



universität
wien

MASTERARBEIT

Titel der Masterarbeit

Dual-polarisiertes Wetterradar versus Mikroregenradar:
Vergleich der Reflektivitätsprofile

Verfasserin

Theresa R. Plank, BSc

angestrebter akademischer Grad

Master of Science (MSc)

Wien, 2014

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 066 614

Studienrichtung lt. Studienblatt: Masterstudium Meteorologie

Betreuer: O. Univ.-Prof. Dr. Reinhold Steinacker

Zusammenfassung

Im Jahr 2011 hat die Umstellung des österreichischen Wetterradar-Netzwerks auf duale Polarisationstechnik, mit der Umrüstung des Wetterradars in Rauchenwarth, begonnen. Da die Erfahrungswerte mit dual-pol Anlagen und den damit einhergehenden Neuerungen und Möglichkeiten in Österreich bisher eher gering sind, ist es von besonderem Interesse Vergleichswerte zu schaffen, die eine adäquate Einschätzung und Interpretation der Messwerte ermöglichen. Durch einen Vergleich der Reflektivitätsprofile des dual-pol Wetterradars mit den vertikal höher aufgelösten Daten des Mikroregenradars wird eine Vergleichsmöglichkeit geschaffen, um beispielsweise Unklarheiten in der Dateninterpretation zu beseitigen oder Messfehler zu erkennen.

Für den Vergleich wird eine, nach bestimmten Kriterien getroffene Auswahl von acht, sowohl konvektiven, als auch stratiformen, Ereignissen herangezogen, die das Wetterradar in Rauchenwarth und das Mikroregenradar am Trafelberg repräsentativ gegenüberstellen. Der Vertikalvergleich findet über den gesamten Messbereich (alle Höhenschichten) des Mikroregenradars und die entsprechenden Höhenbereiche der Wetterradarelevationswinkel statt. Anschließend werden die Radarmesswerte mit den Referenzmesswerten eines Distrometers am Boden in Beziehung gesetzt. Des Weiteren bringt eine Gegenüberstellung von gefiltertem und ungefiltertem Radarsignal Aufschlüsse über die Hintergründe und Vorgänge des Signalprocessings. Die Datenauswertung veranschaulicht zudem Abschattungseffekte, aufgrund der ersten Alpenausläufer, für die unterste Elevation des Wetterradars in Rauchenwarth.

Der zweite Aspekt dieser Arbeit betrifft die Niederschlagsdämpfungskorrektur des dual-pol Wetterradars mittels differentieller Phase. Welche mit dem ZPHI-Verfahren anhand eines Beispielfalls demonstriert und wiederum mit dem Mikroregenradar als Referenz in Beziehung gesetzt wird.

Sowohl das dual-pol Wetterradar, als auch das Mikroregenradar weist je nach vorherrschenden Bedingungen und Gegebenheiten Stärken und Schwächen in der Messung auf. Dabei ist es anzuraten, durch eine Kombination beider Systeme, das gesamte Potential auszuschöpfen und die Vorteile in der Messung der jeweiligen Radaranlage zu nutzen. Im Übrigen ist zu konstatieren, dass die behandelte Thematik durch weiterführende wissenschaftliche Arbeiten noch detaillierter zu untersuchen und zu diskutieren ist.

Abstract

Since the year 2011 the Austrian weather radar network was adapted to dual-polarization technique, starting with the weather radar at Rauchenwarth. Because of minor experience with dual-polarization radars and their innovative possibilities in Austria, it is important to create reference values to permit suitable evaluation and interpretation of the radar data.

By comparing reflectivity profiles of dual-polarization radar and micro rain radar data with a higher resolution in the vertical, one executes a permanent possibility for comparison to obtain e.g. data misinterpretation or measurement errors. Different criteria were chosen for a selection of eight stratiform and convective cases to be considered in a representative comparison of the weather radar at Rauchenwarth and the micro rain radar at Trafelberg. According to that vertical profiles of the micro rain radar were collated with appropriate weather radar elevation angles. Subsequently the radar data was compared with distrometer measurements at the ground for reference issues. After matching filtered and unfiltered radar reflectivity signals one gets some indication of signal processing and filtering techniques. The data analysis illustrates shading effects at the outer branch of the Alps for the lowest elevation angle of the weather radar at Rauchenwarth.

The second issue of this thesis pertains precipitation attenuation correction by means of differential phase shift. By an example case the applied ZPHI-method is demonstrated and interrelated with the micro rain radar reflectivity measurement as a reference.

Both the dual-polarized weather radar and the micro rain radar have strong and weak points depending on prevailing conditions according to the measurement. A combination of both systems is recommended to exploit the full potential and benefit of the advantages of a particular radar. Otherwise the particular topics of this thesis should be further investigated and discussed scientifically.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	iii
Abstract	iv
Inhaltsverzeichnis	v
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemfelder	2
1.3 Aufbau	5
2 Allgemeines	7
2.1 Dual-polarisiertes Wetterradar	10
2.1.1 Dual-pol Momente	12
2.2 Mikroregenradar	13
3 Datensatz	17
3.1 Daten des dual-pol Wetterradars Rauchenwarth	17
3.2 Daten des Mikroregenradars am Trafelberg	18
4 Methodik	19
4.1 Vertikalvergleich	19
4.2 ZPHI-Verfahren	21
5 Fallauswahl	27
6 Ergebnisse	39
6.1 Abschattung	39
6.2 Wetterradarsignal: gefiltert versus ungefiltert - horizontal versus vertikal . . .	41
6.3 Vertikalvergleich Mikroregenradar und Wetterradar	43
6.4 Referenzdistrometer	49

6.5	Wetterradar Dämpfungskorrektur	53
7	Schlussfolgerung und Ausblick	57
	Literaturverzeichnis	59
	Abbildungsverzeichnis	vii
	Tabellenverzeichnis	xi
	Danksagung	xiii
	Lebenslauf	xv

1 Einleitung

In dieser Arbeit sollen die Unterschiede in der Niederschlagsbestimmung von Wetterradar- und Mikroregenradaranlagen untersucht und mit Hilfe von Distrometerdaten in Bodennähe nachvollzogen werden. Des Weiteren werden anhand eines Beispielfalls die Dämpfungseffekte am Wetterradar erforscht und mit der differentiellen Phase die beobachteten Radarreflektivitäten korrigiert. Für den Vergleich werden dreierlei Messsysteme herangezogen: das dual-polarisierte Wetterradar der Austro Control Österreichische Gesellschaft für Zivilluftfahrt mbH in Wien-Raichenwarth, das Mikroregenradar der Universität Wien am Trafelberg und ein Distrometer der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) ebenfalls am Trafelberg. Der Einfachheit halber wird im Folgenden fallweise Mikroregenradar mit MRR und dual-polarisiertes Wetterradar mit WXR abgekürzt und mit den ersten Buchstaben des Standortes indiziert (WXR_{RAU} und MRR_{TRA}).

1.1 Motivation

Das österreichische Wetterradar Netzwerk - betrieben von Austro Control Österreichische Gesellschaft für Zivilluftfahrt mbH - wurde in den Jahren 2011 bis 2013 kontinuierlich auf eine neue Generation von Wetterradars, mit dualer Polarisierungstechnik (dual-pol Technik), überholt (vgl. Kaltenböck, 2012 [12]). Diese Neuerung im Flugwetterradar Netzwerk bringt eine Vielzahl von Möglichkeiten Niederschlag genauer zu spezifizieren und zu erfassen, die es zukünftig auch in der operationellen Anwendung optimal auszuschöpfen gilt. Da die Erfahrungswerte mit dual-pol Anlagen in Österreich aufgrund der kurzen Betriebszeit bisher eher gering sind, ist es besonders im Interesse aller Anwender Vergleichswerte zu schaffen, die eine adäquate Einschätzung und Interpretation der Messwerte ermöglichen. In vorangegangenen Arbeiten wurden Vergleiche von alten und neuen Wetterradaranlagen angestellt, welche aber nur auf einen kurzen Vergleichszeitraum beschränkt sind. In dieser Arbeit soll darum ein etwas anderer Ansatz gewählt werden, um eine Vergleichsmöglichkeit zu schaffen. Auf diese, sofern beide Radaranlagen (MRR und WXR) in Betrieb sind, zu jedem Zeitpunkt zurückgegriffen werden kann um etwaige Unklarheiten in der Dateninterpretation zu beseitigen, Messfehler zu erkennen oder eine Eichung der Radardaten in den entsprechenden Höhen über dem Mi-

Microregenradar vorzunehmen.

Das Microregenradar bietet mit einer hohen vertikalen Auflösung eine optimale Vergleichsmöglichkeit für das Wetterradar im Vertikalprofil (über dem MRR-Standort). Besonders für die niederschlagsträchtigen untersten Elevationen des Wetterradars bringt das Microregenradar einen, bis zu einem gewissen Grad, unschlagbaren Mehrwert für die Erkennung, Spezifikation und Klassifikation von Niederschlag. Siehe dazu auch vorangegangene Arbeiten von, Clemens et al., 2007 [4], Clemens et al., 2006 [3], Peters et al., 2005 [20] und Peters et al., 2002 [19], sowie Wagner et al., 2004 [27] und Wagner et al., 2003 [26]. Diese Arbeit soll ein erster Schritt für die optimale Ausschöpfung des Microregenradarpotentials und dessen mögliche Anwendung im operationellen Dienst sowie weiterführende Forschung in diesem Bereich sein.

1.2 Problemfelder

Im Rahmen dieser Arbeit, speziell im Umgang mit den Daten und der Auswertung haben sich auch einige Problemfelder aufgetan. Einige davon konnten mit einfachen Mitteln beseitigt werden, andere jedoch waren aufgrund verschiedener Gegebenheiten, unter anderem technischer Faktoren, nicht beeinflussbar. Die folgende Auflistung soll einen kurzen Abriss über vorhandene Problemfelder geben.

Datenverfügbarkeit Die Auswahl der untersuchten Fälle ist aufgrund der Datenverfügbarkeit beider Radaranlagen, sowohl des Microregenradars, als auch des dual-pol Wetterradars begrenzt. Zweiteres ist erst im Frühjahr 2011 in Betrieb gegangen, damit ist die Fallauswahl für diese Arbeit auf die Jahre 2011-2013 beschränkt. Erschwerend kommt dabei hinzu, dass in der besagten Periode das MRR, aus verschiedensten Gründen, nicht immer im Messbetrieb war. Ein weiteres Auswahlkriterium stellt die Zugrichtung des Niederschlagsfeldes bzw. der Schauerzelle, sowie die optimale Erfassung am MRR Standort Trafelberg dar, sodass das MRR sinnvolle Messwerte liefern kann. Weitere limitierende Faktoren sind außerdem, stratiforme Ereignisse mit zu tiefer Schneefallgrenze und konvektive Ereignisse mit festem Niederschlag (beispielsweise Hagel oder Graupel), da das MRR für diese Fälle keine adäquaten Messwerte liefern kann. Aufgrund dieser und anderer Komponenten ist die Datenverfügbarkeit ein maßgeblich begrenzender Faktor für die in dieser Arbeit präsentierten Fallauswahl.

Radarsensitivität Messungen mit Radaranlagen werden allen voran von der ausgesandten Pulsfrequenz oder Wellenlänge bestimmt. Daher gibt es auch verschiedene Bandbreiten in denen Radars operieren, je nachdem welchem vordergründigen Zweck die Messung dienen soll. Ein großer Unterschied in der Sensibilität eines Radars gewisse Niederschlagsteilchen zu erfassen, ergibt sich durch Gleichung 2.6 für den Rückstreuquerschnitt eines Niederschlagsteilchens, wobei die Wellenlänge zur vierten Potenz in die Gleichung eingeht und somit je nach Wellenlänge des ausgesandten Pulses und Tropfengröße Diskrepanzen bezüglich der gemessenen Reflektivitätswerte verschiedener Radars

entstehen. Im Falle des WXR_{RAU} beträgt die Wellenlänge des ausgesandten Pulses gemäß der WXR-Spezifikationen aus Tabelle 2.1 $\lambda_{WXR_{RAU}} = 5,36 \text{ cm}$, da $\lambda = \frac{c}{f}$ gilt. Die Wellenlänge des MRR_{TRA} beläuft sich laut MRR-Spezifikation in Tabelle 2.2 demnach auf $\lambda_{MRR_{TRA}} = 1,25 \text{ cm}$. Ausschlaggebend sind diese Unterschiede besonders im Vergleich der Radaranlagen miteinander, da kleinere Tröpfchen vom Mikroregenradar erfasst werden können, vom Wetterradar jedoch nicht, da die Wellenlänge des WXR im Bezug auf die Tropfengröße zu groß ist. Im Gegensatz dazu wird der Puls des Mikroregenradars bei sehr großen Niederschlagsteilchen, wie zum Beispiel Hagelkörner so stark gedämpft, dass die Messwerte nicht zum weiteren Vergleich herangezogen werden können, bei Wetterradars ist dieser Effekt aufgrund der größeren Wellenlänge vergleichsweise gering.

Vergleich der Strahlvolumina Unterschiedliche Volumengrößen sind für einen eindeutigen Vergleich jeglicher Art im Wesentlichen unzulässig. Daher steht beim Vergleich des Mikroregenradars mit dem dual-pol Wetterradar in dieser Arbeit ein Versuch im Vordergrund, die Volumina vergleichbarer zu machen. Dieses Vorhaben ist aber aus logistischen Gründen nur eine Annäherung an optimale Vergleichsbedingungen. Da das MRR Strahlvolumen um ein Vielfaches kleiner ist als das des Wetterradars, wurden die Höhenbereiche der MRR Messung entsprechend der jeweiligen WXR Strahlvolumenbereiche gemittelt. Idealerweise würde ein Vergleich von Radardaten auch eine horizontale Mittelung inklusive direkt benachbarter Volumenwerte erfordern. Diese Bedingung wurde in dieser Arbeit aber nicht erfüllt, da im Falle eines Mikroregenradars, in der Horizontalen jeweils nur ein Messwert in den Höhenschichten direkt über dem Mikroregenradarstandort existiert, sowie im Vergleich das Volumen des Wetterradars bereits viel größer ist, als das zu gegenüberstellende Volumen des Mikroregenradars. Weitere Ausführungen zu diesem Thema sind Kapitel 4.1 zu entnehmen.

Zeitliche Variabilität Messinstrumente werden in der Regel zeitlich sehr genau synchronisiert, durch länger andauernde Betriebszeiten können die Systemzeiten aber leicht von einander abweichen, dieser Fehler sollte aber sehr geringen Ausmaßes sein. Zeitliche Variabilität wird auch durch die unterschiedlichen Messmethoden hervorgerufen. Das MRR mittelt jeweils die Messwerte der letzten 30 Sekunden, ein vollständiger WXR Volumenscan hingegen bekommt den Zeitstempel der untersten Elevation des Scans, die Elevationen darüber passieren zeitlich aber schon innerhalb der 2,5 Minuten davor. Aufgrund dessen können sich während der Messung und im Vergleich der Radaranlagen untereinander Diskrepanzen ergeben. In der Gegenüberstellung mit dem Distrometer ist darauf zu achten, dass es zeitliche Differenzen in der Messung gibt, da Regentropfen, die vom Radar in einer gewissen Höhe detektiert werden, aufgrund ihrer Fallgeschwindigkeit auch eine gewisse Zeit brauchen bis sie den Boden beziehungsweise das Distrometer erreichen. Dies kann je nach Fallgeschwindigkeit und detektierter Höhe der Tropfen bis zu einigen Minuten Verzögerung verursachen.

Räumliche Variabilität Messwerte bestimmter Radarmessgrößen neigen dazu räumlich stark zu fluktuieren, Grenzen und Übergänge sind mitunter drastisch. Allen voran deshalb, weil ein vorliegendes Messvolumen bezüglich der inbegriffenen physikalischen Phänomene eine um ein Vielfaches gröbere Betrachtungsskala aufweist. Eine Mittelung über mehrere benachbarte Messvolumina entkräftet dieses Problemfeld zumindest fürs erste. In der Vertikalen wurde eine Mittelung der Mikroregenradarmesswerte für den Vergleich vorgenommen. Eine horizontale Homogenisierung durch Mittelung ist in dieser Arbeit nicht durchführbar, zudem der Vergleich der Radarmesswerte auf einer, besonders das dual-pol Wetterradar betreffend, sehr kleinen räumlichen Skala stattfindet. Räumliche Diskontinuitäten können auch durch die so genannte Interleave scan strategy des dual-pol Wetterradars hervorgerufen werden. Für den Vergleich mit dem MRR hat diese Scantechnik zur Folge, dass anstatt des vollständigen Volumens mit 16 Elevationen, nur 8 Elevationen für den Vergleich heranzuziehen sind, aber in einer höheren zeitlichen Auflösung. Mehr Informationen dazu sind Kapitel 2.1 zu entnehmen.

Logarithmische Skala Der Vergleich der Reflektivitätsfaktoren des Wetterradars und Mikroregenradars findet im Rahmen dieser Arbeit auf der logarithmischen Skala statt. Dies erscheint vielleicht ungewöhnlich, wurde aber in der Arbeit von Lakshmanan, 2012 [14] eingehend untersucht und lieferte mitunter bessere Ergebnisse als eine Datenhandhabung und Bildverarbeitung auf der linearen Skala. Allgemeine Meinungen und Standpunkte sind diesbezüglich zwiespältig, den Vergleich in dieser Arbeit betreffend, fiel die Entscheidung eindeutig auf die logarithmische Skala, also auf dBZ und nicht auf die lineare Skala von Z (mm^6m^{-3}). Bestimmte Operationen verlangen aber dennoch zwingend eine Betrachtung auf der linearen Skala, mehr Informationen dazu sind Lakshmanan, 2012 [14] zu entnehmen.

Abschattungseffekte Aufgrund der Lage des dual-pol Wetterradars Rauchenwarth im Flachland des Wiener Beckens, möchte man vermuten Abschattungseffekte würden keine essentielle Rolle spielen. Eine nähere Betrachtung im Vergleich mit dem Mikroregenradar am Trafelberg zeigt eindeutig, dass die Ausläufer des Alpenbogens einen massiven Einfluss besonders auf die unterste Elevation ($0,5^\circ$) bereits in geringer Entfernung von nur 50 km vom Wetterradar haben. Die Abschattung aufgrund der bis zu 1000 m hohen Geländeerhebungen ist für den azimuthalen Südwestsektor nicht außer Acht zu lassen. Da das MRR auf rund 1000 m Seehöhe liegt, stehen für den Vergleich der Messdaten in der untersten WXR Elevation ($0,5^\circ$) nicht ausreichend Höschichten zur Verfügung um einen adäquaten Vergleich anstellen zu können, siehe dazu auch Kapitel 4.1. Aufgrund dessen wurde die unterste Elevation für die resultierenden Vergleiche nicht weiter in Betracht gezogen, siehe dazu auch Abbildung 6.1.

Dämpfungseffekte Eine wohl bekannte Fehlerquelle bei der Niederschlagsdetektion ist die Dämpfung des Radarstrahls durch meteorologische und nicht meteorologische Phänome-

ne. Vor allem die Strahldämpfung an Hydrometeoren ist von entscheidender Bedeutung, auch für den Vergleich der Reflektivitätsfaktoren der Radaranlagen. Das Mikroregennadar sendet eine vergleichsweise kurze Wellenlänge in seinem Radarpuls aus, daher wird der Puls an sehr großen Tropfen oder an festen Partikeln, wie Hagel stärker gedämpft, als der Radarpuls des dual-pol Wetterraders mit einer etwas größeren Wellenlänge. Die Niederschlagsdämpfung spielt also beim MRR besonders in größeren Höhen bzw. oberhalb der Schmelzschicht eine bedeutende Rolle. Der Wetterradarstrahl weist genauso Dämpfungseffekte beim Durchgang durch Niederschlagsfelder auf. Diese Niederschlagsdämpfung kann mit Hilfe der dual-pol Momente und mittels Korrekturverfahren, wie beispielsweise der ZPHI-Methode korrigiert werden.

Signalprozessor Aufgrund der Einstellungen am Signalprozessor des WXR_{RAU} werden beim vorliegenden Datensatz Gebiete mit schlechter Korrelation der Dopplergeschwindigkeit, auch Zerosnake genannt, herausgefiltert, weil sie als Groundclutter identifiziert werden. Dadurch werden in diesen Gebieten mitunter auch Reflektivitätswerte entfernt, die auf meteorologische Echos zurückzuführen sind. Ein weiteres Problemfeld, besonders den Vergleich mit dem MRR_{TRA} betreffend, entsteht dadurch, dass manche Reflektivitätswerte das Rauschlevel nicht übersteigen und dadurch vom Signalprozessor am WXR gefiltert werden, das MRR hingegen liefert noch nennenswerte Reflektivitätswerte. Diese Diskrepanzen in der Messung und Datenhandhabung kann, über längere Zeit hinweg, einen deutlichen Bias im Vergleich hervorrufen.

Was ist die Wahrheit? Da es sich beim Vergleich um unterschiedliche Messsysteme handelt ist es meist sehr schwer zu beurteilen, welche Messung nun die richtige ist. Dabei gilt es abzuwiegen was der wahrscheinlichste Fall bzw. das wahrscheinlichste Ergebnis aufgrund der Gegebenheiten bei der Messung ist. Durch den Vergleich der beiden Radarsysteme mit Bodenmessstellen, wie dem Distrometer oder einem Ombrometer, steht eine zusätzliche Informationsquelle in der Wahrheitsfindung zur Verfügung. Diese Daten können aber nur für eine Abschätzung im Vergleich verwendet werden, da eine direkte Gegenüberstellung aufgrund der unterschiedlichen Messgegebenheiten nicht sinnvoll ist und beispielsweise durch Verdunstung und Windeinflüsse nennenswerte Messfehler entstehen. Die Auswertung der Messungen kann demnach nur nach bestem Wissen und Gewissen erfolgen, aber mit absoluter Sicherheit kann eine hundertprozentige Richtigkeit an Interpretation und Auswertung des Ergebnisses nicht gewährleistet werden, da es im Menschenermessen liegt, dies zu beurteilen.

1.3 Aufbau

Essentiell als Einstieg und Voraussetzung für den Vergleich zweier Messsysteme ist das Verständnis der Messmethode und Arbeitsweise der Anlage selbst. Diesbezüglich wird in den

Kapiteln 2.1 und 2.2 Näheres erläutert. Entsprechende Unterschiede ergeben sich auch in der Aufbereitung der Datensätze, die in Kapitel 3 dargelegt werden. Abschnitt 4 behandelt die verwendeten Methoden für den Vertikalvergleich und die Dämpfungskorrektur. Die getätigte Fallauswahl und die zugrundeliegenden Kriterien, sowie eine detaillierte Beschreibung der untersuchten Fälle sind Kapitel 5 zu entnehmen. Die Darstellung und Diskussion der Vergleichsergebnisse von Mikroregenradar, Wetterradar, sowie der Distrometerdaten und der durchgeführten Dämpfungskorrektur für das Wetterradar erfolgt in Kapitel 6. Abschließend steht ein Ausblick (Kapitel 7) für den zukünftigen Umgang mit der behandelten Thematik und ein Aufzeigen von Möglichkeiten weiterführender Arbeitsthemen und Forschungsgebiete.

2 Allgemeines

RADAR steht für RADio Detection And Ranging und ist ein Fernerkundungssystem, das im meteorologischen Sinne in erster Linie dem Zweck der Erfassung von Niederschlags- und Wolkenpartikeln dient.

Moderne Wetterradaranlagen (i. A. Dopplerradars) bestehen aus einem komplexen Systemaufbau mit fünf primären Elementen, siehe dazu auch Gekat et al., 2004 [7]. Kurz gesagt, dem Signalprozessor, dem Transmitter, der den Mikrowellenpuls generiert, sowie dem Duplexer, einem Schaltkreis, der das Mikrowellensignal zur Antenne bringt und das rückgestreute empfangene Signal zum Empfänger, um dabei das Signal zu amplifizieren und die Trägerfrequenz zu entfernen. Der Signalprozessor digitalisiert und verarbeitet das Ausgabesignal und steuert das Timing des Transmitters, allen voran die *PRF* (pulse repetition frequency). Die Ausgabedaten des Signalprozessors werden an den Produktgenerator weitergeleitet und dreidimensionale meteorologische Datensets generiert. Die Entfernung (oder range r) zwischen Radar und Zielobjekt ist abhängig von der Zeit, die das Signal braucht, um mit Lichtgeschwindigkeit zum Zielobjekt zu kommen und wieder zurück zum Radar. Daraus ergibt sich eine Entfernungsauflösung von

$$\Delta r = \tau c / 2 \quad (2.1)$$

wobei τ die Pulslänge in s und c die Lichtgeschwindigkeit in m/s ist. Die maximale Reichweite eines Radars r_{max} (in m) wird durch die *PRF* (in s^{-1}) begrenzt, da das ausgesandte Signal in der Regel zuerst wieder empfangen werden muss, bevor das nächste Signal transmittiert werden kann. (Gekat et al., 2004 [7])

$$r_{max} = \frac{c}{2 \cdot PRF} \quad (2.2)$$

Die Reflektivität Z eines Punktzieles wird aus der empfangenen Leistung P_R des rückgestreuten Signals am Radarempfänger abgeleitet. Die Empfangsleistung ist abhängig von den technischen Gegebenheiten des Radars, den Ausbreitungsbedingungen der elektromagnetischen Welle, der Entfernung zum Punktziel und der Reflektivität. Doviak und Zrnic haben diese Abhängigkeiten in der so genannten meteorologischen Radargleichung (Gl. 2.3) zusam-

mengefasst (vgl. Doviak and Zrnic, 1984 [5]).

$$P_R(r) = \frac{\pi^3 P_T G^2 G_R \Theta^2 c \tau |K|^2 Z}{2^{10} \ln(2) \lambda^2 r^2 L_{atm}^2 L_{MF}} \quad (2.3)$$

Wobei P_T die Sendeleistung bezeichnet, G den gesamten Antennengewinn, G_R den Antennengewinn an der Empfangsantenne (auch Verluste zwischen Antenne und Elektronik) und Θ eine Antenne mit 3 dB Strahlbreite. Weiters ist der Faktor $|K|^2 = \left|\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+2}\right|^2$ mit der Dielektrizitätskonstante ε , welche für Wasser und Eis stark unterschiedlich ist, λ steht für die Wellenlänge des ausgesandten Signals, L_{atm} für die atmosphärische Dämpfung zwischen Antenne und Punktziel und L_{MF} für interne Matched-Filter Verluste. Gleichung 2.3 gilt unter der Annahme, dass der Radarstrahl eine zirkularsymmetrische Form hat und das Strahlvolumen vollständig mit Niederschlag gefüllt ist. Wenn das Radar gut kalibriert und das System stabil genug ist, kann man alle Konstanten aus Gleichung 2.3 zu C_R zusammenfassen und die Reflektivität in der Einheit mm^6m^{-3} ergibt sich nach Gekat et al., 2004 [7] als:

$$Z = C_R \cdot r^2 \cdot L_{atm}^2 \cdot P_R. \quad (2.4)$$

Wegen der großen dynamischen Bandbreite der beobachteten Reflektivitäten wird im Allgemeinen die logarithmische Form des Reflektivitätsfaktors

$$dBZ = 10 \log [Z/(\text{mm}^6/\text{m}^3)] \quad (2.5)$$

nach Gekat et al., 2004 [7] verwendet.

Bezugnehmend auf die Arbeit von Lakshmanan, 2012 [14] findet der Vertikalvergleich der Reflektivitätsfaktoren des Weterradars und Mikroregenradars in dieser Arbeit auf der logarithmischen Skala, also in dBZ statt und nicht, wie man vermuten möchte in Z (mm^6m^{-3}). In dieser Studie wurden über einen großen Datensatz hinweg in punkto Datenhandhabung und Bildverarbeitung bessere Ergebnisse auf der logarithmischen Skala erzielt, als auf der linearen. Dennoch verlangen bestimmte Operationen aber zwingend eine Betrachtung auf der linearen Skala.

Meteorologische Ziele sind im Allgemeinen Niederschlags- oder Wolkengebiete, die im Idealfall das Strahlvolumen zur Gänze ausfüllen, dadurch ersetzt ein Volumenziel das triviale Punktziel. Somit addieren sich die Rückstreuquerschnitte σ_i der Niederschlagsteilchen eines betrachteten Volumens. Da die Wellenlänge der gängigen Weterradars im cm -Bereich liegt und die Niederschlagströpfchen, an denen gestreut wird, in der Regel einen Durchmesser im mm -Bereich haben, handelt es sich um Rayleigh-Streuung, damit kann man für den Rückstreuquerschnitt eines Niederschlagsteilchens nach Rinehart, 2010 [21]

$$\sigma_i = \frac{\pi^5 |K|^2 D_i^6}{\lambda^4} \quad (2.6)$$

schreiben. Damit ist die der Rückstreuoeffizient

$$\eta = \frac{\pi^5 |K|^2}{\lambda^4} \sum_{i=1}^n D_i^6. \quad (2.7)$$

Der Radarreflektivitätsfaktor kann somit auch als

$$Z = \int_0^{\infty} n(D) D^6 dD \quad (2.8)$$

definiert werden, mit der Teilchenkonzentration $n(D)$ als Funktion des Tropfendurchmessers in m^{-3} . Mit einer Diskretisierung des Integrals in Gleichung 2.8 wird der Zusammenhang zwischen η und Z , sowie die Proportionalität zur Wellenlänge λ des Radars ersichtlich. Die Gleichungen 2.6 bis 2.8 beschreiben damit die Sensibilität von Radaranlagen im Bezug auf unterschiedliche Tröpfchengrößen aufgrund der Wellenlänge des Radars ($\lambda_{WXR_{RAU}} = 5,36 \text{ cm}$ versus $\lambda_{MRR_{TRA}} = 1,25 \text{ cm}$).

Für den angestrebten Vergleich werden das Wetterradar in Rauchenwarth (WXR_{RAU}), süd-östlich von Wien und das ca. 53 km entfernte Mikroregenradar am Trafelberg (MRR_{TRA}) herangezogen, siehe dazu die Kartendarstellung¹ in Abbildung 2.1.

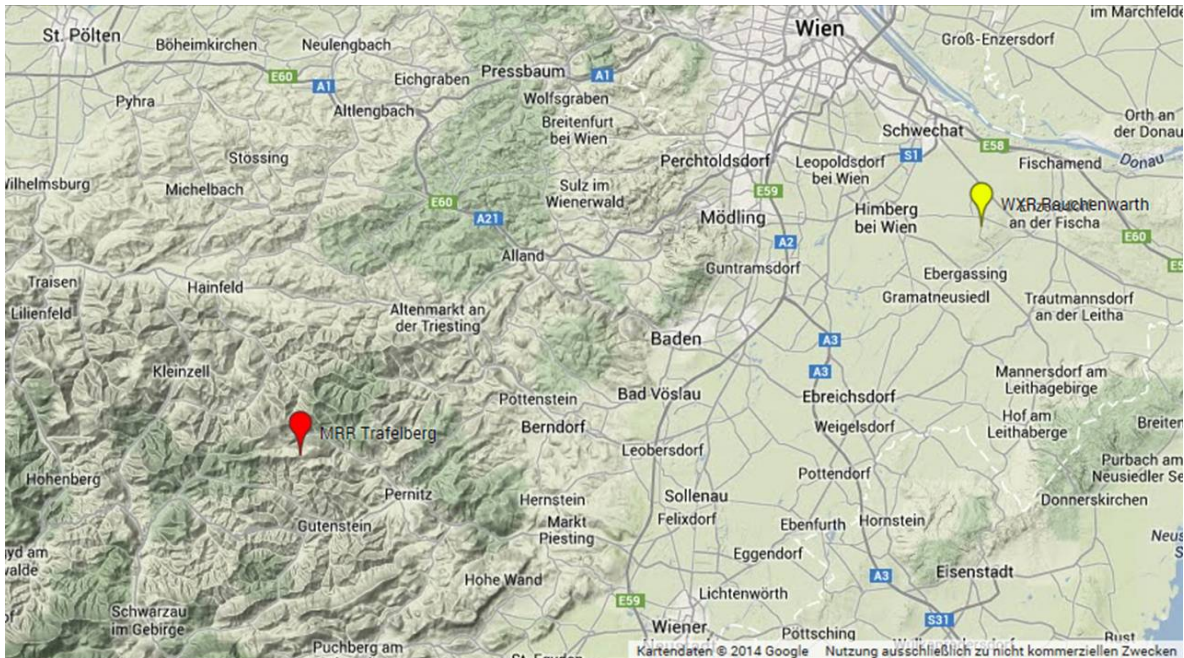


Abbildung 2.1: Übersichtskarte - Lage des Wetterradars Rauchenwarth (gelb markiert) und des Mikroregenradars am Trafelberg (rot markiert).

Die Wetterradardaten werden im Folgenden in Form von A-Scopes oder B-Scopes dargestellt. Bei einem A-Scope handelt es sich um eine eindimensionale Darstellung der Radarechos entlang des Radarstrahls, also eines Elevationswinkels in Azimutrichtung in Abhängigkeit von der Entfernung (siehe beispielsweise Abbildung 6.13). Ein B-Scope hingegen ist eine plane Projektion der Messwerte aller Azimutwinkel (d.h. einer Antennenumdrehung) bei konstantem Elevationswinkel auf eine Ebene in Abhängigkeit von der Entfernung. Auf der Abszisse

¹<https://mapsengine.google.com/map/edit?hl=de&mid=z6FCjtU5v47o.ky28qoIE5yuA>, zuletzt aufgerufen am 07.04.2014

wird dabei der Azimutwinkel aufgetragen, auf der Ordinate die Entfernung vom Wetterradar (siehe z.B. Abbildung 5.2).

2.1 Dual-polarisiertes Wetterradar

Die duale Polarisierungstechnik bringt durch die dadurch abgeleiteten Polarisationsparameter entscheidende Vorteile für die Niederschlagsbestimmung im Vergleich zu einfacher Polarisierungstechnik. Durch das Aussenden eines horizontal und vertikal polarisierten Signals kann mittels kopolarer Messmethode simultan eine Polarisierungsebene ausgesandt und zwei verschiedene empfangen werden. Durch die Polarimetrie (Untersuchung der Polarisierung von Transversalwellen) erhält man Informationen über Form und Orientierung eines Zieles bzw. eines Hydrometeors.

Wie schon eingangs erwähnt, wurden die österreichischen Wetterradaranlagen - hergestellt von Enterprise Electronics Corporation (EEC), fünf an der Zahl - in den letzten Jahren auf duale Polarisierungstechnik umgerüstet. Diese arbeiten mit einem Solid State Modulator, einem Gamic Enigma III Signalprozessor und einer 4,2 m Sandwich-Antenne, sowie einem AFC 6 m Stealth Radom mit hydrophobischer Beschichtung (vgl. Kaltenböck, 2012 [12] und Tabelle 2.1 für Details). Eine weitere Neuerung brachte die Einführung der Interleave scan strategy, siehe

WXR Spezifikationen

Betriebsfrequenz:	5600 – 5650 MHz, C-Band
Radartype:	DWSR-5001C/SDP/CE
Betriebsmodus:	STAR mode
Spitzenleistung:	500 kW
Strahlbreite (3 dB):	0,88°
Pulslänge:	0,8 μs
Horizontale Auflösung:	250 m
Horizontale Reichweite:	224 km

Tabelle 2.1: Technische Fakten zum Wetterradar.

dazu auch Kaltenböck, 2012 [13]. Eine schematische Darstellung der Interleave Volumenscan Strategie ist in Abbildung 2.2 nach Kaltenböck, 2012 [12] ersichtlich. Ein vollständiger Volumenscan über alle 16 Elevationen dauert rund fünf Minuten. Jeder Halbscan beginnt oben mit der ersten Elevation und arbeitet sich nach vollständiger Azimutumdrehung durch Anpassung der Rotationsgeschwindigkeit der Antenne und der *PRF* die acht Elevationen des jeweiligen Halbscans nach unten, damit die so genannte niederschlagsträchtigste Elevation (8. Elevation) die aktuellsten Messwerte beinhaltet und der Halbscan den aktuellsten Zeitstempel bekommt.

Der vollständige Volumenscan wird mit jedem Halbscan, also alle 2,5 Minuten, aktualisiert um die Datenaktualität zu maximieren. In Abbildung 2.3 aus Kaltenböck, 2012 [13] sind die Charakteristika der beiden Halbscans ersichtlich. Der erste Halbscan erfolgt datenoptimiert, der zweite wird durch Sampling der dual PRF doppleroptimiert. Zusätzlich dazu erfolgt alle 15 Minuten eine Kalibrierung der dual-pol Momente mittels Vertikalstrahl in Zenitrichtung.

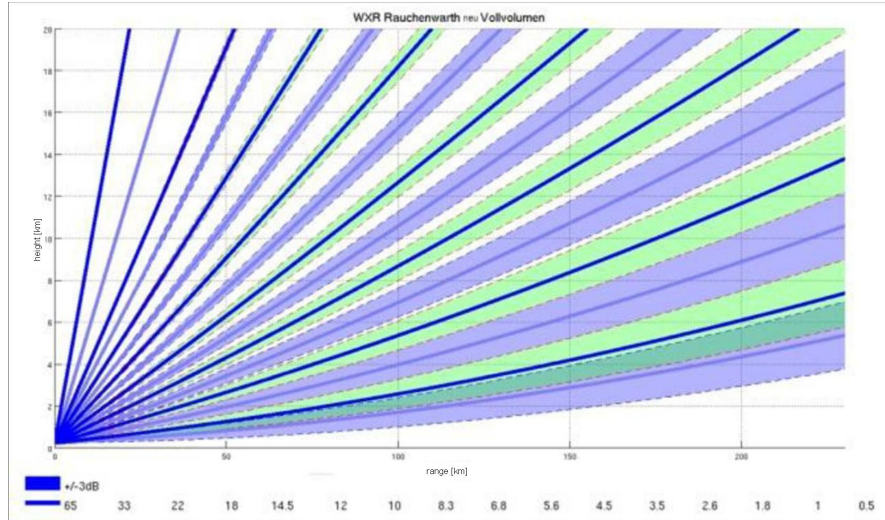


Abbildung 2.2: Interleave scan strategy des WXR_{RAU} - erster Halbscan in blau, zweiter Halbscan in grün dargestellt (aus Kaltenböck, 2012 [12]).

	Elevation	Range (Z)	rotation		PRF	vmax
	Grad	km	1/min	°/s	Hz	m/s
Interleave 1	33 (90)	100	6	36	1500	20
	18	100	6	36	1500	20
	12	125	6	36	1200	16
	8,3	125	6	36	1200	16
	5,6	186	4	24	800	11
	3,5	224	3	18	670	9
	1,8	224	3,3	20	600	8
	0,5	224	3	18	600	8
Interleave 2	65	100	6	36	800/1200	32
	22	100	6	36	800/1200	32
	14,5	100	6	36	800/1200	32
	10	125	6	36	800/1200	32
	6,8	186	4	24	600/800	32
	4,5	186	3,3	20	600/800	32
	2,6	224	3,3	20	480/600	32
	1	224	3	18	480/600	32

Abbildung 2.3: Interleave scan strategy des WXR_{RAU} (aus Kaltenböck, 2012 [13]).

Das Wetterradar in Rauchenwarth operiert im so genannten STAR-Modus (Simultaneous Transmit and Receive), wobei ein Leistungsteiler die 45° polarisierte elektromagnetische Welle aussendet und das horizontale und vertikale Signal auf zwei Empfänger aufgeteilt empfan-

gen werden (siehe Kaltenböck, 2012 [12]). Folgende Größen resultieren aus den Messungen der österreichischen dual-pol Wetterradaranlagen: der horizontale und vertikale Radarreflektivitätsfaktor Z_H und Z_V , die Dopplergeschwindigkeit V_H und die polarimetrischen Größen, wie die differentielle Reflektivität Z_{DR} , der kopolare Korrelationskoeffizient ρ_{HV} sowie die differentielle Phasenverschiebung Φ_{DP} . Für genauere Informationen, das österreichische Wetterradar betreffend, ist auf die Arbeiten von Kaltenböck, 2012 [12] und [13] zu verweisen.

2.1.1 Dual-pol Momente

„Hydrometeore beeinflussen nun polarimetrische Messungen durch Effekte der Rückstreuung sowie der Ausbreitung des Radarstrahls. Dabei wirken sich Größe, Größenverteilung, Aggregatzustand, Form, Orientierung und Fallverhalten auf die einzelnen gemessenen dual-pol Größen unterschiedlich aus.“ (Kaltenböck, 2012 [12])

Eine vollständige Auswertung und Aufstellung der Charakteristika aller polarimetrischen Radargrößen ist der Arbeit von Zrnicek und Ryzhkov, 1999 [28] zu entnehmen.

Z_{DR} Die differentielle Reflektivität ist ein Maß für die mittlere Partikelform (Größe und Orientierung) beispielsweise eines Hydrometeors. Als besonders geeignet erweist sich die differentielle Reflektivität bei der Erfassung von Regen, da kleinere Regentropfen eher kugelförmig sind und größere Tropfen mit zunehmendem Tropfendurchmesser immer abgeplatteter bzw. elliptischer werden. (Illingworth, 2004 [11])

Die horizontale Welle wird dadurch in einem Starkregengebiet stärker rückgestreut, als die vertikale und damit ist

$$Z_{DR} = 10 \log (Z_H/Z_V) \quad (2.9)$$

nach Illingworth, 2004 [11] hier positiv. Kleine Regentropfen und leichte Hagelkörner ergeben hingegen aufgrund ihrer annähernden Kugelsymmetrie Z_{DR} Werte nahe eins oder Null dB. Negative dB Werte können bei großem Hagel auftreten. (Paulitsch et al., 2009 [18])

Verwendung findet die differentielle Reflektivität in der Hydrometeorklassifikation, bei der Berechnung der Regenrate und der Unterscheidung zwischen Hydrometeoren und nicht meteorologischen Echos.

ρ_{HV} Der kopolare Korrelationskoeffizient ist ein Maß für die Vielfalt an Form, Größe und Orientierung von Hydrometeoren in einem Messvolumen. Es handelt sich dabei um die Korrelation der fortlaufenden Zeitreihen von Z_H und Z_V . (Illingworth, 2004 [11])

Im Allgemeinen ist die Korrelation in Regen hoch, das heißt, ρ_{HV} ist nahe eins. Gebiete, in denen verschiedene Niederschlagstypen vorhanden sind, wie beispielsweise Regen und Schnee, mit sehr unregelmäßigen Partikeleigenschaften, weisen eine weit geringere Korrelation auf, die ρ_{HV} Werte belaufen sich auf bis zu 0,8 für nassen Schnee. (Paulitsch et al., 2009 [18])

Anwendung findet der kopolare Korrelationskoeffizient bei der Groundclutteridentifizierung und der Hydrometeorklassifizierung.

Φ_{DP} Die differentielle Phasenverschiebung, auch differentielle Phase genannt, ist die Phasenverschiebung zwischen horizontal und vertikal polarisierter Welle, die beim Durchgang durch ein Medium (Niederschlagsgebiet) entlang des Ausbreitungsweges entsteht. Verursacht wird die Phasenverschiebung durch die Unterschiede in der Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle beim Auftreffen auf Niederschlagspartikel unterschiedlicher Größe und Form. (Paulitsch et al., 2009 [18])

Definiert wird die differentielle Phase durch

$$\Phi_{DP} = \Phi_V - \Phi_H \quad (2.10)$$

und wird mit der Einheit $[\circ]$ beschrieben. Φ_V stellt dabei die Phase der empfangenen vertikalen Welle und Φ_H die Phase der empfangenen horizontalen Welle dar. Beim Durchgang des Radarstrahls durch ein Niederschlagsgebiet mit vielen abgeplatteten Tropfen, ist die Geschwindigkeit der horizontalen Welle geringer, als die der vertikal polarisierten Welle. Dadurch ergibt sich eine zeitliche Verzögerung der horizontalen Welle zur vertikalen, also eine Phasenverschiebung Φ_{DP} . Im Allgemeinen nimmt die differentielle Phasenverschiebung mit der Entfernung vom Radar zu und die spezifische differentielle Phase K_{DP} , also die Änderung der differentiellen Phase mit der Entfernung, in der Einheit $[\circ km^{-1}]$ ist positiv. (Illingworth, 2004 [11])

Die Phaseninformation von Φ_{DP} und K_{DP} bringt durch die Unabhängigkeit der Phasenmessung gegenüber der absoluten Z_H Kalibrierung des Radarsystems sowie auch der Unempfindlichkeit gegenüber der Strahlaufweitung und partieller Strahlabschattung einen eindeutigen Mehrwert für die Niederschlagsbestimmung. Anwendung findet die differentielle Phase vordergründig bei der Korrektur der Ausbreitungsdämpfung und einer verbesserten quantitativen Niederschlagsbestimmung, wie beispielsweise der Berechnung der Regenrate. (Kaltenböck, 2012 [12])

2.2 Mikroregenradar

Das Mikroregenradar am Trafelberg liegt auf 1000 m Seehöhe und wird von der Universität Wien betrieben. Dabei handelt es sich um ein MRR-2 Micro Rain RADAR der Firma METEK Meteorologische Messtechnik GmbH, also um ein so genanntes Vertically Pointing Micro Rain Radar. Das MRR bestimmt die Höhenprofile der Tropfengrößenverteilung und davon abgeleitet die Vertikalprofile folgender quantitativer Größen: Regenrate, Flüssigwassergehalt, Radarreflektivitätsfaktor und Fallgeschwindigkeit der Hydrometeore. Die wichtigsten technischen Spezifikationen zum MRR sind Tabelle 2.2 zu entnehmen. (METEK MRR-2 User Manual, 2012 [17])

Das Herzstück des MRR ist der Gunn-Dioden-Oszillator zur Frequenzmodulation mit einer integrierten Mischungsdiode. Das linear polarisierte Signal wird über einen Wellenleiter und ein Horn auf eine abgesetzte Parabolantenne mit einem Durchmesser von 60 cm übermittelt

MRR-2 Spezifikationen

Betriebsfrequenz:	24,230 GHz
Betriebsmodus:	FMCW (frequency modulated continuous wave)
Leistung:	50 mW
Strahlbreite (3 dB):	2°
Vertikale Auflösung:	wählbar, hier: 100 m
Anzahl der Messvolumina:	31
Mittelungsintervall:	wählbar, hier: 30 s

Tabelle 2.2: Technische Fakten zum Mikroregenradar.

und damit ausgesandt. Das rückgestreute Signal wird von der selben Antenne (monostatisches Radarsystem) wieder empfangen und vom Mischer erkannt sowie vom Signalprozessor weiter verarbeitet. Da das MRR aufgrund der technischen Gegebenheiten das Signal nicht gepulst aussenden kann, wird ein anderes Messprinzip verwendet, nämlich der FMCW Modus (frequenzmodulierte kontinuierliche Wellen Methode). Dadurch, dass kontinuierlich ein Signal ausgesandt und empfangen wird, kann die Entfernungbestimmung nicht über die Laufzeit zwischen Aussenden und Empfangen des Signals, sondern muss über eine Frequenzmodulierung erfolgen. Dabei wird ein Sägezahnmuster, also eine lineare Abnahme der Frequenz des ausgesandten Signals, erzeugt (siehe Abbildung 2.4). Die Frequenzverschiebung zwischen Echo und ausgesandtem Signal ist proportional zur Entfernung des Ziels vom Mikroregenradar. (METEK MRR Physical Basics, 2010 [16])

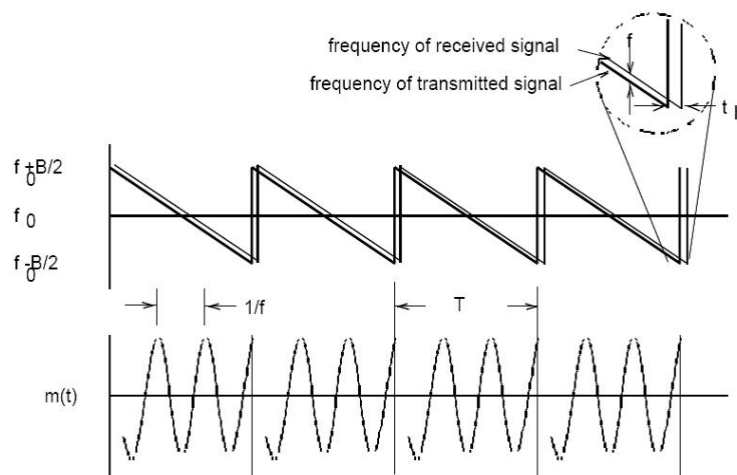


Abbildung 2.4: MRR Frequenzmuster des ausgesandten Signals und des Echos. (aus METEK MRR Physical Basics, 2010 [16])

Aus der Zeitdifferenz zwischen ausgesandtem und empfangenem Signal $\delta t_h = 1/B$ und der Beziehung zwischen Zeitdifferenz und Entfernungsauflösung $\delta h = (1/2)c\delta t_h$, errechnet sich die Auflösung in vertikaler Richtung des Mikroregennadars zu:

$$\delta h = \frac{1}{2} \frac{c}{B} \quad (2.11)$$

B ist die doppelte Amplitude des Sägezahnsignals. Um einen bewegten Tropfen zu erfassen, werden nicht ein Zeitzyklus, sondern mehrere mittels Fast-Fourier-Transformation ausgewertet. Das durch die Fourier-Transformation berechnete Powerspektrum ist proportional zur Dopplerfrequenz des Regentropfens. (METEK MRR Physical Basics, 2010 [16])

In einem Rückstreuivolumen mit vielen Tropfen sind die Tropfen im Volumen nicht gleichverteilt und die Phasen der Rückstreuesignale jedes Tropfens sind statistisch voneinander unabhängig. Somit erhält man die Gesamtleistung des Echos durch Aufsummieren der einzelnen Rückstreuesignale. (METEK MRR Physical Basics, 2010 [16])

Der MRR DSP (Dataspectrum processor) erzeugt 10 Energiespektren pro Sekunde. Standardmäßig ist eine Mittelungszeit von 10 s eingestellt. Da der Prozessor 4 Sekunden für die Datenübermittlung an den PC benötigt, ist in dieser Zeit keine Spektrenverarbeitung möglich. Das heißt, dass bei einer eingestellten Zeit von 10 s jeweils nur über 6 s gemittelt werden kann. (METEK MRR Physical Basics, 2010 [16])

Im empfangenen Signal ist ein unvermeidbares Rauschen enthalten. Dieses Rauschen täuscht ständigen Regen vor, beziehungsweise erzeugt es je nach Regenintensität einen mehr oder weniger großen BIAS der Regenrate. Bei der Signalverarbeitung ist ein Modul zur Abschätzung des Rauschens enthalten. Das Modul nimmt an, dass es sich um frequenzunabhängiges, weißes Rauschen handelt. Zur Unterdrückung des Rauschens wird der Mittelwert des Powerspektrums berechnet und dann sukzessive die Maxima entfernt. Wenn der Mittelwert sich nicht mehr signifikant ändert, entspricht dieser dem Rauschniveau. Dieses wird bei jeder Wellenlänge vom Spektrum abgezogen, um das Signal zu erhalten. (METEK MRR Physical Basics, 2010 [16])

Dieses so genannte Rohsignal wird an die Auswertesoftware übermittelt, die daraus folgende Parameter berechnet (für detaillierte Ausführungen dazu soll an dieser Stelle auf METEK MRR Physical Basics, 2010 [16] verwiesen werden):

- Die **Fallgeschwindigkeit** (in m/s) wird aus dem gemessenen Frequenzverschiebungsspektrum zwischen ausgesandtem und empfangenem Signal berechnet.
- Die **Tröpfchengröße** (in mm) wird auf Basis eines empirisch gefundenen Zusammenhangs zwischen Fallgeschwindigkeit und Tröpfchengröße ermittelt (siehe Abbildung 2.5). Hierbei wird unter Annahme der US-Standardatmosphäre die Änderung der Fallgeschwindigkeit mit der Höhe berücksichtigt. Für weiterführende Informationen sei hier auf die Arbeit von Gunn und Kinzer, 1949 [9] verwiesen.
- Die **Tröpfchengrößenverteilung** ist der Quotient aus spektraler Reflektivität und der Rückstreuläche. Die spektrale Reflektivität ist eine Funktion des Powerspektrums der

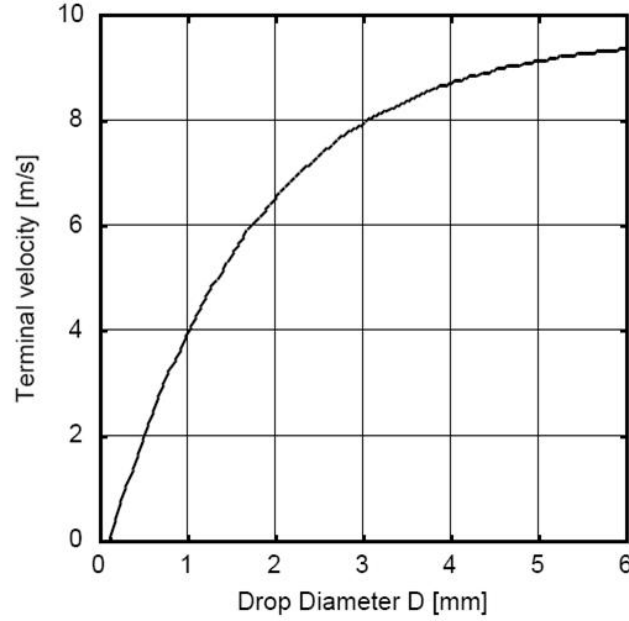


Abbildung 2.5: Fallgeschwindigkeit von Regentropfen am Boden versus Tröpfchengröße in ruhender Luft. (aus METEK MRR Physical Basics, 2010 [16])

Rohdaten, der Frequenzauflösung (30,52 Hz) und der Fallgeschwindigkeit.

$$N(D, i) = \frac{\eta(D, i)}{\sigma(D)} \quad (2.12)$$

Definition von η und σ ist bereits in Gleichung 2.7 und 2.6 erfolgt.

- Die **Radarreflektivität** (dBZ) sei als Gleichung 2.8 definiert.
- Der **Flüssigwassergehalt** ($g\,m^{-3}$) ist das Produkt aus dem Gesamtvolumen aller Tröpfchen und der Dichte von Wasser dividiert durch das Streuvolumen.

$$LWC = \rho_w \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} n(D) D^3 dD \quad (2.13)$$

- Die **Regenrate** ($mm\,h^{-1}$) wird aus der differentiellen Regenrate durch Multiplikation mit der Fallgeschwindigkeit und Integration über alle Tröpfchendurchmesser berechnet:

$$RR = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} n(D) D^3 \nu(D) dD \quad (2.14)$$

Für weiterführende Informationen zu Performance und Leistungsfähigkeit von Mikroregenanlagen in der quantitativen Niederschlagsbestimmung, ist im Besonderen auf die Arbeit von Löffler-Mang und Kunz, 1999 [15] zu verweisen.

3 Datensatz

Die verfügbaren Datensätze der Wetterradaranlagen unterscheiden sich in verschiedenerlei Hinsicht von einander. Sowohl zeitliche, als auch räumliche Unterschiede ergeben sich aus der Feinheit der Auflösung, siehe dazu Kapitel 3.1 und 3.2.

Durch das zeitliche Mittelungsintervall des Referenz-Distrometers von einer Minute ergeben sich auch hier Unterschiede zu den Radaranlagen. Die optimale Datenqualität ist nicht in allen Fällen eindeutig gegeben, oftmals treten größere Datenlücken auf, die für den Vergleich nicht herangezogen werden können.

3.1 Daten des dual-pol Wetterradars Rauchenwarth

Die Daten des Wetterradars in Rauchenwarth wurden von der Austro Control Österreichische Gesellschaft für Zivilluftfahrt mbH zur Verfügung gestellt. Diese werden als Volumenfiles von der von EEC entwickelten Radarsoftware EDGE (Enterprise Doppler Graphics Environment) gespeichert und archiviert. Die archivierten Volumenfiles werden aus EDGE als HDF5-Files (Hierarchical Data Format) exportiert und in MATLAB als Strukturvariable eingelesen, weiterverarbeitet und dargestellt.

In jedem HDF5-Volumenfile ist jeweils ein vollständiger Halbscan mit 8 Elevationen und den gewonnenen Parametern enthalten (somit erhält man alle 2,5 Minuten ein Volumenfile). Die Parameter sind:

- der ungefilterte horizontale und vertikale Reflektivitätsfaktor (TH und TV)
- der gefilterte horizontale und vertikale Reflektivitätsfaktor ($DBZH$ und $DBZV$)
- die differentielle Reflektivität ZDR
- die differentielle Phase $PHDP$
- die Radialgeschwindigkeit $VRAD$

- die spektrale Breite $WRAD$
- die Signal-to-noise-ratio SNR
- der Signal-quality-index SQI bzw. der kopolare Korrelationskoeffizient $RHOHV$

Für den Vergleich mit dem Mikroregenradar ist nun das Volumselement in einer Entfernung von $53,336\text{ km}$ bei einem Azimutwinkel von 252° und einem maximalen Elevationswinkel von $3,5^\circ$ zu betrachten. (siehe Kapitel 4)

Weiters ist beim Vergleich und den Ergebnissen darauf zu achten, dass die Reflektivitätswerte des WXR_{RAU} ab 10.06.2011 um 2 dB niedriger sind, als der tatsächlich gemessene Wert, da seitens der Austro Control Österreichische Gesellschaft für Zivilluftfahrt mbH eine derartige Korrektur auf Wunsch der operationellen Einheit vorgenommen wurde.

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel erwähnt, werden die Wetterraddardaten, ausgewertet mit MATLAB in Form von A-Scopes oder B-Scopes dargestellt. Eine Erläuterung zu den A- und B-Scope Darstellungen ist Kapitel 2 zu entnehmen.

3.2 Daten des Mikroregenradars am Trafelberg

Die Daten des Mikroregenradars am Trafelberg wurden vom Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien für diese Arbeit zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich um Tagesfiles mit 30 Sekunden Mittelwerten für 31 Höenschichten in einer 100 m Auflösung. Die enthaltenen Messgrößen und Parameter wurden bereits in Kapitel 2.2 ausführlich behandelt. Die Daten liegen sowohl als Rohdaten, als auch in gemittelter Form (AVE) vor, diese sind im ASCII-Format gespeichert und können mit der METEK Graphics Software visualisiert werden. Der Einfachheit halber, den folgenden Vergleich betreffend, wurden die gewünschten Parameter (im Speziellen der Reflektivitätsfaktor) als Textdatei aus der Software exportiert und in MATLAB eingelesen, weiterverarbeitet und dargestellt.

Die weitere Datenaufbereitung für den Vergleich erfolgt in MATLAB mittels zeitlicher und räumlicher Mittelungsverfahren. Gemäß den vorliegenden Wetterraddardaten (Halbscans) beläuft sich das zeitliche Mittelungsintervall für die Mikroregenradardaten auf 2,5 Minuten, die räumliche Mittelung wird in Kapitel 4.1 näher erläutert.

4 Methodik

Dieses Kapitel soll im Besonderen die Vergleichsverfahren für die unterschiedlichen Niederschlagserfassungssysteme sowie die Korrekturverfahren der Niederschlagsdämpfung aufzeigen und näher erörtern.

4.1 Vertikalvergleich

In Anlehnung an die schematische Darstellung von Peters et al., 2002 [19], sind in Abbildung 4.1 die Positionen der Radaranlagen zu einander und die Unterschiede in Größe, Form und Sichtweise der Strahlvolumina skizziert. Die Dimensionen der betrachteten Volumina unterscheiden sich um ein Vielfaches voneinander, der vertikale Strahl des Mikroregennadars spiegelt nur einen Bruchteil des erfassten Wetterradarvolumens wieder. Mit dieser Darstellung wird nun auch eindeutig ersichtlich, dass der Vergleich dieser Volumina mit Vorbehalt zu betrachten ist, da aufgrund der großen räumlichen Diskrepanzen der Volumina auch potenzielle Fehlerquellen für Vergleich der Messwerte einhergehen.

Um die Höhe des Radarstrahls in der Entfernung des Mikroregennadarstandorts bestimmen zu können, wird in die so genannte 4/3-Höhenformel (Gleichung 4.1) nach Doviak und Zrnica, 2006 [6] eingesetzt.

$$H = \left(r^2 + \left(\frac{4}{3} \cdot R_e \right)^2 + \left(2r \cdot \frac{4}{3} \cdot R_e \cdot \sin \left(el \cdot \frac{\pi}{180} \right) \right) \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{4}{3} \cdot R_e + h_{WXR} \quad (4.1)$$

Gleichung 4.1 beschreibt die Höhe der Radarstrahlmitte für den jeweiligen Elevationswinkel bei standard Refraktionsverhältnissen (das entspricht einer Ausbreitung der elektromagnetischen Welle durch ein gleichmäßiges Medium), dabei fließen mit ein: die Entfernung vom Wetterradar r ($r_{WXR_{RAU}-MRR_{TRA}} = 53336 \text{ m}$), der Erdradius in mittleren Breiten $R_e = 6374000 \text{ m}$, der Elevationswinkel el in $^\circ$ und die Höhe h_{WXR} des Wetterradars (WXR_{RAU} : $h_{WXR} = 250 \text{ m}$). Je nach Wetterlage (z.B. bei vorhandener Bodeninversion) können die Bedingungen deutlich von den standard Refraktionsverhältnissen abweichen, da diese vom Gradienten des Brechungsindex und somit von der Temperatur und der Feuchte in der Atmosphäre abhängig sind. Eine graphische Darstellung der Beziehung zwischen Entfernung und

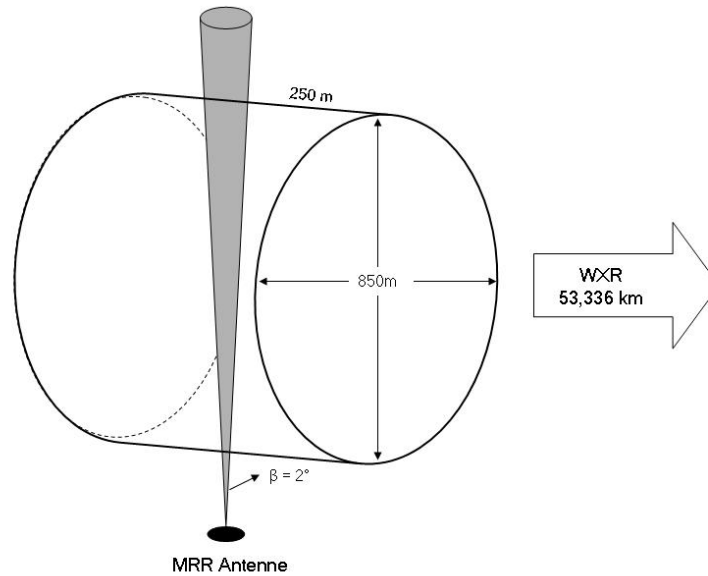


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der Strahlvolumina von MRR_{TRA} und WXR_{RAU} .

Höhe des Radarstrahls für das WXR_{RAU} ist in Abbildung 2.2 ersichtlich. Für die Entfernung des Mikroregennadars vom Wetterradar Wien-Rauchenwarth sind in Tabelle 4.1 die jeweiligen Höhen des Radarstrahls der untersten vier Elevationen aufgelistet. Dabei sind H_{unten} und H_{oben} die Unter- bzw. Oberkante des Radarstrahlvolumens in einer Entfernung von $53,336\text{ km}$, H_{Mitte} bezeichnet die Radarstrahlmitte.

Elevationswinkel [°]	H_{unten} [m]	H_{Mitte} [m]	H_{oben} [m]
0,5	454,6	882,8	1310,9
1,0	920,0	1348,1	1776,2
1,8	1664,5	2092,5	2520,3
2,6	2408,7	2836,5	3264,0

Tabelle 4.1: Höhe des WXR_{RAU} Strahls über Meeresniveau in $53,336\text{ km}$ Entfernung beim Standort des MRR_{TRA} . Die verschiedenen Höhen geben die vertikale Ausdehnung des Strahlvolumens für den jeweiligen Elevationswinkel in dieser Entfernung an.

Aufgrund der höheren vertikalen Auflösung des Mikroregennadars am Trafelberg (100 m) erfolgt gemäß den nach 4/3-Höhenformel berechneten Höhen der Wetterradarstrahlvolumina eine vertikale Mittelung der MRR-Daten. Für den Vergleich werden also gemäß der vertikalen Ausdehnung des Volumselements der jeweiligen Elevation des Wetterradars die entsprechen-

den Höhenschichten der Mikroregennadarmessung gemittelt und ausgewertet.

Wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt, ist der Standort des Mikroregennadars auf 1000 *m* Seehöhe gelegen. Aus Tabelle 4.1 wird nun ersichtlich, dass der 0,5 ° Elevationswinkel in der Entfernung des Mikroregennadarstandorts einen Höhenbereich von 454,6 *m* bis 1310,9 *m* abdeckt. Damit betrifft der Großteil des Wetterradarstrahls den Trafelberg selbst und keine meteorologischen Phänomene, dadurch sind Abschattungseffekte und partielle Strahlfüllung durch die Erhebungen des Alpenvorlandes auch in so geringer Entfernung vom Radar mitzuberechnen. Da für eine adäquate Mittelung der Mikroregennadardaten für einen Vergleich deutlich entsprechende Höhenschichten und Werte vorhanden sein sollten, wird die unterste Elevation (0,5 °) deshalb im folgenden Vergleichsprozess verworfen und nicht weiter berücksichtigt.

4.2 ZPHI-Verfahren

Niederschlagsdämpfung des Radarstrahles ist ein komplexes Thema, begonnen bei der Dämpfungserkennung über den Umgang damit bis zur Korrektur mit dual-pol Momenten. In der vorliegenden Arbeit wird das Hauptaugenmerk auf Korrekturmethode mittels differentieller Phase gelegt, da diese dämpfungs- und kalibrierungsunabhängig ist. Über die Jahre hinweg wurden viele Korrekturverfahren für die Niederschlagsdämpfung entwickelt und zahlreiche Arbeiten zu diesem Thema verfasst, einige davon seien an dieser Stelle angeführt: Testud et al., 2000 [25], Bringi und Chandrasekar, 2001 [2], Paulitsch et al., 2009 [18], Gu et al., 2011 [8], Tabary et al., 2011 [24] sowie Ryzhkov et al., 2011 und 2014 [22], [23].

Einfache empirische Verfahren zur Dämpfungskorrektur der gemessenen Reflektivitäten werden in Paulitsch et al., 2009 [18] sowie in Bringi und Chandrasekar, 2001 [2] behandelt. Letztere wählen einen linearen Ansatz für den korrigierten Reflektivitätsfaktor in einer Entfernung *r* vom Radar:

$$10 \log_{10} [Z(r)] = 10 \log_{10} [Z'(r)] + \alpha [\Phi_{DP}(r) - \Phi_{DP}(0)] \quad (4.2)$$

$Z'(r)$ bezeichnet den gemessenen Reflektivitätsfaktor in der Entfernung *r* vom Radar, $\Phi_{DP}(r)$ die differentielle Phase in der Entfernung *r* vom Radar und $\Phi_{DP}(0)$ ist die differentielle Phase am Ausgangspunkt des Radarstrahls. α ist eine Konstante, in diesem Fall 0,08 (basierend auf Streuungssimulationen), demnach wird insbesondere die Temperaturabhängigkeit der Niederschlagsdämpfung vernachlässigt und die Korrekturmethode kann damit nur eine approximatives Ergebnis liefern. (Bringi und Chandrasekar, 2001 [2])

Den meisten erwähnten Arbeiten liegt der von Testud et al., 2000 [25] entwickelte ZPHI Algorithmus zur Korrektur der tatsächlich gemessenen Reflektivitätsfaktoren zugrunde. Dieser Algorithmus leitet sich von den so genannten Rain Profiling Algorithmen für ein weltraumgestütztes Regenradar der TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission) ab, vergleiche dazu Testud et al., 2000 [25].

Im Falle eines bodengestützten polarimetrischen Fernerkundungssystems wie dem dual-pol

Wetterradar wird bei der ZPHI-Methode die differentielle Phasenverschiebung hinter einem Niederschlagsgebiet ($\Phi_{DP}(r_m)$) als Bedingung herangezogen (siehe Abbildung 4.2 aus Bringi und Chandrasekar, 2001 [2]).

Die ZPHI-Methode, wie auch viele andere Korrekturverfahren basieren auf einer Technik, die von Hitschfeld und Bordan, 1954 [10] eingeführt wurde. Diese besagt, dass die spezifische Dämpfung A mittels Potenzgesetz mit dem Reflektivitätsfaktor in Beziehung steht (Gleichung 4.3). Simulationen zeigen, dass für γ Tropfengrößenverteilungen b nahezu konstant ist und a abhängig von der Temperatur und dem Konzentrationsparameter N_w . Die ZPHI-Methode an sich bezieht a nicht mit ein, b wird jedoch als konstant angesehen. (Bringi und Chandrasekar, 2001 [2])

$$A(r) = a [Z(r)]^b \quad (4.3)$$

Eine lineare Beziehung zwischen der spezifischen Dämpfung (in $dB\ km^{-1}$) und der spezifischen differentiellen Phase K_{DP} (in $^\circ\ km^{-1}$) mit bekanntem Koeffizienten α wird angenommen.

$$A(r) = \alpha K_{DP}(r) \quad (4.4)$$

Die gemessene Reflektivität in einer Entfernung r vom Radar kann als

$$Z'(r) = Z(r) e^{-0,46 A r} \quad (4.5)$$

geschrieben werden. Für einen inhomogenen Pfad des Radarstrahls wird diese zu

$$Z'(r) = Z(r) e^{-0,46 \int_0^r A(s) ds} \quad (4.6)$$

(vgl. Bringi und Chandrasekar, 2001 [2])

Damit kann die Funktion $f(r_i; r_j)$ mit r_i und r_j als Entfernungspunkte entlang des Ausbreitungspfades des Radarstrahls als

$$f(r_i; r_j) = e^{-0,46 b \int_{r_0}^r A(s) ds} \quad (4.7)$$

definiert werden. r_i soll ein fixer Referenzpunkt in der Entfernung r_0 vom Radar sein, r_j ist die veränderliche Entfernungsvariable r . Damit lassen sich folgende Gleichungen anschreiben:

$$f(r_0; r) = e^{-0,46 b \int_{r_0}^r A(s) ds} \quad (4.8a)$$

$$f(0; r) = e^{-0,46 b \int_0^r A(s) ds} \quad (4.8b)$$

$$f(r_0; r) = \frac{f(0; r)}{f(0; r_0)} \quad (4.8c)$$

$$Z'(r) = Z(r) [f(0; r)]^{1/b} \quad (4.8d)$$

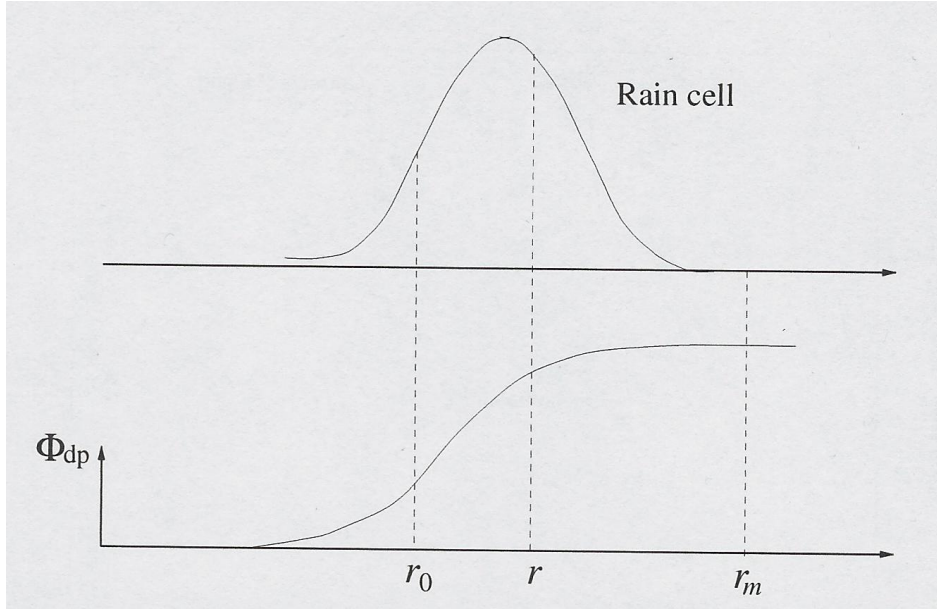


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung des ZPHI-Ansatzes. Die Entfernungsw Variablen r_0 , r und r_m werden entsprechend der Ausdehnung des Niederschlagsgebietes und des Φ_{DP} Profils gewählt. (aus Bringi und Chandrasekar, 2001 [2])

Die Differentialgleichung, erfüllt von $f(r_0; r)$, wird einfach abgeleitet und vereinfacht.

$$\frac{d f(r_0; r)}{d r} = (-0,46 b) f(r_0; r) A(r) \quad (4.9)$$

Mit Gleichung 4.3, 4.8c und 4.8d lässt sich Gleichung 4.9 wie folgt umformen:

$$\frac{d f(r_0; r)}{d r} = (-0,46 b a) \frac{[Z'(r)]^b}{f(0; r_0)} \quad (4.10)$$

Eine Integration von r_0 bis r führt zu dem Ergebnis

$$\int_{r_0}^r \frac{d f(r_0; r)}{d r} d r = \frac{-0,46 a b}{f(0; r_0)} \int_{r_0}^r [Z'(r)]^b d r \quad (4.11a)$$

$$f(r_0; r) - f(r_0; r_0) = \frac{-0,46 a b}{f(0; r_0)} \int_{r_0}^r [Z'(r)]^b d r \quad (4.11b)$$

$$f(r_0; r) = 1 - \frac{a}{f(0; r_0)} I(r_0; r) \quad (4.11c)$$

dabei ist $f(r_0; r_0) = 1$ und $I(r_0; r)$ ist als

$$I(r_0; r) = 0,46 b \int_{r_0}^r [Z'(r)]^b d r \quad (4.12)$$

definiert. (Bringi und Chandrasekar, 2001 [2])

Mit der Intention eine Lösung für die spezifische Dämpfung $A(r)$ hinsichtlich der spezifischen

Dämpfung in einer Referenzentfernung $A(r_0)$ und der gemessenen Reflektivitäten $Z'(r_0)$ und $Z'(r)$ wird der Ansatz von Hitschfeld und Bordan, 1954 [10] mit den Gleichungen 4.8c, 4.8d und 4.11c wie folgt umgeformt.

$$A(r) = a [Z(r)]^b \quad (4.13a)$$

$$A(r) = \frac{a [Z'(r)]^b}{f(0; r_0) - a I(r_0; r)} \quad (4.13b)$$

Die Funktion $f(0; r_0)$ wird nun als Funktion von $A(r_0)$ und $Z'(r_0)$ ausgedrückt.

$$f(0; r_0) = \left[\frac{Z'(r_0)}{Z(r_0)} \right]^b = \frac{a}{A(r_0)} [Z'(r_0)]^b \quad (4.14)$$

Damit kann in Gleichung 4.13b eingesetzt und vereinfacht werden.

$$A(r) = A(r_0) \left\{ \frac{[Z'(r)]^b}{[Z'(r_0)]^b - A(r_0) I(r_0; r)} \right\} \quad (4.15)$$

Man beachte, dass sich der Koeffizient a dabei kürzen lässt. Eine direkte Anwendung von Gleichung 4.15 ist nur möglich, wenn $A(r_0) \neq 0$. (Bringi und Chandrasekar, 2001 [2])

Der zweite Teil der ZPHI-Methode nach Testud et al., 2000 [25] besteht daraus $A(r_0)$ auf die gemessene differentielle Phase zurückzuführen. Abbildung 4.2 definiert nun die Entfernungsvariablen einer idealisierten Niederschlagszelle wie folgt, r_0 ist die Referenzentfernung, r steht für die variable Entfernung entlang des Radarstrahls und r_m ist die Entfernungvariable hinter der Zelle, wo die differentielle Phase Φ_{DP} ihr Maximum erreicht und zu einem konstanten Wert hin konvergiert. (Bringi und Chandrasekar, 2001 [2])

Man beginne mit der Integration von Gleichung 4.4 von r_0 bis r_m .

$$\int_{r_0}^{r_m} A(s) ds = \alpha \int_{r_0}^{r_m} K_{DP}(s) ds \quad (4.16a)$$

$$\int_{r_0}^{r_m} A(s) ds = \frac{\alpha}{2} \int_{r_0}^{r_m} 2 K_{DP}(s) ds \quad (4.16b)$$

$$\int_{r_0}^{r_m} A(s) ds = \frac{\alpha}{2} [\Phi(r_m) - \Phi(r_0)] \quad (4.16c)$$

$$\int_{r_0}^{r_m} A(s) ds = \frac{\alpha}{2} \Delta \Phi(r_0; r_m) \quad (4.16d)$$

Die linke Seite der obigen Gleichungen kann mit Hilfe der Differentialgleichung für $f(r_0; r)$ aus Gleichung 4.9 integriert werden, man erhält

$$\int_{r_0}^{r_m} A(s) ds = \frac{-1}{0,46 b} [\ln f(r_0; r_m)] \quad (4.17)$$

somit kann $f(r_0; r_m)$ durch Umformen der Gleichung 4.16d geschrieben werden als

$$f(r_0; r_m) = e^{-0,23 b \alpha \Delta \Phi(r_0; r_m)} \quad (4.18)$$

Durch Einsetzen von $f(r_0; r_m)$ in Gleichung 4.11c erhält man

$$1 - \frac{a}{f(0; r_0)} I(r_0; r_m) = e^{-0,23 b \alpha \Delta \Phi(r_0; r_m)} \quad (4.19)$$

und unter Verwendung der Gleichung 4.14 für $f(0; r_0)$ ergibt sich folgender Ausdruck für $A(r_0)$

$$A(r_0) = \frac{[Z'(r_0)]^b}{I(r_0; r_m)} \left(1 - e^{-0,23 b \alpha \Delta \Phi(r_0; r_m)} \right) \quad (4.20a)$$

$$A(r_0) = \frac{[Z'(r_0)]^b}{I(r_0; r_m)} \left(1 - 10^{-0,1 (b \alpha) \Delta \Phi(r_0; r_m)} \right). \quad (4.20b)$$

Die endgültige Gleichung für die spezifische Dämpfung $A(r)$ erhält man durch Substitution von $A(r_0)$ in Gleichung 4.15 und einiger einfacher algebraischer Veränderungen:

$$A(r) = \frac{[Z'(r)]^b \left(1 - 10^{-0,1 (b \alpha) \Delta \Phi(r_0; r_m)} \right)}{I(r_0; r_m) - \left(1 - 10^{-0,1 (b \alpha) \Delta \Phi(r_0; r_m)} \right) I(r_0; r)} \quad (4.21)$$

Diese Gleichung beschreibt die spezifische Dämpfung in $dB km^{-1}$ für jeden Entfernungspunkt entlang des Radarstrahlpfades zwischen r_0 und r_m . Der Exponent b ist für C-Band Radars nahe 0,8 und α ist temperaturabhängig, also kann entlang des Strahls variieren (ein gemittelter Wert (zwischen $0 - 30^\circ C$) beträgt 0,073). (Bringi und Chandrasekar, 2001 [2])

Die Arbeit von Testud et al., 2000 [25] bringt mit kleinen algebraischen Umformungen das selbe Ergebnis für $A(r)$ (Gleichung 4.21) hervor.

Sobald man nun für jeden entsprechenden Entfernungspunkt die spezifische Dämpfung $A(r)$ berechnet hat, können die gemessenen Reflektivitätswerte wie folgt korrigiert werden:

$$10 \log_{10} [Z(r)] = 10 \log_{10} [Z'(r)] + 2 \int_{r_0}^r A(s) ds. \quad (4.22)$$

Das ZPHI-Verfahren ist sensibel gegenüber der Abhängigkeit von α , also der Tropfentemperatur und der Form des mittleren Achsenverhältnisses im Verhältnis zum Tropfendurchmesser. Durch die Annahme eines Exponentialansatzes werden Korrekturergebnisse bei Niederschlagsereignissen mit Hagel oder gemischtem Niederschlag verzerrt. Darum wird in solchen Fällen eine Segmentation der Abschnitte verschiedener Niederschlagsklassen in einer Zelle angeraten. (Bringi und Chandrasekar, 2001 [2]) In der vorliegenden Arbeit wird die ZPHI-Methode und zum Vergleich ein einfacher linearer Korrekturansatz zur Dämpfungskorrektur eines Beispielfalls angewandt und analysiert.

5 Fallauswahl

Die Auswahl der zu untersuchenden Ereignisse erfolgt aufgrund der Datenvielfalt nach unterschiedlichen Kriterien. Diese werden im Folgenden angeführt und erörtert.

Datenverfügbarkeit Die Verfügbarkeit der Daten beider Anlagen ist ein ausschlaggebendes Kriterium für die Fallauswahl. Da das WXR_{RAU} im Frühjahr 2011 auf duale Polarisation umgerüstet wurde, ist die Fallauswahl auf die Saisonen 2011, 2012 und 2013 begrenzt. Noch dazu kommt, dass das MRR_{TRA} in diesem Zeitraum (2011-2013) aus verschiedensten Gründen nicht immer online war und Messungen liefern konnte. Nach der Filterung der verfügbaren Fälle kann die Auswahl nach weiteren Kriterien erfolgen.

Niederschlagsereignis Eine Kategorisierung nach konvektivem oder stratiformem Niederschlagsereignis ist für den Vergleich und die Auswertung unerlässlich. Die Einordnung erfolgt subjektiv nach Dauer und Intensität des Ereignisses sowie ihrem Auftreten im Zusammenhang mit synoptischen Systemen. Eine klare Abgrenzung zwischen konvektiv und stratiform kann jedoch nur in den seltensten Fällen eindeutig erfolgen.

Niederschlagsart Die Auswahl nach Niederschlagsart (Regen, Hagel, Schnee, usw.) beschränkt sich im Grunde auf Regen, da der Vergleich mit festen Hydrometeoren aufgrund der unterschiedlichen Voraussetzungen der Radaranlagen (Wellenlänge, Dämpfungseffekte) nicht sinnvoll ist. Die Dämpfung ist mitunter am MRR so groß, dass alles über dem Bereich der stärksten Dämpfung nicht adäquat erfasst werden kann bzw. Messlücken aufweist.

Schneefallgrenze Die Schmelzschicht sollte zum Zeitpunkt der Messung möglichst hoch liegen, damit sich die Dämpfungseffekte besonders am MRR diesbezüglich in Grenzen halten, da wie bereits erwähnt das MRR für die darüber liegenden Höenschichten der Messung keine adäquaten Werte mehr liefert. Somit wird das Winterhalbjahr für den Vergleich als eher ungünstig erachtet, da die Schneefallgrenze in Österreich bezüglich der Höenschichten der Radarmessungen im Winter meist sehr tief liegt. Eine erste Abschätzung der Schneefallgrenze ist mittels Wettermodelldaten erfolgt, die in weiterer Folge eine erstaunlich gute Übereinstimmung mit den vom MRR beobachteten Werten aufweisen.

Strömungslage Ein wichtiges Auswahlkriterium ist die vorherrschende Strömungslage, da für einen optimalen Gesamteindruck beim Vergleich der Radaranlagen möglichst verschiedene Strömungsrichtungen untersucht werden sollen. Aufgrund der Zugrichtung einzelner Zellen oder Niederschlagsgebiete können sich auch die Messwerte deutlich unterscheiden, da allen voran durch Dämpfungseffekte am WXR die Niederschlagserfassung in der Entfernung des MRR Standorts beeinträchtigt werden kann, beispielsweise wenn sich Zellen zwischen WXR und MRR befinden. Eine weitere Schwierigkeit beim Vergleich und der Interpretation stellt dabei auch die Zugbahn des Niederschlagsgebiets dar, da für einen adäquaten Vergleich das MRR_{TRA} möglichst genau getroffen werden sollte, aber unter Umständen wird es von der Zelle nur gestreift und es ergeben sich deshalb Diskrepanzen im Vergleich.

Nach den angeführten Kriterien sind acht Fälle an der Zahl für zutreffend befunden und für den Vergleich aufbereitet worden. Drei Ereignisse aus dem Jahr 2011 und fünf aus dem Jahr 2013, davon sind fünf konvektive Ereignisse und drei stratiforme. Die ausgewählten Zeiträume für den Vergleich erstrecken sich in allen Fällen über die Dauer des Ereignisses am MRR_{TRA} . Einen optimalen Vergleich besonders im Falle eines konvektiven Ereignisses anzustellen ist meist nicht möglich, da ein Vergleich von Niederschlagsereignissen im Idealfall über mehrere Stunden ausgewertet werden sollte, diese Zeitspanne ist im konvektiven Fall oft aber bei weitem nicht gegeben. Tabelle 5.1 und 5.2 geben einen groben Überblick über die getätigte Fallauswahl, den Zeitraum, die Art des Ereignisses, die vorherrschende Strömungsrichtung und eine Abschätzung der Höhe der Schneefallgrenze. Im Rahmen der Fallauswahl werden die Wetterradardaten als B-Scopes dargestellt (für eine Erläuterung dazu sei auf Kapitel 2 verwiesen). Die Mikroregenradardaten werden wie gewohnt in Form eines zeitlichen Verlaufs des Reflektivitätsprofils dargestellt.

Fall Nummer	1	2	3
Datum	27.05.2011	27.05.2011	28.05.2011
Zeitraum	11:00-12:00	19:30-22:00	00:00-02:00
Ereignisart	konvektiv, Kaltfront	konvektiv, Kaltfront	stratiform
Strömungslage	Südwest	Südwest	Südwest-Nordwest
Schneefallgrenze [m]	3000	3000	2000

Tabelle 5.1: Getroffene Fallauswahl für den Vergleich der Vertikalprofile von WXR_{RAU} und MRR_{TRA} im Jahr 2011.

Die Fallauswahl im Jahre **2011** betrifft im Wesentlichen ein Gesamtereignis. Mit einem Kaltfrontdurchgang im Tagesverlauf des **27.05.2011** sind intensive konvektive Zellen aus Südwest über den Standort des MRR_{TRA} hinweggezogen (siehe dazu Abbildung 5.1 bis 5.4). Die Schneefallgrenze liegt tagsüber noch über 3000 m, im Zuge des nachfolgenden Kaltluf-

teinbruchs sinkt diese aber in der Nacht auf **28.05.2011** rasch auf unter 2000 *m*. Mit einem Tiefdruckgebiet, das von der Adria in der Nacht weiter nach Nordosten zieht dreht die Strömung allmählich auf Nordwest und in der zweiten Nachthälfte überwiegt damit der stratiforme Niederschlag (Abbildung 5.5 und 5.6).

Fall Nummer	4	5	6	7	8
Datum	29.07.2013	04.08.2013	13.09.2013	18.09.2013	26.09.2013
Zeitraum	16:30-17:07	16:40-20:25	11:00-11:57	05:00-09:00	12:40-14:40
Ereignisart	konvektiv	konvektiv	konvektiv	stratiform	stratiform
Strömungslage	West-Südwest	Südwest	Nordwest-Nord	Süd-Südwest	West-Nordwest
Schneefallgrenze [<i>m</i>]	3500	3500	2000	2500	3000

Tabelle 5.2: Getroffene Fallauswahl für den Vergleich der Vertikalprofile von WXR_{RAU} und MRR_{TRA} im Jahr 2013.

Die Fallauswahl im Jahre **2013** erstreckt sich über die gesamte Sommersaison.

Den Auftakt macht ein konvektives Ereignis am **29.07.2013**, ein wahrlich kurzes Intermezzo von knapp 35 Minuten, in der ein Luftmassengewitter aus West bis Südwest direkt über das MRR_{TRA} hinweggezogen ist (Abbildung 5.7 und 5.8). Die Schneefallgrenze bewegt sich dabei auf einem hochsommerlichen Niveau um 3500 *m*. Den Fallgeschwindigkeiten im Kern der Zelle nach zu urteilen, die teils über 10 *m/s* liegen, ist die Hagelwahrscheinlichkeit in dieser Zelle gegeben und ein Auftreten anzunehmen.

In einer gradientschwachen Lage mit einer leichten Südwestkomponente bilden sich in der labilen Luftmasse Gewitter und Schauerzellen, die sich am **04.08.2013** quasi stationär im Bereich des MRR_{TRA} befinden (Abbildung 5.10). Daher rührt auch der lange Beobachtungszeitraum, der für ein konvektives Ereignis im Allgemeinen eher ungewöhnlich ist. Die Intensitätsunterschiede im Reflektivitätsfaktor lässt auf die Abfolge mehrerer konvektiver Zellen hindeuten, siehe Abbildung 5.9. Die Schneefallgrenze bewegt sich dabei auf einem hochsommerlichen Niveau um 3500 *m*.

Eine Gewitterzelle streift aus West-Nordwest am **13.09.2013** den Standort des MRR_{TRA} . Die Schneefallgrenze liegt mit rund 2000 *m*, für den Vergleich durchaus grenzwertig tief. Man beachte dazu Abbildung 5.11 und 5.12.

Eine Warmfront überquert am Morgen des **18.09.2013** den Standort des MRR_{TRA} . Im Verlauf steigt die Schneefallgrenze allmählich auf 2500 *m*. Das stratiforme Niederschlagsgebiet bewegt sich aus Süd-Südwest über das MRR_{TRA} und zieht langsam nach Nordosten ab. Siehe dazu Abbildung 5.13 und 5.14.

Am **26.09.2013** zieht mit einer West- bis Nordwestströmung ein Niederschlagsgebiet über den Standort des MRR_{TRA} . Die Einstufung erfolgt hier nach Dauer und Intensität als stratiformes Ereignis mit konvektiven Einlagerungen. Die Schneefallgrenze liegt dabei um 3000 *m*. (Abbildung 5.15 und 5.16)

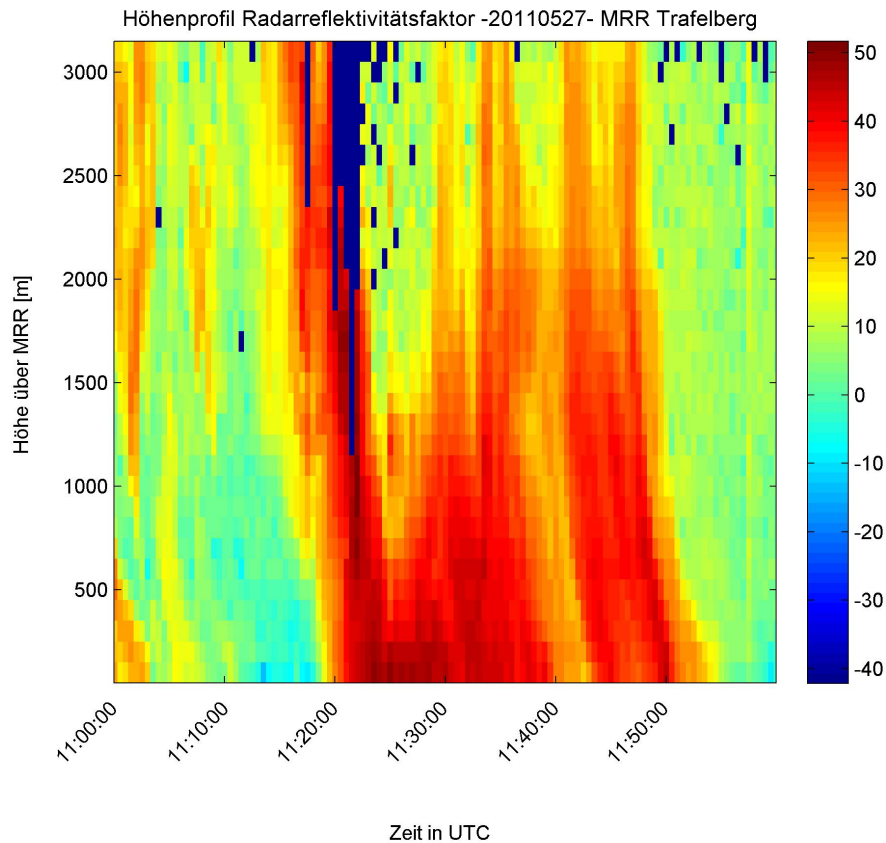


Abbildung 5.1: Zeitserie des MRR_{TRA} Höhenprofils des Reflektivitätsfaktors am 27.05.2011. Konvektives Ereignis.

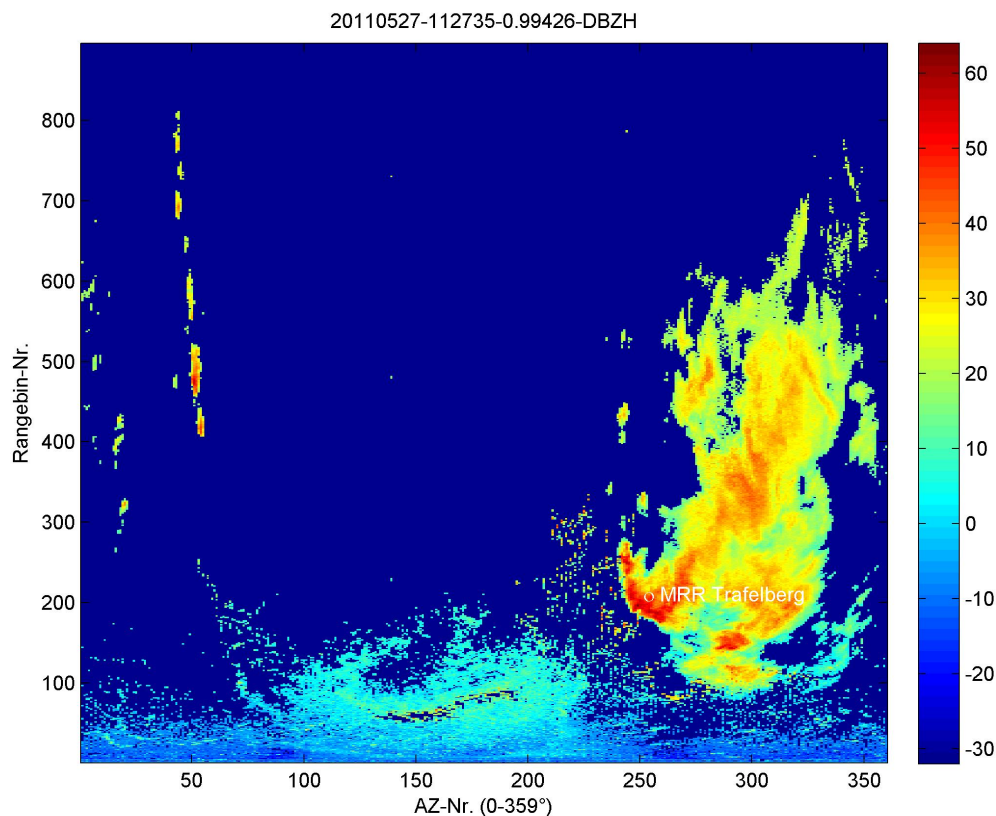


Abbildung 5.2: B-Scope des WXR_{RAU} am 27.05.2011, 11:27 UTC. Azimutscan des Reflektivitätsfaktors bei einem Elevationswinkel von 1 Grad. Der Standort des MRR_{TRA} ist mit einem weißen Kreis gekennzeichnet.

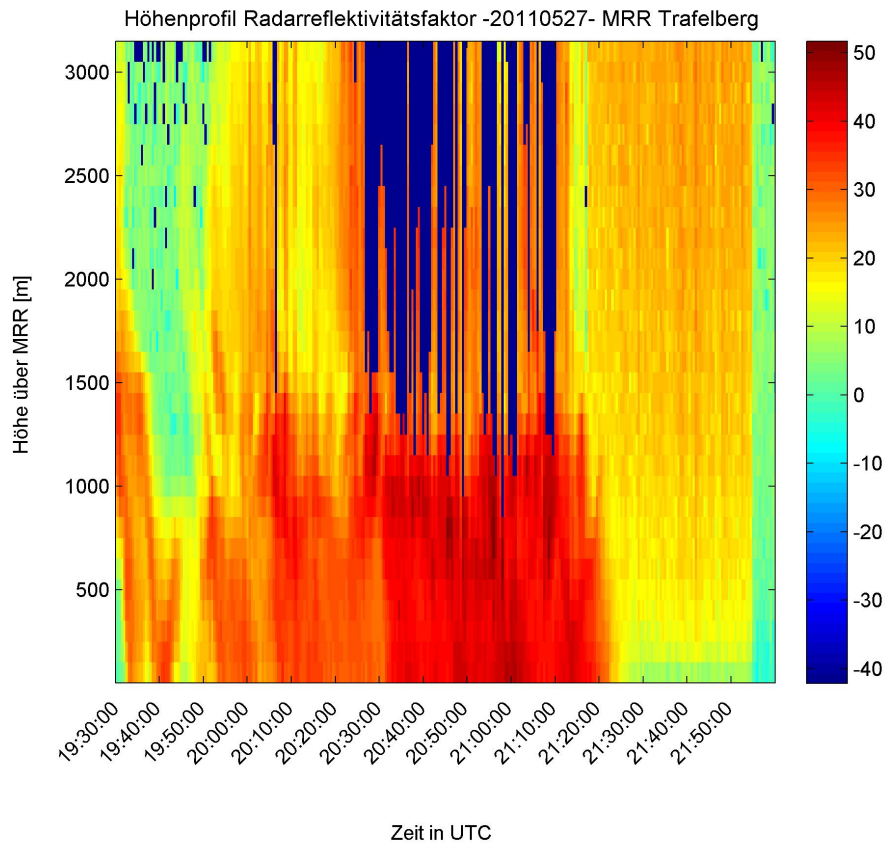


Abbildung 5.3: Zeitserie des MRR_{TRA} Höhenprofils des Reflektivitätsfaktors am 27.05.2011. Konvektives Ereignis.

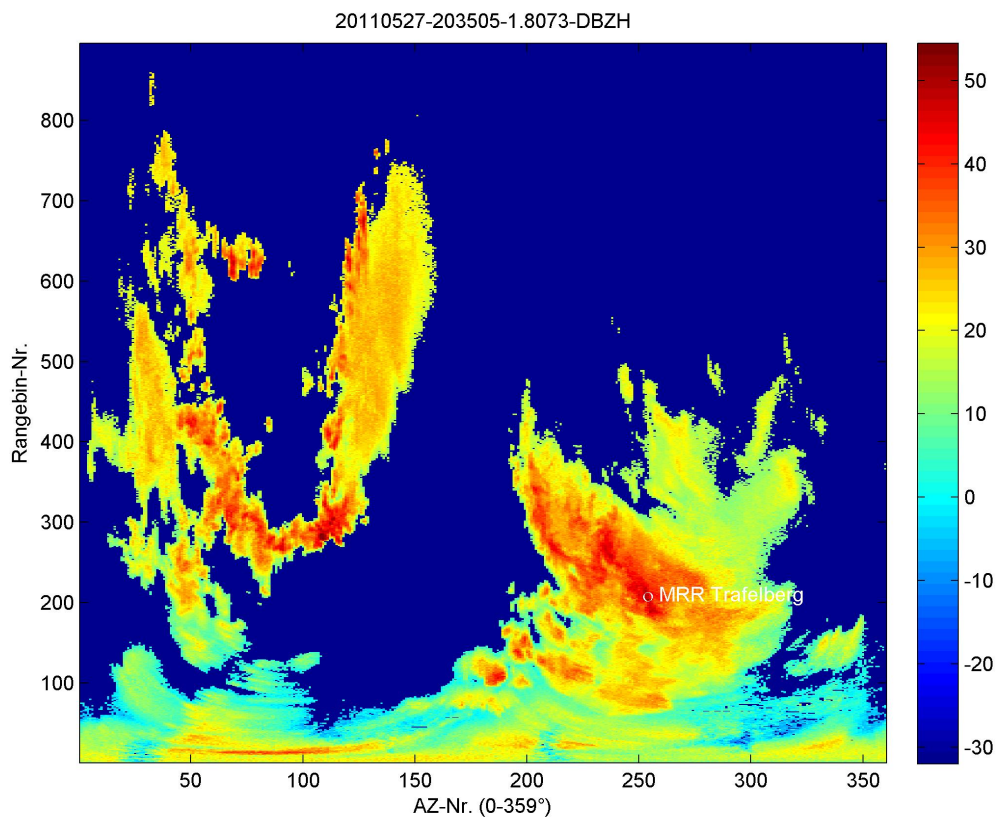


Abbildung 5.4: B-Scope des WXR_{RAU} am 27.05.2011, 20:35 UTC. Azimutscan des Reflektivitätsfaktors bei einem Elevationswinkel von 1,8 Grad. Der Standort des MRR_{TRA} ist mit einem weißen Kreis gekennzeichnet.

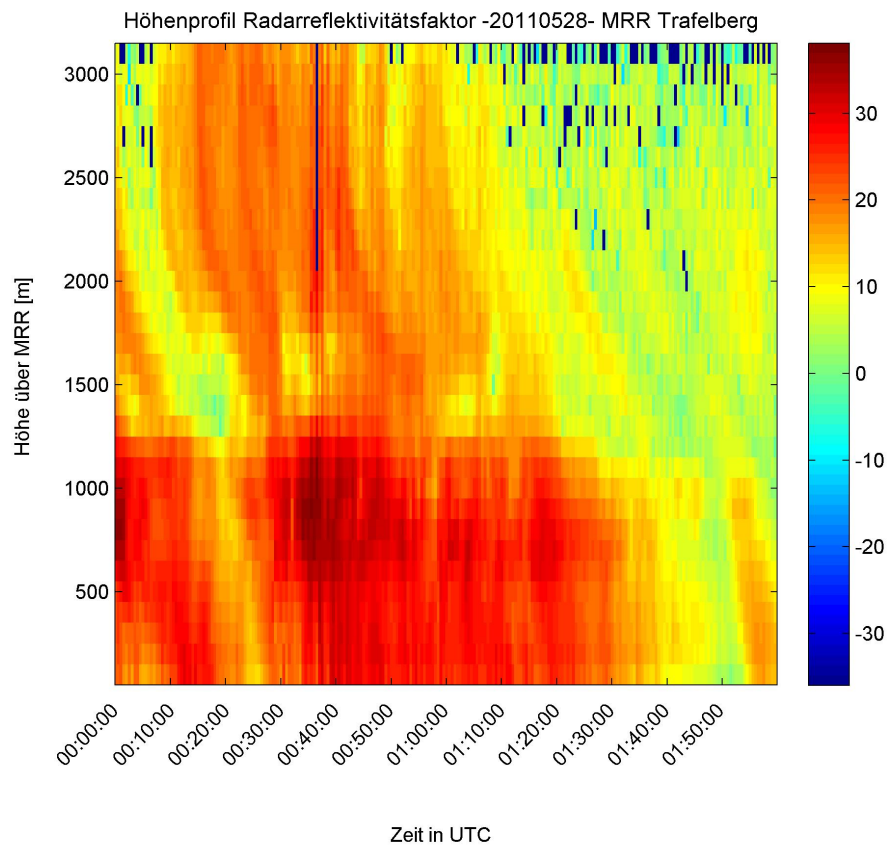


Abbildung 5.5: Zeitserie des MRR_{TRA} Höhenprofils des Reflektivitätsfaktors am 28.05.2011. Stratiformes Ereignis.

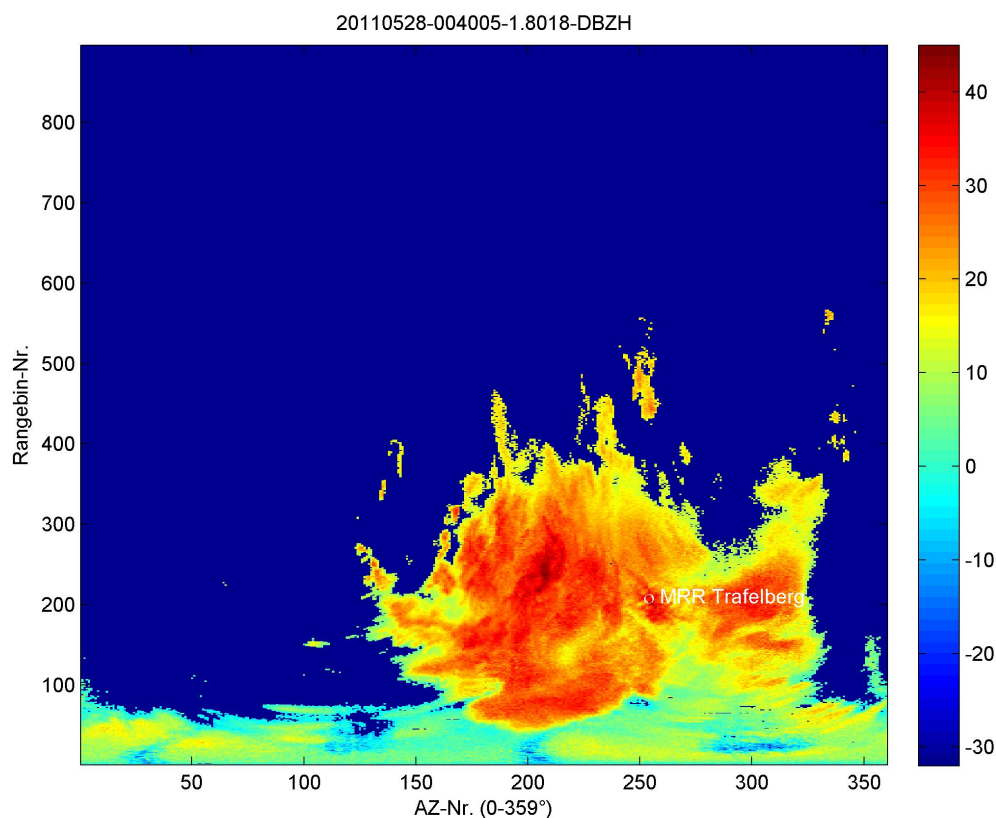


Abbildung 5.6: B-Scope des WXR_{RAU} am 28.05.2011, 00:40 UTC. Azimutscan des Reflektivitätsfaktors bei einem Elevationswinkel von 1,8 Grad. Der Standort des MRR_{TRA} ist mit einem weißen Kreis gekennzeichnet.

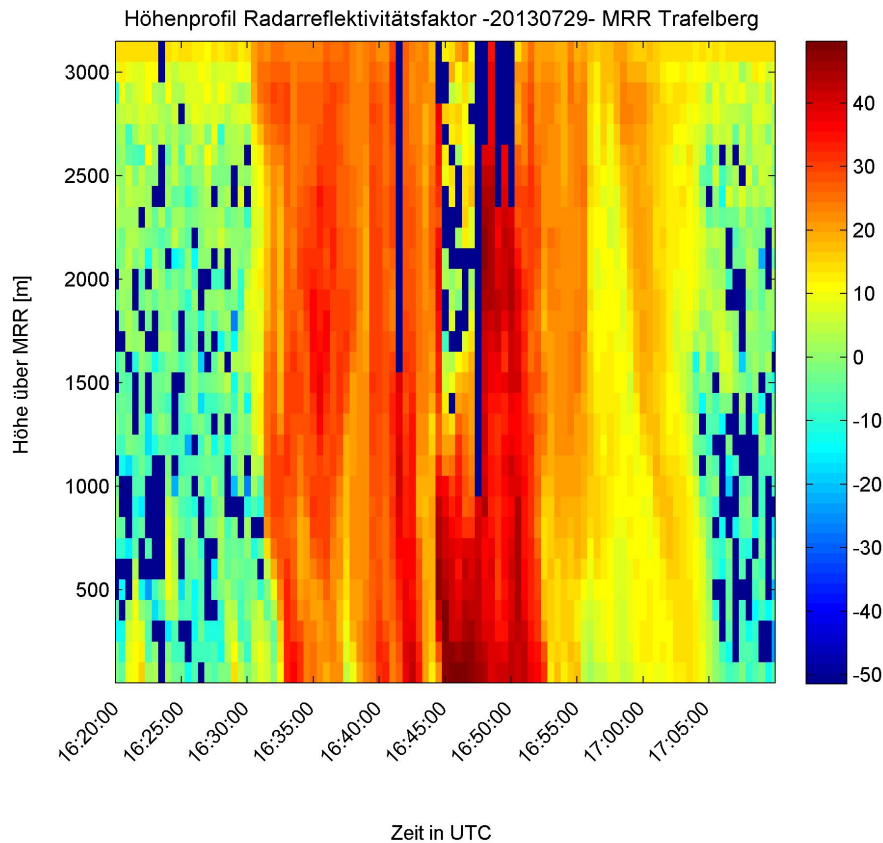


Abbildung 5.7: Zeitserie des MRR_{TRA} Höhenprofils des Reflektivitätsfaktors am 29.07.2013. Konvektives Ereignis.

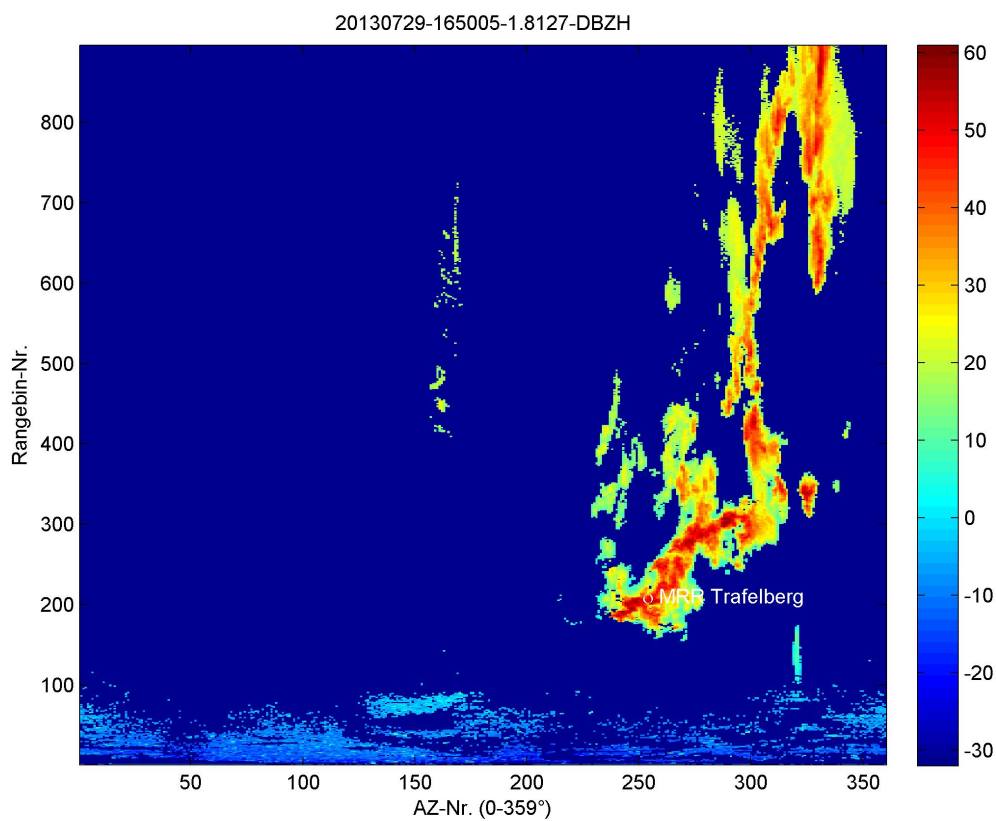


Abbildung 5.8: B-Scope des WXR_{RAU} am 29.07.2013, 16:50 UTC. Azimutscan des Reflektivitätsfaktors bei einem Elevationswinkel von 1,8 Grad. Der Standort des MRR_{TRA} ist mit einem weißen Kreis gekennzeichnet.

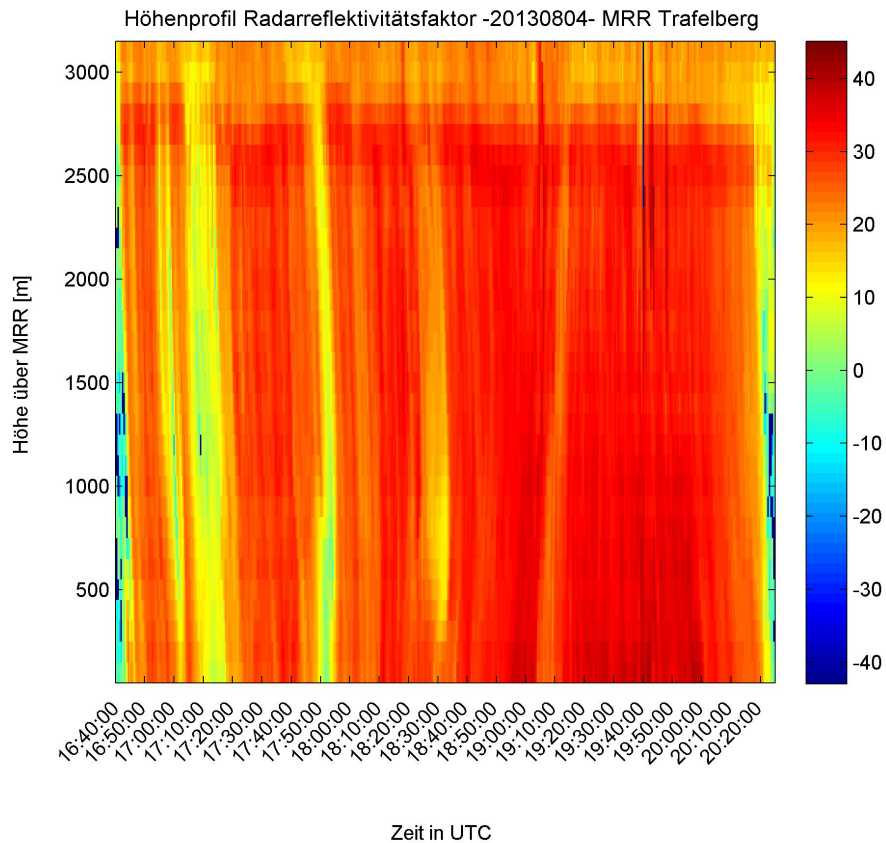


Abbildung 5.9: Zeitserie des MRR_{TRA} Höhenprofils des Reflektivitätsfaktors am 04.08.2013. Konvektives Ereignis.

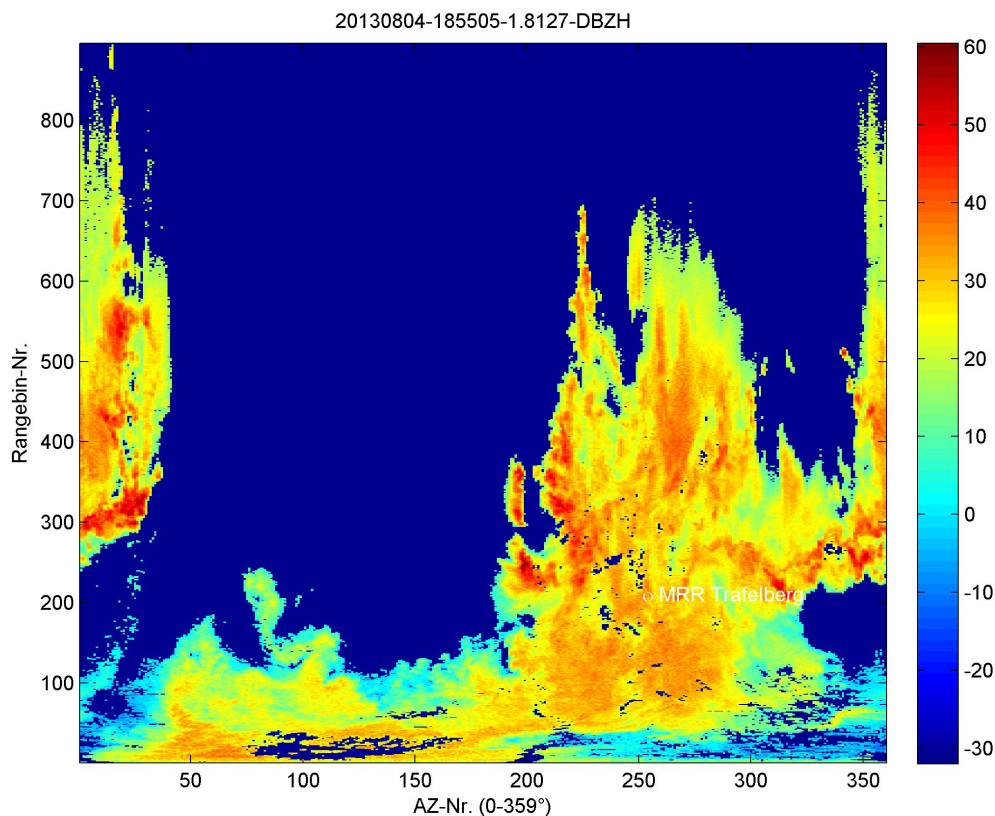


Abbildung 5.10: B-Scope des WXR_{RAU} am 04.08.2013, 18:55 UTC. Azimutscan des Reflektivitätsfaktors bei einem Elevationswinkel von 1,8 Grad. Der Standort des MRR_{TRA} ist mit einem weißen Kreis gekennzeichnet.

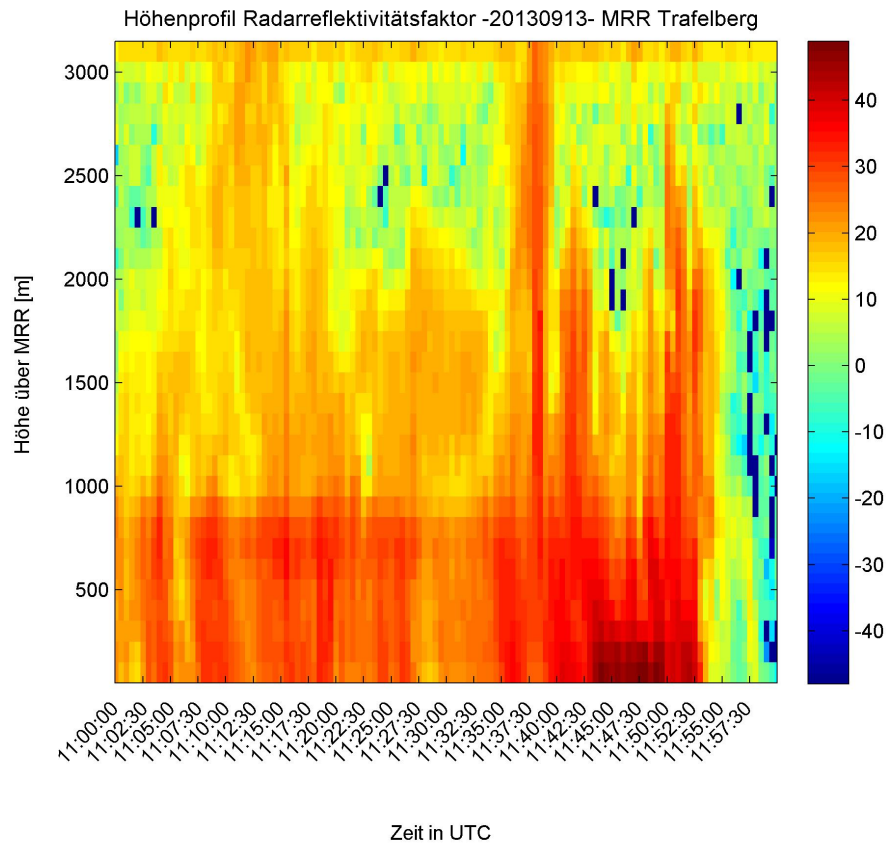


Abbildung 5.11: Zeitserie des MRR_{TRA} Höhenprofils des Reflektivitätsfaktors am 13.09.2013. Konvektives Ereignis.

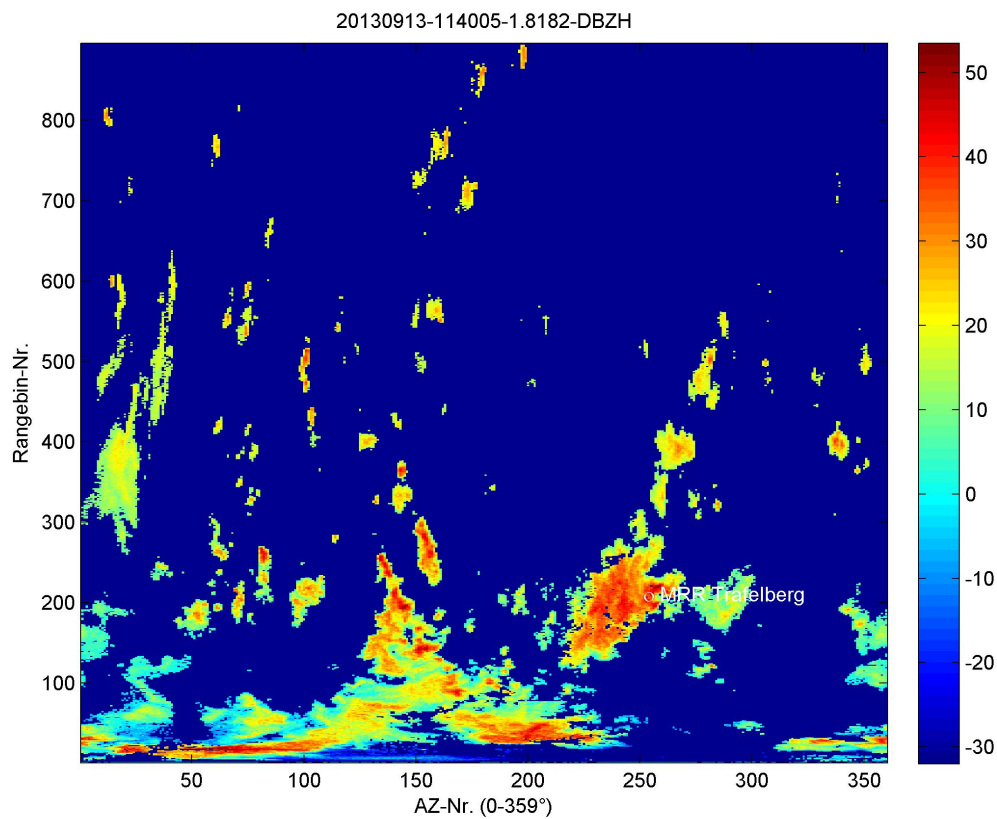


Abbildung 5.12: B-Scope des WXR_{RAU} am 13.09.2013, 11:40 UTC. Azimutscan des Reflektivitätsfaktors bei einem Elevationswinkel von 1,8 Grad. Der Standort des MRR_{TRA} ist mit einem weißen Kreis gekennzeichnet.

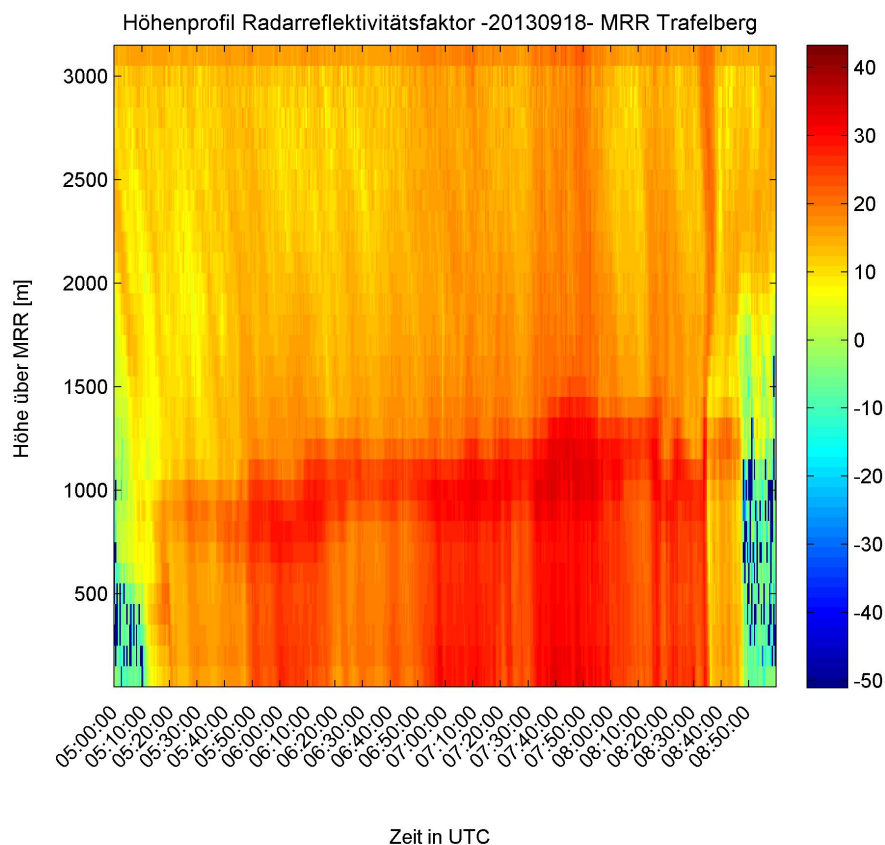


Abbildung 5.13: Zeitserie des MRR_{TRA} Höhenprofils des Reflektivitätsfaktors am 18.09.2013. Stratiformes Ereignis.

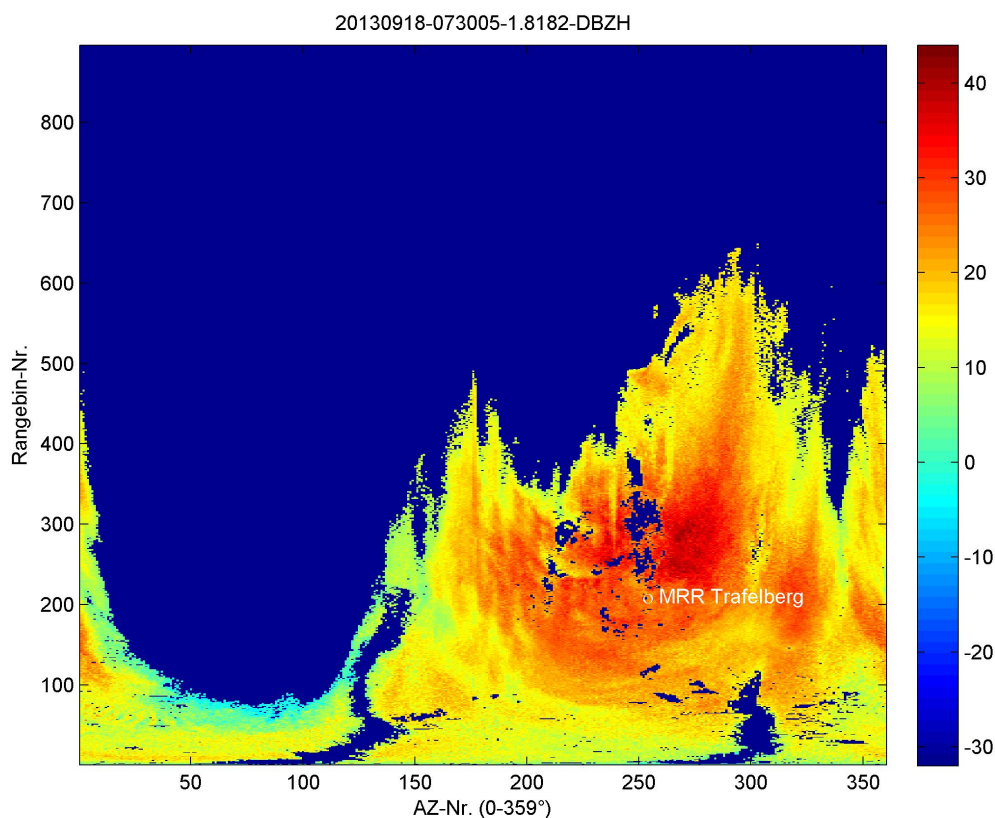


Abbildung 5.14: B-Scope des WXR_{RAU} am 18.09.2013, 07:30 UTC. Azimutscan des Reflektivitätsfaktors bei einem Elevationswinkel von 1,8 Grad. Der Standort des MRR_{TRA} ist mit einem weißen Kreis gekennzeichnet.

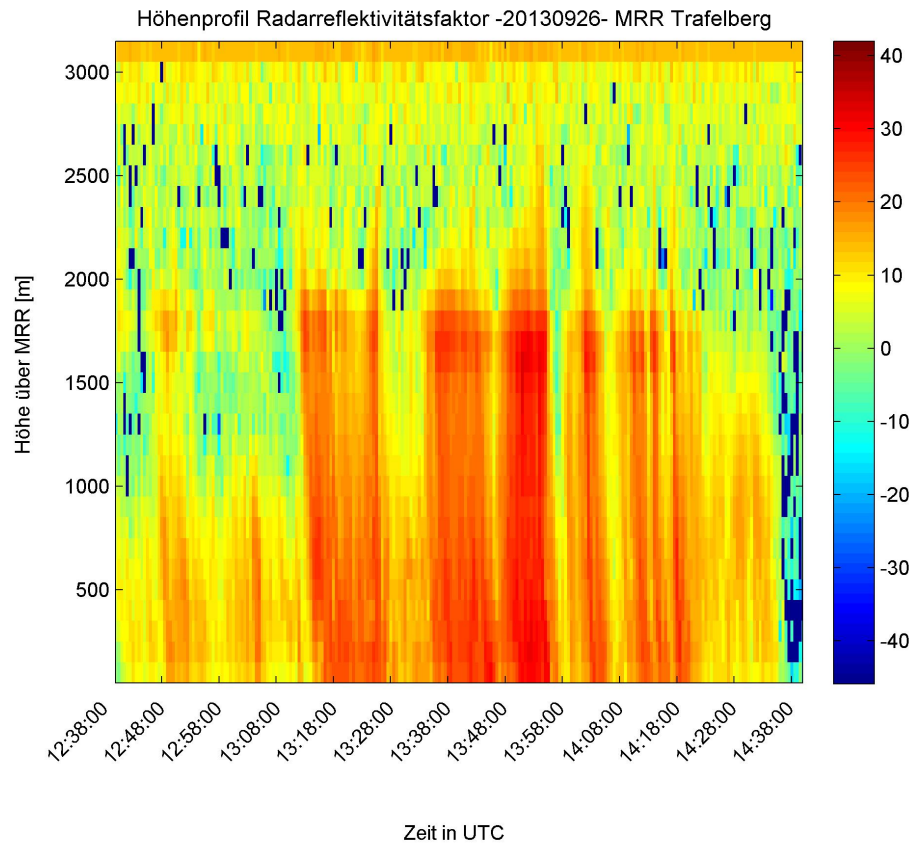


Abbildung 5.15: Zeitserie des MRR_{TRA} Höhenprofils des Reflektivitätsfaktors am 26.09.2013. Stratiformes Ereignis.

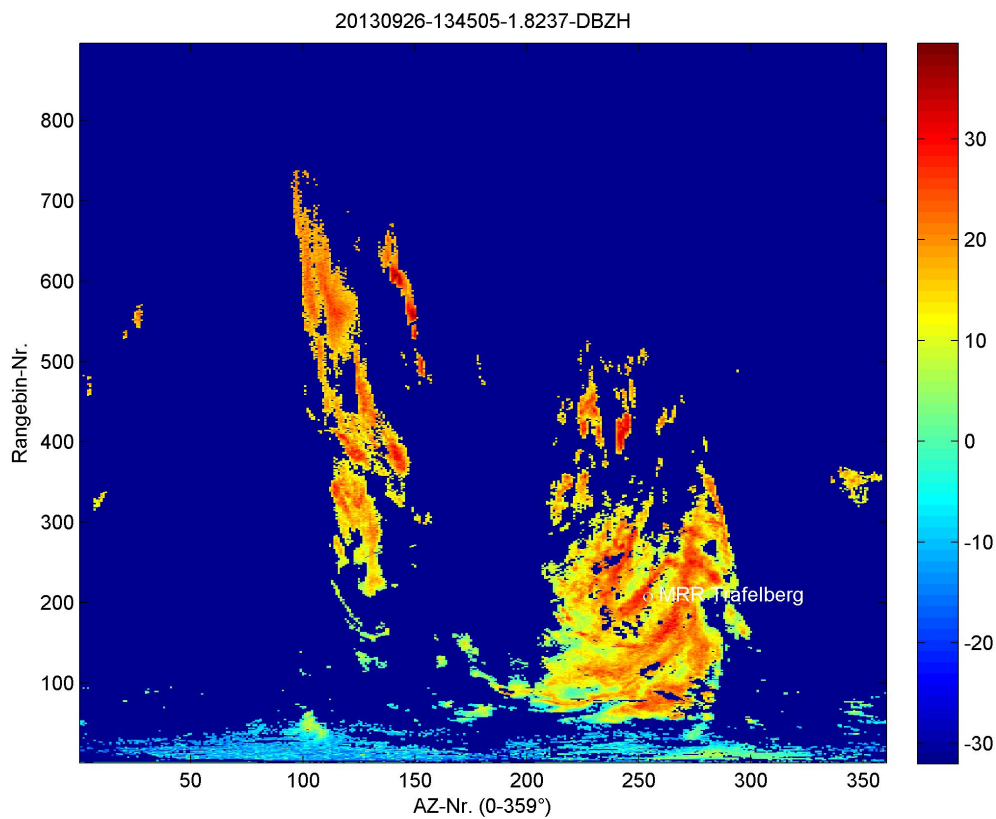


Abbildung 5.16: B-Scope des WXR_{RAU} am 26.09.2013, 13:45 UTC. Azimutscan des Reflektivitätsfaktors bei einem Elevationswinkel von 1,8 Grad. Der Standort des MRR_{TRA} ist mit einem weißen Kreis gekennzeichnet.

6 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die gewonnenen Ergebnisse dargestellt und anschließend diskutiert. Allen voran soll zunächst das Abschattungsproblem der untersten Elevation des WXR_{RAU} erörtert werden, bevor die Vergleiche der ungefilterten und gefilterten, sowie horizontalen und vertikalen Reflektivitätsfaktoren des WXR_{RAU} vorgestellt werden, gefolgt von dem Kernstück der Arbeit, dem Vertikalvergleich der beiden Radaranlagen und dem Vergleich mit einem Referenzdistrometer in Bodennähe. Abschließend soll die Dämpfungskorrektur der Wetterradarwerte den Kreis wieder schließen.

6.1 Abschattung

Abbildung 6.1 zeigt die Radarabdeckung für den Bereich westlich des WXR_{RAU} (Azimutwinkel in Richtung des MRR_{TRA} beträgt 252°) für den stratiformen Fall vom 18.09.2013. Die unterste Elevation ($0,5\text{ Grad}$ - in der Abbildung unten) wird durch Abschattungseffekte, verursacht durch die ersten Erhebungen des Alpenvorlandes, massiv beeinträchtigt. Darüber liegende Elevationen zeigen kaum Beeinträchtigungen durch die Orographie in diesen Sektoren (Abbildung 6.1 oben, repräsentativ für die höheren Elevationen wird der $1,8\text{ Grad}$ Elevationswinkel angeführt). Da das Mikroregenradar am Standort Trafelberg (in den Abbildungen mit einem weiß Kreis gekennzeichnet) bereits über 1000 m Seehöhe liegt, ist ein Vergleich mit der untersten Elevation ($0,5\text{ Grad}$) des WXR_{RAU} hinfällig, da eine Abschattung des Radarstrahls und partielle Strahlfüllung in diesem Bereich vordergründig sind, vgl. dazu Bech et al., 2012 [1]. Tabelle 4.1 ist zu entnehmen, dass für einen Vertikalvergleich der $0,5\text{ Grad}$ Elevation des WXR_{RAU} mit dem MRR_{TRA} demnach nur noch 300 m übrig blieben. Aus diesem Grund wurde der $0,5\text{ Grad}$ Elevationswinkel in den weiteren Auswertungen vernachlässigt, da im Vertikalvergleich keine adäquate repräsentative Aussage getroffen werden kann, siehe dazu auch Kapitel 4.1.

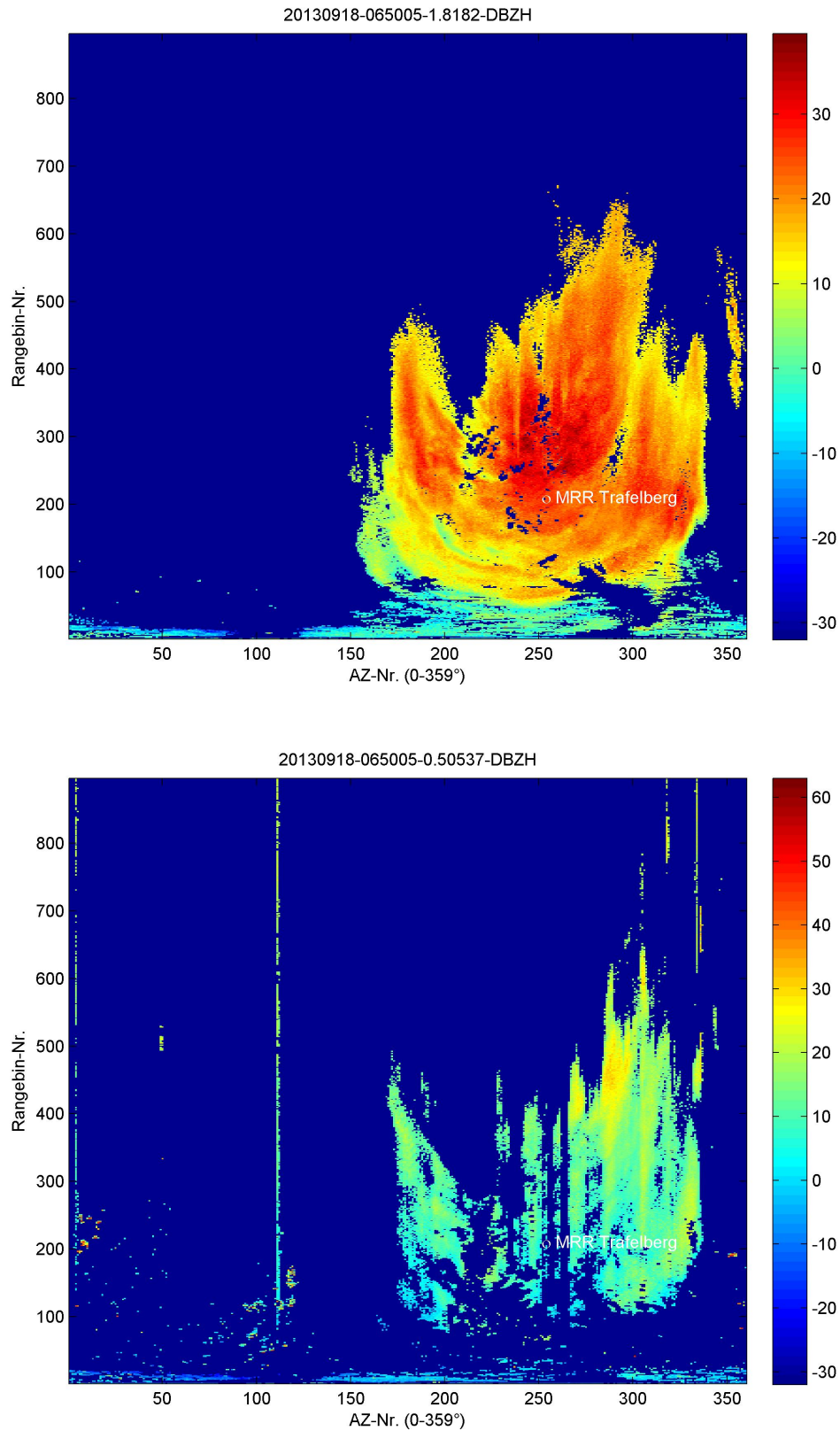


Abbildung 6.1: B-Scopes des WXR_{RAU} am 18.09.2013, 06:50 UTC. Azimutscan des Reflektivitätsfaktors bei einem Elevationswinkel von 0,5 Grad (unten) und 1,8 Grad (oben). Der Standort des MRR_{TRA} ist mit einem weißen Kreis gekennzeichnet.

6.2 Wetterradarsignal: gefiltert versus ungefiltert - horizontal versus vertikal

Bei der Betrachtung der gefilterten und ungefilterten Reflektivitäten des WXR_{RAU} im Vergleich, siehe dazu Abbildung 6.2, fällt durch die Lage der Datenpunkte bezüglich der 45° Linie (also der idealen Geraden) auf, dass in allen drei betrachteten Elevationen der gefilterte Reflektivitätsfaktor niedrigere Werte aufweist, als das ungefilterte Signal. Besonders sticht auch der Bereich der -32 dBZ des gefilterten Reflektivitätswerte hervor, da das ungefilterte Signal hierfür doch deutlich höhere Werte zeigt. Dies ist auf die Filterung im Signalprocessing zurückzuführen, bei der unter einer gewissen Messwertschwelle die Reflektivitätswerte auf -32 dBZ gesetzt werden, da diese das Rauschlevel damit nicht übersteigen. Im Vergleich

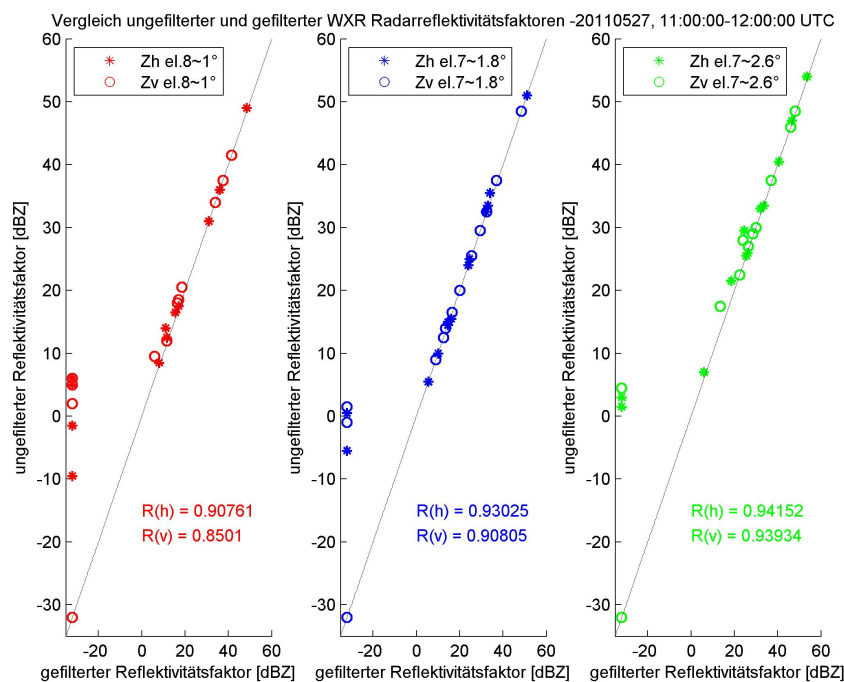


Abbildung 6.2: Ungefilterte versus gefilterte Reflektivitätsfaktoren: Scatterplots der horizontalen (Sterne) und vertikalen (Kreise) Reflektivitätsfaktoren der verschiedenen Elevationswinkel (1° in rot, $1,8^\circ$ in blau und $2,6^\circ$ in grün) für den 27.05.2011 11:00-12:00.

der untersten beiden Elevationen 7 und 8 (d.h. $0,5^\circ$, 1° , $1,8^\circ$ und $2,6^\circ$, alternierend mit jedem Halbscan alle 2,5 Minuten) am 27.05.2011, vergleiche dazu Abbildung 6.3, wird der Unterschied zwischen horizontalem und vertikalem Reflektivitätsfaktor klarer. Meist ist der horizontale Reflektivitätsfaktor, aufgrund der Tropfenform (vergleiche dazu Kapitel 2.1.1), größer als der vertikale. Eindeutig zu erkennen ist in diesem Fall auch ein Unterschied aufgrund der höheren Sensibilität des Mikroregennadars zu den Wetterradarmesswerten. In den

untersten Höhenschichten weist das Mikroregenradar zumeist deutlich höhere Reflektivitätswerte auf (Abbildung 6.3 unten), verglichen mit den gefilterten und ungefilterten horizontalen und vertikalen Reflektivitätsfaktoren, die speziell in der 8.Elevation Niederschlagsdämpfung erfahren (mehr dazu siehe Abschnitt 6.5).

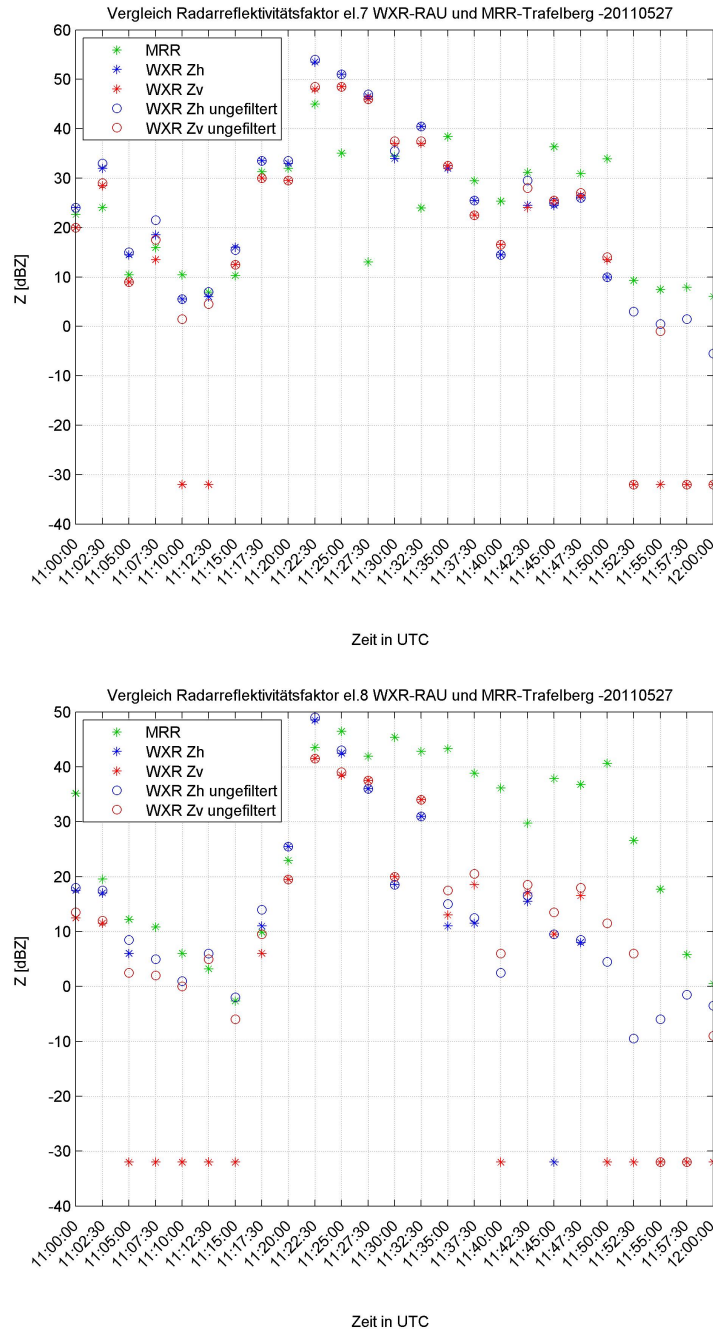


Abbildung 6.3: Zeitreihe der ungefilterten, gefilterten, horizontalen (blau) und vertikalen (rot) Reflektivitätsfaktoren der 7. (oben) und 8.Elevation (unten) des WXR_{RAU} für den 27.05.2011 11:00-12:00. Zum Vergleich sind zusätzlich die Messwerte des MRR_{TRA} (grün) eingetragen.

6.3 Vertikalvergleich Mikroregenradar und Wetterradar

Die Daten beider Radaranlagen (WXR_{RAU} und MRR_{TRA}) wurden gemäß dem in Kapitel 4.1 dargelegten Verfahren aufbereitet und in Form von Vertikalprofilen, Vergleichszeitreihen und Scatterplots gegenübergestellt. An dieser Stelle soll die Auswertung und Interpretation anhand der angeführten Scatterplots (Abbildung 6.4 bis 6.8) erfolgen. Dabei ist zu bemerken, dass für die Gegenüberstellung die gefilterten horizontalen Reflektivitätsfaktoren verwendet werden, da diese vordergründig operationelle Anwendung finden. Weiters werden Reflektivitätswerte von -32 dBZ des WXR_{RAU} und deren Vergleichswerte in den Streudiagrammen vernachlässigt, da diese gefilterten Reflektivitäten in erster Linie dem Signalprocessing entspringen und nicht der Radarmessung an sich. Wie bereits eingangs erwähnt, wird der $0,5^\circ$ Elevationswinkel in dieser Auswertung auch nicht weiter berücksichtigt.

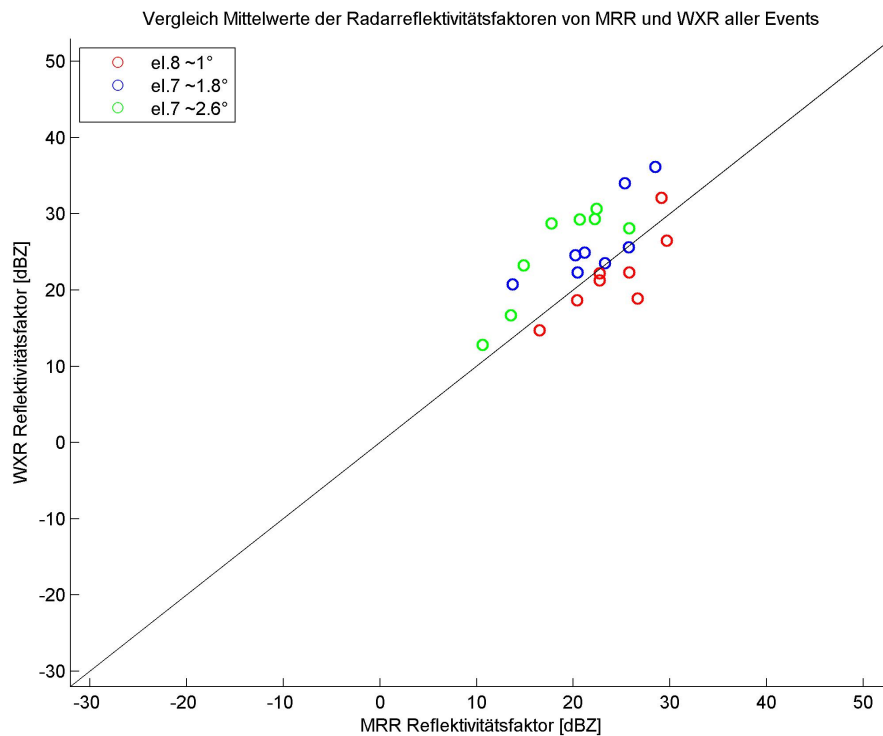


Abbildung 6.4: Scatterplot der Mittelwerte der Reflektivitätsfaktoren der verschiedenen Elevationswinkel (1° in rot, $1,8^\circ$ in blau und $2,6^\circ$ in grün) aller ausgewählten Fälle: WXR_{RAU} versus MRR_{TRA} .

Ein Überblick bzw. eine Gesamtauswertung aller ausgewählten Fälle ist in Abbildung 6.4 ersichtlich. Diese Graphik ist eine Darstellung aller Eventmittelwerte (in dBZ) der behandelten Elevationen. Dabei ist zu beachten, dass jedem Mittelwert, je nach Event bzw. Datenmenge und -qualität, unterschiedlich viele Datenpunkte zugrunde liegen (stratiforme Events um

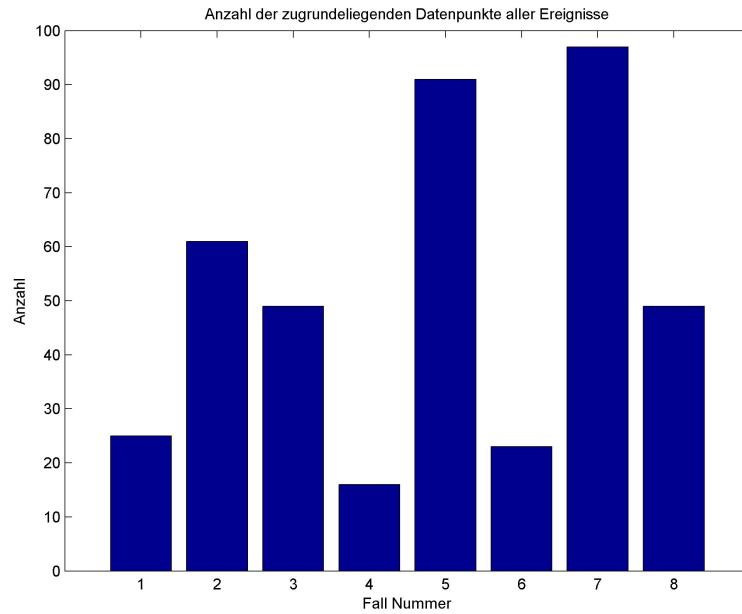


Abbildung 6.5: Anzahl der Auswertung zugrundeliegenden Datenpunkte aller Ereignisse (Fälle 1-8).

ein Vielfaches mehr aufgrund der Dauer des Ereignisses als konvektive Events, siehe Abbildung 6.5). In der Verteilung der Mittelwerte ist eine positive Abweichung der Werte des 1° Elevationswinkels hin zum Mikroregenradar zu erkennen, da von diesem wegen der höheren Sensibilität aufgrund der Wellenlänge im Allgemeinen, in den untersten Höhenschichten höhere Reflektivitätswerte gemessen werden können. Ganz im Gegensatz zu den beiden Elevationen darüber (blau und grün im Streudiagramm), wo sich eine eindeutige Tendenz hin zum dual-pol Wetterradar zeigt. Da das MRR aus Gründen der Niederschlagsdämpfung, beispielsweise aufgrund einer tiefen Schmelzschicht, in größerer Höhe stärkere Dämpfung erfährt und die Werte darum geringer sind als die des Wetterradars.

In den Scatterplots der einzelnen Fälle (Abbildung 6.6 bis 6.8) sind nun alle relevanten Datenpunkte des Events eingetragen und deren Mittelwerte, die in Abbildung 6.4 zusammengefasst sind (durch einen Kreis in der jeweiligen Farbe), ersichtlich. In den Farben der jeweiligen Elevation wird im Diagramm rechts unten die Varianz der Streuung angegeben. In der Darstellung ist zu beachten, dass die Reflektivitätswerte des WXR_{RAU} aus dem Jahr 2013 (Abbildung 6.7 und Abbildung 6.8) eine Korrektur um -2 dB vom Radarbetreiber erfahren haben und man somit einen künstlichen Bias erhält. Diese wurde hier aber nicht wieder aufgehoben, da primär die Werte gegenübergestellt werden sollen, die auch im operationellen System verwendet werden.

Die Events aus dem Jahre 2011 sind in Abbildung 6.6 abgebildet, im Folgenden sollen diese erörtert werden.

1. Das erste konvektive Ereignis vom **27.05.2011** mittags (Abbildung 6.6a) liefert in der Gegenüberstellung vergleichsweise geringe Korrelationskoeffizienten R , da kein vollständig positiver Zusammenhang zwischen den Datenpunkten besteht und die Datenmenge vergleichsweise gering ist. Zudem ist hier auch keine eindeutige systematische Abweichung zu erkennen, da, wie schon im vorangegangenen Abschnitt zu erkennen war, das Wetterradar in diesem Fall in den untersten Elevationen massiven Dämpfungseffekten ausgesetzt ist.
2. Das zweite konvektive Ereignis mit dem Kaltfrontdurchgang an diesem Tag (Abbildung 6.6b) weist deutlich bessere statistische Werte und eine weitaus geringere Streuung auf. Diesem konvektiven Fall liegen auch deutlich mehr Datenpunkte zugrunde. Bei eingehender Betrachtung wird hier eine positive systematische Abweichung hin zum Wetterradar erkennbar.
3. Das rein stratiforme Ereignis in der Nacht auf **28.05.2011** zeigt in der Gegenüberstellung ein nahezu beispielhaftes Bild, mit einer geringen Streuung und mit der Lage nahezu aller Datenpunkte in der Nähe der (optimalen) 45° Linie. Im Besonderen sind die Werte der unteren beiden betrachteten Elevationen (in Abbildung 6.6c rot und blau) mit Korrelationskoeffizienten über 0,9 bestechend. Einzig die $2,6^\circ$ Elevation weist eine positive systematische Abweichung in Richtung WXR auf, dies ist vermutlich auf das Sinken der Schneefallgrenze bzw. Schmelzschicht zurückzuführen, wobei die gemessenen Reflektivitäten des MRR in größerer Höhe aufgrund der Dämpfungseffekte geringer sind als die des WXR.

Ein direkter Vergleich dreier konvektiver Ereignisse aus dem Jahr 2013, deren Ergebnisse unterschiedlicher nicht sein könnten, ist Abbildung 6.7 zu entnehmen.

4. Den Auftakt macht ein konvektives Ereignis am **29.07.2013** (Abbildung 6.7a). Durch die kurze Dauer des Events ist die Datengrundlage in diesem Fall sehr mager für einen Vergleich. Der rasche Durchzug und die kleinräumige Skala der Zelle macht sichtliche Unterschiede in der Erfassung beider Radarsysteme. Nachdem, wie schon bei der Fallauswahl erwähnt, davon ausgegangen werden kann, dass in dieser Zelle Hagel vorhanden ist, gestaltet sich der Vergleich in diesem Fall sehr schwierig, da sich Dämpfungseffekte aufgrund von Hagel bei beiden Radaranlagen unterschiedlich stark auswirken. Feste Niederschlagspartikel, im besonderen Hagelkörner, dämpfen den Radarstrahl im Besonderen den des Mikroregenradars nennenswert. Der Brechungsindex von Wasser und Eis ist unterschiedlich und wirkt sich bei der verwendeten Frequenz stark aus. Der Effekt wird teilweise durch die unterschiedliche Form von Wassertropfen und Eiskristallen kompensiert.
5. In einer gradientschwachen Lage am **04.08.2013** bewegen sich mehrere Gewitter und Schauerzellen nahezu stationär um den Standort des MRR_{TRA} (Abbildung 6.7b). Da-

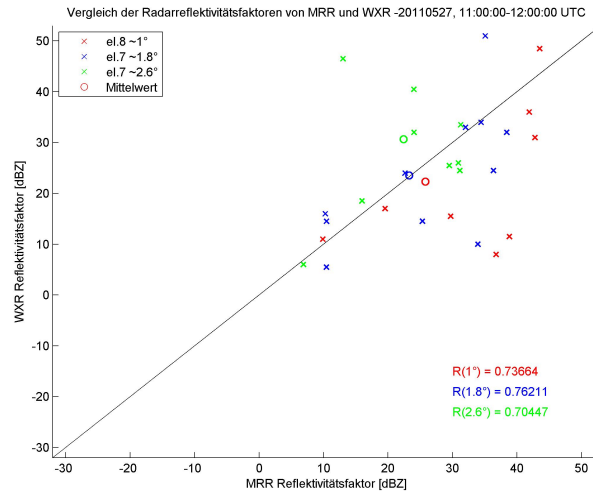
mit bietet der lange Beobachtungszeitraum eine guten Datengrundlage für den Vergleich. Hier ist erneut der charakteristische positive Bias in der untersten Elevation (rot im Streudiagramm) hin zum Mikroregenradar ersichtlich, darüber liegende Elevationen verhalten sich dabei wenig auffällig mit einer Verteilung um die 45° Linie.

6. Der dritte konvektive Fall im Jahr 2013 betrifft den **13.09.2013** (Abbildung 6.7c). Im Vergleich zum vorherigen Ereignis wirkt sich hier eine sehr tiefliegende Schneefallgrenze von rund 2000 m merklich auf den Datenvergleich aus. Eine positive systematische Abweichung hin zum Wetterradar in den oberen beiden Elevationen und eine Streuung resultieren besonders in der $2,6^\circ$ Elevation in vergleichsweise geringen Werten für den Korrelationskoeffizienten R . Der charakteristische Bias in der 1° Elevation ist auch hier deutlich zu erkennen.

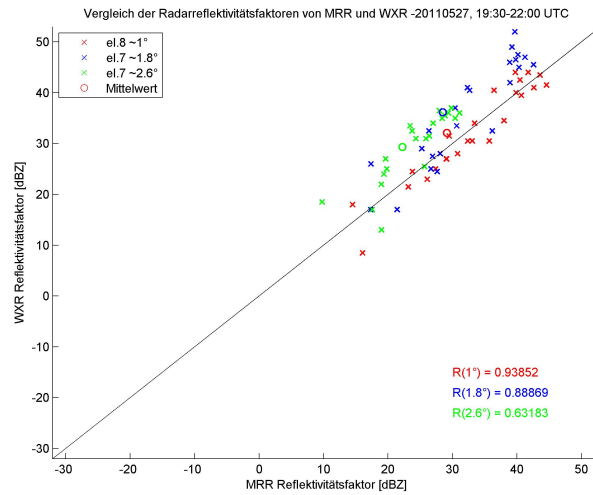
Den Abschluss des Vergleichsprozesses bilden zwei stratiforme Ereignisse aus dem Jahr 2013, siehe dazu Abbildung 6.8.

7. Das Ereignis am Morgen des **18.09.2013** zeigt im wesentlichen ein ganz ähnliches Bild (Abbildung 6.8a), wie die Gegenüberstellung vom 13.09.2013. Aufgrund der tiefliegenden Schneefallgrenze bzw. Schmelzschicht weist im Besonderen die $2,6^\circ$ Elevation eine positive systematische Abweichung hin zum Wetterradar auf.
8. Am **26.09.2013** hingegen ist die statistische Auswertung der Gegenüberstellung der Reflektivitätsfaktoren, aufgrund der mit etwa 3000 m deutlich höher liegenden Schneefallgrenze bzw. Schmelzschicht, merklich besser und zeigt alle zu erwartenden Charakteristika im Vergleich eines Mikroregenradars mit einem Wetterradar, siehe Abbildung 6.8b.

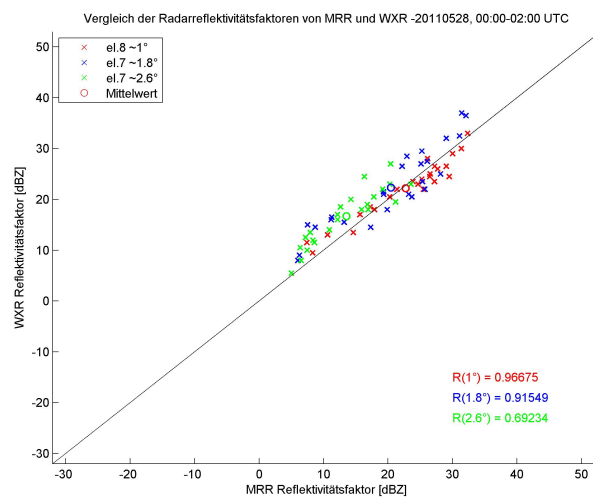
Im Allgemeinen ist anzunehmen, dass stratiforme Ereignisse aufgrund der Tröpfchengröße und der geringeren Niederschlagsdämpfungseffekte weit besser erfasst werden können als konvektive. Der vorangegangene Vergleich hat aber gezeigt, dass dies nicht zwingend der Fall sein muss. Abhängig von der Dauer des Events und Gleichförmigkeit des Niederschlagsgebietes sowie allen Einflussparametern die zwischen Wetterradar und Mikroregenradar stehen, kann obiger Vermutung bis zu einem gewissen Grad widersprochen werden. Im Vergleichsprozess wird nun auch eindeutig klar, warum eine Gegenüberstellung in der Wintersaison nicht zulässig wäre und keinen Mehrwert brächte.



(a)

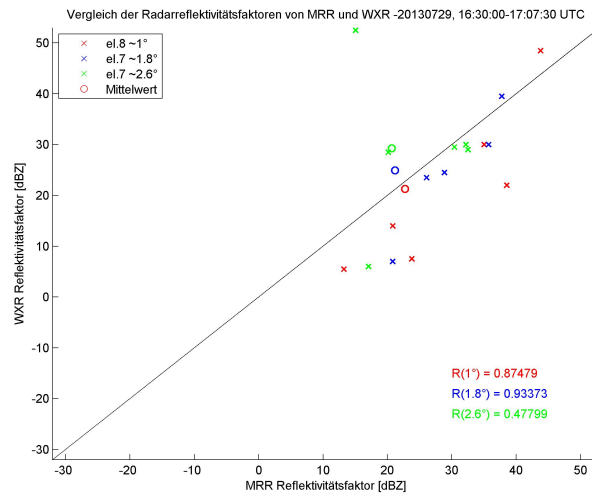


(b)

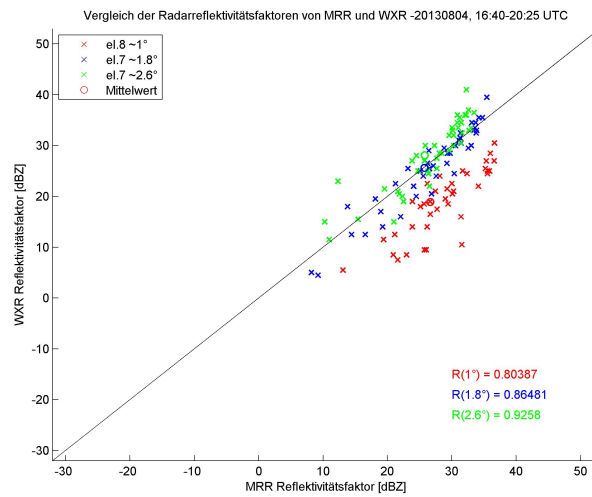


(c)

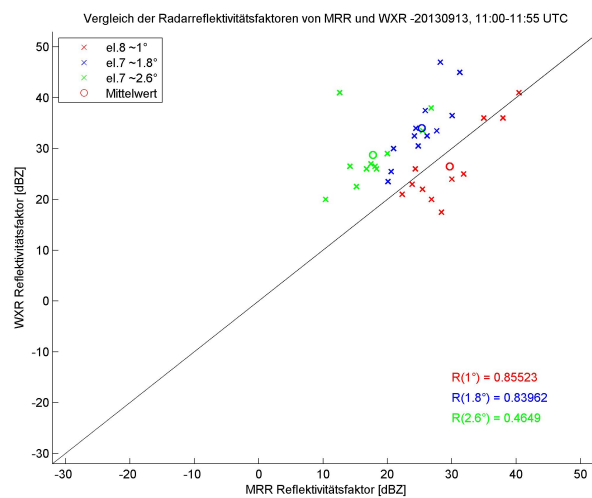
Abbildung 6.6: WXR_{RAU} versus MRR_{TRA} : Scatterplots der Reflektivitätsfaktoren der verschiedenen Elevationswinkel (1° in rot, $1,8^\circ$ in blau und $2,6^\circ$ in grün) und deren Mittelwerte (Kreise) für (a) 27.05.2011 11:00-12:00, (b) 27.05.2011 19:30-22:00 und (c) 28.05.2011 00:00-02:00.



(a)

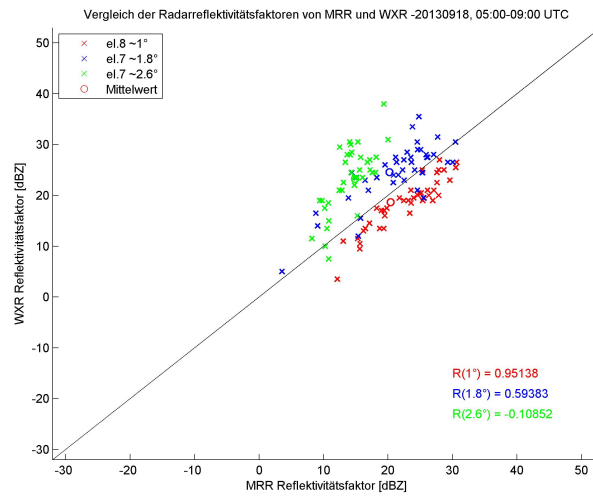


(b)

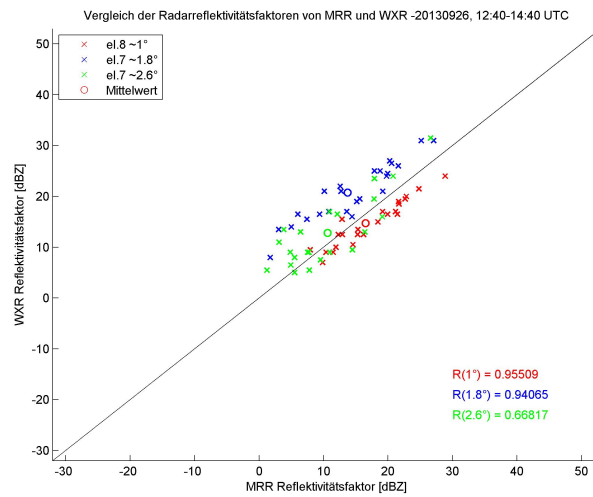


(c)

Abbildung 6.7: WXR_{RAU} versus MRR_{TRA} : Scatterplots der Reflektivitätsfaktoren der verschiedenen Elevationswinkel (1° in rot, 1.8° in blau und 2.6° in grün) und deren Mittelwerte (Kreise) für (a) 29.07.2013 16:30:00-17:07:30, (b) 04.08.2013 16:40-20:25, (c) 13.09.2013 11:00-11:55.



(a)

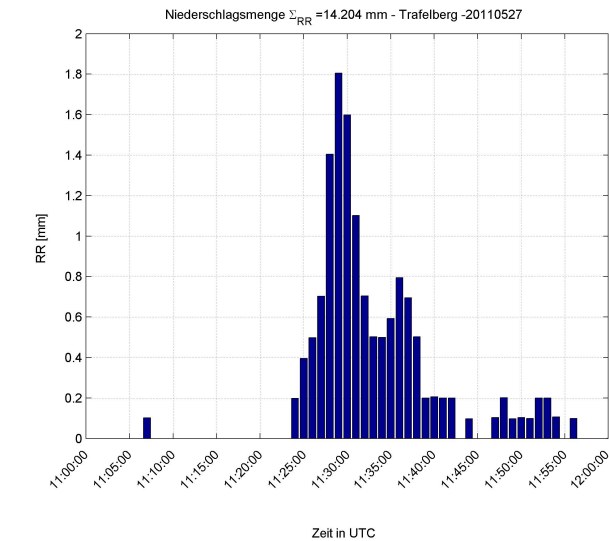


(b)

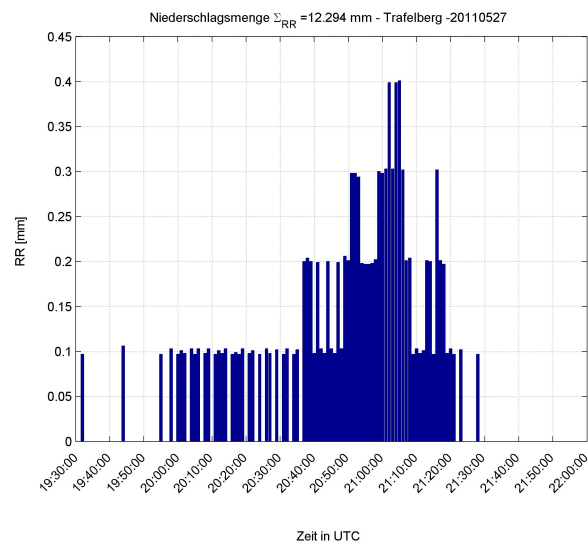
Abbildung 6.8: WXR_{RAU} versus MRR_{TRA} : Scatterplots der Reflektivitätsfaktoren der verschiedenen Elevationswinkel (1° in rot, 1.8° in blau und 2.6° in grün) und deren Mittelwerte (Kreise) für (a) 18.09.2013 05:00-09:00 und (b) 26.09.2013 12:40-14:40.

6.4 Referenzdistrometer

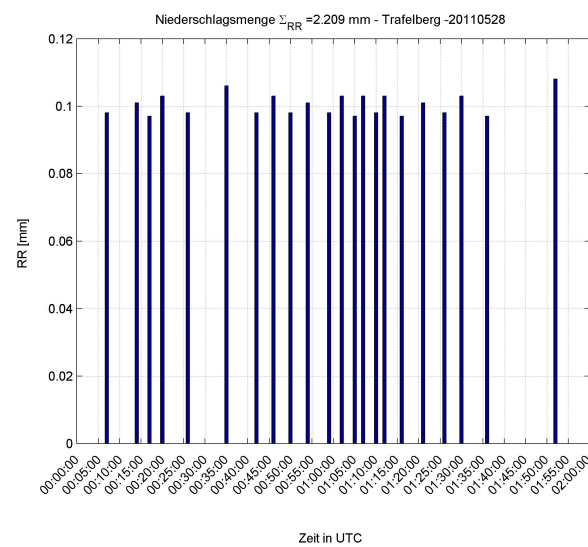
Ein Vergleich mit einem bodennahen Messgerät, wie dem Distrometer kann nicht direkt stattfinden, da Radars die Tropfen in der Höhe messen und ein Distrometer den Niederschlag der schließlich “tatsächlich” am Boden ankommt. Trotzdem liefert diese Messung wertvolle Zusatzinformation als Referenzmessgerät. Für den Vergleich wird das Distrometer am Standort Trafelberg in unmittelbarer Nähe des Mikroregennadars herangezogen.



(a)

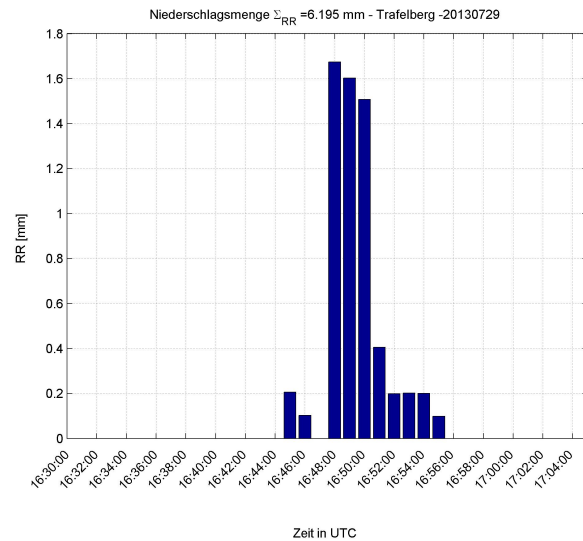


(b)

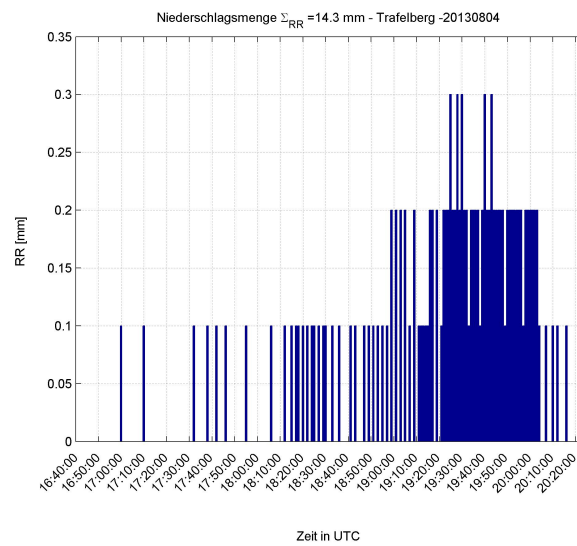


(c)

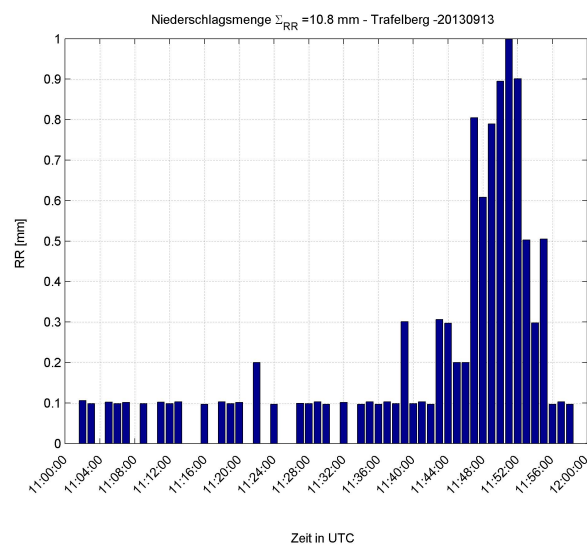
Abbildung 6.9: Distrometerzeitreihe für (a) 27.05.2011 11:00-12:00, (b) 27.05.2011 19:30-22:00 und (c) 28.05.2011 00:00-02:00 am Standort MRR_{TRA} .



(a)

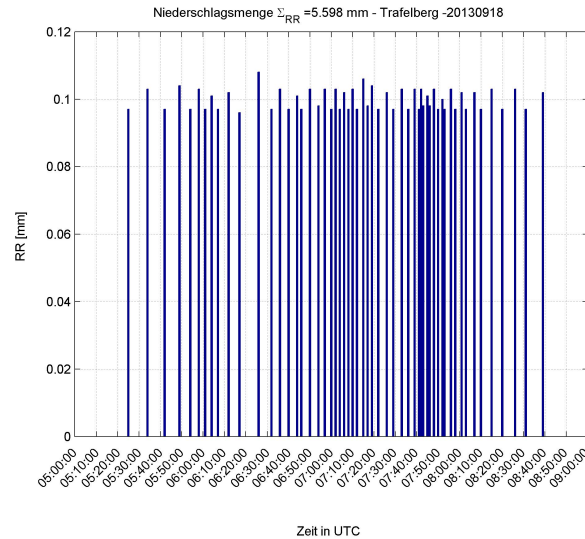


(b)

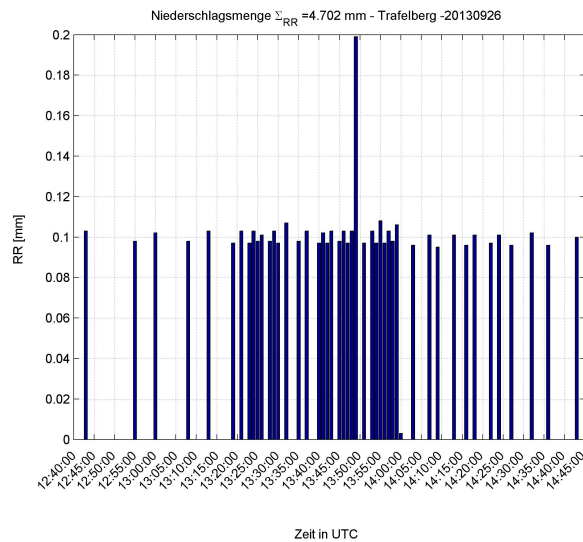


(c)

Abbildung 6.10: Distrometerzeitreihe für (a) 29.07.2013 16:30-17:05, (b) 04.08.2013 16:40-20:25, (c) 13.09.2013 11:00-12:00 am Standort MRR_{TRA} .



(a)



(b)

Abbildung 6.11: Distrometerzeitreihe für (a) 18.09.2013 05:00-09:00 und (b) 26.09.2013 12:40-14:45 am Standort MRR_{TRA} .

Da bei der Messung zeitweise auch nennenswerte Datenlücken auftreten, sind die berechneten Niederschlagssummen Σ_{RR} (jeweils im Titel der Zeitreihendarstellung in Abbildung 6.9 bis 6.11 angeführt) nicht als optimal repräsentativ einzustufen, dies soll nur einen Anhaltspunkt bieten. Im Wesentlichen soll diese Gegenüberstellung den Verlauf des Niederschlagsereignisses verdeutlichen, um beispielsweise auch konvektive und stratiforme Strukturen besser erkennen und von einander unterscheiden zu können. In einem Vergleich ist zu beachten, dass es aufgrund der unterschiedlichen Fallgeschwindigkeiten der Tropfen aus gewisser Höhe zu zeitlichen Verzögerungen im Niederschlagsbild kommt, da der Tropfen eine gewisse Zeit benötigt bis er aus der Messhöhe des Radars den Boden erreicht. Ergänzend ist noch zu erwähnen, dass

zur Überprüfung beider Ergebnisse eine approximative Berechnung der Niederschlagssummen via Z-R-Beziehung aus den Radarreflektivitäten der einzelnen Fälle angestellt wurde. Eine vergleichende Histogrammdarstellung der Niederschlagsmengen vom 27.05.2011 findet sich in Abbildung 6.12. Aufgrund der Lücken im Distrometerdatensatz, sowie der Unterschiede

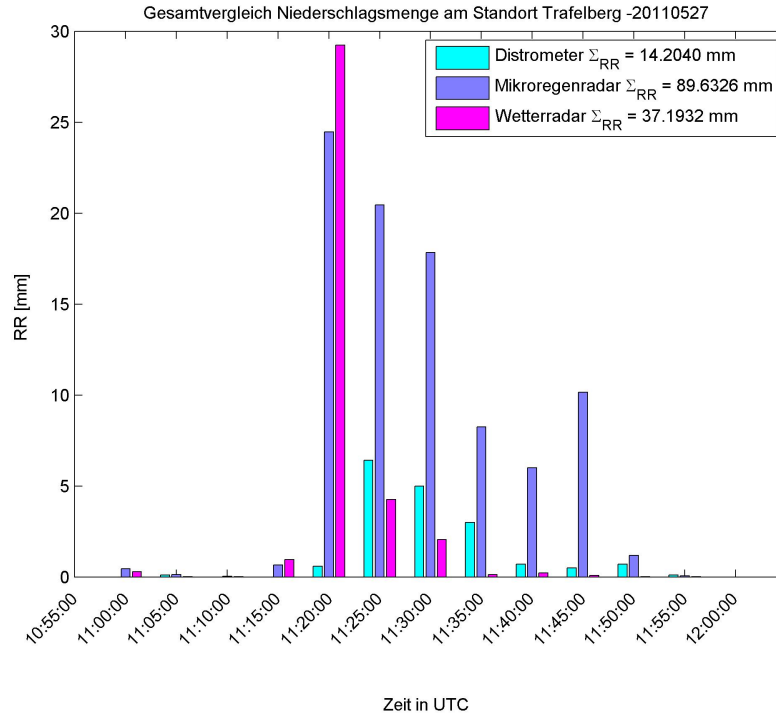


Abbildung 6.12: Vergleich der Niederschlagsmengen des Distrometers, des Mikroregenradars und des Wetterradars am Standort Trafelberg für den 27.05.2011 11:00-12:00.

de in der zeitlichen Auflösung und der räumlichen Differenz (Höhe der Messung, Größe des Messvolumens) der gegenübergestellten Messsysteme, fließen unter anderem signifikante Fehlerquellen in die Auswertung mit ein und rufen mitunter deutliche Unterschiede im Vergleich hervor.

6.5 Wetterradar Dämpfungskorrektur

Als Beispielfall zur Dämpfungskorrektur wurde der 27.05.2011 zu Mittag gewählt, um den Mehrwert einer Niederschlagsdämpfungserkennung und -korrektur mittels dual-pol Momente zu demonstrieren. Die Wahl fällt auf diesen Fall, weil die Dämpfung der WXR Reflektivitätswerte bereits im vorangegangenen Vergleich deutlich zu erkennen ist und diese deshalb so bemerkenswert für die Entfernung des MRR_{TRA} ausfällt, da sich ein Teil der Zelle zwischen Wetterradar und dem Standort Trafelberg befindet. Ein guter Indikator für die Niederschlagsdämpfung ist ein kontinuierlicher Anstieg der differentiellen Phase. Die Korrektur

erfolgt mittels, wie in Kapitel 4.2 erläuterten ZPHI-Methode entlang des Wetterradarstrahls des 252° Azimutwinkels in Richtung Mikroregenradarstandort, um den Vergleichswert des MRR_{TRA} als Referenz nutzen zu können. Abbildung 6.13 ist die eine A-Scope Darstellung des Radarreflektivitätsfaktors (blaue Linie) und der differentiellen Phase (grüne Linie) bei einem Elevationswinkel von 1° . Der Verlauf des korrigierten Reflektivitätsfaktors ist als strichlierte Linie eingetragen, einerseits die Korrektur mittels ZPHI-Methode (dick strichliert) andererseits die Korrektur mittels eines einfachen linearen Ansatzes (dünn strichliert). Als Referenz ist der am MRR_{TRA} zu diesem Zeitpunkt gemessene Reflektivitätswert an der passenden Stelle eingetragen. Die Entfernungsvariablen r_0 und r_m wurden gemäß Abbildung 4.2 auf 41 km und 60 km festgelegt. Der Standort des MRR_{TRA} befindet sich wie erwartet im Bereich des Maximums der differentiellen Phase und damit auch im Bereich der größten Dämpfung. Das Ergebnis beider Dämpfungskorrekturverfahren stimmt gut mit dem gemessenen Wert am MRR_{TRA} überein. Erstaunlicherweise kann die einfache lineare Korrektur in diesem Fall vergleichsweise gut mit dem Ergebnis des ZPHI-Verfahrens mithalten, da es in

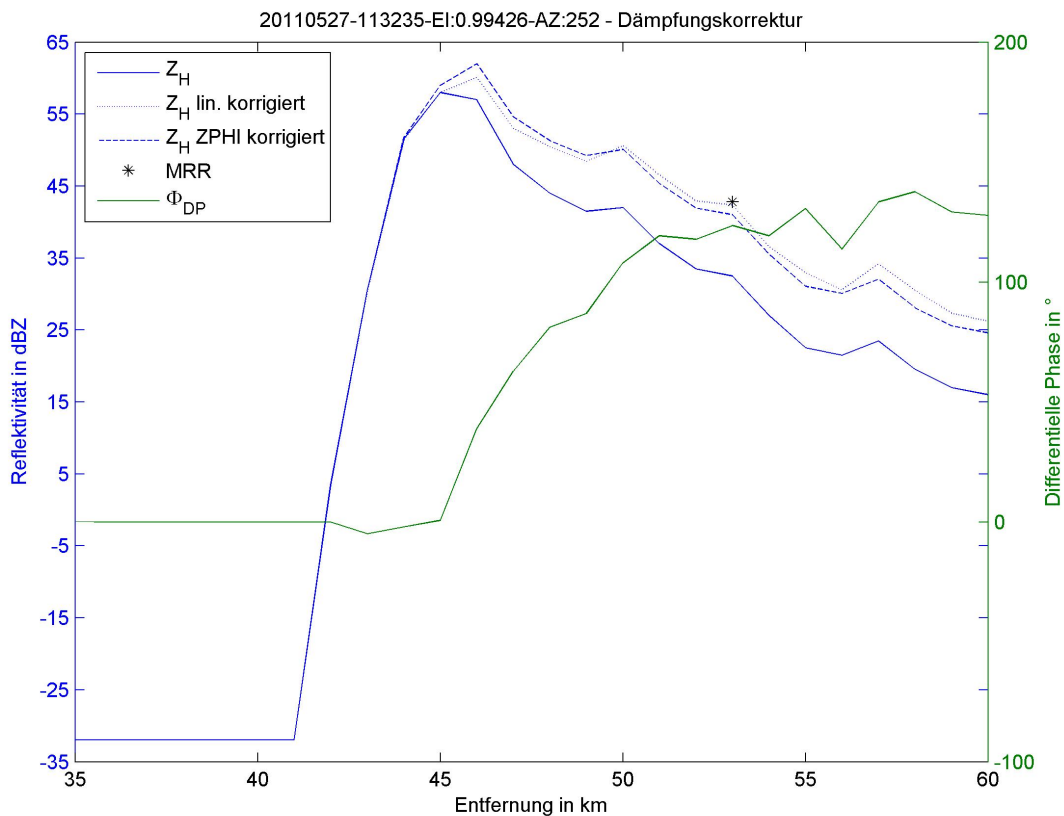


Abbildung 6.13: A-Scope. Dämpfungskorrektur des WXR_{RAU} -Strahls in Richtung MRR_{TRA} am 27.05.2011, 11:32. Der Messwert des MRR_{TRA} ist in der adäquaten Entfernung vom WXR_{RAU} mit einem schwarzen Stern gekennzeichnet.

senen Wert am MRR_{TRA} überein. Erstaunlicherweise kann die einfache lineare Korrektur in diesem Fall vergleichsweise gut mit dem Ergebnis des ZPHI-Verfahrens mithalten, da es in

beiden Fällen zu einer Erhöhung des Messwertes um mehr als 10 dB hin zum Referenzwert des MRR_{TRA} kommt. Die Güte und den Mehrwert jedes einzelnen Korrekturverfahrens zu beurteilen obliegt dem Betrachter, zu konstatieren ist jedoch, dass es eine dringende Notwendigkeit besteht Dämpfungskorrekturverfahren im Speziellen mittels differentieller Phase anzuwenden, um den Mehrwert der dual-pol Momente richtig nutzen und das gesamte Potential ausschöpfen zu können und auch im operationellen Umgang den Vorteil und Zusatznutzen eines dual-polarisierten Wetterraders aufzuzeigen.

7 Schlussfolgerung und Ausblick

Die gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der Abschattungseffekte in der untersten Elevation ($0,5^\circ$) für den Südwestsektor des Abdeckungsgebietes des WXR_{RAU} sind ein willkommener Anlass um das Bewusstsein für Abschattungseffekte im Alpenraum generell zu schärfen. Es ist klar ersichtlich, dass Erhebungen auch nicht sehr hoch sein müssen um die Messung bereits massiv zu beeinträchtigen und darum bei der Interpretation von Radarbildern die örtliche Topographie immer hinterfragt und nicht außer Acht gelassen werden sollte. Die Betrachtung der Gegenüberstellung von ungefiltertem und gefiltertem Signal macht einen wesentlichen Faktor deutlich, den es bei der Interpretation von Radardaten zu beachten gilt. Geringe Reflektivitätswerte, unterhalb des Rauschlevels, werden vom Signalprozessor gefiltert und damit scheinen Echos von beispielsweise sehr kleine Tropfen am Radarbild nicht auf. Der Vergleich der beiden Radaranlagen hat gezeigt, dass die Stärken des Mikroregenradars, aufgrund der höheren Sensibilität, primär in den unteren Höhenschichten liegen. Das dual-pol Wetterradar hingegen kann in den oberen Höhenschichten besser überzeugen, da die Dämpfungseffekte am Mikroregenradar in großer Höhe in vielen Fällen stärker zum Tragen kommen. Eine Gegenüberstellung der Radardaten mit Daten des Distrometers zeigt eine Übereinstimmung im zeitlichen Verlauf des Ereignisses. Aufgrund der Unterschiede im Messsystem und der vorhandenen Fehlerquellen weist ein direkter Vergleich mitunter deutliche Differenzen zwischen den einzelnen Messergebnissen auf. Die Dämpfungskorrektur der Wetterradardaten mittels differentieller Phase liefert plausible Ergebnisse, die mittels Referenzwert des Mikroregenradars verifiziert werden konnten.

Abschließend bleibt noch zu bemerken, dass eine operationelle Einbindung eines Mikroregenradars in das Wetterradarnetzwerk anzudenken wäre, um die Vorteile der Zusatzinformation nutzen zu können, beispielsweise um Vergleiche anzustellen oder generell um ein vertikal höher aufgelöstes Bild von Niederschlagszellen und Substrukturen zu bekommen. Eine Systemneuerung ist jedoch mit nicht zu unterschätzendem finanziellem Aufwand verbunden, weshalb eine solche Entscheidung und Umsetzung den verantwortlichen Stellen obliegt. Anzudenken wäre in diesem Zusammenhang auch das Mikroregenradar als Tool zur Fehler- bzw. Biaskorrektur für Wetterradaranlagen und Systemungereimtheiten zu verwenden. Der vorliegende Vergleich ist diesbezüglich ein erster Schritt, weiterführende Arbeiten sind daher in Betracht zu ziehen.

Weiterführende Untersuchungen zum Thema Dämpfungskorrekturverfahren mittels differentieller Phase sind empfehlenswert. Diesbezüglich sollten auch Überlegungen einer operationellen Umsetzung der Korrekturmethode angestellt werden, um mit möglichst wenig Ressourcenaufwand die bestmöglichen Ergebnisse erzielen zu können. Im Allgemeinen sollte angestrebt werden den Mehrwert und das Potential der differentiellen Phaseninformation zu nutzen, beispielsweise zur Signalrekonstruktion der untersten Elevation bzw. von Zerosnakes, die durch das Signalprocessing entstehen. Zu diesem Thema empfiehlt es sich weitere wissenschaftliche Untersuchungen durchzuführen.

Eine Erweiterung des Vergleichs des dual-pol Wetterraders auf eine horizontale Ebene ist in anderen Arbeiten nach aktuellem Stand bereits im Entstehungsprozess, dabei können Horizontalschnitte des Wetterraders mit TAWES- und HD-Stationsaufzeichnungen in VERA-Analysen verglichen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Bech et al. *Doppler Radar Observations - Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar, and Other Advanced Applications*. InTech, 2012.
- [2] V. N. Bringi and V. Chandrasekar. *Polarimetric Doppler Weather Radar - Principles and applications*. Cambridge University Press, 2001.
- [3] M. Clemens et al. Time-height evolution of measured raindrop size distributions. In *Proceedings of ERAD 2006*, volume 3, pages 137–140, 2006.
- [4] M. Clemens et al. Einfluss zeitlicher und räumlicher Variabilität von Tropfenspektren auf die Niederschlagsbestimmung mittels Wetterradar. In *DACH Meteorologentagung 2007*, volume 1, 2007.
- [5] R. J. Doviak and D. S. Zrníc. *Doppler radar and weather observations*. Academic Press, 1984.
- [6] R. J. Doviak and D. S. Zrníc. *Doppler Radar and Weather Observations*. Dover Books on Engineering. Dover Publications, second edition, 2006.
- [7] F. Gekat et al. The state of weather radar operations, networks and products. In P. Meischner, editor, *Weather Radar - Principles and Advanced Applications*, chapter 1, pages 1–51. Springer-Verlag, 2004.
- [8] J.-Y. Gu et al. Polarimetric attenuation correction in heavy rain at C-band. *Journal of applied Meteorology and Climatology*, 50:39–58, 2011.
- [9] R. Gunn and G. D. Kinzer. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *Journal of Meteorology*, 6:243–248, 1949.
- [10] W. F. Hitschfeld and J. Bordan. Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelengths. *Journal of Meteorology*, 11:58–67, 1954.
- [11] A. Illingworth. Improved precipitation rates and data quality by using polarimetric measurements. In P. Meischner, editor, *Weather Radar - Principles and Advanced Applications*, chapter 5, pages 130–166. Springer-Verlag, 2004.

-
- [12] R. Kaltenböck. Das österreichische Wetterradar Netzwerk. *ÖGM bulletin*, 2:14–22, 2012.
 - [13] R. Kaltenböck. New generation of dual polarized weather radars in Austria. Technical report, ERAD 2012 - The seventh European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, 2012.
 - [14] V. Lakshmanan. Image processing of weather radar reflectivity data: Should it be done in Z or dBZ? *Electronic Journal of Severe Storms Meteorology*, 7 (3):1–8, 2012.
 - [15] M. Löffler-Mang and M. Kunz. Notes and correspondence - on the performance of a low-cost K-band doppler radar for quantitative rain measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16:379–387, 1999.
 - [16] METEK. *MRR Physical Basics*. Meteorologische Messtechnik GmbH, 2010.
 - [17] METEK. *MRR-2 User Manual - Micro Rain RADAR*. Meteorologische Messtechnik GmbH, 2012.
 - [18] H. Paulitsch et al. Dual-polarization C-band weather radar algorithms for rain rate estimation and hydrometeor classification in an alpine region. *Advances in Geoscience*, 20:3–8, 2009.
 - [19] G. Peters et al. Rain observations with a vertically looking Micro Rain Radar (MRR). *Boreal Environment Research*, 7:353–362, 2002.
 - [20] G. Peters et al. Profiles of raindrop size distribution a retrieved by Microrain Radars. *Journal of Applied Meteorology*, 44:1930–1949, 2005.
 - [21] R. E. Rinehart. *Radar for Meteorologists: or you, too, can be a radar meteorologist*. Rinehart, R. E., 5th edition, 2010.
 - [22] A. Ryzhkov et al. Simultaneous measurements of heavy rain using S-band and C-band polarimetric radars. In *35th Conference on Radar Meteorology*, 2011.
 - [23] A. V. Ryzhkov et al. Potential utilization of specific attenuation for rainfall estimation, mitigation of partial beam blockage, and radar networking. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31:599–619, March 2014.
 - [24] P. Tabary et al. Evaluation of two integrated polarimetric Quantitative Precipitation Estimation (QPE) algorithms at C-band. *Journal of Hydrology*, 405:248–260, 2011.
 - [25] J. Testud et al. The rain profiling algorithm applied to polarimetric weather radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17:332–356, 2000.
 - [26] A. Wagner et al. Coupling a vertically looking K-band radar and a C-band weather radar to obtain a complete profile of reflectivity. *Geophysical Research Abstracts*, 5:11993, 2003.

-
- [27] A. Wagner et al. Vertical profile of drop size spectra. In *Proceedings of ERAD 2004*, pages 402–406, 2004.
- [28] D. S. Zrnic and A. V. Ryzhkov. Polarimetry for Weather Surveillance Radars. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(3):389–406, 1999.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Übersichtskarte - Lage des Wetterradars Rauchenwarth (gelb markiert) und des Mikroregenradars am Trafelberg (rot markiert).	9
2.2	Interleave scan strategy des WXR _{RAU} - erster Halbscan in blau, zweiter Halbscan in grün dargestellt (aus Kaltenböck, 2012 [12]).	11
2.3	Interleave scan strategy des WXR _{RAU} (aus Kaltenböck, 2012 [13]).	11
2.4	MRR Frequenzmuster des ausgesandten Signals und des Echos. (aus METEK MRR Physical Basics, 2010 [16])	14
2.5	Fallgeschwindigkeit von Regentropfen am Boden versus Tröpfchengröße in ruhender Luft. (aus METEK MRR Physical Basics, 2010 [16])	16
4.1	Schematische Darstellung der Strahlvolumina von MRR _{TRA} und WXR _{RAU}	20
4.2	Schematische Darstellung des ZPHI-Ansatzes. Die Entfernungsvariablen r_0 , r und r_m werden entsprechend der Ausdehnung des Niederschlagsgebietes und des Φ_{DP} Profils gewählt. (aus Bringi und Chandrasekar, 2001 [2])	23
5.1	Zeitreihe des MRR _{TRA} Höhenprofils des Reflektivitätsfaktors am 27.05.2011. Konvektives Ereignis.	30
5.2	B-Scope des WXR _{RAU} am 27.05.2011, 11:27 UTC. Azimutscan des Reflektivitätsfaktors bei einem Elevationswinkel von 1 Grad. Der Standort des MRR _{TRA} ist mit einem weißen Kreis gekennzeichnet.	30
5.3	Zeitreihe des MRR _{TRA} Höhenprofils des Reflektivitätsfaktors am 27.05.2011. Konvektives Ereignis.	31
5.4	B-Scope des WXR _{RAU} am 27.05.2011, 20:35 UTC. Azimutscan des Reflektivitätsfaktors bei einem Elevationswinkel von 1,8 Grad. Der Standort des MRR _{TRA} ist mit einem weißen Kreis gekennzeichnet.	31
5.5	Zeitreihe des MRR _{TRA} Höhenprofils des Reflektivitätsfaktors am 28.05.2011. Stratiformes Ereignis.	32

5.6	B-Scope des WXR_{RAU} am 28.05.2011, 00:40 <i>UTC</i> . Azimutscan des Reflektivitätsfaktors bei einem Elevationswinkel von 1,8 <i>Grad</i> . Der Standort des MRR_{TRA} ist mit einem weißen Kreis gekennzeichnet.	32
5.7	Zeitreihe des MRR_{TRA} Höhenprofils des Reflektivitätsfaktors am 29.07.2013. Konvektives Ereignis.	33
5.8	B-Scope des WXR_{RAU} am 29.07.2013, 16:50 <i>UTC</i> . Azimutscan des Reflektivitätsfaktors bei einem Elevationswinkel von 1,8 <i>Grad</i> . Der Standort des MRR_{TRA} ist mit einem weißen Kreis gekennzeichnet.	33
5.9	Zeitreihe des MRR_{TRA} Höhenprofils des Reflektivitätsfaktors am 04.08.2013. Konvektives Ereignis.	34
5.10	B-Scope des WXR_{RAU} am 04.08.2013, 18:55 <i>UTC</i> . Azimutscan des Reflektivitätsfaktors bei einem Elevationswinkel von 1,8 <i>Grad</i> . Der Standort des MRR_{TRA} ist mit einem weißen Kreis gekennzeichnet.	34
5.11	Zeitreihe des MRR_{TRA} Höhenprofils des Reflektivitätsfaktors am 13.09.2013. Konvektives Ereignis.	35
5.12	B-Scope des WXR_{RAU} am 13.09.2013, 11:40 <i>UTC</i> . Azimutscan des Reflektivitätsfaktors bei einem Elevationswinkel von 1,8 <i>Grad</i> . Der Standort des MRR_{TRA} ist mit einem weißen Kreis gekennzeichnet.	35
5.13	Zeitreihe des MRR_{TRA} Höhenprofils des Reflektivitätsfaktors am 18.09.2013. Stratiformes Ereignis.	36
5.14	B-Scope des WXR_{RAU} am 18.09.2013, 07:30 <i>UTC</i> . Azimutscan des Reflektivitätsfaktors bei einem Elevationswinkel von 1,8 <i>Grad</i> . Der Standort des MRR_{TRA} ist mit einem weißen Kreis gekennzeichnet.	36
5.15	Zeitreihe des MRR_{TRA} Höhenprofils des Reflektivitätsfaktors am 26.09.2013. Stratiformes Ereignis.	37
5.16	B-Scope des WXR_{RAU} am 26.09.2013, 13:45 <i>UTC</i> . Azimutscan des Reflektivitätsfaktors bei einem Elevationswinkel von 1,8 <i>Grad</i> . Der Standort des MRR_{TRA} ist mit einem weißen Kreis gekennzeichnet.	37
6.1	B-Scopes des WXR_{RAU} am 18.09.2013, 06:50 <i>UTC</i> . Azimutscan des Reflektivitätsfaktors bei einem Elevationswinkel von 0,5 <i>Grad</i> (unten) und 1,8 <i>Grad</i> (oben). Der Standort des MRR_{TRA} ist mit einem weißen Kreis gekennzeichnet.	40
6.2	Ungefilterte versus gefilterte Reflektivitätsfaktoren: Scatterplots der horizontalen (Sterne) und vertikalen (Kreise) Reflektivitätsfaktoren der verschiedenen Elevationswinkel (1° in rot, 1,8° in blau und 2,6° in grün) für den 27.05.2011 11:00-12:00.	41
6.3	Zeitreihe der ungefilterten, gefilterten, horizontalen (blau) und vertikalen (rot) Reflektivitätsfaktoren der 7. (oben) und 8. Elevation (unten) des WXR_{RAU} für den 27.05.2011 11:00-12:00. Zum Vergleich sind zusätzlich die Messwerte des MRR_{TRA} (grün) eingetragen.	42

6.4	Scatterplot der Mittelwerte der Reflektivitätsfaktoren der verschiedenen Elevationswinkel (1° in rot, $1,8^\circ$ in blau und $2,6^\circ$ in grün) aller ausgewählten Fälle: WXR _{RAU} versus MRR _{TRA}	43
6.5	Anzahl der Auswertung zugrundeliegenden Datenpunkte aller Ereignisse (Fälle 1-8).	44
6.6	WXR _{RAU} versus MRR _{TRA} : Scatterplots der Reflektivitätsfaktoren der verschiedenen Elevationswinkel (1° in rot, $1,8^\circ$ in blau und $2,6^\circ$ in grün) und deren Mittelwerte (Kreise) für (a) 27.05.2011 11:00-12:00, (b) 27.05.2011 19:30-22:00 und (c) 28.05.2011 00:00-02:00.	47
6.7	WXR _{RAU} versus MRR _{TRA} : Scatterplots der Reflektivitätsfaktoren der verschiedenen Elevationswinkel (1° in rot, $1,8^\circ$ in blau und $2,6^\circ$ in grün) und deren Mittelwerte (Kreise) für (a) 29.07.2013 16:30:00-17:07:30, (b) 04.08.2013 16:40-20:25, (c) 13.09.2013 11:00-11:55.	48
6.8	WXR _{RAU} versus MRR _{TRA} : Scatterplots der Reflektivitätsfaktoren der verschiedenen Elevationswinkel (1° in rot, $1,8^\circ$ in blau und $2,6^\circ$ in grün) und deren Mittelwerte (Kreise) für (a) 18.09.2013 05:00-09:00 und (b) 26.09.2013 12:40-14:40.	49
6.9	Distrometerzeitreihe für (a) 27.05.2011 11:00-12:00, (b) 27.05.2011 19:30-22:00 und (c) 28.05.2011 00:00-02:00 am Standort MRR _{TRA}	50
6.10	Distrometerzeitreihe für (a) 29.07.2013 16:30-17:05, (b) 04.08.2013 16:40-20:25, (c) 13.09.2013 11:00-12:00 am Standort MRR _{TRA}	51
6.11	Distrometerzeitreihe für (a) 18.09.2013 05:00-09:00 und (b) 26.09.2013 12:40-14:45 am Standort MRR _{TRA}	52
6.12	Vergleich der Niederschlagsmengen des Distrometers, des Mikroregenradars und des Wetterradars am Standort Trafelberg für den 27.05.2011 11:00-12:00.	53
6.13	A-Scope. Dämpfungskorrektur des WXR _{RAU} -Strahls in Richtung MRR _{TRA} am 27.05.2011, 11:32. Der Messwert des MRR _{TRA} ist in der adäquaten Entfernung vom WXR _{RAU} mit einem schwarzen Stern gekennzeichnet.	54

Tabellenverzeichnis

2.1	Technische Fakten zum Wetterradar.	10
2.2	Technische Fakten zum Mikroregenradar.	14
4.1	Höhe des WXR_{RAU} Strahls über Meeresniveau in $53,336\text{ km}$ Entfernung beim Standort des MRR_{TRA} . Die verschiedenen Höhen geben die vertikale Ausdehnung des Strahlvolumens für den jeweiligen Elevationswinkel in dieser Entfernung an.	20
5.1	Getroffene Fallauswahl für den Vergleich der Vertikalprofile von WXR_{RAU} und MRR_{TRA} im Jahr 2011.	28
5.2	Getroffene Fallauswahl für den Vergleich der Vertikalprofile von WXR_{RAU} und MRR_{TRA} im Jahr 2013.	29

Danksagung

Besonderer Dank gilt Mag. Rudolf Kaltenböck und Ass.-Prof. Mag. Dr. Manfred Dorninger für die Datenbereitstellung, die während der Unterstützung und Bereitwilligkeit auf all die aufkommenden Fragen Antworten zu finden. Weiters möchte ich o. Univ.-Prof. Dr. Reinhold Steinacker für die Bereitschaft diese Arbeit zu betreuen danken.

Ein besonderes Dankeschön möchte ich an dieser Stelle an meine Familie, die mich während des gesamten Studiums unentwegt unterstützt und mir in jeder Situation Kraft gegeben hat, sowie an Matthias, der mich immer ermutigt und mir den notwendigen Rückhalt geboten hat, aussprechen.

Ein Dank gilt auch meinen Kollegen, die mich durchs Studium begleitet und mir im Zuge dessen wahre Freunde und geworden sind.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Theresa Roswitha Plank, BSc
Geburtsdatum: 23.April 1990
Wohnort: Wien

Ausbildung

1996 - 2000 Volksschule St. Elisabeth, 1020 Wien
2000 - 2008 Bundesgymnasium Wien IX, Wasagasse 10 mit schulautonomer
Schwerpunktsetzung Kommunikation und Sprachkompetenz
2008 - 2011 Bachelorstudium der Meteorologie an der Universität Wien
2011 - 2014 Mastersutdium der Meteorologie an der Universität Wien

Berufserfahrung

08/2006 Ferialpraktikum bei EPAMEDIA GmbH
08/2008 Ferialpraktikum bei der OMV Aktiengesellschaft
08/2011 Ferialpraktikum bei der Austro Control GmbH
2009 - 2012 Studiumsbegl. Tätigkeit bei Mono chem-pharm Produkte GmbH
07/2012 Ferialpraktikum bei Österreichische Hagelversicherung VVaG
08/2012 Ferialpraktikum im BMLFUW Abt.VII/3 - Wasserhaushalt
09/2012 Ferialpraktikum in der ORF Fernschwetterredaktion
2012-2013 Tutorin der LV Wetterbesprechung und der LV Meteorologisch-
klimatologische Exkursion an der Universität Wien
Seit 03/2013 Meteorologin bei MeteoServe Wetterdienst GmbH