

Dr. Peter Meischner  
Institut für Physik der Atmosphäre  
Oberpfaffenhofen, 15. März 1999

## **Schlußbericht zum Vorhaben**

# **„ Bestimmung von Regen- und Wasserdampfverteilungen und Transporten mit PRIRODA und Verifikation durch aktive polarimetrische Radarmessungen vom Boden und DIAL Messungen vom Flugzeug aus“**

Einschließlich des Aufstockungsantrages Nr. 8 551 5599

Förderkennzeichen 50 EE 9510

**Berichtszeitraum: 01.01.1996 – 31.12.1998**

## **1. Die wissenschaftlichen Ziele**

Im Antrag waren die Zielsetzungen

- Bestimmung von Regenraten für verschiedene Wolkentypen aus Mikrowellenradiometermessungen von PRIRODA aus und Verifikation mit POLDIRAD
- Bestimmung des Gesamtsäulenwassergehaltes der Atmosphäre aus Mikrowellenradiometermessungen von PRIRODA aus und Verifikation mit hochaufgelösten DIAL-Messungen durch Unterfliegen

formuliert. Nachdem bald abzusehen war, daß verlässliche Daten von PRIRODA nicht zur Verfügung stehen würden, wurden die Zielsetzungen in Abstimmung mit dem Auftraggeber modifiziert:

Die Bestimmung von Regenraten aus Satellitenmessungen und die Verifikation am Boden mit POLDIRAD-Messungen sollte nun sowohl für DMSP-SSM/I Daten als auch für PRIRODA-Daten – sobald verfügbar – durchgeführt werden. Hierzu sollten Algorithmen zur Bestimmung von Regenraten aus multispektralen Mikrowellenradiometer-Messungen implementiert werden, sowohl für die Mikrowellen-Kanäle, die auf PRIRODA installiert sind (IKAR-D-Sensor, 7,5; 13,3; 22,2; 37,5 GHz), als auch für die Kanäle des SSM/I Sensors auf den operationellen DMSP Satelliten (19,35; 22,235; 37,5; 85,5 GHz).

Da Wolken- und Niederschlagspartikel in den verschiedenen Spektralbereichen unterschiedlich emittieren, und da diese Teilchen insbesondere die von der Erdoberfläche emittierte Strahlung unterschiedlich absorbieren und streuen, erwartet man aus einer plausiblen Kombination von Spektralkanälen Informationen über den Niederschlag.

- Multifrequenz-Radiometermessungen vom Boden aus, ebenfalls entsprechend den PRIRODA Kanälen, sollten zur Bestimmung von Wasserdampfstrukturen und zur Regenratenbestimmung genutzt werden.

- Später sollten diese Wasserdampfmessungen vom Boden aus mit DIAL-Messungen vom Flugzeug aus verglichen werden.

## **2. Erfolgte Arbeiten und bisher erzielter Erfolg**

### **2.1 Validierung von Niederschlagsalgorithmen für Mikrowellen-Satellitenradiometer durch koordinierte POLDIRAD-Messungen**

Da letztendlich keine koordinierten Messungen mit den PRIRODA-Sensoren möglich waren, konzentrierten sich die Arbeiten zur Regenbestimmung auf Messungen der amerikanischen operationellen DMSP-Satelliten.

Das Ziel war nun die Bewertung und Verbesserung verschiedener Verfahren, die aus satellitengestützten Mikrowellen-Radiometermessungen die Regenrate am Erdboden bestimmen.

Die Vorgehensweise bestand darin, durch zeitgleich zu Satellitenüberflügen durchgeführte Messungen des DLR-Niederschlagsradars POLDIRAD Datensätze zuschaffen, die die Auswahl von Satelliten-Observablen zur Regenmessung und die Kalibration und/oder Verbesserung von Regenalgorithmen erlauben.

#### **Durchgeführte Arbeiten:**

Bei den SSM/I-Daten handelt es sich – wie mit PRIRODA geplant - um multispektrale Satellitenradiometer-Messungen in den Kanälen 19 GHz, 37 GHz und 85 GHz jeweils horizontal und vertikal polarisiert, sowie bei 22 GHz nur vertikal polarisiert. Die scannenden IKAR-Radiometer auf PRIRODA arbeiten bei den Frequenzen 7,5 GHz, 13,3 GHz, 22 GHz und 37 GHz. Eine genaue Beschreibung des SSM/I-Instruments findet sich z.B. bei Hollinger et al., 1990. Die Untersuchungen und Ergebnisse zu den SSM/I-Daten können - zumindest teilweise – auch für die an Bord von PRIRODA fliegenden Radiometer genutzt werden.

Die zunächst nötige Vorhersage der Zeitpunkte und Positionen der Satellitenüberflüge erfolgte mittels aktueller Bahndaten der NASA und dem shareware-Programm STSPLUS (siehe auch <http://www.geocities.com/SiliconValley/7100/stsplus.htm> ).

Entsprechend dieser Vorhersagen wurden bei geeigneter Wetterlage Radarmessungen durchgeführt. Die SSM/I-Daten wurden vom GHRC (Global Hydrology Resource Center, siehe auch <http://ghrc.msfc.nasa.gov/ghrc/list.html>) übertragen, sobald sie verfügbar waren. Von März bis Oktober 1997 sowie von Juni bis November 1998 wurden alle verfügbaren SSM/I-Daten, die einen Überflug über Oberpfaffenhofen enthalten, übertragen und gesichert. Zu insgesamt etwa 30 geeigneten Terminen wurden spezielle POLDIRAD-Messungen zeitgleich zu Satellitenüberflügen durchgeführt. Die Nutzung von POLDIRAD für diese Aufgabe ist damit gegenüber der Planung erweitert worden. Zusammen mit zusätzlich vorhandenen zeitgleichen Radar-Messungen aus anderen Vorhaben steht nun eine solide Datenbasis zum Vergleich Satellitenmessungen/Radar zur Verfügung, die unterschiedliche synoptische Situationen abdeckt. In mehr als 25 Fällen handelt es sich hierbei um konvektive (also Gewitter-) Wetterlagen, wovon wiederum die Hälfte hohe Niederschlagsintensität in großen Gewitterzellen zeigt, die andere Hälfte hingegen vereinzelte kleine Gewitterzellen mit nur moderaten Regenraten enthält. Die ungleiche Verteilung zu Ungunsten der stratiformen Niederschläge ist auf die Unter-

brechung der Meßbereitschaft während der Wintermonate zurückzuführen. Bei der Auswertung der Radardaten werden polarimetrische Verfahren genutzt, um Bodenechos zu filtern, die unterschiedlichen Wolkenteilchen zu klassifizieren und damit die Wolkenstruktur zu beschreiben und um die Regenrate möglichst genau (relativer Fehler kleiner 30%) zu bestimmen. Solche Verfahren sind herkömmlichen Radarmessungen überlegen (Gorgucci et al., 1994).

Die Satellitendaten liegen aufgrund des nichtstationären Orbits der Satelliten und des Abtastverfahrens der Radiometer auf einem unregelmäßigen und für jeden Überflug anderen Gitter vor. Zur Erstellung von Niederschlagssummen und von Statistiken sowie zur Abschätzung von zeitlichen Änderungen der für die Niederschlagsalgorithmen wichtigen Bodenemissionseigenschaften wurden die Daten auf regelmäßige und ortsfeste Koordinaten interpoliert. Unterschiedliche Verfahren sind hierfür geeignet, neben linearer Interpolation zwischen benachbarten Punkten ist es möglich, mittels kubischer Funktionen oder Taylorentwicklungen zu interpolieren oder die Daten auf dem festen Gitter aus den nächstliegenden ursprünglichen Daten, gewichtet mit einer Funktion des Abstandes zwischen neuem und ursprünglichen Gitterpunkt, zu berechnen. Die exponentiell abstandsgewichtete Interpolation erwies sich als am besten geeignet, da sie im Gegensatz zu linearen Interpolationen die ursprüngliche hohe Variabilität in den Feldern erhält (vgl. Petrenko, 1996). Die Interpolation auf ortsfeste Koordinaten erlaubt es auch erst, Zeitreihen der SSM/I-Daten für einen bestimmten Ort zu erstellen und auszuwerten. Die räumlich hochaufgelösten Radar-Regenraten wurden für Vergleichszwecke innerhalb der so bestimmten Gitterboxen des gewählten Koordinatensystems gemittelt. Aus den Satellitendaten wurden mittels unterschiedlicher aus der Fachliteratur entnommener Algorithmen Regenraten bestimmt. Vor dieser Berechnung des Niederschlages steht bei vielen Verfahren das sogenannte screening, welches in den SSM/I-Daten lediglich regnende von nichtregnenden Pixeln trennt. Insbesondere dient das screening der Identifikation von Schnee-, Wüsten- und sehr trockenen Landoberflächen, die eine der Regenwolke sehr ähnliche Mikrowellensignatur haben. Screening-Verfahren enthalten in der Regel verschiedene empirisch oder durch Vergleichsmessungen gewonnene Bedingungen zur Unterscheidung zwischen Regensignalen und solchen von Schnee- und anderen Landoberflächen.

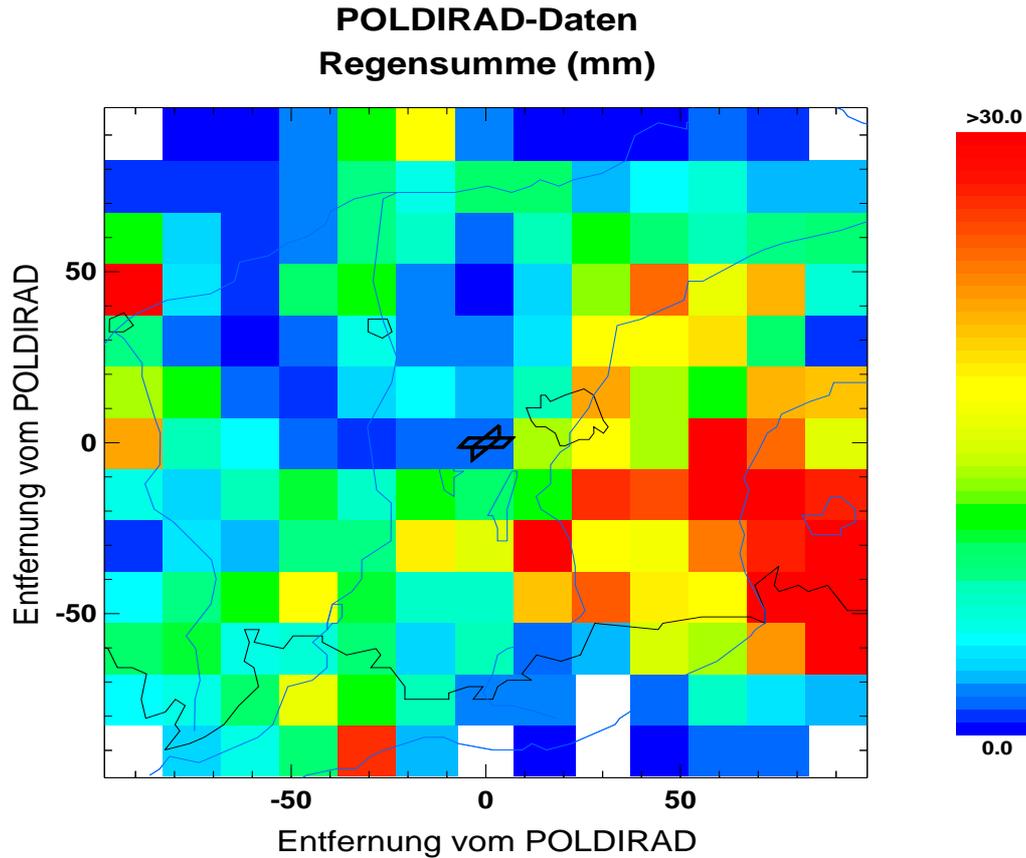


Abbildung 1: Regensumme aus ausgewählten Ereignissen des Jahres 1997, POLDIRAD-Daten

Abbildung 1 zeigt die aus Radarmessungen gewonnene Summe der Regenraten aus neun verschiedenen Einzelereignissen des Jahres 1997. In der Bildmitte befindet sich das DLR-Radar POLDIRAD in Oberpfaffenhofen, etwas östlich davon München. Die Messungen zeigen ein ausgeprägtes Maximum der betrachteten Regensumme von über 30 mm im südöstlichen Bildteil (über dem Chiemsee). Die Regenraten wurden nach der Z-ZDR-R-Methode (Gorgucci et al., 1994) berechnet. Im Nordwesten finden sich die geringsten Summen von nur wenigen mm Niederschlag. Im Vergleich dazu ist die aus Daten zeitgleicher Satellitenüberflüge bestimmte Regensumme des Algorithmus nach Grody (1991) in Abbildung 2 dargestellt.

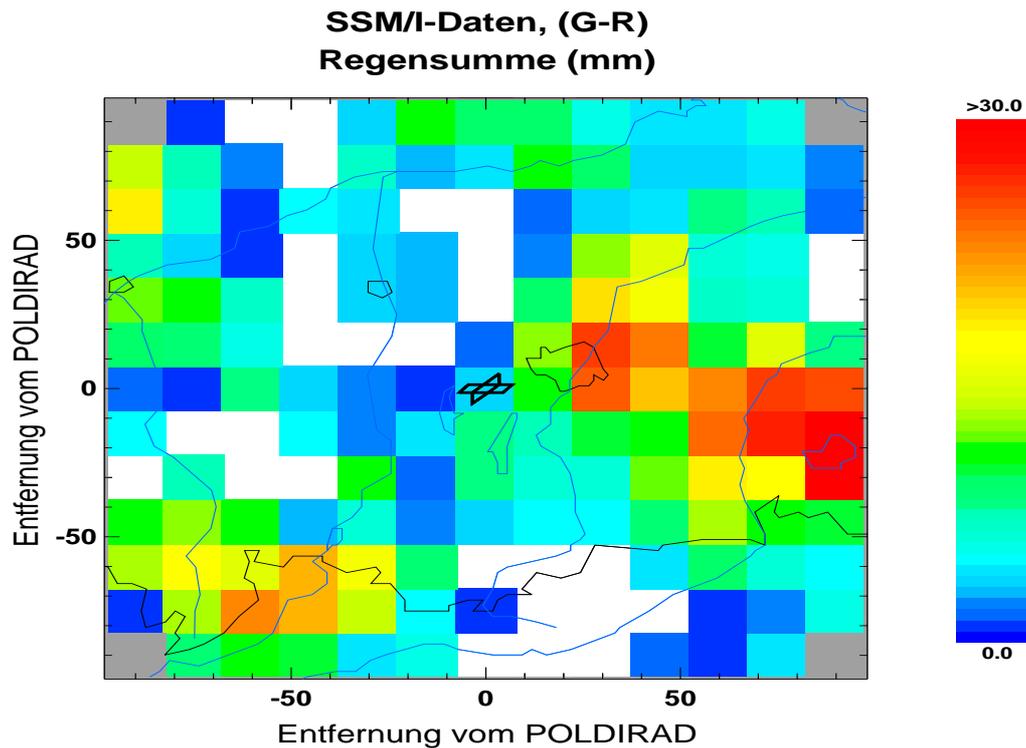


Abbildung 2: Regensumme aus ausgewählten Ereignissen des Jahres 1997, SSM/I-Daten, Verfahren von Grody (1991)

Dieses Bild zeigt eine sehr ähnliche Struktur und eine ähnlich hohe Niederschlagssumme wie die Radarmessung. Das Maximum liegt auch hier über dem Chiemsee und die Gebiete mit geringen Summen hauptsächlich im Nordwesten von Oberpfaffenhofen. Der Vergleich der beiden Abbildungen zeigt, daß mit satellitengetragenen Mikrowellenradiometern prinzipiell Niederschlagsraten über Landoberflächen bestimmt werden können und in der Summe eine quantitative Übereinstimmung mit bodengebundenen Messungen gefunden werden kann.

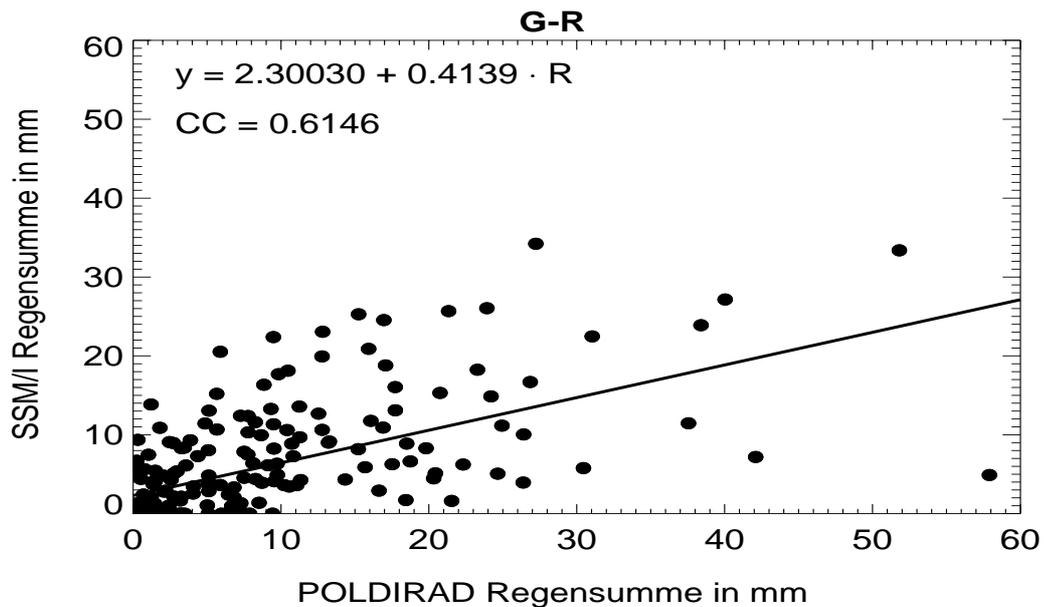


Abbildung 3: Korrelation der Daten aus den Abbildungen 1 und 2

In Abbildung 3 ist die Korrelation zwischen den Regensummen aus Radar- und dem angewandten Satellitenverfahren für den gleichen Datensatz wie in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt. Der Korrelationskoeffizient (CC) zwischen dem Radar- und dem Satellitenverfahren beträgt etwa 0,6. Das SSM/I-Verfahren unterschätzt die Regenraten dort, wo das Radar jeweils eine Summe oberhalb von 30 mm ermittelt. Da die große Summe sich hier aus wenigen Regenereignissen mit hoher Regenrate zusammensetzt, zeigt dies, daß sehr hohe Regenraten offenbar mit dem Verfahren nur schwer bestimmt werden können.

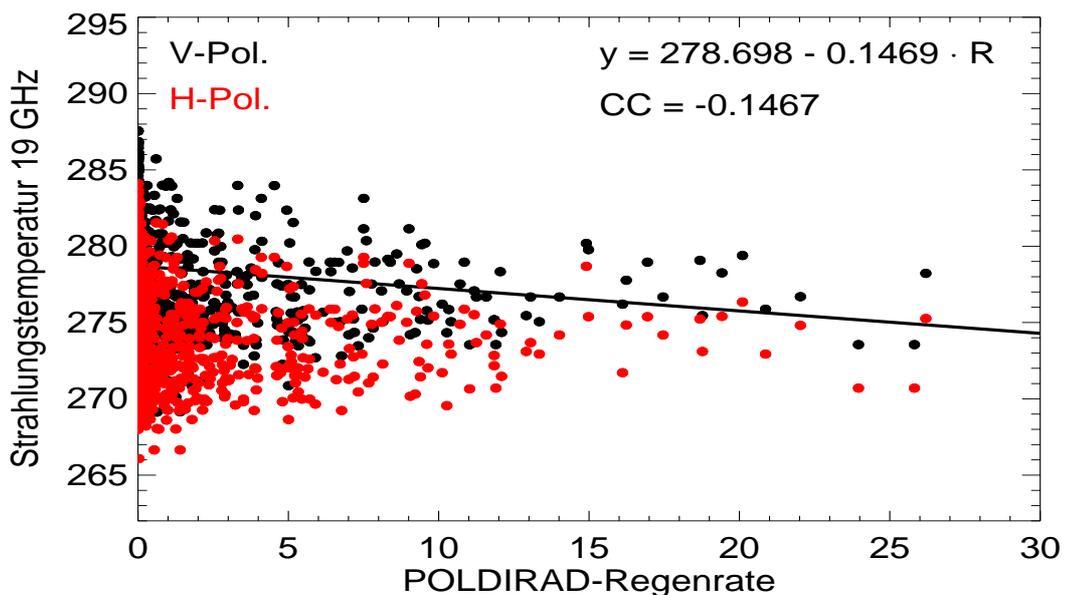


Abbildung 4: Korrelation des Strahlungstemperaturen bei 19 GHz mit der Radar-Regenrate

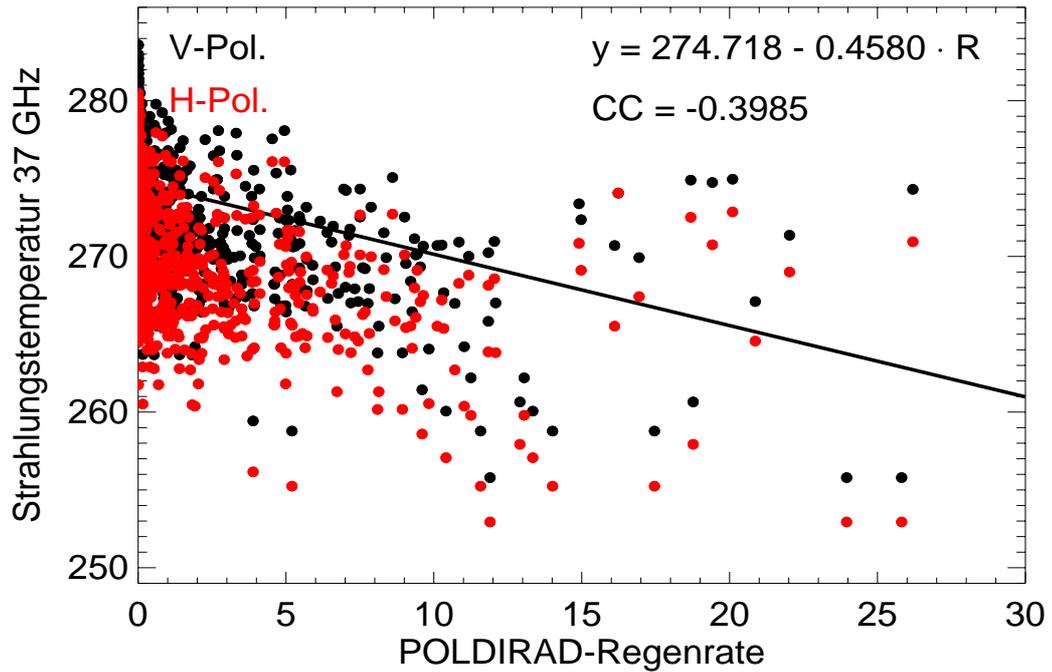


Abbildung 5: Korrelation der Strahlungstemperaturen bei 37 GHz mit der Radar-Regenrate

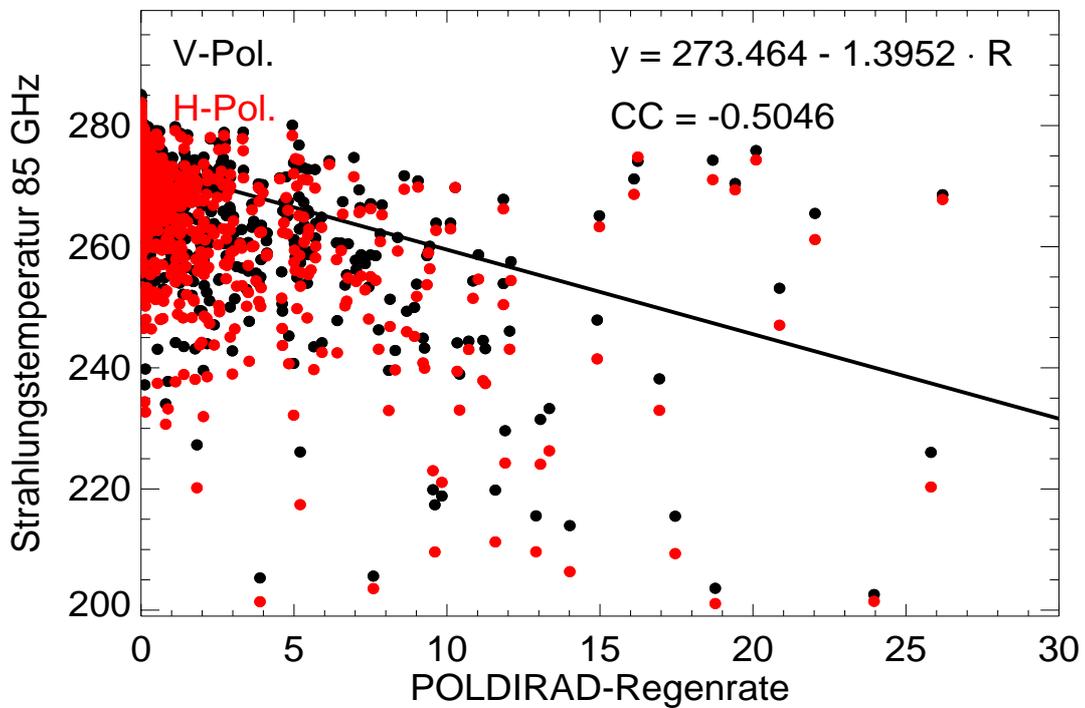


Abbildung 6: Korrelation der Strahlungstemperaturen bei 85 GHz mit der Radar-Regenrate

In den Streudiagrammen der Abbildungen 4, 5 und 6 entspricht jeder Punkt einem Wertepaar aus einer in die Abbildungen 1 bis 3 eingegangenen vom Radar gemessenen Regenrate und der zeitgleich vom Satelliten gemessenen Strahlungstemperatur bei 19 GHz, 37 GHz bzw. 85 GHz, jeweils bei horizontaler bzw. vertikaler Polarisationsrichtung. (Der 22 GHz-Kanal ist nicht gezeigt, da er über Landoberflächen ein kaum vom 19 GHz zu unterscheidendes Signal, also keine verwertbare zusätzliche Information liefert. Da bei 22 GHz eine Absorptionsbande des Wasserdampfes liegt, wurde dieser SSM/I-Kanal zur Abschätzung der Wasserdampfsäule eingerichtet, was jedoch nur über Ozean und in wolkenfreier Atmosphäre möglich ist (siehe auch Weng und Grody, 1994). Nimmt man der Einfachheit halber an, daß ein linearer funktionaler Zusammenhang zwischen Strahlungstemperatur und Regenrate besteht (die Art des funktionalen Zusammenhang, z.B. exponentiell oder linear, ist wegen der starken Streuung der Punkte schwer bestimmbar), kann man die in den Diagrammen eingetragenen Regressionsgeraden und Korrelationskoeffizienten (CC) finden, hier jeweils nur für die vertikale Polarisationsrichtung berechnet. Man erkennt deutlich, daß der 85 GHz-Kanal am empfindlichsten auf die Regenintensität reagiert, die Strahlungstemperatur des 19 GHz-Kanales ist von der Regenrate nahezu unabhängig. Auch bei 37 GHz findet sich noch eine merkliche Temperaturabnahme mit der Regenrate. Im Hinblick auf die PRIRODA-Instrumente, die kein dem 85 GHz-Kanal des SSM/I entsprechendes hochfrequentes Radiometer enthalten, zeigt dies, daß Niederschlag auch dort messbare Signale vorweisen sollte, wenn auch nicht so deutlich wie im 85 GHz-Kanal des SSM/I.

Ein Vergleich jeweils der horizontalen mit der vertikalen Polarisationsrichtung in den SSM/I-Kanälen zeigt, daß im Hinblick auf die Bestimmung der Regenrate über Landoberflächen aus den unterschiedlichen Polarisationssebenen keine zusätzliche relevante Information gewonnen werden kann. Polarisationsdifferenzen werden jedoch über Ozeanen, die im allgemeinen stark polarisiert emittieren, intensiv genutzt, um aus SSM/I-Daten neben Niederschlagsintensitäten auch Informationen über die Windgeschwindigkeit in Bodennähe zu gewinnen (Chang und Milman, 1982). Ebenso können aus der Stärke der Polarisation unter Umständen Eigenschaften der emittierenden Oberfläche, wie z.B. die Oberflächen- und Bodenfeuchte abgeleitet werden (Ferraro et al., 1994).

In allen Diagrammen ist eine große Streuung der Punkte um die Ausgleichsgeraden festzustellen. Diese rührt daher, daß die vom Satelliten gemessenen Strahlungstemperaturen ja kein direktes Maß für die Niederschlagsintensität in Bodennähe sind, sondern von der Emission des Untergrundes und von der Absorption, Emission und Streuung in der gesamten Atmosphäre geprägt werden. Tatsächlich rührt die Temperaturabnahme mit zunehmender Regenrate im 37 GHz- und im 85 GHz-Kanal hauptsächlich ab von der Streuung der Strahlung an Eisteilchen oberhalb des Regens, welche bei hochreichenden Wolken immer vorhanden sind. Bei flachen, warmen Wolken ohne Eisphase ist die Temperaturabnahme in diesen Kanälen deutlich geringer (vgl. Kidd und Barrett, 1990). Wegen der gezeigten höchsten Empfindlichkeit nutzen alle bekannten Niederschlagsalgorithmen über Landoberflächen vorrangig das Signal im 85 GHz-Kanal. Algorithmen, die nur hochfrequente Kanäle nutzen, sind jedoch nicht in der Lage, die räumlich und zeitlich variable Emission der Erdoberfläche aus dem Gesamtsignal herauszurechnen. Informationen aus anderen Frequenzen, insbesondere bei 19 GHz, werden dann oft genutzt, um die Emission des Bodens abzuschätzen und aus dem Signal der anderen Kanäle zu filtern. Abbildung 4 zeigte ja bereits, daß kein wesentlicher mit dem Niederschlag zusammenhängender Einfluß auf die Strahlungstemperatur bei 19 GHz feststellbar ist, die Strahlungstemperaturen ändern sich nicht mit zunehmender Regenrate. Auch alle anderen atmosphärischen Einflüsse auf die Mikrowellenstrahlung sind mindestens eine Größenordnung kleiner als die durch Regentropfen und Eispartikel hervorgerufenen Effekte. Dies

zeigen die Abbildungen 7 und 8 (siehe auch Bauer, 1992 oder Spencer et al., 1989). Die Abbildung 7 (aus Bauer, 1992) zeigt den Extinktionskoeffizienten von Sauerstoff und Wasserdampf im hier betrachteten Mikrowellenfrequenzbereich. Dieser Koeffizient bleibt außerhalb der Absorptionsbanden beider Gase kleiner als etwa  $0,1 \text{ km}^{-1}$ . Im Vergleich dazu ist in Abbildung 8 oben der Streu- und in der Mitte der Absorptionskoeffizient von flüssigen und eisförmigen Frequenzen gezeigt. Diese Koeffizienten sind schon bei Regenraten von weniger als  $10 \text{ mm/h}$  um eine Größenordnung höher als die Absorption durch Gase. Da in den Daten der Abbildung 4 regnende wie auch nichtregnende Satellitenbildpixel enthalten sind, können die Variationen im  $19 \text{ GHz}$ -Kanal im wesentlichen nur durch stark variable Bodenemissionen bewirkt werden.

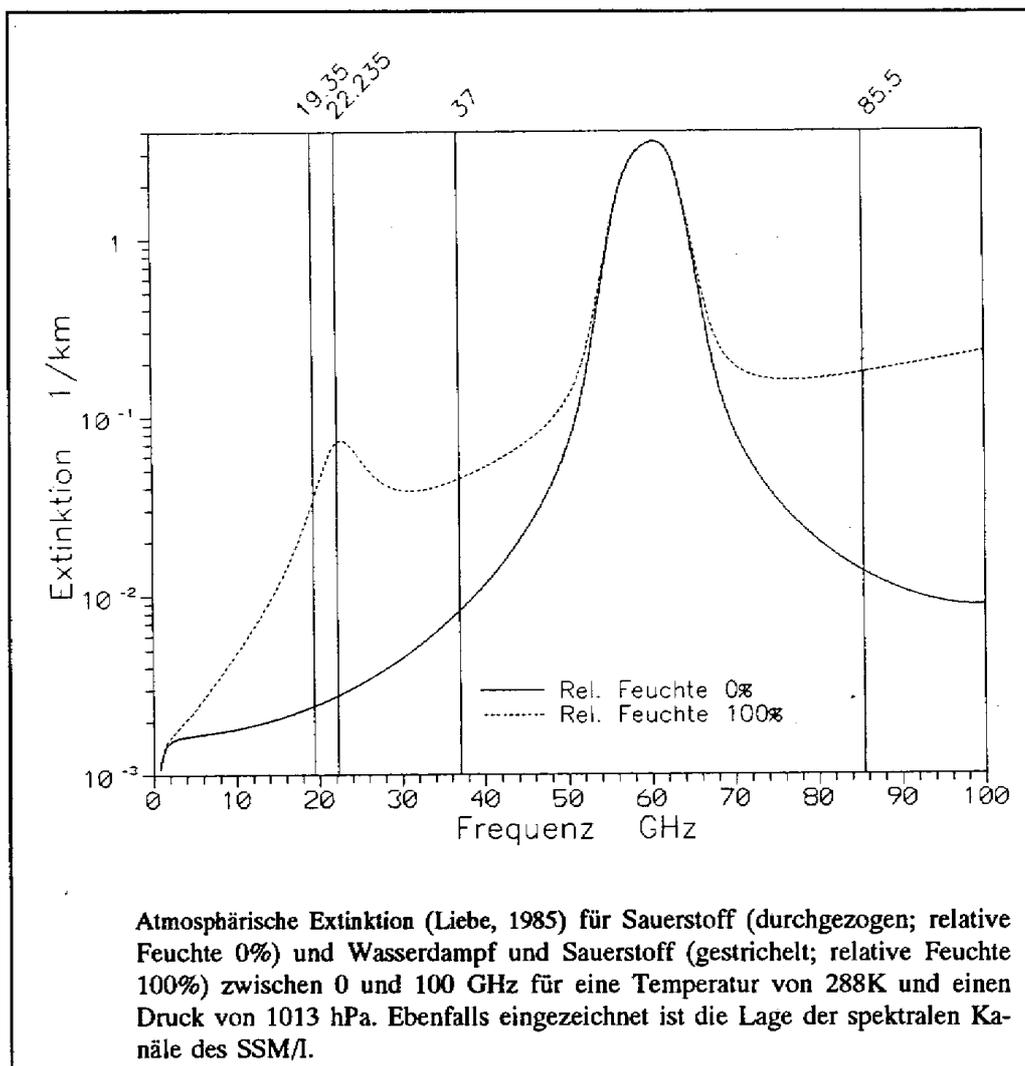


Abbildung 7: Atmosphärische Extinktion (aus Bauer, 1992)

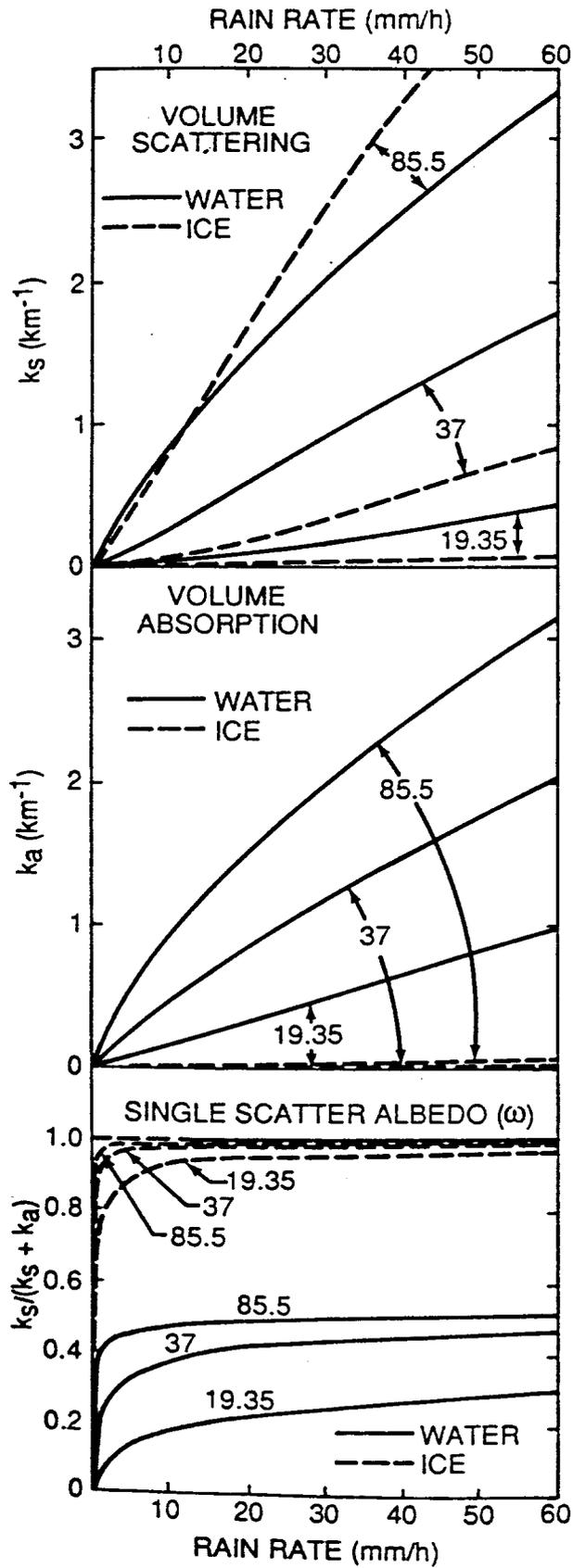


Abbildung 8: Absorptions- und Streukoeffizienten von Regen und Eisteilchen (aus Spencer, 1989)

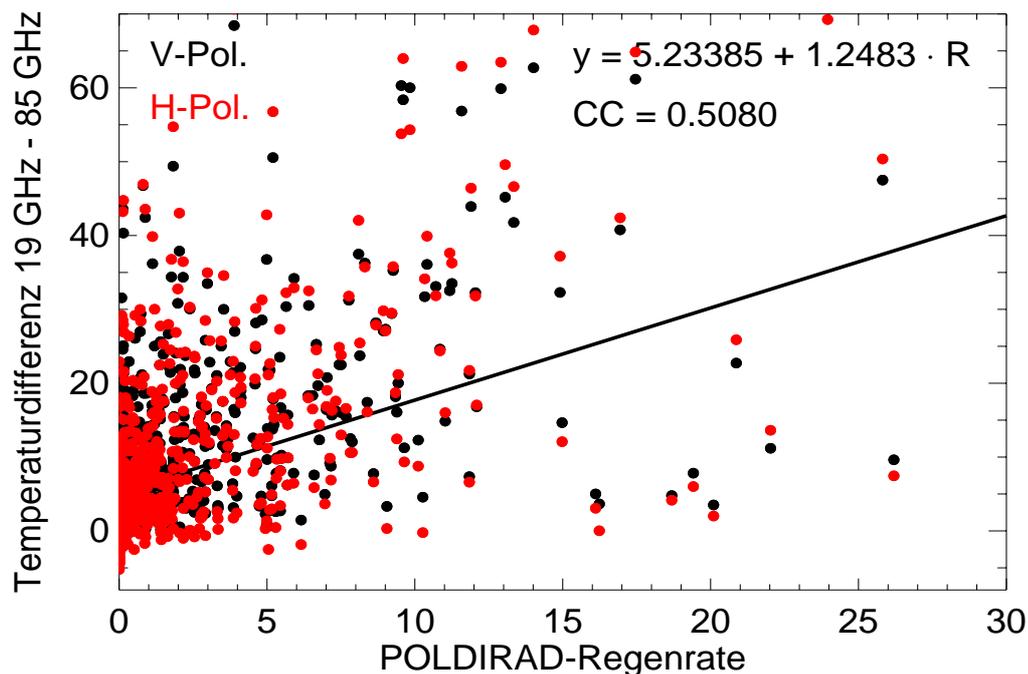


Abbildung 9: Korrelation der Temperaturdifferenz zwischen 19 GHz und 85 GHz mit der Radar-Regenrate

Abbildung 9 zeigt die Korrelation zwischen der Temperaturdifferenz zwischen 19 GHz und 85 GHz und der Radar-Regenrate für den oben beschriebenen Datensatz. Würde man – wieder vereinfachend - annehmen, daß Unterschiede in der Bodenemission in gleichem Maße die Mikrowellenstrahlung bei 19 GHz und bei 85 GHz bestimmt, sollte die Temperaturdifferenz zwischen diesen Kanälen besser mit dem Regen korrelieren. Eine höhere Korrelation oder geringere Streuung der Werte als bei der Betrachtung alleine des 85 GHz-Kanales kann bei den vorliegenden Daten jedoch nicht festgestellt werden.

Das oben beschriebene starke Gewicht der hohen Frequenzen in den SSM/I-Algorithmen hat allerdings auch den Nachteil, daß unter vielen dicken Eiswolken mit hinreichender großer Streuung im 85 GHz-Kanal Regen angezeigt wird, unabhängig davon, ob und wieviel die Wolke tatsächlich regnet.

Aus diesen Gründen - schwierig zu filternder Bodenemissionseinfluß sowie Regenerkennung und -quantifizierung auf Basis des hauptsächlich durch Eisteilchen beeinflussten Signales - ist für alle Algorithmen zu erwarten, daß sich im Einzelfall große Abweichungen von einer Vergleichsmessung am Boden einstellen und erst in der Summe über eine größere Anzahl Regenergebnisse sich durch „Herausmitteln“ dieser Fehler eine möglicherweise bessere Übereinstimmung zeigt.

## SSM/I- und POLDIRAD-Daten vom 14. Juli 1997 Regenrate (mm/h)

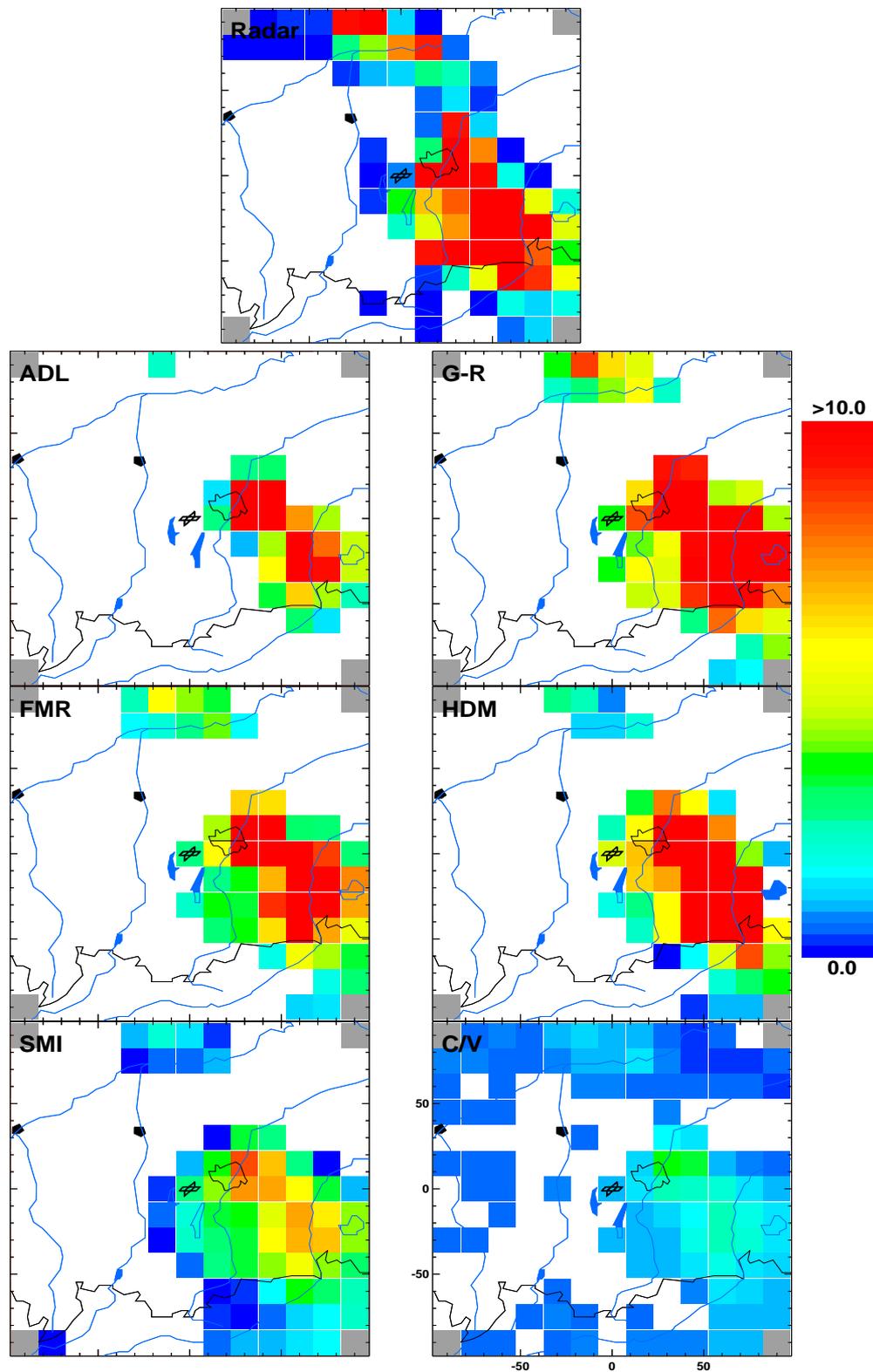


Abbildung 10: Einzelfalluntersuchung vom 14. Juli 1997. Ganz oben die gemittelte Radar-Regenrate, darunter SSM/I-Regenraten unterschiedlicher Verfahren

## SSM/I- und POLDIRAD-Daten vom 6. Juli 1997

### Regenrate (mm/h)

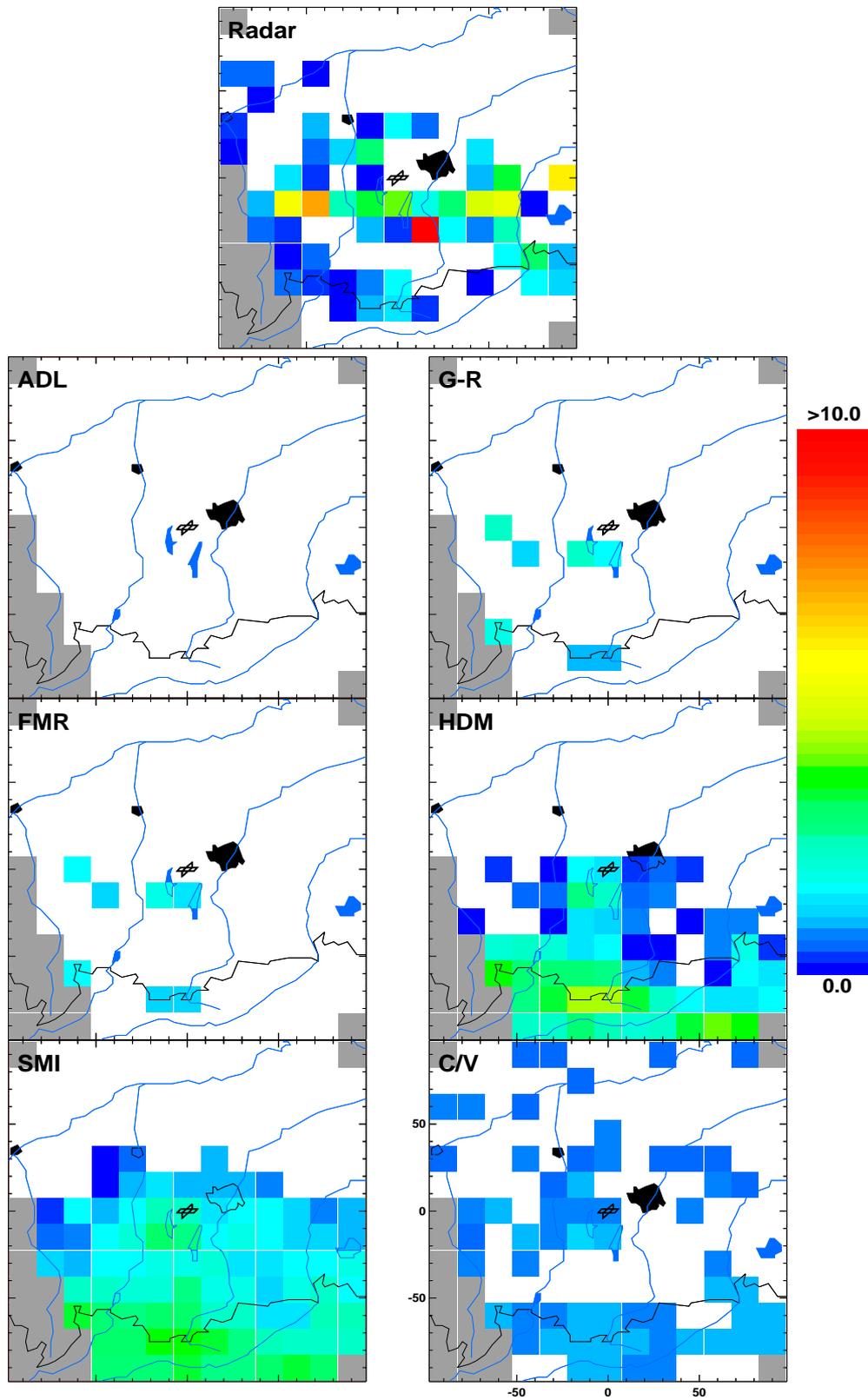


Abbildung 11: Einzelfalluntersuchung vom 6. Juli 1997, sonst wie Abbildung 10

Eine Untersuchung zweier Einzelfälle soll die Wirksamkeit der SSM/I-Niederschlagsverfahren näher beleuchten. Abbildung 10 zeigt oben die gemittelte vom POLDIRAD gemessene Regenrate am 14. Juli 1997. Darunter sind die Regenraten aus SSM/I-Daten dargestellt, welche nach den Verfahren von Adler (ADL, Adler et al., 1993), Grody (G-R, Grody, 1991), Ferraro und Marks (FMR, Ferraro und Marks, 1995), dem Hughes D-Matrix-Algorithmus (HDM, Berg et al., 1998) sowie den Verfahren von Smith (SMI, Smith et al., 1992) und dem Calibration/Validation Team (C/V, Berg et al., 1998) berechnet wurden. Die Bilder zeigen eine Gewitterfront, die von West-Südwest kommend über Oberbayern hinwegzog. Die intensivsten Gewitterzellen befinden sich im südöstlichen Teil der Bilder. Bedingt durch die grobe Auflösung der Bilder von 15 km, welche sich an der feinstmöglichen Auflösung des SSM/I orientiert, sind die einzelnen Gewitterzellen hier nicht zu erkennen. Alle Satellitenverfahren erkennen das Maximum der Regenrate und finden es an etwa der gleichen Position wie das POLDIRAD. Die Verfahren G-R, FMR und HDM zeigen Niederschlag ähnlicher Intensität, wogegen die anderen Verfahren für das gesamte Vergleichsgebiet geringere Regenraten ermitteln. Mit Ausnahme des C/V-Algorithmus ist die Fläche, wo Regen auftritt bei allen Verfahren kleiner als die vom Radar ermittelte. Die Gebiete, wo das Radar noch niedrige Niederschlagsintensitäten von weniger als 1,5 mm/h mißt, werden von den Satellitenverfahren (außer C/V) nicht als regnend erkannt. Im Gegensatz dazu steht das C/V-Verfahren, das eine viel größere Fläche als regnend klassifiziert als die Radarmessung. Dies sind Effekte, die durch die Wahl von Schwellwerten, die die Grenze zwischen nichtregnenden und regnenden Satellitenbildpixeln bestimmen, hervorgerufen werden. Solche Schwellwerte sind in den meisten Verfahren als globale oder Breitengradspezifische und oft jahreszeitlich unabhängige Konstanten enthalten, die in der Regel lokalen Gegebenheiten und (jahres-)zeitlichen Veränderungen keine Rechnung tragen. Beispielsweise lautet im Algorithmus von Adler (1993) die Bedingung für regnende Bildpixel, daß die horizontal polarisierte Strahlungstemperatur im 85 GHz-Kanal unterhalb von 247 K liegen muß. Diese feste Bedingung gewann Adler statistisch-empirisch aus Vergleichsmessungen (operationelle Radardaten, allerdings mit bis zu 50% relativem Fehler behaftet, über Japan), sie schließt hier offenbar viele tatsächlich regnende Pixel aus. Die aus Strahlungstransportrechnungen gewonnenen Schwellwerte des C/V-Algorithmus reichen hingegen nicht aus, um nichtregnende Gebiete sicher zu erkennen und zu verwerfen. Variable Schwellwerte, die sich beispielsweise aus dem zeitlichen Verlauf aller Strahlungstemperaturen in den jeweils vergangenen 30 Tagen bestimmen lassen, sind jedoch aufwendig zu bestimmen (s. Liu und Curry, 1992) und ebenfalls unsicher.

In Abbildung 11 sind die gleichen Verfahren wie in Abbildung 10, hier aber für den 6. Juli 1997 gezeigt. In dieser Situation gab es im gesamten Meßgebiet vereinzelte kleine Schauer. Bedingt durch die geringe räumliche Ausdehnung der Schauerwolken war in den SSM/I-Kanälen kaum ein Regensignal zu erkennen, so daß die Algorithmen ADL, G-R und FMR in dieser Situation eine zu geringe regnende Fläche und zu niedrige Intensitäten bestimmen. HDM und SMI erkennen leichten Niederschlag über den Alpen, der allerdings vom Radar nicht erfasst wurde, während C/V wiederum große Flächen als regnend klassifiziert und generell niedrige Intensitäten berechnet.

In den hier gezeigten Daten konnte kein screening-Verfahren - trotz eines im Meßbereich gelegenen Teiles der Alpen - eine Schneefläche detektieren. Das screening beschränkte sich darauf, regnende und nichtregnende Bildpixel voneinander zu unterscheiden.

Generell kann gesagt werden, daß alle Verfahren, die aus Daten satellitengetragener Mikrowellenradiometer Regenraten über Landoberflächen bestimmen sollen, noch mit einer Reihe von Fehlern behaftet sind, die quantifiziert werden müssen. Wegen des großen Blickfeldes der

Radiometer von etwa 15 km Durchmesser im 85 GHz-Kanal bis zu 60 km bei 19 GHz, erzeugen einzelne kleine Regenwolken höchstens ein schwaches Signal, oft aber wird ihr Signal von der umgebenden ungestörten Emission der Erdoberfläche einfach überstrahlt. Flache, warme Wolken, wie z.B. im Alpenstau im Frühjahr oder Stratus-Wolken vor einer Warmfront enthalten einen nur geringen Anteil streuender Partikel (wenig große Tropfen, kaum oder keine Eisteilchen). Gleichzeitig ist auch die Weglänge der Strahlung in der Wolke sehr kurz. So wird die Mikrowellenstrahlung in der Wolke nur wenig gestreut und die vom Satelliten gemessene Strahlung aus dem Bereich der Wolke unterscheidet sich nur wenig oder gar nicht von dem ungestörten Signal der Umgebung. Mikrowellensatellitenverfahren sind also über Land besonders zur Bestimmung von größeren Niederschlagsintensitäten geeignet. Die bestehenden Verfahren liefern aber auch hier – sowohl in Einzelfällen als auch in der Summe über mehrere Ereignisse - noch fehlerhafte Werte mit Abweichungen von der Radarmessung um etwa den Faktor 2, die durch Nachkalibration der Verfahren und Anpassung der Schwellwerte - beides möglichst unter Berücksichtigung lokaler Gegebenheiten - korrigiert werden sollten.

Die wissenschaftlichen Auswertungen der Messungen sind noch nicht abgeschlossen. Folgende Aufgaben werden noch bearbeitet:

- die vollständige statistische Auswertung des Vergleichsdatensatzes soll für alle verfügbare Regen- und screening- Algorithmen erfolgen. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf den meteorologischen und wolkenphysikalischen Aspekten, so daß die Anwendbarkeit der einzelnen Algorithmen für die unterschiedlichen Wolkentage bewertet werden können.
- die Auswertung unterstützend sind Simulationen mit einem einfachen Strahlungstransportmodell für die unterschiedlichen Wolkentypen vorgesehen.
- die durch die Schrägsicht des Satelliten ( $53^\circ$  Auftreffwinkel am Erdboden) bedingten dreidimensionalen Effekte, die zu einer Verschiebung der angezeigten Regengebiete um bis zu 10 km führen können, sollen untersucht werden. Sind solche Effekte identifizierbar, soll versucht werden, sie mittels eines einfachen Algorithmus zu korrigieren.

## **2.2 Durchführung von Mehrfrequenzradiometermessungen**

Entsprechend des Aufstockungsantrags Nr. 8551 5599 wurden ab September 1996 kontinuierliche Messungen der Strahlungstemperatur der Atmosphäre bei den Frequenzen 13.3, 19.2, 22.2, 37 und 90 GHz durchgeführt. Außerdem wurden parallel Wetterdaten direkt am Standort der Radiometer aufgezeichnet. Während die Messungen bei 22.3 und 37 GHz im Sommer 1998 beendet wurden, laufen die Messungen bei 13.3, 19.2 und 90 GHz und der Wetterdaten immer noch und werden fortgeführt. Die Spezifikationen der Instrumente finden sich in Tabelle 1 und Tabelle 2.

Frequenz	90	37	22.2	19.2	13.5
Polarisation	v/h	v	v	v/h	v/h
Auflösung	0.27 K	0.2 K	0.2 K	< 0.5 K	0.2 K
Genauigkeit (absolut)	2 K	2 K	2 K	2 K	2 K
Rauschzahl	6 dB	5 dB	5 dB	5 dB	5 dB
Bandbreite	2000 MHz	800 MHz	800 MHz	100 MHz	800 MHz
Integrationszeit	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s
Antennen-gewinn	33 dB	30 dB	30 dB	45 dB	22 dB
Antennenhalb-wertsbreite	3.4°	5°	5°	1.2°	15°
Nebenkeulen	< -20 dB	< -15 dB	< -15 dB	< -32 dB	< -40 dB
Kreuzpolarisa-tion	< -22 dB	-	-	< -32 dB	< -20 dB
Elevation	30°	30°	30°	30°	30°
Azimut	180°	180°	180°	180°	180°

Tabelle 1: Technische Daten der Radiometer.

Sensor	Meßbereich	Auflösung
Tropfenzähler (Regenmesser 1 )	0-120 mm/h	0.3 mm/h
Kippwaage (Regenmesser 2)	0-600 mm/h	6 mm/h
Distrometer (Tropfengröße)	0.2 –12.4 mm	0.2 mm
Temperatur	-40°...+60°	0.1°
Relative Luftfeuchte	0-100%	1%
Luftdruck	800-1100 hPa	1 hPa
Windrichtung	0-360°	1°
Windgeschwindigkeit	0-40 m/s	0.1 m/s

Tabelle 2: Technische Daten der Wetterstation.

Entsprechend des Aufstockungsantrags waren die Datenaufzeichnung und Erstellung einer Datenbank zum Vergleich mit Satellitendaten das primäre Ziel. Die Auswertung war nicht Bestandteil des Antrags. Einige interessante Einzelmessungen wurden jedoch analysiert.

## Abhängigkeit der Strahlungstemperatur von Regenrate und Tropfenverteilung

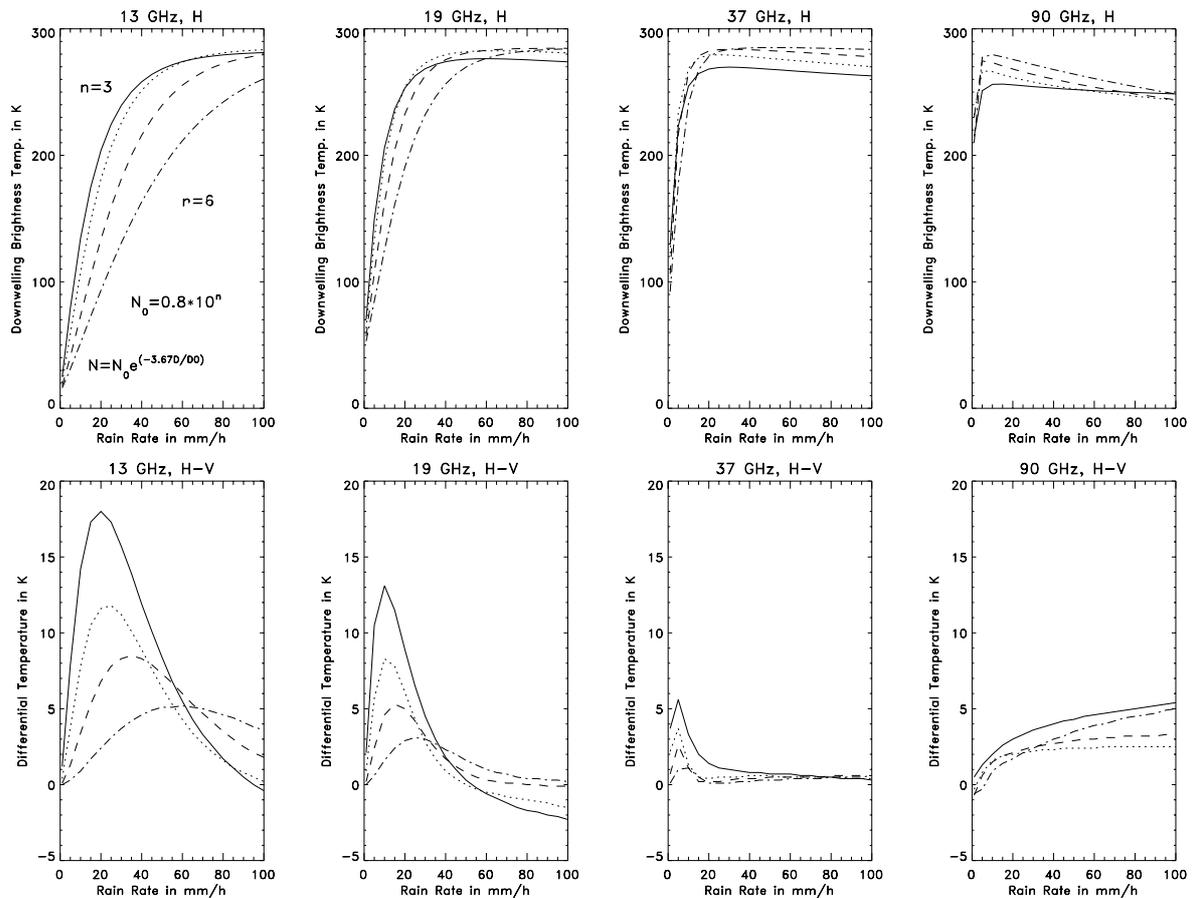


Abbildung 12: Zusammenhang zwischen Strahlungstemperatur, Tropfengrößenverteilung und Regenrate für bodengestützte Messungen, Elevation 30°.

Abbildung 12 zeigt die Abhängigkeit der Strahlungstemperatur von Regenrate und Tropfengrößenverteilung bei verschiedenen Frequenzen für bodengestützte Messungen unter einer Elevation von 27.3 Grad. Die Berechnungen wurden für eine homogene 2,5 km hohe Regenschicht mit einem vertikalen Temperaturgradient von  $-6.5 \text{ K/km}$  über einer 288 K warmen Bodenoberfläche mit einer Emissivität von 0.96 durchgeführt. Die zusätzliche Absorption durch Wasserdampf und Sauerstoff wurde berücksichtigt. Die oberste Reihe des Bildes zeigt die Strahlungstemperatur in horizontaler Polarisation und die unterste Reihe den Polarisationsunterschied zwischen horizontaler und vertikaler Polarisation (h-v). Die Diagramme zeigen, daß für bodengestützte Messungen die tieferen Frequenzen 13 und 19 GHz günstiger sind, da bei den höheren Frequenzen 37 und 90 GHz schon bei relativ geringen Regenraten eine Sättigung der Strahlungstemperatur auftritt.

Bei den niedrigeren Frequenzen wird hauptsächlich die zur Absorption proportionale Emission gemessen, während die Streuung an den Niederschlagsteilchen noch verhältnismäßig klein ist. Bei den höheren Frequenzen sind diese Streueffekte wesentlich stärker ausgeprägt. Sie bewirken den Abfall der Strahlungstemperatur bei hohen Regenraten. Für Messungen vom Satelliten über Land werden gerade diese Streueffekte ausgenutzt, da man bei den niedrigeren

Frequenzen – im Gegensatz zu den bodengestützten Messungen - nur die Strahlung der Erdoberfläche sieht.

Die Abbildung 12 zeigt auch den Einfluß der Tropfengrößenverteilung. Die Kurvenscharen repräsentieren unterschiedliche exponentielle Größenverteilungen der Form:

$$N(D) = N_0 * \exp(-3.67D / D_0) \quad [\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}]$$

mit dem Scharparameter  $n = \log_{10}(N_0/0.8)$ .  $D$  ist der äquivalente Durchmesser eines runden Tropfens mit gleichem Volumen. Reale Regentropfen sind abgeplattet und bewirken einen Polarisationsunterschied in der Strahlungstemperatur. Dieser Effekt kann, wie weiter unten dargestellt, zur Bestimmung der Tropfengrößenverteilung ausgenutzt werden.

### Meßbeispiel

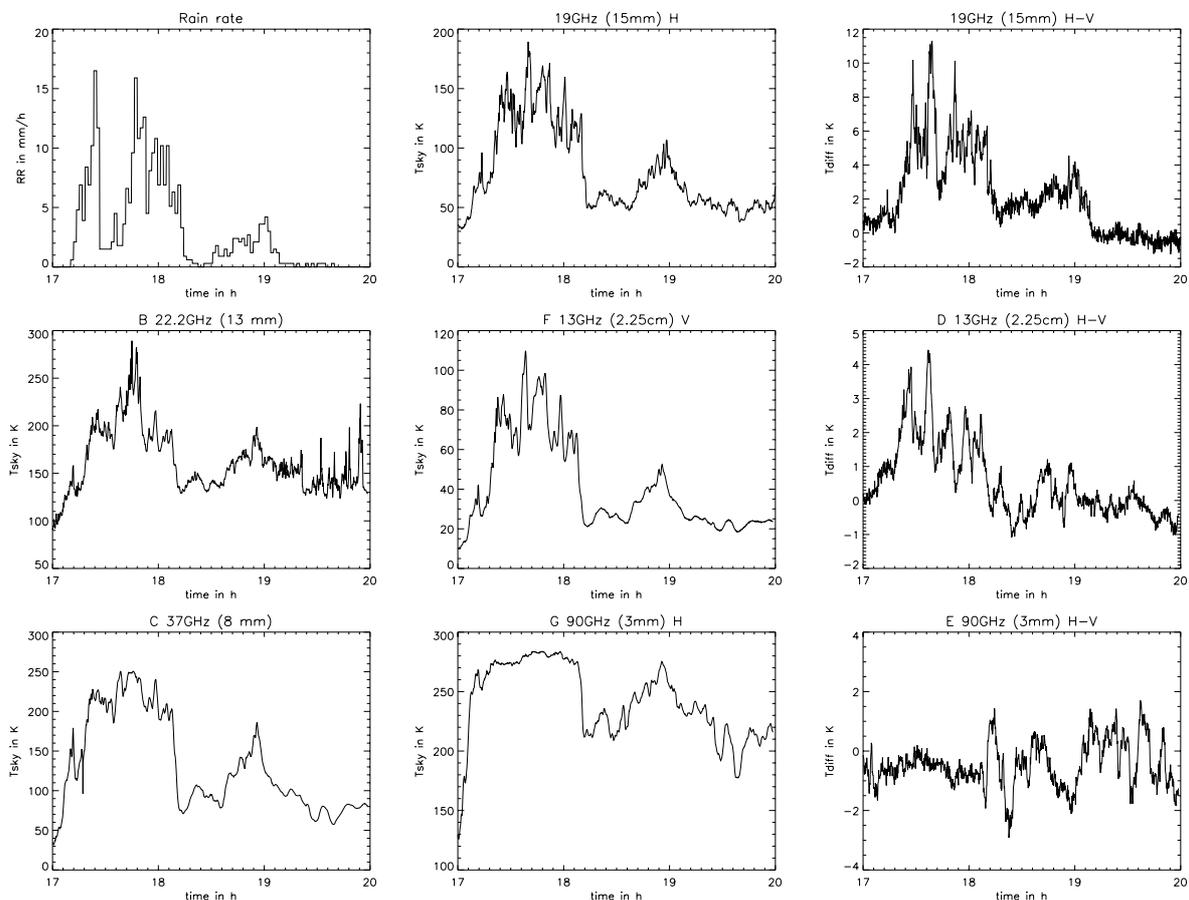


Abbildung 13: Regenrate und Strahlungstemperaturen am 14. Sept. 1996.

Der Zeitverlauf der Regenrate, der Strahlungstemperaturen und Polarisationsunterschiede für ein eher stratiformes Regenereignis sind in Abbildung 13 dargestellt. Die gute Korrelation der einzelnen Strahlungstemperaturen untereinander und mit der Regenrate ist sichtbar. Bei 90 GHz zeigt sich die Sättigung der Strahlungstemperatur bei Regenraten um 10 mm/h. Auch die Strahlungstemperatur bei 22.3 GHz ist relativ hoch, da diese Frequenz nahe der Wasser-

stoffresonanz liegt, und daher sehr empfindlich für die Absorption, bzw. Emission durch den Wasserdampf ist, die der Regenemission überlagert ist.

Aus dem Polarisationsunterschied bei 13 und/oder 19 GHz läßt sich ähnlich wie aus Doppel-polarisations-Radarmessungen eine effektive (pfadintegrierte) Tropfengrößenverteilung ableiten (Hornbostet et al., 1997). Ein Beispiel abgeleitet aus der 19 GHz Strahlungstemperatur-differenz im Vergleich mit Ergebnissen aus Radarmessungen ist in Abbildung 14 dargestellt.

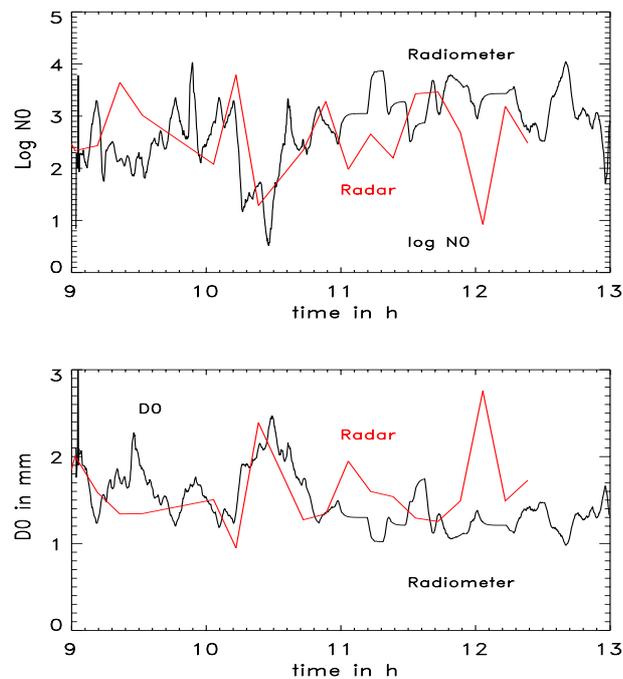


Abbildung 14: Tropfengrößenparameter  $D_0$  und  $N_0$  aus Strahlungstemperatur und Polarisationsdifferenz bei 19 GHz im Vergleich mit Radarergebnissen.

Durch die Ableitung der Tropfengrößenverteilung aus dem Polarisationsunterschied der Strahlungstemperatur läßt sich die Regenratenbestimmung aus Radiometermessungen vom Boden verbessern. Für die Messung vom 14. September 1996 wurde aus den 13 GHz und 19 GHz Strahlungstemperaturen in zwei Polarisationen die Regenrate bestimmt (Abbildung 15). Für 13 GHz ist zum Vergleich die ohne Berücksichtigung der Polarisation unter Annahme einer festen Tropfenverteilung mit  $N_0 = 8000\text{m}^{-3}\text{mm}^{-1}$  abgeleitete Regenrate dargestellt, welche die tatsächliche mit dem Regenmesser gemessene Regenrate deutlich unterschätzt. Es sind jedoch auch Unterschiede zwischen den Ergebnissen aus der 19 GHz und der 13 GHz Strahlungstemperatur sichtbar. Diese sind zum Teil durch die sehr unterschiedlichen Antennenöffnungswinkel (s. Tabelle 1) erklärbar.

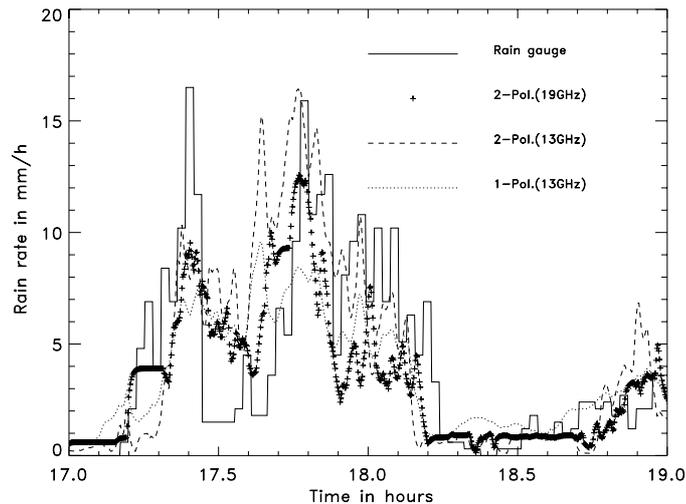


Abbildung 15: Vergleich von Regenraten aus 13 und 19 GHz Strahlungstemperaturen mit Regenmesser

#### Zum Vergleich von Satellitendaten mit Bodenmessungen

Ein direkter Vergleich von am Boden gemessenen Strahlungstemperaturen mit PRIRODA-Daten war nicht möglich. Daten für einen Vergleich mit SSM/I Daten liegen vor. Ein solcher Vergleich war jedoch nicht Bestandteil des Aufstockungsantrags. Trotzdem einige Anmerkungen für eine eventuelle spätere vergleichende Datenauswertung:

Die Satellitendaten haben eine räumliche Auflösung (footprint) von einigen 10 km<sup>2</sup>, während die bodengestützten Radiometer nur einen Bereich von etwa 5 km in fester Blickrichtung erfassen. Dies macht einen direkten Vergleich mit Satellitendaten noch schwieriger als im Falle des bodengestützten Radars, das immerhin einen Radius von ca. 100 km in alle Richtungen abdecken kann.

Eine Möglichkeit für einen besseren räumlichen Vergleich könnte wie folgt aussehen: Da zusätzlich zu den Radiometerdaten auch Windgeschwindigkeit und Windrichtung aufgezeichnet wurden, ist es möglich die zeitlich hochaufgelösten Radiometerdaten (1s) in einen räumlichen Verlauf der Strahlungstemperatur umzurechnen, dessen Richtung durch die Windrichtung festgelegt ist. Das räumliche Intervall  $\Delta l$  ergibt dabei sich aus dem zeitlichen Intervall  $\Delta t$  über die horizontale Komponente der Windgeschwindigkeit  $v_h$  (Kutuza et al., 1995):

$$\Delta l = v_h \cdot \Delta t .$$

Diesen räumlichen Verlauf könnte man mit einen Schnitt in entsprechender Richtung durch ein großflächiges Strahlungstemperaturbild aus Satellitendaten um den Meßort herum vergleichen. Ein solches Verfahren ist zumindest für relativ großflächige und homogene stratiforme Regenereignisse erfolgversprechender als der Vergleich nur eines Punktes am Boden mit den Daten nur eines Satelliten-Footprints der diesen Punkt beinhaltet.

### 2.3 Wasserdampf-DIAL Messungen

Das Differential-Absorptions Lidar, kurz DIAL-Verfahren genannt, ist eine Weiterentwicklung der konventionellen Lidarmeßtechnik, welche ihren Ursprung in der Radartechnologie hat. Dementsprechend arbeiten Lidargeräte ähnlich wie Radaranlagen. Sie bestehen aus einem Sender, der in der Lage ist, elektromagnetische Strahlung pulsförmig in die Atmosphäre auszusenden und einem geeigneten Empfänger, womit die Stärke des Echos als Funktion der Laufzeit registriert werden kann. Die Laufzeit der Pulse ist ein Maß für die Entfernung des Targets. Mit einem Lidar kann diese im allgemeinen sehr genau gemessen werden, da die typische zeitliche Pulslänge der Strahlquelle nur wenige  $10^{-9}$  Sekunden beträgt. Während beim Radar die Wellenlänge der ausgesandten Strahlung im cm-Bereich liegt, emittiert ein Lidargerät vergleichsweise kurzwellige Strahlung aus dem optischen Spektralbereich. Wegen der kurzen Wellenlänge wechselwirkt diese Strahlung schon mit den kleinsten Bestandteilen der Atmosphäre, den Luftmolekülen und Schwebeteilchen (Aerosolen), so daß selbst die klare wolkenfreie Luft ein nachweisbares Echo liefert, was beim Radar nicht der Fall ist. Die Stärke des Lidarechos ist dann ein Maß sowohl für die Dichte und optische Eigenschaft des streuenden Luftvolumens als auch für die Transmission der Atmosphäre bei der entsprechenden Wellenlänge des Senders. Aus den Rückstreudaten eines Lidars können eine Vielzahl umweltrelevanter bzw. meteorologischer Parameter der untersuchten Atmosphäre abgeleitet werden. Abhängig von der jeweiligen Fragestellung wurden hierfür unterschiedliche Techniken entwickelt. Die DIAL- Meßtechnik eignet sich insbesondere für die Fernerkundung des Wasserdampfs. Im Unterschied zum konventionellen Rückstreulidar, welches bei einer festen Wellenlänge sendet, strahlt ein DIAL zwei eng benachbarte Wellenlängen  $l_{on}$  und  $l_{off}$  kurz hintereinander aus, wobei  $l_{on}$  der Zentralwellenlänge einer Wasserdampfabsorptionslinie entspricht. Hier verursacht der Wasserdampf wegen der Absorption eine zusätzliche Schwächung der Strahlung beim Durchlaufen der Atmosphäre.  $l_{off}$  ist die zugehörige Referenzwellenlänge, die so gewählt wird, daß hier eine deutlich geringere Absorption stattfindet. Bei bekannten molekularen Absorptionsquerschnitten, läßt sich das Wasserdampfprofil als Funktion der Entfernung in Ausbreitungsrichtung des Senders einfach berechnen. Wird ein DIAL-System vom Flugzeug aus betrieben, z. B. senkrecht nach unten sondierend, so können damit zweidimensionale Wasserdampfquerschnitte entlang des Flugwegs und bis zum Boden hin erstreckend gemessen werden. Diese Daten lassen sich nach Aufintegration in Flüssigwasserwerte längs der Flugstrecke umrechnen, welche letztlich mit Radiometerdaten verglichen werden können.

Das am Institut für Physik der Atmosphäre entwickelte Wasserdampf-DIAL wurde bisher in der Falcon eingesetzt, um die horizontale und vertikale Struktur des Wasserdampfs in der Grenzschicht mit hoher räumlicher Auflösung zu messen. Erste Meßvergleiche mit Mehrfrequenz-Mikrowellenradiometern bei mesoskalig homogenen Bedingungen zeigen die Ergänzung der Methoden durch die hohe zeitliche Auflösung der Radiometer und die hohe räumlichen Auflösung des DIALs. Die aus den Daten abgeleiteten Flüssigwasserwerte ergaben eine Übereinstimmung von 10%. Das DIAL, mit dem die Daten für den Meßvergleich gewonnen wurde, besitzt eine Meßgenauigkeit von ca. 10 % in der Grenzschicht. Für den in diesem Projekt angestrebten Vergleich mit PRIRODA-Messungen wurde eine Meßgenauigkeit mit dem DIAL von  $\sim 3\%$  angestrebt. Um dies zu erreichen, wurde eine neue Strahlquelle für das DIAL-System auf der Basis eines optisch parametrischen Oszillators entwickelt. Die Laborergebnisse zeigen, das diese Strahlquelle alle spektralen Voraussetzungen eines DIAL-Transmitters erfüllt (Ref). und für den Meßvergleich mit passiven Sensoren in Frage kommt. Momentan arbeitet diese Strahlquelle im Spektralbereich um 940nm, womit DIAL- Messungen bei sehr geringen Wasserdampfwerten, wie sie in der oberen Troposphäre oder unteren Strato-

sphäre vorkommen, durchgeführt werden. Die Weiterentwicklung zum Einsatzes bei hoher Feuchte in der Grenzschicht, um den Vergleich mit den bodengebundenen Radiometern durchzuführen, konnte aufgrund der Nichtverfügbarkeit eines Diodenlasers, der den Wellenlängenbereich des OPOs festlegt, nicht wie geplant im durchgeführt werden. Die noch für 1998 geplanten Falcon Flüge konnten also nicht im Rahmen des Projektes durchgeführt werden.

Dieser Diodenlaser ist Anfang 1999 endlich eingetroffen, so daß das DIAL- System nun auch für Messungen in der unteren Troposphäre komplettiert werden kann. Das bisherige OPO-System konnte noch 1998 im Herbst erstmals im Flugzeug erfolgreich getestet werden. Abb. 16 zeigt das neue Wasserdampf-DIAL in der Falcon, womit eine troposphärische Intrusion, bei der sehr tockenen Luft im ppm-Bereich aus der Stratosphäre tief in die Troposphäre eindringt, erstmalig mit einem Wasserdampf-DIAL gemessen werden konnte.



Abbildung 16: H<sub>2</sub>O-DIAL in der Falcon 20

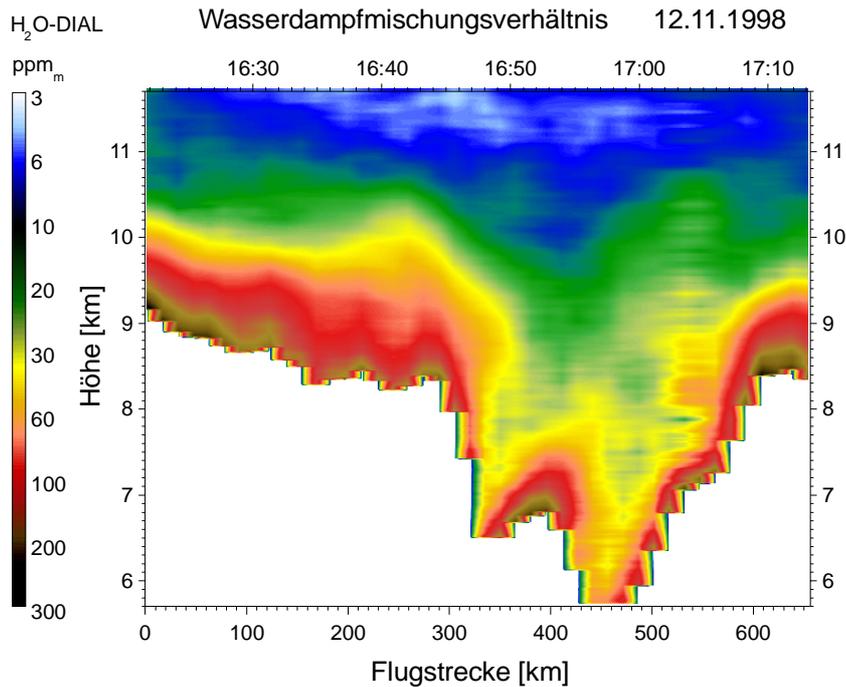


Abbildung 17: DIAL-Messung einer **Tropopausenfaltung**, bei der sehr trockene Luft im **ppm-Bereich** aus der Stratosphäre tief in die Troposphäre eindringt.

### Verwendete Fördermittel

Alle Fördermittel wurden entsprechend der Vorkalkulation verwendet, und zwar für Personal, Reisen von und nach Moskau, Betrieb und Nutzung POLDIRAD, Miete für die Radiometer und Fremdleistung für den Betrieb. Die ursprünglich für FALCON Flugstunden zum Einsatz des Wasserdampf DIAL geplanten Mittel wurden in Absprache mit dem Auftraggeber zur Erweiterung der Meßreihen mit POLDIRAD verwandt.

### Schlußbemerkung

Die Nutzung von Mikrowellenradiometermessungen vom Weltraum zur Regen- und Wasserdampfbestimmung ist ein international hochaktuelles Thema. Mit dem ursprünglich definierten Vorhaben zur Nutzung der Messungen von PRIRODA aus sollte insbesondere die Zusammenarbeit mit Rußland gefördert werden.

Die wissenschaftliche Zusammenarbeit hat sich als sehr fruchtbar erwiesen; es hat eine Reihe gegenseitiger Besuche stattgefunden, die sich auch in gemeinsamen Publikationen niederschlagen haben.

Die Nutzung von Messungen von PRIRODA aus konnte nicht erfolgen. Es haben niemals nutzbare Meßdaten trotz vieler Bemühungen für uns vorgelegen.

Die technischen und organisatorischen Probleme waren sowohl für uns wie für unsere russischen wissenschaftlichen Kollegen kaum durchschaubar und von russischer Nutzerseite wohl auch nicht zu beeinflussen.

Thematisch konnte aber doch das Vorhaben weitgehend durchgeführt werden, indem Mikrowellenradiometerdaten des SHM/I Sensors der amerikanischen DMSP Satelliten, der ähnliche Kanäle wie der PRIRODA Sensor besitzt, genutzt wurden. Dies hatte sogar den Vorteil, daß eine wesentlich bessere Statistik über verschiedene Regensituationen erhalten wurde. Dazu mußten allerdings häufiger Messungen mit POLDIRAD durchgeführt werden als geplant. Die Mittel hierfür wurden kostenneutral z.T. aus Betriebsmitteln für die FALCON gedeckt, die wegen der nicht termingerechten Fertigstellung des Wasserdampf DIALs nicht zum Einsatz kam.

Auch die – ebenfalls in enger Zusammenarbeit mit den russischen Kollegen von IRE – erfolgten Mikrowellenradiometermessungen vom Boden aus haben eine Reihe neuer Erkenntnisse zur Regenmessung ergeben, die ebenfalls z.T. schon publiziert wurden.

#### **Literatur;** eigene Publikationen sind fett gedruckt

Adler, R.F., A.J. Negri, P.R. Keehn and I.M. Hakkarinen, 1993: Estimation of monthly rainfall over Japan and surrounding waters from a combination of low-orbit microwave and geosynchronous IR data, *J. Appl. Meteor.* 32, 335-356.

Bauer, P., 1992: Wasserdampf, Gesamtwasser und Niederschlagsrate aus Daten passiver Mikrowellenradiometer über dem Ozean. Dissertation Universität Hamburg, DLR-Forschungsbericht 92-37, 129 S.

Berg, W., W. Olson, R. Ferraro, S.J. Goodman und F.J. LaFontaine, 1998: An assessment of the first- and second-generation Navy operational precipitation retrieval algorithms, *J. Atmos. Sci.* 55, 1714-1729.

Chang, A.T.C. und A.S. Milman, 1982: Retrieval of ocean surface and atmospheric parameters from multichannel microwave radiometric measurements, *IEEE Trans. on Geosci. Rem. Sens.* 20, No.2, 217-224.

**Ehret G., A. Fix, V. Weiß, G. Poberaj, Th. Baumert, 1998:** Diode-laser-seeded optical parametric oscillator for airborne water vapor DIAL application in the upper troposphere and lower stratosphere *Appl. Phys.* B67, 427-431.

Ferraro, R.R., N.C. Grody and G.F. Marks, 1994: Effects of surface conditions on rain identification using the DMSP-SSM/I, *Rem. Sens. Rev.* 11, 195-209.

Ferraro, R.R. and G.F. Marks, 1995: The development of SSM/I rain-rate retrieval algorithms using ground-based radar measurements, *J. Atmos. Oceanic Technol.* 12, 755-770.

- Gorgucci, E., G.Scarchilli und V. Chandrasekar, 1994: A robust estimator of rainfall rate using differential reflectivity, *Atmos. Oceanic Technol.* 11, 586-592.
- Grody, N.C., 1991: Classification of snow cover and precipitation using the special sensor microwave imager, *J. Geophys. Res* 96, No. D 4, 7423-7535.
- Hacker, Stephan und Peter Meischner, 1999:** Validation of Rainfall Rate Algorithms for the SSM/I by Measurements with the C-Band Multiparameter Radar POLDIRAD,  $\mu$ rad99 – 6th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment, Florenz.
- Hollinger, J.P., J.L. Peirce and G.A. Poe, 1990: SSM/I Instrument Evaluation, *IEEE Trans. on Geosci. Rem. Sens.* 28, No. 5, 781-790.
- Hornbostel, A., Schroth, A., Kutuza, B.G., Evtuchenko, A., 1997:** Dual Polarisation and Multifrequency Measurements of Rain Rate and Drop Size Distribution by Ground-Based Radar and Radiometers, *Proceedings of IGARSS '97*.
- Kidd, C. und E.C. Barrett, 1990: The use of passive microwave imagery in rainfall monitoring *Rem. Sens. Rev.* 4, 415-450.
- Kutuza, B., Hornbostel, A. and A. Schroth, 1995:** Influence of Cloud and Rainfall Characteristics on Brightness Temperatures of the Earth Measured by Satellite. *Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment*, Editor D. Solimini. VSP 1995, S. 198-208.
- Liu, G. and J.A. Curry, 1992: Retrieval of precipitation from satellite microwave measurement using both emission and scattering, *J. Geophys. Res.* 97, D9, 9959-9974.
- Petrenko, B.Z., 1996: Robust restoration of microwave brightness contrasts from the DMSP SSM/I data, *Proc. IGARSS '96*, Lincoln, Nebraska, 27-31 May 1996, vol. 1, 481-483.
- Smirnov, M.T and Meischner P., 1996:** Model-estimated microwave emissions from rain systems for remote sensing applications. *J. Geophys. Res.*, 101, 29-479-29,489.
- Smith, E.A., A. Mugnai, H.J. Cooper, G.J. Tripoli and X. Xiang, 1992: Foundations for statistical-physical precipitation retrieval from passive microwave satellite measurements. Part I: brightness-temperature properties of a time-dependent cloud-radiation model, *J. Appl. Meteor.* 31, 506-531.
- Spencer, R.W., H.M. Goodman and R.E. Hood, 1989: Precipitation retrieval over land and ocean with the SSM/I: identification and characterization of the scattering signal, *J. Atmos. Ocean. Tech.* 6, 254-273.
- Weng, F. and N.C. Grody, 1994: Retrieval of cloud liquid water using the Special Sensor Microwave Imager (SSM/I), *J. Geophys. Res.* 99, 25535-25551.