



Luftfahrtforschungsprogramm 2009-2012 (LuFo IV 2. Call)
innovativer Airport (iPort)

Teilprojekt 2: iPort WX, AP 2.2 Geringe Sichtweiten

Verbundprojekt:
Entwicklung eines zur Nebelerkennung und Nebelprognose
optimierten Millimeter-Radarsystems
'MIRA-IP'

Matthias Bauer-Pfundstein, Gerhard Peters, Bernd Fischer

Meteorologische Messtechnik GmbH, Elmshorn

Schlussbericht

Inhalt

1. Projektbeschreibung	4
1.1. Aufgabenstellung.....	4
1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	5
1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	6
2. Ergebnisse und Arbeitsbericht	6
2.1. Wie kann Nebel mit einem Wolkenradar erfasst werden?.....	6
2.2. Ertüchtigung des Radars zur Nebelmessung.....	8
2.2.1. Vorbemerkung.....	8
2.2.2. Antennenentwicklung	9
2.2.3. Algorithmenentwicklung zur Festechounterdrückung.....	16
2.3. Durchführung und Ergebnisse der iPort Messkampagne November 2011 – März 2012.....	18
2.3.1. Messaufbau und Hilfsinformationen.....	18
2.3.2. Ablauf der Messkampagne und Scan-Strategien	20
2.3.3. Datenstruktur eines Scans.....	20
2.3.4. Vergleich mit Web-Cam.....	21
2.3.5. Beziehung Z versus Sichtweite	22
2.3.6. Nutzung von Ceilometer Messungen?	25
2.3.7. Beobachtung der Nebelobergrenze mit SODAR.....	31
2.3.8. VAD Windmessungen	33
2.3.9. Advektion von Nebel	34
2.3.10. Welche Radarempfindlichkeit ist notwendig?	35
2.4. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	36
2.5. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	37
2.6. Voraussichtlicher Nutzen	37
2.7. Fortschritte bei anderen Stellen.....	37
2.8. Geplante Veröffentlichungen	37
<u>LITERATUR</u>	37

1. Projektbeschreibung

1.1. Aufgabenstellung

Das Luftfahrtforschungsprogramm 2009 -2012 (LuFo IV) zielt darauf ab, den Betrieb eines Flughafens sicherer, planbarer und insgesamt effizienter zu gestalten. Mit diesem Ziel wurde das in 3 Teilbereiche gegliederte Projekt iPort durchgeführt. Besondere Relevanz für die Sicherheit und für die effiziente Abwicklung des Luftverkehrs und des Flughafenbetriebs besitzt das Wettergeschehen, das im Teilprojekt (TP2) „iPORT-WX“ behandelt wurde. Dabei kommt der möglichst frühzeitigen Erfassung und Information über sich ändernde oder bereits geänderte Witterungsbedingungen eine hohe Bedeutung zu.

Mit dem Arbeitspaket 2.2 "Geringe Sichtweite" im TP2 sollte für Flughäfen ein Werkzeug für die Vorhersage von Betriebszeiten mit eingeschränkten Sichtbedingungen und naturgemäß geringeren Flugbewegungen entwickelt werden, um damit die Betriebsplanung unter solchen kritischen Wetterbedingungen optimieren zu können. Dazu sollte ein Nebelprognosemodell „PAFOG“ sowohl aus numerischen Modellwerten (COSMO-EU/COSMO-DE) als auch aus kontinuierlich vor Ort gewonnenen Messwerten von Wind, Temperatur und Feuchte in Bodennähe und im vertikalen Profil gespeist und laufend optimiert werden.

In diesem Zusammenhang sollte ein neuartiges Fernmessverfahren zur Erfassung von Nebel bzw. Sichtweiten erprobt werden. Als Sensor wurde hierfür ein hochempfindliches Millimeterwellen-Radar (MIRA-36) vorgeschlagen, das operationell bereits seit mehreren Jahren für die Detektion und Analyse von Wolken eingesetzt wird. Der grundsätzliche Vorteil der Verwendung von Millimeterwellen gegenüber herkömmlichen Verfahren (Beobachtungen, in-situ Messungen, optische Fernmessverfahren) zur Sichtweitenbestimmung ist die große Reichweite von Millimeterwellen in Nebel weit jenseits der Sichtbarkeitsgrenze. Damit besteht z.B. die Chance, die Schrägsichtweite auf dem Gleitpfad über Distanzen zu erfassen, die auch unter kritischen Bedingungen einen komfortablen Reaktionsraum für die Flugführung zulassen. Die potentiell große Reichweite des Verfahrens bietet darüber hinaus die Möglichkeit, die Advektion von Nebelfeldern zu verfolgen und daraus ggf. eine messwertgestützte Kurzfristprognose der lokalen Nebelentwicklung abzuleiten.

Die Aufgabe in diesem Projekt bestand zunächst darin, die grundsätzliche Machbarkeit und die technischen Randbedingungen dieses messtechnischen Ansatzes zu untersuchen. Eine der wichtigsten zu klärenden Fragen war, ob die Reflektivität von Nebel ausreicht, um unter den zu erwartenden Messbedingungen mit einer für die praktische Anwendung ausreichenden Wahrscheinlichkeit detektiert werden zu können. Im positiven Fall sollte weiter geklärt werden, ob über die qualitative Detektion hinaus – gegebenenfalls mit Hilfe von Zusatzinformationen – Sichtweiten mit ausreichender Genauigkeit aus Radarmessungen abgeschätzt werden können.

1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

METEK GmbH hat langjährige Erfahrung in der Entwicklung, dem Bau und Einsatz von verschiedenen meteorologischen Fernerkundungsverfahren. Hierzu gehört das Millimeterwellen-Radar MIRA-36, das zur Erfassung von Wolken verwendet wird und das nach entsprechenden Modifikationen, die weiter unten beschrieben werden, als aussichtsreicher Kandidat für Nebel- und Sichtweitenerfassung an Flughäfen betrachtet wird. Unter anderem ist ein Gerät dieses Typs seit mehreren Jahren beim DWD am Observatorium Lindenberg zur Erfassung von Wolken im Dauereinsatz. Während dieses Gerät mit einer vertikal gerichteten Antenne ausgerüstet ist, war für die geplanten Erprobungen ein

System mit einer steuerbaren Strahlrichtung erforderlich. Der Flughafen München stellte für das Wolkenradar einen Aufstellungsplatz an der südlichen Landebahn zur Verfügung, so dass praxisnahe Betriebsbedingungen gewährleistet waren.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Kernaktivität war der Betrieb eines modifizierten MIRA-36 in einer Messkampagne mit weiteren akustischen und optischen Fernmesssystemen auf dem Flughafen München von November 2011 bis März 2012. Die Zeit vom Projektbeginn bis zur Messkampagne wurde für Hard- und Softwareentwicklungen zur Vorbereitung der Messungen benötigt. Die Zeit nach der Messkampagne bis zum Projektende wurde zur Auswertung der Feldmessungen und Bewertung der Ergebnisse genutzt.

Das Wolkenradar MIRA-36 ist in normaler Betriebsart zur Nebelerfassung nicht geeignet, da der Einsatzpunkt (kürzeste Entfernung mit Messungen unter Einhaltung der Spezifikationen) bei etwa 150 m liegt. Die Mächtigkeit von Nebelschichten kann aber weniger als 50 m betragen. Als "einfachste" Lösung dieses Dilemmas wurde der Betrieb des Radars mit einer stark geneigten Antenne ins Auge gefasst, um auf diese Weise die minimale Messhöhe (proportional zum Sinus des Elevationswinkels) zu verringern. Als willkommener Nebeneffekt dieser Betriebsart, ergab sich dabei die Möglichkeit, den Radarstrahl parallel zum Gleitpfad auszurichten und so, als eine neuartige Information, Sichtweitenprofile auf dem Gleitpfad zu gewinnen.

Mit dieser starken Neigung der Antenne war allerdings gleichzeitig die größte Unwägbarkeit des Vorhabens verbunden. Abhängig von der variablen Tropfengrößenverteilung in Nebel können die Radarechos des Nebels sehr schwach sein, was mit der Gefahr verbunden ist, dass Bodenstrukturen von Nebenkeulen des Radarstrahls getroffen werden und zu starken Echos führen, die die Nebelechos überdecken. An die Qualität der Radarantenne sind daher extreme Anforderungen zu stellen.

Nach einigen Versuchen, die achsnahen Nebenkeulen der Originalantenne weiter abzusenken, wurde die Modifizierung der Antenne zur Erreichung der verbesserten Nebenkeulendämpfung schließlich von einem Unterauftragnehmer (Institut für Radioastronomie, Kharkov) erfolgreich durchgeführt. Diese Modifizierung kam allerdings für die Messkampagne im Winter 2010/2011 zu spät.

Parallel zu diesem "Hardwareansatz" wurden zur Erkennung und Elimination von Bodenechos effektivere Algorithmen entwickelt, die Signaturen der Dopplerspektren der Radarechos nutzen. Diese Algorithmen erwiesen sich als ausreichend effektiv, so dass Schrägsichtmessungen von Nebel auch mit der vorhandenen Originalantenne durchgeführt werden konnten. Dabei war die Qualität der Daten zumindest für die Ziele dieses Projekts mehr als ausreichend.

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Erfassung von Wolken mit Millimeterwellen-Radaren wurde im Forschungsbereich bereits in den 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts eingeführt. Die Überführung dieser Messtechnik in den operationellen Monitoring-Betrieb wurde zuerst von Moran et al. (1997) dokumentiert. Die zu erwartende Reflektivität von Nebel im Millimeterwellenbereich sowie die Beziehung zwischen Radarreflektivität und Sichtweite wurden von de Wolf et al. (1999) auf der Basis von in-situ Messungen der Tropfengrößenverteilung in advektivem Nebel in mehreren Feldkampagnen analysiert. Ähnliche Beziehungen wurden im Projekt FAM (The Fog Remote Sensing and Modeling Field Project, Gultepe et al. 2009) mit modernerer und umfangreicherer Messtechnik gewonnen. Nebelmessungen mit einem 8,6 mm Radar, das mit einem ähnlichen Scan-Schema, wie hier geplant, wurde, wurden von Hamazu et al. (2003) beschrieben. Der für diese Versuche gewählte Standort bei Hokkaido (43,03 °N, 144,20°E, 90

m Höhe über See) an der östlichen Pazifikküste von Japan war allerdings für diese Versuche besonders geeignet. Das Radar hatte dort freien Blick über die See, und die dort vorherrschenden maritimen Aerosole führen zu relativ großen Nebeltröpfchen, die leichter als kontinentaler Nebel mit Millimeterwellen-Radar zu detektieren sind.

Insgesamt legten die obigen Ergebnisse aber nahe, dass auch unter den am Flughafen München zu erwartenden Bedingungen Radarbeobachtungen von Nebel möglich sein müssten.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Der DWD war der wichtigste Partner für das Vorhaben, da dort das detaillierte Know-how über die Einsatzerfordernisse vorhanden ist. Vom DWD wurden wesentliche Hilfsdaten zur Interpretation der Radarmessungen ermittelt und zur Verfügung gestellt – u.a. durch den Betrieb eines SODAR-Systems sowie eines Laser-Ceilometers während der Felderprobung. Enge Zusammenarbeit wurde auch mit der DFS gepflegt, die die Planung der Messkampagne unterstützte, und uns bei der Festlegung der Messstrategie beraten hatte. Zu danken ist der Flughafen München GmbH für die Bereitstellung des Messplatzes und die Unterstützung bei allen logistischen Problemen.

2. Ergebnisse und Arbeitsbericht

2.1. Wie kann Nebel mit einem Wolkenradar erfasst werden?

Die vertikale Mächtigkeit von Nebelbänken ist häufig geringer als der Einsatzpunkt des Radars. (Der Einsatzpunkt ist die minimale Entfernung von mit dem Radar erfassbaren Zielen.) Dieser liegt für das MIRA-36 bei $r_{min} = 150$ m. Um auch flachere Nebelbänke erfassen zu können, muss das Radar unter kleinen Erhebungswinkeln betrieben werden. Beispielsweise erreicht man mit MIRA-36 bei 5° Erhebungswinkel eine minimale Messhöhe von 13 m über der Antenne. Die Schwierigkeit des Betriebs mit dieser Antennenrichtung ist dadurch gegeben, dass reflektierende Objekte am Boden das Nebelsignal überdecken können. Die Halbwertsbreite des Hauptstrahls der MIRA-36 Standard-Antenne beträgt zwar nur $0,58^\circ$, dennoch können durch Nebenkeulen höherer Ordnung Bodenstrukturen im Nahbereich getroffen werden, wie in Bild 1 schematisch angedeutet ist.

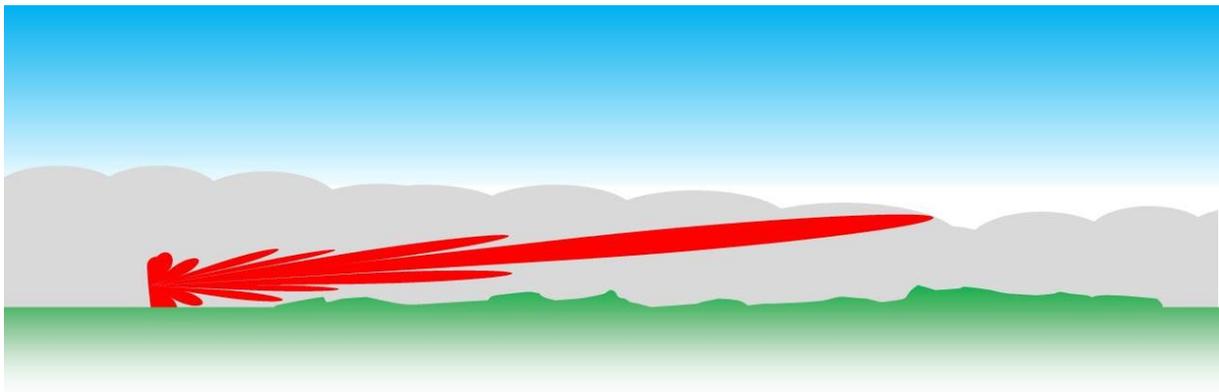


Bild 1: Rot: Schematisches Antennendiagramm mit Nebenkeulen. Strahlachse mit 5° Erhebungswinkel, Grün: Raue Erdoberfläche, Grau: Nebel, Blau: Freie Atmosphäre.

Da es sich bei Nebel um ein strahlfüllendes Target handelt, verläuft die empfangene Echoleistung proportional zu r^{-2} (r Entfernung). Dagegen verläuft die Echoleistung reflektierender Bodenstrukturen, soweit sie als Punktziele betrachtet werden können, proportional zu r^{-4} . Aber auch im Fall flächig verteilter Bodenechos nimmt die empfangene Echoleistung bei bodennaher Aufstellung des Radars auf Grund des Kulisseneffekts stärker als mit r^{-2} ab. Das bedeutet, dass vor allem im Nahbereich durch Bodenechos Probleme zu erwarten sind.

Zur Illustration ist in Bild 2 ein auf dem Flughafen München am 14. November 2011 03:39 UTC gemessenes Dopplerspektrum bei $\beta = 5^\circ$ Erhebungswinkel gezeigt. Die Entfernung r ist vertikal und die Dopplergeschwindigkeit v_r ist horizontal aufgetragen. Die spektrale Leistung (Dezibel, unkalibriert) ist farblich kodiert. Man erkennt bei der Dopplergeschwindigkeit $v_r = 0$ m/s einen schmalen Peak, der im Nahbereich (bis $r = 600$ m) sehr kräftig ist. Ferner sieht man einen schwächeren, breiteren Peak, dessen Geschwindigkeit mit der Entfernung variiert. Die Intensität dieses Peaks nimmt zwar ebenfalls mit zunehmender Entfernung ab, jedoch (bis zur Entfernung $r = 1200$ m) nicht so stark wie die des schmalen Peaks. Bei $r = 1200$ m verschwindet der breite Peak.

Der schmale bis zur Entfernung $r = 1200$ m sichtbare Peak ist auf unbewegliche Bodenechos zurückzuführen – in diesem Fall von der Grasnarbe des Flughafenareals und angrenzender Felder. Der breite Peak stellt dagegen das Nebelecho dar. Der Abbruch des Nebelechos bei $r = 1200$ m entspricht bei dem Elevationswinkel von 5° einer Höhe der Nebeloberkante von $z = 105$ m.

(Der Entfernungsbereich $r = 0,2 - 0,3$ km ist durch Nachschwingungen des Sendepulses gestört.)

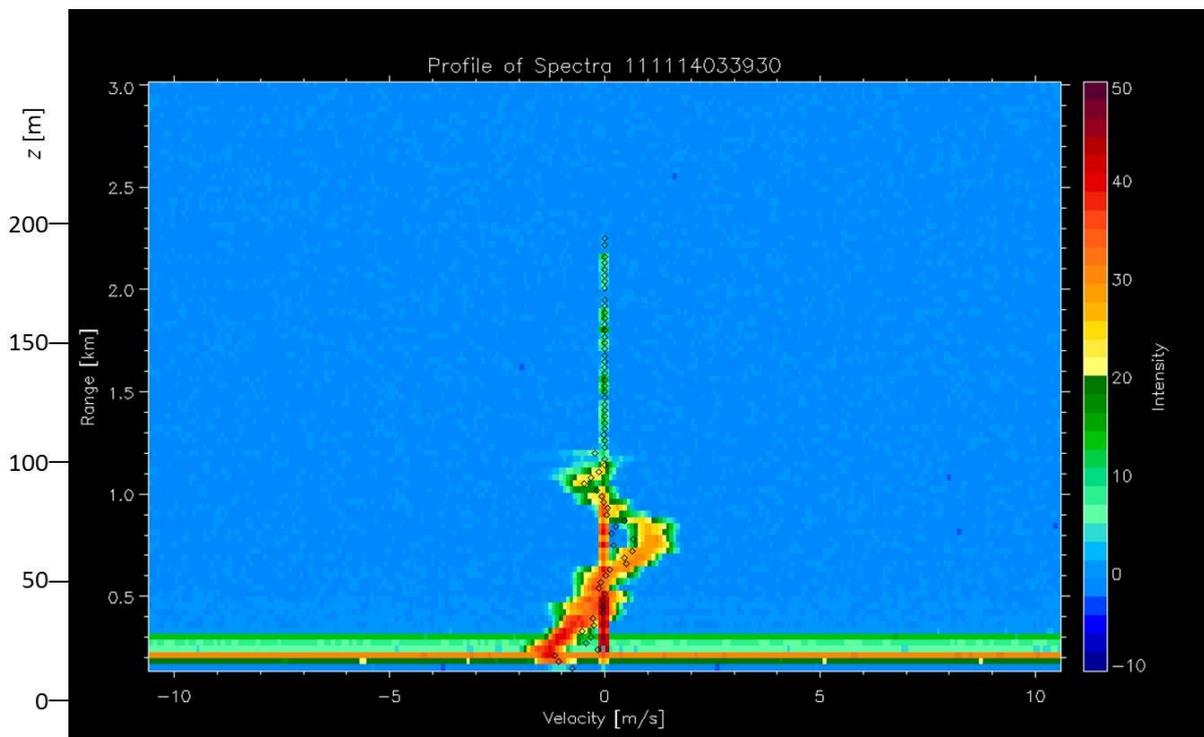


Bild 2: Profil von Dopplerspektren bei $\beta = 5^\circ$ Elevationswinkel. MUC, 2011/11/14 03:39 UTC. Vertikalachse: Entfernung r sowie Höhe $z = r \sin \beta$. Horizontalachse: Dopplergeschwindigkeit v_r . Farblich kodiert: Spektrale Intensität in Dezibel (nicht kalibriert).

Die Dopplerverschiebung und die Breite der Spektren können zur Trennung der Signalbeiträge genutzt werden.

Ein weiteres (hier nicht gezeigtes) Unterscheidungsmerkmal zwischen Nebel- und Bodenechos ist das LDR (Linear Depolarization Ratio): Das MIRA-36 besitzt zusätzlich zum normalen Empfänger (Ko-Kanal) einen zweiten Empfangskanal (Kreuz-Kanal) für elektromagnetische Wellen, deren Polarisation senkrecht zu der der gesendeten Wellen ist. Das Verhältnis der Leistung im Kreuz-Kanal zu der im Ko-Kanal wird als LDR bezeichnet. Ein Charakteristikum von Nebelechos ist, dass die Rückstreusignale exakt die gleiche Polarisation wie die Sendesignale aufweisen, so dass die Leistung im Kreuz-Kanal (ideal) Null ist ($LDR = 0$). Ursache ist die durch die Oberflächenspannung von Wasser erzwungene perfekte Kugelform von Nebeltröpfchen. Die unregelmäßigen Bodenstrukturen führen dagegen zu einer teilweisen Depolarisation des Rückstreusignals, so dass die Bodenechos sich durch ein erhöhtes LDR zu erkennen geben. Eine reale Antenne führt allerdings selbst zu einer gewissen Depolarisation der gesendeten und empfangenen Signale, so dass selbst bei wahren $LDR = 0$ ein kleiner Wert > 0 gemessen wird. Dieser wird als ICPR (Integrated Cross Polarization Ratio) bezeichnet und sollte möglichst klein sein, damit auch geringe LDR-Werte detektiert werden können. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass insbesondere bei Temperaturen oberhalb 0°C mit biologischen Targets (atmosphärisches Plankton) in der bodennahen Atmosphäre zu rechnen ist, die ebenfalls von Nebelechos zu trennen sind. Sie weisen keine signifikanten Unterschiede der Dopplerverschiebung oder der spektralen Breite im Vergleich zu Nebeltröpfchen auf. Allerdings sind sie nicht kugelförmig und bewirken daher ein erhöhtes LDR. Das Plankton-Problem ist nicht spezifisch für die Nebelmessung, sondern war bereits für die Standardanwendung des Wolkenradars zu lösen. Effektive Algorithmen zur Trennung dieser Signale waren daher bei Projektbeginn bereits vorhanden.

Die technische Herausforderung bestand darin, unter Ausnutzung der oben beschriebenen Signaleigenschaften Nebel- Boden- und Planktonechos unter möglichst allen Bedingungen, d.h. auch bei wesentlich schwächeren Nebelsignalen und bei verschwindenden Dopplerverschiebungen des Nutzsignals, voneinander zu trennen.

2.2. Ertüchtigung des Radars zur Nebelmessung

2.2.1. Vorbemerkung

Um die für die Nebelerfassung notwendige Messung unter kleinen Erhebungswinkeln zu ermöglichen, wurden zwei Wege parallel beschritten, die im Folgenden näher beschrieben werden. Zum einen wurde versucht, eine Antenne mit besserer Nebenkeulendämpfung und verbessertem ICPR zu entwickeln. Zum anderen wurde die Signalanalyse zur Festechoerkennung überarbeitet.

Die Antennenentwicklung war zwar schließlich erfolgreich, konnte aber für die iPort Messkampagne nicht rechtzeitig realisiert werden. Bei der näheren Untersuchung der Signaleigenschaften zeigte sich, dass die Signatur der Festechos so wohldefiniert ist, dass auch Symmetrieeigenschaften und höhere Momente der Peaks herangezogen werden konnten, um den Festechoanteil aus dem Gesamtsignal wirksam zu entfernen. Unter Berücksichtigung dieser Erfahrungen wurde die Signalverarbeitung weiterentwickelt, um Festechos effektiver zu filtern. Selbst im ungünstigen Fall, in dem sich die mittlere Dopplerverschiebung der Nebelechos und der Festechos nicht unterscheiden, hat sich dieses Verfahren als wirksam erwiesen und insgesamt zu einem Erfolg der Messkampagne geführt.

2.2.2. Antennenentwicklung



Bild 3: Untersuchte Antennen, Links alte Bauform (Antenne a), Rechts neue Bauform (Antenne b)

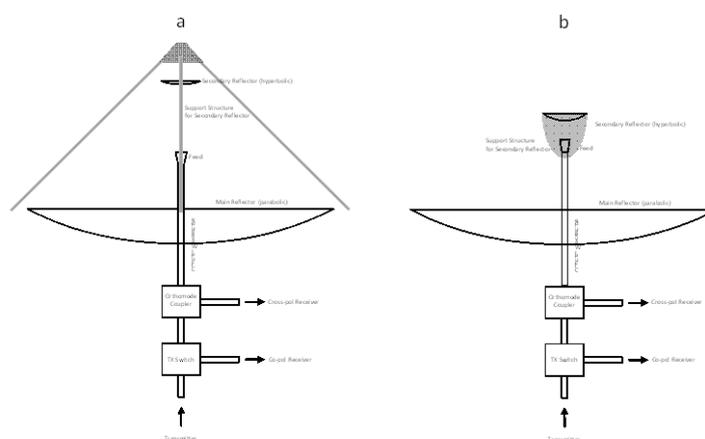


Bild 4: Untersuchte Komponenten für die ICPR-Analyse.

- a) Alte Form mit vier Streben zur Halterung des Sekundärspiegels
- b) Neue Form mit rotationsymmetrischer, mikrowellentransparenter Tragestruktur des Sekundärspiegels.

Die Fähigkeit des Radars kugelförmige von unregelmäßigen Targets zu unterscheiden, hängt vom ICPR ab, das für die polarimetrische Erkennung von Nebel möglichst klein sein sollte. Nach Chandrasekar und Keeler (1993) ist ICPR definiert durch

$$\text{ICPR} = \frac{\int |f_{HH}f_{VH} + f_{HV}f_{VV}|^2 d\Omega}{\int |f_{HH}^2 + f_{HV}^2| d\Omega} \quad \text{Gl. 2-1}$$

Dabei sind

$$f(\alpha, \beta) = \begin{pmatrix} f_{HH} & f_{VH} \\ f_{HV} & f_{VV} \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 2-2}$$

die komplexe Antennenstrahlmatrix, mit f_{HH} = Echosignal (jeweils Amplitude und Phase) im horizontal polarisierten Empfangskanal von einem horizontal polarisierten Sendesignal, f_{VH} = Echosignal im vertikal polarisierten Empfangskanal von einem horizontal polarisierten Sendesignal, f_{HV} = Echosignal im horizontal polarisierten Empfangskanal von einem vertikal polarisierten Sendesignal und f_{VV} = Echosignal im vertikal polarisierten Empfangskanal von einem vertikal polarisierten Sendesignal. Ω ist der Raumwinkel, α und β Azimut und Elevation Da die komplexen Elemente der Matrix relativ schwierig zu bestimmen sind, folgten wir einem Ansatz von Chandrasekar und Keeler (1993), eine obere Grenze, $\text{ICPR}|^{ub}$ zu bestimmen, für die an Stelle der komplexen Matrixelemente nur ihre Beträge benötigt werden:

$$\text{ICPR}|^{ub} = \frac{\int (|f_{VH}||f_{HH}| + |f_{VV}||f_{HV}|)^2 d\Omega}{\int (|f_{HH}|^2 + |f_{HV}|^2)^2 d\Omega} \quad \text{Gl. 2-3}$$

Die Standard-Antenne von MIRA-36 ist eine Cassegrain-Anordnung, bei der der Sekundärspiegel durch vier Aluminiumstreben getragen wird. Diese Streben sind im Azimut diagonal zu den Polarisierungsebenen des E- und H-Feldes angeordnet. Da diese Streben eine potenzielle Quelle für die Depolarisation der gesendeten und empfangenen Strahlung sind, wurde in der neuen Antennenkonstruktion -- ebenfalls eine Cassegrain-Anordnung -- auf diese Streben verzichtet und der Sekundärspiegel mit Hilfe einer rotationssymmetrischen kelchförmigen mikrowellentransparenten PTFE-Struktur über dem Primärstrahler montiert. Beide Antennenausführungen sind in Bild 3 und 4 dargestellt.

Potenzielle Komponenten (siehe Bild 4) und Mechanismen für nicht-verschwindendes ICPR sind

1. Der Orthomode-Koppler: Seine Funktion ist, die ko- und kreuzpolarisierten Komponenten des durch der zirkularen Wellenleiter geführten Feldes zu trennen und zu den entsprechenden Empfangskanälen zu leiten. Falls die Trennung nicht perfekt ist, wird ein gewisser Teil des kopolarisierten Feldes in den Kreuzkanal geleitet (und umgekehrt).
2. Der zirkulare Wellenleiter: Geringfügige Abweichungen von der Kreissymmetrie führen dazu, dass beim Durchlaufen des Wellenleiters ein Teil der Energie der kopolarisierten Welle in eine kreuzpolarisierte Welle transformiert wird (und umgekehrt).
3. Das Fernfeld des Primärstrahlers ist nicht perfekt linear polarisiert, sondern weist vor allem bei größeren Winkelabständen zur Strahlachse gewisse kreuzpolarisierte Komponenten auf.
4. Alle von der Kreissymmetrie abweichenden Strukturen im Strahlengang (z.B. die den Sekundärreflektor tragenden Streben) können zu gestreuten Feldern mit kreuzpolarisierten Komponenten führen.

Die unter 1. und 2. genannten Mechanismen unterscheiden sich bei der alten und neuen Antenne nicht prinzipiell. Um ihre möglichen Beitrag zum ICPR abzuschätzen, wurde die Primärstrahler der Antennen mit einer ebenen Reflektorplatte abgeschlossen und ein kontinuierliches Sendesignal mit Kokanal-Polarisation angelegt. Die Messung im Kreuzkanal ergab für beide Antennen $\text{LDR} < -50$ dB, was deutlich kleiner ist als das minimale beobachtete LDR von (Flüssigwasser) Wolkenechos

(~ -30 dB). Das legt den Schluss nahe, dass das ICPR hauptsächlich durch Elemente der Antennenstruktur bestimmt wird, die unter 3. und 4. beschrieben wurden. Obwohl die Konstruktion der neuen Antenne ein geringeres ICPR erwarten ließ, zeigten Messungen von Wolkenechos leider, dass dies nicht der Fall war, sondern dass das minimale beobachtete LDR nicht unter -22 dB lag, im Vergleich zu -30 dB bei Verwendung der alten Antenne.

Zur Untersuchung der Ursachen wäre eine vollständige Vermessung von $f(\theta, \phi)$ in einem Nahfeld-Antennenprüfstand wünschenswert gewesen. Dies wurde jedoch wegen der im 5stelligen Bereich liegenden Kosten verworfen, zumal nicht sicher war, ob der Dynamikbereich zur Charakterisierung der sehr kleinen Nichtdiagonal-Elemente ausreichend gewesen wäre. Ersatzweise wurden Messungen von Teilen der Antennencharakteristik im Fernfeld durchgeführt. Hierzu wurde ein Testsender mit linearer Polarization in bis zu 600 m Entfernung vom Radar aufgebaut. Die Polarisationssebene konnte durch mechanische Drehung des Senders um die Strahlachse präzise justiert werden.

Die Radarantenne war auf einer Zweiachs-Positioniereinrichtung montiert, mit der die Elevation ϑ und der Azimut φ gesteuert werden konnten. Die Strahlachse mit den Winkeln $\{\varphi_0, \vartheta_0\}$ zeigt auf den Testsender. Die Polar- und Azimutwinkel α und β des Antennendiagramms sind, wie in Bild 5 verdeutlicht, auf die Strahlachse bezogen. Die Empfangssignale wurden in $0,05^\circ$ -Schritten primär als Funktion von φ und ϑ aufgezeichnet, die mit den Winkeln des Antennendiagramms durch

$$\cos \beta = \sin \vartheta \sin \vartheta_0 + \cos \vartheta \cos \vartheta_0 \cos(\varphi - \varphi_0) \quad \text{Gl. 2-4}$$

und

$$\cos \alpha = \frac{\sin \vartheta - \sin \vartheta_0 \cos \beta}{\cos \vartheta \sin \beta} \quad \text{Gl. 2-5}$$

verknüpft sind. Wegen der geringen Strahlbreite der Antennen, wurden die meisten Messungen auf relativ kleine Polarwinkel beschränkt. Dann kann man Gl. 2-4 und Gl. 2-5 approximieren durch

$$\beta^2 = (\vartheta - \vartheta_0)^2 + (\varphi - \varphi_0)^2 \quad \text{Gl. 2-6}$$

und

$$\cos \alpha = \frac{\vartheta - \vartheta_0}{\sqrt{(\vartheta - \vartheta_0)^2 + (\varphi - \varphi_0)^2}} \quad \text{Gl. 2-7}$$

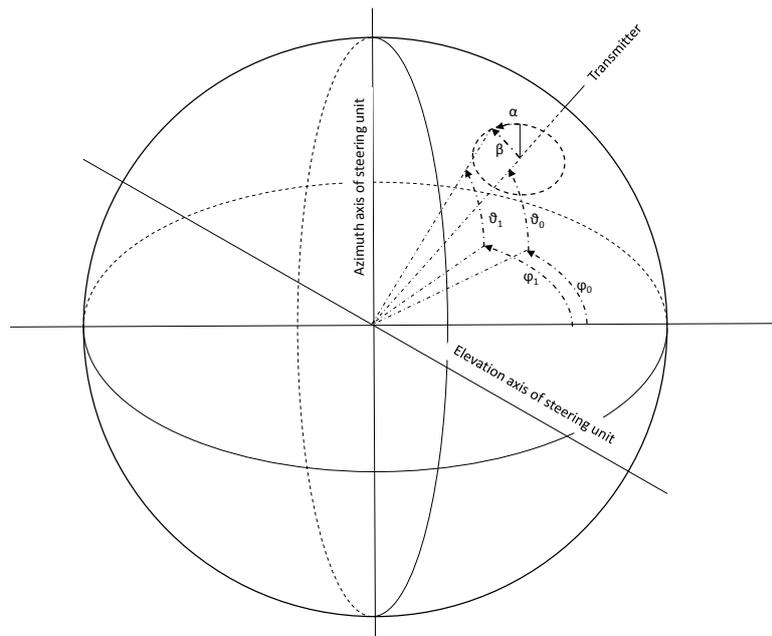


Bild 5: Winkeldefinitionen im Antennen-Testaufbau

Damit können die Winkel $\varphi - \varphi_0$ und $\vartheta - \vartheta_0$ der Zweiachs-Positionierung näherungsweise als kartesische Koordinaten des durch die Polarkoordinaten α und β beschriebenen Antennendiagramms interpretiert werden, siehe Bild 6.

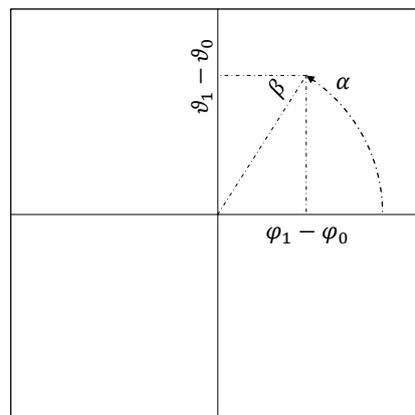


Bild 6: Genäherte Beziehungen zwischen den Winkeln $\varphi - \varphi_0$ und $\vartheta - \vartheta_0$ der Zweiachs-Positionierung und den Azimut- und Polarwinkeln α und β des Antennendiagramms.

Die folgenden Bilder zeigen ausgesuchte Elemente der Amplituden der Antennenstrahlmatrix als Funktion von $\varphi - \varphi_0$ und $\vartheta - \vartheta_0$. Jedes Feld ist in 10^4 Pixel aufgelöst mit einer Messfolge von 0,5 s pro Pixel. Die gesamte Messzeit für ein Feld betrug also ca. 1,5 h.

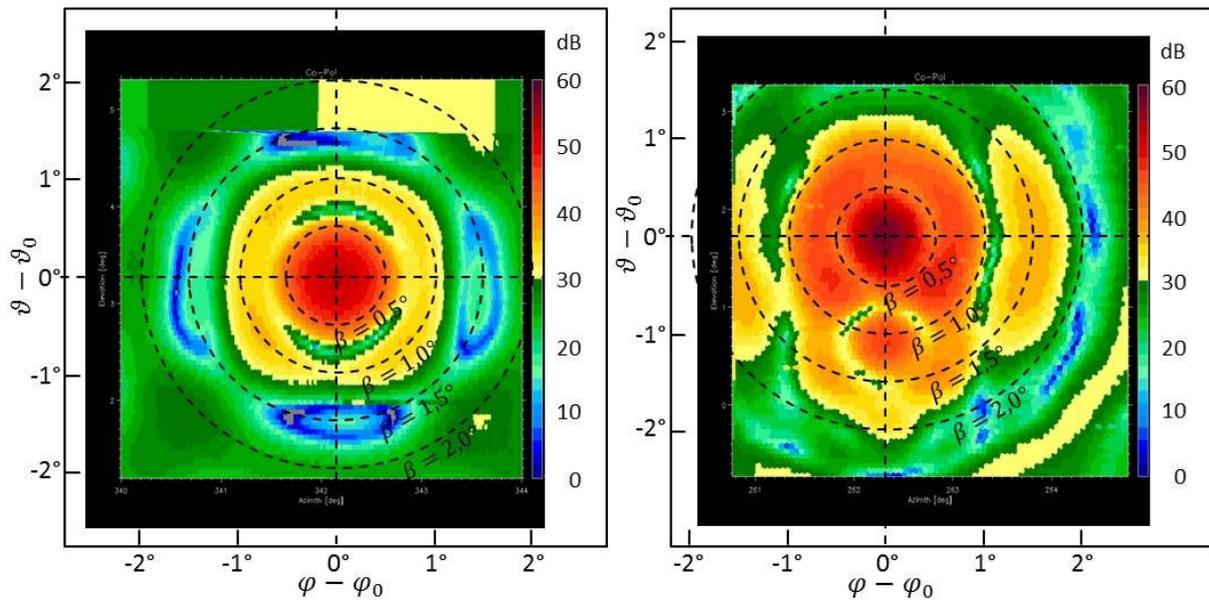


Bild 7: Winkelverteilung von $|f_{VV}|^2$. Links Antenne a, rechts Antenne b.

Die $|f_{VV}|^2$ -Felder in Bild 7 entsprechen den üblichen Antennen-Leistungsdiagrammen. Die Antenne a zeigt, wie zu erwarten, eine ausgeprägte 90° -Symmetrie bezüglich α . Die größten Nebenkeulen zweiter Ordnung werden hier bei $\beta = 1^\circ$ und $\alpha_i = 45^\circ + i \cdot 90^\circ$ beobachtet. Diese Azimut Winkel sind diagonal bezüglich der Polarisierungsebenen und parallel zu den Streben des Sekundärreflektors orientiert. Zusätzlich zur 90° -Symmetrie sind außerdem 180° -Symmetrien in der vertikalen und horizontalen Ebene (bei nichtvorhandener 90° -Symmetrie) erkennbar. Diese Struktur ist wahrscheinlich mit der Orientierung der E - und H -Ebene des Feldes zu erklären.

Antenne b weist ein weniger symmetrisches Muster auf. Lediglich in horizontaler Ebene ist eine Symmetrie erkennbar. Die fehlende vertikale Symmetrie ist möglicherweise auf Messfehler zurückzuführen, da die zur Messzeit nasse Wiese unter der Teststrecke zu Reflexionen geführt haben könnte. Es ist nicht klar, ob die Nebenkeule im SO-Sektor bei $\beta = 2,8^\circ$ sowie das Maximum im Süden bei $\beta = 1,2^\circ$ Artefakte auf Grund von Bodenreflexionen sind. Im Bereich $\beta = 0,75^\circ$ und $1,5^\circ$ sind jedoch deutlich stärkere Nebenkeulen zu beobachten, die vermutlich real sind.

Ein Blick auf Gl. 2-3 zeigt, dass für das ICPR die Kreuzgrößen f_{HV} und f_{VH} entscheidend sind. Die Winkelverteilung von $|f_{HV}(\vartheta, \varphi)|^2$ ist daher in Bild 8 dargestellt. Man sieht, dass die Werte im achsnahen Bereich, wie zu erwarten, relativ klein sind. Allerdings sind sie bei Antenne b bei fast allen Raumwinkeln größer als bei Antenne a. Die Beiträge der Winkelbereiche zum ICPR kann man am besten abschätzen, indem man die Winkelverteilung des Integranden im Zähler von Gl. 2-3 betrachtet, denn entscheidend sind die Produkte der Ko- und Kreuzelemente. In Bild 9 ist die Winkelverteilung des Integranden (normiert mit dem Nenner) dargestellt. Hier wird deutlich, dass die Integration über Ω bei Antenne b zu einem größeren ICPR führt.

Die numerische Integration ergab in der Tat

	ICPR ^{ub} [dB]
Antenne a	-26
Antenne b	-20

Die Werte stellen zwar obere Schranken dar, sind aber im Verhältnis zueinander wahrscheinlich realistisch. Die Winkelverteilung in Bild 9 gab allerdings keinen klaren Hinweis, auf welchen Konstruktionsfehler das die schlechtere ICPR zurückgeführt werden könnte.

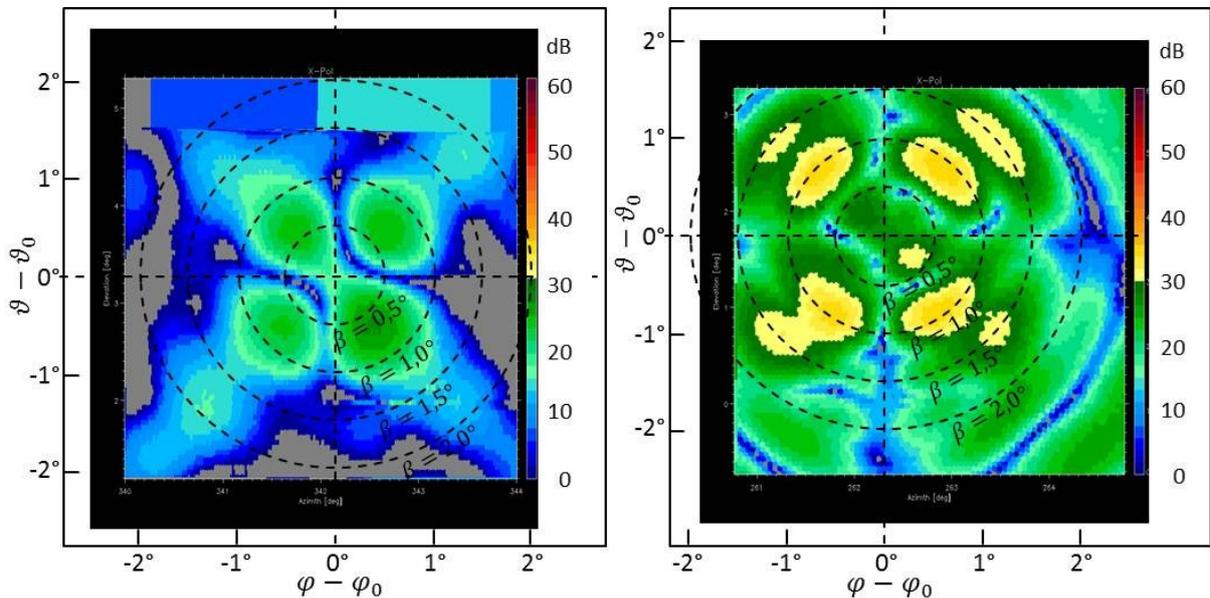


Bild 8: Winkelverteilung von $|f_{HV}(\vartheta, \varphi)|^2$. Links Antenne a, rechts Antenne b.

Ein weiterer Nachteil der neuen Antenne waren natürlich auch die stärkeren Seitenkeulen wegen der damit verbundenen Bodenechos. Um die Relevanz der Antenneneigenschaften für den praktischen Betrieb abzuschätzen, wurden zwei Wolkenradars des gleichen Typs mit einer Standardantenne und der neuen Antenne versehen und Seite an Seite (mit leicht versetzter Sendefrequenz) simultan betrieben. Als Standort bot sich hierfür das Observatorium des Max-Planck-Instituts für Meteorologie auf Barbados an. Das Wetter der Passatwindzone im tropischen Atlantik ist durch häufige kurzzeitige sehr lokale leichte Schauer gekennzeichnet, die häufig auch nur sehr kleine Tropfen enthalten und verdunsten, bevor sie den Boden erreichen. In der damit verbundenen extrem inhomogenen Reflektivitätsverteilung werden unerwünschte Antenneneigenschaften besonders deutlich sichtbar.

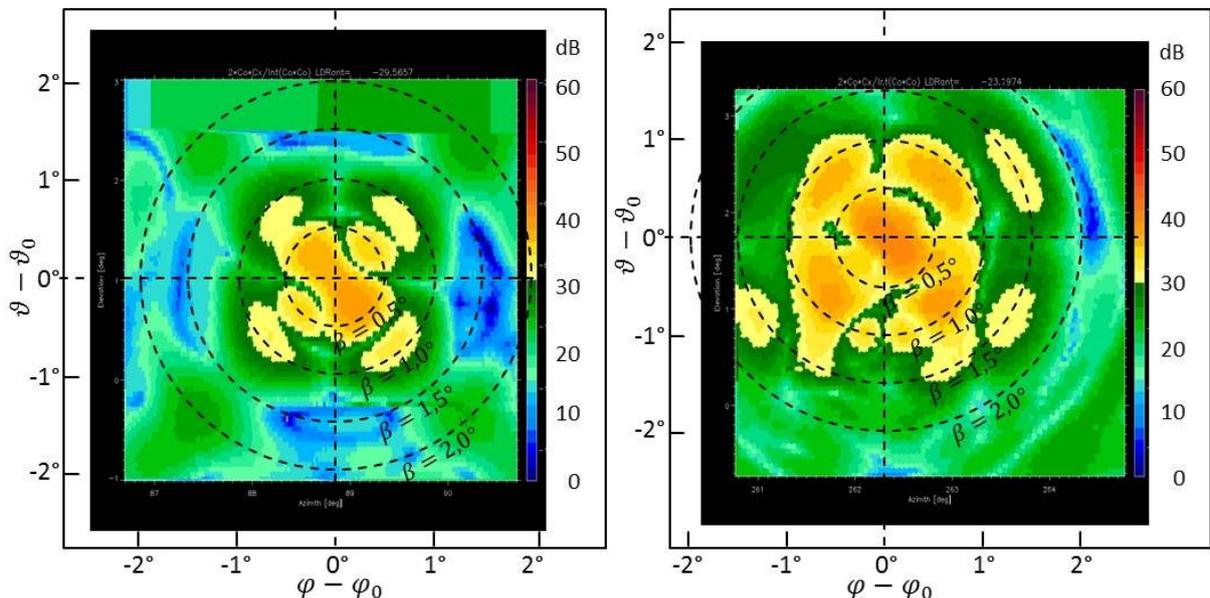


Bild 9: Winkelverteilung von

$$\left(|f_{VH}(\vartheta, \varphi)| |f_{HH}(\vartheta, \varphi)| + |f_{VV}(\vartheta, \varphi)| |f_{HV}(\vartheta, \varphi)| \right)^2 / \int |f_{HH}^2(\vartheta, \varphi) + f_{HV}^2(\vartheta, \varphi)|$$

Links Antenne a, rechts Antenne b.

Bild 10 zeigt Zeit-Höhenschnitte der Dopplergeschwindigkeit der beiden Geräte vom gleichen Zeitraum während des Durchgangs eines solchen Mikroschauers. Beide Antennen waren vertikal gerichtet. Die Geschwindigkeiten werden nur dargestellt, wenn Echosignale oberhalb einer definierten Detektionsschwelle empfangen werden. Die räumlichen Strukturen dieser Detektionsschelle sowie die räumliche Verteilung der Dopplergeschwindigkeiten stimmen überwiegend überein. Ein wesentlicher Unterschied ist das kontinuierliche Signal-Band unterhalb 1500 m, das nur mit der neuen Antenne gesehen wird. Dabei handelt es sich nicht um atmosphärische Echos sondern sehr wahrscheinlich um Sea Clutter, also Echos von der rauen Seeoberfläche, die von achsfernen Nebenkeulen getroffen wird. Hier mag die etwas unterschiedliche Aufstellung der Antennen eine entscheidende Rolle gespielt haben. Nur die neue Antenne hatte direkte Sichtverbindung zur Seeoberfläche in der Nähe. Aus dieser unterschiedlichen Echostruktur kann also nicht unbedingt auf unterschiedliche Antennenqualitäten geschlossen werden. Ein weiterer Unterschied ist aber zwischen 17:30 und 17:50 erkennbar. Oberhalb von 3000 m werden mit der neuen Antenne zunächst Geschwindigkeiten von bis zu 10 m/s in Richtung Radar und später Geschwindigkeiten mit ähnlichem Betrag jedoch entgegengesetztem Vorzeichen gemessen. Diese nur mit der neuen Antenne beobachteten Strukturen sind wahrscheinlich mit achsfernen Seitenkeulen zu erklären, die auf einen herannahenden stark lokalisierten Schauer treffen. Die Radialkomponente v_r setzt sich dann zusammen aus der Windgeschwindigkeit v_h und der Fallgeschwindigkeit der Regentropfen v_t gemäß

$$v_r = v_h \sin \beta + v_t \cos \beta \quad \text{Gl. 2-8}$$

Dabei ist β der Neigungswinkel der Nebenkeule.

Beim Durchgang des Schauers um 17:35 wird dieser von der vertikalen Hauptkeule getroffen und die Dopplergeschwindigkeit wird durch die (kleine) Fallgeschwindigkeit der Nieseltropfen dominiert (Die Fallgeschwindigkeit ist durch Konvektion überlagert). Nach Durchgang des Schauers wird dieser von der windabwärts gerichteten Nebenkeule getroffen, so dass vom die Radialkomponente

$$v_r = -v_h \sin \beta + v_t \cos \beta \quad \text{Gl. 2-9}$$

gemessen wird.

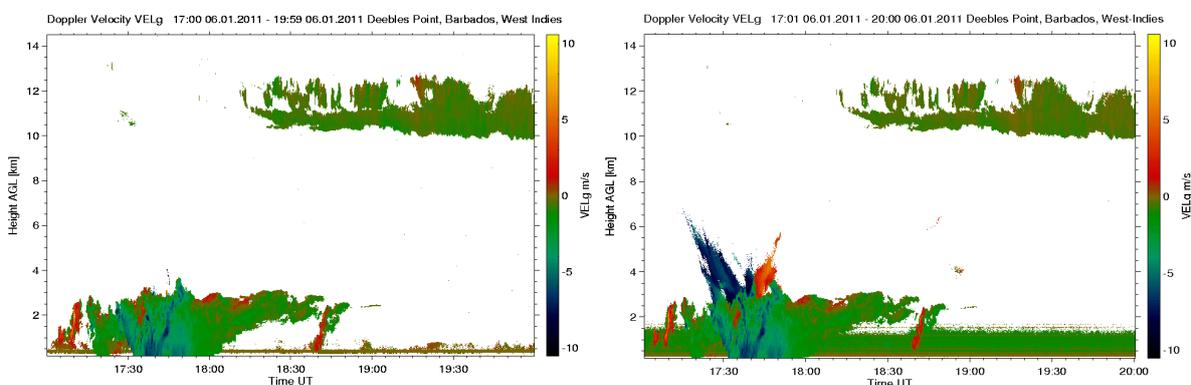


Bild 10: Parallelbetrieb von zwei MIRA-36 Systemen mit alter und neuer Antenne.

Aufgrund dieser beunruhigenden Beobachtung wurde eine zweite Freifeldmessung der neuen Antenne durchgeführt, in der auch größere β -Bereiche erfasst wurden. Um die Messzeit in Grenzen zu halten wurde dafür α auf den in Verdacht geratenen Bereich der H -Ebene eingeschränkt. Das Ergebnis ist in Bild 11 gezeigt.

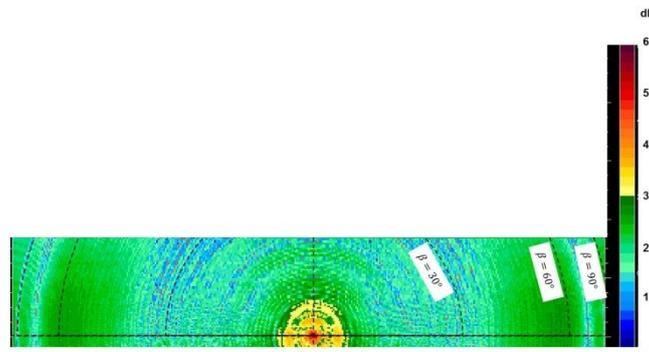


Bild 11: $|f_{VV}|^2$ Antenne b für $-90^\circ < \beta < 90^\circ$ im Bereich der H -Ebene.

Man erkennt Nebenkeulen mit -35 dB re max im Bereich $\beta = 60^\circ$ und 85° , die in der Tat die oben beobachteten Artefakte erklären könnten.

Möglichkeiten, das Antennenkonzept dennoch zu "retten", wurden mit dem Hersteller Q-Par und verschiedenen externen Experten erörtert. Schließlich wurde das Institut für Radioastronomie in Karkhov (Ukraine) mit einer theoretischen Analyse der Antenne und Möglichkeiten der Nachbesserung beauftragt. Als Ergebnis wurde das System Primärstrahler/Sekundärreflektor geringfügig mechanisch verändert. Dadurch konnte eine signifikante Verbesserung erzielt werden, was durch nochmalige Vermessung nachgewiesen wurde. Die entsprechende $|f_{VV}|^2$ -Winkelverteilung ist in Bild 12 gezeigt. Man erkennt nicht nur eine Absenkung der achsfernen Nebenkeulen um ca. 10 dB sondern auch eine deutliche Verbesserung im achsnahen Bereich. LDR-Messungen in Wasserwolken legen nahe, dass damit auch das ICPR gegenüber der Originalversion um mindestens 10 dB verringert wurde und damit auch gegenüber Antenne a eine signifikante Verbesserung erzielt wurde.

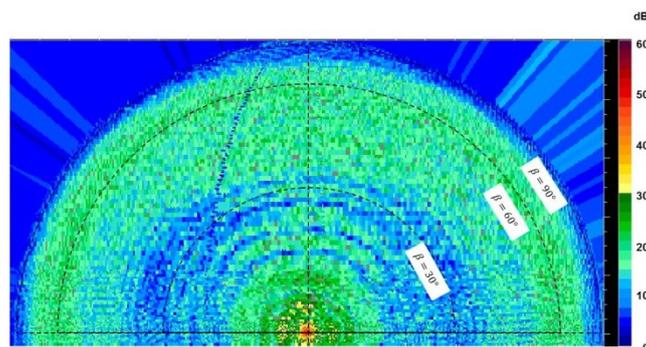


Bild 12: Wie Bild 11 nach Modifizierung des Primärstrahler

2.2.3. Algorithmenentwicklung zur Festechounterdrückung

Der für iPort entwickelte Festecho-Filter wird im Folgenden kurz beschrieben. Der Grundgedanke ist, dass das Spektrum von Echos von stationären Zielen (bis auf einen konstanten Faktor) mit der Fouriertransformierten der Fensterfunktion der Fouriertransformation der Radarsignale übereinstimmt. Das normierte Leistungsspektrum der Fensterfunktion habe die Leistung $c_0 = 1$ bei der Spektrallinie 0. Bei dem hier verwendeten Fenster haben die beiden benachbarten Linien theoretisch die Leistung

$c_1 = c_{-1} \cong 0,25$. Alle anderen spektralen Leistungen sind praktisch null. Die realen Spektren sind auf Grund von Unsicherheiten der Signalphasenmessung und kleinen Schwankungen der Festechos (z. B. durch Wind) allerdings etwas breiter als das theoretische Spektrum. Daher wird für den jeweiligen Standort ein empirisches normiertes "Festechospektrum" entsprechend der beispielhaften Tabelle 1 definiert:

i	c_i
0	1,00000
± 1	0,30000
± 2	0,00600
± 3	0,00060
± 4	0,00015
± 5	0,00007
sonst	0,00000

Tabelle 1: Beispiel eines empirischen normierten Festechospektrums

Für die Festechoerkennung wird das Verhältnis

$$R = \frac{0,5[(S_{-1} - N) + (S_1 - N)]}{S_0 - N} \quad \text{Gl. 2-10}$$

gebildet, mit S_i = spektrale Empfangsleistung der Linie i und N = spektrale Rauschleistung, die nach dem Hildebrand&Sekhon-Verfahren bestimmt wurde. Festecho wird detektiert und vom Gesamtspektrum entfernt, wenn zwischen den Aussagen

1. S_0 ist signifikant höher als der Rauschhintergrund.
2. R ist kleiner als eine Schwelle R_{th} . Typischerweise ist $R_{th} = 0,7$.
3. S_{-1} und S_1 sind nicht signifikant höher als der Rauschhintergrund.

folgende Boolesche Verknüpfung besteht: $(1. \cap 2.) \cup 3.$ In diesem Fall wird das von Festecho bereinigte Spektrum S_i^* gemäß

$$S_i^* = \max\{S_i - c_i(S_0 - N), N\} \quad \text{Gl. 2-11}$$

berechnet.

Der in der Standardsoftware implementierte MMCLX-Algorithmus (Bauer und Görsdorf, 2007) zur Unterdrückung von atmosphärischem Plankton sorgt unabhängig von dem oben beschriebenen Verfahren für eine weitere Unterdrückung von Festechos. MMCLX nutzt die polarimetrischen Signaleigenschaften. Da Festechos sich üblicherweise durch ein relativ hohes LDR auszeichnen, werden vom Festechofilter nicht erkannte (aber für eine LDR-Messung ausreichend starke) Festechos durch MMCLX beseitigt. Der MMCLX-Algorithmus ist bei Temperaturen unterhalb 0°C normalerweise wirkungslos. Diese Temperaturabfrage wurde für iPort abgeschaltet, da es sich zeigte, dass auch unter Winterbedingungen eine Plankton-Filterung erforderlich ist. Eine Nebenwirkung dieser Maßnahme war, dass in Fällen, in denen eine Schmelzschicht im Messbereich des Radars existierte, diese Signale auf Grund des hohen LDR mit Plankton verwechselt und eliminiert wurden. Für die iPort-Erprobung war dies zwar nur wenig störend, für einen künftigen operationellen Einsatz sollte hierfür jedoch noch eine Lösung gefunden werden.

2.3. Durchführung und Ergebnisse der iPort Messkampagne November 2011 – März 2012.

2.3.1. Messaufbau und Hilfsinformationen

Das zentrale Gerät war ein scannendes K-Band Wolkenradar. Das Radar MIRA-36 (ohne Scanning-Unit) ist in GörSDorf et. al (2013) näher beschrieben. Die wesentlichen Systemparameter sind in Tabelle 2 aufgeführt:

Parameter	Value	Unit
Transmitter		
Frequency,	35,1	GHz
Type	Magnetron	
Peak power	30	kW
Antenna		
Type	Cassegrain	
Dish diameter	1.0	m
3dB one-way beam width	0,56	degree
Gain	49.5	dBi
First Sidelobe level,	< -21	dB re max
Receiver		
Total noise figure including TR-switch,	6,2	dB
Dynamic range,	80	dB
ADC resolution,	16	bit
ADC sampling rate,	125	MHz
Number of range gates	500	
Range resolution	30	m
Loss in transmitting and receiving waveguides	1,1	dB
Sensitivity at 5 km, 5 s averaging	-53	dBZ

Tabelle 2: Systemparameter MIRA-36

Mit der Scanning-Unit des Radars kann der Halbraum mit einer Winkelgeschwindigkeit von bis zu 20°/s und einer absoluten Winkelgenauigkeit von 0,1° abgetastet werden. Bild 13 zeigt das Radar am Flughafen München während eines Scans in Richtung Osten mit kleinem Elevationswinkel.



Bild 13: MIRA-36 am Flughafen München.

Vom DWD waren in 500 m Entfernung östlich vom Wolkenradar ein Ceilometer CHM15Kx und in unmittelbarer Nähe des Radars ein Sodar_Rass PCS200 installiert worden. Bei entsprechendem Azimut des Wolkenradars und durch Steuerung der Elevation konnten so vom MIRA-36 und vom CHM15Kx gemeinsame Volumina in einem Vertikalprofil über dem CHM15Kx beginnend in 50 m Höhe abgetastet werden. Eine Übersicht der Installation ist in Bild 14 gezeigt.

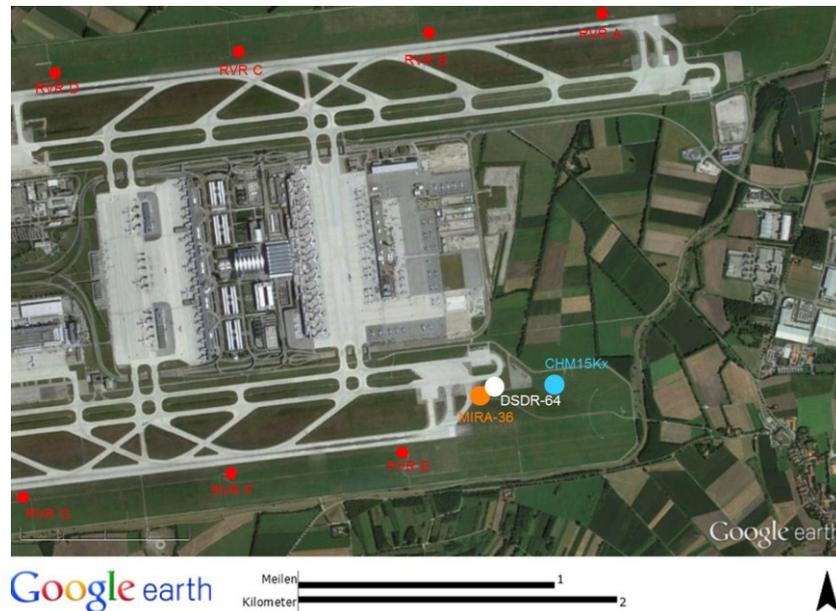


Bild 14: Installation der Fernmesssysteme (MIRA-36, DSDR-64, CHM15Kx) für Nebelmessungen sowie Positionen der Transmissiometer (RVR A – RVR H) auf dem Flughafen München.

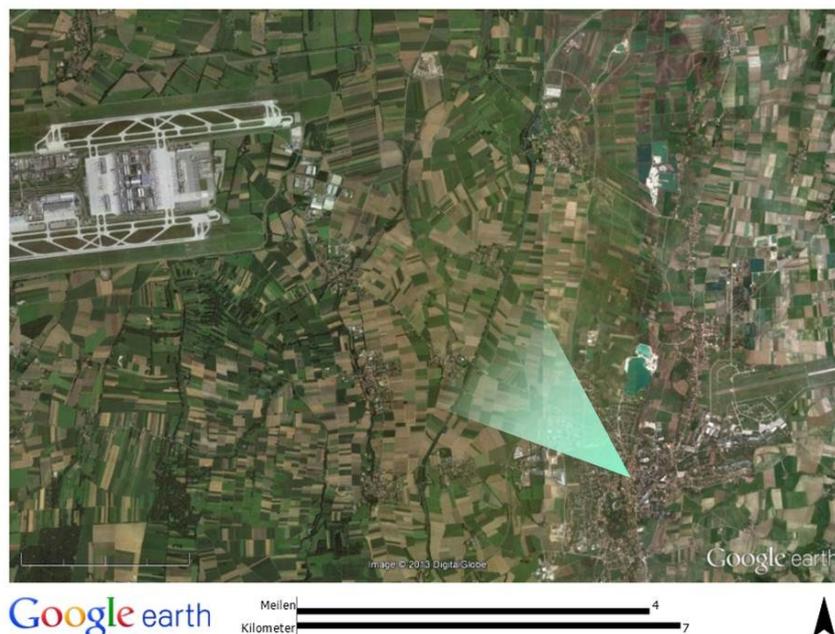


Bild 15: Grüner Kegel, ungefähre Sichtbereich der Web Cam von Radio Rock Antenne, Moosinning.

Zusätzlich zu den Messungen dieser Fernmesssysteme wurden die Ergebnisse der Sichtweitenbeobachtungen vom Tower sowie die Sichtweitenmessungen von 8 MITRAS Transmissiometern (RVR A

– RVR H) an den Runways herangezogen. Für einen qualitativen Hinweis auf die Sichtweite im Bereich des Flughafens wurden außerdem einige Web-Cam Bilder von Radio Rock Antenne Moosinning (Bild 15) verwendet.

2.3.2. Ablauf der Messkampagne und Scan-Strategien

Als "Normal-Mode" des MIRA-36 wurde das in Tabelle 3 dargestellte Scan-Schema festgelegt, das mit 15-minütiger Periode wiederholt wurde. Die Dopplerspektren wurden über 5 s gemittelt. In dieser Konfiguration wurde das Gerät vom 11. November 2011 bis zum 20. Februar 2012 betrieben. In dieser Zeit wurden 26 Tage mit jeweils mehrstündigen Nebelereignissen dokumentiert. Zwischen dem 21. Februar und 9. März 2012 wurde mit RHI-Scans in Ebenen parallel zur Windrichtung versucht, Informationen über die Advektion von Nebel zu gewinnen, die ggf. für Kurzfristprognosen verwendbar sind (siehe Kapitel 2.3.9).

Scan-Abschnitt	Zeit (s)	Bezeichnung	Azimut Elevation	Zweck
A	1 -- 400	Gleitpfad	80° 5°	Profil der Schrägsichtweite auf dem Gleitpfad
B	401 -- 500	RHI1	80° 0,4°/s	Nebelstruktur in Vertikalschnitt parallel Gleitpfad
C	501 -- 800	Conical Scan	1,2°/s 45°	Räumliche Verteilung höher reichender Bewölkung, Doppler-Messungen Wind (VAD)
D	801 -- 900	RHI2	80° -0,4°/s	Nebelstruktur in Vertikalschnitt parallel Gleitpfad, Rückkehr zu A

Tabelle 3: MIRA-36 Scan-Schema im "Normal-Mode"

Für den gesamten Zeitraum der Messkampagne stehen auch die Daten des SODAR-RASS zur Verfügung. Das System liefert mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten und einer Höhenauflösung von 20 m im Höhenbereich 40 – 500 m Profile verschiedener Variablen, von denen die wichtigsten in Tabelle 4 aufgeführt sind.

Symbol	Name	Beschreibung
<i>R3</i>	Schall-Reflektivität	Gibt Hinweis auf Mikroturbulenz. (Oft erhöht an Nebeloberkante).
<i>V</i>	Windgeschwindigkeit	Werden aus radialen Windkomponenten auf verschiedenen Strahlen errechnet.
<i>D</i>	Windrichtung	
<i>S3</i>	Sigma 3	Streuung Windkomponente. Maß für die Turbulenzintensität.
<i>T</i>	Temperatur	Aus Schallgeschwindigkeit auf dem Vertikalstrahl abgeleitet.

Tabelle 4: Die wichtigsten mit SODAR_RASS gewonnenen Variablen

Das Ceilometer CHM15Kx lieferte während der gesamten Messkampagne Profile der gedämpften optischen Reflektivität mit einer zeitlichen Auflösung von 15 s und einer Höhenauflösung von 15 m. In Kapitel 2.3.6 werden Versuche beschrieben, aus diesen Daten in Kombination mit MIRA-36 Messungen die optische Extinktion und damit Sichtweiten abzuleiten.

2.3.3. Datenstruktur eines Scans

In Bild 16 ist Z als Funktion der Messhöhe und Messzeit für einen vollständigen Scan gezeigt.

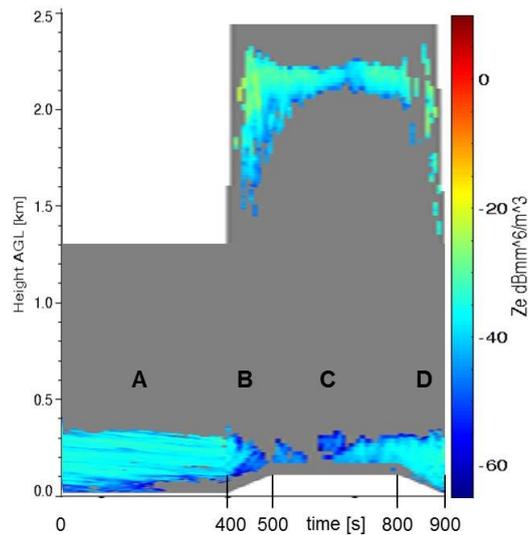


Bild 16: Radarreflektivität als Zeit-Höhendiagramm während eines vollständigen MIRA-36-Scans.

In Phase A wird das Radar mit 5° Elevationswinkel betrieben. Die graue Schattierung gibt an, welcher Höhenbereich vom Radar erfassbar ist. Er liegt in Phase A zwischen 12 und 1300 m. Zwischen 15 und 350 m liegt eine Nebelbank, die zu Z -Werten in der Größenordnung -40 dBZ führt. Zu beachten ist, dass die Höhe 350 m hier wegen der geringen Elevation einer Horizontalentfernung von 4000 m entspricht. In Phase B steigt der Elevationswinkel auf 45°. Dies führt zu einer Spreizung des erfassten Höhenbereichs mit dem Einsatzpunkt bei 110 m und der Obergrenze 10,6 km. Hier sind nur die unteren 2,5 km gezeigt. Während Phase C kann der Nebel wegen des höheren Einsatzpunkts nicht realistisch erfasst werden. Dafür erkennt man nun eine über dem bodennahen Nebel liegende Wolkenschicht in 2,2 km Höhe. In Phase D wird der Elevationswinkel wieder auf 5° abgesenkt, und man sieht dass der bodennahe Nebel unverändert geblieben ist.

Für die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Vergleiche werden Daten aus der jeweils passenden Scanphase extrahiert.

2.3.4. Vergleich mit Webcam

Der Vergleich mit Aufnahmen der Rock-Antenne Webcam liefert einen direkten -- allerdings nur qualitativen -- Nachweis des Zusammenhangs zwischen Sichtweite und Radarreflektivität. Hierfür sind in Bild 17 zwei Folgen von jeweils 8 Scans dargestellt mit entsprechenden Aufnahmen der Webcam und ihrer zeitlichen Zuordnung. Im nebelfreien Fall wird vom Radar im bodennahen Bereich kein Signal detektiert. Die in der Webcam Aufnahme sichtbare Wolkendecke ist durchbrochen. Zum Zeitpunkt der Aufnahme werden die Wolken offenbar nicht vom Radarstrahl getroffen. Die davorliegenden Scans zeigen jedoch eine Wolkenschicht in 2 km Höhe an. Im zweiten Beispiel ist die Sichtweite nach Webcam-Aufnahme sehr gering. Die Radarmessungen zeigen eine aufliegende Nebelbank mit 200 bis fast 300 m Mächtigkeit. Höhere Wolken werden nicht zu dieser Zeit detektiert.

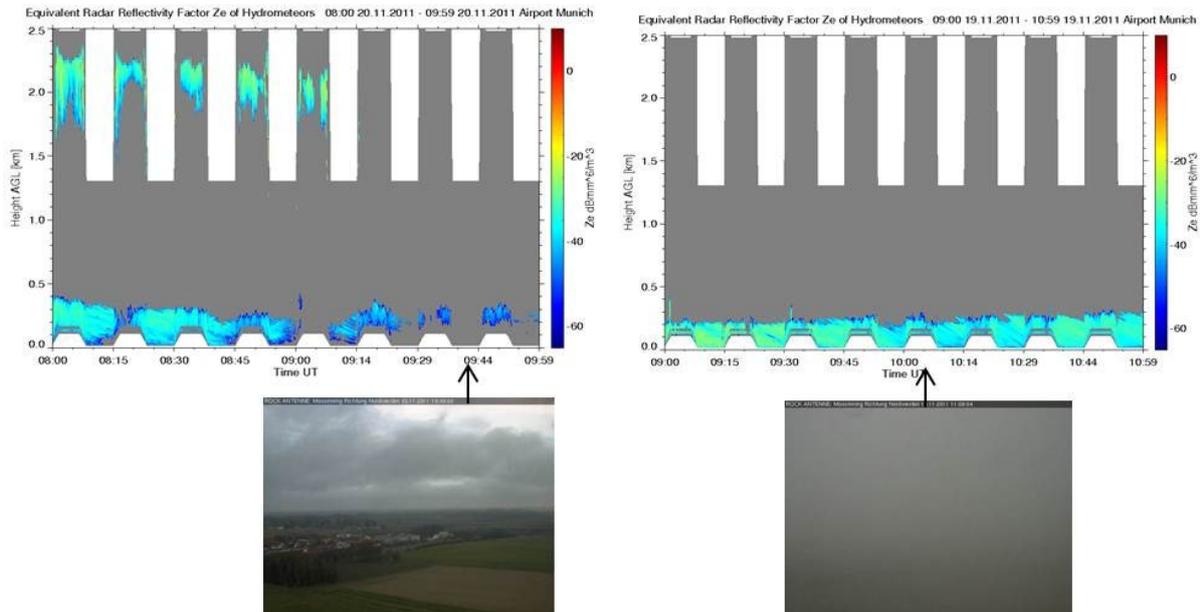


Bild 17: Vergleich zwischen Webcam und MIRA-36. Die Pfeile geben den jeweiligen Zeitpunkt der Webcam-Aufnahmen an. Links gute Sicht. Rechts Nebel.

2.3.5. Beziehung Z versus Sichtweite

Aus den Dopplerspektren des MIRA-36 Empfangssignals wurden nach der oben beschriebenen Targetklassifikation und Filterung als wichtigster Parameter die Radarreflektivität Z (bzw. Z_e) abgeleitet. Für den quantitativen Vergleich zwischen Radarreflektivität und Sichtweite ist zu beachten, dass die Korrelation zwischen diesen Variablen aus verschiedenen Gründen eingeschränkt sein kann. Ein fundamentaler Grund ist, dass die Radarreflektivität in anderer Weise von der Tropfengrößenverteilung im Nebel abhängt als die Sichtweite. Die Radarreflektivität Z ist gleich dem 6. Moment der Tropfengrößenverteilung $n(D)$, mit $D =$ Tropfendurchmesser:

$$Z = \int_0^{\infty} n(D)D^6 dD \quad \text{Gl. 2-12}$$

Dagegen ist die Sichtweite (Meteorological Optical Range) definiert als

$$\text{MOR} = -\frac{K}{\alpha} \quad \text{Gl. 2-13}$$

mit $K = \ln 0,05$, empirische Konstante für gerade noch erkennbaren Kontrast, und $\alpha =$ optischer Extinktionskoeffizient, der vom Tropfenspektrum wie folgt abhängt:

$$\alpha = \frac{\pi}{4} \int_0^{\infty} Q_{ext}(D, \lambda) n(D) D^2 dD \quad \text{Gl. 2-14}$$

Dabei ist λ die Lichtwellenlänge und Q_{ext} der normierte Extinktionsquerschnitt. Er ist im Allgemeinen eine komplizierte Funktion von D und λ , kann jedoch in dem hier interessierenden Größenbereich durch die Konstante 2 approximiert werden. Damit ist α proportional zum zweiten Moment der

¹ Für den Fall, dass die Natur der Targets unsicher ist, wird die aus dem Dopplerspektrum abgeleitete Radarreflektivität als "äquivalente Radarreflektivität Z_e " bezeichnet.

Durchmesserverteilung. Eine Verschiebung der Verteilung zu größeren Tropfen bewirkt eine viel größere Zunahme von Z als von α .

Von Gultepe et al. (2009) (im Folgenden GU) wurde gemessene Tropfengrößenverteilungen benutzt, um daraus sowohl die Sichtweite als auch die Radarreflektivität zu berechnen. Die daraus folgende Regression ist in Bild 18 gezeigt:

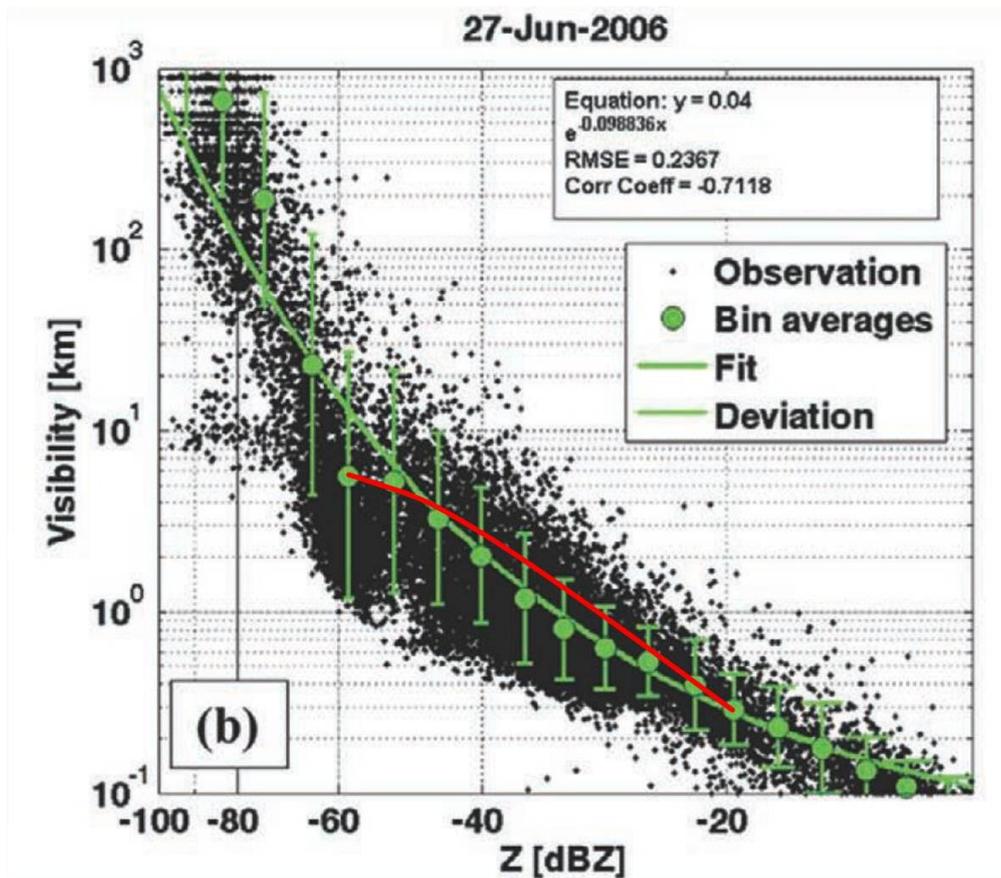


Bild 18: MOR und Z aus gemessenen Tropfengrößenverteilungen berechnet. Grüne Kurve: Gefittete Funktion (Aus Gultepe et al., 2009). Nachträglich eingetragene rote Linie: Lineare Beziehung $\text{visib} [m] = -132,5 \cdot Z [\text{dBZ}] - 2350 [m]$ mit den Stützpunkten $Z_l = -60 \text{ dBZ}$ und $Z_l = -20 \text{ dBZ}$. (siehe auch Bild 20).

Der Vorteil dieses Verfahrens gegenüber einer direkten Vergleichsmessung von Z und MOR ist, dass alle Einflüsse auf die beobachtete Beziehung, die durch die unterschiedlichen räumlichen Abtastungen der Messverfahren in Verbindung mit der räumlichen Inhomogenität Sichtweite bedingt sind, vermieden werden. Geeignete Nephelometer standen für die Messkampagne jedoch leider nicht zur Verfügung. Statt dessen konnten in München die Sichtweiten-Beobachtungen des Towers (im Folgenden mit "visib" bezeichnet) und die Transmissiometermessungen zum Vergleich herangezogen werden. Im Letzteren Fall wurden entweder die Daten des RVR E (siehe Bild 14) oder der Mittelwert aus allen 8 Sensoren verwendet (im Folgenden mit "RVR E" und "RVR" bezeichnet).

Das zusammenfassende Ergebnis von allen 26 Nebelereignissen ist in Bild 19 gezeigt. Hier wurde die mit dem Radar in 24 m Höhe (entsprechend 270 m Range) gemessene Radarreflektivität mit den Towerbeobachtungen verglichen. Im Bereich $-70 \text{ dBZ} < Z < -20 \text{ dBZ}$ ist eine qualitative Übereinstimmung mit der berechneten Beziehung (Bild 18, rote Gerade) erkennbar. Bei Radarreflektivitäten

oberhalb -20 dBZ nimmt die gemessene Beziehung jedoch einen völlig anderen Verlauf. Die Ursache hierfür ist, dass größere Z -Werte nicht durch Nebel sondern durch Niederschlag verursacht wurden, der auf Grund der größeren Tropfen, wie oben erläutert wurde, auf die Sichtweite einen vollständig anderen Einfluss hat als Nebel. Diese Situation wurde in den GU-Ergebnissen offenbar nicht berücksichtigt, da die zu Grunde liegenden Tropfengrößenmessungen möglicherweise nicht für die Erfassung von Niederschlagstropfen ausgelegt waren oder weil in den Daten keine Niederschlagsereignis enthalten ist.

Als weiteres effektives Kriterium zur Erkennung von Niederschlagsituationen aus den vorhandenen Radar-Daten hatte sich die vertikale Ausdehnung von zusammenhängenden, aufliegenden Schichten detektierbarer Radarreflektivität erwiesen. Wenn diese 500 m überschritt, wurde Niederschlag diagnostiziert. Prinzipiell wäre das MIRA-36 zwar geeignet, die Existenz von Niederschlagströpfchen eindeutig aus der Fallgeschwindigkeit abzuleiten. Dies würde jedoch eine vertikale Strahlrichtung erfordern und würde, da diese Niederschlagsereignisse sehr kurzzeitig sein können, hohe Kontingente der Scan-Zeit verbrauchen. Für eine spätere operationelle Anwendung ist daher zu erwägen, ob ein unabhängiger schnell ansprechender Niederschlagsdetektor für eine sicherere Targetklassifizierung herangezogen werden sollte.

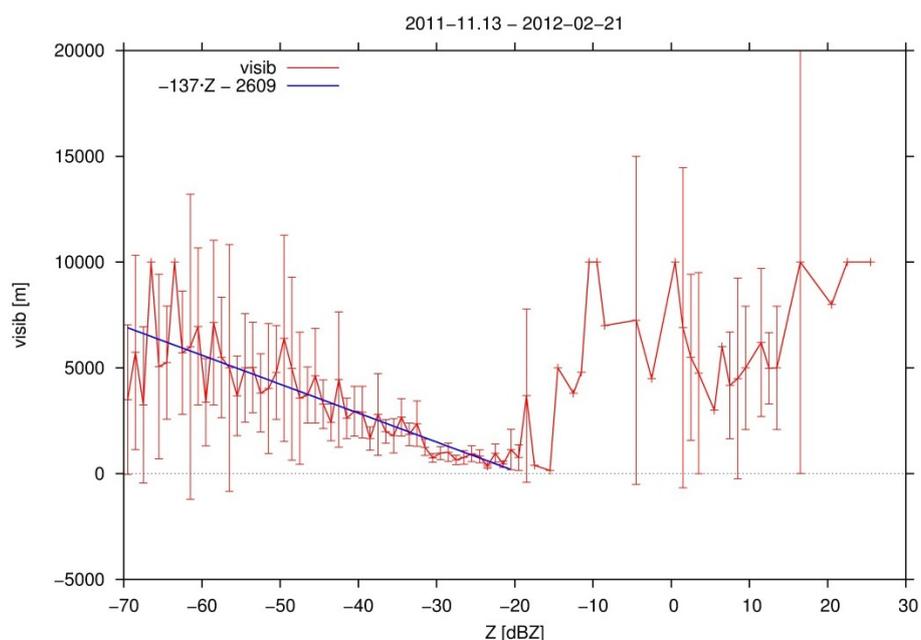


Bild 19: Tower-Beobachtungen der Sichtweite als Funktion der Radarreflektivität in 24 m Höhe. Flughafen München vom 13. November 2011 bis 21. Februar 2012.

Ermutigend ist, dass die Streuung der aus Z abgeleiteten Sichtweite gegenüber den Beobachtungen mit abnehmender Sichtweite – also im kritischen Bereich – kleiner wird. Die blaue Linie gibt einen geschätzten linearen Zusammenhang der MUC-Daten wieder, entsprechend

$$\text{visib}_{\text{METAR MUC}} [\text{m}] = -137 \cdot 10 \log Z - 2609 \quad \text{Gl. 2-15}$$

Für die GU-Ergebnisse (vergl. Bild 18, grüne Kurve) wurde von den Autoren der Fit mit

$$\text{visib}_{\text{GU}} [\text{m}] = 40 \cdot \exp(-0,098836 \cdot 10 \log Z) \quad \text{Gl. 2-16}$$

angesetzt. Beide Fits (schwarz gepunktet und grün) sind in Bild 20 wiedergegeben. Bei der Bewertung der Unterschiede ist zu beachten, dass die Struktur des GU-Fits stark vom Bereich mit geringen Werten der Radarreflektivität (< -70 dBZ) bzw. großen Werten der Sichtweite geprägt ist (siehe Bild 18). Sichtweiten zwischen 10 und 1000 km sind jedoch lediglich als rechnerische Werte zu betrachten, die durch Beobachtungen in der realen Atmosphäre kaum zu reproduzieren sein dürften. Für den Vergleich mit beobachteten Sichtweiten ist es daher angemessen, die GU-Daten auf den Bereich $\text{visib} < 10$ km zu beschränken. Eine lineare Beziehung zwischen den "Bin-Averages" an den Stützpunkten $Z_l = -60$ dBZ und $Z_l = -20$ dBZ :

$$\text{visib}_{\text{GU } Z > -60} [\text{m}] = -135,5 \cdot 10 \log Z - 2350 \quad \text{Gl. 2-17}$$

Diese Beziehung ist in Bild 20 als rote Gerade dargestellt. (In Bild 18 erscheint diese Beziehung wegen der dort gewählten nicht-linearen Koordinaten gekrümmt.) Berücksichtigt man die unterschiedlichen Entstehung der Beziehungen Gl. 2-15 und Gl. 2-17 mit völlig unabhängigen systematischen Fehlern, so ist die Abweichung zwischen $\text{visib}_{\text{METAR MUC}}$ und $\text{visib}_{\text{GU } Z > -60}$ überraschend gering.

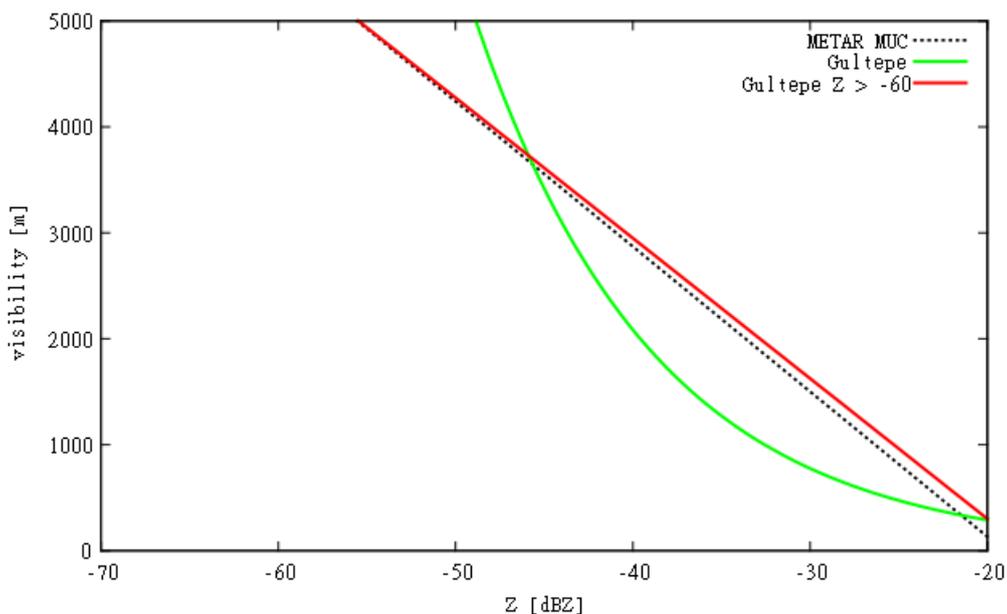


Bild 20: Gefittete Beziehungen zwischen Radarreflektivität und Sichtweite (ohne Niederschlag). Schwarz gepunktet: Beobachtete Sichtweite und gemessenen Radarreflektivität. Grün: Berechnete Sichtweite und Radarreflektivität aus gemessenen Tropfengrößenverteilungen. Rot: Wie Grün, jedoch linearer Fit, beschränkt auf $Z < -70$ dBZ.

2.3.6. Nutzung von Ceilometer Messungen

Der Zusammenhang zwischen Radarreflektivität und Sichtweite weist eine relativ große Streuung auf, die, wie Bild 18 zeigt, nicht nur auf Beobachtungsfehler sondern auch auf fundamentale Gründe zurückzuführen ist. Ein mögliches Verfahren zur Verringerung dieser Streuung ist die aus der Wetterradartechnik bekannte "Aneichung", indem aus simultanen, lokalen, unabhängigen Messungen der Sichtweite zusammen mit den Radarmessungen eine dynamische, lokale $\text{visib}(Z)$ -Beziehung gewonnen wird. In situ-Messungen am Boden scheinen hierfür allerdings nicht geeignet zu sein, da besonders in Bodennähe große vertikale Gradienten der Sichtweite auftreten können. Dies wird durch den Vergleich mit den Sichtweitenbeobachtungen des Towers einerseits und den Messungen der Transmissiometer andererseits deutlich. In Bild 21 sind diese Vergleiche über den gesamten Zeitraum vom

13. November 2011 bis 21. Februar 2012 als zweidimensionale Histogramme gezeigt. Die Zahl der Messwertpaare, die in das zweidimensionale Bin mit der Größe $\Delta \log \text{visib} \times \Delta \log Z = 0,1 \times 0,1$ fallen, ist farbkodiert dargestellt. (Der wiedergegebene Bereich der Sichtweite wurde entsprechend dem RVR Messbereich auf 2000 m beschränkt.) Man sieht, dass in den RVR-Messungen überhaupt keine Werte mit $\text{visib}_{\text{rvr,e}} < 200 \text{ m}$ enthalten sind, wogegen in den Beobachtungen $\text{visib}_{\text{metar}} < 200 \text{ m}$ etwa 30mal gemeldet wurden. Nach eigenen Beobachtungen in Starknebelsituationen tendierte die Nebeluntergrenze in der Tat dazu, nicht auf dem Boden aufzuliegen sondern einige Meter über den Boden abzuheben.

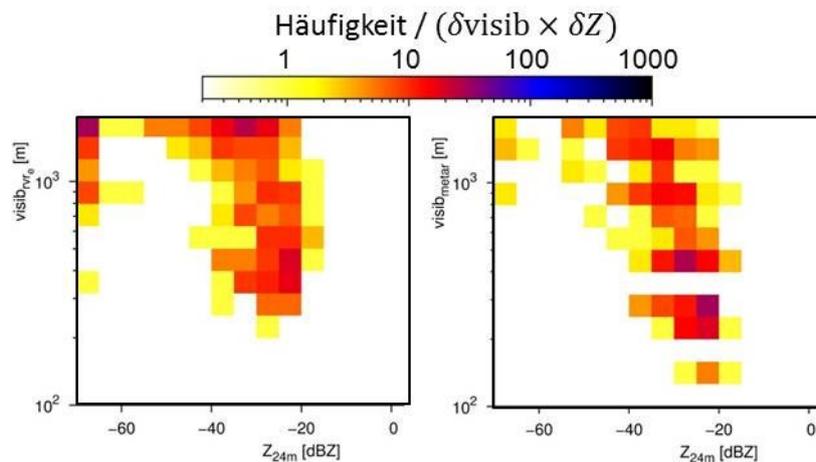


Bild 21: 2D-Histogramme. Links $\text{visib}_{\text{rvr,e}}$ gegen $Z_{24 \text{ m}}$. Rechts $\text{visib}_{\text{metar}}$ gegen $Z_{24 \text{ m}}$.

Die RVR Sensoren schieden daher für die Aneicherung aus. Aber auch die beobachteten Sichtweiten wurden für diesen Zweck als nicht gut geeignet betrachtet, da sie einen räumlichen Bereich repräsentieren, der sich stark vom Ort des Radar-Streuvolumens unterscheidet.

Aus diesen Gründen wurde versucht, die Informationen des CHM15Kx zu nutzen. Hierzu waren zunächst einige Schwierigkeiten zu überwinden. Das gemeinsame Streuvolumen lag in Scan-Phase A des Radars in einer Höhe von 45 m. Dies ist nach Angaben des Herstellers ein Bereich, in dem die Struktur der gemessenen Echoprofile noch stark von der Überlappungsfunktion $O(z)$ beeinflusst ist. Die Sonderanfertigung CHM15Kx war zwar für Messungen im Nahbereich optimiert worden, die Form der Überlappungsfunktion war aber nicht bekannt. Auch bei bekannter Funktion $O(z)$ bleibt das Problem der Sichtweiten für den Fall optischer Dicke $\gg 1$. Das bekannte Verfahren Klett (1981) und Fernald (1984) ist nicht anwendbar, weil kein Referenzwert des Rückstreuquerschnitts in geeigneter Entfernung zur Verfügung steht.

Daher wurde hier ein Verfahren zur optischen Dämpfungsbestimmung erprobt, das Ceilometer- und Radar-Signale miteinander verknüpft. Da dieses dem DIAL-Prinzip verwandte Verfahren nach unserem Kenntnisstand der Literatur innovativ ist, wird es im Folgenden näher beschrieben.

Die Radar- und Lidargleichung lauten in einer für diesen Zweck geeigneten Form:

$$Z(z_i) = \Gamma_R \beta_R(z_i) \quad \text{Gl. 2-18}$$

und

$$m(z_i) = \Gamma_L O(z_i) \beta_L(z_i) \underbrace{\exp\left\{-2 \int_0^{z_i} \alpha(\zeta) d\zeta\right\}}_{\tau(z_i)} \quad \text{Gl. 2-19}$$

Dabei ist z_i die Höhe des i -ten Range Gates (Radar- und Lidar-Range-Gates seien auf eine gemeinsame Höhenauflösung re-sampled), Γ_R ist eine Konstante, die unter anderem die Radarkalibration enthält, β_R ist die entfernungskorrigierte Empfangsleistung bei der Radarwellenlänge, m ist der scheinbare spezifische Rückstreuquerschnitt bei der Ceilometerwellenlänge. Es unterscheidet sich vom wahren spezifische Rückstreuquerschnitt $\beta_L(z_i)$ durch den Kalibrationsfehler des Ceilometers Γ_L , die Überlappfunktion $O(z_i)$ und die Pfaddämpfung (gegeben durch das Profil des Extinktionskoeffizienten $\alpha(\zeta)$ auf dem Weg zum Streuvolumen und zurück – bzw. die Zweiweg-Transmission $\tau(z_i)$).

Wir definieren den Quotienten $Q \equiv m/Z$ und erhalten

$$Q(z_i) = \frac{\Gamma_L O(z_i) \beta_L(z_i) \tau(z_i)}{\Gamma_R \beta_R(z_i)} \quad \text{Gl. 2-20}$$

und führen nun $A(z_{i+1}, z_i) \equiv Q(z_{i+1})/Q(z_i)$ ein, für den wir erhalten

$$A(z_{i+1}, z_i) = \frac{O(z_{i+1}) \beta_L(z_{i+1}) \tau(z_{i+1}) \beta_R(z_i)}{O(z_i) \beta_L(z_i) \tau(z_i) \beta_R(z_{i+1})} \quad \text{Gl. 2-21}$$

Die Faktoren Γ_L und Γ_R sind in Gl. 2-21 herausgefallen, d.h. $A(z_{i+1}, z_i)$ hängt nicht von der Kalibrierung des Radars oder Ceilometers ab. Die für das Verfahren entscheidende nun eingeführte Annahme ist, dass

$$\frac{\beta_R(z_i)}{\beta_L(z_i)} = \frac{\beta_R(z_{i+1})}{\beta_L(z_{i+1})} \quad \text{Gl. 2-22}$$

Es sei betont, dass nicht ein global konstantes Verhältnis β_R/β_L postuliert wird, was wegen der nicht konstanten Form der Tropfengrößenverteilung auch nicht zulässig wäre. Es wird lediglich angenommen, dass dies Verhältnis in benachbarten Streuvolumina gleich ist. Dabei muss beachtet werden, dass auch diese schwächere Annahme nicht in allen Fällen zutrifft. Beispielsweise ändert sich am unteren Rand einer nieselnden Wolke die Form der Tropfengrößenverteilung sprunghaft, weshalb mit einem Ceilometer und Millimeterwellenradar oft unterschiedliche Wolkenbasishöhen gemessen werden. Wir nehmen hier aber an, dass sich beide Range Gates vollständig innerhalb einer nicht regnenden Nebel-/Wolken-schicht befinden. Dann vereinfacht sich Gl. 2-21 mit Hilfe von Gl. 2-22 zu

$$A(z_{i+1}, z_i) = \frac{O(z_{i+1}) \tau(z_{i+1})}{O(z_i) \tau(z_i)} \quad \text{Gl. 2-23}$$

Mit der Definition der Zweiweg-Transmission, $\tau(z) \equiv \exp\{-2 \int_0^z \alpha(\zeta) d\zeta\}$, kann Gl. 2-23 umgeformt werden in

$$\alpha(z_{i+1}, z_i) = \frac{1}{2\Delta z} (\ln O_{i+1,i} - \ln A(z_{i+1}, z_i)) \quad \text{Gl. 2-24}$$

Die rechte Seite von Gl. 2-24 enthält außer der Messwertverknüpfung $\ln A(z_{i+1}, z_i)$ den unbekannteren Term $\ln O_{i+1,i}$. Unter der Annahme, dass die Überlappungsfunktion zeitunabhängig ist, kann $\ln O_{i+1,i}$ aus einem größeren Datensatz abgeschätzt werden. Dazu wird die Tatsache genutzt, dass

$\alpha(z_{i+1}, z_i)$ niemals kleiner Null sein kann. $\ln O_{i+1,i}$ wird dann so gewählt, dass der minimale Wert von $\alpha(z_{i+1}, z_i)$ gleich Null ist. Diese Vorgehensweise wird an einem 24stündigen Messbeispiel in Bild 22 erläutert. Zunächst wird $\ln O_{i+1,i}$ in Gleichung Gl. 2-24 gleich Null gesetzt, wodurch man die in Bild 22 dargestellten verschobene Extinktion $\alpha' = -\ln A/2\Delta z = \alpha - \ln O/2\Delta z$ erhält. Das Minimum von α' tritt um 15:00 UTC mit Werten bei $\alpha_{\min}' \sim -0,05 \text{ m}^{-1}$ auf, was als erste Schätzung für die Überlappfunktion gleich $-\ln O/2\Delta z$ gesetzt werden kann.

Für eine genauere Schätzung wurden Häufigkeitsverteilungen von α' (bzw. $\ln A$) über die gesamte Zeit der Messkampagne gebildet. Das Ergebnis ist in Bild 23 gezeigt. Für Δz wurde 30 m gewählt. Die angegebenen Höhen stellen jeweils die Mitte zwischen den Referenzhöhen z_i und z_{i+1} dar. Die Breite der Bins $\delta\alpha'$ beträgt $0,01 \text{ m}^{-1}$.

Man erkennt in allen Höhen bimodale Verteilungen. Der linke Peak wird als Grenzfall mit $\alpha = 0$ interpretiert, der Schätzungen für $\ln O_{i+1,i}$ liefert. Mit zunehmender Höhe wandert die Peakposition asymptotisch gegen Null, wie es für die Überlappungsfunktion zu erwarten ist. Im Idealfall müsste der linke Peak eine verschwindend schmale linke Flanke haben. Die dieser Flanke entsprechenden scheinbar negativen Extinktionskoeffizienten können wahrscheinlich darauf zurückgeführt werden, dass die Form und horizontale Position der Streuvolumina des Ceilometers und Radars sehr verschieden sind, wogegen für Gl. 2-23 angenommen wurde, dass die Messwerte einer gegebenen Höhe aus denselben Volumina stammen. Mit den so abgeleiteten Korrekturen könnten so optische Extinktionskoeffizienten bestimmt werden und für die Aneicherung der $\text{visib}(Z)$ -Beziehung verwendet werden. Die Ursache des rechten Peaks wird weiter unten diskutiert.

14.11.2011

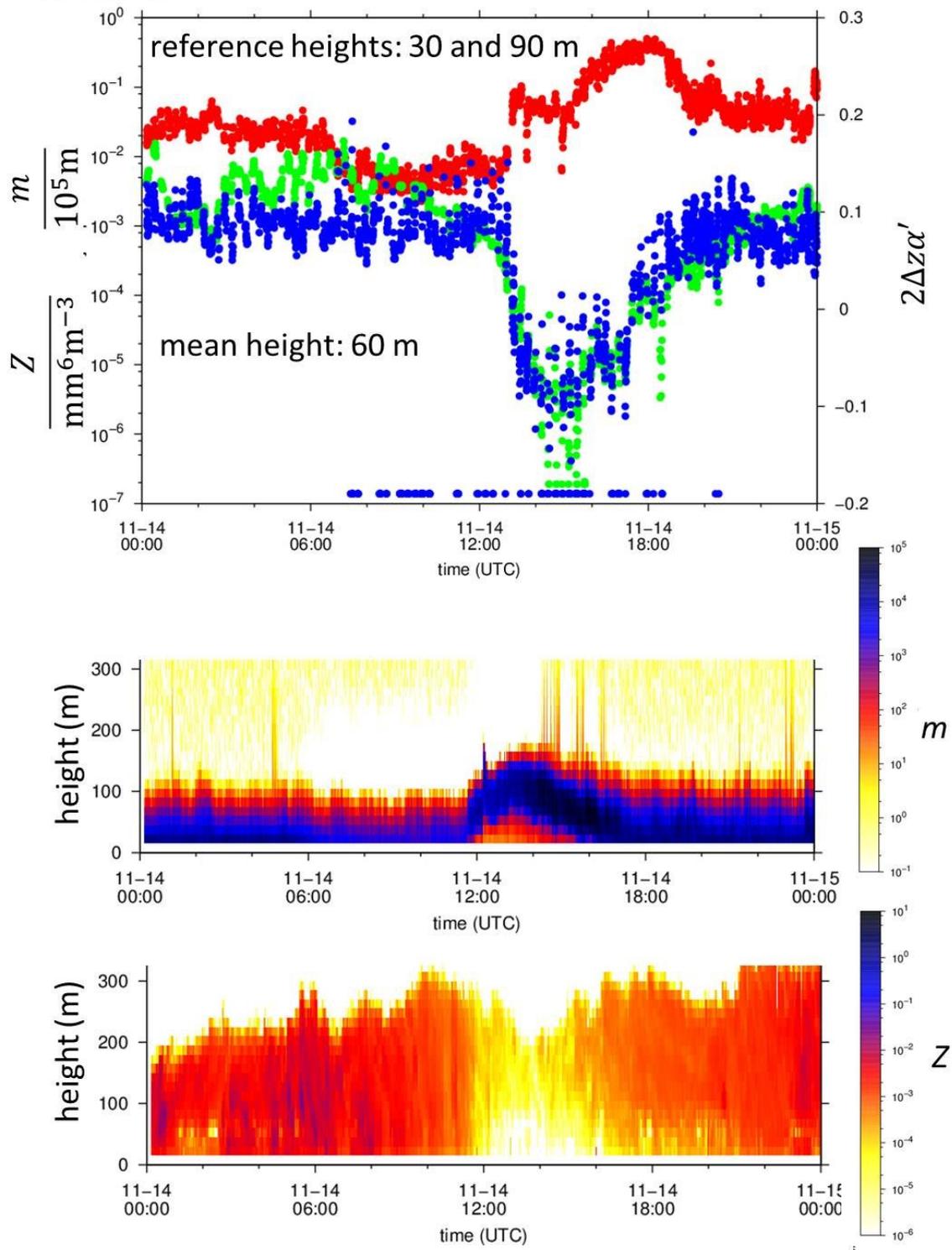


Bild 22: Beispiel einer Nebel-Episode. Oben: (rot) Zeitreihe des gedämpften und auf Grund der Überlappfunktion verfälschten Ceilometer-Rückstreuerquerschnitts m , (grün) Radar Reflektivitätsfaktor Z , (blau) verschobener Extinktionsquerschnitt α' . Mitte: Zeithöhenschnitt von m . Unten: Zeithöhenschnitt von Z .

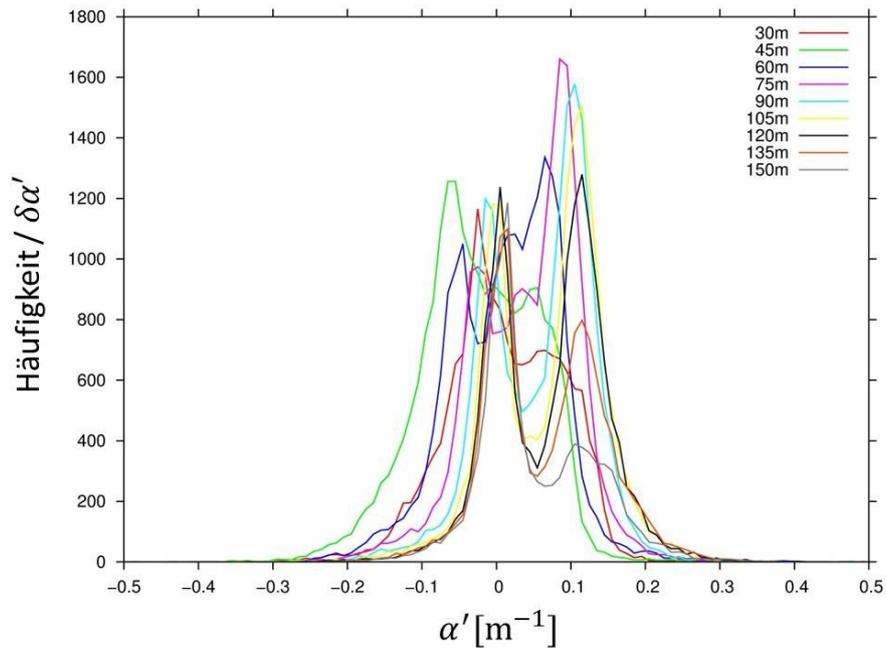


Bild 23: Häufigkeitsverteilungen von α' in den Höhen 30 bis 150 m.

Zuvor wurde jedoch getestet, wie gut diese Extinktionskoeffizienten mit der beobachteten Sichtweite korreliert sind.

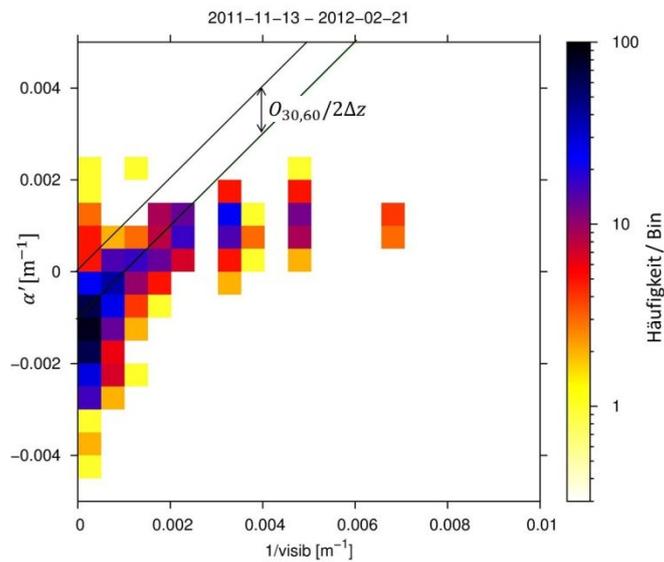


Bild 24: Regression der mit Gl. 2-24 bestimmten Extinktion gegen die beobachtete reziproke Sichtweite.

Das Ergebnis ist in Bild 24 dargestellt. Es zeigt die Regression des aus den Referenzhöhen $z_i = 30$ m und $z_{i+1} = 60$ m ermittelten Extinktionskoeffizienten gegen die beobachtete inverse Sichtweite. Die Regression ist wieder als zweidimensionales Histogramm dargestellt. Ein "Bin" ist hier definiert als $\text{Bin} \equiv \delta\alpha' \times \delta(1/\text{visib})$ mit der Größe $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1} \times 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$. Der erwartete Zusammenhang ist für kleine Werte von $1/\text{visib}$ entsprechend Gl. 2-13 linear mit der Steigung $-K$. Auf der Ordinate ist die unkorrigierte Extinktion aufgetragen. Die Häufung bei $\alpha' = 0,001 \text{ m}^{-1}$ und $1/\text{visib} \rightarrow 0$ ent-

spricht dem linken Peak in Bild 23 und wird als α -Nullpunktverschiebung auf Grund der Überlappungsfunktion interpretiert. Man erkennt einen linearen Bereich bis zu $1/\text{visib} \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ mit der Steigung $-K = 1$. Nach der MOR-Definition wäre allerdings $-K = -\ln 0,05 \approx 3$ zu erwarten. Noch schlechter mit der Theorie in Einklang zu bringen ist, dass die Steigung für $1/\text{visib} > 0,002$ praktisch auf null zurückgeht. Diese Sättigung entspricht dem rechten Peak in den Histogrammen von Bild 23. Hieraus ist zu schließen, dass die Ceilometer-Daten bei Sichtweiten $< 500 \text{ m}$ nicht signifikant auf Sichtweitenänderungen reagieren. Dies würde bedeuten, dass mit einem Ceilometer oder Lidar im optischen Bereich Sichtweitenbestimmungen nur bei großen – im iPort-Zusammenhang unkritischen – Sichtweiten möglich sind. Unsere vorläufige, mit Experten noch nicht diskutierte, Erklärung dieses Ergebnisses ist der Einfluss der Mehrfachstreuung in optisch dichten Medien: Signale, die im Range Gate i_1 zuerst gestreut wurden, werden durch anschließende Mehrfachstreuung mit zusätzlicher zeitlicher Verzögerung zum Empfänger zurückgestreut. Dadurch werden sie Range Gates $i_m > i_1$ zugeordnet. Der durch Extinktion erwartete Signalabfall mit zunehmendem i wird dadurch teilweise kompensiert, und damit wird α unterschätzt.

Nach diesem Befund wurde von weiteren Versuchen Abstand genommen, die Ceilometerdaten für die "Aneichung" des Radars zu verwenden.

2.3.7. Beobachtung der Nebelobergrenze mit SODAR

Die hauptsächliche Motivation für den ergänzenden Einsatz SODAR-RASS des DWD war die Messung von Windprofilen und die damit möglich Abschätzung der Nebeladvektion. Obwohl keine direkte Nebelbeobachtung mit der Schallrückstreuung des SODARs möglich ist, konnte hier durch die simultane Messung mit dem Wolkenradar erstmals die schon länger bestehende Vermutung bestätigt werden, dass die Nebelobergrenze in den Rückstreuprofilen erkennbar ist. Die Schallrückstreuung ist proportional zur kleinräumigen Temperaturvarianz, die durch Strahlungsabkühlung und die damit verbundenen Schichtungsinstabilität an der Nebeloberkante erhöht ist. Bild 25 zeigt gleichzeitig Sodar- und Radarmessungen in einem Zeit-Höhenschnitt. Von 00:00 bis 20:00 UTC ist nur das Sodar in Betrieb. In dieser Zeit ist ein von 150 m bis 300 m ansteigendes Band erhöhter Rückstreuung zu erkennen. Das Wolkenradar wird um 20 Uhr eingeschaltet. In der dann folgenden Darstellung ist im 90minütigen Wechsel die Radar- und Sodar-Rückstreuung gezeigt. Man sieht, dass die Lage des schmalen Bandes erhöhter Schallrückstreuung mit der Lage des Abfalls der Radarrückstreuung übereinstimmt. Am 10.11.2013 um 14:00 UTC überschreitet die Nebelobergrenze 500 m und verlässt damit den Messbereich des Sodars.

Bei der Erwägung, ob die Sodar-Daten gegebenenfalls alleine zur Nebeldiagnose verwendet werden könnten, ist zu beachten, dass die Profile der Schallrückstreuung nicht immer einen eindeutigen Schluss auf die Lage der Nebeloberkante zulassen. So erkennt man beispielsweise im letzten Segment der Sodar-Messungen eine Zone erhöhter Rückstreuung zwischen dem Boden und 200 m Höhe, die jedoch offenbar nichts mit der Nebelobergrenze zu tun hat. Für Prognosezwecke könnten allerdings die SODAR-Windprofile herangezogen werden, die häufig eine markante Windscherung an der Nebelobergrenze aufweisen.

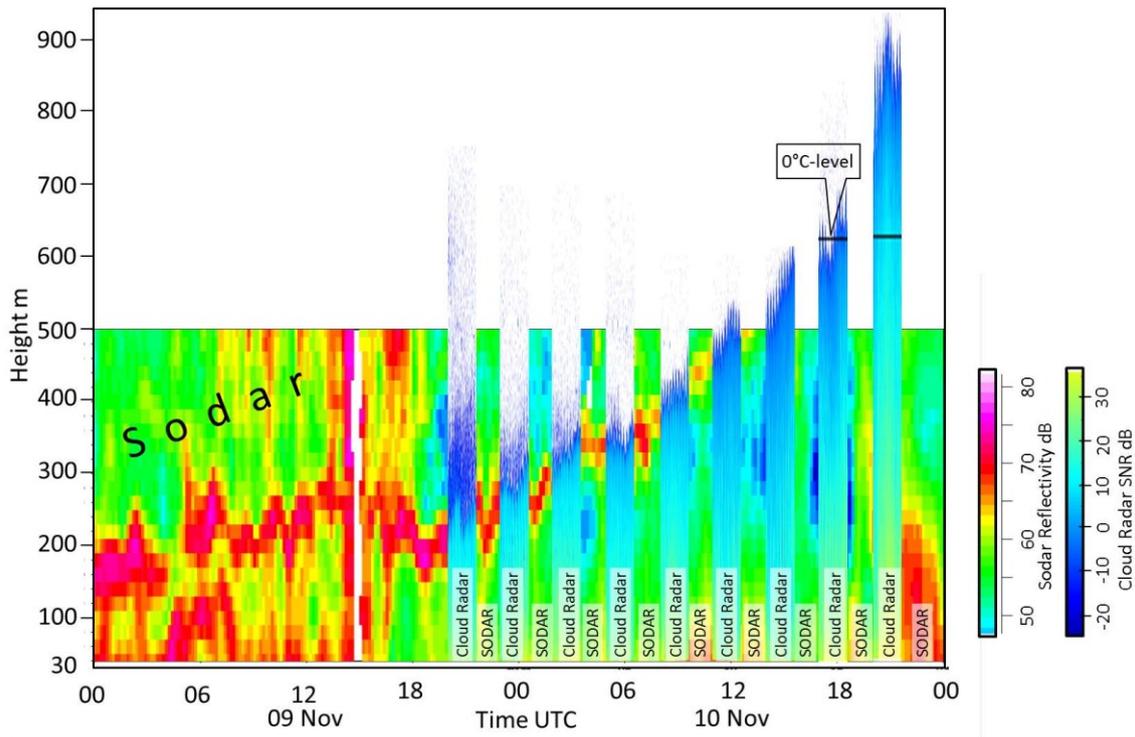


Bild 25: Überlagerte Zeithöhenschnitte der Sodar- und Radarrückstreuung.

Dies ist auch in dem hier gezeigten Beispiel der Fall, wie aus Bild 26 hervorgeht. Bis zum 10. 11. um 10:00 UTC herrscht innerhalb der Nebelschicht mit wenigen Unterbrechungen praktisch Windstille und es ist eine mit der Nebeloberkante ansteigende Scherungszone erkennbar. Nach dem Überschreiten der Nebeloberkante von 500 m setzt in der darunter liegenden Schicht schwacher Wind ein (~ 4 m/s), bis gegen 18:00 UTC zunächst oben, dann frontal herabsteigend, die Geschwindigkeit auf 10 m/s zunimmt.

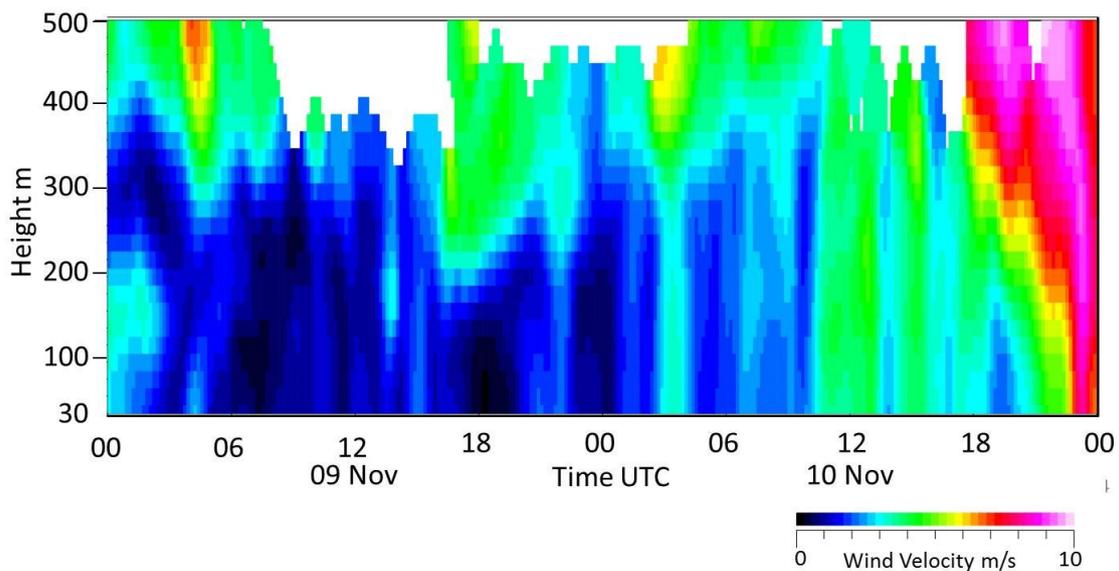


Bild 26: Zeitabschnitt wie Bild 25, jedoch Zeit-Höhenschnitt der Windgeschwindigkeit aus Sodar-Messungen.

2.3.8. VAD Windmessungen

Die C-Phasen des Scan-Schemas (siehe Tabelle 3) können auch dazu genutzt werden, Windprofile in Nebel/Wolken/Niederschlag/Atmosphärischem Plankton mit dem Wolkenradar zu bestimmen. Dazu werden die Dopplerverschiebungen als Funktion von Entfernung und Azimut aufgetragen (Velocity Azimuth Display). Bei dem hier gewählten Elevationswinkel von 45° sind die Beträge von Horizontalentfernung und Messhöhe identisch. Unter der Annahme horizontaler Homogenität ist die Dopplergeschwindigkeit bei einer gegebenen Messhöhe eine sinusförmige Funktion des Azimuts ϕ :

$$\hat{v}_D(\phi) = U \sin 45^\circ \sin(\phi - D) + W \cos 45^\circ \quad \text{Gl. 2-25}$$

mit U = horizontale Windgeschwindigkeit und W = Vertikalkomponente (Fallgeschwindigkeit der streuenden Partikel.) Durch Fitten der gemessenen Werte $v_D(\phi)$ an die Funktion $\hat{v}_D(\phi)$ können die freien Parameter U und W bestimmt werden. In Bild 27 ist ein Beispiel mit aufliegender ca. 5 km hochreichender Bewölkung gezeigt. In typischen Nebelsituationen ohne höhere Bewölkung ist der Messbereich natürlich auf wesentlich kleinere Höhenbereiche beschränkt. Die Kohärenz der gewonnenen Geschwindigkeitsfelder lässt erwarten, dass hieraus stabile Windprofile abgeleitet werden können. In einem künftigen operationellen Einsatz könnte es daher lohnend sein, VAD-Messungen für die Erstellung von Prognosen zur advektiven Nebelentwicklung heranzuziehen. Jedoch wären dafür noch robuste Algorithmen zu entwickeln, die auch Abweichungen von der Idealform in Gl. 2-25 tolerieren. In dem in Bild 27 gezeigten Beispiel ist die Windgeschwindigkeit so groß, dass die Nyquist-Grenze der Dopplergeschwindigkeit überschritten wird. Man erkennt dies an den Sprüngen zwischen -10 und $+10$ m/s (schwarz/gelb). Aus der Wettarradartechnik sind zuverlässige Verfahren bekannt, die möglicherweise übernommen werden können, um die VAD-Geschwindigkeitsmessung durch Entfaltung auf ein Vielfaches der Nyquistfrequenz auszudehnen. Dies wurde im Rahmen dieses Projekts aber nicht realisiert, da es als Arbeitspaket nicht vorgesehen war und in dieser Entwicklungsphase keine Priorität hatte.

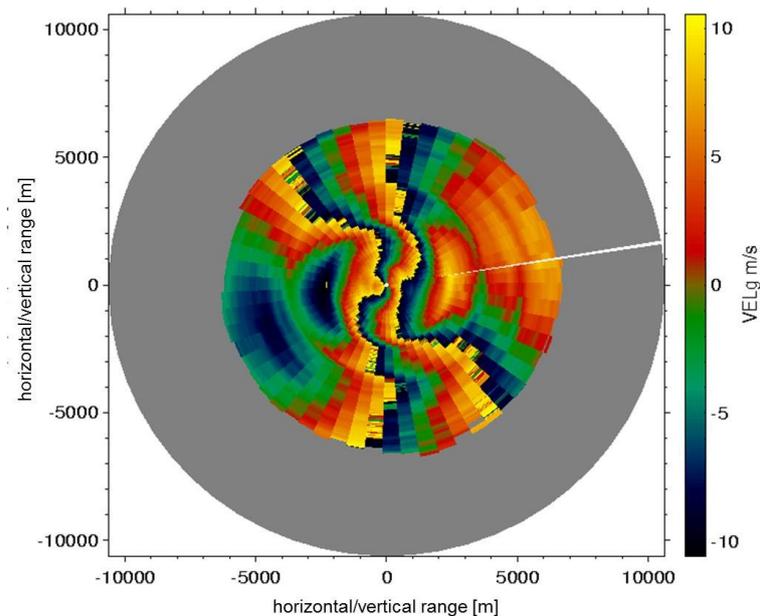


Bild 27: Dopplergeschwindigkeit in Scan-Phase C (Velocity Azimuth Display) in 5 km hochreichender Bewölkung.

2.3.9. Advektion von Nebel

Da die Messkampagne gezeigt hatte, dass Radardetektion von Nebel recht zuverlässig funktionierte, wurde nach Abschluss des geplanten Messprogramms vom 21.2. bis 9.3.2012 ein spezieller Scan-Mode gefahren, mit dem Möglichkeiten erprobt wurden, die Advektion von Nebel zu beobachten, um daraus möglicherweise Kurzfristprognosen im 10-Minuten-Bereich abzuleiten. Uematsu et al. (2005) haben die Verlagerung von zellularen Nebelfeldern in PPI-Scans eines Millimeterwellen-Radars beobachtet. Hier wurden RHI-Scans im Elevationsbereich 3 – 177° durchgeführt, da diese die vertikale Struktur und damit eine Unterscheidungsmöglichkeit zwischen Wolken und Nebel liefern. Idealerweise sollte der Azimut parallel zum Wind ausgerichtet sein. In diesem vorläufigen Versuch wurde aber der Einfachheit halber in Anbetracht der vorherrschenden westlichen Winde weiterhin der feste Azimut (89°) parallel zum Gleitpfad verwendet. Im horizontnahen Elevationsbereich wurde eine Winkelgeschwindigkeit von 0,5°/s gewählt, um auch in großen Entfernungen eine ausreichende Höhenauflösung zu erhalten. Um die Scan-Zeit in vernünftigen Grenzen zu halten wurde die Winkelgeschwindigkeit im zenitnahen Bereich auf 2°/s beschleunigt. Die Mittelungszeit wurde in dieser Betriebsart auf 1 s reduziert, um die Winkelauflösung nicht zu stark zu verschlechtern.

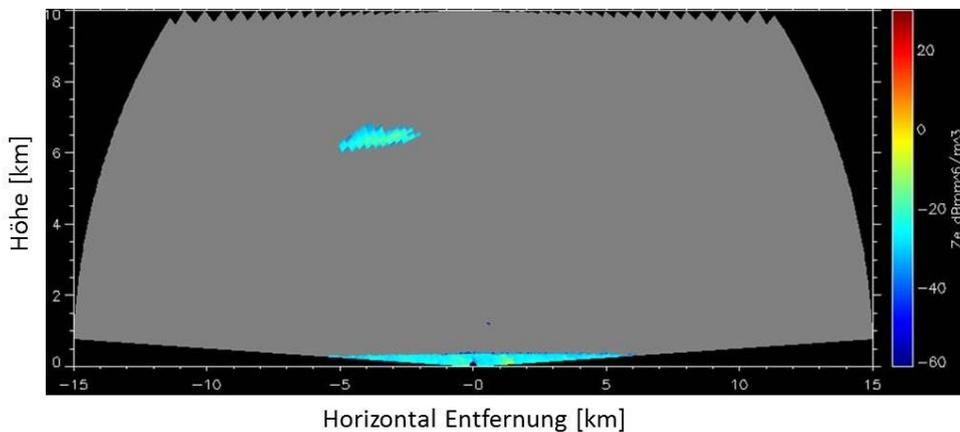


Bild 28: RHI-Scan einer 300 m hohen Nebelschicht. Scan-Folge ca. 200 s.

Bild 28 zeigt einen RHI Scan von einer 300 m hohen Nebelschicht, die bei diesem Scan-Schema bis zu einer Entfernung von 6 km beobachtet werden kann. Die Wiederholrate ist ca. 200 s, so dass bei einer angenommenen Windgeschwindigkeit (parallel zur Scan-Ebene) von beispielsweise 5 m/s advective Verlagerungen von 1 km auftreten würden. Diese Verlagerungen sollten bei genügend großer Lebensdauer von Strukturen angesichts des gesamten horizontalen Messbereich von ± 6 km erkennbar sein.

Bei korrekter Azimutausrichtung und bekannter Windgeschwindigkeit von beispielsweise 5 m/s (Diese könnte aus Dopplerverschiebung entnommen werden.) würde eine einfache Extrapolation für das in Bild 28 gezeigte Beispiel besagen, dass sich lokal innerhalb der nächsten 20 Minuten (advektiv) nichts ändert.

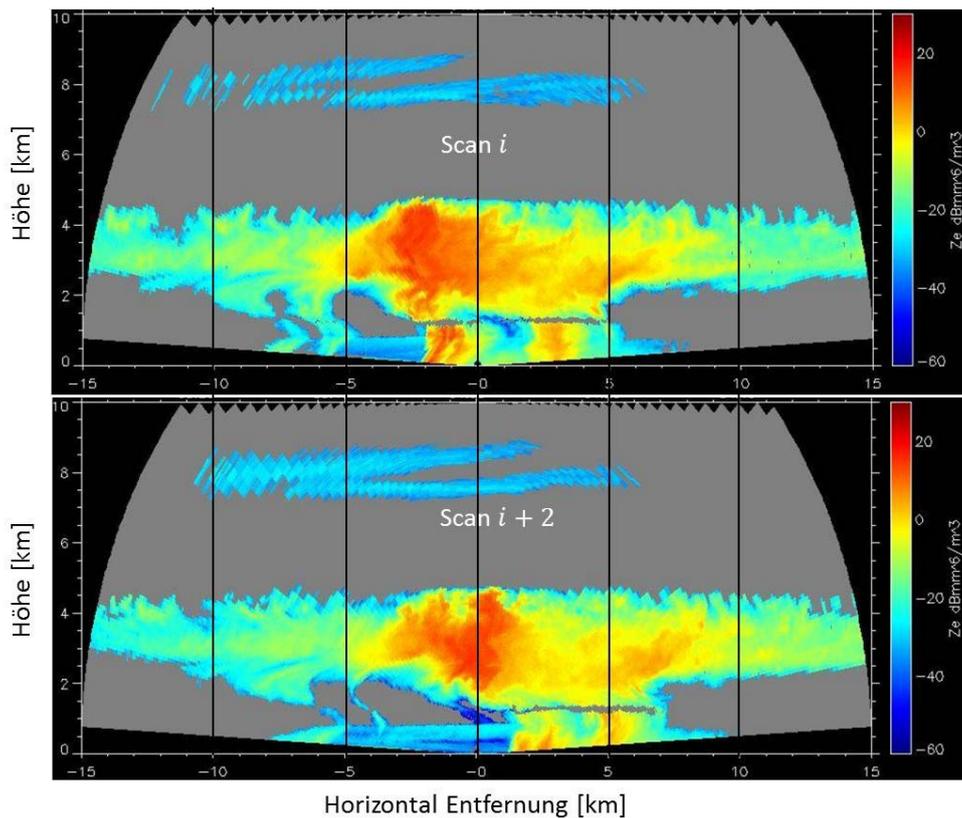


Bild 29: Folge von 2 Scans von höherreichenden, strukturierten Wolken mit ca. 400 s zeitlichem Abstand.

In Bild 29 ist zwei RHI-Scans von höherreichenden, strukturierten Wolken gezeigt, um zu demonstrieren, dass die Verfolgung von Strukturen und Extrapolation der Verlagerungsgeschwindigkeit für Kurzfristprognosen genutzt werden könnte. Der zeitliche Abstand zwischen den Scans beträgt ca. 400 s. Vor allem die Strukturen in den unteren 2 km weisen eine ausreichend große Persistenz auf, so dass eine Verlagerungsgeschwindigkeit (5 – 6 m/s) geschätzt werden kann.

Diese vorläufigen Versuche legen nahe, dass durch geeignete Scan-Muster eine Advektionsschätzung von Nebel möglich sein könnte. Für die praktische Anwendung sind allerdings noch sorgfältige Entwicklungen und Erprobungen erforderlich. So wird zum Beispiel ein Automatismus benötigt, der den Azimut der RHI-Scans der Windrichtung anpasst. Bei Richtungsscherungen ist ein geeignetes Bezugsniveau zu definieren. Vor allem ist ein geeigneter Tracking-Algorithmus zu implementieren, der – ggf. gestützt durch Dopplermessungen – realistische Zuggeschwindigkeiten von Strukturen auch bei unvollkommener Persistenz ermittelt.

2.3.10. Welche Radarempfindlichkeit ist notwendig?

Eine wesentliche Frage für die Nutzbarkeit eines Wolkenradars zur Nebeldiagnose und –prognose ist die Detektionswahrscheinlichkeit von kritischen Sichtweiten. Mit Hilfe der Beziehung zwischen Sichtweite und Radarreflektivität kann ein Schwellwert für die minimale detektierbare Reflektivität Z_{\min} festgelegt werden. Da diese von der Entfernung r des Streuvolumens und der Mittelungszeit t abhängt, wird die Radarempfindlichkeit S_R zweckmäßigerweise durch entsprechende Normierung definiert. In der üblichen Dezibel-Schreibweise ist dann

$$S_R = Z_{\min}(r [m], t[s]) - 20 \log r + 5 \log t \quad \text{Gl. 2-26}$$

Nach der Spezifikation von Z_{\min} in Tabelle 2 gilt für das MIRA-36

$$S_R = -124 \text{ dBZ} \quad \text{Gl. 2-27}$$

Für die folgenden Überlegungen wird die in Kapitel 2.3.5 wiedergegebene theoretische GU-Beziehung zwischen Sichtweite und Radarreflektivität zu Grunde gelegt, da sie (im Gegensatz zu den Daten der iPort-Messkampagne) frei von Beobachtungsfehlern ist. Danach entspricht eine Radarreflektivität $Z = -40 \text{ dBZ}$ im Mittel eine Sichtweite von ca. 2500 m (d.h. $\langle \text{MOR}(-40 \text{ dBZ}) \rangle = 2500 \text{ m}$). Auf Grund der unterschiedlichen Tropfengrößenverteilungen streut die Sichtweite (2σ) jedoch um eine Zehnerpotenz (siehe Bild 18). Nimmt man eine Lognormal-Verteilung für die Sichtweite an, so ist diese bei $Z = -40 \text{ dBZ}$ in 16% aller Fälle kleiner als 790 m.

Eine detektierbare Radarreflektivität von $Z_{\min} = -40 \text{ dBZ}$ wird daher als angemessen für eine ausreichend sichere Detektion von Situationen mit eingeschränkter Sichtweite betrachtet.

Die Nebeldetektion setzt allerdings eine zuverlässige Targetklassifizierung voraus. Vor allem atmosphärisches Plankton ist in den bodennahen Schichten sehr oft eine dominierende Echoquelle und muss zuverlässig herausgefiltert werden. Wesentliches Kriterium ist das LDR (Bauer und Görsdorf, 2007), dass den Schwellwert von 17 dB unterschreiten muss. Dieser Schwellwert kann nur detektiert werden, wenn der Echopegel um mindestens 17 dB über Z_{\min} liegt. Für Nebelmessungen muss daher eigentlich eine ungünstigere Radarempfindlichkeit definiert werden:

$$S_{R, \text{fog}} = S_R + 17 = -107 \text{ dBZ} \quad \text{Gl. 2-28}$$

Der Nutzen von Nebelbeobachtungen mit Radar ist nicht die Messung im Nahbereich, da diese mit in-situ Methoden billiger und besser realisierbar ist. Vielmehr liegt der Zusatznutzen des Radars in der Fernmessung im Bereich mehrerer Kilometer, um so Informationen für Kurzfristprognosen der Nebelentwicklung zu gewinnen und/oder Sichtweiteninformationen auf dem Gleitpfad zur Verfügung zu stellen. Eine sinnvolle Forderung ist daher, dass $Z_{\min} = -40 \text{ dBZ}$ im gesamten Entfernungsbereich des Radars zu gewährleisten. Für die Mittelungszeit wird $t = 1 \text{ s}$ angesetzt - als Kompromiss zwischen Empfindlichkeit und Scan-Geschwindigkeit. Mit der Empfindlichkeit von MIRA-36 ergibt sich dann nach Gl. 2-28 eine maximale Messentfernung von gut 2 km. Verzichtet man auf die Targetklassifikation, so ist Gl. 2-27 anwendbar mit einem entsprechend erweiterten Entfernungsbereich von 16 km.

2.4. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die größte Position (jeweils Selbstkosten) waren die Personalkosten in Höhe von € 373.300,00. Sie wurden im Wesentlichen benötigt für die in Kapitel 2.2.2 und 2.2.3 beschriebenen Entwicklungsarbeiten sowie die in Kapitel 2.3 beschriebene Durchführung und Auswertung der Messkampagne.

Die zweitgrößte Position waren Fremdleistungen in Höhe von € 50.000,00, die für die Nachentwicklung der Antenne benötigt wurden. Von den Materialkosten in Höhe von €15.000,00 entfielen €7.000,00 auf die Beschaffung eines Ersatzmagnetrons (Verschleißteil) für das für die Messkampagne leihweise zur Verfügung gestellte Wolkenradar, der Rest auf Kleinmaterial. Die Reisekosten in Höhe

von €4.500,- wurden für die Teilnahme an Projektbesprechungen sowie die Installation und lokale Betreuung der Messsysteme auf dem Flughafen München benötigt.

2.5. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit ist in den Kapiteln 2.2.1 bis 2.2.3 sowie 2.3.1 bis 2.3.10 für alle dort beschriebenen Entwicklungsschritte und Analysen ausführlich begründet worden.

2.6. Voraussichtlicher Nutzen

Es konnte gezeigt werden, dass mit Millimeterwellenradar Beobachtungen von Nebel in einem mehrere Kilometer umfassenden Entfernungsbereich möglich sind. Die Ergebnisse zeigten eine Empfindlichkeit und Zuverlässigkeit der Messungen, die den operationellen Einsatz zur Unterstützung der Betriebsplanung an nebelgefährdeten Flughäfen sinnvoll erscheinen lassen.

2.7. Fortschritte bei anderen Stellen

Boers et al. (2013) haben simultane Nebelmessungen mit Radar und Tropfengrößenanalysatoren durchgeführt und versucht, die Streuung der Beziehung zwischen Radarreflektivität und Sichtweite zu vermindern, indem ein mikrophysikalisches Modell herangezogen wurde, aus dem die Tropfengrößenverteilung während des Lebenszyklus' eines Nebelereignisses abgeleitet wurde. Es bleibt abzuwarten, inwieweit diese interessanten Grundlagenstudien in die Praxis umsetzbar sind. Am SIR-TA/Palaisau (Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique) wird ein langfristig angelegtes Forschungsprogramm "PARISFOG" zur experimentellen Analyse und Fernerfassung von Nebel, zur Modellierung der mikrophysikalischen Eigenschaften sowie zur Aufklärung der Randbedingungen der Nebelentwicklung und -auflösung durchgeführt (Haefelin et al., 2010). In den Wintermonaten sind jeweils Intensivmesskampagnen durchgeführt worden, die aufschlussreiche Ergebnisse erwarten lassen.

2.8. Geplante Veröffentlichungen

Arbeitstitel: "Fog observations with a K-band cloud radar", geplantes Journal: *Atmospheric Measurement Techniques*, European Geophysical Union

LITERATUR

- Bauer-Pfundstein, M. R. and U. Górsdorf, 2007: Target separation and classification using cloud radar Doppler-spectra. 33rd International Conference on Radar Meteorology, 6-10 August 2007, Cairns, Australia.
- Boers, R., H. Klein Baltink, H. J. Hemink, F. C. Bosveld, M. Moerman, 2013: Ground-Based Observations and Modeling of the Visibility and Radar Reflectivity in a Radiation Fog Layer. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **30**, 288–300.
- Chandrasekar, V., R. Jeffrey Keeler, 1993: Antenna Pattern Analysis and Measurements for Multiparameter Radars. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **10**, 674–683.
- de Wolf, David A., Christos Kontogeorgakis, Robert E. Marshall, 1999: Reflectivity and Attenuation at Millimeter to Infrared Wavelengths for Advection Fogs at Four Locations. *J. Appl. Meteor.*, **38**, 126–131.
- Fernald, F.G.: Analysis of Atmospheric Lidar Observations: Some Comments. *Appl. Opt.* **23** (1984) 652-653

- Görsdorf, U., V. Lehmann, M. Bauer, G. Peters, 2013: A 35 GHz radar for long term observations of cloud parameters - Description of system, data processing and sampling strategy, Zur Veröff. eingereicht bei ?????
- Gultepe, I., and Coauthors, 2009: The Fog Remote Sensing and Modeling Field Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90**, 341–359.
- Haeffelin, M., and Coauthors, 2010: PARISFOG: Shedding New Light on Fog Physical Processes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 767–783.
- Hamazu, Kyosuke, Hiroyuki Hashiguchi, Toshio Wakayama, Tomoya Matsuda, Richard J. Doviak, Shoichiro Fukao, 2003: A 35-GHz Scanning Doppler Radar for Fog Observations. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **20**, 972–986.
- Hildebrand, Peter H., R. S. Sekhon, 1974: Objective Determination of the Noise Level in Doppler Spectra. *J. Appl. Meteor.*, **13**, 808–811.
- Klett, J. D.: Stable Analytical Inversion Solution for Processing Lidar Returns. *Appl. Opt.* **20** (1981) 211-220
- Moran, Kenneth P., Brooks E. Martner, M. J. Post, Robert A. Kropfli, David C. Welsh, Kevin B. Widen-er, 1998: An Unattended Cloud-Profiling Radar for Use in Climate Research. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **79**, 443–455.
- Uematsu, Akihisa, Hiroyuki Hashiguchi, Michihiro Teshiba, Hisamichi Tanaka, Koichi Hirashima, Shoichiro Fukao, 2005: Moving Cellular Structure of Fog Echoes Obtained with a Millimeter-Wave Scanning Doppler Radar at Kushiro, Japan. *J. Appl. Meteor.*, **44**, 1260–1273.

Dr. Matthias Bauer-Pfundstein
(Projektleiter)

Elmshorn 20.06.2013