsborn  
<https://www.iap-kborn.de/>
- [Jones et al. (1998)] J. Jones, A.R. Webster, W.K. Hocking *an improved interferometer desing for use with meteor radars* Radio Science, Volume 33, Number 1, 1998
- [Kang et al. (2007)] Chunmei Kang and Scott E. Palo *A time-frequency method for detecting VHF underdense meteor signals* Radio Science, Volume 42, 2007
- [Larsen and Röttger (1991)] *VHF Radar Measurements of In-Beam Incidence Angles and Associated Vertical-Beam Radial Velocity Corrections* Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1991
- [McKinley(1961)] D. W. R. McKinley *Meteor Science and Engineering* McGraw-Hill Book Company, Inc., 1961
- [Sugar(1964)] George R. Sugar *Radio Propagation by Reflection from Meteor Trails* Proc. IEEE, 52(2), 116-136
- [Stober(2009)] Gunter Stober *Dissertation: Astrophysikal Studies on Meteors using a SKiYMET All-Sky Meteor Radar* Universität Leibzig, 2009
- [Vierinen(2012)] Juha Vierinen *Dissertation: On statistical theory of radar measurements* Aalto University, 2012



# Selbständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

*Unterschrift :*

*Ort, Datum :*



