

# Master Thesis

Interferometrische Untersuchungen der Mesosphäre und dessen  
Variabilität mittels eines MF-Radarsystems

Eingereicht am: 2. Mai 2016

von: Patrick von der Thüsen  
geboren am 21. Januar 1989  
in Reinbek

## Aufgabenstellung

Im Rahmen dieser Master Thesis sollen interferometrische Untersuchungen der Mesosphäre und dessen Variabilität mittels eines medium frequency (MF)-Radio Detection and Ranging (Radar)systems angestellt werden. Das Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik betreibt seit 1996 MF Radarsysteme auf der Nordnorwegischen Insel Andoya (69°N, 16°E). Diese Radarsysteme eignen sich auf Grund der Betriebsfrequenz von 2 bis 3 MHz und daher regulär auftretenden partiellen Reflektion besonders für eine kontinuierliche Beobachtung der Mesosphäre im Höhenbereich von ca. 50 bis 100 km. Mit diesen Radarbeobachtungen ist es möglich, höhenaufgelöst den Horizontal- und Vertikalwind sowie die Elektronendichte zu bestimmen. Das MF-Radar Saura ist eines von zwei Atmosphärenforschungsradaren dieses Frequenzbereiches, die auf Grund des großen Antennenarrays (29+2 Antennen mit ca. 1x 1km Ausdehnung) und der Anzahl verfügbarer Sende-/Empfangsmodule den Radarstrahl auch aus der Hauptstrahlrichtung schwenken kann (Doppler-Beam-Swinging (DBS)). Somit ist es möglich sowohl eine gewisse räumliche Information über die beobachteten Strukturen und vor allem die horizontale Komponente des zu beobachtenden Windfeldes zu messen. Als eine weitere Methode ist es möglich, mittels Korrelationsanalyse den Horizontalwind der über das Radar driftenden Strukturen zu bestimmen. Aus vertikalen Messungen mit entgegengesetztem Polarisationsdrehsinn können die Elektronendichten aus der differentiellen Absorption und Phase bestimmt werden. Somit stellt das MF-Radar Saura ein sehr gutes Instrument zur Beobachtung, Untersuchung und Charakterisierung der Mesosphäre dar. Die jeweilige Höhenabdeckung ist dabei vom Zustand der Mesosphäre insbesondere der Dynamik, solarer Gezeit und der natürlichen geomagnetischen Variabilität gekennzeichnet. Letzteres ist dabei insbesondere durch die geomagnetische Position des Radars und damit dem Eindringen energetischer Partikel geprägt. Seit Dezember 2015 werden bei dem MF-Radar Saura Beobachtungen mit sechs Empfangskanälen durchgeführt, wobei die Rohdaten des kombinierten Radarstrahls, sowie von fünf Einzelantennen gespeichert werden. Diese fünf Einzelantennen ermöglichen dabei die interferometrische Untersuchung der beobachteten Strukturen.

## Aufgaben:

- Spektrale Analyse von MF-Radar-Rohdaten zur Unterscheidung in „normaler“ Rückstreuung und besonderer „Events“, z.B. ausgelöst durch Teilchenpräzipitation.
- Untersuchung zur Häufigkeit, Beobachtungshöhe dieser „Events“ und deren jahreszeitliche Variationen.
- Spektrale Bestimmung des Horizontalwindbetrages während dieser Events und Vergleich mit DBS-Messungen.
- Interferometrische Lokalisierung der beobachteten Reflektionszentren und Untersuchung ihrer Verteilung.
- Spektrale Analyse der Radarrohdaten zur möglichen Verbesserung der Elektronendichtebestimmungen.

## Zusammenfassung

Für die kontinuierliche Beobachtung der Atmosphäre in einer Höhe von etwa 70 bis 95 km werden Radaranlagen, die bei etwa 3 MHz betrieben werden, genutzt. Primär werden diese Antennensysteme zur Windbestimmung eingesetzt. Durch die Wellenlänge und den daraus resultierenden Abmessungen dieser Systeme ist es kaum möglich ideale Strahlungseigenschaften zu erreichen. Daher werden aufgrund der weiten Beobachtungswinkel und den Nebenzipfeln Signale aus unerwünschten Richtungen empfangen. Diese Masterthesis beschreibt interferometrische Methoden zur Analyse der Radarrohdaten zur Bestimmung der Einfallsrichtung empfangener Signale. Diese können anschließend genutzt werden, um die Ergebnisse etablierter Analyseverfahren z.B. zur Windbestimmung zu verbessern. Des Weiteren wurden statistische Analysen zu besonderen Zuständen der mittleren Atmosphäre durchgeführt, bei denen die Elektronendichte innerhalb kürzester Zeit aufgrund von Präzipitationsereignissen stark heraufgesetzt wurde. Während dieser Zeitpunkte ist die Windbestimmung nicht zuverlässig und daher soll die spektrale Analyse genutzt werden, um den Horizontalwind abzuschätzen. Das Ziel ist es, dadurch zur Qualitätsverbesserung der routinemäßig bestimmten Winde und dem geophysikalischen Prozessverständnis beizutragen.

## Abstract

Radars that operate at about 3 MHz are used for continuous monitoring of the atmosphere at a height of about 70 to 95 km. These systems are mainly used for determining the wind field. Because of the wavelength and the physical size of the antenna array it is hardly possible to accommodate a perfect radiation pattern. As a result of the wide beam width and the side lobes the radar receives signals from unwanted directions. This master's thesis describes interferometric methods analysing radar raw data to determine the angle of arrival of received signals. These results can be used for example to improve the determination of the wind field. Furthermore, statistical analysis were performed for special events in the middle atmosphere. During these events the electron density increases within a short time period due to precipitation. During these times the wind determination is likely affected and therefore the spectral analysis is used to estimate the horizontal wind. The target is to improve the quality of determined winds and the geophysical understanding of the process.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
1.1	Atmosphäre . . . . .	8
1.2	Institut für Atmosphärenphysik . . . . .	11
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen und Systembetrachtung</b>	<b>13</b>
2.1	Antennen . . . . .	13
2.1.1	Koordinatensystem . . . . .	13
2.1.2	Richtfaktor und Gewinn einer Antenne . . . . .	14
2.1.3	Haupt- und Nebenkeule . . . . .	15
2.1.4	Antennenwirkfläche . . . . .	16
2.2	Radar . . . . .	17
2.2.1	Signaltheorie . . . . .	18
2.2.2	Auswahl von Radar-Reflexions- und Streuungsarten . . . . .	19
2.2.3	Dopplerverschiebung . . . . .	21
2.2.4	Windbestimmung in der Atmosphäre mittels Radar . . . . .	22
2.3	Das Saura MF-Radar . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Statistische und spektrale Analyse von Präzipitationsereignissen</b>	<b>30</b>
3.1	Detektion der Eventzeiträume . . . . .	32
3.2	Ursachen . . . . .	34
3.3	Ergebnisse . . . . .	36
3.4	Spektralanalyse und Bestimmung des Horizontalwindbetrages . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Interferometrische Bestimmung der Einfallsrichtung - Angle of Arrival</b>	<b>43</b>
4.1	Numerischer Lösungsansatz . . . . .	44
4.2	Nichtlinearer Lösungsansatz . . . . .	49
4.3	Funktionsnachweis . . . . .	51
4.4	Vergleich der Varianten . . . . .	55
4.5	Ergebnisse . . . . .	59
4.6	Anwendung der AoA-Informationen . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Fazit</b>	<b>63</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>66</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>70</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>72</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>73</b>

<b>A Anhang</b>	<b>74</b>
A.1 Testdaten mit $(\phi = 285^\circ, \theta = 15^\circ)$ . . . . .	74
A.2 Testdaten mit $(\phi = 45^\circ, \theta = 25^\circ)$ . . . . .	76
A.3 Ablauf des Event-Detektion-Programms . . . . .	78
<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	<b>83</b>

## 1 Einleitung

Die Übertragung von Daten über Funk gewinnt in der heutigen Zeit immer mehr an Bedeutung. In der Industrie findet die Funk- und Kommunikationstechnik nun verstärkt Anwendung durch das Projekt „Industrie 4.0“, wodurch Prozessabläufe vor allem in der Produktion noch intelligenter miteinander kommunizieren sollen. Aber auch im privaten Bereich werden die Möglichkeiten genutzt, wie z.B. bei Mobiltelefonen oder WLAN, um das tägliche Leben der Menschen angenehmer zu gestalten, durch die permanente Möglichkeit, Informationen mit anderen Menschen austauschen zu können. Man kann Antennen und Funkübertragungssysteme allerdings nicht nur einsetzen, um Kontakt zu anderen aufzubauen, es wird auch für die Forschung eingesetzt. Gerade vor dem Hintergrund des Klimawandels ist es immer wichtiger die Erdatmosphäre zu untersuchen. Dieser Aufgabe stellt sich unter anderem das Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik (IAP). An diesem Institut wird Grundlagenforschung auf diesem Gebiet betrieben, da große Teile der Prozesse in der Erdatmosphäre zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vollständig verstanden wurden. Aber nicht nur die Physik hinter diesen Vorgängen ist von Interesse, ebenso muss man sich mit Störungen der Anlagen auseinandersetzen, die regelmäßig beobachtet werden können. Dabei beeinflusst Strahlung, die in die Atmosphäre der Erde eintritt, das Beobachtungsvolumen so stark, dass die gewonnenen Daten in diesen Zeiträumen unter Umständen nicht vollständig nutzbar sind. Daher ist eine Kernaufgabe dieser Thesis, diese nicht nutzbaren Zeiträume zu finden, um eine langzeitige statistische Aussage über ihr Auftreten treffen zu können. Von noch größerer Bedeutung ist es allerdings, herauszufinden, aus welcher Richtung das Signal empfangen wurde. Daher werden in dieser Arbeit zwei verschiedene Varianten untersucht, um den Einfallswinkel zu bestimmen und anschließend zu vergleichen. Das Ziel besteht darin, eine Aussage darüber treffen zu können, welche Methode verwendet werden sollte, um die zur Verfügung stehende Rechentechnik optimal zu nutzen.

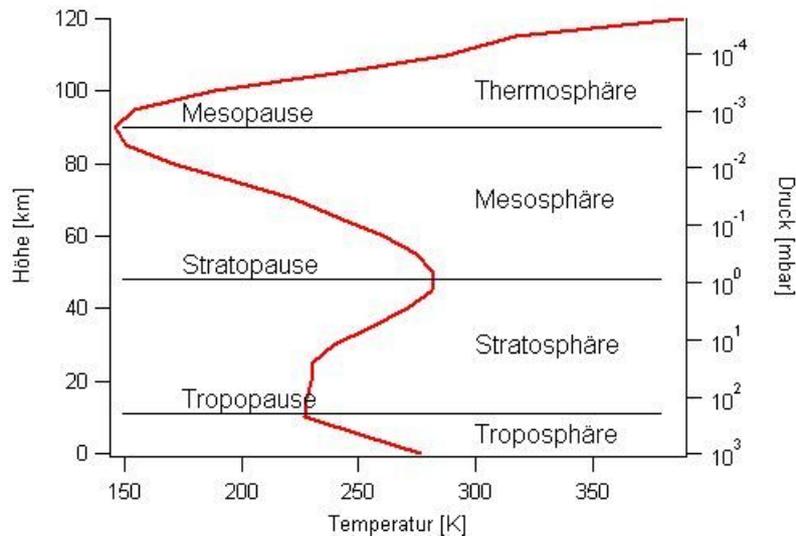
Die vorliegende Arbeit wurde folgendermaßen untergliedert:

Im ersten Kapitel wird zunächst die Atmosphäre beschrieben und das Institut vorgestellt, an dem die Beobachtungen durchgeführt werden. Das zweite Kapitel besteht

aus der Vorstellung der theoretischen Grundlagen sowie der Systemvorstellung. Zunächst werden einige mathematische Zusammenhänge der Antennentheorie aufgezeigt, um im darauffolgenden Abschnitt näher auf die Benutzung von Radaranlagen einzugehen. Zum Einen wird dargestellt, wie die Signale aussehen, die empfangen werden und zum Anderen wie diese für die Wissenschaft genutzt werden. Das in dieser Thesis verwendete Saura MF-Radar wird im letzten Abschnitt des zweiten Kapitels vorgestellt. Dabei wird auf die Systemeigenschaften eingegangen und die Experimentmöglichkeiten beschrieben. Das dritte Kapitel beschäftigt sich mit der Detektion der spektralen Events. Dabei wird zunächst gezeigt, was darunter zu verstehen ist und wie die Erfassung der Events umgesetzt wurde. Zudem wird die Auswertung der Verteilung über mehrere Jahre vorgestellt und die daraus resultierende Wahrscheinlichkeit des Auftretens näher betrachtet. Des Weiteren wird gezeigt, wie sich die Spektren während dieser Events von typischen Echos unterscheiden und vorgestellt, wie die Abschätzung des Horizontalwindbetrages dieser Events umgesetzt wird. Im vierten Kapitel werden zwei Möglichkeiten zur Bestimmung des Haupteinfallwinkels gezeigt und die Umsetzung dieser beschrieben. Im Ergebnis folgt eine Auswertung darüber, welche der vorgestellten Varianten zukünftig favorisiert werden soll. Abschließend erfolgt eine Betrachtung der gemittelten Ergebnisse über einen Zeitraum von mehreren Tagen und ein Ausblick auf ein mögliches Anwendungsgebiet der gewonnenen Richtungsinformation. Das fünfte Kapitel beinhaltet sowohl die Zusammenfassung und Analyse der Ergebnisse, als auch das daraus resultierende Fazit und ein Ausblick auf die zukünftigen Anwendungsmöglichkeiten.

## 1.1 Atmosphäre

Der unterste Teil der Atmosphäre wird Troposphäre genannt und ist aufgrund der darin befindlichen Wetterprozesse vom besonderen Interesse für den Menschen. Diese Schicht reicht vom Erdboden bis zur Stratosphäre, welche durch die Tropopause in einer Höhe von ca. 11 km abgetrennt wird. Die Höhe der Tropopause variiert nach Breitengrad und Jahreszeit, in den Tropen erreicht sie eine Höhe von bis zu 18 km, wohingegen sie an den Polen im Mittel nur eine Höhe von 8 km erreicht [Bil14]. Die gängige Einteilung der Erdatmosphärenschichten erfolgt nach dem vertikalen Temperaturverlauf, welcher in der Grafik 1.1 zu sehen ist. Die Temperatur in der Troposphäre wird maßgeblich durch die vom Erdboden abgegebene Wärme beeinflusst, wohingegen die darüberliegenden Schichten hauptsächlich durch Sonnenstrahlen erwärmt werden [Sch03]. Im Allgemeinen fällt die Temperatur in der Troposphäre mit

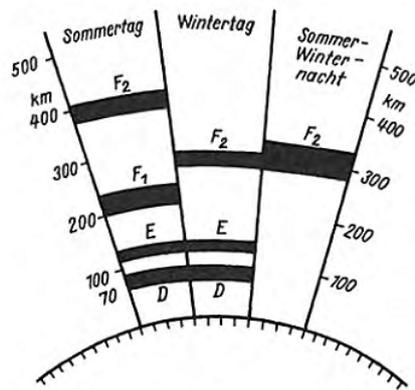


**Bild 1.1:** Aufbau der Erdschicht nach [Fle90]

steigender Höhe um 6 bis 8 K je km bis zur Tropopause [Rot95]. Die Troposphäre wird auch als Wettersphäre bezeichnet, da sich in ihr die wetterbestimmenden Vorgänge ereignen.

Die Erdatmosphäre besteht zudem aus der Stratosphäre, der Mesosphäre, der Thermosphäre und der Exosphäre. Innerhalb der Stratosphäre liegt die Ozonschicht in einer Höhe von 15 bis 35 km [Glo15]. Diese ist für den Menschen von großer Bedeutung, da dort langwellige UV-Strahlung absorbiert wird und ihm als Schutz vor Krankheiten wie beispielsweise Hautkrebs dient. Die Abnahme der Dicke dieser Schicht, gerade in den Polarregionen, wird als Ozonloch bezeichnet, welches hauptsächlich durch Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) verursacht wird [Fra15]. Dabei handelt es sich um eine Gruppe von Gasen, die als Treibgas oder Kältemittel verwendet werden. Die Stratosphäre erstreckt sich bis zu einer Höhe von ca. 50 km, hierbei wird der Übergang zur Mesosphäre als Stratopause bezeichnet. Kennzeichnend für diesen Übergang ist die Ausprägung eines lokalen Maximums im Temperaturverlauf [Wet16].

Die Mesosphäre reicht ungefähr bis zu einer Höhe von 85 km und gilt für das IAP als besonders bedeutend, da in den polaren Regionen in diesem Höhenbereich Noctilucent Clouds (NLC) und Polar Mesosphere Summer Echoes (PMSE) beobachtet werden können. Diese Erscheinungen sind seit mehreren Jahrzehnten bekannt und bilden einen Schwerpunkt der Grundlagenforschung am IAP. Ihre Entstehung wird auf die Ansammlung von Eiskristallen zurückgeführt, wobei zu beachten gilt,



**Bild 1.2:** Ionosphärenschichten nach [Rot95]

dass nicht alle mikrophysikalischen Eigenschaften vollständig verstanden sind und es weltweit widersprüchliche Theorien gibt [Bau16]. Oberhalb der Mesopause, welche die Mesosphäre abschließt, liegt die Thermosphäre und schließt das hier angeführte Modell als oberste Schicht ab. In einigen Temperaturverlaufmodellen wird zusätzlich als oberste Schicht die Exosphäre aufgeführt.

Eine weitere Möglichkeit, die Gliederung der Atmosphäre vorzunehmen, besteht darin, sie nach dem Zustand der darin befindlichen Teilchen zu unterteilen. Dabei wird unterschieden zwischen der Neutrosphäre, Ionosphäre, Plasmasphäre und der Magnetosphäre. Die Neutrosphäre zeichnet sich dabei durch die Anzahl an neutralen Teilchen aus und erstreckt sich vom Erdboden bis hin zu einer Höhe von ca. 80 km, ehe sie in die Ionosphäre übergeht. In dieser kommt es durch solare Strahlung zur Ionisation von Gasen und einer großen Anzahl an freien Elektronen, sie umfasst den Bereich bis 800 km. Die Anzahl an freien Elektronen wird maßgeblich durch die Intensität und Art der Strahlung der Sonne beeinflusst. Innerhalb der Ionosphäre befinden sich die D-, E- und F-Schichten, wie in der Abbildung 1.2 aus [Rot95] zu sehen ist. Die Angaben, in welcher Höhe welche Schicht beginnt, hängen vom Beobachtungsort und -zeitpunkt ab, woraus sich die abweichenden Angaben in der Literatur erklären.

Die D-Schicht befindet sich in einer Höhe zwischen 60 und 90 km und zeichnet sich dadurch aus, dass die Elektronendichte vergleichsweise gering ist und nur sehr lange Wellen reflektiert werden, was die besondere Bedeutung für den Funkverkehr erklärt. Die D-Schicht ist nur sichtbar, solange ausreichend solare Strahlung in diesem Bereich verfügbar ist, weshalb sie am Tag besser detektiert werden kann, da typischer Weise in der Nacht eine deutlich geringere Elektronendichte vorherrscht. Die sich darüber befindende E-Schicht liegt in einer Höhe von 100 bis 125 km und

bildet sich ebenfalls auf der Tagseite der Erde. In der Mittagszeit entsteht durch den Sonnenstand das Ionisationsmaximum, ehe es zum Abend hin abnimmt und in der Nacht vollständig verschwindet. Diese Schicht lässt sich mit Radaranlagen regelmäßig beobachten, wohingegen sporadische E-Schichten unregelmäßig auftreten. Dabei kommt es zu starken lokalen Ionisationen, die sich als vertikal dünne Schicht darstellen. Die darüber liegende F-Schicht befindet sich in einer Höhe von 200 bis 400 km und ist die am stärksten ionisierte Schicht [Rot95]. Im Gegensatz zu den zuvor vorgestellten Schichten ist diese auch in den Nachtstunden sichtbar, da die Rekombinationen in diesem Höhenbereich deutlich langsamer vonstattengehen. Die in der Abbildung 1.2 dargestellten Entfernungen dienen nur der Orientierung, da sich der Ionisationsgrad in Abhängigkeit von Tages- und Jahreszeit, Sonnenaktivität und geografischer Position ständig ändert. Die Plasmasphäre kennzeichnet den Bereich über 1000 km, in welchem alle darin liegenden Teilchen vollständig ionisiert sind. Abgeschlossen wird das Modell, abhängig vom Zustand der darin befindlichen Teilchen, durch die Magnetosphäre, in der das Erdmagnetfeld dominiert.

## 1.2 Institut für Atmosphärenphysik



**Bild 1.3:** Hauptgebäude des Instituts [IAP16a]

Das Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik (IAP) ist Teil der Leibniz-Gemeinschaft und ein An-Institut der Universität Rostock. Das Institut wurde 1992 gegründet und hat seinen Hauptsitz, welcher auf dem Foto 1.3, entnommen aus dem Internetauftritt ([IAP16a]) des IAPs, gezeigt wird, im Ostseebad Kühlungsborn. Neben dem Hauptsitz existiert eine Außenstelle in Juliusruh an der Nordküste der Insel Rügen.

Weiterhin engagiert sich das IAP am Arctic Lidar Observatory for Middle Atmosphere Research (ALOMAR) im Norden Norwegens. Der Hauptforschungsschwerpunkt liegt in der Beobachtung und Erforschung der mittleren Atmosphäre, der Meso- und Stratosphäre, sowie der Troposphäre [IAP16b]. Die verschiedenen Methoden zur Untersuchung werden durch die drei Abteilungen repräsentiert. Die Abteilung Optische Sondierung und Höhenforschungsraketen nutzt Light detection and ranging (LIDAR)-Messungen, ballongetragene Experimente und in situ Messungen mittels Höhenforschungsraketen. Die Radarabteilung hingegen führt kontinuierliche Beobachtungen mit Radarsystemen durch. Dafür benutzt sie eine Vielzahl an unterschiedlichen Radaranlagen, mit denen unterschiedliche Höhenabdeckungen und zeitliche Abdeckungen realisiert werden. Zum Beispiel das in dieser Arbeit betrachtete Saura MF-Radar gehört zu der Reihe der genutzten Messinstrumente. Ergänzt wird die Grundlagenforschung durch die Abteilung der Theorie und Modellierung, welche versucht, die Variabilität der Atmosphäre durch Simulationen und Modelle besser nachzuvollziehen.

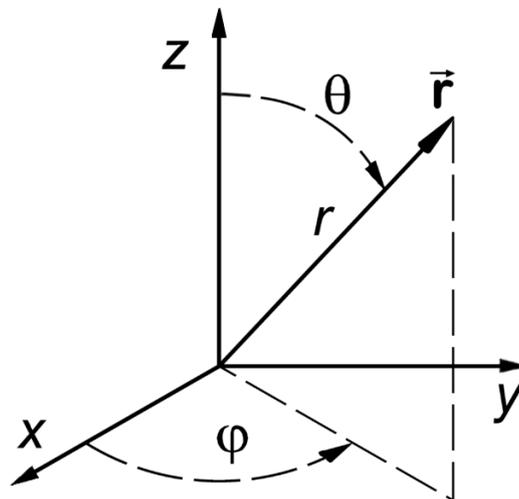
Außerdem wird eine enge Zusammenarbeit mit der Universität Rostock gepflegt, die sich auch dadurch auszeichnet, dass der Direktor des IAP sowie die jeweiligen Abteilungsleiter in der Funktion als Professoren ihr Wissen weitervermitteln. Ebenfalls werden regelmäßig Fachvorträge und Vorlesungen von Wissenschaftlern des IAP gehalten.

## 2 Theoretische Grundlagen und Systembetrachtung

### 2.1 Antennen

Eine Antenne ist in der Informationstechnik definiert als eine „... Sende- oder Empfangseinrichtungen für elektromagnetische Wellen. Als Sendeantenne wandeln sie den elektrischen Strom in elektromagnetische Welle, dabei wird die HF-Leistung des HF-Senders in eine Freiraumwelle umgesetzt, als Empfangsantenne wandeln sie die Freiraumwelle in eine Leitungswelle um, die dem HF-Empfangsteil zugeführt wird“ [ITW]. Durch die Form der Antenne wird bestimmt, auf welcher Frequenz sie arbeitet und wie die Wellen abgegeben bzw. aufgenommen werden. Eine umfangreiche Übersicht über die Arten von Antennen ist im Kapitel N in [MG92] enthalten.

#### 2.1.1 Koordinatensystem



**Bild 2.1:** Sphärisches Koordinatensystem aus [Wor12]

In der Antennentechnik wird häufig das sphärische Koordinatensystem anstelle des kartesischen Koordinatensystems genutzt, da es die Definition erleichtert, in welche

Richtung die Leistung abgestrahlt wird oder aus welcher Richtung das Signal empfangen wurde. Dabei handelt es sich, wie in dem Bild 2.1 ersichtlich wird, ebenfalls um ein dreidimensionales Koordinatensystem und die Position eines Raumpunktes liegt auf der gedachten Oberfläche einer Kugel. Die Berechnung dieses Punktes erfolgt aus der Entfernung  $r$ , dem Azimutwinkel  $\phi$  und dem Zenitwinkel  $\theta$ . Da die in dieser Thesis verwendeten Antennen erdbodennah angebracht sind, ist lediglich die Betrachtung der oberen Halbkugel als Ergebnisraum erforderlich. Daraus ergibt sich für den Zenitwinkel  $\theta$  ein maximaler Wertebereich von 0 bis  $\pi$  und für den Azimutwinkel  $\phi$  von 0 bis  $2\pi$ , wohingegen der Abstand  $r$  ein unendlich großen positiven Wert annehmen kann.

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (2.1)$$

$$\phi = \arctan \frac{y}{x} \quad (2.2)$$

$$\theta = \arctan \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} \quad (2.3)$$

Wie aus der Formel 2.1 hervorgeht, errechnet sich der Abstand aus der Wurzel der quadrierten Entfernung in x, y und z Richtung. Die Formeln 2.2 und 2.3 zeigen die Überführung der kartesischen Richtungsinformationen zu den Winkeln  $\phi$  und  $\theta$ . Die entgegengesetzte Richtung der Umwandlung erfolgt über die in 2.4 bis 2.6 dargestellten Formeln.

$$x = r \sin \theta \cos \phi \quad (2.4)$$

$$y = r \sin \theta \sin \phi \quad (2.5)$$

$$z = r \cos \theta \quad (2.6)$$

### 2.1.2 Richtfaktor und Gewinn einer Antenne

Im Fernfeld nimmt die Strahlungsdichte proportional zum quadrierten Abstand zur Antenne ab. Je nach Antennendesign wird die Strahlungsdichte  $S$  in eine Raumrichtung konzentriert. Sofern nicht eine andere Referenzantenne verwendet wird, bezieht

sich die Strahlungsdichte  $S$  auf den isotropen Strahler und wird aufgrund dessen mit dem Index  $i$  versehen (Formel 2.7) und  $P$  stellt die gesamte Strahlungsleistung dar.

$$S_i = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (2.7)$$

Um die Verteilung der Strahlung zu betrachten, wird die Richtcharakteristik herangezogen, diese bildet sich aus dem Verhältnis zwischen der Strahlungsdichte in eine Raumrichtung  $S_r(\Phi, \Theta)$  und der maximal abzugebenden Strahlung  $S_{r,max}$ . Weitere Kenngrößen, um die Bündelung der elektromagnetischen Wellen zu untersuchen, sind der Richtfaktor und der Antennengewinn. Ersterer ist in der Formel 2.8 zu sehen und beinhaltet die Strahlungsdichte in eine gezielte Raumrichtung  $S_r(\Phi, \Theta)$  im Verhältnis zur Referenzstrahlungsdichte  $S_i$ , die aufgrund der angenommenen isotropen Strahlung winkelunabhängig ist. Demnach gibt der Richtfaktor  $D$  an, wie viel Strahlungsdichte in dieser Richtung gewonnen bzw. verloren wird.

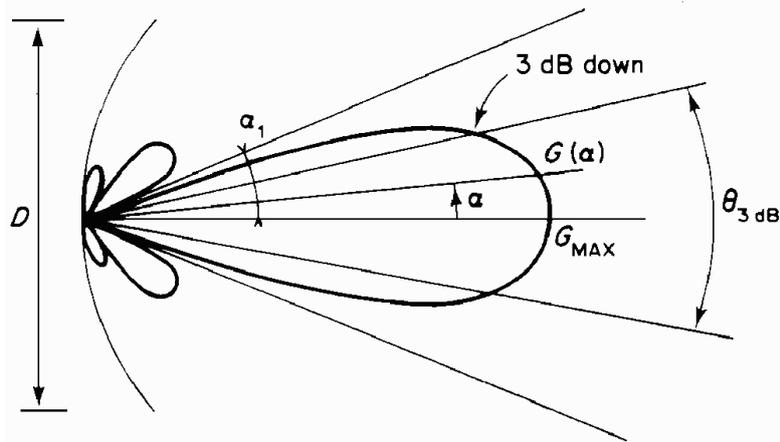
$$D = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot S_r(\phi, \theta)}{P} \quad (2.8)$$

Die Betrachtung des Gewinns (Formel 2.9) ist eine Erweiterung des Richtfaktors um die Berücksichtigung der Eingangsleistung, welche sich aus der Reduktion der Gesamtleistung um die Verlustleistung bildet, der Antenne. Bei einer verlustlosen Antenne mit einem Wirkungsgrad von 100 % entspricht der Gewinn dem Richtfaktor  $D = G$ .

$$G = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot S_r(\phi, \theta)}{P_{ein}} \quad (2.9)$$

### 2.1.3 Haupt- und Nebenkeule

Wird die Strahlung in eine gezielte Richtung konzentriert, kommt der Begriff Strahlungskeule zum Einsatz. Dabei wird unterschieden zwischen der Haupt- und der Nebenkeule. Erstere wird auch als Mainlobe bezeichnet, „sie ist definiert als jener Teil der Richtcharakteristik, der durch Winkel mit minimaler Feldstärke begrenzt wird“ (Seite N9 3-1 in [MG92]). Die Strahlbreite wird unterschiedlich definiert, dabei wird ein Grenzwert von beispielsweise 3 dB (siehe Skizze 2.2) angenommen und



**Bild 2.2:** Skizze Haupt- und Nebenkeule aus [Com06]

die winkelmäßige Ausdehnung der Hauptkeule untersucht. Es wird überprüft, bei welchem Winkel die maximale Strahlungsdichte oder der maximale Gewinn  $G_{MAX}$  um den Definitionswert verringert wurde. Dabei ist der Wert von 3 dB ein gängiger Wert in der Informationstechnik, da dies der Halbwertsbreite entspricht. Das bedeutet, dass die Strahlungsdichte auf die Hälfte des maximalen Wertes abgesunken ist. Wie stark die Hauptkeule gedämpft wird, bevor sich eine Nebenkeule (auch Sidelobe) ausprägt, wird als Nebenzipfeldämpfung oder Nebenkeulendämpfung bezeichnet. In der Grafik 2.2 ist die Position dieser Dämpfung durch den Winkel  $\alpha_1$  gekennzeichnet. Die Nebenzipfeldämpfung wird relativ zur Hauptkeule in dB angegeben.

#### 2.1.4 Antennenwirkfläche

Um zu überprüfen, wie viel Leistung aus einer einfallenden Welle gewonnen werden kann, muss die Antennenwirkfläche betrachtet werden. Im Empfangsfall ist die maximal entnehmbare Leistung  $P$  proportional zur Strahlungsdichte  $S$  (Formel 2.10). Da dieser Proportionalitätsfaktor die Dimension einer Fläche hat, wird sie Antennenwirkfläche genannt.

$$A = \frac{P}{S} \quad (2.10)$$

Dabei wird unterschieden zwischen der theoretischen Wirkfläche (Formel 2.11) und der effektiven Wirkfläche (Formel 2.12). Da die theoretische Fläche nicht die Gewinne der Antennen bzw. die Verlustleistung, berücksichtigt, wird in der Praxis häufig nur die effektive Wirkfläche zur Betrachtung herangezogen.

$$A_0 = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot D \quad (2.11)$$

Je nach Antennendesign kann die Wirkfläche von der geometrischen Fläche der Antennen abweichen. Zudem ist sie frequenzabhängig, denn „mit steigender Frequenz sinkt die Wirkfläche und damit die abgegebene Empfangsleistung“ (Seite 84 in [Rot95]).

$$A_W = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G \quad (2.12)$$

## 2.2 Radar

Das Wort Radar ist ein Akronym aus der englischen Bedeutung „Radio Detection and Ranging“, welches heutzutage auch im deutschen geläufig ist, wo es früher noch „Funkortung und -Abstandsmessung“ sowie „Funkmeßtechnik“ genannt wurde. Darunter versteht man allerdings sowohl das Verfahren zur Ortung von Objekten im Raum mithilfe gebündelter elektromagnetischer Wellen als auch das Gerät, das diese Welle aussendet und wieder empfängt. Es gilt zu unterscheiden zwischen dem Primärsignal, welches von dem Radar ausgestrahlt wird und dem anschließend empfangenen Sekundärsignal, welches auch Echo genannt wird. Realisiert werden Radaranlagen über Antennen, die den Übergang von leitungsgebundenen elektromagnetischen Wellen zu sich im freien Raum ausbreitenden Funkwellen ermöglichen. Die folgenden Formeln sind aus der Literatur entnommen [Pro05], [MG92], [Rot95], [Kar11].

### 2.2.1 Signaltheorie

Die Formel 2.13 zeigt, wie die Laufzeit  $t$  des Signals genutzt wird, um die Entfernung  $R$  des Rückstreuers zu berechnen. Dabei ist  $c$  die Lichtgeschwindigkeit, zudem muss beachtet werden, dass die Laufzeit der doppelten Entfernung entspricht, da die Welle den Weg zum Ziel hin und zurück passieren muss. [Ric05]

$$R = \frac{c \cdot t}{2} \quad (2.13)$$

Unter der Annahme, dass die geometrische Ausdehnung des reflektierenden Objektes deutlich kleiner ist als das Impulsvolumen, kann die Radargleichung für Punktziele verwendet werden. Diese wird in der Formel 2.14 gezeigt [Cre04].

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2 \sigma}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot R_t \cdot R_r} \quad (2.14)$$

$$P_r = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \sigma}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot R^4} \quad (2.15)$$

Nach dem Abstandsgesetz nimmt die Empfangsleistung  $P_r$  in der Entfernung  $R$  quadratisch ab, wobei der Weg vom Sender zum Objekt  $R_t$  und zurück zum Empfänger  $R_r$  berücksichtigt werden muss. Bei einem Radar, welches mit derselben Antenne sendet und empfängt, vereinfacht sich die Formel, indem der gleiche Abstand und Gewinn verwendet wird (Formel 2.15). Außerdem wird die Sendeleistung  $P_t$  und die effektive Reflexionsfläche  $\sigma$  für die Berechnung benötigt. Des Weiteren gilt diese Rechnung nur im Fernfeld, wenn also die Entfernung zum Ziel deutlich größer ist als die Wellenlänge  $\lambda$  der Trägerfrequenz und die elektromagnetische Welle als ebene Welle im Raum betrachtet werden kann.

$$s(t) = A \cdot e^{j(2 \cdot \pi \cdot f_D \cdot t + \varphi_0)} \quad (2.16)$$

$$= i + j \cdot q \quad (2.17)$$

Wenn sich der Streuer nicht in Ruhe zum Sender befindet, kommt es zur Dopplerverschiebung  $f_D$ , welche dazu führt, dass das empfangene Signal  $s(t)$  auf einer um die Dopplerverschiebung abweichenden Frequenz empfangen wird (Formel 2.16). Dabei steht  $A$  für die Amplitude des Signals und  $\varphi_0$  für die Phasenlage zum Ausgangssignal. Das resultierende Signal liegt in komplexer Form vor (Formel 2.17), wobei der Realteil die Inphasenkomponente  $i$  und der Imaginärteil die Quadraturkomponente  $q$  darstellt.

$$P = 20 \cdot \log_{10} \sqrt{i^2 + q^2} \quad (2.18)$$

Die Leistung  $P$  des Signals wird aus dem Betrag des Real- und Imaginärteils gebildet und in  $dB$  angegeben (Formel 2.18).

$$P_m = \frac{P \cdot \tau}{T} \quad (2.19)$$

Bei einem Pulsradar wird die mittlere Pulsleistung  $P_m$  über die Pulsleistung  $P$ , die Pulsdauer  $\tau$  und den Pulsabstand  $T$  berechnet (Formel 2.19). Das Verhältnis von Pulsdauer zu Pulsabstand wird als Tastverhältnis oder im englischen als „duty cycle“ bezeichnet. Im Gegensatz zum Continuous Wave/ Dauerstrich (CW)-Radar wird nicht dauerhaft gesendet und empfangen, sondern diese Vorgänge sind zeitlich voneinander getrennt.

### 2.2.2 Auswahl von Radar-Reflexions- und Streuungsarten

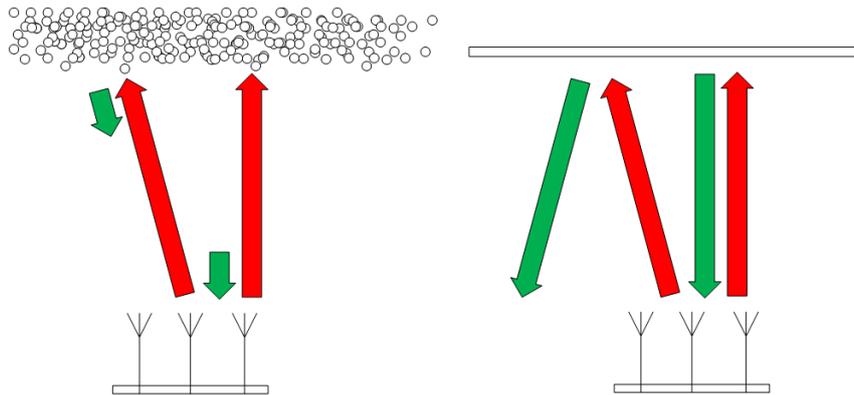
Damit Reflexionen in der Atmosphäre beobachtet werden können, bedarf es Brechungsindexinhomogenitäten. In der Formel 2.20 ist die Berechnung für den Brechungsindex  $n$  zu sehen und diese wurde in [Gag90] beschrieben. Der zweite und dritte Term auf der rechten Seite werden durch den Wasserdampfgehalt  $e$  in  $mBar$ , den Atmosphärendruck  $p$  in  $mBar$  und die absolute Temperatur  $T$  in  $K$  dominiert. Daher sind diese maßgeblich für den Brechungsindex in der Tropo- und Stratosphäre verantwortlich. Der rechtsseitig befindliche letzte Term beinhaltet die Elektronendichte  $N_e$  in  $m^{-3}$  und die kritische Plasmadichte  $N_c$  in  $m^{-3}$ . In der darauf folgenden

Formel ist die Abhängigkeit der kritischen Plasmadichte von der Frequenz beschrieben. Daraus geht hervor, dass die Frequenz und die Elektronendichte entscheidend dafür sind, ob die Möglichkeit einer Totalreflexion besteht.  $\epsilon_0$  ist die Dielektrizitätskonstante des freien Raumes,  $m_e$  und  $e$  sind die Masse sowie die Ladung eines Elektrons,  $f$  gibt die Radarfrequenz an [Sat89].

$$n = 1 + \frac{3.73 \cdot 10^{-1} e}{T^2} + \frac{77.6 \cdot 10^{-6} p}{T} - \frac{N_e}{2N_c} \quad (2.20)$$

$$N_c = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot \epsilon_0 \cdot m_e}{e^2 \cdot f^2} \quad (2.21)$$

$$N_c = 1.24 \cdot 10^{-2} f^2 \quad (2.22)$$



**Bild 2.3:** Prinzipskizze: links isotrope Rückstreuung; rechts Totalreflexion

Durchdringt die vom Radar ausgesandte elektromagnetische Welle in der Atmosphäre ein Objekt und es kommt dabei zu einer Änderung des Brechungsindex, führt dies zu partiellen Reflexionen. Das bedeutet, ein Teil der Welle wird transmittiert und ein Teil wird reflektiert. Es wird also ein Anteil hindurch gelassen und ein Anteil an einer Grenzfläche zurückgeworfen, wobei unterschiedliche Arten der Rückstreuung auftreten können, von der vollständig isotropen Rückstrahlung bis zur Totalreflexion. Bei einer isotropen Rückstrahlung kommt nur ein sehr geringer Teil der ausgesandten Leistung zu dem Empfänger zurück (siehe Grafik 2.3 links), da an dem Streuobjekt die Leistung in alle Richtungen gleichmäßig aufgeteilt wird [Hoc90]. Dies führt bei der Betrachtung mit unterschiedlichen Schwenkwinkeln dazu, dass die Strukturen sichtbar bleiben, da immer ein Teil zurück zum Sender reflektiert wird. In der Grafik 2.3 wird die ausgesandte Leistung in rot und die reflektierte

Leistung in grün dargestellt. Bei der Totalreflexion hingegen wirkt die angestrahlte Struktur wie ein Spiegel und reflektiert das Signal verlustlos, sodass die Leistung vollständig zurückgesendet wird (siehe Grafik 2.3 rechts). Bei Radaranlagen wird dies besonders deutlich, da sich darüber befindliche Objekte nicht mehr detektiert werden können. Der Fall der Totalreflexion ist eine Idealisierung, da dies bedeuten würde, dass keine Verluste beim Übergang der Medien entstehen würden.

### 2.2.3 Dopplerverschiebung

Die Dopplerverschiebung beschreibt den Effekt, wenn sich die Frequenz des ausgesandten Signals aufgrund der Bewegung des angestrahlten Objektes verändert. Ein häufig gewähltes Beispiel, um diesen Effekt anhand von alltäglichen Beobachtungen zu erläutern, ist das Martinshorn im Straßenverkehr. Bewegt sich zum Beispiel ein Krankenwagen mit einer konstanten Geschwindigkeit auf den Beobachter zu, kommt es zu einer Stauchung der Wellen vor dem Fahrzeug. Die Ursache hierfür liegt darin, dass sich der Abstand zwischen den Wellenbergen durch die Bewegung verringert, demnach sinkt die Wellenlänge bzw. es erhöht sich die Frequenz des vom Beobachter empfangenen Signals. Entfernt sich das Fahrzeug, kommt es zu einer Dehnung der Wellen, da sich der Abstand der Wellenberge zueinander vergrößert, woraus sich ein höherer Wert der Wellenlänge ergibt. Folglich verringert sich die Frequenz, die der Beobachter wahrnimmt.

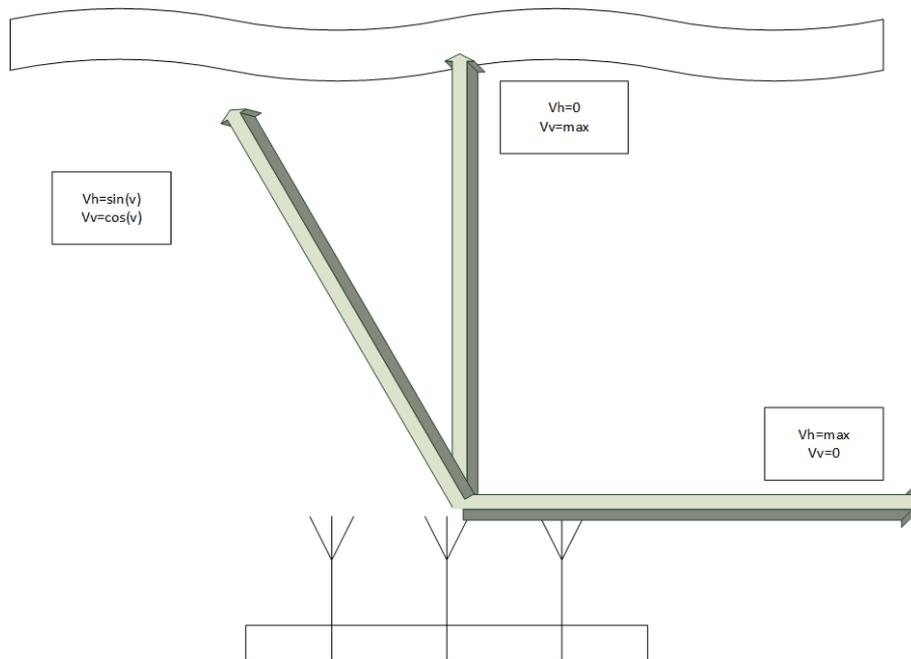
$$f_D = \frac{2 \cdot v_D}{\lambda} \quad (2.23)$$

$$f_D = f_0 + \delta f \quad (2.24)$$

Bei Radarexperimenten in der Atmosphärenphysik ist die Dopplerverschiebung von besonderer Bedeutung, da sie direkt verknüpft ist mit der Geschwindigkeit des beobachteten Objekts. Das ist in diesem Fall der Wind. Die Formel 2.23 zeigt die Abhängigkeit der Dopplerfrequenz von der ausgesendeten Frequenz und der Dopplergeschwindigkeit  $v_D$ , welche die line of sight (LOS)-Komponente des Geschwindigkeitsvektors  $v$  beinhaltet.

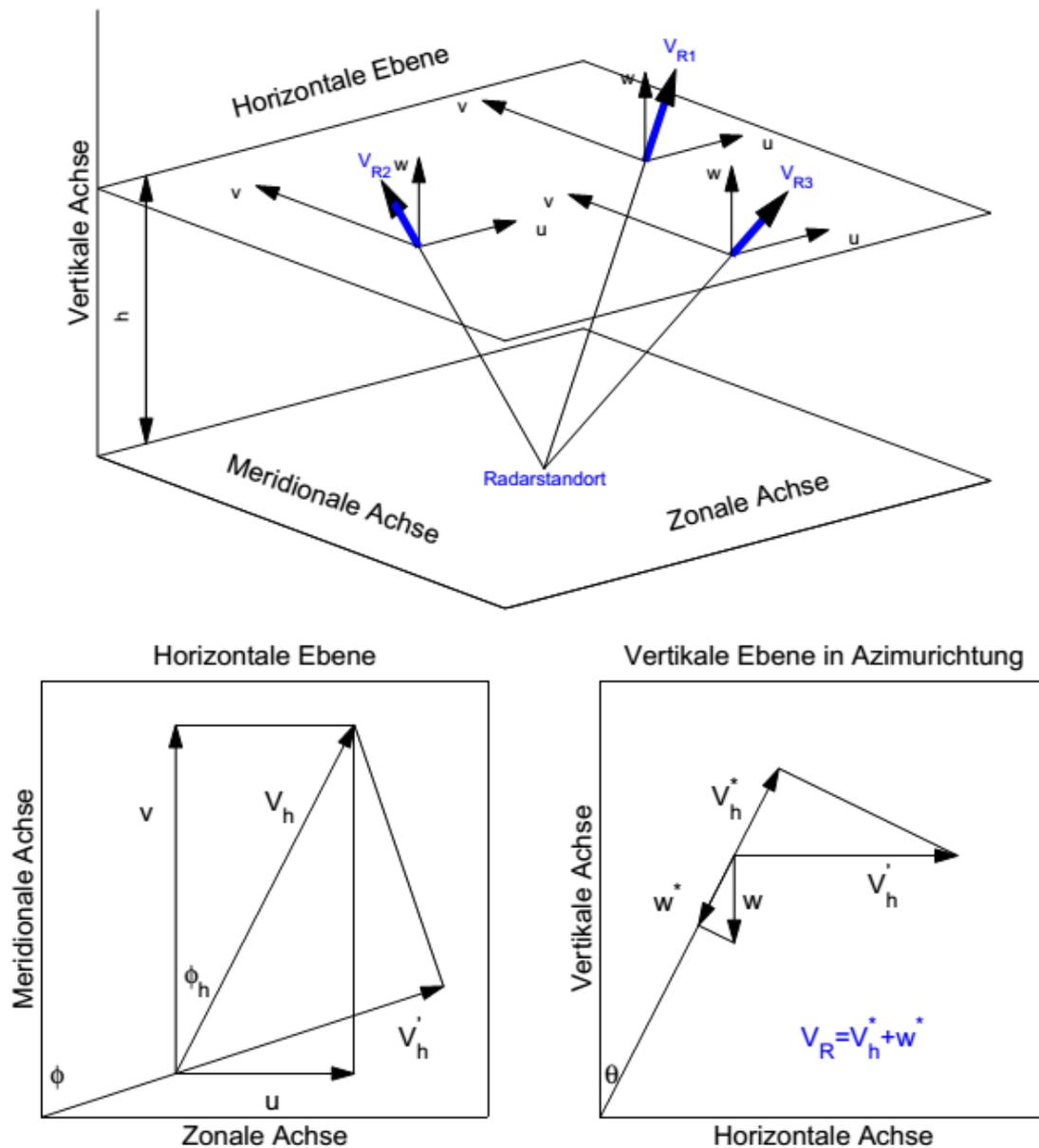
### 2.2.4 Windbestimmung in der Atmosphäre mittels Radar

Bei der Berechnung des Windes über Radaranlagen haben sich zwei Methoden etabliert, zum Einen das Spaced Antenna (SA)-Verfahren und zum Anderen das Doppler-Beam-Swinging (DBS)-Verfahren. Für die SA-Methode werden mindestens drei räumlich voneinander getrennte Empfangsantennen benötigt, die über einen eigenen Empfangskanal verfügen und die das wiederkehrende Signal des vertikalen Beams zeitgleich auswerten. Beim DBS-Verfahren hingegen werden für die möglichst eindeutige Bestimmung des Windfeldes mindestens drei gut separierte Beamrichtungen benötigt und es beruht auf der Auswertung der Dopplerverschiebung des Echos. Der Wind wird als Vektor dargestellt, der sich aus einer horizontalen und einer vertikalen Komponente zusammensetzt. Zudem ist es üblich, die horizontale Komponente nach Zonal- und Meridionalwind zu unterteilen, wobei zonal die West-/Ost- und meridional Nord-/Süd- Richtung beschreibt. In der Grafik 2.5 aus [Zec99] sind die drei Betrachtungsebenen dargestellt. Dabei wird unterschieden zwischen der horizontalen und vertikalen Ebene sowie der dreidimensionalen Darstellung.



**Bild 2.4:** Prinzipskizze über den sichtbaren Teil des Windes in Abhängigkeit der Beamrichtung

Da sich mehrere Streuer innerhalb des Messvolumens befinden können und sich jeder mit einer unterschiedlichen Geschwindigkeit bewegen kann, wird die mittlere Dopplergeschwindigkeit bestimmt. Die mittlere Dopplerfrequenz  $f_D$  kann bei Kennt-



**Bild 2.5:** 3D-Darstellung zur Bestimmung des dreidimensionalen Windfeldes über die DBS-Methode aus [Zec99]

nis der Radarwellenlänge  $\lambda$  genutzt werden, um die radiale Geschwindigkeit  $V_R$  (siehe Formel 2.25) zu bestimmen. Allerdings sind die Anteile der radialen Geschwindigkeit schwenkwinkelabhängig, wie aus der Skizze 2.4 zu entnehmen ist.

$$V_R = \frac{\lambda f_D}{2} \quad (2.25)$$

In der oberen Grafik (Abbildung 2.5) ist zu sehen, wie der Wind mittels der DBS-Methode betrachtet wird. Die blau eingezeichneten Pfeile repräsentieren die radiale Geschwindigkeit,  $u$  ist die zonale,  $v$  die meridionale und  $w$  die vertikale Windkomponente.  $V'_h$  ist die Projektion der horizontalen Geschwindigkeit auf die Ebene entlang der Beamrichtung des Azimutwinkels, wohingegen  $V_h^*$  und  $w^*$  die Bewegung entlang des Zenitwinkels beschreiben.

$$V'_h = V_h \cos(\phi - \phi_h) \quad (2.26)$$

Bei einem geschwenkten Beam muss der Azimutwinkel der Strahlrichtung  $\phi$  berücksichtigt werden, denn die Projektion der horizontalen Geschwindigkeit  $V'_h$  (Formel 2.26) wird über die horizontale Windgeschwindigkeit  $V_h$ , die Windrichtung  $\phi_h$  und den Schwenkwinkel  $\phi$  bestimmt [Zec99]. Die horizontale-  $V_h^*$  und vertikale-  $w^*$  Komponente (Formel 2.29 & 2.30) der Projektion auf die Ebene entlang des Zenitwinkels  $\theta$  bilden zusammen die radiale Geschwindigkeit  $V_R$  (siehe Abbildung 2.5 unten rechts).

$$u = V_h \sin(\theta) \quad (2.27)$$

$$v = V_h \cos(\theta) \quad (2.28)$$

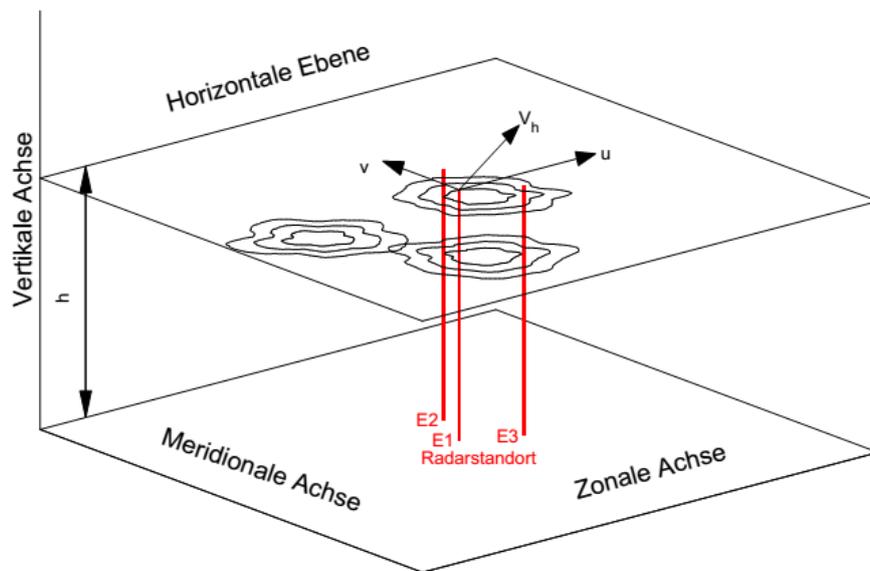
$$w^* = w \cos(\theta) \quad (2.29)$$

$$V_h^* = V'_h \sin(\theta) \quad (2.30)$$

Unter Berücksichtigung der Formeln 2.27 und 2.28 kann die radiale Geschwindigkeit mit der Formel 2.31 bzw. 2.32 berechnet werden.

$$V_R = V_h \cos(\phi - \phi_h) \sin \theta + w \cos \theta \quad (2.31)$$

$$= u \sin \phi \sin \theta + v \cos \phi \sin \theta + w \cos \theta \quad (2.32)$$



**Bild 2.6:** Bestimmung des Windes in der Höhe  $h$  über die Antennen E1, E2 und E3 mit dem Spaced Antenna Verfahren aus [Zec99]

Mit phasengesteuerten Antennenfeldern sind DBS-Messungen leicht zu realisieren, der größte Nachteil dieser Methode liegt allerdings darin, dass die Annahme besteht, dass ein konstantes Windfeld im gesamten Beobachtungsbereich existieren würde. Die Messungen erfolgen zeitlich versetzt und auch der Schwenkwinkel muss berücksichtigt werden, denn bei den betrachteten Entfernungen wirken sich kleine Änderungen des Schwenkwinkels stark auf die geografische Position des Messvolumens aus. Daher etablierte sich das SA-Verfahren, das in der Abbildung 2.6 zu sehen ist. Vergleichbar zur DBS-Methode kann über die Formel 2.25 zunächst die radiale Geschwindigkeit bestimmt werden. Da die Rückstreuzentren häufig nicht im Zenit liegen, obwohl dorthin die meiste Leistung abgestrahlt wird, muss die Angle of Arrival (AoA)-Funktion angewendet werden, um über die Formel 2.32 die gesuchten Windkomponenten zu berechnen. Die Möglichkeiten der AoA-Bestimmungen werden im fünften Kapitel ausführlich beschrieben.

### 2.3 Das Saura MF-Radar

MF- und HF-Radarare gehören zu den ältesten Techniken bei der Untersuchung des Höhenbereiches von 50 bis 110 km und werden auch heutzutage noch regelmäßig verwendet. Sie wurden stetig verbessert und bieten stabile und verlässliche Methoden, um Elektrondichten, Winde und Turbulenz zu messen [Rei15]. Bei der Untersuchung

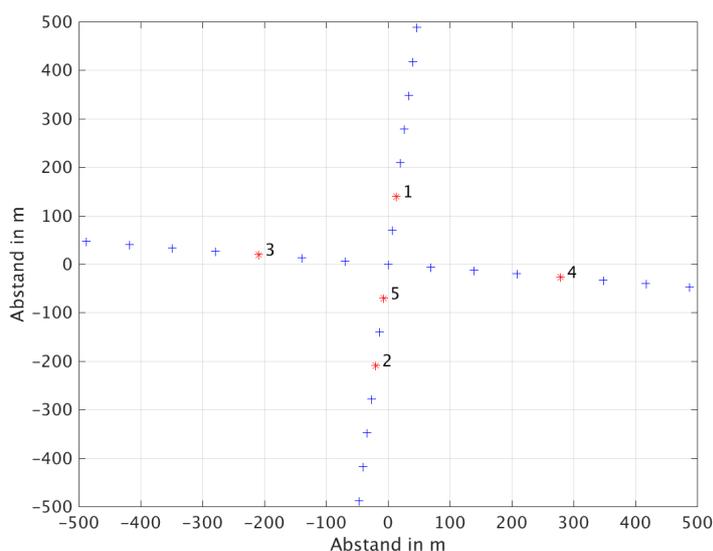


**Bild 2.7:** Foto Saura MF-Radar [IAP16c]

der Meso- und unteren Thermosphäre, also zwischen dem Temperaturmaximum in der Stratopause (ca. 50 km) und dem Temperaturminimum in der Mesopause (ca. 85 km), wird zwischen Fernerkundung (Lidar und Radar) und direkter Messung (Höhenforschungsraketen) unterschieden. Der Vorteil von Radaranlagen liegt darin, dass kontinuierlich gemessen werden kann, wohingegen Raketen immer in ihrer Messdauer begrenzt sind. Raketenmessungen umfassen typischerweise ein Zeitraumbereich von wenigen Minuten und besitzen einen durch die Flugbahn vorgegebene örtliche Begrenzung der Messung.

Das im Folgenden betrachtete Saura MF-Radar wird gelegentlich als partielles Reflexionsradar bezeichnet, da es die ionisierten Komponenten der Atmosphäre zur Detektion nutzt. Partielle Reflexion oder auch Fresnel Reflexion genannt, entsteht durch Irregularitäten im Brechungsindex. Die gängigste Methode, um diese Irregularitäten zu untersuchen, ist die Spaced Antenna (SA)-Methode, hierfür werden mindestens drei Antennen benötigt, die nicht kollinear angeordnet sind.

Das Saura MF-Radar (siehe Foto 2.7) wurde im Juli 2002 im Norden Norwegens errichtet und wird auf einer Frequenz von 3,17 MHz als Pulsradar betrieben. Ein großer Vorteil des Saura MF-Radars liegt im Gegensatz zu vergleichbaren Systemen darin, dass die Möglichkeit besteht, auch DBS-Messungen zu realisieren. Diese werden erzeugt, indem neben dem vertikalen Beam auch die Himmelsrichtungen Nordwest, Nordost, Südwest und Südost bei einem Zenitwinkel von  $6,8^\circ$  abgetastet werden.

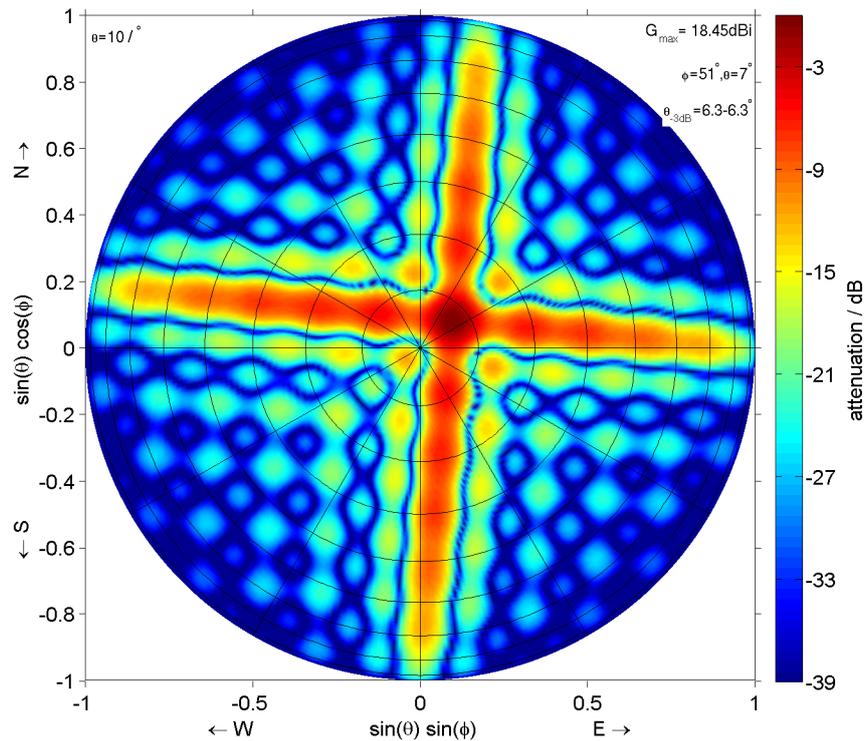


**Bild 2.8:** Antennenanordnung des Saura MF-Radars

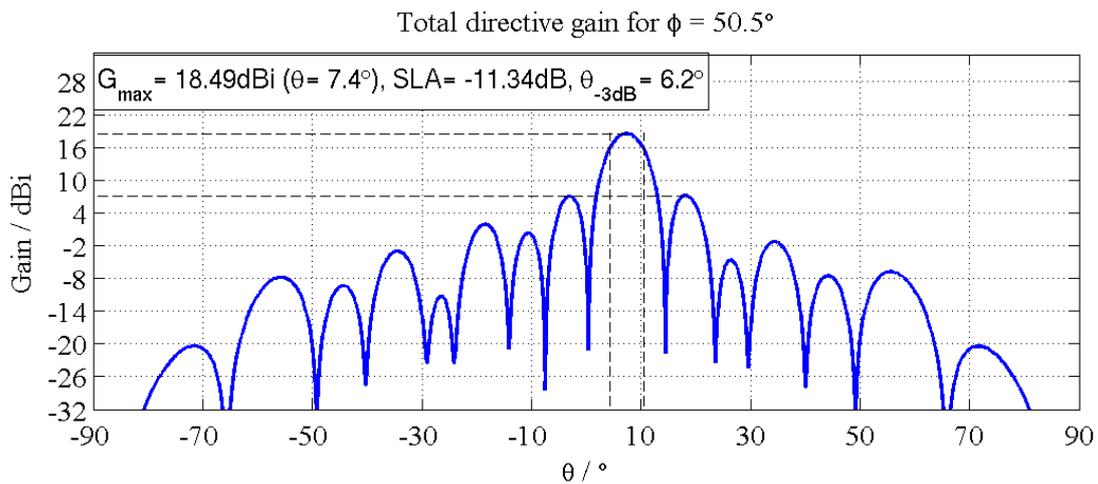
Das Saura MF-Radar besteht aus 29 gekreuzten Halbwellendipolen, die in einer Mills Cross Anordnung 11 m über dem Boden angebracht sind. Die Antennen haben einen Abstand von  $0,74 \lambda$ , woraus sich eine Gesamtausdehnung des Antennenfeldes von über  $1 \times 1$  km ergibt. Aus dieser Form der Anordnung, welche in der Grafik 2.8 dargestellt wird, ergibt sich eine minimale Strahlbreite von  $6,6^\circ$ . Das Strahlungsdiagramm des Saura MF-Radars ist in den Grafiken 2.9 und 2.10 zu sehen. Diese Simulationen wurden von einem geschwenktem Beam mit der Richtung  $\phi = 50,5^\circ$  und  $\theta = 6,8^\circ$  erstellt und entsprechen damit einer der zuvor beschriebenen DBS-Beamrichtungen.

Wobei zu beachten gilt, dass in der Grafik 2.9 die das Verhältnis zum Strahlungsmaximum zu sehen ist, wohingegen die darauffolgende Grafik den Gewinn darstellt. Die Hauptkeule weist einen Gewinn von 18,49 dBi auf und die Nebenkeulen werden mit  $-11,34$  dB unterdrückt. Dieser Wert ist der Grafik 2.10 unter der Angabe SLA zu entnehmen, was für die englische Bezeichnung „sidelobe attenuation“ steht.

Weiterhin wird das Saura MF-Radar für SA-Messungen genutzt, dabei sendet das gesamte Feld und der Empfang erfolgt durch fünf räumlich voneinander getrennten Einzelantennen, die in der Grafik 2.8 mit den Ziffern 1 bis 5 nummeriert sind. Jeder Dipol des Arrays wird mit einer eigenen Sendeeinheit betrieben, welche eine Maximalleistung von 2 kW zur Verfügung stellt und dabei die Phase regelt. Das gesamte Feld kann mit einer Spitzenleistung von 116 kW betrieben wer-



**Bild 2.9:** Strahlungsdiagramm des Saura MF-Radars in Draufsicht, dargestellt in Kugelkoordinaten



**Bild 2.10:** Schnitt durch das Strahlungsdiagramm aus der Abbildung 2.9 bei einem Azimutwinkel von  $50,5^\circ$

den. Ein wichtiger Aspekt des Saura MF-Radars besteht darin, dass die Polarisation der ausgesendeten Welle umgeschaltet werden kann, wie beim Differential Absorp-

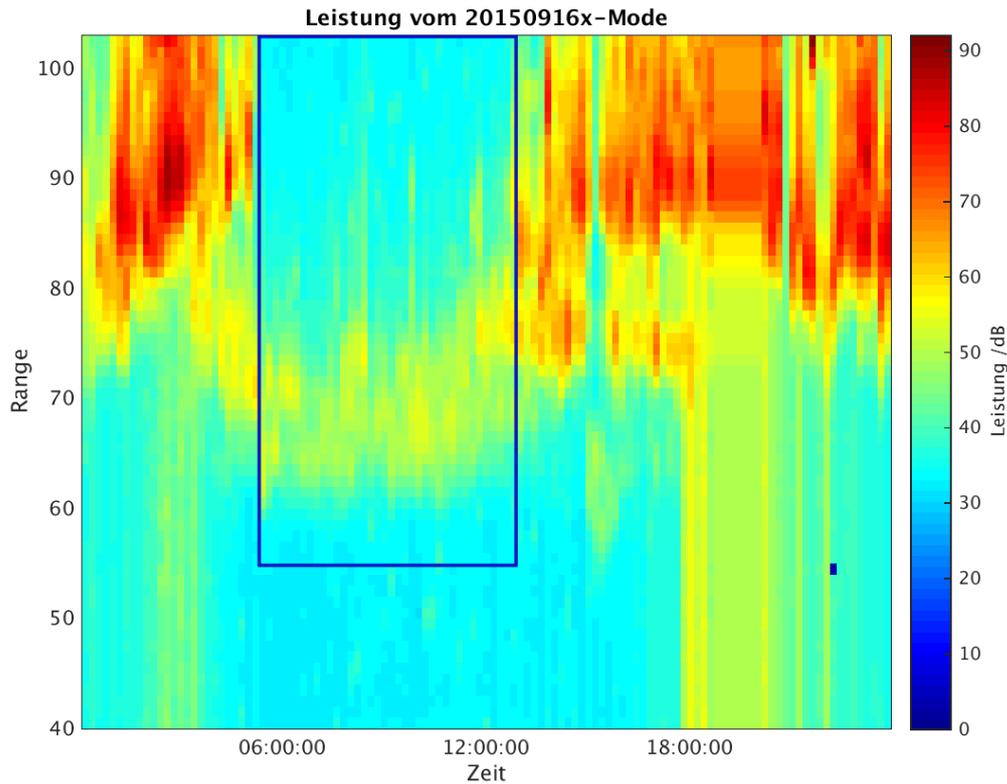
tion Experiment (DAE) und Differential Phase Experiment (DPE). Der Vergleich der Radardaten mit den verschiedenen Polarisierungen wird genutzt, um Elektronendichten zu bestimmen. Dabei wird die rechtszirkulare Polarisation als gewöhnlich, im englischen ordinary, und die linkszirkulare Polarisation als ungewöhnlich oder extraordinary bezeichnet, woraus sich die Bezeichner für die Betriebsmodi: o- & x- (bzw. e) Modus herleiten lassen. Einige Standardsystemparameter des Saura MF-Radars werden nachfolgend in der Tabelle 2.3 zusammengefasst. Dabei gilt zu beachten, dass diese Angaben für die DBS Messungen gelten und je nach Experiment abweichen können.

Saura MF-Radar Systemeigenschaften	
Position	69,3 °N, 16,0 °O
Frequenz	3,17 MHz
Spitzenleistung	116 kW
Höhenauflösung	1000 m
Pulsbreite	13,3 μs
Pulswiederholfrequenz	120 Hz
Länge der Zeitreihe	180 s

**Tabelle 2.1:** Saura MF-Radar Systemeigenschaften und Experimentparameter beim DBS Experiment

### 3 Statistische und spektrale Analyse von Präzipitationsereignissen

Mit dem Saura MF-Radar wird regelmäßig beobachtet, dass die Elektronendichte innerhalb kürzester Zeit aufgrund von Präzipitationsereignissen stark ansteigt. Bei der Untersuchung der Spektren während dieser Zeit, zeigt sich ein wiederkehrendes Muster, daher werden diese Ereignisse im Folgenden als spektrale Events bezeichnet. Für die Analyse der Daten nach spektralen Events werden die DBS-Datensätze verwendet. Diese sind bereits zu Tagesarchiven zusammengefasst aus 24 mal mindestens fünf Experimentdurchläufen. Je nach Experimentanordnung kann die Anzahl der zugrundeliegenden Daten variieren. Die Rohdaten, aus denen die spektrale Analyse erfolgen soll, sind im Gegensatz dazu in Stundenarchiven vorhanden und beinhalten ebenfalls mindestens fünf Aufnahmen mit einer Länge von drei Minuten und sind um ein vielfaches größer als die zuvor vorgestellten DBS-Daten. Daher sollen die DBS-Daten genutzt werden, um die Eventzeitpunkte effizienter zu detektieren und die Laufzeit des Programmes zu minimieren. In diesem Fall ist unter Event eine Störung des Normalzustandes zu verstehen. Als Identifikationsmerkmal wird die Verteilung der Leistung zugrunde gelegt. An einem ruhigen Tag ist zu sehen, wie innerhalb des Beobachtungsbereiches von 60 km bis 120 km sich das Maximum der gemessenen Leistung in dem Höhenbereich von 80 bis 100 km wiederfindet. Während der Eventzeiträume verteilt sich die Leistung in deutlich niedrigere Entfernungen und der Bereich über dem Maximum ist häufig deutlich leistungsschwächer (40 bis 50 dB). In dem Bild 3.1 ist so ein Eventzeitpunkt und die typische Verteilung der gemessenen Leistung zu sehen. Zudem zeigt die spektrale Analyse der Rohdaten in diesen Zeitpunkten eine typische Parabelform, welche im Folgenden genutzt werden soll, um daraus den Betrag des Horizontalwindes und die Breite des Spektrums zu bestimmen. Ziel der Untersuchungen ist eine statistische Aussage darüber treffen zu können, wann diese Events in welcher Höhe wie oft auftreten. Das Programm zum Erstellen dieser Statistik ist in mehrere Komponenten unterteilt. Das erste Skript durchsucht die DBS-Dateien, führt die Eventdetektionsroutine aus und speichert die Ergebnisse in mat-Dateien ab. Ein weiteres Skript ist dafür verantwortlich zu erkennen, ob die Datensätze für jedes Jahr vollständig sind und diese Lücken zu füllen,

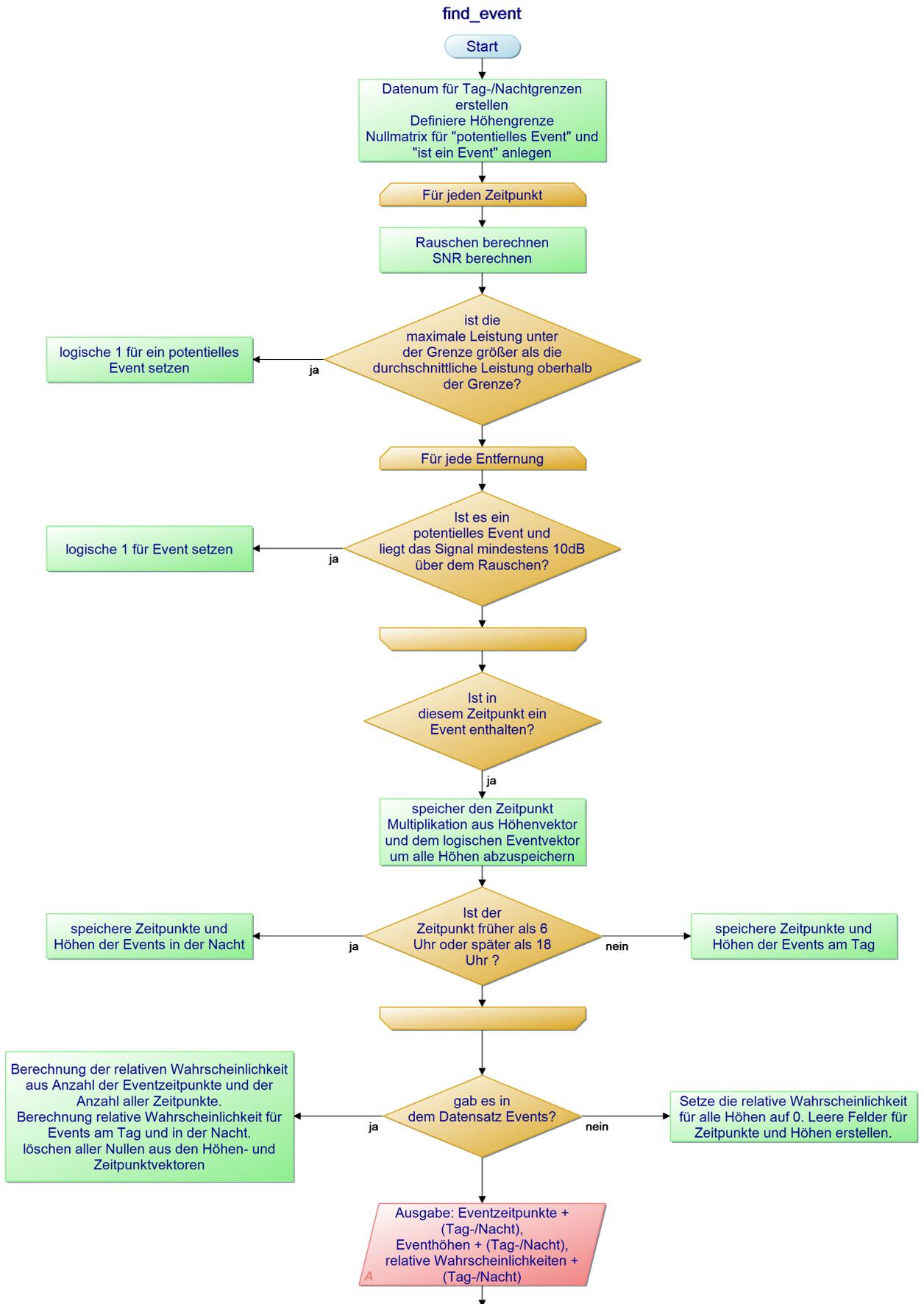


**Bild 3.1:** Eventzeitpunkt in den DBS Daten

indem die DAE Daten verwendet werden. Diese enthalten zwar nur die Daten der vertikalen Experimente, liegen aber in vergleichbaren Form vor, wobei unter Umständen eine veränderte Höhen- und Zeitaufösung beachtet werden muss, wodurch es notwendig wird, die Daten an den entsprechenden Stellen zu interpolieren. Das dritte Skript ist dafür verantwortlich die Datensätze zusammenzuführen und aus täglichen mat-Dateien jährliche zu erstellen, die anschließend für die Aufarbeitung der Statistik verwendet werden sollen. Im Anhang A.3 befinden sich Programmablaufpläne des gesamten Programmes, die eine bessere Übersicht über den Ablauf bieten sollen.

### 3.1 Detektion der Eventzeiträume

Innerhalb der Funktion zum Finden der Events wird der Beobachtungsraum in zwei Bereiche aufgeteilt, die durch die Entfernung von 80 km getrennt sind. Als erstes Kriterium zum Überprüfen, ob es ein Eventzeitpunkt sein kann, wird die maximale Leistung unterhalb dieser Grenze erfasst und mit der durchschnittlichen Leistung oberhalb von 80 km verglichen. Nach dieser Vorselektion wird untersucht, ob das Signal mindestens 10 dB über dem Rauschen liegt. Die Ergebnisse dieser Funktion sind Vektoren mit den Informationen über alle gefundenen Höhen, Zeitpunkte und die relative Wahrscheinlichkeiten je Entfernung. Um die relative Wahrscheinlichkeit zu berechnen, werden die Zeitpunkte je Entfernung ins Verhältnis zur Anzahl der Zeitschritte gesetzt. Zudem wird die Wahrscheinlichkeit der Ereignisse am Tag und in der Nacht jeweils einzeln betrachtet, wobei die Uhrzeiten 6 und 18 Uhr als Grenzen verwendet werden. Die Grafik 3.2 zeigt schematisch den Ablauf der Funktion mit dem Namen „find event“, welche für das Finden der Events erstellt wurde.

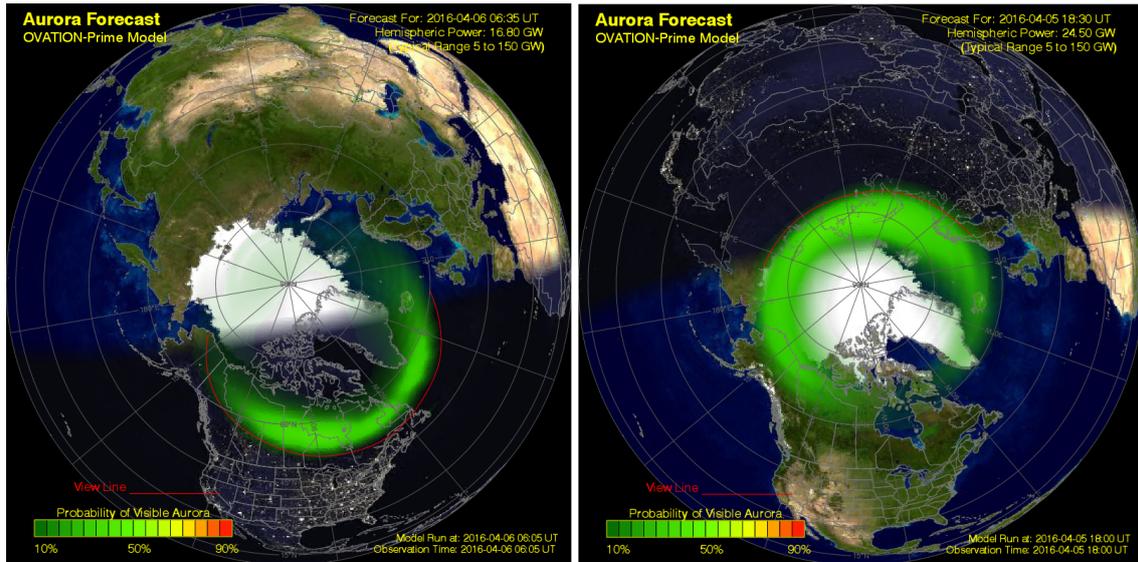


**Bild 3.2:** Programmablauf der Eventdetektion

### 3.2 Ursachen

Um nachzuvollziehen, wie es zu diesen Events kommt, muss die Wechselwirkung zwischen der Sonne bzw. dem Sonnenwind und dem Magnetfeld der Erde betrachtet werden. Die Sonne sendet ununterbrochen neben der Strahlung im optischen Bereich auch mit wechselnder Intensität Röntgenstrahlung und einen Strom aus Elektronen und Protonen in Richtung der Erde und diese geladenen Teilchen treffen auf die Magnetfeldlinien in der Magnetosphäre. Da die Magnetfeldlinien nordwärts gerichtet sind und die Teilchen damit senkrecht auf diese auftreffen, wirkt die Lorenzkraft, die bewirkt, dass die Teilchen nun entlang der Feldlinien abgelenkt werden. Die Wechselwirkung aus Magnetfeld der Erde und dem Magnetfeld des Sonnenwindes kann unter bestimmten Bedingungen dazu führen, dass elektrisch geladene Teilchen sich parallel zum Magnetfeld bewegen und in die Magnetosphäre eintreten. Diese Teilchen sind verantwortlich für den als Polarlicht bekannten Effekt [Sal09]. Daher kann vermutet werden, dass Zeiten besonders starker Sonnenaktivität dazu führen, dass diese Events häufiger auftreten. Die Variation der Sonnenaktivität wird Sonnenzyklus oder Schwabezyklus genannt, benannt nach dem deutschen Botaniker und Astronom Samuel Heinrich Schwabe. Im Jahr 1843 entdeckte er, dass die Sonnenflecken einer Periodizität von ca. 10 Jahren unterliegen indem er fast zwei Jahrzehnte lang die Sonnenflecken nach Minima und Maxima untersuchte [Bee]. Daraufhin stellte der Schweizer Astronom und Direktor der Eidgenössischen Sternwarte Johann Rudolf Wolf umfangreichere Untersuchungen an, indem er den Zeitraum von 17. bis zum 19. Jahrhundert betrachtete. Seine Erkenntnisse sind die Grundlage für die mittlere Sonnenzyklusdauer von 11,04 Jahren, die fortlaufende Nummerierung der Zyklen und die nach ihm benannte Relativzahl zur Häufigkeit von Sonnenflecken. Die Dauer eines Zyklus kann zwischen 9 und 14 Jahren schwanken, wobei das Minimum der Sonnenfleckenzahl den Startpunkt des Zyklus darstellt. Im Januar 2008 begann der 24. Zyklus und sein Maximum wurde im Februar 2014 gemessen. Die NASA stellt auf ihrer Internetseite eine Tabelle bereit, in der alle beobachteten Sonnenfleckenzahlen eingetragen sind [NAS15].

Um die Veränderung der Feldlinien des Magnetfeldes am magnetischem Nordpol zu veranschaulichen, können die Vorhersagen der Space Weather Prediction Center (SWPC) herangezogen werden. Dieses Labor gehört zur National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) und ist das offizielle Zentrum für Weltraumwettervorhersagen der Vereinigten Staaten von Amerika. Auf der Internetseite der SWPC ist ein Modell zu finden, welches eine Vorhersage über das Auftreten von Aurora borealis in der nördlichen Hemisphäre trifft. Dabei gilt zu beachten, dass

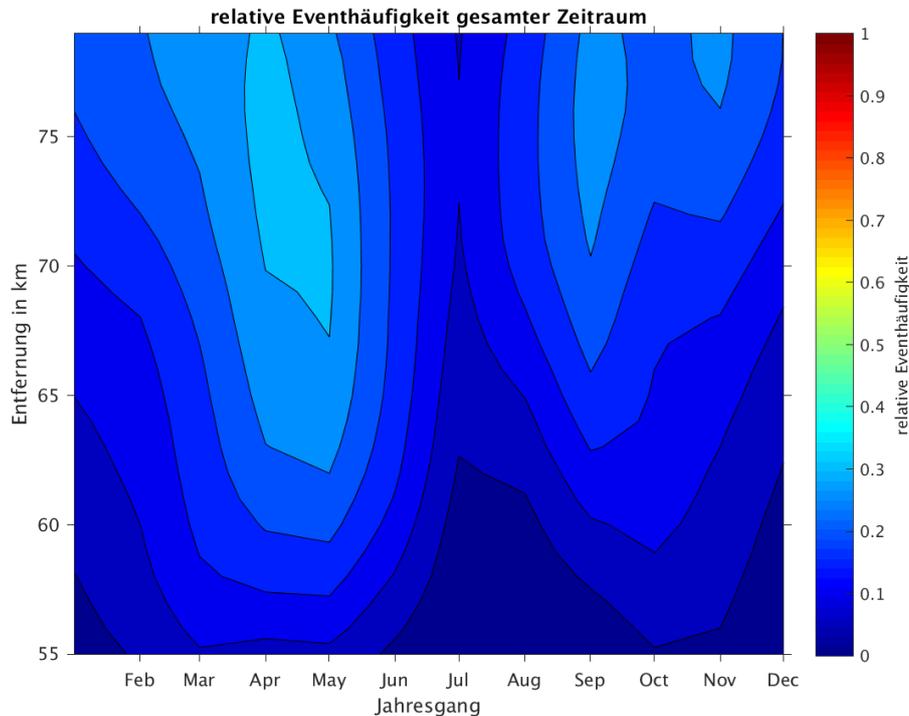


**Bild 3.3:** Aurora Sichtbarkeit dargestellt durch das Modell der SWPC aus [SWP]

Polarlichter nur auf der optisch sonnenabgewendeten Seite sichtbar sein können, siehe abgedunkelte Flächen in der Grafik 3.3, da das durch Rekombination ausgesandte Licht ansonsten nicht sichtbar ist. Die den Bildern zugrundeliegenden Daten sind vom 6. April 2016 um 6 Uhr (linke Seite) und auf der rechten Seite um 18 Uhr, welches die Uhrzeiten der Entscheidungsgrenzen in der hier beschriebenen Untersuchung sind. In der rechten oberen Ecke der Bilder kann die Leistung in der Hemisphäre abgelesen werden, die in einem typischen Bereich von 5 bis 150 GW liegt. Dabei besteht ein direkter Zusammenhang zwischen gemessener Leistung und Sichtbarkeit der Polarlichter, denn bei Werten von unter 20 GW ist es sehr unwahrscheinlich, dass es sichtbare Effekte gibt und im Gegensatz dazu deuten Werte von über 100 GW auf einen sehr starken geomagnetischen Sturm hin, welcher dazu führt das die Polarlichter über mehrere hundert Kilometer sichtbar sind. Der Vergleich der Bilder zeigt, wie sich die Feldlinien des magnetische Nordpols zeitlich ändern und der Standort im Norden Norwegens nicht durchgängig im Bereich des Polrandes liegt. Da es allerdings nur am Rand zum Herabsinken der Ladungsträger kommt, kann dies als mögliche Ursache für die Abweichungen der gefundenen Events herangezogen werden kann.

### 3.3 Ergebnisse

Für die Untersuchung nach der Auftretenswahrscheinlichkeit wurden Daten von 2002 bis 2015 untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass trotz der Auffüllung der Datensätze Lücken im Zeitraum von Januar 2002 bis Mai 2002, Juli & August 2002/2003, April & Dezember 2007 sowie Januar 2009 berücksichtigt werden mussten. Der restliche Zeitraum wird als vollständig betrachtet, da mindestens 24 Tagesarchive pro Monat zu Verfügung stehen. Der vollständige Ablauf des Programms ist im Anhang unter Abschnitt A.3 zu sehen. Bei der Bildung der Mittelwerte wurden ausschließlich die vollständigen Datensätze berücksichtigt. Aufgrund der zuvor beschriebenen Definition eines Events wurde der Höhenbereich von 40 bis 80 km untersucht, wohingegen sich der Autor bei der Darstellung für den Bereich von 55 bis 80 km entschied, da in dem darunterliegenden Entfernungen kaum Events detektiert wurden.

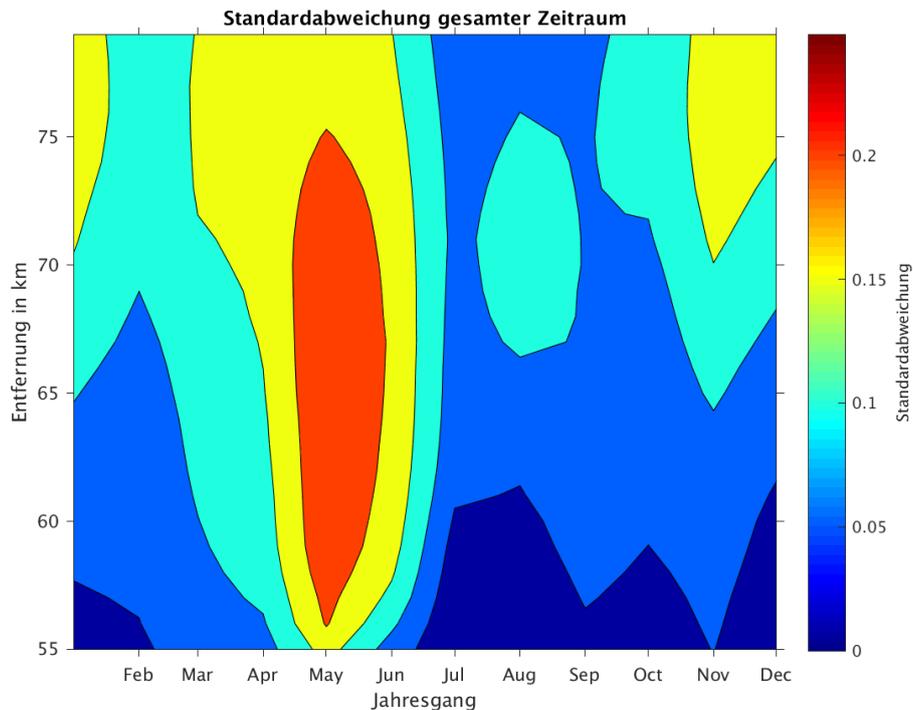


**Bild 3.4:** Gemittelte Eventwahrscheinlichkeit für den gesamten Zeitraum von 2002 bis 2015

Die Grafik 3.4 zeigt das Ergebnis der Auswertung im Hinblick auf die Auftretenswahrscheinlichkeit über den gesamten Zeitraum. Am häufigsten wurden Störungen im April ermittelt, dabei zeigte sich ein maximaler Wert für das Auftreten der Events von 31,83% in einem Höhenbereich von 77 km. Im Gegensatz dazu ist das Auftreten der Störungen im Juli statistisch gesehen am niedrigsten, denn für diesen Monat

konnte eine maximale Wahrscheinlichkeit von 10,25 % in einer Entfernung 76 km bestimmt werden und liegt damit sehr nah an dem Mittelwert von 10,23 %, der über alle Zeiten und Entfernungen ermittelt wurde. Ebenso bestätigt sich die Position des Minimums und Maximums bei der Mittelung über alle Höhen, wobei für den April eine Auftretenswahrscheinlichkeit von 16,33 % und für den Juli von 4,13 % berechnet wurde.

Weiterhin zeigte sich, dass bei steigender Höhe die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Events steigt. Da mit zunehmender Höhe die vorhandene Ionisation zunimmt und nur ein Teil der Leistung auf niedrigere Höhenbereiche herabsinkt, deckt sich diese Beobachtung mit dem zu erwartenden Ergebnis. Die Wahrscheinlichkeit für das Erscheinen eines Events in dem Höhenbereich von 75 bis 80 km über alle Zeiten beträgt 22,39 %, wohingegen in dem unteren Bereich von 55 bis 60 km lediglich 6,26 % ermittelt wurden.



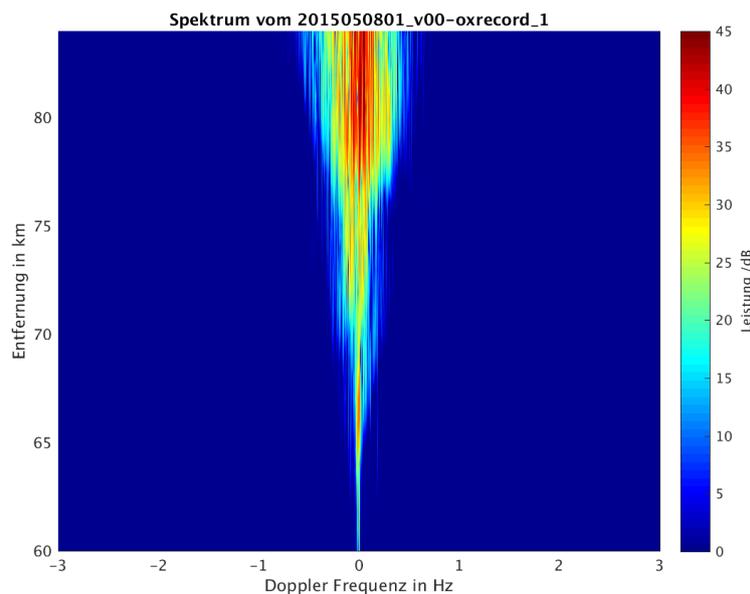
**Bild 3.5:** Standardabweichung der Eventwahrscheinlichkeit für den gesamten Zeitraum von 2002 bis 2015

Um die Streuung der Messergebnisse zu untersuchen, wurde die Standardabweichung für den gesamten Zeitraum bestimmt (Grafik 3.5). Dafür wurden alle jährlichen Daten in einer Matrix zusammengefasst und die Abweichung über die Jahre gemittelt. Wie aus der Abbildung 3.5 hervorgeht, sind die größten Unregelmäßigkeiten mit

einem Wert von 24,85 % im Mai zu finden, wohingegen die Abweichung im Mittel über alle Höhen und Monate bei 7,7 % liegt. Die geringste maximale Abweichung von 8,9 % wurde für den Monat Juli ermittelt, da dort über alle Jahre konstant wenige Events auftraten. Bei der Untersuchung der Abweichung über alle Monate bestätigte sich die größte Abweichung im Mai mit einem über die Höhe gemittelten Wert von 15,7 % und die geringste Unregelmäßigkeit im Juli mit 4 %. Bei der Betrachtung der mittleren Abweichung für jede Entfernung zeigte sich, dass die Standardabweichung mit der Höhe zunimmt. Innerhalb des Bereiches von 55 bis 60 km beträgt die durchschnittliche Abweichung noch 6,56 %, wohingegen in den Entfernungen von 75 bis 80 km mit 13,97 % eine deutlich höhere Abweichung ermittelt wurde.

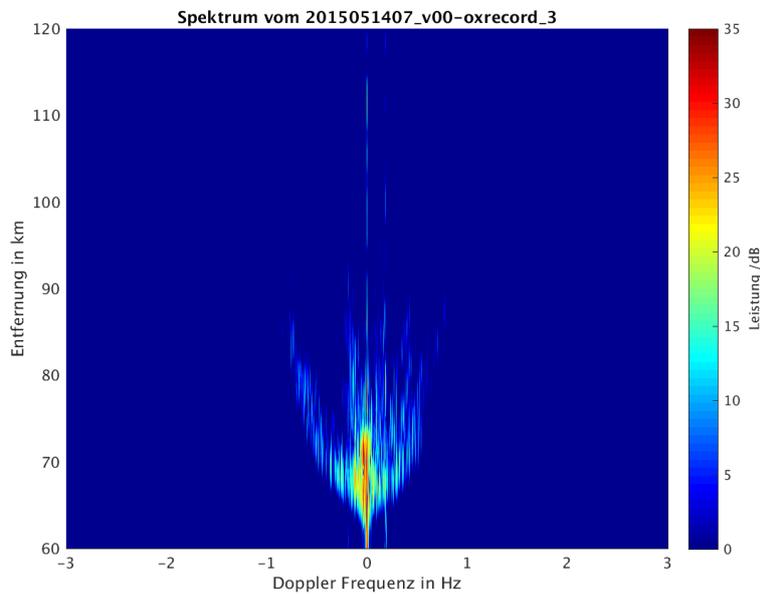
### 3.4 Spektralanalyse und Bestimmung des Horizontalwindbetrages

Die Grafik 3.6 zeigt das Frequenzspektrum eines typischen Echos des Saura MF-Radar, welches in einem Höhenbereich von 60 bis 90 km am 08.05.2015 um 1 Uhr aufgenommen wurde. Die Fourier-Transformation, um das Spektrum zu erzeugen, ist als Funktion in Matlab umgesetzt, dafür müssen der Datensatz, die Abtastfrequenz und die Länge der Zeitreihe übergeben werden. Die Transformation wird für jede Entfernung einzeln berechnet und anschließend zusammengesetzt. Im Zeitbereich beträgt die Dauer der Messreihe drei Minuten, wobei die Anzahl an Datenpunkten durch unterschiedliche Experimenteinstellungen variieren kann.



**Bild 3.6:** Frequenzspektrum vom 08.05.2015

Zur Abschätzung des Horizontalwindbetrages soll das Spektrum während eines Eventzeitpunktes untersucht werden. Dabei wird erwartet, dass in dem Höhenbereich über 80 km kaum Leistung erfasst wird und sich die Form einer quadratischen Funktion als äußere Begrenzung des Spektrums zeigt. In der Abbildung 3.7 ist das Spektrum während eines Events dargestellt, die zugrundeliegenden Daten sind vom 14.05.2015 um 7 Uhr. Die hier getroffene Annahme ist, dass die Breite des Spektrums Auskunft über den Betrag des Horizontalwindes gibt. Bei geringen Geschwindigkeiten bildet sich ein schmales Spektrum aus, wohingegen eine Zunahme der Windgeschwindigkeit zu einer Verbreiterung des Spektrums führt.



**Bild 3.7:** Frequenzspektrum vom 14.05.2015

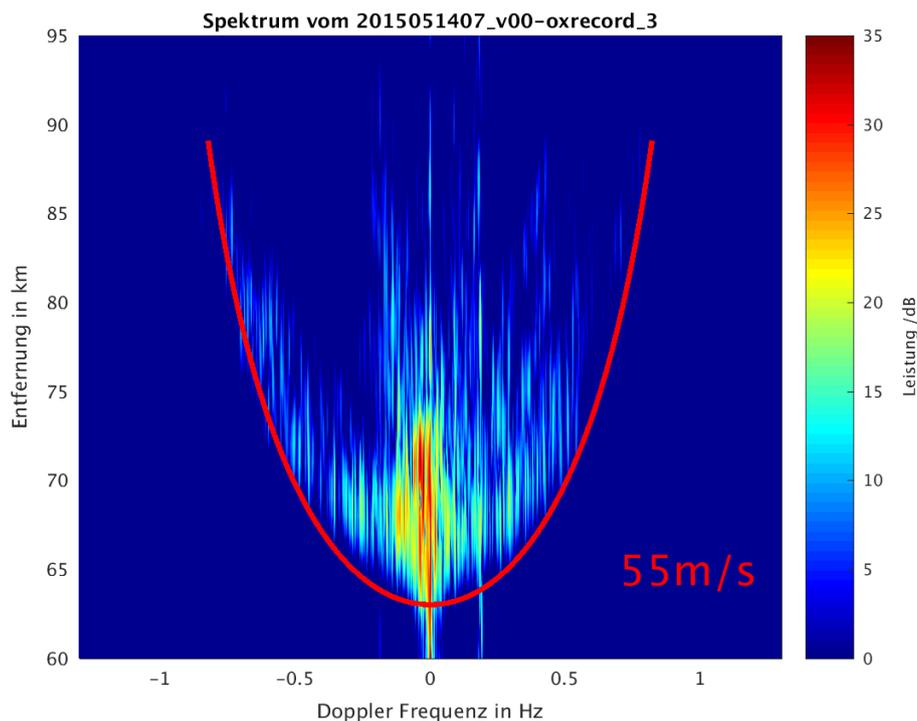
Unter Zuhilfenahme der Formel 3.1 kann, bei bekanntem Horizontalwind  $v_s$ , die Dopplerverschiebung berechnet werden.

$$f_d(\theta) = f \cdot \frac{\sqrt{1 - \frac{v_s^2}{c^2}}}{1 - \frac{v_s}{c} \cdot \cos(\theta)} \quad (3.1)$$

Wie bereits im Abschnitt 2.2.4 durch die Skizze 2.4 über den sichtbaren Teil des Windes verdeutlicht wurde, sind die Anteile des Windes abhängig vom Zenitwinkel

zum Streuzentrum. Da ein unendlich dünner Radarstrahl nicht praktisch umsetzbar ist, müssen die Strahlbreite der Hauptkeule und die Nebenzüpfel berücksichtigt werden, weshalb trotz vertikalen Beams Anteile der horizontalen Komponente enthalten sind. Im Folgenden wird die Annahme getroffen, dass die vertikale Komponente im Verhältnis zum Horizontalwind sehr klein ist und deshalb vernachlässigt wird.

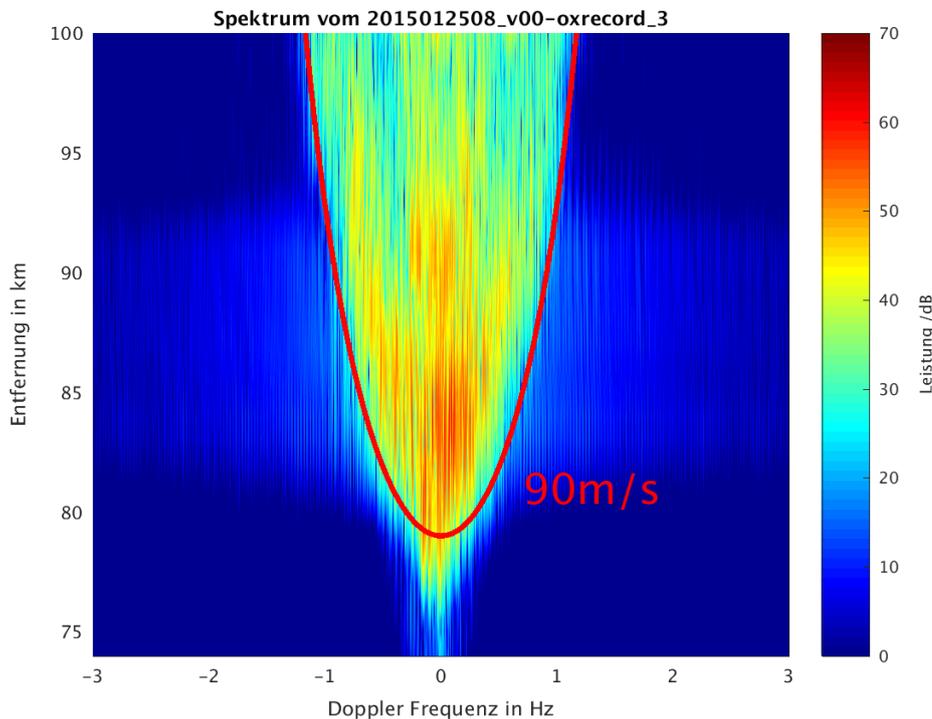
Um aus dem vorliegenden Eventspektrum (Abbildung 3.7) den Betrag des Horizontalwindes abschätzen zu können, müssen die Stützstellen der Parabel gefunden werden. Um diese zu bestimmen, wird zunächst nach der möglichen Nullstelle gesucht. Dafür wird die Leistung auf der Mittenfrequenz untersucht, ob eine Signalstärke von mindestens 10 dB vorliegt. Die grafische Darstellung des Spektrums ermöglicht es, die Nullstelle und den Höhenbereich, der weiter betrachtet werden soll, zu definieren. Um die Stützstellen der Kurve zu ermitteln, wird der linke und rechte Verlauf separat betrachtet, da unter Umständen kein symmetrischer Funktionsverlauf vorliegt.



**Bild 3.8:** Frequenzspektrum vom 14.05.2015 mit Horizontalwind

Die Grafik 3.8 zeigt das zuvor vorgestellte Spektrum (Abbildung 3.7), nachdem der Bereich zur weiteren Untersuchung eingeschränkt und der Betrag des Horizontalwindes berechnet wurde. In der Abbildung ist der Höhenbereich von 60 bis 95 km dargestellt, wobei eine Windgeschwindigkeit von 55 m/s ermittelt wurde. Da in diesem Höhenbereich allerdings kein Vergleich mit Meteordaten angestellt werden kann,

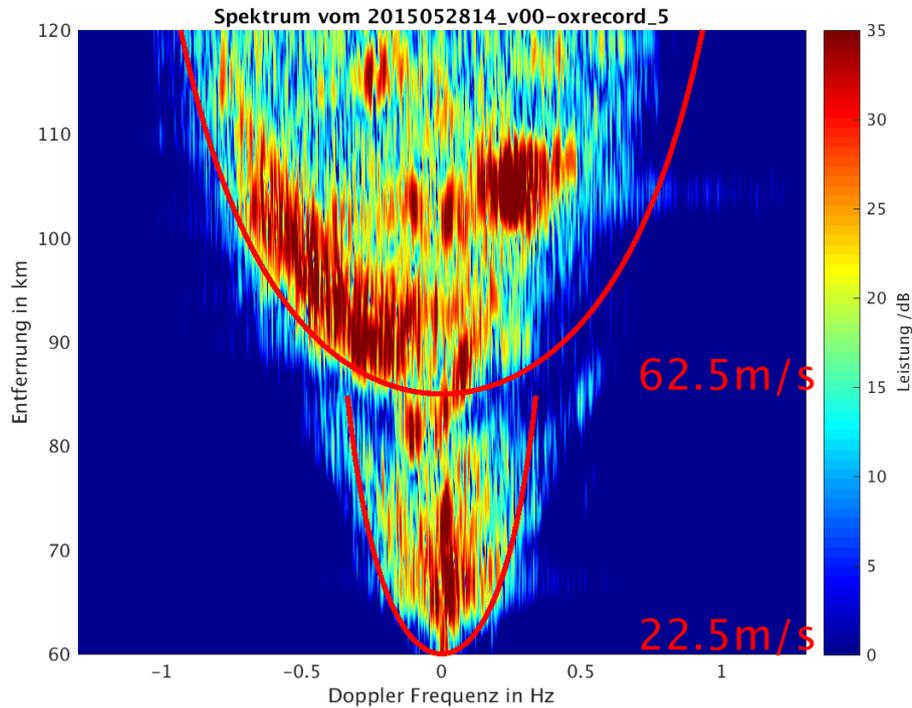
ist in der Grafik 3.9 ein Spektrum eines Events aus einer höheren Entfernung dargestellt. Dieses ist, im Vergleich zu dem in der Abbildung 3.8 dargestellten Spektrum, deutlich breiter und entspräche einer Windgeschwindigkeit von 90 m/s. Für diesen Höhenbereich liegen Meteordaten zum Vergleich vor, wobei zu beachten gilt, dass diese Stundenwerte beinhalten. Für den 25.01.2015 von 8 bis 9 Uhr zeigte sich ein Wind von 22 m/s für die Entfernung von 80 km. Die Höhenauflösung der Meteordaten beträgt 2 km, demnach ist die darunterliegenden Entfernung 78 km, in der ein Wind von 23 m/s bestimmt wurde, wohingegen in der Entfernung von 82 km ein Horizontalwindbetrag von 30 m/s ermittelt wurde.



**Bild 3.9:** Frequenzspektrum vom 25.05.2015 mit Horizontalwind

Die Bestimmung der Nullstelle ist bei der Berechnung des Horizontalwindbetrags von besonderer Bedeutung, da der berechnete Wind sich auf die Entfernung der Nullstelle bezieht. In den zuvor vorgestellten Datensätzen, erschien es sinnvoll, den Wind nur in einer Entfernung zu berechnen. In der Grafik 3.10 hingegen sind bei zwei Entfernungen Strukturen, die untersucht werden können. Dabei unterscheidet sich die ermittelte Geschwindigkeit in der unteren Entfernung bei 60 km mit 22,5 m/s sehr stark vom Horizontalwind von 62,5 m/s in einer Höhe von 85 km. Für den 28.05.2015 von 14 bis 15 Uhr liegen ebenfalls Meteordaten zum Vergleich vor. Diese zeigten in der Entfernung von 86 km eine Geschwindigkeit von 33 m/s. In dem darüberliegen-

den Höhenbereich von 88 km hingegen wurde ein Horizontalwindbetrag von 11 m/s ermittelt.

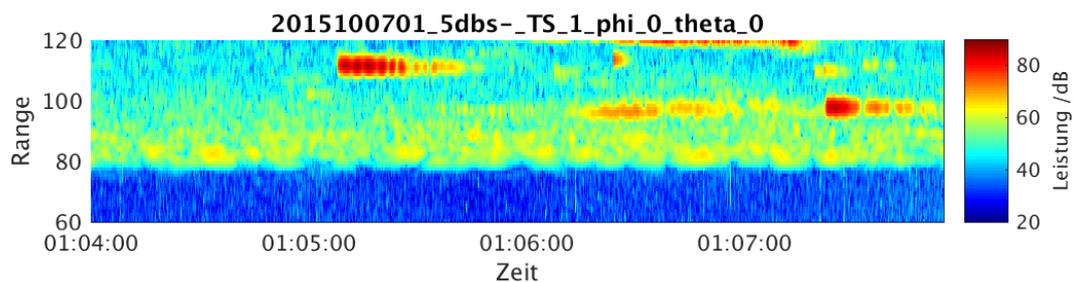


**Bild 3.10:** Frequenzspektrum vom 28.05.2015 mit Horizontalwind

In beiden vorgestellten Datensätzen wurde ein Horizontalwindbetrag über das Spektrum bestimmt, der schneller ist, als der aus den Meteoren ermittelte Wind. Dabei ist teilweise eine deutliche Abweichung festzustellen. Die Gründe dafür können sein, dass die vertikale Komponente vernachlässigt wurde und die unterschiedlichen Länge der zeitlichen Mittelung. Die über das Spektrum ermittelten Werte für den Betrag des Horizontalwindes beziehen sich auf eine Dauer von drei Minuten, wohingegen die Daten aus der Meteorbeobachtung einen gemittelten Wind über eine Stunde darstellen.

## 4 Interferometrische Bestimmung der Einfallsrichtung - Angle of Arrival

Für die Auswertung von Radardaten ist es wichtig, zu bestimmen, aus welcher Richtung das Signal empfangen wurde. Eine Möglichkeit an diese Information zu gelangen ist der Angle of Arrival (AoA). Dies ist eine Interferometriemethode, bei der die Haupteinfallsrichtung der Rückstreuung beschrieben und häufig in Kugelkoordinaten angegeben wird. Außerdem werden in der Literatur die Begriffe Mean Angle of Arrival (MAoA) und Direction of Arrival (DoA) häufig als Synonyme verwendet, da es nicht ausgeschlossen ist, dass es nicht nur ein, sondern viele Rückstreuzentren gibt und nur das dominierende als Haupteinfallsrichtung bestimmt wird.



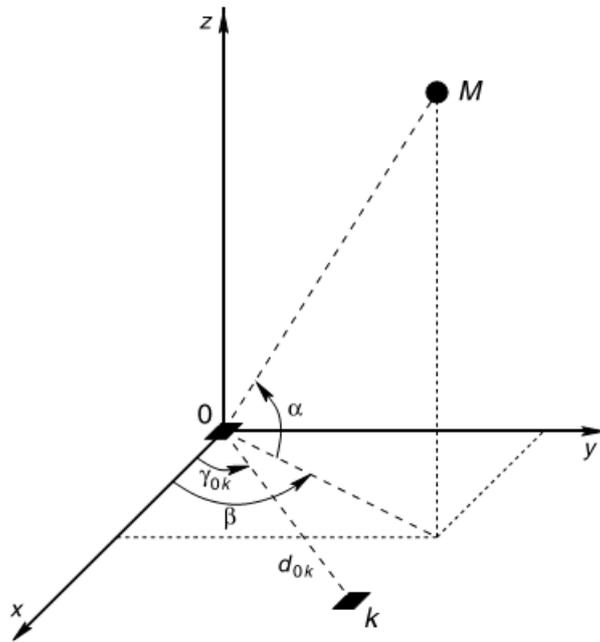
**Bild 4.1:** RTI-Diagramm vom 07.10.2015

Der Ansatz der AoA-Berechnung liegt darin, die Phasendifferenz zwischen den Empfängern zu nutzen, um so eine Lokalisierung des Rückstreucentrums als Punkt zu ermöglichen. Die Grafik 4.1 zeigt das Range-Time-Intensity (RTI)-Diagramm, aus dem der Einfallswinkel bestimmt werden soll. Für die Erfassung der Richtung werden mindestens drei Antennen benötigt, die im Idealfall in einem gleichseitigen Dreieck angeordnet sind und untereinander einen Abstand von maximal  $0,5 \lambda$  besitzen. Bis zur halben Wellenlänge wird gewährleistet, dass die AoA-Winkel, welche aufgrund des Phasenunterschiedes zwischen zwei Antennen berechnet wurden, eindeutig sind. Aber nicht nur Mehrdeutigkeiten erschweren die korrekte Berechnung des AoA. Gibt es mehrere nahezu gleichstarke Streuer aus unterschiedlichen Richtungen, führt dies innerhalb kürzester Zeit zu vielen Richtungssprüngen. Im Folgenden werden zwei

Lösungsansätze untersucht, zum Einen ein numerischer Ansatz, der sich auf [Lau06] zurückführen lässt und zum Anderen ein am IAP entwickelter Ansatz, der ein Fitting zwischen den gemessenen Kohärenzen und einer theoretischem Modellbeschreibung durchführt.

#### 4.1 Numerischer Lösungsansatz

Die Grafik 4.2 wurde von [Lau06] übernommen und zeigt ein typisches Bezugssystem für ein Interferometer. Die Empfangsantennen befinden sich in der  $xy$ -Ebene und liegen im Koordinatenursprung sowie dem Punkt  $k$ . Folglich beschreibt  $d_{0,k}$  die Distanz und  $\gamma_{0,k}$  den Winkel zwischen den beiden Empfängern. Der Punkt  $M$  repräsentiert das Rückstreuungszentrum. Die Richtung wird vom Ursprung ausgehend zu  $M$  über den Polarwinkel  $\alpha$  und den Azimutwinkel  $\beta$  angegeben.



**Bild 4.2:** Skizze eines Interferometers nach [Lau06]

Die zu untersuchenden Signale liegen in der Form vor, wie es in der Gleichung 4.1 zu sehen ist.  $A$  ist dabei die Amplitude des Signals,  $f_D$  die Frequenz der Dopplerverschiebung und  $\varphi_0$  die Phasenlage zum Ausgangssignal. In der zweiten Zeile ist eine weitere Darstellungsform des Signals zu sehen, und zwar als komplexes Signal bestehend aus seinen Quadraturkomponenten dem Real- und Imaginärteil.

$$s(t) = A \cdot e^{2 \cdot (2\pi f_D)t + \varphi_0} \quad (4.1)$$

$$= i + j \cdot q \quad (4.2)$$

Die Formel 4.3 zeigt, wie die Phasendifferenz  $\Delta\varphi_{i,j}$  zwischen zwei Empfängern  $i$  und  $j$  berechnet wird. Dafür wird das Signal  $s_i$  mit dem konjugiert komplexen des Signals  $s_j$  multipliziert und der Arkustangens aus dem Real- und Imaginärteil berechnet. Die Herleitung der Formeln ist aus [Lau06] und [Som12] zu entnehmen. Hierbei gilt zu beachten, dass die Rückstreuung als Punkt lokalisiert wird und nur das Zentrum der Rückstreuung erfasst wird. Die Phasendifferenz zwischen zwei Empfängern resultiert aus dem räumlichen Abstand der Empfangsantennen. Daher kann die Phasendifferenz auch in Abhängigkeit des Abstandes ausgedrückt werden, wie in der Formel 4.4 dargestellt ist.  $\lambda$  entspricht dabei der Wellenlänge des Radars und  $\Delta d$  ist der Wegunterschied zwischen den Antennen  $i$  und  $j$ .

$$\Delta\varphi_{i,j} = \angle(s_i, s_j) = \arctan\left(\frac{\Re(s_i s_j^*)}{\Im(s_i s_j^*)}\right) \quad (4.3)$$

$$\Delta\varphi_{i,j} = -\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \Delta d \quad (4.4)$$

Unter der Annahme, dass der Abstand zum Streuzentrum deutlich größer ist als die Abstände der Antennen untereinander, kann für den zweidimensionalen Fall der Wegunterschied durch die Formel 4.5 ausgedrückt werden. Beim Saura MF-Radar beträgt der Abstand zwischen zwei benachbarten Antennen  $0.74\lambda$  und ist mit ca. 66 m deutlich kleiner als die Entfernung der beobachteten Rückstreuzentren, die in einer Entfernung von 60 bis 120 km liegen.

$$\Delta d = \sin(\alpha) \cdot d_{i,j} \quad (4.5)$$

Da die hier verwendeten Antennen allerdings nicht linear angeordnet sind, sondern sich der Abstand zwischen 2 Antennen aus dem Abstand in x- und y-Richtung

zusammensetzt, muss der dreidimensionale Fall betrachtet werden. In den Formeln 4.6 und 4.7 ist die Projektion der Abstände auf die x- und y- Achse abgebildet. Dafür wird der Winkel  $\gamma_{i,j}$  zwischen der x-Achse und der Verbindungslinie von i zu j gebildet, wie in der Skizze eines Interferometers 4.2 dargestellt ist.

$$x_{i,j} = \sin(\gamma_{i,j}) \cdot d_{i,j} \quad (4.6)$$

$$y_{i,j} = \cos(\gamma_{i,j}) \cdot d_{i,j} \quad (4.7)$$

Der Wegunterschied  $\Delta d_{i,j}$  zwischen den Antennen i und j setzt sich aus dem Wegunterschieden  $\Delta d_x$  und  $\Delta d_y$  in x- bzw. y- Richtung zusammen. Die Gleichung 4.9 entsteht durch das Einsetzen von 4.6 und 4.7 in 4.8 und kann wie in der Gleichung 4.10 ausformuliert werden.

$$\Delta d_{i,j} = \Delta d_x + \Delta d_y \quad (4.8)$$

$$= \sin(\alpha_x) \cdot x_{i,j} + \sin(\alpha_y) \cdot y_{i,j} \quad (4.9)$$

$$= \sin(\alpha_x) \cdot \sin(\gamma_{i,j}) \cdot d_{i,j} + \sin(\alpha_y) \cdot \cos(\gamma_{i,j}) \cdot d_{i,j} \quad (4.10)$$

Die Gleichungen 4.11 und 4.12 stellen die Überführung in Kugelkoordinaten dar.

$$\sin(\alpha_x) = \sin(\Theta) \cdot \sin(\Phi) \quad (4.11)$$

$$\sin(\alpha_y) = \sin(\Theta) \cdot \cos(\Phi) \quad (4.12)$$

Daher kann der Wegunterschied in Abhängigkeit der Kugelkoordinaten wie in 4.13 ausgedrückt werden.

$$\Delta d_{i,j} = \sin(\Theta) \cdot \sin(\Phi) \cdot \sin(\gamma_{i,j}) \cdot d_{i,j} + \sin(\Theta) \cdot \cos(\Phi) \cdot \cos(\gamma_{i,j}) \cdot d_{i,j} \quad (4.13)$$

Durch die Kombination der Gleichungen 4.4 und 4.13 kann das Gleichungssystem 4.14 erstellt werden. Der Vektor  $P$  beinhaltet die Phasendifferenzen zwischen den Antennenpaaren,  $S$  ist eine Matrix mit den Abständen in x- und y-Richtung relativ zur Wellenlänge der Trägerfrequenz und  $r$  beinhaltet die Richtung des Rückstreuungszentrums. Die Gleichung 4.15 zeigt die verkürzte Schreibweise von dem Gleichungssystem 4.14.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \varphi_{01} \\ \varphi_{02} \\ \varphi_{03} \\ \varphi_{04} \\ \varphi_{0N} \end{bmatrix}}_P = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{2\pi}{\lambda}d_{01}\cos\gamma_{01} & -\frac{2\pi}{\lambda}d_{01}\sin\gamma_{01} \\ -\frac{2\pi}{\lambda}d_{02}\cos\gamma_{02} & -\frac{2\pi}{\lambda}d_{02}\sin\gamma_{02} \\ -\frac{2\pi}{\lambda}d_{03}\cos\gamma_{03} & -\frac{2\pi}{\lambda}d_{03}\sin\gamma_{03} \\ -\frac{2\pi}{\lambda}d_{0N}\cos\gamma_{0N} & -\frac{2\pi}{\lambda}d_{0N}\sin\gamma_{0N} \end{bmatrix}}_S \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\alpha)\cos(\beta) \\ \cos(\alpha)\sin(\beta) \end{bmatrix}}_r \quad (4.14)$$

$$P = S \cdot r \quad (4.15)$$

Durch die Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate kann die Normalengleichung 4.16 gebildet werden. Dafür wird die Gleichung 4.15 mit der transponierten Matrix  $S$  multipliziert. Die Lösung des Systems ist immer dann eindeutig, wenn die Matrix  $S$  den vollen Rang besitzt und diese Bedingung ist in diesem Fall erfüllt.

$$S^T S r = S^T p \quad (4.16)$$

Die Gleichung 4.16 kann nach  $r$  umgestellt werden, wie in 4.17 zu sehen ist.

$$r = S^T (S^T S)^{-1} \cdot p \quad (4.17)$$

$$r_1 = \sin(\theta) \sin(\phi) \quad (4.18)$$

$$r_2 = \sin(\theta) \cos(\phi) \quad (4.19)$$

Dieses Ergebnis wird in seine Komponenten 4.18 und 4.19 zerlegt, welche anschließend genutzt werden, um den Zenit- und Azimutwinkel  $(\theta, \phi)$  zu berechnen 4.20 4.21.

$$\theta = \arcsin(\sqrt{(r_1)^2 + (r_2)^2}) \quad (4.20)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \quad (4.21)$$

Der Eindeutigkeitsbereich der AOA-Funktion wird durch den Abstand der Antennen beeinflusst. Liegen die Empfänger in einer Distanz von mehr als  $0,5 \lambda$  auseinander, kann der Winkel nicht eindeutig bestimmt werden, da die Phase nur auf einen Wertebereich bis zu  $360^\circ$  definiert ist.

$$\sin \theta_{i,j} = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi_{i,j}}{d_{i,j}} \quad (4.22)$$

$$\theta_{i,j} = \arcsin \frac{\lambda}{2d_{i,j}} \quad (4.23)$$

In der Formel 4.22 ist der Zusammenhang aus Wellenlänge  $\lambda$ , Phasendifferenz zwischen dem Empfängern i und j  $\varphi_{i,j}$  sowie dem Abstand zwischen diesen  $d_{i,j}$  dargestellt. Setzt man nun für die Phasendifferenz den größtmöglichen Wert von  $\pi$  ein und stellt dies nach der gesuchten Größe um (Formel 4.23), erhält man den maximalen eindeutig bestimmbar Winkel. Dies muss für jede Richtung einzeln betrachtet werden, sofern die Abstände nicht identisch sind und gilt entlang der Verbindungslinie zwischen den Empfängern. Beim Saura MF-Radar besteht für den ausgewählten Zeitraum das kleinstmögliche Dreieck aus den Antennen 2,3 und 5, wie der Abbildung 2.8 zu entnehmen ist. Da der Abstand der Antennen größer als  $0,5 \lambda$  ist,

können nur einfallende Signale mit einem Winkel von weniger als ca.  $40^\circ$  eindeutig bestimmt werden. Ergebnisse außerhalb dieses Lösungsraumes werden hinein projiziert und lassen sich ohne weitere Untersuchung nicht von tatsächlichen Lösungen innerhalb des Raumes unterscheiden. Aus dem Reziproke der Formel 4.23 kann die Information gewonnen werden, wie viele Vielfache der Lösung möglich sind.

## 4.2 Nichtlinearer Lösungsansatz

Im Rahmen der Bachelorthesis von Matthias Clahsen entwickelte dieser eine AoA-Funktion in Python, um die Richtung der detektierten „underdense-Meteor-Echos“ zu bestimmen [Cla15].

Um den Haupteinfallswinkel zu bestimmen, soll eine globale Suche nach dem Minimum der Abweichung zwischen einem Modell und den gemessenen Daten erfolgen. Dafür werden zunächst Antennenpaare gebildet, da beim Saura MF-Radar fünf Einzelempfangsantennen zur Verfügung stehen, ergeben sich 10 Paare, die mit den Indizes  $i$  und  $j$  beschriftet wurden. Folglich beschreibt  $s_i$  das komplexe Empfangssignal an der Antenne  $i$  und  $y_i$  das mit weißen, gaußverteilten Rauschen überlagerte Signal. Die in 4.24 bis 4.32 dargestellten Formeln sind aus der Thesis [Cla15] entnommen und beziehen sich auf Meteorechos. Demnach resultiert die Kohärenz  $\rho_{i,j}$  aus der Kreuz- und Autokorrelation der Signale und diese beinhaltet die Phasendifferenz. Des Weiteren beschreibt  $a_N$  die Abfallrate des Meteors,  $f_N$  die Frequenz,  $P_N$  die Rauschleistung und  $N$  die Anzahl der zur Verfügung stehenden Stützstellen.

$$\rho_{i,j} = \frac{KKF(s_i, s_j)}{\sqrt{AKF(s_i) \cdot AKF(s_j)}} \quad (4.24)$$

$$= \frac{\Psi_{\underline{y}_i, \underline{y}_j}}{\sqrt{(\Psi_{\underline{y}_i, \underline{y}_i}[0] - NP_N) \cdot (\Psi_{\underline{y}_j, \underline{y}_j}[0] - NP_N)}} \quad (4.25)$$

$$= \frac{\Psi_{\underline{y}_i, \underline{y}_j}}{\sqrt{(\Psi_{\underline{y}_i, \underline{y}_i}[0] - NP_N) \cdot (\Psi_{\underline{y}_j, \underline{y}_j}[0] - NP_N)}} \quad (4.26)$$

$$= \frac{A_i A_j \cdot e^{a_N k} \cdot e^{j2\pi f_N k} \cdot e^{(\varphi_j - \varphi_i)} \cdot K[k]}{\sqrt{A_i^2 A_j^2 \cdot e^{-2a_N k} \cdot e^{j4\pi f_N k} \cdot K[k]}} \quad (4.27)$$

$$= e^{j(\varphi_j - \varphi_i)} \quad (4.28)$$

$$= e^{-j\Delta\varphi_{i,j}} \quad (4.29)$$

Betrachtet man die in 4.4 dargestellte Gleichung nun für x- und y-Richtung separat, können daraus die Formeln 4.30 und 4.31 gebildet werden. Diese stellen die Grundlage für das Modell 4.32 dar, welches zum Vergleich mit den gemessenen Daten herangezogen werden soll. Dieses Modell wurde als anonyme Funktion umgesetzt und ihr müssen Startwerte übergeben werden. Die Rückgabeparameter sind die berechneten Winkel und das berechnete Residuum. Das Residuum beschreibt die Abweichung der Modellfunktion 4.32, wobei das Minimum dem Optimum entspricht.

$$\sin \theta_x = \frac{\delta}{\Delta x_{i,j}} = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\Delta \varphi_{i,j}}{\Delta x_{i,j}} \quad (4.30)$$

$$\sin \theta_y = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\Delta \varphi_{i,j}}{\Delta y_{i,j}} \quad (4.31)$$

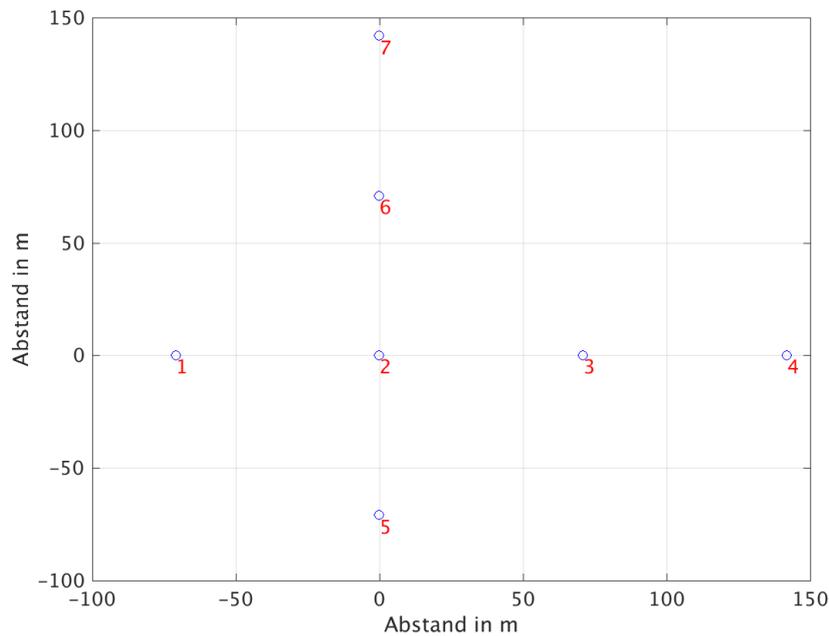
Die Grenzen des Lösungsraumes der gesuchten  $\sin \theta_x$  und  $\sin \theta_y$  können durch das Einsetzen von  $\pi$  in die Formeln 4.30 und 4.31 gefunden werden. Über diesen Raum wurde ein gleichmäßiges Gitter angelegt, woraus sich eine 11x11-Matrix mit allen Startwerten für  $\sin \theta_x$  und  $\sin \theta_y$  bildet, die dann schrittweise in die anonyme Funktion übergeben werden.

$$\rho_{i,j} = e^{-j\Delta \varphi_{i,j}} = e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta_x \cdot \Delta x_{i,j} + \sin \theta_y \cdot \Delta y_{i,j})} \quad (4.32)$$

Die Anwendung der Funktion unterliegt im ursprünglichen Quelltext der Bedingung, dass der als „Eventzeitraum“ bezeichnete Zeitpunkt bereits bekannt ist, demnach geht der Verwendung der AOA-Funktion eine Detektionsfunktion voraus. Darüber ist der Startzeitpunkt und die Dauer der Korrelation bekannt und es kann angenommen werden, dass sich die Richtung während dieses Zeitraums nicht ändert. Bei den hier verwendeten Rohdaten liegen keine Vorkenntnisse über die Beschaffenheit der Atmosphäre zu diesem Zeitpunkt vor. Daher muss der Ansatz der Kohärenzbildung verworfen werden. Wird allerdings keine Zeitreihe, sondern nur ein einzelner Datenpunkt betrachtet, geht aus der Formel 4.29 hervor, dass bei bekanntem Phasenunterschied die Richtung über das Modell gefunden werden kann.

### 4.3 Funktionsnachweis

Um die Berechnung der AoA-Winkel zu überprüfen, wurden synthetische Daten erzeugt, welche unter Berücksichtigung der Formel 4.33 jeweils mit der Richtungsinformation  $(\phi = 90^\circ, \theta = 7^\circ)$ ,  $(\phi = 45^\circ, \theta = 25^\circ)$  und  $(\phi = 285^\circ, \theta = 15^\circ)$  versehen und zusätzlich verrauscht wurden. Der Signalabstand beträgt dabei 20 dB und die Datenmatrix hat einen Umfang von 11 Höhen bei 100 Zeitschritten. Im Folgenden wird nur der erste Datensatz betrachtet, die weiteren Ergebnisse befinden sich im Anhang in den Abschnitten A.1 und A.2.

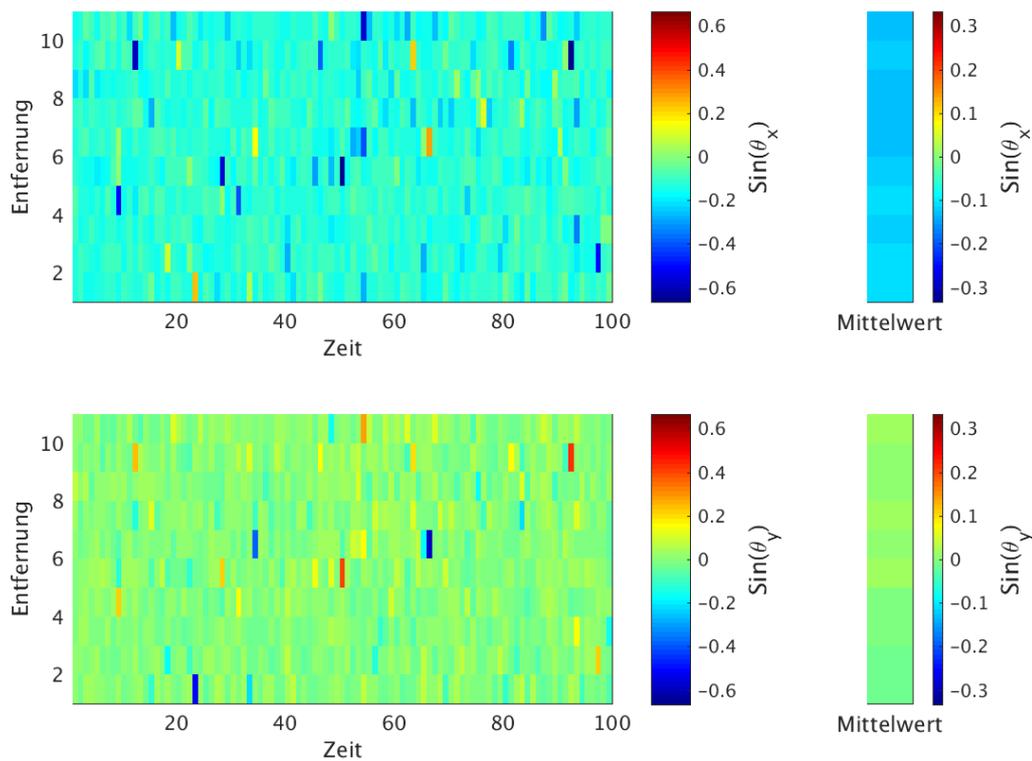


**Bild 4.3:** Antennenanordnung der Testdaten

$$\begin{matrix} \varphi_{25} \\ \varphi_{35} \\ \varphi_{55} \end{matrix} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_{25} & \Delta y_{25} \\ \Delta x_{35} & \Delta y_{35} \\ \Delta x_{55} & \Delta y_{55} \end{bmatrix} \cdot \begin{matrix} \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \\ \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) \end{matrix} \quad (4.33)$$

Das Bild 4.3 zeigt die Antennenpositionen des selbst erstellten Antennenfeldes, die unter Verwendung der Wellenlänge vom Saura MF-Radar jeweils einen Abstand von  $0,74 \lambda$  zueinander aufweisen. Dabei wurde ein Dreieck aus den Antennen 2, 3 und 5

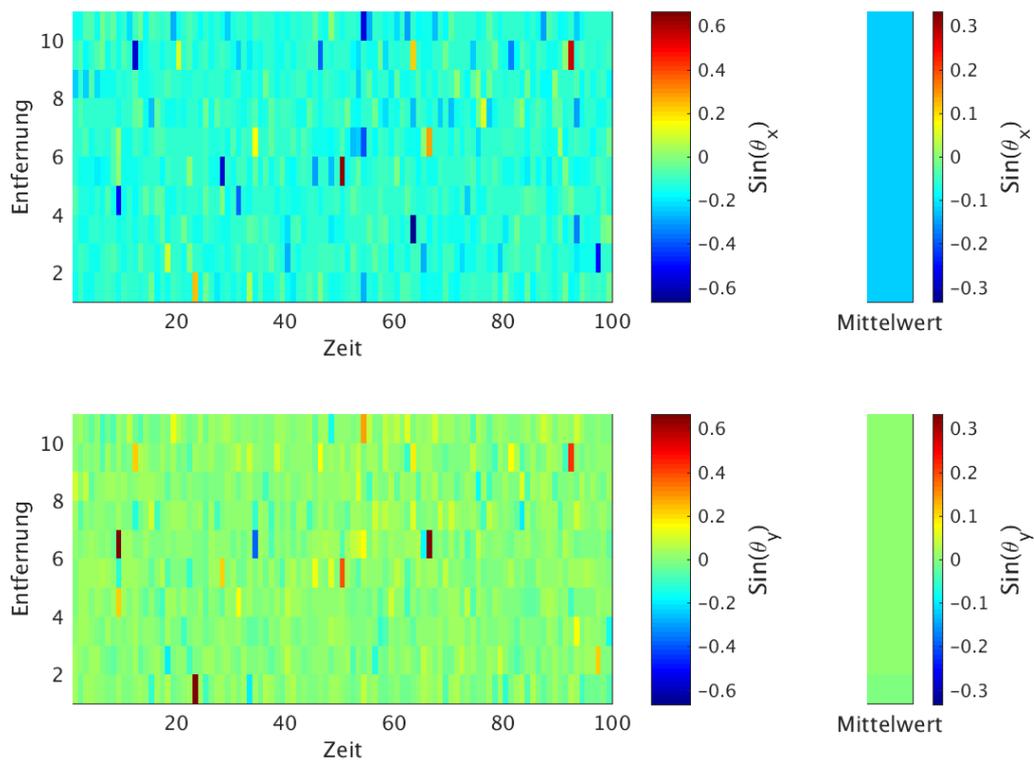
gebildet und daraus die Abstandsmatrix berechnet, die neben den Daten ein Übergabeparameter der AoA-Funktion ist. Aufgrund dessen, dass es eine Referenzantenne gibt, werden in dieser Betrachtung nur zwei Basislinien verwendet, da der Abstand zu sich selbst und die daraus resultierende Phase 0 entspricht. Die Ergebnisse der numerischen AoA-Funktion sind in dem Bild 4.4 zu sehen, zum Einen links die berechneten  $\sin(\theta_x), \sin(\theta_y)$  und zum Anderen rechts der daraus gebildete Mittelwert. Durch das Einsetzen der verwendeten Winkel ( $\phi = 90^\circ, \theta = 7^\circ$ ) in die Gleichungen 4.18 und 4.19 können die Erwartungswerte für  $\sin(\theta_x)$  von  $-0,122$  und  $\sin(\theta_y)$  von 0 bestimmt werden.



**Bild 4.4:** Ergebnisse für  $\sin(\theta_x)$  und  $\sin(\theta_y)$  der numerischen AoA-Methode bei ( $\phi = 90^\circ, \theta = 7^\circ$ ) und der dazugehörige Mittelwert

Weiterhin gibt die Funktion die berechneten  $(\phi, \theta)$  sowie den Phasenversatz in Radiant zurück. Dieser resultierende Phasenversatz wurde in einen komplexen Wert überführt und dem nichtlinearen Modell übergeben, um zu überprüfen, ob dieselben Winkel gefunden werden (siehe Abbildung 4.5). Somit wird der Modellansatz für einen einzelnen Datenpunkt durchgeführt, eine Betrachtung der Kohärenzbildung ist nicht erforderlich. Zuvor wurde das Modell überprüft, indem bekannte Wer-

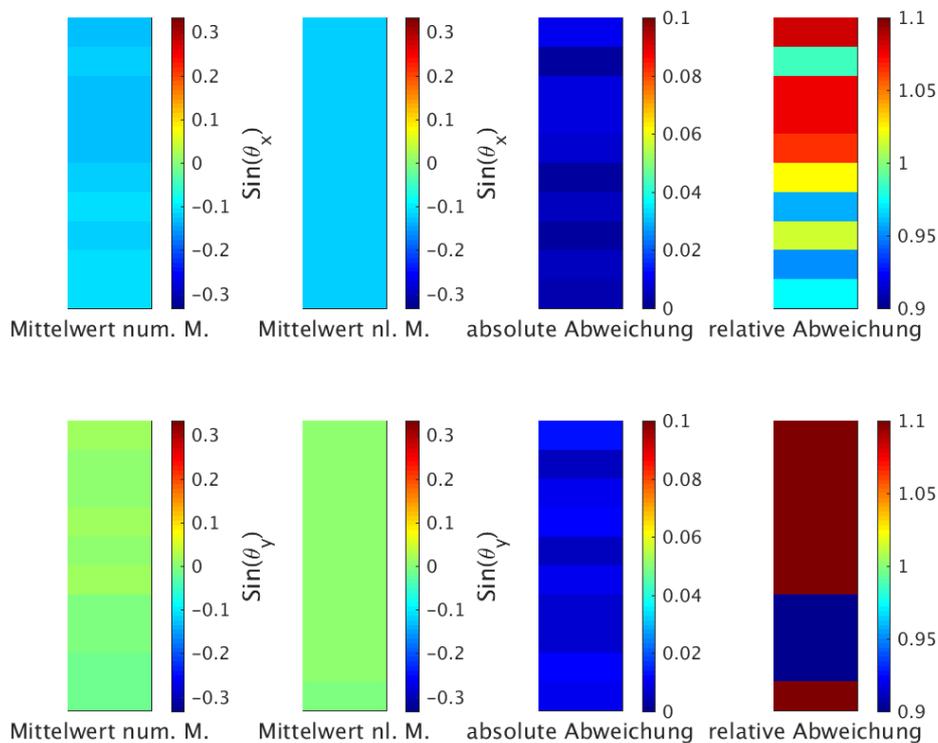
te von  $\sin(\theta_x)$  und  $\sin(\theta_y)$  in die Berechnung von  $\rho$  (Formel 4.32) eingesetzt und das Ergebnis mit dem Phasenversatz der numerischen Methode verglichen wurde. Allerdings zeigte sich nach den ersten Tests, dass bei der nicht linearen Methode unregelmäßig Lösungen außerhalb des Lösungsraumes gefunden wurden. Dies kann auf die Mehrdeutigkeiten zurückgeführt werden und daher wurde eine einmalige Prüfung eingebaut, die kontrolliert, ob das Ergebnis im Lösungsraum liegt und bei Nichterfüllen der Bedingung die zweitbeste Lösung auswählt. Obwohl keine weitere Prüfung eingebaut wurde, zeigte sich, dass dadurch deutlich bessere Ergebnisse erzielt wurden.



**Bild 4.5:** Ergebnisse für  $\sin(\theta_x)$  und  $\sin(\theta_y)$  der nichtlinearen AoA-Methode bei  $(\phi = 90^\circ, \theta = 7^\circ)$  und der dazugehörige Mittelwert

Wie anhand der Abbildungen 4.4 und 4.5 gut zu erkennen ist, sind die resultierenden Winkel nicht identisch. Allerdings ist die Übereinstimmung sehr groß, wie aus der Grafik 4.6, in der die Abweichung der Mittelwerte zueinander zum Einen absolut und zum Anderen relativ betrachtet wurde, hervorgeht. Bei der Berechnung über den numerischen Ansatz wurde für  $\sin(\theta_x)$  ein Mittelwert von  $-0.125$  und beim nichtlinearen von  $-0.12$  festgestellt. Für die Untersuchung der relativen Abweichung

wird der numerische Mittelwert ins Verhältnis zum Ergebnis des nicht linearen Ansatzes gesetzt. Die absolute Abweichung resultiert aus dem Betrag der Differenz der Ergebnisse. Für die maximale relative Abweichung wurde ein Wert von 1.084 ermittelt bei einer absoluten Abweichung von 0.01. Bei der Betrachtung der mittleren Standardabweichung ergab sich ein Wert von 0.065 für die berechneten  $\sin(\theta_x)$ . An der Grafik 4.4 ist zudem zu erkennen, dass sich das Rauschen stark auf die resultierende Werte auswirkt. Denn obwohl ein sehr gutes Signal-Rausch-Verhältnis für die Testdaten gewählt wurde, zeigt sich, dass stärker verrauschte Datenpunkte dazu führen, dass die gefundenen Werte vereinzelt stark abweichen.



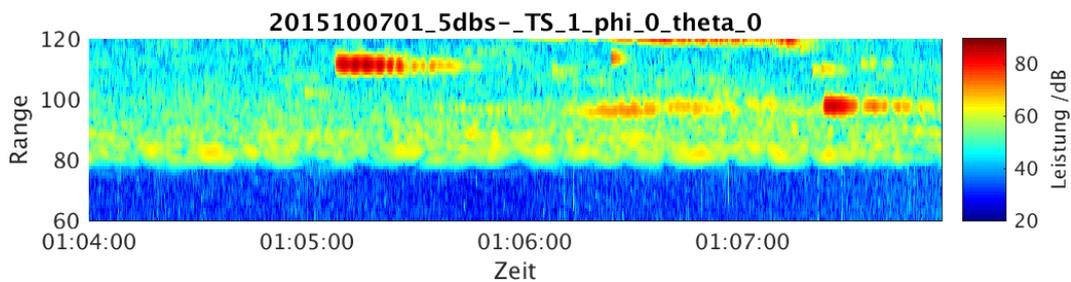
**Bild 4.6:** Abweichung von  $\sin(\theta_x)$  und  $\sin(\theta_y)$  aus den Ergebnissen der vorgestellten AoA-Methoden für die Testdaten mit den Richtungsinformationen ( $\phi = 90^\circ, \theta = 7^\circ$ )

Die Analyse der Ergebnisse des  $\sin(\theta_y)$  Winkels zeigte, dass im Vergleich zum zuvor betrachteten Winkel die Übereinstimmung kleiner ist. Der numerische Ansatz lieferte einen Mittelwert von 0.008 im Vergleich zum nicht linearen mit 0.0003. Es zeigte sich eine maximale absolute Abweichung von 0.012 und dies führt dazu, dass die relative Abweichung sehr groß ist, die aber nicht genauer betrachtet werden soll, da die Werte sehr dicht bei 0 liegen und dadurch die Aussagekraft der relativen

Wahrscheinlichkeit zu vernachlässigen ist.

Bei der Betrachtung der anderen beiden Testfälle (siehe Anhang A.1 und A.2), stellte sich heraus, dass die größte absolute Abweichung, in dem zuvor vorgestellten Datensatz, zu sehen ist. Demnach ist die maximal festgestellte absolute Abweichung 0.012, daher bleibt festzuhalten, dass die Abweichung gering genug ist, um die Ergebnisse als gleich zu betrachten. Außerdem konnte bewiesen werden, dass für die Bildung des Mittelwertes der Medianwert genommen werden sollte, da so einzelne starke Abweichung das gemittelte Ergebnis nicht verfälschen.

#### 4.4 Vergleich der Varianten

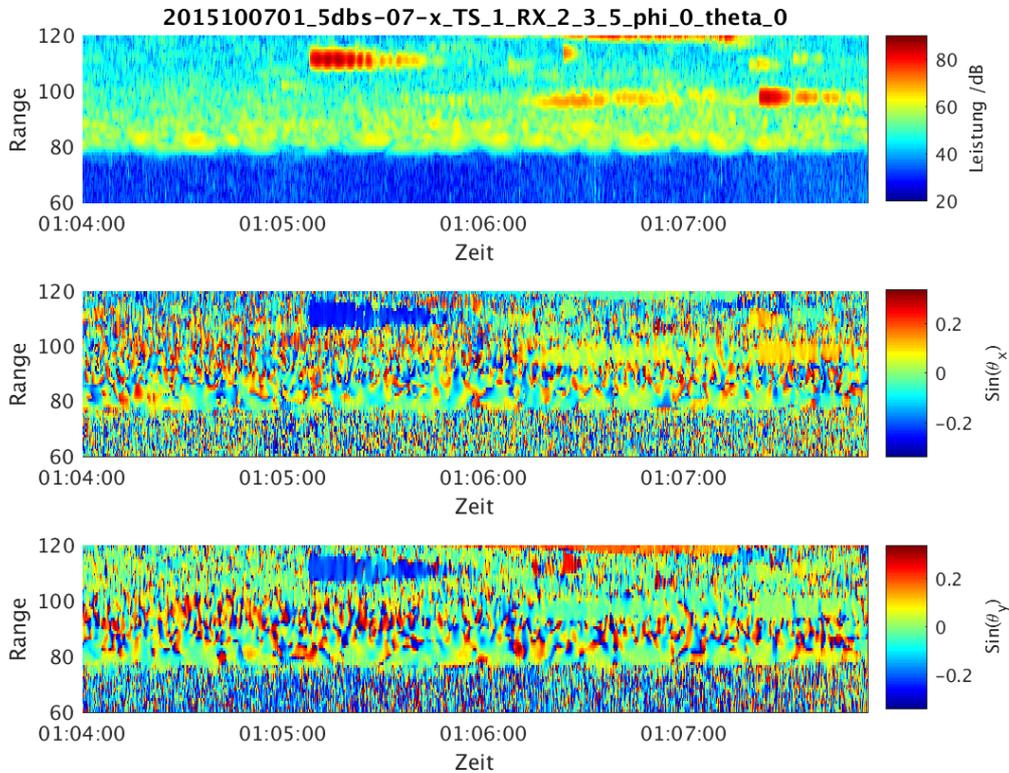


**Bild 4.7:** RTI-Diagramm vom 07.10.2015

Für die folgenden Untersuchungen wurde der Zeitraum vom 07.10.2015 1-2 Uhr gewählt, da in diesem mehrere sehr gut sichtbare Reflexionen vorhanden sind (siehe Grafik 4.7). In dem dargestellten Range-Time-Intensity (RTI)-Diagramm ist um 01:05:20 in einer Höhe von 108 bis 116 km sehr viel Leistung im Vergleich zum Hintergrund zu sehen. Aufgrund der Dauer und Beschaffenheit des Signals könnte es sich hierbei um einen Meteor handeln. Diese eignen sich, um die Korrektur der Beamrichtung zu überprüfen und haben im Regelfall einen vom Zenit abweichenden Einfallswinkel. Das RTI-Diagramm wurde über den Leistungsmittelwert der drei verwendeten Antennen erstellt.

Bevor die AoA-Funktionen zum Einsatz kommen, müssen die Daten aufbereitet werden. Dafür wurde der systembedingte Phasenversatz am Empfänger ausgemessen, um diesen zu berücksichtigen und herauszurechnen. Anschließend wird überprüft, ob es sich um einen geneigten Beam handelt, da zum besseren Vergleich alle Daten in den Zenit projiziert werden sollen. Für die Überprüfung der Verschiebung eignen sich starke Signale, wie sie in der Grafik 4.1 zu sehen sind. Ist diese Verschiebung erfolgreich, ist bei einem geneigten Beam ein vergleichbarer Einfallswinkel zu der

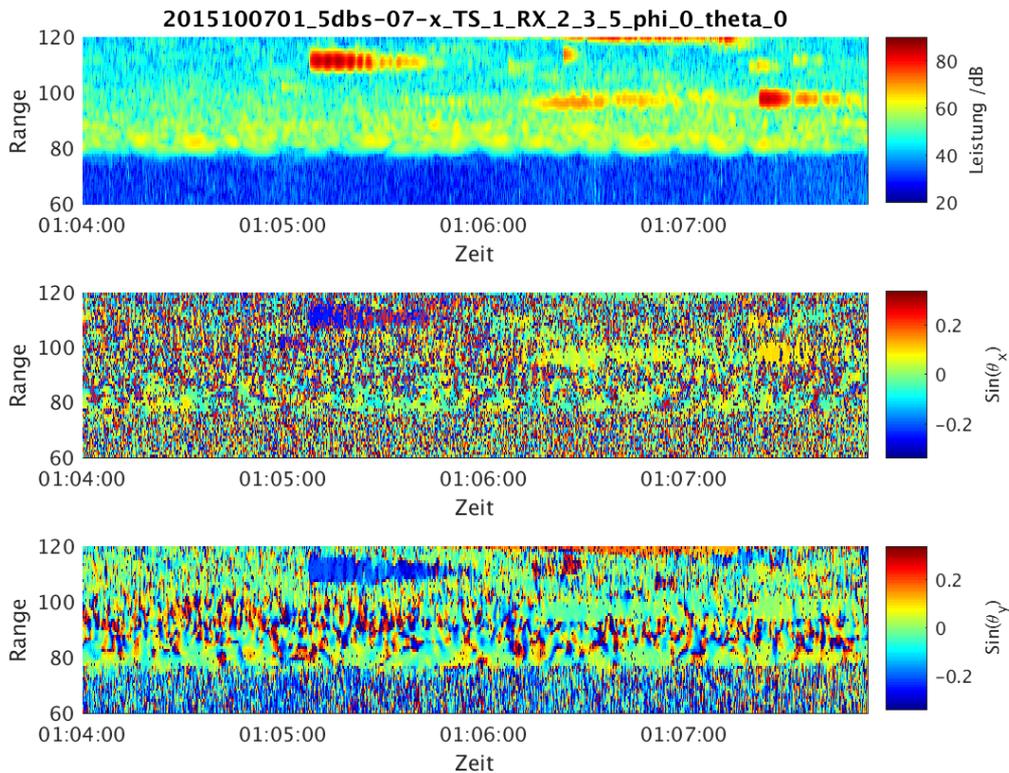
vertikalen Betrachtung zu erkennen. Abschließend wird der Gleichanteil der Daten berechnet und abgezogen bevor diese korrigierte Datenmatrix der Winkelberechnung übergeben wird.



**Bild 4.8:** Ergebnisse für  $\sin(\theta_x)$  und  $\sin(\theta_y)$  der numerischen AoA-Methode für den Datensatz vom 07.10.2015

Das Bild 4.8 zeigt die AOA-Untersuchung nach der numerischen Methode und die Grafik 4.9 die Ergebnisse der Variante mit dem nichtlinearen Modell. Es wurden Zeitmessungen für beide Varianten angestellt und auf ihre Rechenzeit untersucht, wobei sich herausstellte, dass die numerische Methode ca. 3 Minuten benötigt, um einen Datensatz zu untersuchen. Der nicht lineare Ansatz ist deutlich langsamer, dieser benötigt für eine Aufnahme von 3 Minuten über 4000 Minuten, also fast drei Tage lang. Die Dauer dieser Berechnung variiert allerdings sehr stark je nach Beschaffenheit des Signals. Für die Realisierung wurde die „lsqcurvefit“-Funktion von Matlab genutzt, welches ein nichtlinearer Lösungsalgorithmus nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate ist. Dabei konvergiert die Lösung, solange bis die Änderung der Lösung je Iteration einen Schwellwert unterschreitet, der Standardwert liegt bei  $10^{-6}$ . Zudem existiert ein Abbruchkriterium, wenn nach 200 Iterationen

die minimale Änderung nicht erreicht wurde. Darin begründet sich die stark variierende Laufzeit des Lösungsalgorithmuses, um eine Lösung für einen Datenpunkt zu finden. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass der „Levenberg-Marquardt“-Algorithmus verwendet wurde, da dieser, im Gegensatz zu den anderen verfügbaren Betriebsmodi, komplexe Werte akzeptiert.



**Bild 4.9:** Ergebnisse für  $\sin(\theta_x)$  und  $\sin(\theta_y)$  der nichtlinearen AoA-Methode für den Datensatz vom 07.10.2015

Aus dem Vergleich der Ergebnisse geht hervor, dass bei Signalen, die einen stark zenitabweichenden Einfallswinkel besitzen, dieselbe Richtung über beide Methoden bestimmt wurde. Anhand des dargestellten RTI-Diagramms ist ersichtlich, dass nur bei ausreichender Signalstärke die AoA-Winkel fehlerfrei bestimmt wurden. In den verrauschten Datenpunkten ist die Übereinstimmung der Methoden deutlich geringer. Bei dem numerischen Ansatz sind die resultierenden Strukturen ausgeprägter und wirken gleichartiger, wohingegen bei der Methode mit dem Modell in denselben Höhen und Zeitpunkten viele Richtungssprünge auftreten. Die nicht lineare Methode bietet den Vorteil, dass das Residuum zur näheren Betrachtung herangezogen werden kann. Daher erscheint es sinnvoll, bei ausreichender Vorkenntnis über die

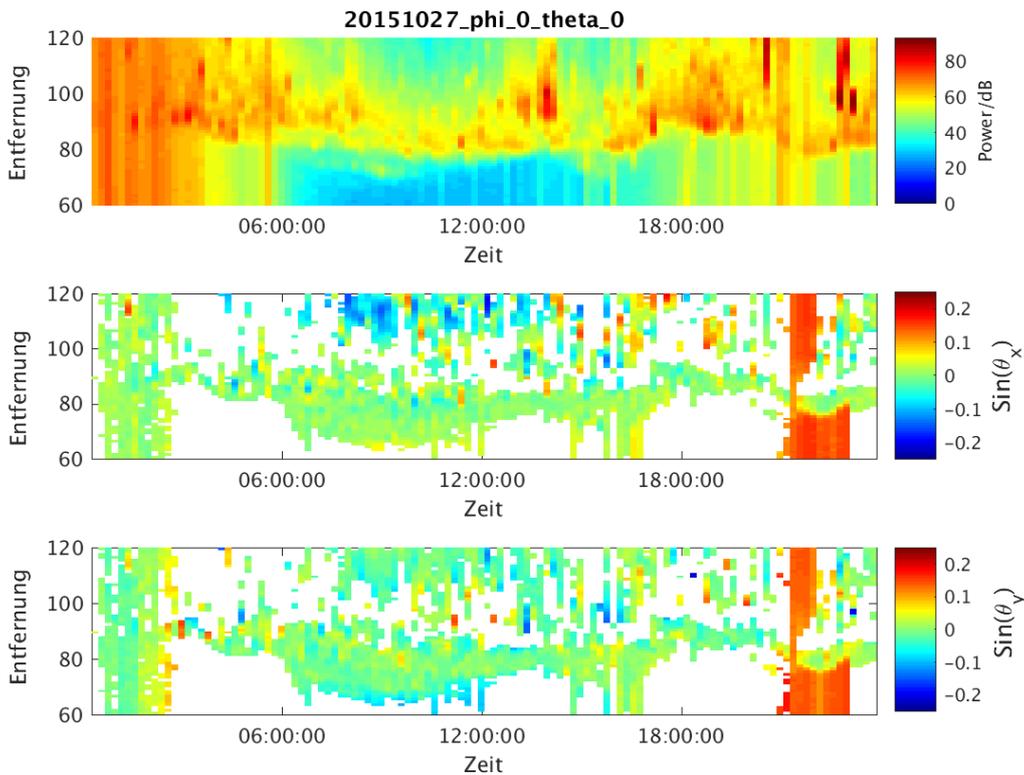
Beschaffenheit des Signals diese Methode zusätzlich zu verwenden, um die Ergebnisse zu verifizieren.

Für eine langzeitige Untersuchung eignet sie sich allerdings zum heutigen Zeitpunkt der Technik nicht, da die Ergebnisse des numerischen Ansatzes zwar bestätigt wurden, der zusätzliche Rechenaufwand allerdings zu groß ist. Für die langzeitige Untersuchung sollen zunächst aus allen verfügbaren drei Minuten Aufnahmen Tagesdiagramme erstellt werden, die anschließend über mehrere Tage gemittelt werden.

Unter der Voraussetzung, dass die Rechenleistung so zunimmt, dass diese Berechnung in einem angemessenen Zeitumfang erfolgen kann, sollte die nichtlineare Methode näher betrachtet werden, da das Modell die Möglichkeit beinhaltet, alle Basislinien und resultierenden Phasenversätze gleichzeitig zu übergeben. Bei der numerischen Methode besteht diese Möglichkeit auch, allerdings zeigten Untersuchungen darüber, dass ohne Berücksichtigung der Phasensprünge der Lösungsraum sehr weit eingeschränkt wird, woraufhin die resultierenden AoA-Winkel unglaublich erschienen. Da der ursprüngliche Quelltext der nichtlinearen Methode in Python geschrieben wurde und Matlab ein Vektor bzw. Matrizen optimiertes Programm ist, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Umsetzung in Python effizienter ist. Eine zeitliche Untersuchung über die Programmdauer in Python wurde nicht angestellt, da dieser Ansatz bei der Berechnung des Einfallswinkels von Meteoriten verwendet wird und die Signale nicht in vergleichbarer Form vorliegen.

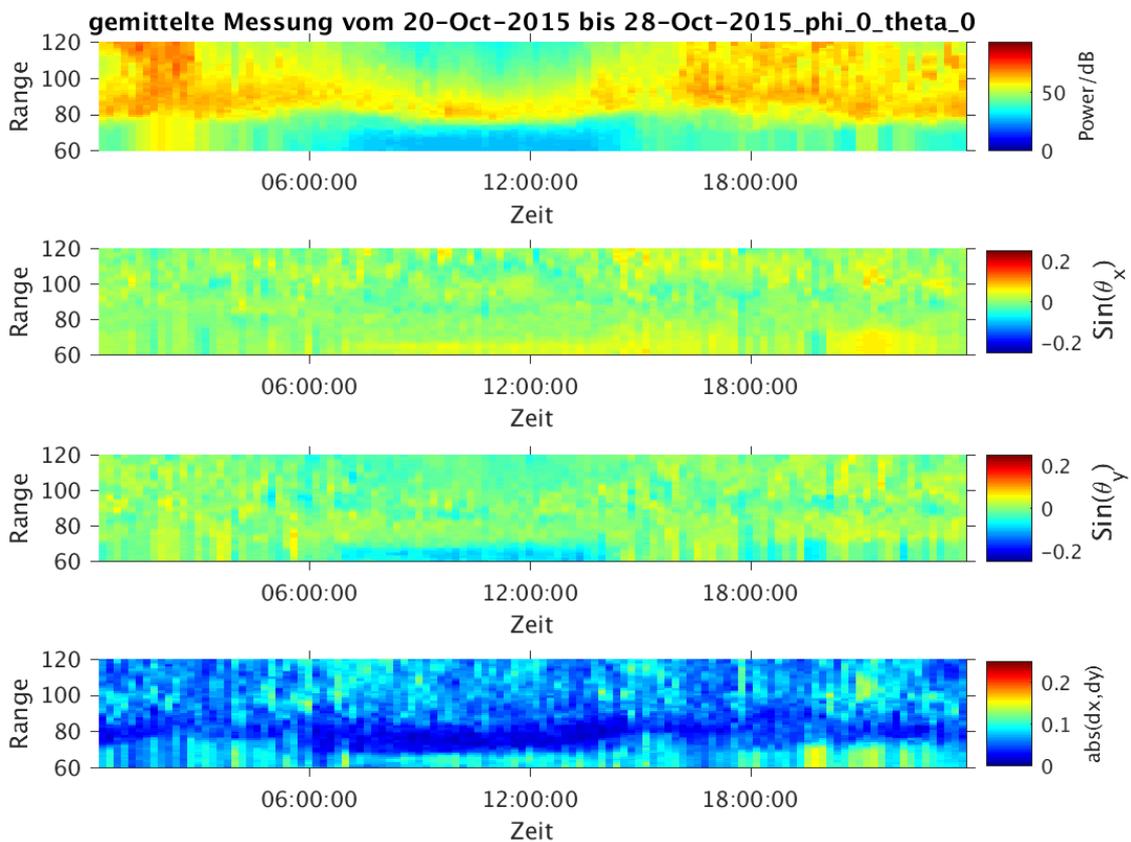
#### 4.5 Ergebnisse

Die Untersuchung der Einfallswinkel soll nicht nur über einzelne Aufnahmen von drei Minuten betrachtet werden, sondern daraus sollen gemittelte Werte über mehrere Tage ermittelt werden. Dafür wurde das interne Saura MF-Radar Archiv zur Hilfe genommen, denn darin sind tägliche RTI-Diagramme verfügbar, aus denen möglichst störungsfreie Zeiträume bestimmt wurden. Daher wurden die Zeiträume vom 19. Juli 2015 bis zum 25. Juli, 20. Oktober bis 28. Oktober und 24. November bis 29. November ausgewählt. Aus den Rohdaten, die aus fünf drei Minuten langen Aufnahmen bestehen, wurden Mittelwerte für jede Entfernung gebildet. Für die bessere Darstellung und um ein Teil des Rauschens zu unterdrücken, wurde die Standardabweichung innerhalb der Entfernungen untersucht. Erreichen diese einen Schwellwert von 0.3, wird der berechnete Winkel für die Entfernung nicht berücksichtigt. Diese gebildeten Mittelwerte werden anschließend zu einer Matrix zusammengesetzt, die den gesamten Tag abbildet. In der Grafik 4.10 werden die gemittelten Werte für die Leistung,  $\sin(\theta_x)$  und  $\sin(\theta_y)$  dargestellt.



**Bild 4.10:** Tagesdiagramm bestehende aus RTI,  $\sin(\theta_x)$  und  $\sin(\theta_y)$  vom 27.10.2015

Nach der Bildung der Tagesdaten wurden diese in eine Matrix überführt, die den gesamten Zeitraum beinhaltet. Anschließend erfolgte eine Mittelung über die Tage, wobei die NaN-Werte durch die Standardabweichung nicht betrachtet wurden. Die Abbildung 4.11 zeigt neben dem RTI-Diagramm der Leistung und den berechneten AoA-Winkeln die Abweichung der Winkel vom Zenit. Dafür wurde der Betrag der Winkel gebildet und anschließend aufsummiert. Der Vergleich zwischen der Abweichung und dem RTI-Diagramm zeigt, dass an dem Übergang zu einer stark ionisierten Schicht verhältnismäßig viel Leistung reflektiert wird und die rückkehrenden Wellen aus diesem Bereich sehr zenitnah eintreffen. In dem hier beispielhaft vorgestellten Zeitraum bildet sich eine stabile Schicht zwischen 76 und 85 km.

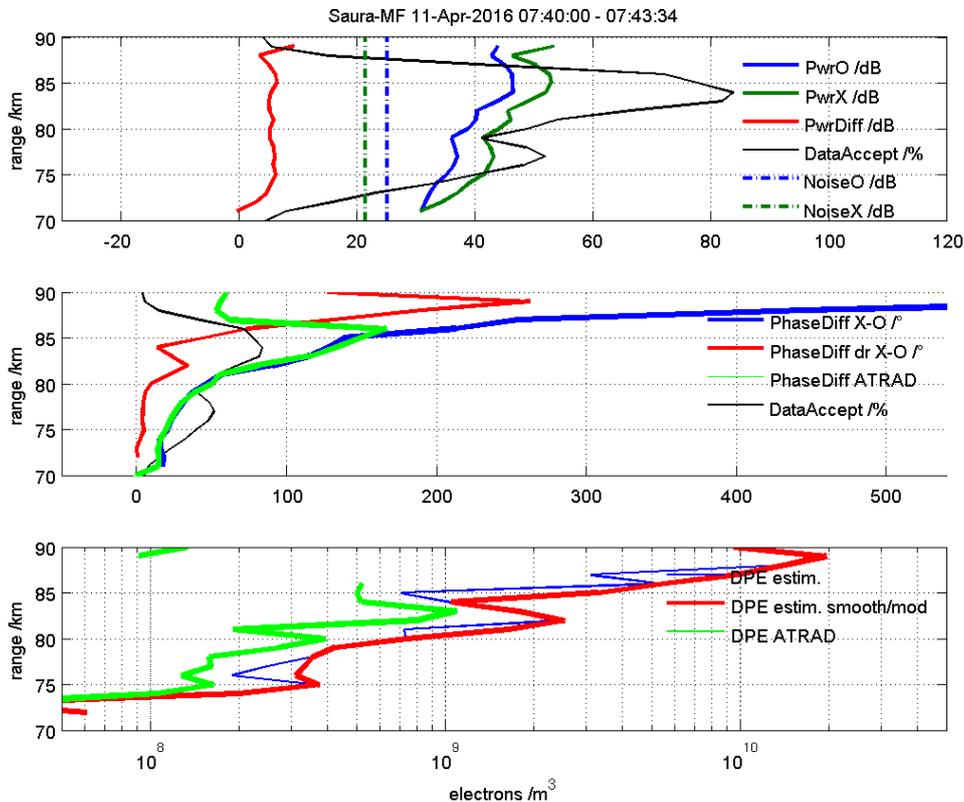


**Bild 4.11:** Gemitteltes Tagesdiagramm vom 20.10.2015 bis 28.10.2015 bestehend aus RTI,  $\sin(\theta_x)$ ,  $\sin(\theta_y)$  und dem Betrag aus  $\sin(\theta_x)$  und  $\sin(\theta_y)$

#### 4.6 Anwendung der AoA-Informationen

Um die Elektronendichtebestimmungen zu verbessern, sollen die Informationen der AoA-Funktion genutzt werden. Die Grafik 4.12 wurde von Dr. Toralf Renkwitz er-

stellt und dem Autor zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich um vorläufige Ergebnisse, die noch validiert werden müssen.



**Bild 4.12:** Bestimmte Leistungs-, Phasenprofile und daraus abgeleitetes Elektronendichteprofil für die Standardanalyse (grün) und AoA-bereinigte verbesserte Analyse (blau,rot)

In der oberen Grafik in der Abbildung 4.12 ist das Leistungsprofil der beiden Polarisationsarten (in blau für die gewöhnliche und in grün für die ungewöhnliche) zu sehen. Zu diesen wird der entsprechende Rausch-/ Störwert ermittelt und als gestrichelte Linie im gleichen Farbton dargestellt. Die rote Linie stellt die Differenz der gemessenen Leistungen dar.

Der in der Abbildung 4.12 in hellgrün dargestellte Verlauf stellt die Ergebnisse der kommerziellen Standardanalyse von Atmospheric radar systems (ATRAD) dar. Bei dieser werden ab einer Höhe von 85 km keine Ergebnisse für die Elektronendichte erzielt (siehe untere Grafik), daher ist der Ansatz, über die AoA-Informationen die Daten soweit vorzuselektieren, dass ein verlässlicher Phasenverlauf vorliegt. Wie anhand der mittleren Grafik zu sehen ist, widerspricht der über die Rohdaten ermittelte Phasenverlauf (in rot und blau dargestellt) dem der ATRAD-Analyse.

In der unteren Grafik ist zu erkennen, dass die geglätteten Werte des Differential Phase Experiment (DPE)-Experiments plausibler erscheinen, da zu erwarten ist, dass in dem Höhenbereich von 85 bis 90 km durch die vorhandene Ionisation eine höhere Elektronendichte erreicht wird.

## 5 Fazit

Da in der Atmosphäre aufgrund von Präzipitationsereignissen regelmäßig ein starker Anstieg der Elektronendichte beobachtet werden kann, war ein Ziel dieser Mastertesis, die Eventzeiträume zu detektieren, um von diesen die statistische Verteilung zu untersuchen. Der Algorithmus zum Finden der Events erwies sich als zuverlässig beim Erfassen der Zeiträume und Höhen. Um die Ergebnisse zu validieren, wurden die resultierenden Wahrscheinlichkeiten mit dem Auftreten von Sonnenflecken verglichen und Zeiträume vergleichbarer Zustände untersucht. Eine weitere Untersuchung der Ursachen ist allerdings vonnöten, da zwar eine Übereinstimmung mit den vorhandenen Sonnenfleckenzahlen gefunden wurde, diese aber alleine nicht ausreichen, um den Effekt zu erklären. Es besteht die Vermutung, dass ein Zusammenhang zu der Polarlichtaktivität bzw. den geomagnetischen Störungen besteht und die Verformung der Feldlinien des magnetischen Nordpols genauer betrachtet werden sollte. Dafür bedarf es allerdings umfangreicherer Daten, wie das Magnetfeld während der Eventzeitpunkte aussieht. Die Ergebnisse sollten genutzt werden, um diese mit anderen Untersuchungen zu vergleichen, um die geophysikalischen Prozesse besser nachvollziehen zu können.

Ein weiterer Aspekt der Untersuchung nach den Eventzeitpunkten ist, dass sich die Windberechnung über die DBS-Daten in diesen Zeiträumen als fehleranfällig erwies. Daher kann das Ergebnis genutzt werden, um diese Zeitpunkte bei der Berechnung auszuschließen und einer gezielten Nachanalyse zuzuführen.

Da sich während dieser Events in den Spektren ein wiedererkennbares Muster bildet, wurde gezeigt, wie sich das Spektrum während eines Events von dem eines typischen Radarechos unterscheidet. Das Ziel war es, den Horizontalwindbetrag während dieser Events abzuschätzen, um zur Qualitätsverbesserung der routinemäßig bestimmten Winde beizutragen. Der Betrag des Horizontalwindes während dieser Ereignisse konnte zwar abgeschätzt werden, allerdings konnte keine eindeutige Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus den Windbeobachtungen mittels Meteorradar festgestellt werden. Die über das Spektrum hergeleiteten Geschwindigkeiten waren oft deutlich größer, wobei die Ursache hierfür bisher nicht abschließend geklärt ist. Eine

Tatsache, die den Vergleich erschwert, ist die Abweichung der Länge der Zeitreihe, da ein gemittelter Wert von einer Stunde mit einem drei Minuten Wert verglichen wird. Da allerdings die Meteorwinde für diesen Zeitraum sehr zuverlässig erschienen, da eine Stunde davor und danach ähnliche Werte berechnet wurden, bestand die Vermutung, dass eine größere Übereinstimmung erzielt wird. Bei dieser Betrachtung wurde die Annahme getroffen, dass der Vertikalwind zu vernachlässigen ist, wobei allerdings nicht ausgeschlossen werden kann, dass im Spektrum nicht der neutrale Hintergrundwind, sondern auch das koordinierte Herabsinken der Teilchen erfasst wird. Eine ausführlichere Auswertung der verschiedenen Windgeschwindigkeiten könnte von wissenschaftlich großem Nutzen sein, wenn es gelingt die Abweichung soweit nachzuvollziehen, dass damit die Lücken in den DBS-Winddaten gefüllt werden können.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit war es, den Haupteinfallwinkel des zurückkehrenden Signals zu bestimmen, um die Ergebnisse etablierter Analyseverfahren z.B. zur Windbestimmung zu verbessern. Daher wurden zwei verschiedene Ansätze zur Berechnung des AoA vorgestellt, wobei sich herausstellte, dass der nichtlineare Ansatz für die Berechnung deutlich länger braucht im Vergleich zum numerischen Verfahren ohne bisher eindeutigen Zugewinn an Informationen für zenitnahe Reflektionsereignisse. Die ermittelten Richtungen für die partielle Rückstreuung aus der D-Schicht erscheinen beim nichtlinearen Ansatz zudem verrauschter. Anhand von synthetischen Daten konnte gezeigt werden, dass beide Methoden funktionieren und sich im Mittel der richtige Winkel findet, auch wenn einzelne Datenpunkte zu stark abweichenden Ergebnissen führten. Da der nichtlineare Ansatz in anderen Einsatzgebieten erfolgreich verwendet wird, wäre es wünschenswert gewesen, diese Methode auch beim Saura MF-Radar nutzen zu können. Das Problem mit der Laufzeit des Programms könnte gelöst werden, indem es in einer anderen Programmiersprache realisiert wird oder nur auf einen speziell vorselektierten kleineren Datensatz angewendet wird. Bei Meteoren zum Beispiel, bei denen über ein definierten Zeitraum angenommen werden kann, dass eine gleichbleibende Richtung vorliegt, sollte der Modelvergleich herangezogen werden um die Ergebnisse zu validieren.

Durch die Mittelung der AoA-Winkel über einen Zeitraum von mehreren Tagen im Oktober 2015, konnte nachgewiesen werden, dass sich in der Höhe von 80 km eine stabile Schicht bildet, bei der das Signal zenitnah zurückkehrt. Das gesamte Verfahren kann verbessert werden, indem die im Januar 2016 neu installierten Empfänger und damit zusätzlich verfügbaren Empfangsantennen genutzt werden. Diese erweitern den Eindeutigkeitsbereich, da hierbei ein kleineres gleichschenkliges Dreieck

aufgespannt wird und dadurch weniger Mehrdeutigkeiten auftreten.

Ein weiteres Ziel dieser Thesis war es, die Informationen der AoA-Untersuchung zu nutzen, um die Elektronendichtebestimmung zu verbessern. Da hierbei allerdings bisher nur vorläufige Ergebnisse erzielt wurden, müssen diese zunächst validiert werden. Da in dem hier gezeigten Beispiel die kommerzielle Standardanalyse ab einer Höhe von 85 km keine Ergebnisse liefert, ist es zu empfehlen diesen Ansatz weiter zu verfolgen, um einen möglichst schlüssigen Elektronendichteverlauf zu erzeugen, der für weitere wissenschaftliche Betrachtungen herangezogen werden kann.

## Literaturverzeichnis

- [Bau16] BAUMGARTEN, DR. G. , STRELNIKOVA, DR. I.: *PMSE und NLC*. Website, 2016. – Online erhältlich unter <https://www.iap-kborn.de/forschung/matrixgruppen/pmse-und-nlc/>; abgerufen am 4. Februar 2016.
- [Bee] BEET, E. A.: Heinrich Samuel Schwabe, 1789 - 1875. In: *Journal of the British Astronomical Association* 85, S. 532–533
- [Bil14] BILDUNGSSERVER KLIMAWANDEL: *Tropopause*. Website, 2014. – Online erhältlich unter <http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Tropopause>; abgerufen am 13. April 2016.
- [Cla15] CLAHSNEN, Matthias: *Detektion und Identifikation von mit Hilfe des MMA-RIA Konzepts gewonnenen Specular-Meteor-Echos*, Leibniz-Institute of Atmospheric Physics e.V. at University of Rostock, Bachelor Thesis, 2015
- [Com06] COMMUNICATIONS LABORATORY: *Bild Haupt- und Nebenkeule*. Website, 2006. – Online erhältlich unter [http://happy.emu.id.au/lab/rep/rep/9510/txtspace/9510\\_010.htm](http://happy.emu.id.au/lab/rep/rep/9510/txtspace/9510_010.htm); abgerufen am 13. April 2016.
- [Cre04] CREWELL, SUSANNE: *Vorlesungsunterlagen Radarmeteorologie*. Website, 2004. – Online erhältlich unter [http://www.meteo.physik.uni-muenchen.de/lehre/crewell/vorles/radarmet/radarmet\\_ss04\\_radargleichung.pdf](http://www.meteo.physik.uni-muenchen.de/lehre/crewell/vorles/radarmet/radarmet_ss04_radargleichung.pdf); abgerufen am 21. März 2016.
- [Fle90] FLEMING E. L., CHANDRA S. , BARNETT J. J. AND CORNEY M. : Zonal mean temperature, pressure, zonal wind, and geopotential height as functions of latitude. In: *Adv. Space Res.* (1990), 10, S. 11–59
- [Fra15] FRANCK, ANNIKA : *Ozon*. Website, 2015. – Online erhältlich unter <http://www.planet-wissen.de/natur/klima/klimawandel/pwieozon100.html>; abgerufen am 11. April 2016.
- [Gag90] GAGE, K. S.: Radar Observations of the Free Atmosphere: Structure and Dynamics. In: *American Meteorological Society* (1990), S. 534–565

- [Glo15] GLOBALISIERUNG FAKTEN: *Ozonloch*. Website, 2015. – Online erhältlich unter <http://www.globalisierung-fakten.de/ozonloch/>; abgerufen am 11. April 2016.
- [Hoc90] HOCKING W. , FUKAO S. , TSUDA T., YAMAMOTO M., SATO T., AND KATO S.: Aspect sensitivity of stratospheric VHF radio-wave scatterers, particularly above 15-km altitude. In: *Radio Science* 25 (1990), S. 613–627
- [IAP16a] IAP: *Bild Hauptgebäude IAP*. Website, 2016. – Online erhältlich unter <http://www.leibniz-gemeinschaft.de/institute-museen/einrichtungen/iap/>; abgerufen am 13. April 2016.
- [IAP16b] IAP: *Internetseite IAP*. Website, 2016. – Online erhältlich unter <https://www.iap-kborn.de/home/>; abgerufen am 13. April 2016.
- [IAP16c] IAP: *Photo Saura MF Radar*. Website, 2016. – Online erhältlich unter <https://www.iap-kborn.de/1/research/department-radar-soundings-and-sounding-rockets/>; abgerufen am 13. April 2016.
- [ITW] ITWISSEN: *Definition Antenne*. Website, . – Online erhältlich unter <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Antenne-antenna.html>; abgerufen am 11. April 2016.
- [Kar11] KARK, Klaus W.: *Antennen und Strahlungsfelder*. 4. Auflage. Vieweg und Teubner, Wiesbaden, 2011
- [Lau06] LAU E. M. , SCOTT E. P. , ET AL.: Statistical characterization of the meteor trail distribution at the South Pole as seen by a VHF interferometric meteor radar. In: *Radio Science* 41 (2006), S. 532–533
- [Mah00] MAHAFZA, Bassem R.: *Radar Systems Analysing and Design using Matlab*. 1. Aufl. Madison : Chapman & Hall/CRC, 2000. – ISBN 1–58488–182–8
- [MG92] MEINKE, Hans H. ; GUNDLACH, Friedrich-Wilhelm: *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik: Grundlagen / Komponenten / Systeme*. 5. Auflage. 1992
- [NAS15] NASA: *Sonnenfleckenzahlen*. Website, 2015. – Online erhältlich unter [http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/spot\\_num.txt](http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/spot_num.txt); abgerufen am 21. März 2016.
- [NOA15] NOAA: *Earth's magnetosphere*. Website, 2015. – Online erhältlich unter <http://www.swpc.noaa.gov/phenomena/earths-magnetosphere>; abgerufen am 6. April 2016.

- [Pro05] PROF. DR.-ING. W. WIESBECK: *Vorlesungsunterlagen Antennen und Antennensysteme*. Website, 2005. – Online erhältlich unter <http://download.prgm.org/ham/ant/wiesbeck-aas-05skript.pdf>; abgerufen am 30. März 2016.
- [Rei15] REID, IAIN MURRAY : MF and HF radar techniques for investigating the dynamics and structure of the 50 to 110 km height region: a review. In: *Progress in Earth and Planetary Science* (2015), 10
- [Ren08] RENKWITZ, Toralf: *Analysis and Optimisation of Medium Gain X-Yagi Antennas for the EISCAT 3D 237.5 MHz Incoherent Scatter Radar Active Array*, Leibniz-Institute of Atmospheric Physics e.V. at University of Rostock, Master Thesis, 2008
- [Ric05] RICHARDS, Mark A.: *Fundamentals of Radar Signal Processing* -. 1. Aufl. Madison : McGraw Hill Professional, 2005. – ISBN 978-0-071-77648-6
- [Rot95] ROTHAMMEL, Karl ; KRISCHKE, Alois (Hrsg.): *Rothammels Antennenbuch*. 11. Auflage. Franckh-Kosmos, Stuttgart, 1995
- [Sal09] SALZMANN, WIEBKE: *Vorlesungsunterlagen Radarmeteorologie*. Website, 2009. – Online erhältlich unter <http://www.physik.wissenstexte.de/polarlicht.html>; abgerufen am 21. März 2016.
- [Sat89] SATO, T.: Radar principles. In: *Handbook for MAP 30* (1989), S. 19–53
- [Sch03] SCHÖNWIESE, Christian-Dietrich: *Klimatologie - 27 Tabellen*. 3. wesentlich verb. und aktualisierte Aufl. Stuttgart : Ulmer, 2003. – ISBN 978-3-825-21793-8
- [Sko90] SKOLNIK, Merrill I.: *Radar Handbook*. 2. Auflage. 1990
- [Som12] SOMMER, Svenja: *Untersuchung dreidimensionaler Atmosphärenstrukturen mittels Radarinterferometrie*, Leibniz-Institute of Atmospheric Physics e.V. at University of Rostock, Master Thesis, 2012
- [SWP] SWPC: *Internetseite SWPC*. Website, . – Online erhältlich unter <http://www.swpc.noaa.gov/>; abgerufen am 11. April 2016.
- [Wet16] WETTER.DE: *Stratopause*. Website, 2016. – Online erhältlich unter <http://www.wetter.de/cms/wetterlexikon-stratopause-2400132.html>; abgerufen am 11. April 2016.

- [Wor12] WORMER,P.: *Bild sphärisches Koordinatensystem*. Website, 2012.  
– Online erhältlich unter [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spherical\\_polar\\_coordinates.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spherical_polar_coordinates.png); abgerufen am 13. April 2016.
- [Zec99] ZECHA, Marius: *Untersuchung der polaren sommerlichen Mesosphäre mit unterschiedlichen Radarverfahren im VHF-Bereich*, Leibniz-Institute of Atmospheric Physics e.V. at University of Rostock, Dissertation zum Dr.-Ing., 1999

## Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau der Erdschicht nach [Fle90] . . . . .	9
1.2	Ionosphärenschichten nach [Rot95] . . . . .	10
1.3	Hauptgebäude des Instituts [IAP16a] . . . . .	11
2.1	Sphärisches Koordinatensystem aus [Wor12] . . . . .	13
2.2	Skizze Haupt- und Nebenkeule aus [Com06] . . . . .	16
2.3	Prinzipskizze: links isotrope Rückstreuung; rechts Totalreflexion . . .	20
2.4	Prinzipskizze über den sichtbaren Teil des Windes in Abhängigkeit der Beamrichtung . . . . .	22
2.5	3D-Darstellung zur Bestimmung des dreidimensionalen Windfeldes über die DBS-Methode aus [Zec99] . . . . .	23
2.6	Bestimmung des Windes in der Höhe $h$ über die Antennen E1, E2 und E3 mit dem Spaced Antenna Verfahren aus [Zec99] . . . . .	25
2.7	Foto Saura MF-Radar [IAP16c] . . . . .	26
2.8	Antennenanordnung des Saura MF-Radars . . . . .	27
2.9	Strahlungsdiagramm des Saura MF-Radars in Draufsicht, dargestellt in Kugelkoordinaten . . . . .	28
2.10	Schnitt durch das Strahlungsdiagramm aus der Abbildung 2.9 bei einem Azimutwinkel von $50,5^\circ$ . . . . .	28
3.1	Eventzeitpunkt in den DBS Daten . . . . .	31
3.2	Programmablauf der Eventdetektion . . . . .	33
3.3	Aurora Sichtbarkeit dargestellt durch das Modell der SWPC aus [SWP] .	35
3.4	Gemittelte Eventwahrscheinlichkeit für den gesamten Zeitraum von 2002 bis 2015 . . . . .	36
3.5	Standardabweichung der Eventwahrscheinlichkeit für den gesamten Zeitraum von 2002 bis 2015 . . . . .	37
3.6	Frequenzspektrum vom 08.05.2015 . . . . .	38
3.7	Frequenzspektrum vom 14.05.2015 . . . . .	39
3.8	Frequenzspektrum vom 14.05.2015 mit Horizontalwind . . . . .	40
3.9	Frequenzspektrum vom 25.05.2015 mit Horizontalwind . . . . .	41
3.10	Frequenzspektrum vom 28.05.2015 mit Horizontalwind . . . . .	42
4.1	RTI-Diagramm vom 07.10.2015 . . . . .	43
4.2	Skizze eines Interferometers nach [Lau06] . . . . .	44
4.3	Antennenanordnung der Testdaten . . . . .	51
4.4	Ergebnisse für $\sin(\theta_x)$ und $\sin(\theta_y)$ der numerischen AoA-Methode bei ( $\phi = 90^\circ, \theta = 7^\circ$ ) und der dazugehörige Mittelwert . . . . .	52

4.5	Ergebnisse für $\sin(\theta_x)$ und $\sin(\theta_y)$ der nichtlinearen AoA-Methode bei $(\phi = 90^\circ, \theta = 7^\circ)$ und der dazugehörige Mittelwert . . . . .	53
4.6	Abweichung von $\sin(\theta_x)$ und $\sin(\theta_y)$ aus den Ergebnissen der vorgestellten AoA-Methoden für die Testdaten mit den Richtungsinformationen $(\phi = 90^\circ, \theta = 7^\circ)$ . . . . .	54
4.7	RTI-Diagramm vom 07.10.2015 . . . . .	55
4.8	Ergebnisse für $\sin(\theta_x)$ und $\sin(\theta_y)$ der numerischen AoA-Methode für den Datensatz vom 07.10.2015 . . . . .	56
4.9	Ergebnisse für $\sin(\theta_x)$ und $\sin(\theta_y)$ der nichtlinearen AoA-Methode für den Datensatz vom 07.10.2015 . . . . .	57
4.10	Tagesdiagramm bestehende aus RTI, $\sin(\theta_x)$ und $\sin(\theta_y)$ vom 27.10.2015	59
4.11	Gemittelttes Tagesdiagramm vom 20.10.2015 bis 28.10.2015 bestehend aus RTI, $\sin(\theta_x)$ , $\sin(\theta_y)$ und dem Betrag aus $\sin(\theta_x)$ und $\sin(\theta_y)$ . . .	60
4.12	Bestimmte Leistungs-, Phasenprofile und daraus abgeleitetes Elektromomentdichteprofil für die Standardanalyse (grün) und AoA-bereinigte verbesserte Analyse (blau,rot) . . . . .	61
A.1	Ergebnisse für $\sin(\theta_x)$ und $\sin(\theta_y)$ der numerischen AoA-Methode bei $(\phi = 285^\circ, \theta = 15^\circ)$ und der dazugehörige Mittelwert . . . . .	74
A.2	Ergebnisse für $\sin(\theta_x)$ und $\sin(\theta_y)$ der nichtlinearen AoA-Methode bei $(\phi = 285^\circ, \theta = 15^\circ)$ und der dazugehörige Mittelwert . . . . .	75
A.3	Abweichung von $\sin(\theta_x)$ und $\sin(\theta_y)$ aus den Ergebnissen der vorgestellten AoA-Methoden für die Testdaten mit den Richtungsinformationen $(\phi = 285^\circ, \theta = 15^\circ)$ . . . . .	75
A.4	Ergebnisse für $\sin(\theta_x)$ und $\sin(\theta_y)$ der numerischen AoA-Methode bei $(\phi = 45^\circ, \theta = 25^\circ)$ und der dazugehörige Mittelwert . . . . .	76
A.5	Ergebnisse für $\sin(\theta_x)$ und $\sin(\theta_y)$ der nichtlinearen AoA-Methode bei $(\phi = 45^\circ, \theta = 25^\circ)$ und der dazugehörige Mittelwert . . . . .	77
A.6	Abweichung von $\sin(\theta_x)$ und $\sin(\theta_y)$ aus des Ergebnissen der vorgestellten AoA-Methoden für die Testdaten mit den Richtungsinformationen $(\phi = 45^\circ, \theta = 25^\circ)$ . . . . .	77
A.7	Gesamtablauf DBS . . . . .	78
A.8	Programmablaufplan „Saura DBS“ . . . . .	79
A.9	Programmablaufplan „Saura DBS after“ . . . . .	80
A.10	Programmablaufplan „Saura DBS complete Data“ . . . . .	81
A.11	Programmablaufplan „Saura DBS create statistic“ . . . . .	82

## Tabellenverzeichnis

2.1	Saura MF-Radar Systemeigenschaften und Experimentparameter beim DBS Experiment . . . . .	29
-----	---	----

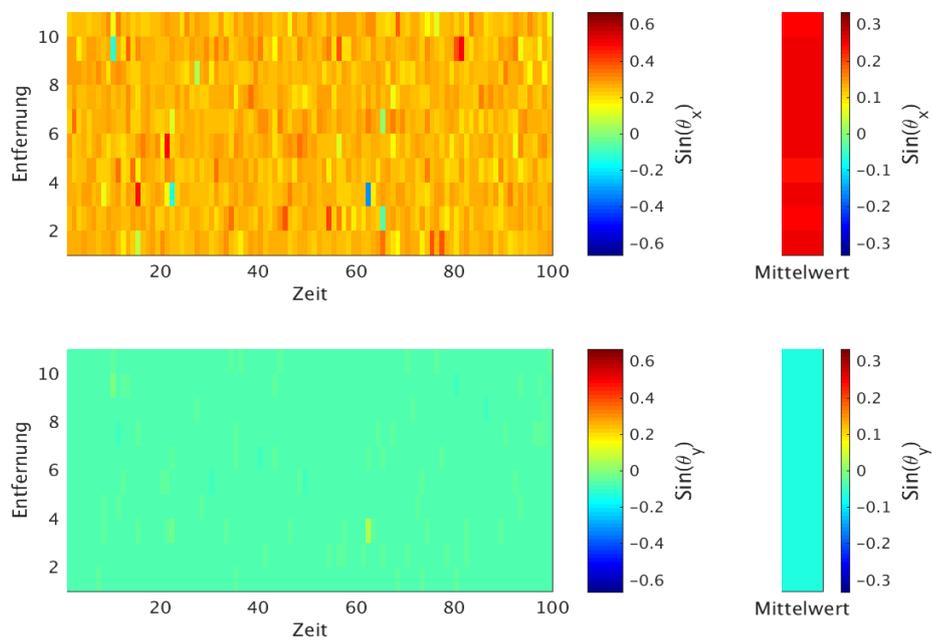
---

## Abkürzungsverzeichnis

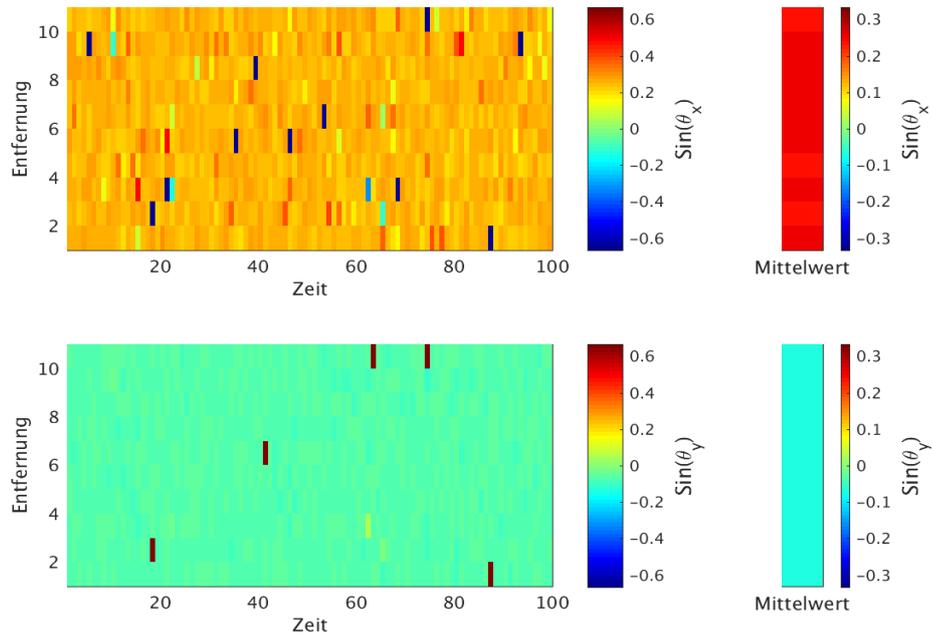
<b>AoA</b>	Angle of Arrival.....	25
<b>ALOMAR</b>	Arctic Lidar Observatory for Middle Atmosphere Research.....	12
<b>ATRAD</b>	Atmospheric radar systems.....	61
<b>CW</b>	Continuous Wave/ Dauerstrich.....	19
<b>DAE</b>	Differential Absorption Experiment.....	28
<b>DBS</b>	Doppler-Beam-Swinging.....	2
<b>DoA</b>	Direction of Arrival.....	43
<b>DPE</b>	Differential Phase Experiment.....	29
<b>FCKW</b>	Fluorchlorkohlenwasserstoffe.....	9
<b>IAP</b>	Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik.....	7
<b>LIDAR</b>	Light detection and ranging.....	12
<b>LOS</b>	line of sight.....	21
<b>MAoA</b>	Mean Angle of Arrival.....	43
<b>MF</b>	medium frequency.....	2
<b>NLC</b>	Noctilucent Clouds.....	9
<b>NOAA</b>	National Oceanic and Atmospheric Administration.....	34
<b>PMSE</b>	Polar Mesosphere Summer Echoes.....	9
<b>Radar</b>	Radio Detection and Ranging.....	2
<b>RTI</b>	Range-Time-Intensity.....	43
<b>SA</b>	Spaced Antenna.....	22
<b>SWPC</b>	Space Weather Prediction Center.....	34

## A Anhang

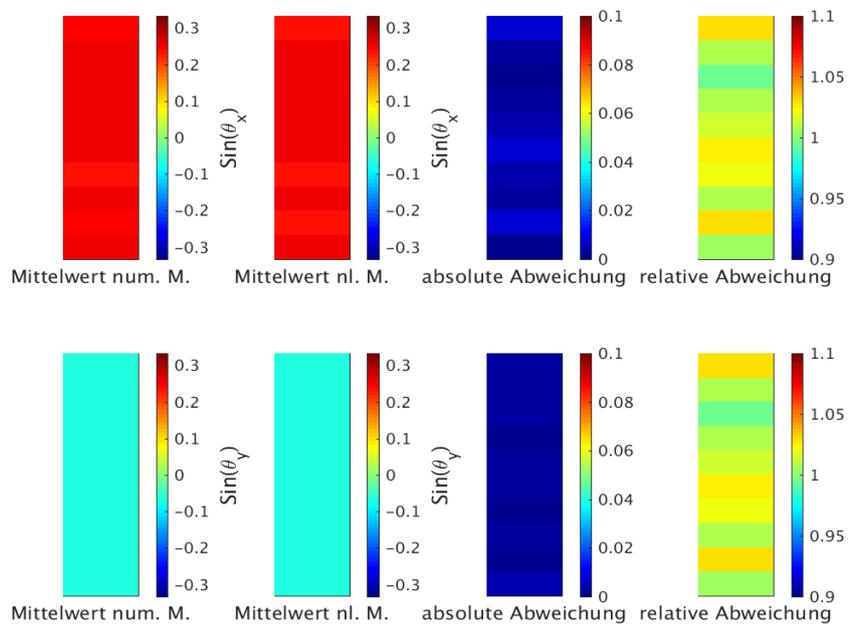
### A.1 Testdaten mit $(\phi = 285^\circ, \theta = 15^\circ)$



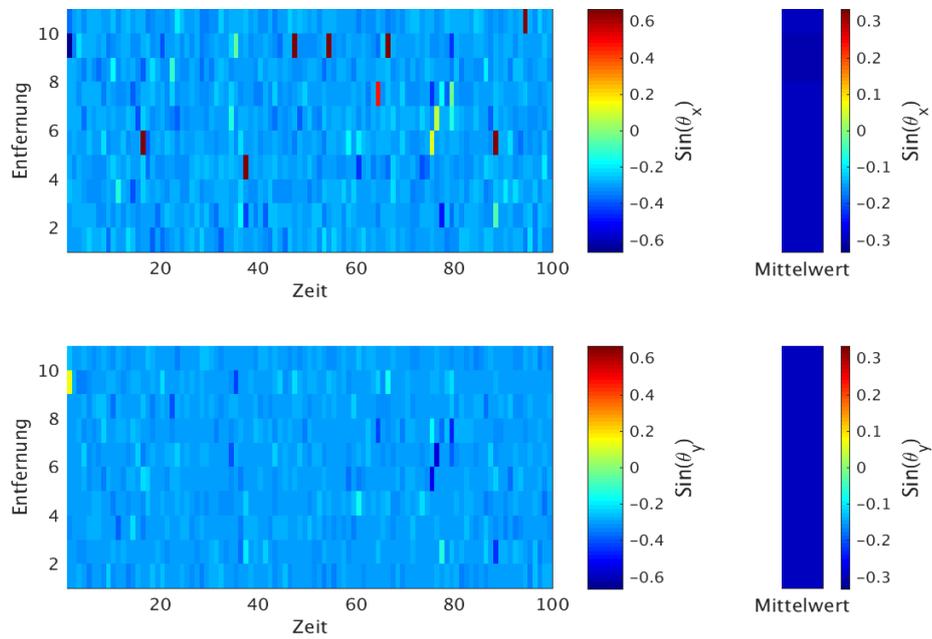
**Bild A.1:** Ergebnisse für  $\sin(\theta_x)$  und  $\sin(\theta_y)$  der numerischen AoA-Methode bei  $(\phi = 285^\circ, \theta = 15^\circ)$  und der dazugehörige Mittelwert



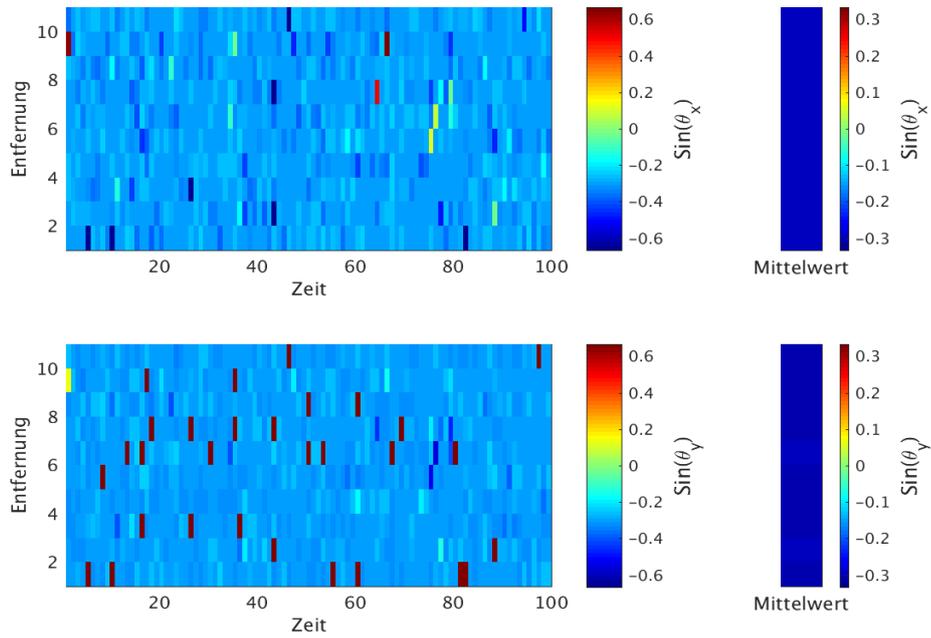
**Bild A.2:** Ergebnisse für  $\sin(\theta_x)$  und  $\sin(\theta_y)$  der nichtlinearen AoA-Methode bei  $(\phi = 285^\circ, \theta = 15^\circ)$  und der dazugehörige Mittelwert



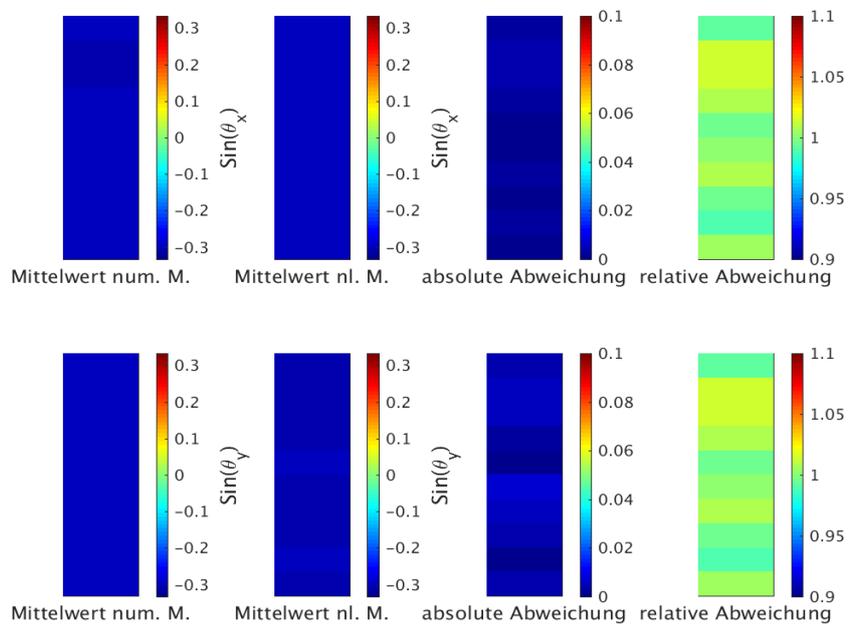
**Bild A.3:** Abweichung von  $\sin(\theta_x)$  und  $\sin(\theta_y)$  aus den Ergebnissen der vorgestellten AoA-Methoden für die Testdaten mit den Richtungsinformationen  $(\phi = 285^\circ, \theta = 15^\circ)$

A.2 Testdaten mit  $(\phi = 45^\circ, \theta = 25^\circ)$ 

**Bild A.4:** Ergebnisse für  $\sin(\theta_x)$  und  $\sin(\theta_y)$  der numerischen AoA-Methode bei  $(\phi = 45^\circ, \theta = 25^\circ)$  und der dazugehörige Mittelwert



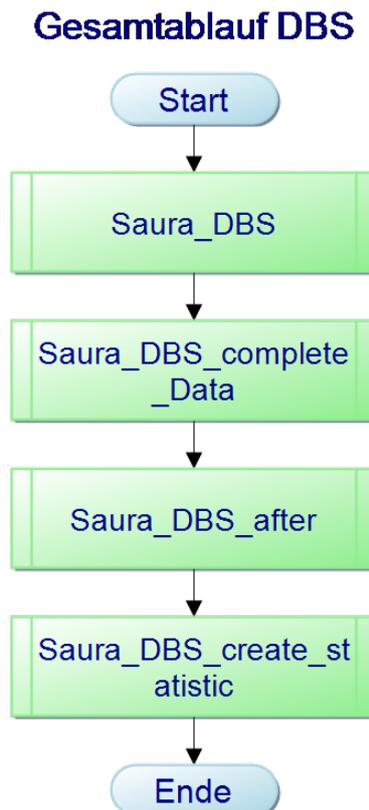
**Bild A.5:** Ergebnisse für  $\sin(\theta_x)$  und  $\sin(\theta_y)$  der nichtlinearen AoA-Methode bei  $(\phi = 45^\circ, \theta = 25^\circ)$  und der dazugehörige Mittelwert



**Bild A.6:** Abweichung von  $\sin(\theta_x)$  und  $\sin(\theta_y)$  aus den Ergebnissen der vorgestellten AoA-Methoden für die Testdaten mit den Richtungsinformationen  $(\phi = 45^\circ, \theta = 25^\circ)$

### A.3 Ablauf des Event-Detektion-Programms

Die Grafik A.7 zeigt die Reihenfolge in der die Skripte ausgeführt werden. Diese Form der Realisierung wurde gewählt, damit die Zwischenergebnisse separat abgespeichert und kontrolliert werden können. Die Bildunterschriften entsprechen den Namen der Skripte, wie sie auf dem beigelegtem Datenträger zu finden sind.



**Bild A.7:** Gesamtablauf DBS

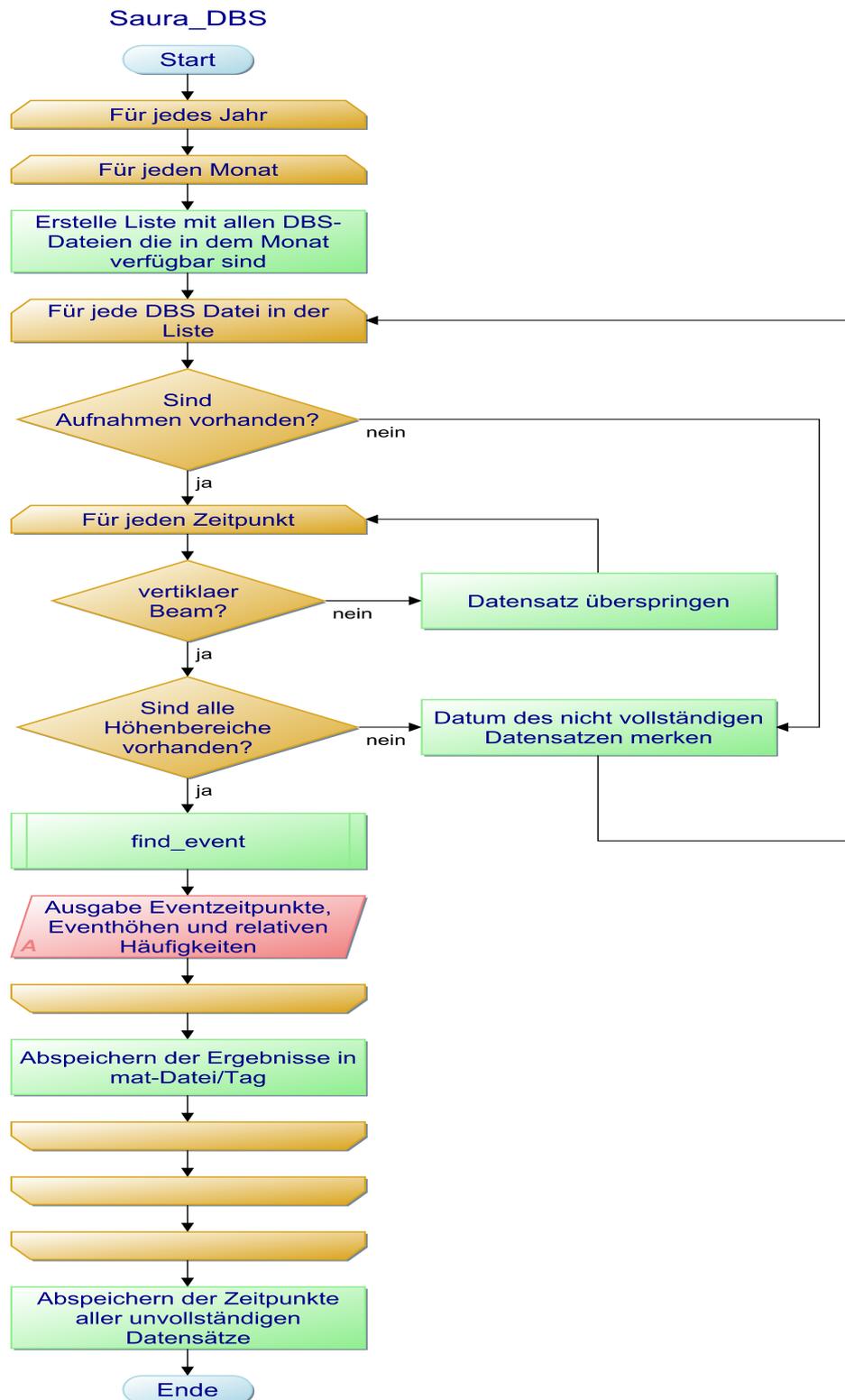


Bild A.8: Programmablaufplan „Saura DBS“

## Saura\_DBS\_after



**Bild A.9:** Programmablaufplan „Saura DBS after“

## Saura\_DBS\_complete\_Data



**Bild A.10:** Programmablaufplan „Saura DBS complete Data“

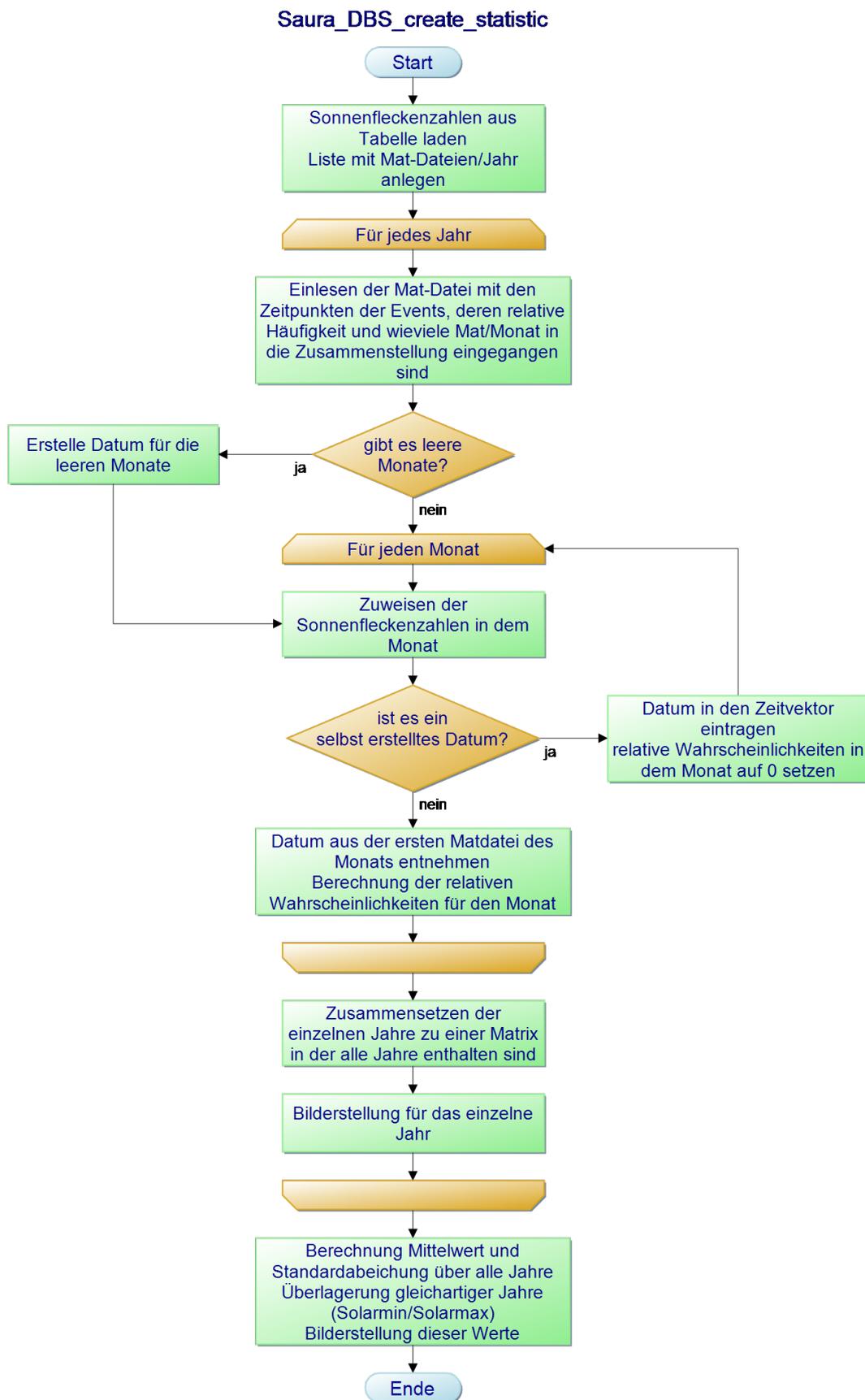


Bild A.11: Programmablaufplan „Saura DBS create statistic“

## Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die anderen Quellen im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, sind durch Angaben der Herkunft kenntlich gemacht. Dies gilt auch für Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen sowie Quellen aus dem Internet.

Ich erkläre ferner, dass ich die vorliegende Arbeit in keinem anderen Prüfungsverfahren als Prüfungsarbeit eingereicht habe oder einreichen werde.

Die eingereichte schriftliche Fassung entspricht der auf dem Medium gespeicherten Fassung.

Ort, Datum

Unterschrift