Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich
Prof. Dr. Hans Richner
Institut für Atmosphäre und Klima
Gruppe Atmosphärenphysik

Diplomarbeit
Sommersemester 2004

Hagelklimatologie mit Radar- und Satellitendaten

Oktober 2004
Michael Zbinden

Leitung: Prof. Dr. Hans Richner, IAC, ETH Zürich
Betreuung: Dr. Willi Schmid, IAC, ETH Zürich
Dr. Marc Wüest, IAC, ETH Zürich

Zusammenfassung

Versicherungen und Rückversicherungen sind an der Wiederkehrperiode starker Hagelzüge mit grossem Schadenpotential interessiert. Da mit Radardaten nur Hagelklimatologien für beschränkte Regionen erstellt werden können, wird eine Methode gesucht, die grossräumig eingesetzt werden kann und nicht an lokale Messdaten und -instrumente gebunden ist.

Zu Beginn wird mit Hilfe von Radardaten eine Klimatologie für das Gebiet des internationalen Komposits des Deutschen Wetterdienstes erstellt. Dazu werden die stärksten Radar-Echos mit einer Reflektivität von 55 dBZ unter Berücksichtigung eines Korrekturtherms für hohe Wolken durch eine Koordinatentransformation exakt auf ein IR-Satellitenbild übertragen. In einem zweiten Schritt werden die charakteristischen Parameter, durch die potentielle Hagelzellen auf dem IR-Satellitenbild gekennzeichnet sind, mit Hilfe einer statistischen Auswertung bestimmt. Anschliessend erfolgt die Direktsuche nach potentiellen Gewitterzellen auf dem ganzen Satellitenbild ohne die Unterstützung durch Radardaten: die nun bestimmten Suchparameter werden in einem IDL™ Programm-Code umgesetzt, und die Kennzahlen der auf diese Weise gefundenen Zellen in einer Datei gespeichert.
Sowohl die Verteilung der Radar-Echos wie auch die Verteilung der auf dem IR-Satellitenbild bestimmten potentiellen Gewitterzellen wird über dem betrachteten Gebiet erfasst. Dazu wird dem Bild ein Raster überlagert und die kumulierte Anzahl Pixel je Sektor berechnet, um die regionalen Unterschiede hervorzubringen und in einer weiteren Phase die beiden Methoden und Verteilungen miteinander vergleichen zu können. Sämtliche Vorgänge werden zur Verifizierung an einem zweiten Bild-Datensatz gleichen Umfangs wiederholt.

Es kann gezeigt werden, dass eine statistisch signifikante, positive Korrelation ($R = 0.81$) zwischen den Verteilungen, die mit Hilfe von Radardaten berechnet worden sind, vorhanden ist und somit auf die Existenz regionaler Unterschiede betreffend der Häufigkeit von Hagelereignissen geschlossen werden kann. Über den Alpen und in der Küstenregion von Deutschland und den Niederlanden werden höhere Häufigkeitswerte detektiert.

Die Direktsuche auf dem Satellitenbild akzeptiert mit vorliegenden Parametern noch zu viele Wolken, so dass keine hohen Korrelationswerte zwischen Radar- und Satellitenverteilung resultieren. Die Wiederkehrperiode starker Hagelzüge mit grossem Schadenpotential kann alleine mit der vorgestellten Methode nicht eindeutig bestimmt werden. Es sind aber noch nicht alle Möglichkeiten ausgeschöpft: Der Einsatz von WV-Satellitenbildern zur Bestimmung weiterer Kriterien und der Verzicht auf die Küstenlinien, die dem Satellitenbild überlagert dargestellt sind, können die Direktsuche positiv beeinflussen.

Zwischen den Verteilungen der beiden Datensätze, die durch Direktsuche auf dem Satellitenbild entstanden sind, werden sehr hohe Korrelationswerte festgestellt. Die Kontinente weisen bei beiden Verteilungen höhere Häufigkeiten auf, als dies über den Wassermassen der Fall ist. Dies kann durch die stärkere Erwärmung der Landmassen und die daraus folgende konvektive Wolkenbildung erklärt werden. Die grössten Häufigkeitswerte für das Auftreten von potentiellen Gewitterzellen über Land werden in den Alpen und Pyrenäen verzeichnet, was in guter Übereinstimmung zu Publikationen anderer Autoren steht.

Abstract

In order to determine hail climatologies on a large scale, a novel approach is described which only treats satellite pictures as single data source. The advantage of this method is the independence of local data and measurement instruments. The signatures of potential hail clouds on the Meteosat infrared satellite picture are analysed and determined by means of radar data. In a further step, the direct search for hail clouds on the satellite picture is only implemented with these signatures and without any consideration of radar data. The frequencies of hail clouds at a certain location are calculated and compared with a second dataset. Highest values are found over the Alps and the Pyrenees. Moreover, continents show generally higher values than oceans which indicates an increased convective activity over land. The frequency of severe hailstorms with enormous damage potential cannot be unequivocally determined with this approach because the method considers too many clouds as potential hail clouds. The use of water vapour satellite pictures as an additional source of information could improve the results.

Es wird eine Methode zur Bestimmung von grossräumigen Hagelklimatologien beschrieben, die als Datenquelle nur Satellitenbilder benötigt und somit unabhängig von lokalen Messdaten ist. Mit Hilfe von Radardaten werden die Signaturen der potentiellen Gewitterzellen auf einem Infrarot-Satellitenbild (Meteosat) bestimmt, um in einem weiteren Schritt ohne die Hilfe von Radardaten direkt auf dem Satellitenbild nach potentiellen Hagelzellen zu suchen. Die Regionalen Häufigkeitsunterschiede werden bestimmt und mit den Resultaten eines zweiten Datensatzes verglichen. Die grössten Häufigkeitswerte für das Auftreten von potentiellen Gewitterzellen über Land werden in den Alpen und Pyrenäen verzeichnet. Die Kontinente weisen gegenüber den Wassermassen generell höhere Werte auf, was auf vermehrte konvektive Wolkenbildung über Land hindeutet. Die Wiederkehrperiode starker Hagelzüge mit grossem Schadenpotential kann alleine mit vorgestellter Methode nicht eindeutig bestimmt werden. Die Methode akzeptiert noch zu viele Wolken als potentielle Hagelzellen und könnte mit Hilfe von Wasserdampf-Satelleitenbildern verbessert werden.

1 Einleitung 1
1.1 Danksagung 1
1.2 Aufgabenstellung / Projektziele 1
1.3 Wetterradar 2
1.3.1 Die Radargleichung 3
1.3.1.1 Einflüsse auf die Reichweite einer Radaranlage 6
1.3.2 Abtastverfahren der Radaranlagen des DWD 6
1.3.3 Hageldetektion 6
1.4 Meteosat 7
1.4.1 Verfügbare Wetteraufnahmen 9
1.4.2 Messprinzip im IR-Bereich 9

2 Daten und Hilfsmittel 11
2.1 Radar-Komposit des DWD 11
2.2 IR Satellitenbilder von MeteoSchweiz 13
2.2.1 Hagelzellen auf Satellitenbildern 14
2.2.2 Vergleich Radarbild - Satellitenbild 14
2.3 Technische Hilfsmittel 15

3 Methoden 16
3.1 Koordinatentransformation von Radar- zu Satellitenbild 16
3.2 Korrekturterm für hohe Wolken auf dem Satellitenbild 19
3.3 Bestimmung charakteristischer Grössen potentieller Hagelzellen auf dem Satellitenbild 22
3.3.1 Erstellung der Statistik 22
3.3.1.1 Identifizierung von Hagelzellen auf Radarbildern 22
3.3.1.2 Übertragung der Hagelzellen unter Berücksichtigung des Korrekturterms 23
3.3.1.3 Bestimmung der Schwerpunkte der einzelnen Hagelzellen 23
3.3.1.4 Suche des kühlsten Nachbarpixels 23
3.3.1.5 Bestimmung der Flächen innerhalb verschiedener Gradienten 24
3.3.1.6 Export in ein Log-File 26
3.3.2 Auswertung der Statistik 26
3.3.3 Zwischenergebnisse aus der Statistik 33
3.4 Direktsuche nach potentiellen Hagelzellen auf dem Satellitenbild 33
3.5 Verifizierung der gefundenen Parameter an zweitem Datensatz 36

4 Resultate 37
4.1 Vergleich der Statistiken beider Datensätze 37
4.2 Hagelklimatologie über Europa 42
4.2.1 Hagelverteilung mit Hilfe der Radarbilder 43

4.2.2 Hagelverteilung mit Hilfe der Satellitenbilder 43
4.2.3 Vergleich der Hagelverteilungen 45
4.2.3.1 Radar vs. Radar 45
4.2.3.2 Satellit vs. Radar 48
4.2.3.3 Fazit aus der Betrachtung der Korrelationswerte zwischen den Datensätzen 55
4.2.3.4 Statistische Trefferquote der Direktsuche 55
4.2.3.5 Satellit vs. Satellit 57

5 Schlussfolgerungen 65

6 Ausblick 67
6.1 Motivation 67
6.2 Vorschläge für weiterführende Arbeiten zum Thema 67
6.2.1 Qualitätskontrolle (Trefferquote) der potentiellen Hagelzellen auf dem Satellitenbild 67
6.2.2 Verbesserung der Hagelerkennung mit Hilfe von Wasserdampf-Satellitenbildern 67
6.2.3 Vergleich von Hagelstatistiken mit Radarbildern 67
6.2.4 Umgang mit den eingezeichneten Küstenlinien auf den Satellitenbildern 68

7 Terminologie, Abkürzungen und Formelzeichen 69
7.1 Terminologie 69
7.2 Abkürzungen 71
7.3 Formelzeichen 72

8 Literatur 75

9 Abbildungen und Tabellen 77
9.1 Abbildungen 77
9.2 Tabellen 80

A Excel(TM) Arbeitsblätter / Allgemeines 1
A.1 Meteosat-IR: Falschfarben-Index, zugewiesen durch MeteoSchweiz 1
A.2 Grössenverteilung der Hagelzellenflächen auf dem Sat.-Bild, detektiert mit Radar 2
A.3 Verteilung der errechneten Zellenflächen bei verschiedenen Farb-Deltas 2
A.4 Häufigkeitsverteilung der Farbindizes 3
A.5 Häufigkeitsverteilung der Farbindizes, Fallunterscheidungen Nord (> 50°) / Süd (< 50°) 3
A.6 Häufigkeitsverteilung der Abstände (Schwerpunkt Hagelzelle - Kältezentrum) 4
A.7 Häufigkeitsverteilung der Azimutwinkel (Schwerpunkt Hagelzelle -

Kältezentrum) 4
A.8 Häufigkeitsverteilung der Azimutwinkel (90°-Klassen) 5
A.9 Vergleich der Grössenverteilung der Hagelzellenflächen auf dem Sat.-Bild, detektiert mit Radar in den beiden Zeitperioden 5
A.10 Korrelation der Radar-Echos (Datensatz99 vs. Datensatz02) über der Testfläche 6
A.11 Gegenüberstellung der höchsten Korrelationswerte 6
A.12 Scatter-Plot Direktsuche99 vs. Direktsuche02 7
A.13 Verteilungen über dem Satellitenbild (Direktsuche mit Farbindex-Limite 30 / Flächen-Limite 15 Pixel), Werte in # Pixel je Sektor 8
A.14 Gegenüberstellung der Verteilungen, Periode 1997-99 (hervorgehoben der Bereich mit guter Radarabdeckung, ohne Küsteneinflüsse) 9
A.15 Gegenüberstellung der Verteilungen, Periode 2000-02 (hervorgehoben der Bereich mit guter Radarabdeckung, ohne Küsteneinflüsse) 10

B Beschreibung der IDL Prozeduren und Funktionen 1
B.1 Funktionen & Prozeduren 1
B.2 „Batch-Prozesse“: Funktionen & Prozeduren 3
B.3 Hilfsfunktionen & -prozeduren zur Effizienzsteigerung beim Betrachten / Auswerten 4

C Inventar der CD zur vorliegenden Diplomarbeit 1
C.1 Ordner „Diplomarbeit_(Bericht)“ 1
C.2 Ordner „Direktsuche“ 1
C.3 Ordner „IDL“ 1
C.4 Ordner „Koordinaten_Kalibrierung“ 1
C.5 Ordner „Parametersuche“ 1
C.6 Ordner „RadSat_Korrelation“ 1
C.7 Ordner „RadSat-Viewer“ 1
C.8 Ordner „Rohdaten“ 1
C.9 Ordner „Sat_Verteilung“ 2

D Inventar der DVD zur vorliegenden Diplomarbeit 3
D.1 Ordner „1997“ bis „2002“ 3

1 Einleitung

1.1 Danksagung

Ich konnte während meiner Diplomarbeit auf eine ausserordentlich gute Betreuung durch die Gruppe Atmosphärenphysik zählen. Mein ganz besonderer Dank geht an *die Herren Dr. Willi Schmid* und *Dr. Marc Wüest*, die mich während dieser Diplomarbeit betreuten, dafür, dass sie sich jederzeit für mich Zeit nahmen und mit ihrer Fachkompetenz und ihren vielen guten Vorschlägen und unzähligen Tipps ganz wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Zudem möchte ich mich bei meinen Kameraden an der ETH für den regen Gedankenaustausch, die interessanten Diskussionen und die vielen guten Ideen bedanken, die Diplomsemester wie -arbeit bereichert haben.

1.2 Aufgabenstellung / Projektziele

Versicherungen und Rückversicherungen sind an der Wiederkehrperiode von starken Hagelzügen interessiert. Mit Hilfe von langjährigen Radardaten gelingt es, Hagelzüge zu identifizieren und eine Klimatologie für beschränkte Regionen zu erstellen. Da die Radardaten in anderen Gebieten aber oft fehlen oder die Datenqualität auf Grund technischer Unterschiede der Anlagen und Messmethoden nicht vergleichbar ist, ist eine räumliche Ausweitung einer solchen Klimatologie schwierig bis unmöglich. Hier können Satellitenbilder weiterhelfen. Damit dies möglich ist, muss verstanden werden, wie gut vom Radar erkannte Hagelzüge auch in den Satellitenbildern identifiziert werden können.

Folgende Projektziele sollen mit dieser Arbeit erreicht werden:

- Identifikation von Hagelzügen auf Radarbildern einer Region
- Prüfung der Relation zwischen Radar- und Satellitenbildern für die gleiche Region
- Anwendung und Prüfung der gefundenen Relation für eine andere Region, für welche Radar- und Satellitenbilder vorhanden sind
- Anwenden und Erstellen einer Statistik von Hagelzügen für Regionen, für welche nur Satellitenbilder vorhanden sind

Für die Arbeit stehen Radarbilder der MeteoSchweiz und des DWD[1] (Europa-Komposit) sowie Meteosat-IR Bilder für die Jahre 1997 bis 2002 zur Verfügung. Zusätzliche meteorologische Daten werden nicht beigezogen.

Verschiedene Autoren haben sich bereits mit der Erfassung und Analyse von Gewitter- und Hagelereignissen beschäftigt. So liegen einige Publikationen zu dieser Thematik für ganz Westeuropa ([Delden 2001] und [Collier 1994]), Norditalien ([Morgan 1973]), Ungarn ([Geresdi & Horváth 2000]), Nordwestspanien ([López 2001]), Grossbritannien ([Webb et al. 2001]), Frankreich ([Vinet 2001]) und Polen [Bielec-Bakowska 2003] vor, um nur einige zu nennen. Sämtliche Untersuchungen sind abhängig von Datenbanken, die einzelne, gezielt erfasste Hagelsturmereignisse enthalten. [Collier 1994] setzt zudem, gestützt auf die Arbeiten von [Adler & Fenn 1977][2] und [Negri & Adler 1981][3], IR-Bil-

1. Deutscher Wetterdienst
2. Sie stellten eine Korrelation zwischen Gewitterereignissen und der räumlichen Ausdehnungsrate von Isothermen, die kälter als die Tropopause sind, fest.
3. Sie erkannten eine Koinzidenz zwischen der Position von Radar-Echos und Gewittern, die auf Satellitenbildern bestimmt wurden.

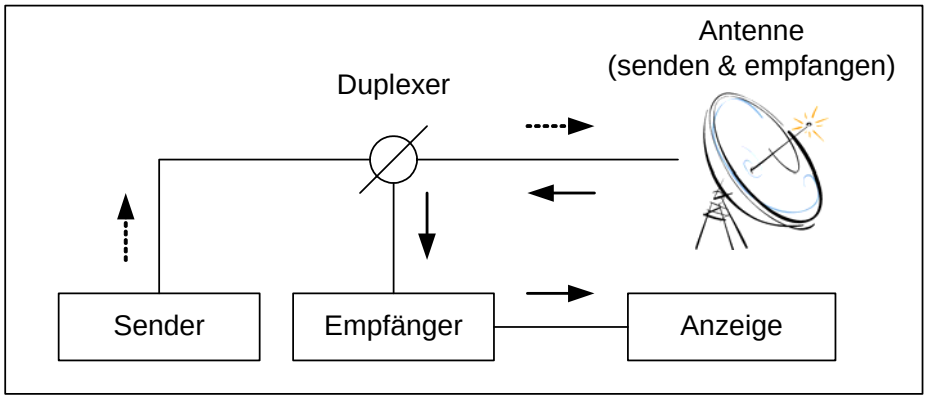
der von Satelliten in niedriger Erdumlaufbahn zur Erfassung von konvektiven Gewitterzellen ein. Für das Gebiet der USA erstellte [Brooks 2003] mit Hilfe von Reanalysedaten eine Hagelklimatologie, die er mittels Modellen auf das Gebiet der ganzen Welt ausdehnte.

Die Methode, die in vorliegender Arbeit vorgestellt wird, weist gegenüber anderen Arbeiten folgende Vorteile auf: Durch die Zuhilfenahme geostationärer IR-Satellitenbilder kann ein Gebiet mit guter zeitlicher Auflösung[4] beobachtet werden, und die Verfügbarkeit von Bildern ist für fast alle bewohnten Gebiete der Erde gewährleistet. Gelingt die Bestimmung von potentiellen Gewitterzellen auf dem Satellitenbild mit Hilfe geeigneter Signaturen, können Hagelklimatologien für sämtliche Regionen der Welt auf relativ einfache Art ohne die Verfügbarkeit aufgearbeiteter, historischer Daten oder komplexer, rechenintensiver Modelle erstellt werden.

1.3 Wetterradar

Die drehende Parabolantenne eines Wetterradars sendet ein gebündeltes elektromagnetisches Signal mit einer Wellenlänge von typischerweise 1 bis 10 cm als kurzen, energiereichen Impuls aus. Das Signal wird von Hydrometeoren (Regentropfen, Schneeflocken, Eiskristallen oder Hagelkörnern) reflektiert und mit der selben Antenne aufgefangen [MeteoRadar]. Aus der zeitlichen Verzögerung zwischen dem ausgesandten und dem empfangenen Signal kann die Entfernung der Niederschlagszone berechnet werden. Radargeräte der neusten Generation liefern auch präzise Angaben über die Intensität der Niederschläge [MeteoSchweiz].

ABBILDUNG 1-1 Funktionsweise eines Radars



Einfaches Blockdiagramm eines Radars. Basierend auf einer Abbildung in [Rinehart 1997].

Die Radarreflektivität wird hauptsächlich von der Grösse der Hydrometeore bestimmt und ist ein Mass für die Niederschlagsintensität. Die Geschwindigkeit der Partikel (in radialer Richtung zum Radar) kann mit Hilfe eines gepulsten Doppler Radars durch Messung der Dopplergeschwindigkeit bestimmt werden [MeteoRadar]. Ein Dopplerfilterverfahren entfernt sogenannte Clutter. Clutter sind Festechos, die durch hohe Gebäude oder Hügel verursacht werden [DWD - Radarverbund].

Ein wichtiger Vorteil des Wetterradars ist die Erfassung von relativ grossen Gebieten (10 - 230 km Ausdehnung[5]) mit grosser zeitlicher und räumlicher Auflösung. Radarbilder

4. Bei Meteosat-6 und Meteosat-7 liegt das Aufnahmeintervall bei 1 Bild / 30 Minuten.
5. Quelle: [DWD - Radarverbund]

tragen wesentlich dazu bei, dass die Gefahr von Starkniederschlägen rechtzeitig erkannt werden kann.

1.3.1 Die Radargleichung

Der folgende Abschnitt basiert auf den Ausführungen von [Wolff] und [Rinehart 1997].

Die Radargleichung wird dazu benutzt, die physikalischen Zusammenhänge von der Sendeleistung, über die Wellenausbreitung bis zum Empfang darzustellen. Im folgenden wird zunächst davon ausgegangen, dass sich die elektromagnetischen Wellen unter idealen Bedingungen, also ohne Störeinflüsse, ausbreiten können.
Wird von einem isotropen Kugelstrahler hochfrequente Energie abgestrahlt, so verteilt sich diese gleichmässig nach allen Richtungen. Demzufolge bilden Flächen gleicher Leistungsdichte Kugeln um den Strahler. Bei grösser werdendem Kugelradius verteilt sich die Energie auf eine grössere Fläche um den Strahler.

Somit ergibt sich für die ungerichtete Leistungsdichte S_u die folgende Formel:

[1.1]

$$S_u = \frac{P_S}{4 \cdot \pi \cdot R_1^2}$$

P_S Sendeleistung [W]
S_u ungerichtete Leistungsdichte [W/m^2]
R_1 Entfernung Antenne - Ziel [m]

Wird die Abstrahlung (bei gleichbleibender Sendeleistung) durch geeignete Massnahmen auf eine Kugelteilfläche begrenzt, so ergibt sich in Abstrahlrichtung eine Erhöhung der Leistungsdichte. Dies wird als Antennengewinn bezeichnet. Erzielt wird dieser Gewinn durch gerichtete Abstrahlung der Energie. Für die gerichtete Leistungsdichte ergibt sich:

[1.2]

$$S_g = S_u \cdot G$$

S_g gerichtete Leistungsdichte [W/m^2]
G Antennengewinn

Radarantennen sind in der Realität keine „teilabstrahlenden“ Kugelstrahler, sondern Richtantennen (z.B. Parabolantennen) mit einem Antennengewinn von 30 bis 40 dB.

ABBILDUNG 1-2 Radar-Antenne

Antenne des DWD am Standort Neuheilenbach in der Vulkaneifel (C-Band Antenne mit 4.2 m Reflektordurchmesser). Abbildung aus [Wolff].

Die Zielauffassung ist nicht nur von der Leistungsdichte am Ort des Zieles abhängig, sondern zusätzlich von der Einschränkung, wieviel davon tatsächlich in Richtung der Radaranlage zurückreflektiert wird. Um die nutzbare reflektierte Leistung bestimmen zu können, wird die Rückstrahlfläche σ benötigt. Diese schwierig zu erfassende Grösse ist nebst der Grösse des Objekts von mehreren Faktoren wie Formgebung, Oberflächenbeschaffenheit und Material abhängig.
Die reflektierte Leistung P_r (am Zielort) ergibt sich somit aus der Leistungsdichte S_u, dem Antennengewinn G und der sehr variablen Rückstrahlfläche σ:

[1.3]

$$P_r = \frac{P_S}{4 \cdot \pi \cdot R_1^2} \cdot G \cdot \sigma$$

P_r reflektierte Leistung [W]
σ Rückstrahlfläche [m^2]

Vereinfacht kann ein Ziel aufgrund der reflektierten Leistung wiederum als Strahler betrachtet werden. Die reflektierte Leistung P_r wird dann zur abgestrahlten Leistung.

Da auf dem Rückweg der Echos die gleichen Verhältnisse wie auf dem Hinweg herrschen, ergibt sich für die Leistungsdichte am Empfangsort S_e:

[1.4]

$$S_e = \frac{P_r}{4 \cdot \pi \cdot R_2^2}$$

S_e Leistungsdichte am Empfangsort [W/m^2]
P_r reflektierte Leistung [W]
R_2 Entfernung Ziel - Antenne [m]

An der Radarantenne ist die Empfangsleistung P_E abhängig von der Strahldichte am Empfangsort und der wirksamen Antennenfläche A_W:

[1.5]

$$P_E = S_e \cdot A_W$$

P_E Empfangsleistung [W]
A_W wirksame Antennenfläche [m^2]

Die wirksame Antennenfläche ergibt sich aus der Tatsache, dass eine Antenne nicht verlustfrei arbeitet, d.h. die geometrischen Abmessungen stehen nicht ganz als Empfangsfläche zur Verfügung. In der Regel ist die Wirkung einer Antenne um den Faktor 0,6 bis 0,7 (Faktor K_a) kleiner, als es die geometrischen Abmessungen vermuten lassen.

Für die wirksame Antennenfläche gilt:

[1.6]

$$A_W = A \cdot K_a$$

A_W wirksame Antennenfläche [m^2]
A geometrische Antennenfläche [m^2]
K_a Wirkungsfaktor der Radarantenne

Damit ergibt sich für die Leistung am Empfangsort P_E:

[1.7]

$$P_E = \frac{P_r}{4 \cdot \pi \cdot R_2^2} \cdot A \cdot K_a$$

P_E Leistung am Empfangsort [W]

Bisher wurde bei den Herleitungen der Hin- und Rückweg gesondert betrachtet. Mit dem nächsten Schritt werden beide Wege zusammengefasst (R_1 {Antenne - Ziel} gleich R_2 {Ziel - Antenne}).

[1.8]

$$P_E = \frac{P_S \cdot G \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi)^2 \cdot R_R^4} \cdot A \cdot K_a$$

Eine weitere Gleichung, die an dieser Stelle nicht hergeleitet werden soll, stellt den Antennengewinn G in Beziehung zu der verwendeten Wellenlänge λ.

[1.9]

$$G = \frac{4 \cdot \pi \cdot A \cdot K_a}{\lambda^2}$$

Nach der Umstellung auf die Antennenfläche A und dem Einsatz in die obere Gleichung ergibt dies nach der Kürzung:

[1.10]

$$P_E = \frac{P_S \cdot G^2 \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot R_R^4}$$

Nach der Umstellung auf die Reichweite R_R entsteht die klassische Form der Radargleichung:

[1.11]

$$R_R = \sqrt[4]{\frac{P_S \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{P_E (4 \cdot \pi)^3}}$$

R_R Reichweite [m]
P_S Sendeleistung [W]
G Antennengewinn
λ Wellenlänge [m]
σ Rückstrahlfläche [m^2]
P_E Leistung am Empfangsort [W]

1.3.1.1 Einflüsse auf die Reichweite einer Radaranlage

Alle Betrachtungen in Zusammenhang mit der Radargleichung wurden bisher unter der Voraussetzung angestellt, dass sich die elektromagnetischen Wellen unter idealen Bedingungen ausbreiten können. In der Praxis ergeben sich allerdings eine Reihe von Verlusten (geräteinterne Dämpfungsverluste, Fluktuationsverluste bei der Reflexion am Ziel, atmosphärische Dämpfungsverluste auf dem Ausbreitungsweg, Reflexion an Erdoberfläche), die nicht unberücksichtigt bleiben können, da sie die Wirksamkeit einer Radaranlage zum Teil erheblich reduzieren.

1.3.2 Abtastverfahren der Radaranlagen des DWD

Der folgende Abschnitt basiert auf den Ausführungen in der Broschüre [DWD - Radarverbund], die einer Offline-Version eines Webseitenteils des DWD entspricht.

Der DWD setzt zwei verschiedene Abtastverfahren ein:
Bei der Raumabtastung, dem *volume scan*, durchläuft die Antenne alle 15 Minuten 18 verschiedene Elevationswinkel von 37.0° bis 0.5°. Dabei deckt sie die Atmosphäre bis in eine Höhe von 12 km ab. Der volume scan besteht aus zwei verschiedenen Messmodi: Der *intensity mode* deckt die unteren Elevationswinkel von 0.5° bis 4.5° ab, der *doppler mode* erfasst die Elevationswinkel darüber. Die horizontale Reichweite beträgt beim intensity mode 230 km und beim doppler mode 120 km.

Die unterste Position hat für die Hydrometeorologie eine herausragende Bedeutung. Daher wird die Raumabtastung alle fünf Minuten unterbrochen und die Niederschlagsabtastung (*precipitation scan*) im tiefsten Elevationswinkel durchgeführt, um möglichst zeitnah Niederschlagsdaten aus Entfernungen bis 128 km zu gewinnen. Der Radarstrahl streicht dabei - angepasst an die jeweilige Orographie - zwischen 0.5° und 1.8° über den Horizont.

1.3.3 Hageldetektion

Mit Hilfe von Radar lassen sich Aussagen über das Vorhandensein von Hagel innerhalb einer Gewitterzelle machen. Eine von mehreren Methoden benutzt die Reflektivität in Kombination mit den Dimensionen der Wolke. Diese Methode wurde in den UdSSR entwickelt und von [Waldvogel 1979] im Schweizer Mittelland überprüft.

Die Hagelwahrscheinlichkeit lässt sich als eine komplexe Funktion P (hier nicht abgebildet), abhängig von den in Abbildung 1-3 dargestellten Parametern darstellen:

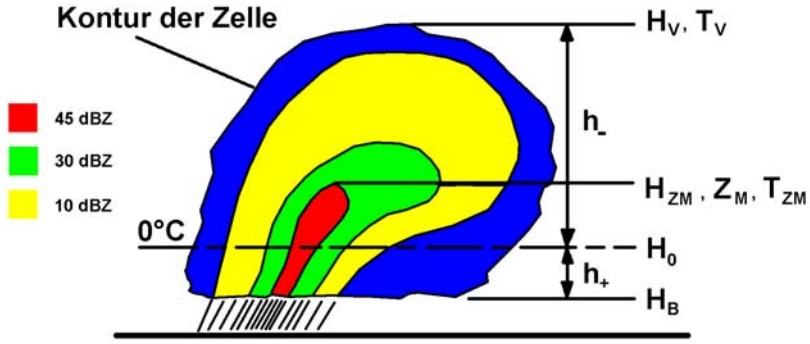
[1.12]

$$P = P(H_V, T_V, H_{ZM}, T_{ZM}, Z_M, \frac{h_-}{h_+})$$

Ein mögliches Kriterium für das Auftreten von Hagel lässt sich wie folgt definieren:

- Hagelwahrscheinlichkeit P grösser 50 %
- Maximale Reflektivität Z_M übersteigt 45 dBZ
- Maximale Reflektivität reicht bis über die 0°-Grenze hinaus

ABBILDUNG 1-3 Radar-Reflektivitäten innerhalb einer Hagelzelle



H_V, H_B: maximale Ausdehnung der Wolke
h_-: kalter Anteil der Wolke
H_0: Höhe der Nullgradgrenze
h_+: warmer Anteil der Wolke
H_{ZM}: Höhe der maximalen Reflektivität
Z_M: Intensität der maximalen Reflektivität
T_{ZM} / T_V: Temperaturen auf diversen Höhen
Basierend auf einer Abbildung in [Waldvogel 1979].

Gemäss [Waldvogel 1979] liegt die Trefferquote bei 195 untersuchten Niederschlagszellen wie folgt: in 124 Fällen wurde weder Hagel registriert, noch vorhergesagt; in 38 Fällen wurde zwar Hagel registriert, aber nicht gemessen. In 33 Fällen wurde Hagel richtig vorhergesagt und in keinem Fall trat Hagel auf, ohne dass das Kriterium welchen vorhergesagt hätte.
Die Zahlen zeigen, dass jeder Hagelschlag korrekt vorhergesagt wurde, aber jeder zweite Alarm ein Fehlalarm war.

Das Hagelkriterium lässt sich deutlich verbessern, wenn statt all den oben genannten Kriterien lediglich das folgende benützt wird:

[1.13]

$$H_{ZM} \geq H_0 + 1.4\,\text{km}$$

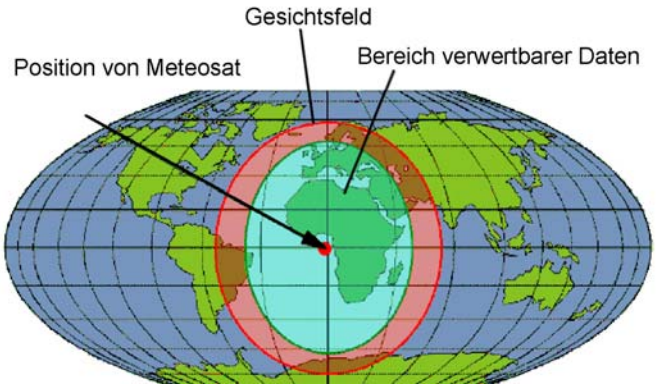
Mit diesem sehr einfachen Kriterium lassen sich von den 38 falsch vorhergesagten Zellen 10 richtigerweise als Regenzellen zuordnen ([Waldvogel 1979]).

1.4 Meteosat

Dieser Abschnitt zu Meteosat basiert auf Informationen, die vollständig auf der Internetseite von [EUMETSAT] zu finden sind.

Beobachtungsdaten von Satelliten liefern essentielle Inputwerte für die numerische Wettervorhersage. Meteosat ist ein geostationärer Satellit (Position 0° Länge / 0° Breite / 35‘800 km Höhe), dessen Aufgabe die Aufnahme und Verteilung von Wetterbildern ist. Er ist Teil eines weltumspannenden Systems von Wettersatelliten und deckt dabei hauptsächlich die Kontinente Europa und Afrika ab.

ABBILDUNG 1-4 Position und Gesichtsfeld von Meteosat

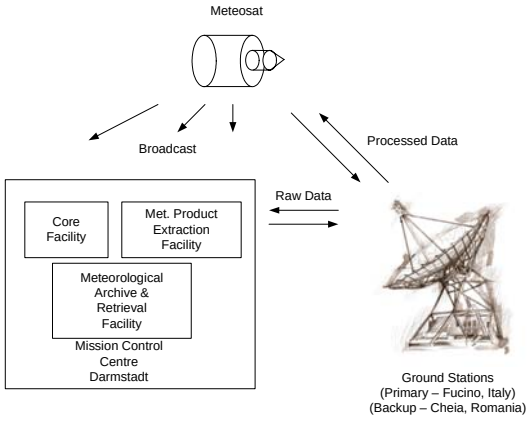


Position über 0° Länge / 0° Breite (Schnittpunkt Aequator mit 0°-Meridian).
Grüner Kreis: Bereich verwertbarer Daten. Roter Kreis: Gesichtsfeld des Satelliten.
Basierend auf einer Abbildung in [FZK].

Der erste Satellit der Meteosat-Serie wurde bereits 1977 gestartet. Seit Januar 2004 ist Meteosat-8 in Betrieb, der erste Satellit der zweiten Generation (Satelliten des Typs MSG[6] liefern mehr Informationen: Bildwiederholungszyklus von 15 Minuten (30 Minuten bei Meteosat) und 12 Spektral-Kanälen (3 Kanäle bei Meteosat), Information von 10 Bit pro Pixel (8 Bit bei Meteosat) und Auflösung von 3 km/Pixelkante im Nadir für alle Kanäle ausser dem hochauflösenden VIS-Kanal mit 1 km/Pixelkante (bei Meteosat 5 km/Pixelkante, respektive 2.5 km/Pixelkante)) [Schmetz et al. 2002].
Die in vorliegender Arbeit benutzten Satellitenbilder stammen von Meteosat-6 (Februar 1997 bis Juni 1998) und Meteosat-7 (Juni 1998 bis Ende 2005), beides Satelliten der ersten Generation.

Die Satelliten werden von EUMETSAT[7], einem Zusammenschluss von heute 18 europäischen Staaten gesteuert und gewartet. Die Daten, die das Radiometer an Bord des Satelliten aufnimmt, werden zunächst an die Bodenstation von EUMETSAT in Darmstadt übertragen, dort nachbearbeitet, zum Satelliten zurückgeschickt und von dort aus wiederum an alle Benutzer weiterverbreitet.

ABBILDUNG 1-5 Kommunikation zwischen Meteosat und Bodenstation / Rechenzentrum



Basierend auf einer Abbildung in [EUMETSAT-MAUH].

6. Meteosat Second Generation
7. European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites

1.4.1 Verfügbare Wetteraufnahmen

Das im Meteosat-6 und Meteosat-7 verwendete Radiometer deckt drei verschiedene Wellenlängenbereiche ab [EUMETSAT-MAUH]:

0.5–0.9 µm: Den sichtbaren Bereich (VIS), der nur tagsüber genutzt werden kann. Die Auflösung beträgt 2.5 km/Pixelkante senkrecht unter dem Satelliten.

5.7–7.1 µm: Das Wasserdampf-Absorptionsband (WV), in dem die Feuchteverhältnisse der oberen Troposphäre gut abgeschätzt werden können. Die Auflösung beträgt 5.0 km/Pixelkante senkrecht unter dem Satelliten.

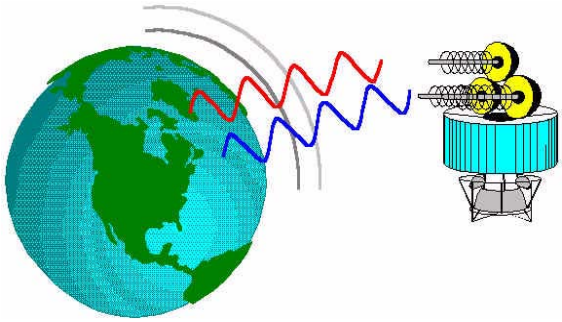
10.5–12.5 µm: Den thermalen Infrarotbereich (IR), der Tag und Nacht für die Erstellung von Satellitenbildern benutzt werden kann. Er liefert auch Informationen über die Temperatur der Meeresoberfläche und der oberen Wolkenschichten. Auch in diesem Messbereich beträgt die Auflösung 5.0 km/Pixelkante senkrecht unter dem Satelliten.

Abgesehen von kurzen Sendepausen sendet Meteosat 24 Stunden am Tag. Dabei werden im 4-Minuten-Rhythmus neue Bilder übertragen. Obwohl das Radiometer immer den gesamten von Meteosat aus sichtbaren Bereich der Erde aufnimmt, werden die Bilder für die Ausstrahlung in neun (IR) oder elf (VIS) Segmente unterteilt und einzeln gesendet. Dabei werden die Ausschnitte, auf denen Europa sichtbar ist, häufiger ausgestrahlt als die anderen, so dass von Europa alle 30 Minuten ein aktualisiertes Bild aus dem infraroten und dem sichtbaren Wellenlängenbereich verfügbar ist. Diese Bilder weisen nur eine Verzögerung von ca. 10 Minuten zwischen dem Zeitpunkt der Aufnahme und ihrer Ausstrahlung auf.

1.4.2 Messprinzip im IR-Bereich

Das IR-Bild gibt die Strahlungsintensität im infraroten Spektralbereich wieder. Bilder sind Tag und Nacht verfügbar. Jeder Körper, also auch die Erdoberflächen, Wasseroberflächen und Wolken, sendet entsprechend seiner Temperatur Strahlung aus.

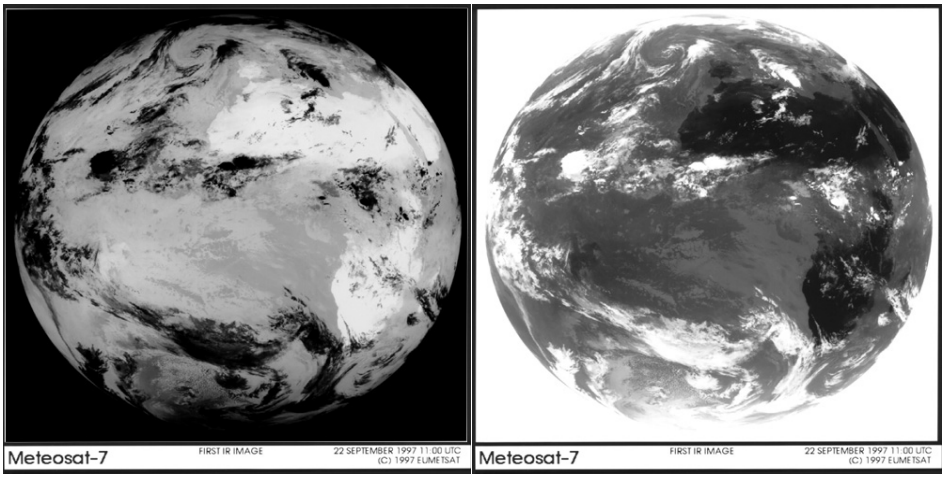
ABBILDUNG 1-6 IR-Abstrahlung der Erde



Schematische Darstellung der IR-Messung. Abbildung aus [FZK].

Die vom Satelliten gemessenen Intensitäten werden zu einem Bild (256 Graustufen) konvertiert, auf dem jede Graustufe der korrespondierenden Strahlungsintensität entspricht. Die prozessierten IR-Bilder werden in ihren 256 Graustufen invertiert, so dass der Eindruck eines visuellen Bildes entsteht. Da die Temperatur mit der Höhe abnimmt, sind Wolken in grossen Höhen sehr kalt und somit IR-strahlungsarm. Sie erscheinen im *invertierten* IR-Bild hellgrau bis weiss. Erd- und Meeresoberflächen sind relativ warm und erscheinen dunkelgrau bis schwarz (siehe Abbildung 1-7).

ABBILDUNG 1-7 IR-Aufnahmen von Meteosat-7



links: Original-IR-Aufnahme (IR-strahlungsarme Flächen (z.B. Wolken) dunkel). © 1997 EUMETSAT.

rechts: Invertierte-IR-Aufnahme (IR-strahlungsarme Flächen (z.B. Wolken) hell). © 1997 EUMETSAT.

Das invertierte Bild entspricht den Rohdaten, die anschliessend von den verschiedenen Wetterdiensten als Falschfarben[8]-Satellitenbilder aufgearbeitet werden.

8. Der Farbindex des Originalbildes wird hierbei durch eine beliebige Farbskala ersetzt, um die Anschaulichkeit zu verbessern.

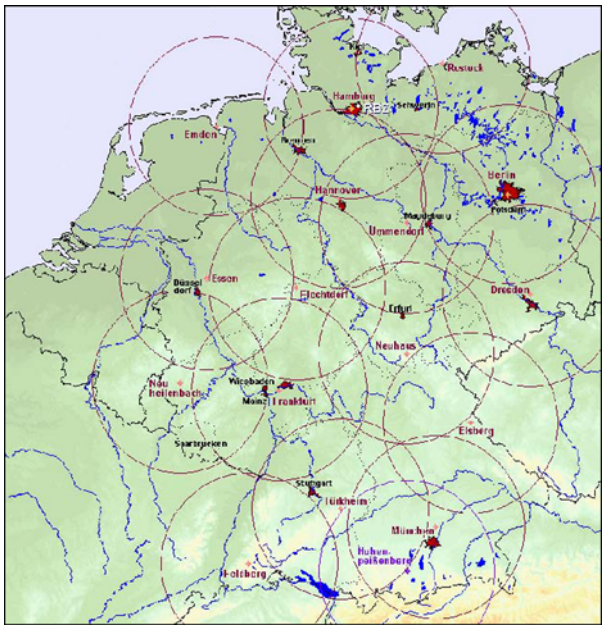
2 Daten und Hilfsmittel

2.1 Radar-Komposit des DWD

Folgender Abschnitt basiert auf den Informationen aus der PDF-Broschüre [DWD - Radarverbund].

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) unterhält ein Netz von Wetterradaranlagen, den so genannten Radarverbund, der sich aus 16 operationellen Radarsystemen[9] zusammensetzt und das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland abdeckt.

ABBILDUNG 2-1 DWD - Radarverbund



16 operationelle Radarsysteme, 1 Forschungsradar.
Kreise: 128 km Radius, Radarbetriebszentrale (RBZ) in Hamburg.
© 2002 DWD.

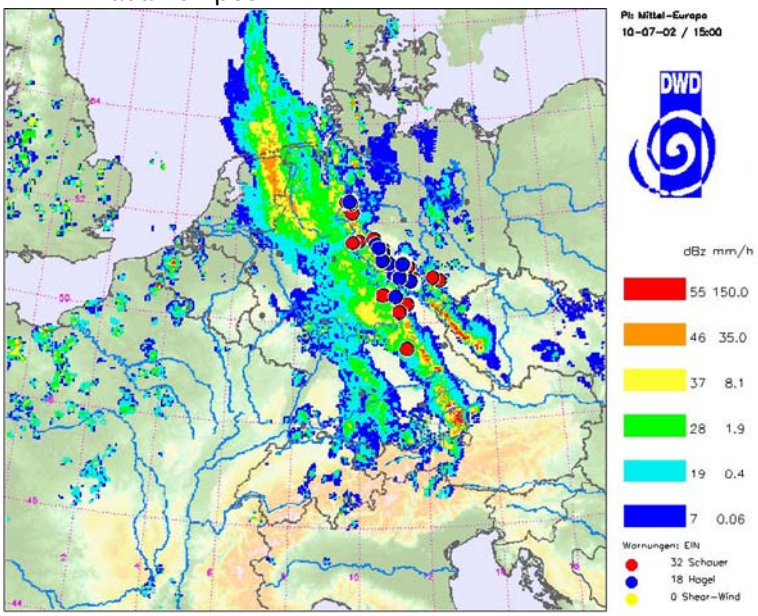
In der Offenbacher Zentrale überlagert ein Grossrechner die jeweiligen Einzelbilder und generiert damit die sogenannten Kompositprodukte. In den Überlagerungsbereichen von mehreren Radarstandorten verwendet er bei den qualitativen Radarprodukten das jeweils stärkste Signal. Bei den quantitativen Produkten wird der Wert, bei dem der Radarstrahl dem Boden am nächsten ist, übernommen oder ein Mehrschichten-Komposit erzeugt.

Um grenzübergreifende Informationen über sich nähernde Niederschlagsgebiete und ihre Entwicklungen zu erhalten, tauscht der DWD seine Radardaten mit den Wetterdiensten der europäischen Nachbarn aus. Das Ergebnis ist ein internationales Kompositbild, das aus den lokalen Radarbildern von Brüssel (Belgien) und Römö (Dänemark) sowie den Kompositbildern von Deutschland, Österreich, Schweiz[10], Frankreich, Niederlande, Grossbritannien und Tschechien erstellt wird.

9. Aktuelle Verbund-Radarsysteme (operationell seit): München (1987), Frankfurt (1998), Hamburg (1990), Berlin-Tempelhof (1991), Essen (1991), Hannover (1994), Emden (1994), Neuhaus (1994), Rostock (1995), Ummendorf (1996), Feldberg (1997), Eisberg (1997), Flechtdorf (1997), Neuheilenbach (1998), Türkheim (1998), Dresden (2000)

10. Die Schweizer Wetterradarstationen sind: La Dôle, Albis und Monte Lema. Die ETH Zürich betreibt zudem ein Forschungsradar.

ABBILDUNG 2-2 DWD - Radarkomposit

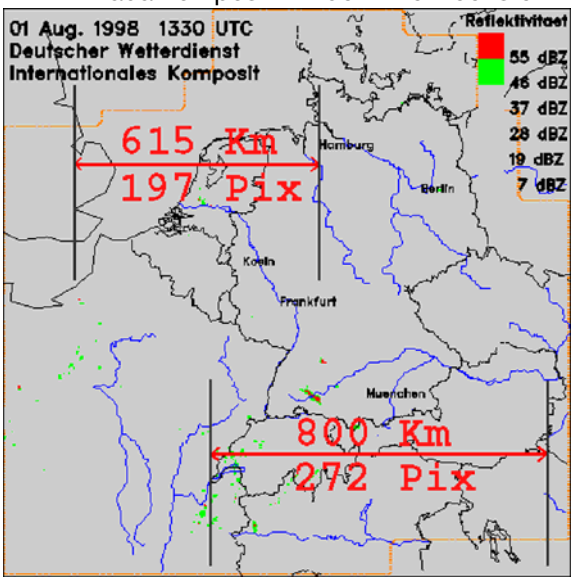


Internationales Kompositbild des DWD. © 2002 DWD.

Die verschiedenen Intensitäten werden farbcodiert einer Karte überlagert.

Für die vorliegende Arbeit stehen Radarkomposit Bilder des DWD für die Jahre 1997 bis 2002 zur Verfügung. Im Unterschied zu Abbildung 2-2 sind auf diesen Bildern nur die zwei höchsten Intensitäten (46 dBZ als grüne Pixel und 55 dBZ als rote Pixel) dargestellt.

ABBILDUNG 2-3 DWD - Radarkomposit mit den zwei höchsten Intensitätsstufen



Radarkomposit mit den beiden höchsten Intensitätsstufen 46 dBZ (grün) und 55 dBZ (rot). Die schwächeren Reflektivitätsstufen wurden eliminiert. Zudem sind die Distanzverhältnisse eingezeichnet (Pixel-Kantenlänge: ca. 3 km).

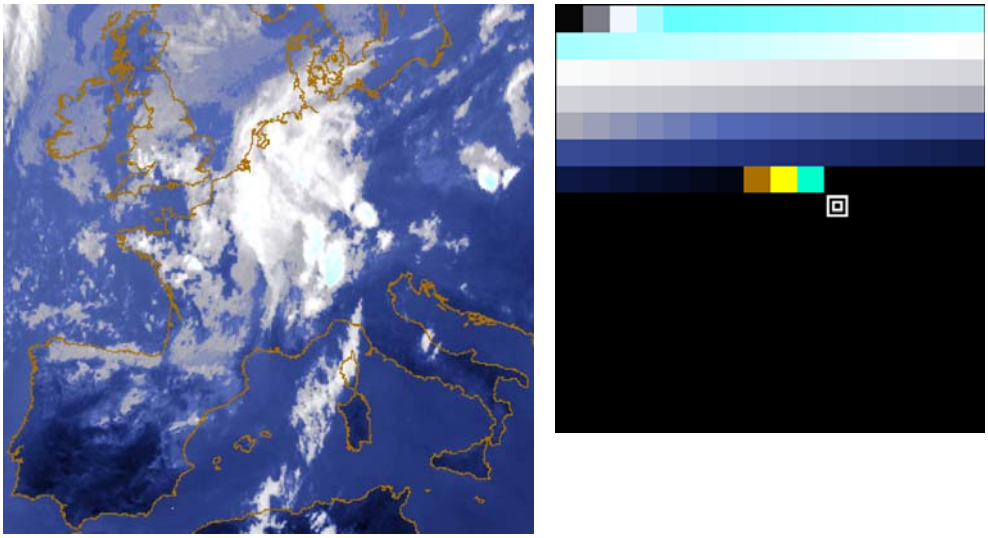
Die Konturen der Staaten und Küsten sind schwarz und die wichtigsten Flüsse blau abgebildet. Als orange-braune Linie ist das Sichtfeld der Radarstationen markiert. Es handelt sich um indizierte Bilder[11] mit einer Auflösung von 460 x 460 Pixel. Ein Pixel

weist im Durchschnitt eine Kantenlänge von ca. 3 km auf (in W/E wie N/S Richtung). Das Aufnahmeintervall der Bilder beträgt 15 Minuten.

2.2 IR Satellitenbilder von MeteoSchweiz

Als weiterer Datensatz stehen Meteosat-IR Bilder für die Jahre 1997 bis 2002 zur Verfügung, die durch MeteoSchweiz aufgearbeitet und mit einem qualitativen Falschfarben-Index versehen wurden. Dabei werden Temperaturen grösser 40° C dunkelblau bis schwarz, 0° C beim Übergang Blau zu Grau und Temperaturen kleiner -40° C beim Übergang von Weiss zu Cyan dargestellt[12].

ABBILDUNG 2-4 Meteosat-IR - Falschfarbenbild



links: Meteosat-IR Satellitenbild, aufgearbeitet durch MeteoSchweiz.

rechts: Falschfarben-Index, der durch MeteoSchweiz den Graustufen des Originalbildes zugeordnet wurde.

Der Farbindex besteht aus 256 Feldern (siehe Abbildung 2-4, rechts: Platznummer 0 {oben links im Bild} bis 255 {unten rechts im Bild}), denen von MeteoSchweiz entsprechend der Temperaturskala des Originalsatellitenbildes je eine Farbe zugeordnet wurde. Dabei werden nur die Platznummern 4 bis 103 zur Darstellung des Bildes benutzt: Platz Nr. 103 (braun) wird den Konturen der Kontinente zugeordnet, die nachträglich der Originalaufnahme überlagert wurden. Mit abnehmender Indexnummer entsprechen die Farbtöne immer kühleren Temperaturen: Von Index Nr. 102 (Schwarz-Blau) über Nr. 95 (Dunkelblau), Nr. 70 (Blau-Grau), Nr. 35 (Grau-Weiss), Nr. 25 (Weiss-Cyan) bis schlussendlich zu Nr. 4 (intensivster Cyan-Farbton), der Farbe, die dem absolut kühlsten Temperaturwert auf dem Satellitenbild entspricht. Die komplette RGB-Farbtabelle kann in Anhang A, Abbildung A.1, nachgeschlagen werden.

Da sich Landmassen stärker erwärmen als das Wasser, werden sie mit dieser Farbskala dunkelblau bis schwarz dargestellt. Die kühlsten Wolken in sehr grosser Höhe werden durch intensive Cyan-Farbtöne wiedergegeben, tiefer liegende Wolken werden weiss abgebildet.

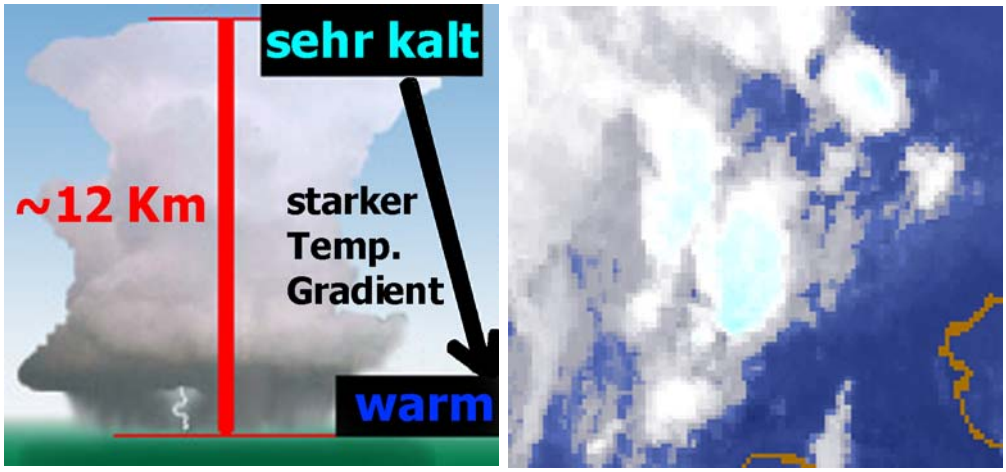
11. Bei indizierten Bildern ist jedes Pixel eindeutig bestimmt durch 3 Parameter: X-Koordinate, Y-Koordinate und Platznummer der Farbe auf dem Farbindex.
12. Gemäss Auskunft von Hanspeter Rösli, MeteoSchweiz, vom 1.6.2004.

Die Auflösung der Meteosat-IR Bilder beträgt 380 x 380 Pixel. Ein Pixel weist im Durchschnitt eine Kantenlänge von ca. 6.5 km auf[13] (in W/E wie N/S Richtung). Vier Radar-Pixel decken somit etwa die gleiche Fläche ab wie ein einziges Satelliten-Pixel. Das Aufnahmeintervall der Bilder beträgt 30 Minuten. Auf der Originalaufnahme durch Meteosat werden hohe nördliche Breiten auf Grund des flachen Sichtwinkels verzerrt wiedergegeben. Aus diesem Grund werden die Bilder durch EUMETSAT digital entzerrt und in einer polar-stereographischen Projektion[14] abgebildet, so dass der Eindruck entsteht, Europa sei aus einem viel steileren Winkel aufgenommen worden.

2.2.1 Hagelzellen auf Satellitenbildern

Durch starke Konvektion können Gewitterwolken bis in Höhen über der Tropopause hinaus ragen. Der Wolkentop weist in Folge der grossen Höhe relativ zu seiner Umgebung (tiefer liegende Wolken oder Erdboden) eine sehr viel tiefere Temperatur auf, so dass am Rand der Wolke ein starker Temperaturgradient entsteht.

ABBILDUNG 2-5 Gewitterwolken aus Sicht des Satelliten



links: Schematische Darstellung einer Gewitterwolke: Der Wolkentop in sehr grosser Höhe weist eine viel tiefere Temperatur auf als das Gebiet neben der Gewitterzelle. Basierend auf einer Abbildung in [SturmW].

rechts: sehr kalte Wolken aus Sicht des Satelliten (Meteosat-IR).

Dieser Temperaturgradient ist auch aus Perspektive des Satelliten zu beobachten: kalte, relativ kleine Pixel-Zentren (intensive Cyan-Farbtöne) werden von Pixel umringt, deren Farbwert (Temperatur) mehrere Farbstufen tiefer liegt als das Zentrum (siehe Abbildung 2-5, rechts).

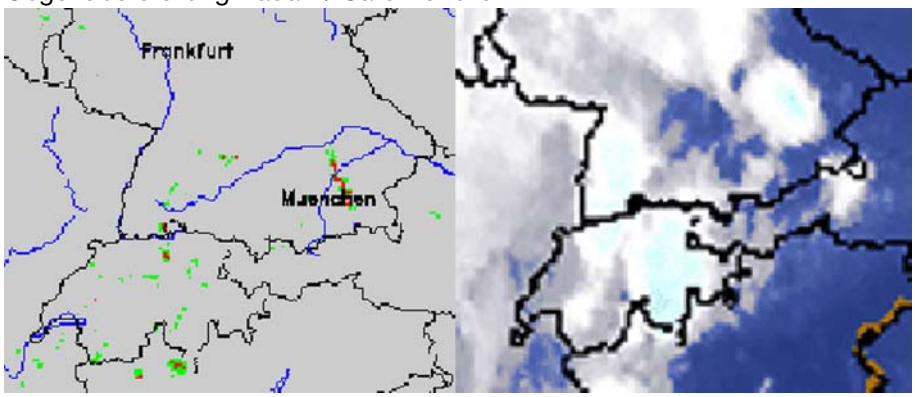
2.2.2 Vergleich Radarbild - Satellitenbild

Die Gegenüberstellung von Radar- und Satellitenbildausschnitt identischer Aufnahmezeit lässt vermuten, dass die Radar-Echos der höchsten Intensitätsstufe recht gut mit den Pixel intensiver Cyan-Farbtöne übereinstimmen (siehe Abbildung 2-6). Dieser Zusammenhang soll im weiteren ausgenutzt werden, um potentielle Gewitterzellen direkt auf dem Satellitenbild aufzuspüren.

13. Die effektive Kantenlänge eines Pixels auf dem Satellitenbild ist abhängig von der geographischen Breite. Im arithmetischen Mittel entspricht dies ca. 6.5 km.
Wie in Abschnitt 1.4.1 beschrieben, beträgt die Auflösung senkrecht unter dem Satelliten 5 km/Pixelkante.

14. Gemäss Angaben von Dr. Daniel Lüthi, IAC, ETH Zürich.

ABBILDUNG 2-6 Gegenüberstellung Radar- / Satellitenbild



links: Ausschnitt aus einem Radarbild.

rechts: Identischer Ausschnitt auf dem Satellitenbild identischer Aufnahmezeit (zur Positionsbestimmung wurden die Staatsgrenzen überlagert).

2.3 Technische Hilfsmittel

Zur numerischen Bearbeitung der Bilder wird die Programmierumgebung IDL™ 6.0 (The Interactive Data Language)[15] gewählt, die speziell für die Bildbearbeitung zugeschnitten ist. Des Weiteren kommen das Microsoft® Office Paket 2003, Microsoft® Visual Basic™ 6.0, Adobe® Photoshop® 8.0 und SigmaStat® 3.0 zum Einsatz. Gerechnet wird auf PCs der heutigen Generation (Intel® Pentium® 4, 2.4 - 3.0 GHz).

15. IDL™ (Interactive Data Language) by RSI Research Systems Inc., http://www.rsinc.com

3 Methoden

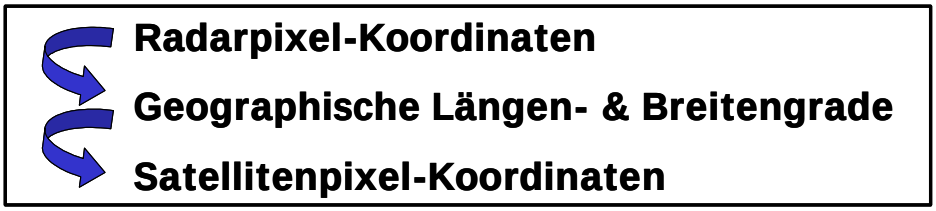
Die Berechnung und Manipulation von Bilddaten ist sehr rechenintensiv, da zum Teil für jedes einzelne Pixel mehrere Operationen durchgeführt werden müssen. Werden ganze Datensätze mit mehreren Tausend Bildern gerechnet, dauert dies viele Stunden bis Wochen.

Zum Verständnis der Formeln und Programmzeilen muss beachtet werden, dass IDL™ den Koordinatenursprung (0/0) der Bildpixel beim Eck-Pixel unten links im Bild festsetzt und anschliessend die Bildinformationen jeweils zeilenweise von links nach rechts einliest. Ein Pixel in der 4. Reihe von unten / 3. Spalte von links erhält somit die Koordinaten (X = 2 / Y = 3).

3.1 Koordinatentransformation von Radar- zu Satellitenbild

Um die Radarbilder mit den Satellitenaufnahmen vergleichen zu können, muss jede Pixelposition des einen Bildes exakt auf dem anderen Bild lokalisiert werden können. Dies wird durch eine Koordinatentransformation erreicht, bei der die X- und Y-Pixelkoordinaten des Radarbildes in geographische Längen- und Breitengrade umgerechnet und anschliessend in die Pixelkoordinaten des Satellitenbildes überführt werden.

ABBILDUNG 3-1 Koordinatentransformation



Anhand von 25 markanten, auf dem Radarbild gleichmässig verteilten Pixel (Flussmündungen, Eckpunkte der Staatsgrenzen), deren geographische Koordinaten auf einer Landkarte leicht zu identifizieren sind, werden die Parameter der ersten Transformationsgleichungen[16] kalibriert:

[3.1]

$$\mathrm{GeoB} = 90 - \frac{\sqrt{(276.5 - \mathrm{RPX})^2 + (1734 - \mathrm{RPY})^2}}{37.7535}$$

$$\mathrm{GeoL} = 10 - \mathrm{ATAN}\ \frac{276.5 - \mathrm{RPX}}{1734 - \mathrm{RPY}} \cdot \frac{180 \cdot 1.0977}{\pi}$$

GeoB Geographische Breite des Radarpixels mit X-Koordinate *RPX* und Y-Koordinate *RPY*

GeoL Geographische Länge des Radarpixels mit X-Koordinate *RPX* und Y-Koordinate *RPY*

16. Der Gleichung [3.1] liegt, basierend auf einer Formel von Dr. Willi Schmid, IAC, ETH Zürich, die Annahme einer Kugel zu Grunde. Die Ausdrücke (276.5 - RPX) und (1734 - RPY) entsprechen den jeweiligen Differenzwerten zu den Pixeln mit Koordinaten 0° und sind somit abhängig vom betrachteten Bildausschnitt. Die Werte 1.0977 und 37.7535 stehen im Zusammenhang mit der Oberflächenkrümmung und somit auch vom Zoomfaktor des Bildes. Sämtliche Konstanten wurden empirisch bestimmt.

Die Bestimmung der Parameter der zweiten Transformationsgleichungen[17] werden nach dem gleichen Verfahren[18] durchgeführt, um die geographischen Koordinaten in X-/Y-Satellitenpixel-Koordinaten umzurechnen:

[3.2]

$$SPX = \frac{\sqrt{\frac{D \cdot (C\text{-}1)}{-C-1-D(1+D)}}}{0.0006102} + 133 \qquad C = SIN\ \frac{GeoB \cdot \pi}{180}$$

$$SPY = \frac{\sqrt{\frac{D \cdot (C\text{-}1)}{-C-1-D(1+D)}}}{D \cdot 0.0006102} + 835 \qquad D = TAN\ \frac{GeoL \cdot \pi}{180}^{2}$$

SPX X-Koordinate des Satellitenpixels mit geographischer Breite *GeoB* und geographischer Länge *GeoL*

SPY Y-Koordinate des Satellitenpixels mit geographischer Breite *GeoB* und geographischer Länge *GeoL*

Der 0°-Meridian teilt beide Bilder in zwei Zonen: Östliche Längen werden dabei durch positive und westliche Längen durch negative Werte wiedergegeben. Aus diesem Grund wird im IDL™-Code eine Fallunterscheidung für positive und negative Längen vorgenommen:

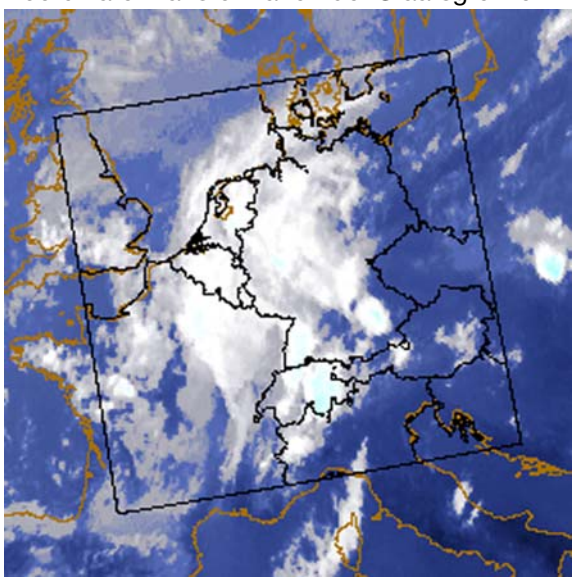
```
PRO glgb_to_pixxy,lon,lat,varPix_X_Sat,varPix_Y_Sat

       xoff = 133
       yoff = 835
       pscal = 0.0006102
       pi = ATAN(1.)*4.

       C = SIN(lat*pi/180.)
       D = TAN(lon*pi/180.)

              IF lon < 0 THEN BEGIN
                     xr = SQRT((C*D^2-D^2)/(-D^2-C*D^2-1-C))*(-1.)
              ENDIF ELSE BEGIN
                     xr = SQRT((C*D^2-D^2)/(-D^2-C*D^2-1-C))
              ENDELSE

       yr = xr/D

       varPix_X_Sat = xr/pscal + xoff

              IF yr/pscal LE yoff THEN BEGIN
                     varPix_Y_Sat = yr/pscal*(-1.) + yoff
              ENDIF ELSE BEGIN
                     varPix_Y_Sat = yr/pscal + yoff
              ENDELSE

       varPix_X_Sat = ROUND(varPix_X_Sat)
       varPix_Y_Sat = ROUND(varPix_Y_Sat)
RETURN
END
```

17. Der Gleichung [3.2] ist, basierend auf einer Formel von Dr. Daniel Lüthi, IAC, ETH Zürich, eine polarstereographische Projektion zugrunde gelegt. Die Konstanten 133 und 835 entsprechen den jeweiligen Differenzwerten zu den Pixeln mit Koordinaten 0° und sind somit abhängig vom betrachteten Bildausschnitt. Die Konstante 0.0006102 steht im Zusammenhang mit der Oberflächenkrümmung und ist somit vom Zoomfaktor des Bildes abhängig. Sämtliche Konstanten wurden für den Bildausschnitt empirisch bestimmt. Sachdienliche Angaben sind auch in [EUMETSAT-MAUH] zu finden.

18. Hierbei wurden 32 markante Satellitenpixel (Eckpunkte der Küstenlinien) zur Kalibrierung verwendet.

Zur Verifizierung der Parameter der Koordinatentransformationsgleichungen werden die Staatsgrenzen des Radarbildes dem Satellitenbild überlagert:

ABBILDUNG 3-2 Koordinatentransformation der Staatsgrenzen

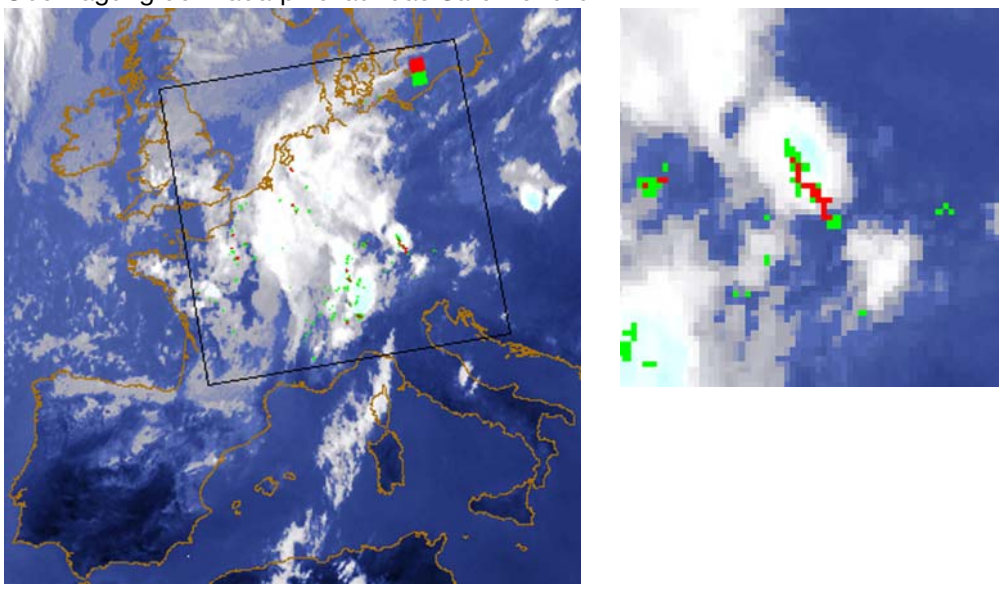


Die Kontrolle der Küstenlinien gibt Aufschluss über die Genauigkeit.

Der Vergleich der Küstenlinien im Nordwesten und Südosten zeigt eine gute Übereinstimmung. Bedingt durch die schlechtere Auflösung des Satellitenbildes kann keine grössere Präzision als +/- 2 Satellitenpixel erwartet werden.

Mit den nun bekannten Koordinatentransformationsgleichungen ist es möglich, sämtliche Radar-Echos an geographisch korrekter Position auf das Satellitenbild zu bringen:

ABBILDUNG 3-3 Übertragung der Radarpixel auf das Satellitenbild



links: Die stärksten zwei Radar-Echos (rote Pixel: 55 dBZ, grüne Pixel: 46 dBZ) wurden dem Satellitenbild überlagert. Schwarz ist der Bereich des Radarbildes eingezeichnet. Die beiden rot und grün dargestellten Flächen oben rechts im Bereich des Radarbildes entsprechen den Legenden des Radarbildes (siehe Abbildung 2-3 auf Seite 12).

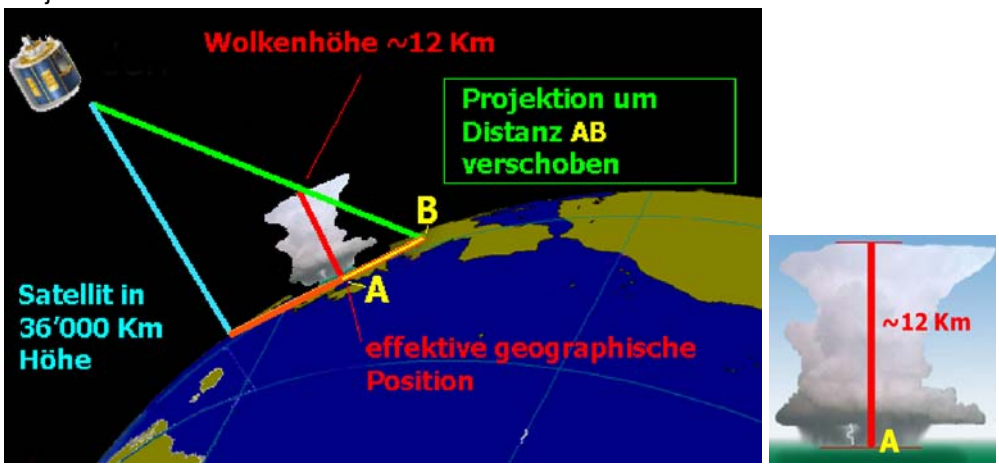
rechts: Vergrösserung des Bildbereiches um eine Gewitterzelle.

Die vergrösserte Ansicht in Abbildung 3-3, rechts zeigt, dass die Position des Radar-Echos nicht exakt der Wolkenposition entspricht, sondern die Radar-Echos zu weit südwestlich gezeichnet werden. Es ist denkbar, dass hohe Wolken unter dem flachen Bildaufnahmewinkel durch Meteosat nicht über der korrekten geographischen Position abgebildet werden (siehe Kapitel 3.2).

3.2 Korrekturterm für hohe Wolken auf dem Satellitenbild

Als Folge der Position von Meteosat über dem Schnittpunkt von Aequator und Greenwich-Meridian werden hohe geographische Breiten unter einem flacheren Winkel aufgenommen als tiefe Breiten. Objekte in sehr grosser Höhe über Boden werden vom Satelliten nicht an ihrer Position orthogonal zum Erdboden abgebildet, sondern auf dem Satellitenbild in nordöstlicher Richtung[19] verschoben.

ABBILDUNG 3-4 Projektion sehr hoher Wolken aus Sicht des Satelliten

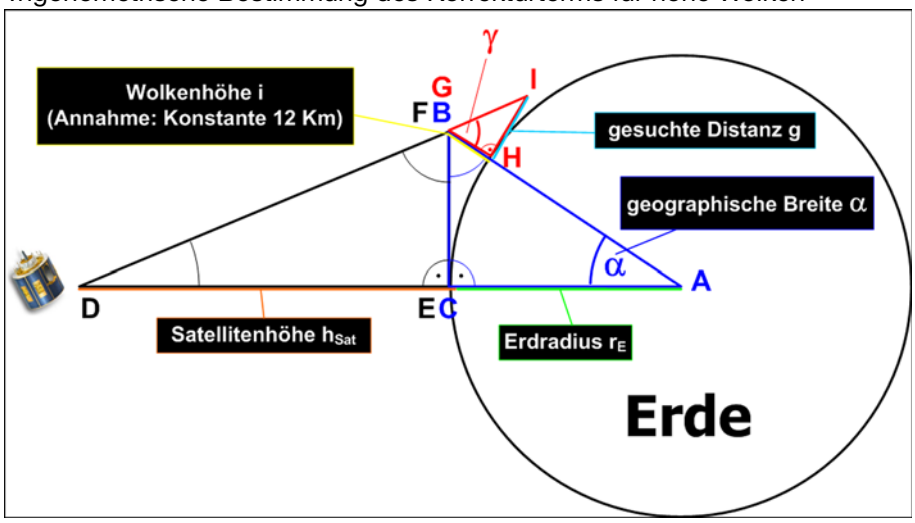


Die Projektion des Wolkentops von hohen Wolken (Höhen von 8-12 Km) wird durch den Satelliten um die Distanz AB verschoben aufgezeichnet. Die Verschiebung findet in Richtung der Verbindungslinie der geographischen Positionen von Wolke und Satellit statt.

19. Dies gilt für Objekte auf der nördlichen Hemisphäre mit östlicher relativer Position zum Satelliten. Objekte mit westlicher relativer Position zum Satelliten werden auf der nördlichen Hemisphäre zu weit nordwestlich abgebildet.

Die Distanz zwischen der Projektion des Wolkentops und der effektiven orthogonalen geographischen Position lässt sich trigonometrisch in Abhängigkeit der geographischen Koordinaten bestimmen:

ABBILDUNG 3-5 Trigonometrische Bestimmung des Korrekturterms für hohe Wolken



Schematische Darstellung zur Bestimmung der Projektionsdistanz in N/S-Richtung. Die Berechnung der Projektionsdistanz in E/W-Richtung erfolgt auf die gleiche Art, wobei für den Winkel α statt der geographischen Breite die absolute geographische Länge eingesetzt wird.

Daraus folgt Gleichung [3.3], die sowohl für die Verschiebung in N/S-Richtung (abhängig von der geographischen Breite) wie auch jene in E/W-Richtung (abhängig von der geographischen Länge) anzuwenden ist:

[3.3]

$$g = \mathrm{TAN}\ 90 + \alpha - \mathrm{ATAN}\ \frac{h_{Sat} + r_E - (r_E + i)\cdot \mathrm{COS}(\alpha)}{(r_E + i)\cdot \mathrm{SIN}(\alpha)} \cdot i$$

g	Projektionsdistanz in Abhängigkeit des Winkels α [m]
α	geographische Länge (Berechnung der Projektionsdistanz in W/E-Richtung) oder geographische Breite (Berechnung der Projektionsdistanz in N/S-Richtung))
h_{Sat}	Distanz des Satelliten über dem Erdboden [konst. 36‘000‘000 m]
r_E	Erdradius [6‘375‘000 m]
i	Wolkenhöhe, als konstant angenommen [12‘000 m]

In folgender IDL^{TM}-Funktion wird die Projektionsdistanz g bestimmt und anschliessend in Grad umgerechnet. Hierbei findet gemäss Übergabevariable *type*[20] die Fallunterscheidung statt, ob eine Abweichung in Richtung der Längengrade oder der Breitengrade berechnet werden soll:

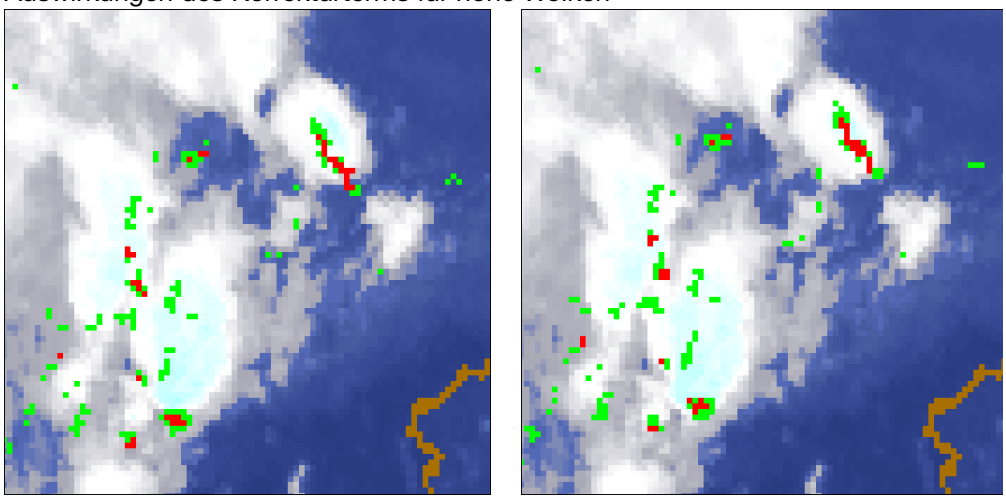
```
FUNCTION cloud_deviation_calc, varAngle, type

        ;conversion to uppercase
        type = STRUPCASE(type)

        ;set constants
        Pi = ATAN(1.)*4.
        varSatH = 36000000.
        varEarthRad = 6375000.
```

20. Die Variable *type* enthält den Wert ‚LONGITUDE‘ oder ‚LATITUDE‘ des Typs STRING.

```
        varCloudH = 12000. ;average estimate of cloud height

        ;conversion of coord.-types
        varAngle = varAngle * Pi / 180.
        a = varSatH + varEarthRad - (varEarthRad + varCloudH) * COS(varAngle)
        b = (varEarthRad + varCloudH) * SIN(varAngle)

        ;calculation of deviation in [m]
        varDelta = TAN(90. * Pi / 180. + varAngle - ATAN(a/b)) * varCloudH

                ;conversion to degrees & differentiation: longitudes / latitudes
                IF type EQ 'LATITUDE' THEN BEGIN

                        varDelta_degree = varDelta / (2. * varEarthRad * Pi / 360.)

                ENDIF ELSE BEGIN

                        ;calculation with earth size on latitude x
                        varDelta_degree = varDelta / (2. * (varEarthRad * SIN(varAngle)) * Pi
                        / 360.)

                ENDELSE

RETURN,varDelta_degree

END
```

Der nun berechnete Delta-Wert (in Grad) wird vor der Koordinatentransformation der Radarpixel zur berechneten geographischen Position addiert (oder subtrahiert, je nach geographischer Position des Pixels) und anschliessend in X-/Y-Koordinaten der Satellitenpixel umgerechnet. Auf diese Weise werden die Radar-Echos auf dem Satellitenbild in korrigierter Position abgebildet.

ABBILDUNG 3-6 Auswirkungen des Korrekturterms für hohe Wolken



Transformation der Koordinaten ohne (links) und mit (rechts) Korrekturterm.

Wie auf Abbildung 3-6, rechts zu erkennen ist, beeinflusst diese Korrektur die Koinzidenz der Radar-Echos mit den auf dem Satellitenbild erkennbaren Gewitterzellen positiv. Erst die Statistik über mehrere tausend Bilder wird zeigen, ob der eingeführte Korrekturterm einen sinnvollen Einfluss auf die Übertragungspositionen der Hagelzellen hat.

3.3 Bestimmung charakteristischer Grössen potentieller Hagelzellen auf dem Satellitenbild

Die Ermittlung potentieller Hagelzellen mit Hilfe von Radar kann durch die Bestimmung der Höhe des 45 dBZ Echos im Verhältnis zur Nullgradgrenze bestimmt werden (siehe Kapitel 1.3.3). Da die Temperatur auf Radarbildern nicht verfügbar ist, wird im Folgenden alleine das stärkste verfügbare Radar-Echo von 55 dBZ verwendet, um potentielle Hagelzellen zu lokalisieren. Dabei ist nicht ausgeschlossen, dass eine Minderheit der Zellen statt Hagel nur Starkregen bringt. Durch den höheren Echo-Grenzwert von 55 dBZ wird die Vernachlässigung des Temperaturkriteriums teilweise kompensiert.

3.3.1 Erstellung der Statistik

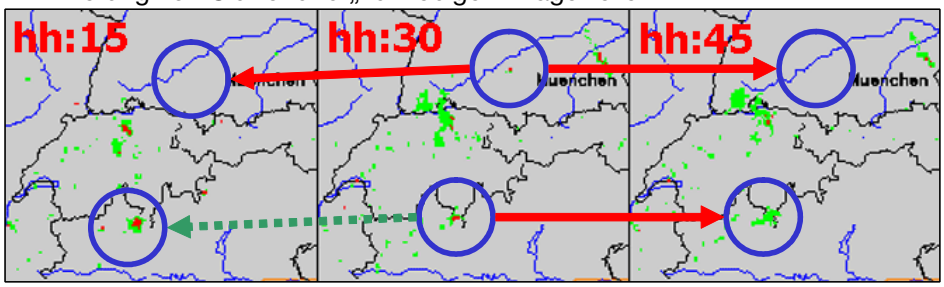
Mit Unterstützung der Radarbilder werden auf den Satellitenbildern typische Parameter gesucht und bestimmt, um in einem weiteren Schritt ohne Hilfe des Radars direkt auf dem Satellitenbild nach potentiellen Hagelzellen zu suchen. Die Statistik zur Bestimmung dieser Parameter wird mit Radar- und Satellitenbildern der Sommermonate der Jahre 1997 bis 1999 erstellt. Die nachfolgenden Schritte werden in IDL™ umgesetzt und in einer Schlaufe auf den Datensatz angewendet.[21]

3.3.1.1 Identifizierung von Hagelzellen auf Radarbildern

Obwohl die Radarstationen mit einem Clutter-Filter ausgestattet sind, kommt es vor, dass in Realität nicht jedes Echo durch eine Gewitterzelle ausgelöst wird. Es können Effekte durch die Orographie, Flugobjekte oder Defekte am Radar auftreten, die durch den Filter nicht eliminiert werden. Um die Datenqualität zu verbessern, werden die Radardaten vor dem Übertragen auf das Satellitenbild gefiltert: In einem ersten Schritt werden die Bilder im Schnellverfahren von Auge geprüft, um diejenigen zu eliminieren, die infolge technischer Defekte einer Radar-Anlage offensichtliche Fehler[22] enthalten. In einem zweiten Schritt werden nur rote Pixel weiterverarbeitet, bei denen sich auf dem vorangehenden oder nachfolgenden Bild innerhalb eines Umkreises von 15 Pixel[23] mindestens ein rotes Pixel finden lässt. Damit wird erreicht, dass sehr kurzlebige Zellen oder Clutter eliminiert werden (siehe Abbildung 3-7).

21. Für den Ablauf werden immer 4 Dateien benötigt: Radar- und Satellitenbild gleicher Zeit und je ein vorangehendes und nachfolgendes Radarbild zum Filtern von Clutter. Fehlt eines der Bilder, wird der Vorgang abgebrochen und zum nächsten Bild übergegangen. Die Rechenzeit für diesen Vorgang beträgt auf einem Intel® Pentium® 4 2.4 GHz um die 10 Stunden.
22. Durch technischen Defekt kann es vorkommen, dass der ganze Bereich rund um eine Radarstation mit starken Echos markiert ist. Diese auffälligen, roten Kreise sind von Auge gut zu erkennen.
23. 15 Pixel entsprechen einer Distanz von ca. 40 km, die die Gewitterzelle durchwandern muss, um aus dem Akzeptanzbereich zu fallen. Pro 15 Minuten wird ein Radarbild erstellt. Somit werden Zellen mit Geschwindigkeiten kleiner 160 km/h auf zwei aufeinanderfolgenden Bildern innerhalb des Toleranzkreises auftauchen, falls das Radar-Echo noch gross genug ist.

ABBILDUNG 3-7 Eliminierung von Clutter und „kurzlebigen“ Hagelzellen



Drei Radarbildausschnitte, im Abstand von jeweils 15 Minuten aufgenommen. Die blauen Kreise mit Radius von 15 Pixel definieren den Umkreis, innerhalb dem auf vorangehendem **oder** nachfolgendem Bild ein weiteres rotes Pixel zu finden sein muss, damit die Zelle nicht ignoriert wird.

obere Reihe: Das rote Pixel im oberen Kreis auf Bild *hh:30 (mitte)* taucht weder im Bild *hh:15* noch im Bild *hh:45* im Umkreis von 15 Pixel auf. Es wird somit ignoriert (roter Pfeil, ausgezogene Linie).

untere Reihe: Das rote Pixel im untern Kreis auf Bild *hh:30 (mitte)* hat auf Bild *hh:15* ein benachbartes rotes Pixel. Obwohl auf dem nachfolgenden Bild kein rotes Pixel im Umkreis von 15 Pixel zu finden ist, wird diese Zelle für die weiteren Berechnungen akzeptiert (grüner Pfeil, unterbrochene Linie).

Dieser Filter ist sehr einfach und effizient, schliesst aber nicht aus, dass ein rotes Pixel einer anderen Zelle in den Toleranzkreis fällt, so dass das zu testende Pixel irrtümlicherweise akzeptiert wird.

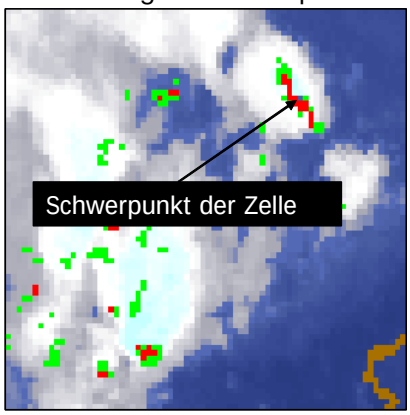
3.3.1.2 Übertragung der Hagelzellen unter Berücksichtigung des Korrekturterms

In diesem Schritt werden sämtliche roten Radar-Pixel auf dem Radarbild lokalisiert und auf das Satellitenbild übertragen (siehe Abbildung 3-3 auf Seite 18). Der Korrekturterm für hohe Wolken (siehe Kapitel 3.2) wird dabei angewendet.

3.3.1.3 Bestimmung der Schwerpunkte der einzelnen Hagelzellen

Als nächstes werden die Schwerpunktskoordinaten jeder einzelnen Zelle auf dem Satellitenbild bestimmt. Dabei werden die arithmetischen Mittel aller X- und Y-Koordinaten der nun auf das Satellitenbild übertragenen Radar-Echos gebildet und auf ganze Zahlen gerundet. Der Zellenschwerpunkt wird als Zentrum der Zelle betrachtet.

ABBILDUNG 3-8 Bestimmung der Schwerpunktskoordinaten einer Hagelzelle



X-/Y-Koordinaten des Schwerpunktes entsprechen dem arithmetischen Mittel aller X-Koordinaten (Y-Koordinaten) der Pixel einer Zelle.

3.3.1.4 Suche des kühlsten Nachbarpixels

Zum Aufspüren der zum Radar-Echo zugehörigen Wolke auf dem Satellitenbild wird im Umkreis von r Pixel um das Hagelzentrum das „kühlste Pixel“ mit minimalem Abstand

zum Zentrum gesucht. Der Suchradius r setzt sich zusammen aus drei Komponenten ($r = r_1 + r_2 + r_3$):

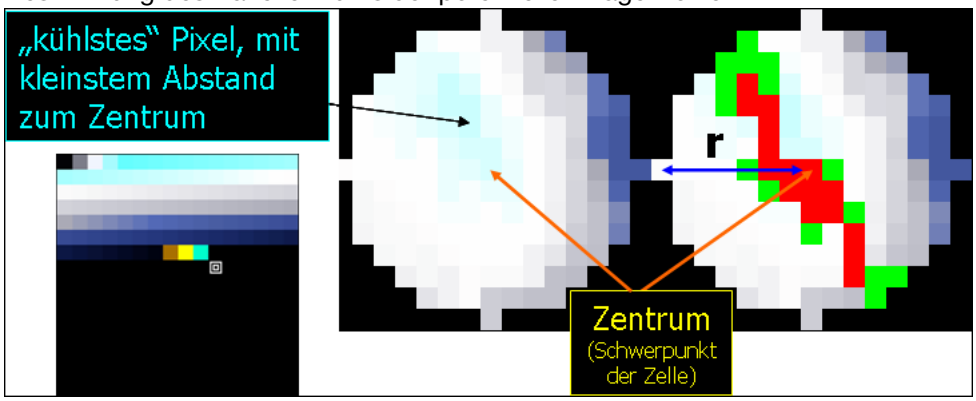
- Dem approximierten Kreisradius aller roten Pixel der Zelle (Fläche A):

[3.4]

$$r_1 = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

- Der Genauigkeit der Koordinatenübertragung vom Radar- auf das Satellitenbild von $r_2 = 2$ Pixel.
- Einem Translationswert von $r_3 = 3$ Pixel (entspricht ca. 20 km), der einen Fall aus 5‘000 m Höhe mit Seitenwinden berücksichtigt[24].

ABBILDUNG 3-9 Bestimmung des Kältezentrums der potentiellen Hagelwolke



Im Umkreis von r Pixel zum Zentrum der Zelle (Schwerpunkt) wird das Pixel bestimmt, das dem kühlsten Farbwert auf dem Index (unten links im Bild) entspricht.

Das nun bestimmte Kältezentrum wird als Kern der Wolke betrachtet und dient für die weiteren Berechnungen als Startpunkt.

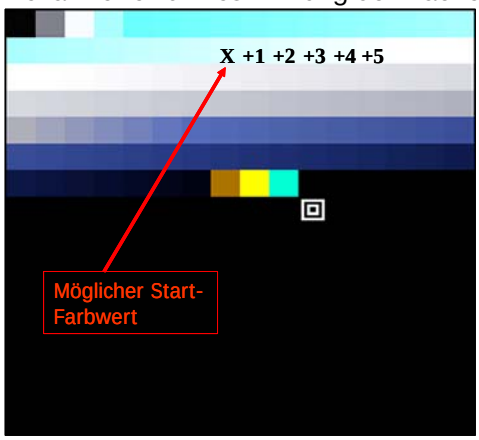
3.3.1.5 Bestimmung der Flächen innerhalb verschiedener Gradienten

Wie in Abschnitt 2.2.1 auf Seite 14 erläutert wird, ist eine potentielle Hagelzelle auf dem Satellitenbild charakterisiert durch einen „kalten“ Farbwert im Zentrum und einen stark abfallenden Temperaturgradienten am Rande der Zelle.

Auf dem Satellitenbild kann dieser Gradient wie folgt numerisch erfasst werden:
Als erstes wird der Farbwert des nun gefundenen Kältezentrums bestimmt. Ausgehend von diesem Farbwert werden die fünf Farben (Delta-Werte) definiert, die jeweils eine Farbstufe wärmer sind als der vorangehende Wert (siehe Abbildung 3-10).

24. Hagelkörner können durch Winde während dem freien Fall seitwärts transportiert werden, so dass die Ankunft nicht exakt unter der Wolke stattfindet. Das Radar-Echo fällt in dieser Situation nicht mit der Wolkenposition zusammen, so dass eine Toleranz von 3 Pixel zugewiesen wird.

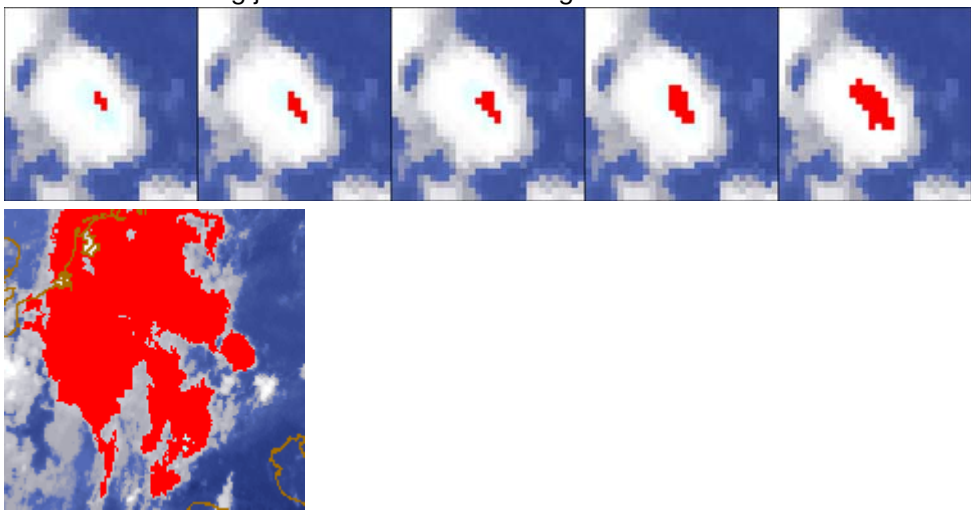
ABBILDUNG 3-10 Delta-Werte zur Bestimmung der Flächen auf verschiedenen Farbniveaus



X markiert das Kältezentrum auf dem Farbindex des Satellitenbildes. Die je eine Farbstufe „wärmeren" Farben werden hier mit +1 bis +5 markiert.

Nun wird für jeden dieser fünf Delta-Werte die Fläche bestimmt, die alle Pixel um das Zentrum bis hin zu diesem Farbgrenzwert umfasst. Die Fläche nimmt dabei mit zunehmendem Delta-Wert in Folge der grösseren Toleranz zu. Weist die potentielle Gewitterzelle einen sehr flachen Gradienten auf, wird die Fläche schon beim ersten Delta-Wert riesig gross und kann als Hagelzelle verworfen werden. Ist die Fläche bei kleinen Delta-Werten im vernünftigen Grössenbereich einer Hagelzelle und nimmt - wenn überhaupt - erst bei grösseren Delta-Werten riesige Dimensionen an, handelt es sich um eine potentielle Hagelzelle. Denn solange die Fläche auf dem Wolkentop bestimmt wird, bleibt die Fläche klein. Sobald der Gradient am Rande der Wolke überwunden ist, nimmt die Fläche sofort grosse Dimensionen an.

ABBILDUNG 3-11 Flächenbestimmung je Delta-Wert bei einer Hagelzelle



oben: Die Fläche nimmt mit zunehmendem Delta-Wert (von links nach rechts) infolge der grösseren Toleranz ebenfalls zu und überwandert dabei den Temperaturgradienten am Wolkenrand nicht. Diese Zelle wird als Hagelzelle identifiziert. Falls diese Zelle den Wolkenrand überschreiten und danach eine gosse Fläche markieren würde, könnte sie trotzdem als Hagelzelle akzeptiert werden, da sie bei kleinen Delta-Werten Flächenstabilität zeigt (solange die Fläche auf dem Wolkentop liegt).

unten: Eine Zelle mit wärmerem Zentrum und flacherem Gradienten markiert schon beim ersten Delta-Wert riesige Flächen und kann als Hagelzelle verworfen werden.

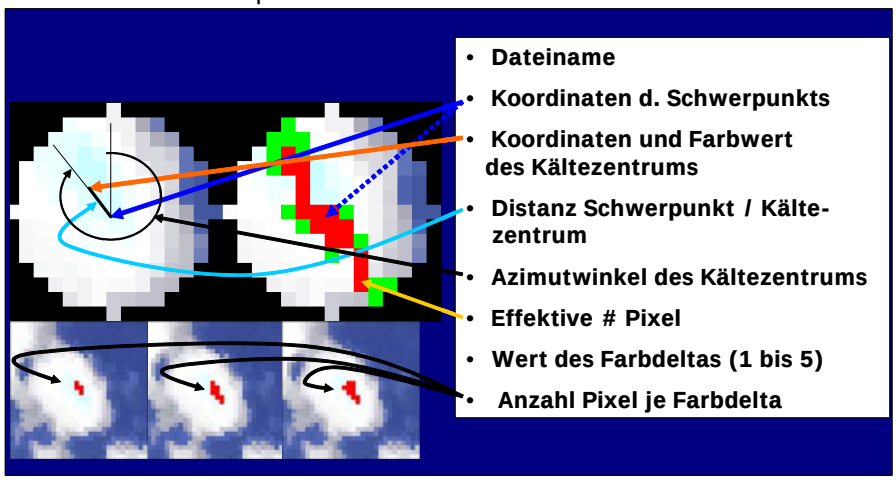
3.3.1.6 Export in ein Log-File

Die nun bestimmten Parameter werden in ein Textfile exportiert. Dabei werden folgende Werte registriert:

- Der Name der Datei (enthält Datum und Aufnahmezeit)
- Die Koordinaten des Schwerpunktes des übertragenen Hagel-Echos auf dem Satellitenbild
- Die Koordinaten und der Farbwert des Kältezentrums (Kern der Wolke)
- Die Distanz zwischen Schwerpunkt und Kältezentrum (in Pixel)
- Der Azimutwinkel des Kältezentrums, gesehen vom Schwerpunkt
- Die effektive Anzahl Pixel der Hagelzelle (Radar-Echo auf dem Satellitenbild)
- Die Anzahl Pixel, die je Farb-Delta bestimmt werden

Der so entstandene Datensatz wird anschliessend ausgewertet, um die charakteristischen Grössen für die nachfolgende Direktsuche auf dem Satellitenbild zu bestimmen.

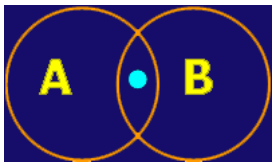
ABBILDUNG 3-12 Parameter für den Export in eine Datei



3.3.2 Auswertung der Statistik

In den Sommermonaten der Jahre 1997 bis 1999 konnten insgesamt 25‘469 Hagelzellen auf den Radarbildern identifiziert werden. Da nicht ausgeschlossen ist, dass für mehrere Radar-Echos auf dem Satellitenbild ein gemeinsames, identisches Kältezentrum gefunden wird, tauchen einige Kältezentren mehrfach in der Statistik auf. Der Bereinigte Datensatz, ohne mehrfache Zellen auf dem Satellitenbild, enthält 23‘211 Zellen.

ABBILDUNG 3-13 Gemeinsames Kältezentrum für mehrere Zellen



Zwei Zellen A und B können in ihrem Suchradius ein gemeinsames Kältezentrum finden, das beiden Hagelzellen als Wolkenmittelpunkt zugeteilt wird. Somit werden die Koordinaten und der Farbwert dieses Pixels mehrfach in die Statistik aufgenommen (liegt das Kältezentrum innerhalb der Suchradien von N Zellen, wird das Zentrum N mal erfasst).

Die beschreibenden statistischen Grössen können nachfolgender Tabelle entnommen werden:

TABELLE 3-1 Beschreibende statistische Grössen (Datensatz 1997-99)

Grösse	Wert	Bemerkung
Anzahl erfasste Zellen	23‘211	25‘469 inkl. mehrfache Kältezentren
Kleinste / grösste Zelle	1 S-Pixel[a] / 110 S-Pixel[a]	Gebiet zusammenhängender Pixel
Durchschnittlicher Farbindex[b]	37	Standardabweichung: 20.5; Median: 30
„kältester“ / „wärmster“ Farbindex[c]	4 / 83	Farbwert 4 entspricht dem „kühlstmöglichen“ Farbwert
Durchschnittlicher Abstand des Zellenschwerpunkts zum Kältezentrum[c]	3.98 S-Pixel[a]	Standardabweichung: 1.73 S-Pixel[a]; Median: 4.24 S-Pixel[a]
Durchschnittliche Grösse einer Zelle[c]	2.6 S-Pixel[a]	Standardabweichung: 3.0 S-Pixel[a]; Median: 2.0 S-Pixel[a]

a. S-Pixel steht für Satellitenpixel

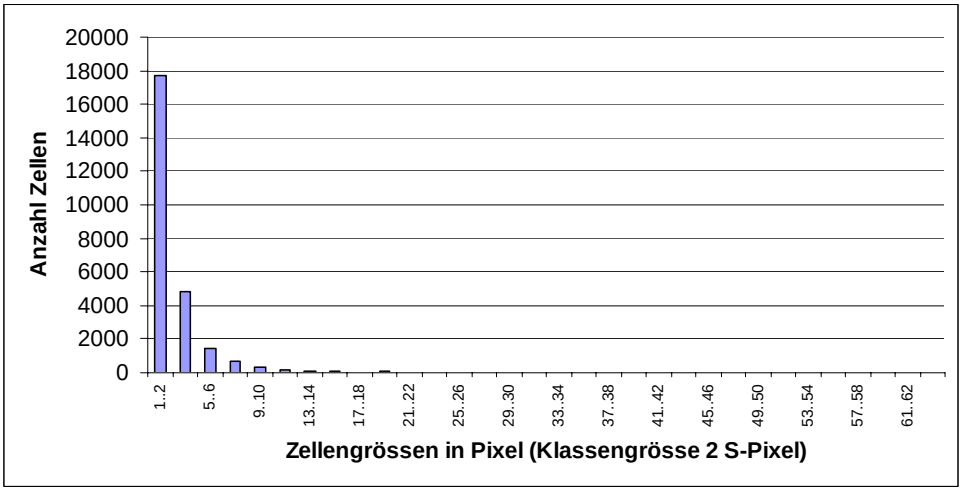
b. Berechnet am bereinigten Datensatz mit 23‘211 Zellen

c. Berechnet am kompletten Datensatz mit 25‘469 Zellen

Die enormen Unterschiede der Minimal- und Maximalwerte sowohl bei den mittleren Zellengrössen als auch bei den Farbwerten werden durch die hohen Standardabweichungen bestätigt, die auf hohe Streuungen um die Mittelwerte hinweisen. Aus diesem Grund wird dem Median grössere Aufmerksamkeit geschenkt, da er stabiler auf Extremwerte reagiert.

Die Häufigkeitsverteilung der Hagelzellenflächen, die vom Radar detektiert und auf das Satellitenbild übertragen worden sind, liefert folgendes Bild (siehe Abbildung 3-14):

ABBILDUNG 3-14 Grössenverteilung der Hagelzellenflächen auf dem Sat.-Bild, detektiert mit Radar

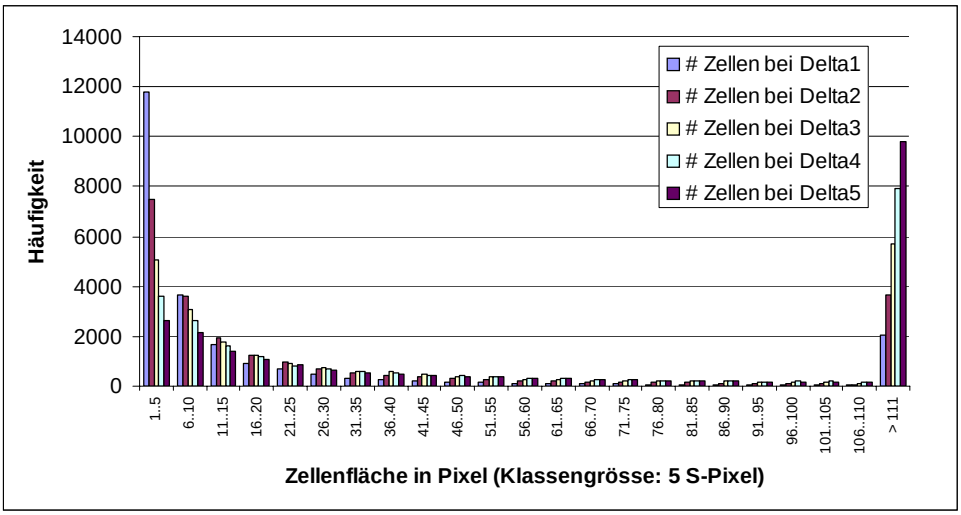


Berechnet am kompletten Datensatz mit 25‘469 Zellen.

Die meisten Hagelzellen weisen auf dem Satellitenbild Flächen von 1 bis 2 Pixel auf, was angesichts der Kantenlänge eines Satellitenpixels von ca. 6.5 Km nicht erstaunt. Über 99.1 % aller Zellen weisen eine Fläche < 15 Pixel auf.

Die Häufigkeitsverteilungen der Flächen, die bei den fünf Delta-Werten (siehe Abschnitt 3.3.1.5 auf Seite 24) berechnet werden, ergibt folgende Verteilung (siehe Abbildung 3-15):

ABBILDUNG 3-15 Verteilung der errechneten Zellenflächen bei verschiedenen Farb-Deltas

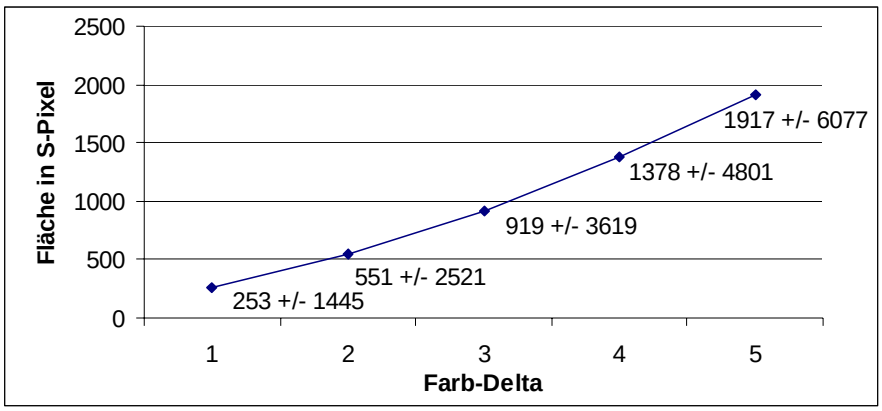


Je Klasse von 5 Pixel werden die Zellenhäufigkeiten pro Delta (Delta 1 bis 5, jeweils von links nach rechts) aufgetragen. Die letzte Klasse (ganz rechts im Bild) fasst die restlichen Klassen > 111 zusammen.

Mit zunehmendem Delta-Wert wird die Suchtoleranz grösser. Dies bedeutet, dass kleine Delta-Werte zu kleinen Zellenflächen führen. Dies ist auch in Abbildung 3-15 zu sehen: in den ersten zwei Klassen dominiert Delta 1 die höheren Farb-Deltas, wohingegen ab Klasse 3 die höheren Farb-Deltas an Bedeutung gewinnen.

Wird die durchschnittliche Fläche (Anzahl Pixel), die je Farb-Delta gefunden worden ist, aufgezeichnet, ergibt dies folgendes Bild (siehe Abbildung 3-16):

ABBILDUNG 3-16 Durchschnittliche errechnete Flächen in Pixel pro Farb-Delta

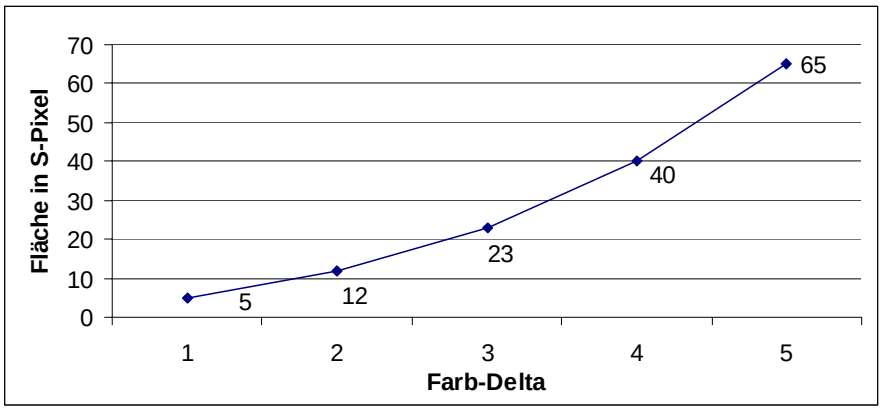


Berechnet am bereinigten Datensatz mit 23‘211 Zellen. Neben den Datenpunkten ist der numerische Wert mit Standardabweichung angegeben.

Infolge der extrem grossen Fläche, die bei sehr flachen Gradienten bestimmt werden (siehe unteres Bild in Abbildung 3-11 auf Seite 25), nehmen auch bei dieser Betrachtung die einzelnen arithmetischen Mittel extreme, unrealistische Grössen an (zur Erinnerung: die durchschnittliche Zellengrösse, bestimmt mit Hilfe des Radars, beträgt 2.6 Pixel!).

Die Standardabweichungen nehmen dabei extreme Werte an. Auch hier hilft der Medianwert weiter (siehe Abbildung 3-17):

ABBILDUNG 3-17 Medianwerte der errechneten Flächen in Pixel pro Farb-Delta

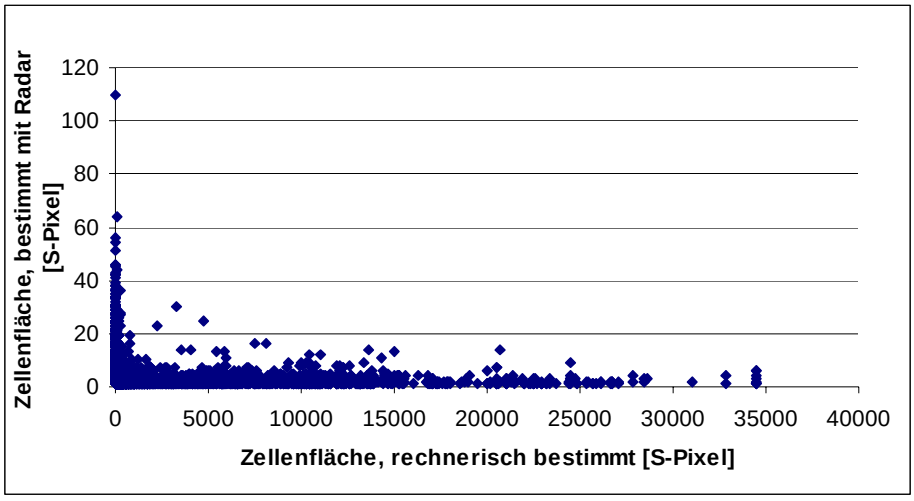


Berechnet am bereinigten Datensatz mit 23‘211 Zellen.

Als Folge des starken Temperaturgradienten am Wolkenrand wird erwartet, dass die Kurve ebenfalls eine Steigungsänderung erfährt, sobald die Fläche des Wolkentops verlassen wird. Als beste Näherung lässt sich eine Gerade durch den Nullpunkt und den Wert bei Farb-Delta 1 und 2 legen. Die Daten, die mit Hilfe von Farb-Delta 2 ermittelt worden sind, werden somit für die nachfolgenden Berechnungen weiterverwendet.

Des Weiteren kann kein Zusammenhang zwischen der Grösse von Zellen, die vom Radar detektiert werden und den korrespondierenden Flächen auf dem Satellitenbild, die mit Hilfe der Temperaturgradienten berechnet werden, festgestellt werden (siehe Abbildung 3-18):

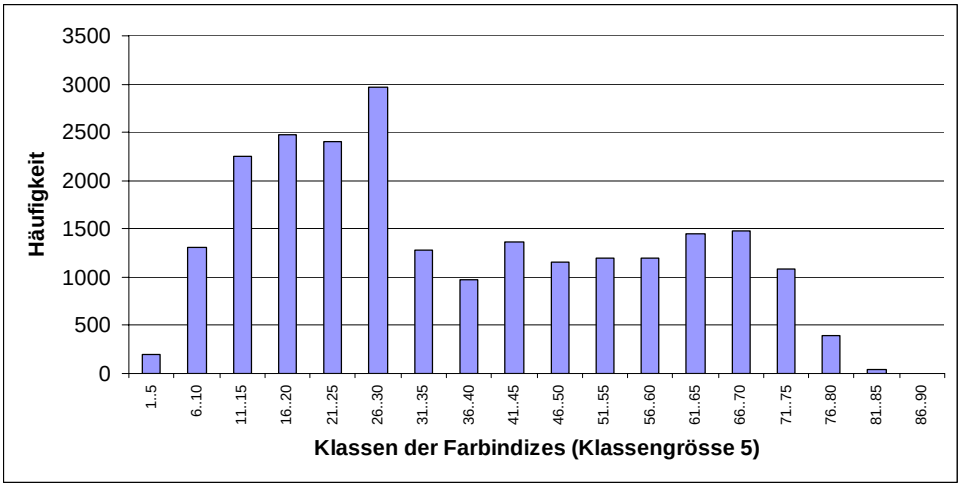
ABBILDUNG 3-18 Scatter-Plot der Flächen der Hagelzellen, bestimmt mit Radar / durch Berechnung



Berechnet am bereinigten Datensatz mit 23‘211 Zellen unter Berücksichtigung der mit Farb-Delta 2 bestimmten Flächen.

Die Häufigkeitsverteilung der Farbindizes ergibt folgendes Bild (siehe Abbildung 3-19):

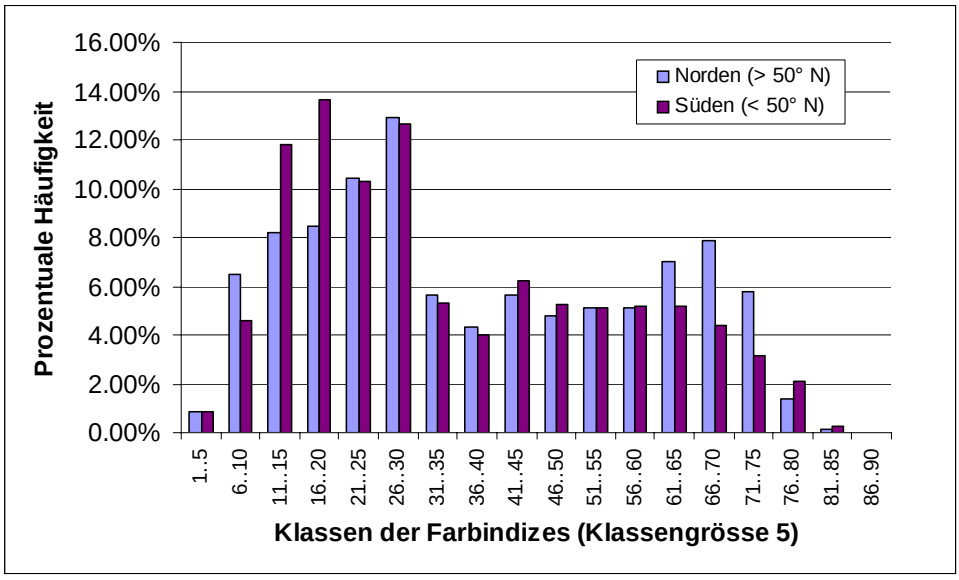
ABBILDUNG 3-19 Häufigkeitsverteilung der Farbindizes



Berechnet am bereinigten Datensatz mit 23‘211 Zellen.

In dieser Abbildung sind zwei Gruppierungen zu erkennen: links im Bild (bis Farbindex 30) die kühleren und rechts im Bild die eher wärmeren Wolkenzentren. Da die Hagelbildung nur in sehr kalten Wolken stattfinden kann, kommt die Vermutung auf, dass es sich bei den zu warmen Farbindizes um die Zentren von Clutter handelt und nur die links im Bild erkennbaren Zellen als konvektive Hagelzellen in sehr grosser Höhe identifiziert werden können. Um regionale Unterschiede festzustellen, wird eine Fallunterscheidung Nord / Süd vorgenommen, die durch die 50°-Breitenlinie definiert worden ist (siehe Abbildung 3-20):

ABBILDUNG 3-20 Häufigkeitsverteilung der Farbindizes, Fallunterscheidung Nord / Süd



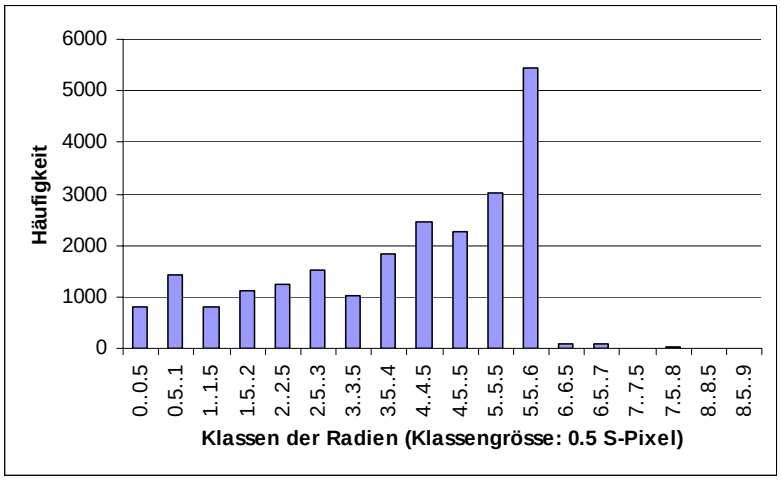
Berechnet am bereinigten Datensatz mit 23‘211 Zellen. Gegenüberstellung der 13‘449 Zellen mit Position > 50° N (jeweils linker Balken) und den 9‘762 Zellen mit Position < 50° N (jeweils rechter Balken). Die beiden Gruppen wurden je auf 100 % normiert.

Werden die beiden Gruppen prozentual verglichen fällt auf, dass:

- in der Südregion weniger Zellen durch den Radar erfasst worden sind (unabhängig von der Grösse).
- die Südregion prozentual mehr Zellen aufweist, die Farbindizes zwischen 11 und 20 haben.
- die Nordregion prozentual mehr Zellen aufweist, die Farbindizes zwischen 60 und 75 haben, was auf Clutterbildung in den Küstenregionen hindeuten könnte.
- beide Regionen bei den Farbindizes zwischen 21 und 60 vergleichbare Werte verzeichnen.

Des Weiteren wurden die Abstände zwischen dem Schwerpunkt der Hagelzelle und dem ihr zugehörigen Kältezentrum (siehe Abschnitt 3.3.1.4 auf Seite 23) und die Azimutwinkel ausgewertet (siehe nachfolgende Abbildungen):

ABBILDUNG 3-21 Häufigkeitsverteilung der Abstände (Schwerpunkt Hagelzelle - Kältezentrum)

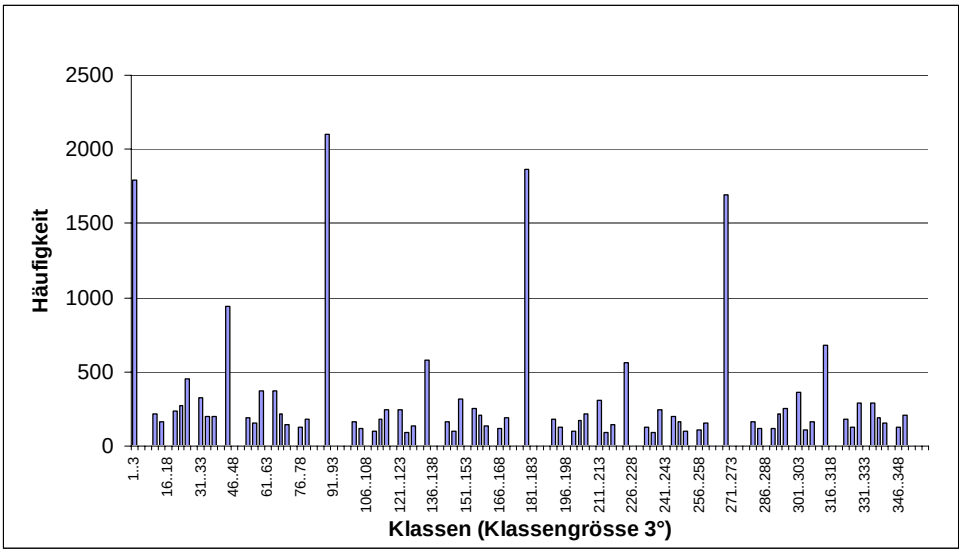


Berechnet am bereinigten Datensatz mit 23‘211 Zellen.

Der am häufigsten vorkommende Abstand liegt zwischen 5.5 und 6.0 Satellitenpixel. Folgende fünf Kombinationen aus Delta-X/Delta-Y sind denkbar: 5/3, 3/5, 4/4, 6/0, 0/6. Alle anderen Abstände weisen kleinere Häufigkeiten auf.

Die Verteilung der Azimutwinkel[25] zeigt ein auffälliges Muster: Alle vielfachen von 45° weisen eine wesentlich höhere Häufigkeit auf, als alle anderen Winkel. Dabei heben sich die 90°-Winkel nochmals deutlich von den übrigen 45°-Vielfachen ab (siehe Abbildung 3-22).

ABBILDUNG 3-22 Häufigkeitsverteilung der Azimutwinkel (Schwerpunkt Hagelzelle - Kältezentrum)



Berechnet am bereinigten Datensatz mit 23'211 Zellen. Zusätzlich sind 815 exakte Treffer (Koinzidenz von Schwerpunkt der Hagelzelle und gefundenem Kältezentrum) zu verzeichnen.

Diese Verteilung kann wie folgt erklärt werden: durch die diskreten Niveaus, die bei Pixelkoordinaten nur möglich sind, werden Vielfache von 45°-Winkeln bevorzugt auftreten, falls die Distanz zwischen den beiden Messpunkten sehr kleine Pixelwerte annimmt (siehe Abbildung 3-23).

ABBILDUNG 3-23 Wahrscheinlichkeiten für n*45°-Winkel in Abhängigkeit verschiedener Radien

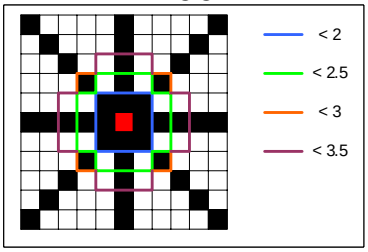
Wahrscheinlichkeit für n*45°:

r < 2.0: 100%

r < 2.5: 60%

r < 3.0: 67%

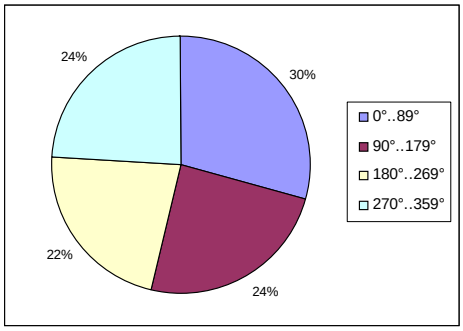
r < 3.5: 56%



25. Winkel, unter dem ein Beobachter, der im Schwerpunkt der Hagelzelle steht, das Kältezentrum der potentiellen Hagelwolke sieht. Der Azimutwinkel bewegt sich zwischen 0° und 360° und wird im Uhrzeigersinn gemessen.

Wird die Verteilung der Winkel nur nach den vier Quadranten aufgeschlüsselt, treffen je Quadrant beinahe gleichviele Ereignisse ein (siehe Abbildung 3-24):

ABBILDUNG 3-24 Häufigkeitsverteilung der Azimutwinkel, 4 Klassen à 90°



Berechnet am bereinigten Datensatz mit 23‘211 Zellen.

Diese Verteilung bestätigt den eingeführten Korrekturterm für hohe Wolken, der in Abschnitt 3.2 auf Seite 19 beschrieben worden ist. Würde dieser Korrekturterm die relative Lage der Hagelschwerpunkte zu den Kältezentren beeinflussen, müsste Abbildung 3-24 eine ungleichmässigere Verteilung zeigen.

3.3.3 Zwischenergebnisse aus der Statistik

Um die Direktsuche nach potentiellen Hagelzellen auf dem Satellitenbild in Angriff zu nehmen, werden folgende charakteristischen Parameter aus den bisherigen Erkenntnissen bestimmt:

- Der **Farbindex** des Zentralpixels der potentiellen Hagelzelle muss **kleiner 35** sein. Dieser Wert wird in der Grössenordnung des Mittelwerts (37) und des Medians (30) gewählt.
- Für das **Farb-Delta** wird Stufe **2** gewählt. Dieser Wert geht aus der linearen Approximation durch die zwei ersten Delta-Werte und dem Nullpunkt in Abbildung 3-17 auf Seite 29 hervor.
- Die **Fläche** der potentiellen Hagelzelle darf **nicht grösser als 15 Pixel** sein. Dies geht aus der Tatsache hervor, dass über 99 % aller Hagelzellen, die vom Radar aufs Satellitenbild übertragen wurden, Flächen kleiner dieser Grösse aufweisen. Um die automatische Suche toleranter zu gestalten, wird im IDL^{TM}-Code trotzdem ein Grenzwert von 30 Pixel verwendet. Damit werden sämtliche Möglichkeiten offen gehalten: kleinere Flächen können aus diesem Datensatz extrahiert werden - grössere Flächen würden einen erneuten Rechendurchlauf bedeuten.

Alle diese Parameter werden im IDL^{TM}-Code für die Direktsuche auf dem Satellitenbild eingesetzt.

Als weitere Zwischenergebnisse seien hier die Bestätigung des *Korrekturterms für hohe Wolken* und die unterschiedlichen Farbindex-Verteilungen der Fallunterscheidung Nord/Süd aufgeführt, die auf das *vermehrte Vorkommen von Clutter im Norden (evtl. in Küstengebieten)* hindeuten.

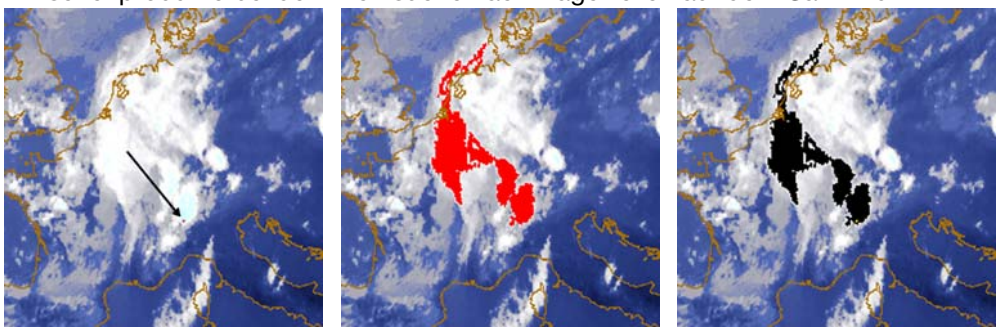
3.4 Direktsuche nach potentiellen Hagelzellen auf dem Satellitenbild

Der IDL^{TM}-Code für die Direktsuche auf einem Satellitenbild ist wie folgt aufgebaut:

- Erstelle vier Kopien des zu bearbeitenden Satellitenbildes (*Sat1*, *Sat2*, *Sat3*, *Sat4*).

- Suche auf dem Satellitenbild *Sat1* sequenziell alle Pixel mit Farbindex <= 35 in aufsteigender Reihenfolge, beginnend beim „kältesten“ Farbwert. Speichere die Koordinaten aller Pixel, die dieses Kriterium erfüllen, in einem Array, das durch die sequenzielle Auffüllung automatisch nach „Kälte“ sortiert wird.
- Bestimme für jedes Element des Arrays zwei Flächen, *Fläche A* und *Fläche B*:
  Fläche A: Suche auf *Sat2* alle Pixel innerhalb 2 Stufen des Farb-Deltas, relativ zum Farbwert des Startpixels, und bestimme die Grösse der gefundenen Fläche.
  Fläche B: Suche auf *Sat3* alle Pixel innerhalb des Farbwerts 35, ausgehend vom Farbwert des Startpixels.
- Übertrage *Fläche B* in schwarzen Pixeln auf *Sat1*.
  (Durch die Übertragung der schwarzen Pixel werden sämtliche betroffenen Pixel als neue Startpunkte eliminiert. Würde dies nicht geschehen, würde das Farb-Delta-Grössenkriterium nicht greifen, da nachfolgende Farbwerte am Rand der schon erfassten Zellen „anbauen“ würden.)
- Übertrage *Fläche A* in gelben Pixeln auf *Sat1*, falls *Fläche A* <= 30 Pixel.

ABBILDUNG 3-25 Zwischenprodukte bei der Direktsuche nach Hagelzellen auf dem Sat.-Bild



links: Fläche A (markiert durch Pfeil) wird bei erstem Element des Arrays bestimmt (rote Pixel).

mitte: Fläche B wird ebenfalls bei erstem Element bestimmt (rote Pixel).

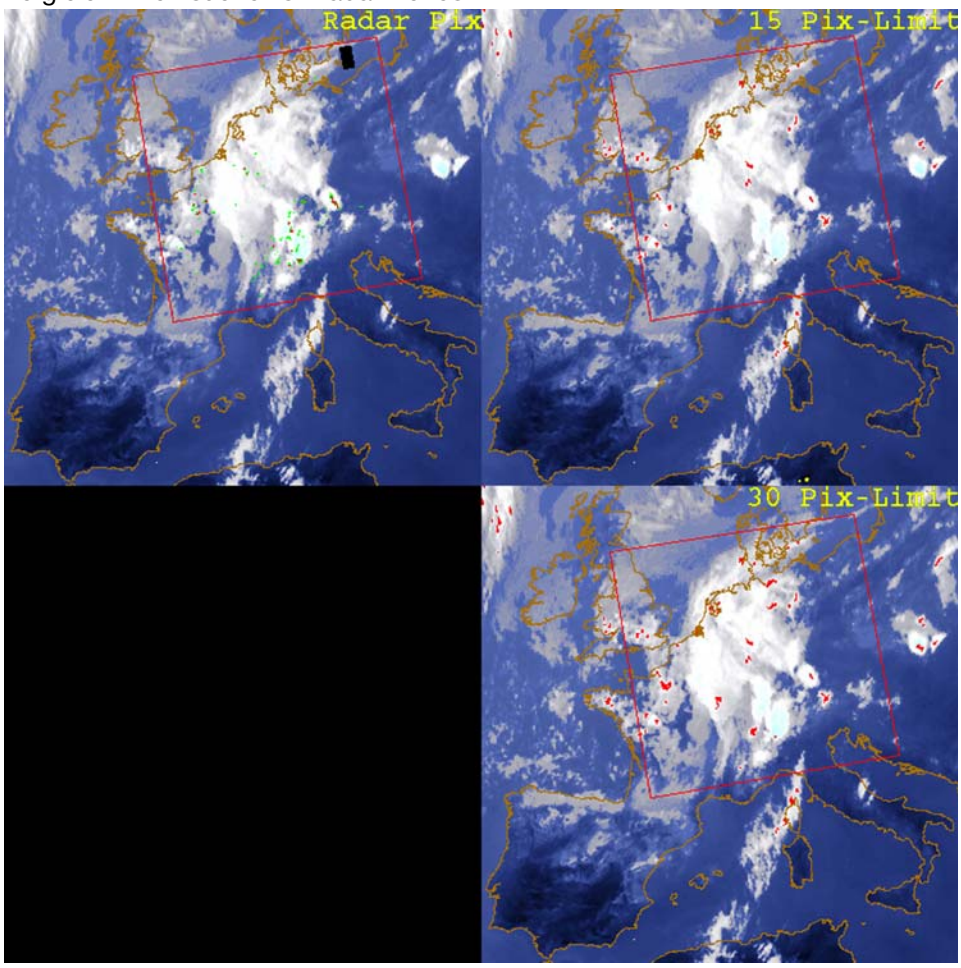
rechts: Fläche B wird als schwarze Pixel übertragen, Fläche A wird, da kleiner als 30 Pixel, ebenfalls übertragen, und zwar als gelbe Pixel.

- Setze *Sat2* = *Sat1* und *Sat3* = *Sat1* (Reset der Bildvariablen).
- Wiederhole für jedes Element des Arrays die beiden Flächensuchen, falls unter den Koordinaten des Elements auf *Sat1* kein schwarzes Pixel zu finden ist. Falls ein schwarzes Pixel gefunden wird: bearbeite das nächste Element des Arrays.
- Übertrage schlussendlich, nach vollständiger Bearbeitung des Arrays, sämtliche gelben Pixel von *Sat1* auf *Sat4* und stelle sie in roter Farbe dar.
- Füge den Dateinamen der soeben bearbeiteten Datei in einem Log-File an.
- Schreibe für jede Zelle folgende Parameter in ein Log-File: Koordinaten des Schwerpunkts, Koordinaten des Startpixels der Suche (Array-Elemente), Farbwert des Schwerpunktspixel, Farbwert des Startpixels der Suche und Fläche der Zelle.

Dieser Ablauf wird in einer Schlaufe auf den ganzen Datensatz angewendet. Er entspricht dem ausformulierten IDL^{TM}-Code in abgekürzter Form (siehe CD).

Folgende Abbildung lässt einen Vergleich zwischen den übertragenen Radar-Echos und dem Resultat der Direktsuche auf dem Satellitenbild zu:

ABBILDUNG 3-26 Vergleich Direktsuche vs. Radar-Echos



Als roter Rahmen ist der Bereich des Radarbildes überlagert.

oben links: Radar-Echos, übertragen auf Satellitenbild

oben rechts: Direktsuche auf Satellitenbild, Flächenlimite 15 Pixel

unten rechts: Direktsuche auf Satellitenbild, Flächenlimite 30 Pixel

Zu beachten ist, dass dieser Ablauf keine Eindeutigen Ergebisse liefert, da die Sortierreihenfolge des Arrays massgeblich mitbestimmt, in welcher Reihenfolge die einzelnen Zentren bearbeitet und welche Pixel schwarz gesetzt (blockiert) werden. Durch die Umsortierung des Arrays ist es möglich, dass ein leicht anderes Ergebnis resultiert, bei dem einzelne Zellen in der Grösse differieren, Zellen dazukommen oder wegfallen. Durch die Grösse des Datensatzes und einer gewissen Zufallsverteilung der einzelnen Temperaturen auf den Satellitenbildern wird dieser Effekt statistisch irrelevant.

Im Unterschied zum Datensatz der Radarbilder, der nur Bilder von Gewittertagen enthält, liegen bei den Satellitenbildern sämtliche Tage der Sommermonate vor. Aus diesem Grund wird die Schnittmenge der Bilder mit Hilfe einer IDL^{TM}-Routine bestimmt und markiert, um bei der Auswertung Gleiches mit Gleichem vergleichen zu können und die Unterschiede zwischen komplettem und reduziertem[26] Satellitendatensatz auswerten zu können.

Die Auswertung der Direktsuche nach potentiellen Hagelzellen auf dem Satellitenbild erfolgt im Abschnitt „Hagelklimatologie über Europa“ auf Seite 42.

3.5 Verifizierung der gefundenen Parameter an zweitem Datensatz

Um die gefundenen Resultate zu verifizieren, werden sämtliche Abläufe an einem zweiten Datensatz wiederholt. Dieser Datensatz umfasst die Sommermonate der Jahre 2000 bis 2002 und unterscheidet sich somit zeitlich statt räumlich vom ersten Datensatz. Die Ergebnisse des Vergleichs werden in Abschnitt 4.1 dargelegt.

26. Der reduzierte Satellitendatensatz enthält nur die Schnittmenge der Dateien von Radar- und Satellitenbild-Datensatz.

4 Resultate

4.1 Vergleich der Statistiken beider Datensätze

Die Auswertung des zweiten Datensatzes der Jahre 2000 bis 2002 (im Folgenden *Datensatz02* genannt) wird den Resultaten des ersten Datensatzes der Jahre 1997 bis 1999 (im Folgenden *Datensatz99* genannt) gegenübergestellt. Wie in den nachfolgenden Abbildungen zu erkennen ist, können die Ergebnisse von *Datensatz99* meist in guter Übereinstimmung bestätigt werden:

TABELLE 4-1 Vergleich statistischer Grössen beider Datensätze

Grösse	Datensatz99	Datensatz02	Bemerkung
Anzahl erfasste Zellen Inkl. mehrfache Zentren Erfasste Bilddateien Durchschn. # Zellen / Bild Anzahl erfasste Tage	23‘211 25‘469 2‘487 9.3 60	17‘551 15‘889 2‘723 6.4 70	
Kleinste / grösste Zelle	1 S-Pixel[a] / 110 S-Pixel[a]	1 S-Pixel[a] / 195 S-Pixel[a]	Gebiet zusammenhängender Pixel
Durchschnittl. Farbindex[b] Standardabweichung Median	37 20.5 30	33 20.9 27	
„kältester“ / „wärmster“ Farbindex[c]	4 / 83	4 / 84	Farbwert 4 entspricht dem „kühlstmöglichen“ Farbwert
Durchschnittlicher Abstand des Zellenschwerpunkts zum Kältezentrum[c] Standardabweichung Median	3.98 S-Pixel[a] 1.73 S-Pixel[a] 4.24 S-Pixel[a]	3.68 S-Pixel[a] 1.88 S-Pixel[a] 4.12 S-Pixel[a]	
Durchschnittliche Grösse einer Zelle[c] Standardabweichung Median	2.6 S-Pixel[a] 3.0 S-Pixel[a] 2.0 S-Pixel[a]	3.2 S-Pixel[a] 4.7 S-Pixel[a] 2.0 S-Pixel[a]	

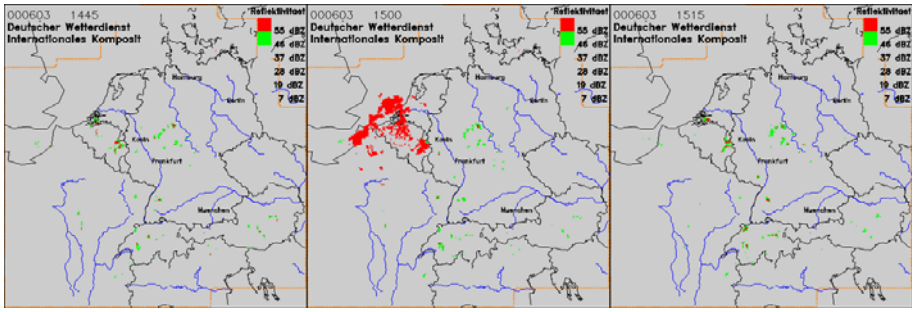
a. S-Pixel steht für Satellitenpixel

b. Berechnet an den bereinigten Datensätzen ohne mehrfache Zentren

c. Berechnet an den kompletten Datensätzen

Beide Datensätze enthalten nur Bilder, auf denen Radar-Echos zu identifizieren sind. Bilder ohne ein einziges Echo sind nicht enthalten. Aus diesem Grund enthält *Datensatz99* weniger erfasste Dateien als *Datensatz02*. Trotzdem ist die durchschnittliche Anzahl erfasster Echos pro Bild bei *Datensatz99* grösser (9.3 gegenüber 6.4 erfassten Zellengrösse unabhängige Radar-Echos pro Bild). Die grösste Hagelzelle mit einer Fläche von 195 Pixel in *Datensatz02* weist für eine Hagelzelle unrealistische Dimensionen auf. Die nächstkleinere Zelle hat noch immer eine Fläche von 154 Pixel. Diese Echos werden durch technischen Defekt der Radar-Anlagen oder Clutter ausgelöst. Die Bilder entgingen dem manuellen Check und dem im IDL™-Code implementierten Clutter-Filter, wie es in Abschnitt 3.3.1.1 auf Seite 22 beschrieben ist. Stellvertretend für alle Bilder mit Clutter sei hier eine Folge von drei Aufnahmen im Intervall von 15 Minuten vom 3. Juni 2000 abgebildet:

ABBILDUNG 4-1 Radar-Clutter

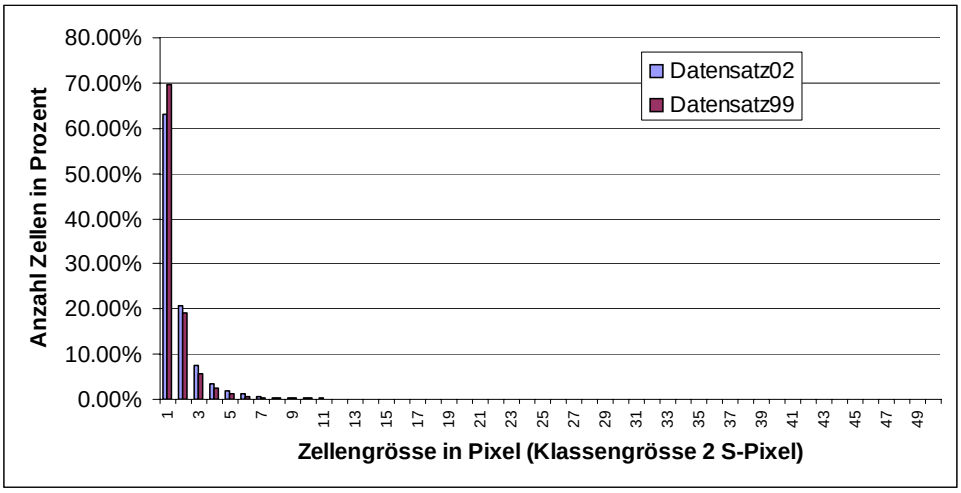


Radar-Aufnahmen vom 3.6.2000, 14:45, 15:00, 15:15. Alleine auf dem Mittelbild ist eine Anhäufung von roten Pixeln zu sehen. Dieses Bild ist der manuellen Prüfung entgangen. Die automatische Prüfung im IDL™-Code versagt, da im Umkreis von 15 Pixel des Zellenschwerpunktes sehr wohl ein benachbartes rotes Pixel auf einem vorausgehenden oder nachfolgenden Bild zu finden ist.

Die Anzahl solcher Clutter-Bilder ist bezogen auf die Gesamtheit der Daten eine kleine Teilmenge, die aber mit ihren zum Teil riesigen Pixelzahlen durchaus ihren Einfluss auf die Statistik ausübt. Aus diesem Grund wird hauptsächlich dem Median (robuster bei Ausreissern) und nicht dem arithmetischen Mittel die Aufmerksamkeit geschenkt. Ein aufwändigeres Filterverfahren könnte eine Verbesserung der Datenqualität bewirken.

Nachfolgend eine Gegenüberstellung der Graphiken beider Datensätze. Die Auswahl entspricht den in Abschnitt 3.3.1 kommentierten Abbildungen. Zum Teil wird die prozentuale Darstellung gewählt, um bessere Vergleiche zuzulassen.

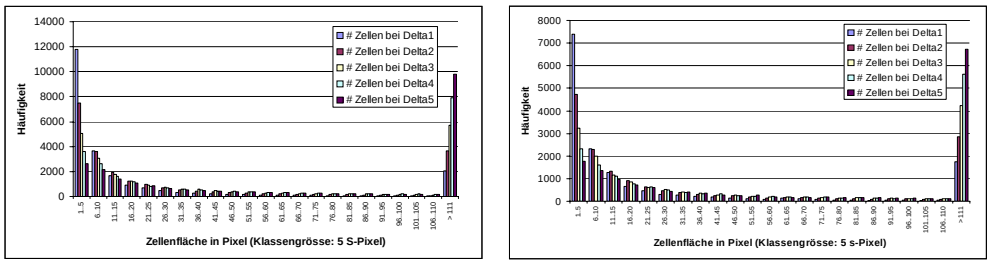
ABBILDUNG 4-2 Grössenverteilung der Hagelzellenflächen auf dem Sat.-Bild, detektiert mit Radar



Berechnet an den kompletten Datensätzen. *Datensatz99* (rechter Balken) und *Datensatz02* (linker Balken), je auf 100 % normiert.

Die Grössenverteilung der Hagelzellenflächen beider Datensätze ist beinahe identisch.

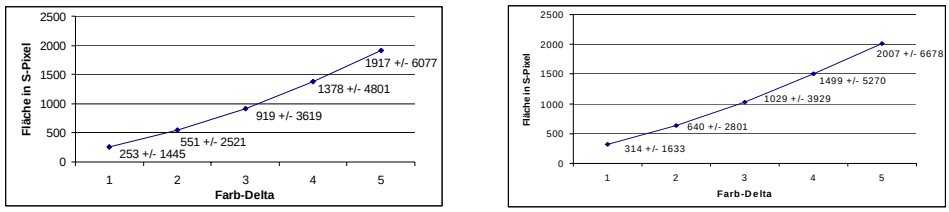
ABBILDUNG 4-3 Verteilung der errechneten Zellenflächen bei verschiedenen Farb-Deltas



Berechnet an den bereinigten Datensätzen: *Datensatz99* (links) und *Datensatz02* (rechts). Je Klasse von 5 Pixel werden die Zellenhäufigkeiten pro Delta (Delta 1 bis 5, jeweils von links nach rechts) aufgetragen. Die letzte Klasse (ganz rechts im Bild) fasst die restlichen Klassen > 111 zusammen.

Ebenfalls die Verteilung der errechneten Zellenflächen bei verschiedenen Farb-Deltas.

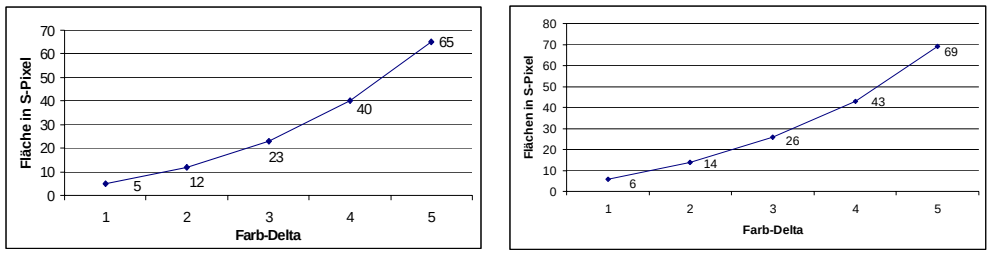
ABBILDUNG 4-4 Durchschnittliche errechnete Flächen in Pixel pro Farb-Delta



Berechnet an den bereinigten Datensätzen: *Datensatz99* (links) und *Datensatz02* (rechts). Neben den Datensätzen ist der numerische Wert mit Standardabweichung angegeben.

Die durchschnittlich errechneten Flächen weisen beim *Datensatz02* leicht höhere Werte auf, die Standardabweichungen sind vergleichbar.

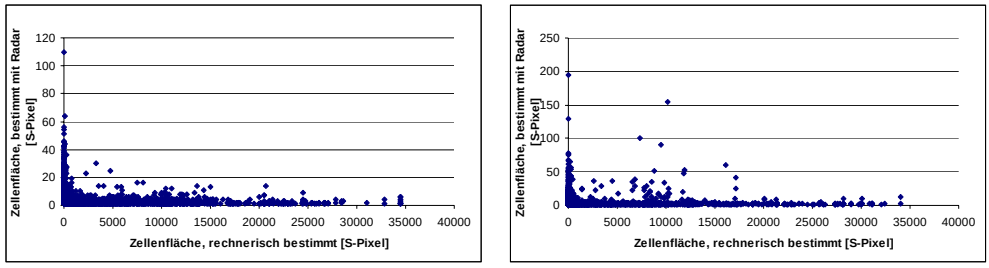
ABBILDUNG 4-5 Medianwerte der errechneten Flächen in Pixel pro Farb-Delta



Berechnet an den bereinigten Datensätzen: *Datensatz99* (links) und *Datensatz02* (rechts).

Datensatz02 weist geringfügig höhere Medianwerte auf als *Datensatz99*.

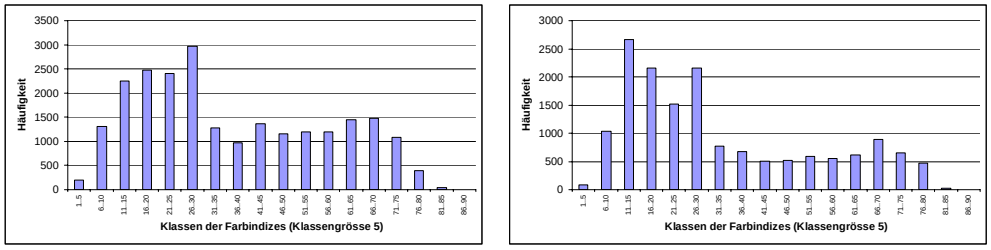
ABBILDUNG 4-6 Scatter-Plot der Flächen der Hagelzellen, bestimmt mit Radar / durch Berechnung



Berechnet an den bereinigten Datensätzen: *Datensatz99* (links) und *Datensatz02* (rechts) unter Berücksichtigung der mit Farb-Delta 2 bestimmten Flächen.

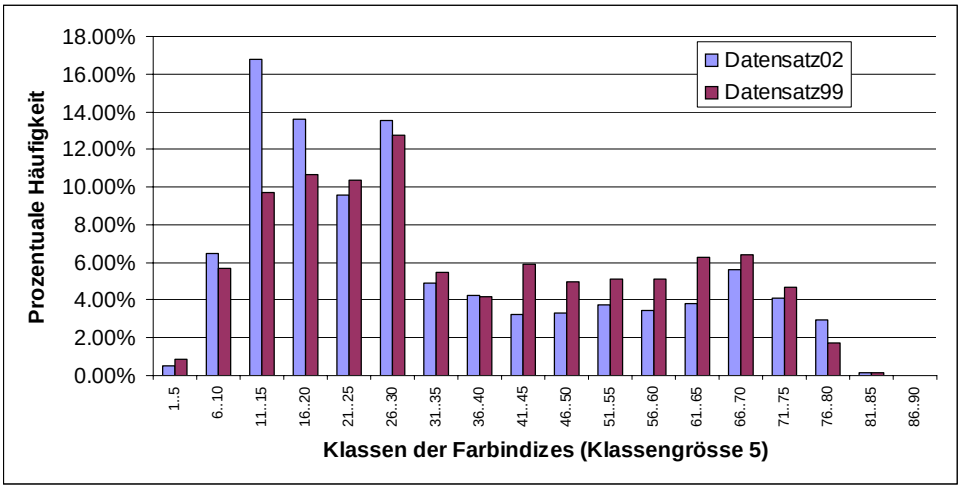
Auch beim Scatter-Plot der Hagelzellenfläche der Jahre 2000 bis 2002 findet keine korrelation zwischen der Grösse der übertragenen Radar-Echos und den durch die Direktsuche bestimmten Flächen statt. *Datensatz02* (Abbildung 4-6, rechts) enthält einige Zellen mit relativ grossen Flächen (grösser 40 S-Pixel). Der Scatter-Plot gibt jedoch keine Auskunft darüber, um wieviele Datenpunkte es sich handelt, da auf einem Bildpunkt mehrere Datenpunkte zusammenfallen können. Diese grossen Flächen (Werte auf der Ordinate) weisen auf Clutter hin.

ABBILDUNG 4-7 Häufigkeitsverteilung der Farbindizes



Berechnet an den bereinigten Datensätzen: *Datensatz99* (links) und *Datensatz02* (rechts).

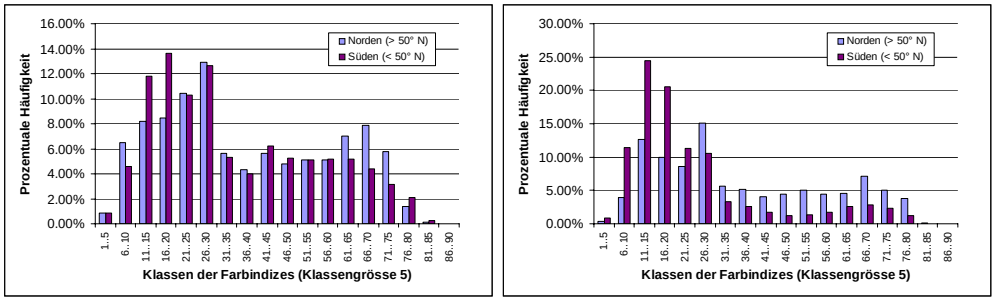
ABBILDUNG 4-8 Prozentuale Häufigkeitsverteilung der Farbindizes



Berechnet an den bereinigten Datensätzen.
Gegenüberstellung der prozentualen Häufigkeitsverteilungen der Farbindizes beider Datensätze, normiert auf je 100 %.

Die prozentuale Häufigkeitsverteilung der Farbindizes zeigt, dass *Datensatz02* gegenüber *Datensatz99* mehr Zellen mit kühlem Farbwert aufweist und weniger Zellen, die wärmeren Farbwerten entsprechen. Die auffällige Teilung in kalte (bis Farbindex 30) und wärmere Zentren ist bei beiden Datensätzen ausgeprägt.

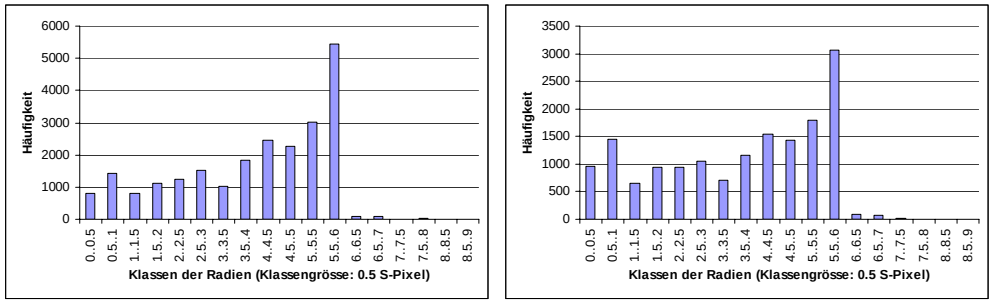
ABBILDUNG 4-9 Häufigkeitsverteilung der Farbindizes, Fallunterscheidung Nord / Süd



Berechnet an den bereinigten Datensätzen: *Datensatz99* (links) und *Datensatz02* (rechts). Gegenüberstellung der Zellen mit Position > 50° N (jeweils linker Balken) und den Zellen mit Position < 50° N (jeweils rechter Balken). Die beiden Gruppen wurden je auf 100 % normiert.

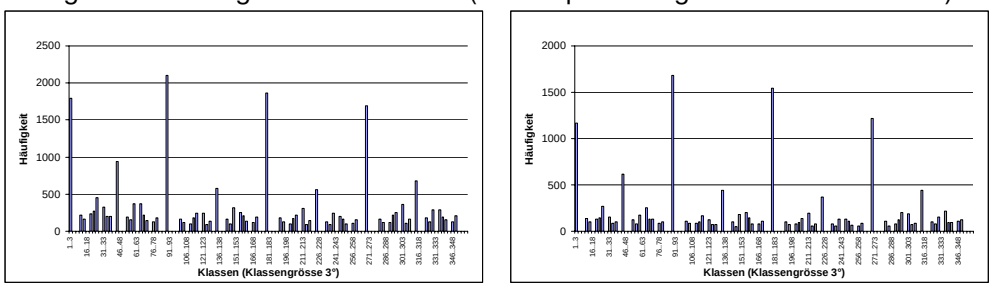
Wird die Fallunterscheidung Nord/Süd vorgenommen, weist *Datensatz02* im Norden bei allen Farbwerten grösser 30 höhere Häufigkeiten auf. Kalte Werte kleiner 30 werden hingegen im Süden häufiger gezählt. Diese Ausprägung ist viel stärker, als dies bei *Datensatz99* der Fall ist. Die warmen Farbindizes weisen ebenfalls auf Clutter hin, die gemäss dieser Fallunterscheidung im Norden mit grösserer Häufigkeit auftreten und unter Umständen nur einzelne Radarstationen betreffen dürften.

ABBILDUNG 4-10 Häufigkeitsverteilung der Abstände (Schwerpunkt Hagelzelle - Kältezentrum)



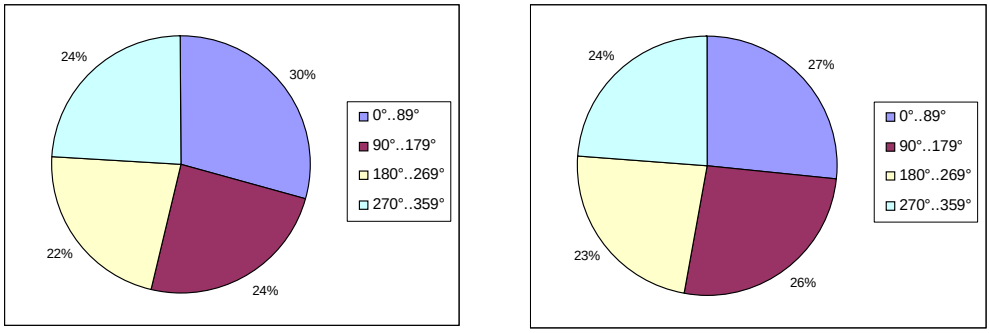
Berechnet an den bereinigten Datensätzen: *Datensatz99* (links) und *Datensatz02* (rechts).

ABBILDUNG 4-11 Häufigkeitsverteilung der Azimutwinkel (Schwerpunkt Hagelzelle - Kältezentrum)



Berechnet am bereinigten Datensatz mit 23‘211 Zellen. Zusätzlich sind 815 exakte Treffer (Koinzidenz von Schwerpunkt der Hagelzelle und gefundenem Kältezentrum) zu verzeichnen.

ABBILDUNG 4-12 Häufigkeitsverteilung der Azimutwinkel, vier Klassen à 90°



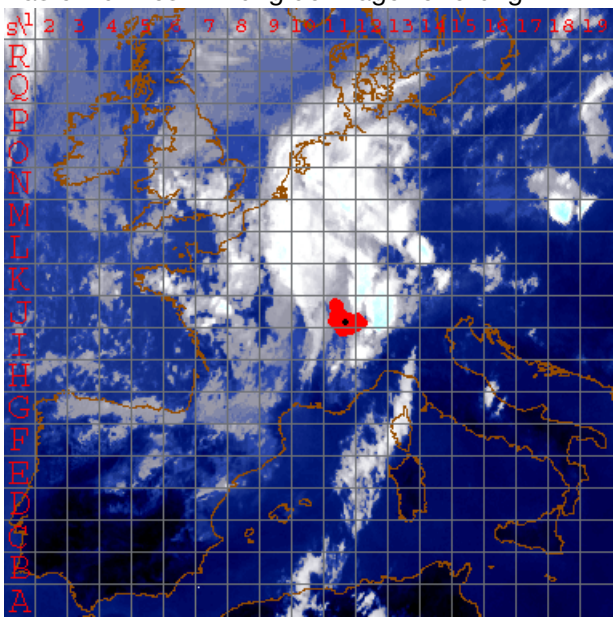
Berechnet an den bereinigten Datensätzen: *Datensatz99* (links) und *Datensatz02* (rechts).

Die Abstände und Azimutwinkel führen bei beiden Datensätzen zu fast identischen Ergebnissen.

4.2 Hagelklimatologie über Europa

Die Verteilung der Hagelzellen über Europa wird mit Hilfe eines Rasters mit Maschenweite 20 Pixel bestimmt, das über die Satellitenbilder gelegt wird. Sämtliche Pixel einer Gewitterzelle werden dem gleichen Bildsektor zugeteilt, in den auch der Zellenschwerpunkt fällt.

ABBILDUNG 4-13 Raster zur Bestimmung der Hagelverteilung



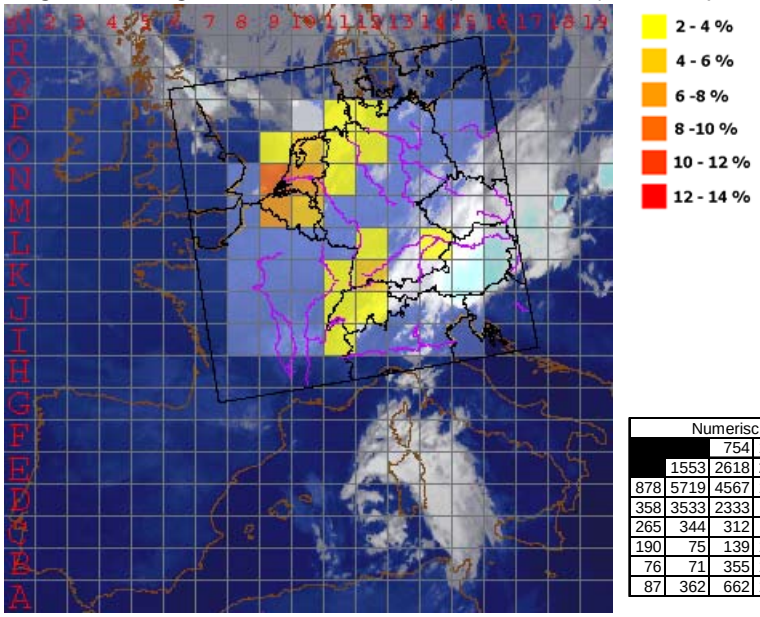
Raster mit Maschenweite 20 Pixel. Ordinate mit Buchstaben-, Abszisse mit Zahlenbeschriftung. Schematisch ist eine riesige Gewitterzelle dargestellt (rote Pixel - die schwarzen Pixel markieren den Zellenschwerpunkt). Alle Pixel dieser Zelle werden dem Bildsektor J11 zugeteilt (Sektor des Zellenschwerpunktes), obwohl es auch Pixel gibt, die eigentlich über I11, I12 und J13 liegen.

Pro Bildsektor wird die Summe aller Pixel bestimmt und als Prozentwert farbkodiert einem Satellitenbild überlagert. Die so entstandenen Bilder liefern qualitative Angaben über die Häufigkeit von Gewitterzellen über den jeweiligen Bildsektoren.

4.2.1 Hagelverteilung mit Hilfe der Radarbilder

Die Auswertung von *Datensatz99*, der mit Hilfe von Radarbildern erstellt worden ist, zeigt folgende Verteilung über dem vom Radar-Komposit erfassten Gebiet (siehe Abbildung 4-14):

ABBILDUNG 4-14 Hagelverteilung mit Hilfe des Radars (*Datensatz99*) in Pixel pro Sektor (prozentual)



Numerische Werte der # Pixel							
		754	1555	1527	509	285	61
	1553	2618	2144	1267	1149	1061	169
878	5719	4567	1458	533	722	477	62
358	3533	2333	499	129	120	132	122
265	344	312	365	1357	962	1715	939
190	75	139	1141	2909	852	967	838
76	71	355	1870	1723	111	75	110
87	362	662	1636	355	131	8	126

Satellitenbild mit Raster, überlagerten Konturen der Staatsgrenzen und Ränder des Radarbildes (schwarz). Das Gebiet mit guter Radarabdeckung ist als helle Fläche hervorgehoben. Die prozentuale Häufigkeit der Gewitterzellen ist farbcodiert überlagert (hervorgehobene Fläche auf 100 % normiert). Ungefärbte Flächen weisen Häufigkeiten kleiner 2 % auf. In Tabelle unten rechts sind die numerischen Werte in Anzahl Pixel je Zelle abgebildet.

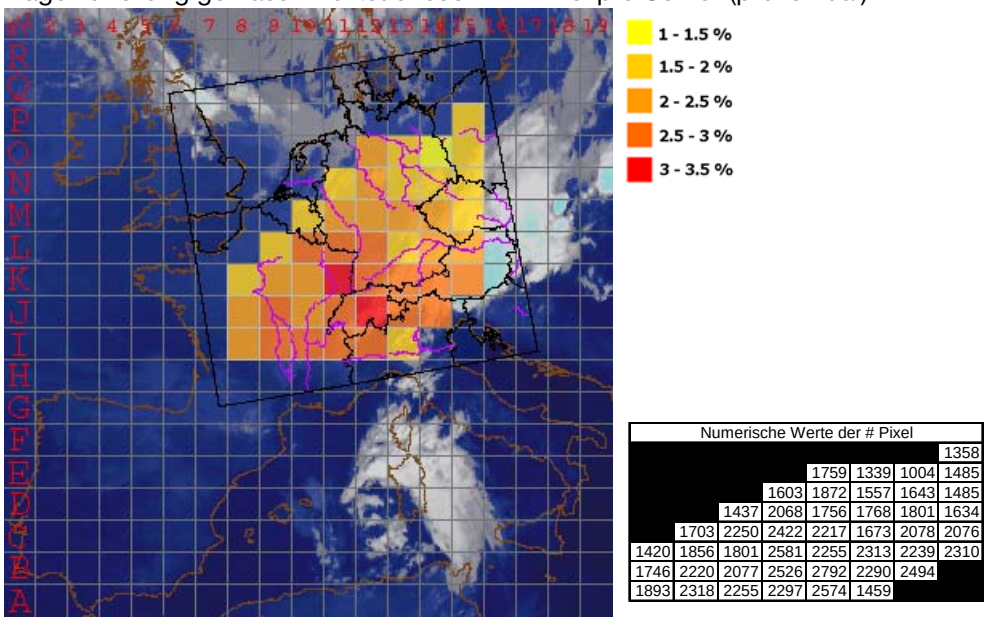
Deutlich zeichnen sich zwei Regionen ab, in denen die Häufigkeit der radar-detektierten Gewitterzellen wesentlich höher ist als in den anderen Gebieten. Einerseits ist dies in den nördlichen Küstenregionen um Belgien und Holland andererseits über der Schweiz und in der Region um Schwarzwald und Vogesen. Der Maximalwert von 9.96 % (5‘719 gezählte Pixel) ist in Sektor N9 zu finden. Es ist denkbar, dass dieser Wert infolge der Auszählung von Clutter-Pixel entstanden ist.
Im Gebiet um Schwarzwald, Vogesen und der Schweiz könnte die Topographie einen Einfluss auf die konvektive Wolkenbildung ausüben (z.B. steilerer Einfallswinkel der Sonne auf Hangflächen oder Windsysteme in Tälern). Es ist aber auch zu bedenken, dass in den Alpen- und Voralpentälern die Radarmessungen durch die Topographie eingeschränkt werden. Sektor J12 zum Beispiel weist eine grosse Häufigkeit auf, obwohl in den Alpen die Sichtweite von Radar stark eingeschränkt ist.

4.2.2 Hagelverteilung mit Hilfe der Satellitenbilder

Die Direktsuche nach Gewitterzellen, wie sie in Abschnitt 3.4 „Direktsuche nach potentiellen Hagelzellen auf dem Satellitenbild“ auf Seite 33 beschrieben ist, wird wiederum auf die beiden Datensätze der Jahre 1997-99 und 2000-02 angewendet. Die Log-Files der Resultate beider Berechnungen werden im Folgenden mit *Direktsuche99* und *Direktsuche02* bezeichnet (mit Attribut *-R* für den Reduzierten Datensatz, der nur die Schnittmenge der Aufnahmen zwischen Radar- und Satellitenbildern enthält). Die beiden Datensätze enthalten die Parameter, die durch eine Suche bis Farbwert 35 und Fläche 30 Pixel limitiert worden sind. Teilmengen mit enger gefassten Parametern können

somit ohne weiteres aus den Datensätzen extrahiert werden.
Die beiden Log-Files enthalten um die 500‘000 Einträge. Diese Anzahl ist mit Microsoft® Excel™ nicht mehr vernünftig auswertbar. Aus diesem Grund wird die Auszählung der Zellenflächen zur Erstellung der Häufigkeitsverteilung über Europa in IDL™ umgesetzt. Ein erstes Resultat aus *Direktsuche99-R* mit extrahierten Werten kleiner/gleich 30 beim Farbwert (entspricht dem Medianwert) und 15 bei der Zellengrösse (umfasst über 99 % aller Gewitterzellen, die vom Radar erfasst worden sind) ist in Abbildung 4-15 zu sehen. Dabei wird die Fläche auf Sektoren ohne braune Küstengrenzlinien beschränkt, da diese Pixel das Ergebnis beeinflussen können[27].

ABBILDUNG 4-15 Hagelverteilung gemäss *Direktsuche99-R* in Pixel pro Sektor (prozentual)



Numerische Werte der # Pixel							
							1358
				1759	1339	1004	1485
			1603	1872	1557	1643	1485
		1437	2068	1756	1768	1801	1634
	1703	2250	2422	2217	1673	2078	2076
1420	1856	1801	2581	2255	2313	2239	2310
1746	2220	2077	2526	2792	2290	2494	
1893	2318	2255	2297	2574	1459		

Satellitenbild mit Raster, überlagerten Konturen der Staatsgrenzen und Ränder des Radarbildes (schwarz). Die betrachtete Fläche entspricht allen Sektoren, die gute Radarabdeckung und zugleich keine braunen Küstenpixel enthalten. Die prozentuale Häufigkeit der Gewitterzellen ist farbcodiert überlagert (hervorgehobene Fläche auf 100 % normiert). In Tabelle unten rechts sind die numerischen Werte in Anzahl Pixel je Zelle abgebildet.

Die Verteilung, nur mit Hilfe des Datensatzes *Direktsuche99-R* erstellt, ist viel flacher ausgefallen, als dies mit *Datensatz99* der Fall ist. Dies war zu erwarten, da auf dem Satellitenbild mit Sicherheit einige Wolken die Suchkriterien erfüllen und gleichzeitig für die Bodenradarstationen kein Echo generieren (z.B. Zirren, die in Folge ihrer Höhe kalt genug sind, um den Kältefarbwert einer Gewitterzelle zu erreichen und eine Fläche kleiner 15 Pixel aufweisen können). Wird davon ausgegangen, dass solche Wolken zufällig über einem Gebiet verteilt sind, können sie für einen gewissen Basiswert an Treffern verantwortlich gemacht werden. Die Gewitterzellen werden zusätzlich zu diesem Basiswert addiert, so dass regionale Unterschiede erfasst werden können, falls sie wirklich in ausgeprägter Form existieren. Dass bei der Direktsuche generell zu viele Wolken akzeptiert werden wird deutlich, wenn die numerischen Werte der auf Radar- und Satelliten-

27. Die dem Satellitenbild überlagerten Küstengrenzen (braune Pixel) weisen zum Teil Ringstrukturen auf, die die Fläche künstlich in ihrer Grösse limitieren und kleiner als das Flächenkriterium sind. Zieht z.B. eine Front (weisse Pixel, die oft kalt genug sind, um das Temperatur-Farbkriterium zu erfüllen) unter einer solchen Ringstruktur vorbei, wird dieses Gebiet auf jedem Bild als potentielle Gewitterzelle registriert. Dies führt zu enormen Anhäufungen, die aber durch „technische“ Limitierung im Bild bedingt werden.

bild erfassten Zellen verglichen werden (siehe numerische Werte bei Abbildung 4-14 und 4-15).

Einzig die Sektoren K12 und J11 weisen in guter Uebereinstimmung mit Abbildung 4-14 eine geringfügig höhere Häufigkeit potentieller Gewitterzellen auf. Zu beachten ist aber, dass diese Verteilung mit *Direktsuche99-R* erstellt worden ist - dieser Datensatz enthält nur Bilder, die durch die vorhandenen Radarbilder vorselektionierte worden sind.

4.2.3 Vergleich der Hagelverteilungen

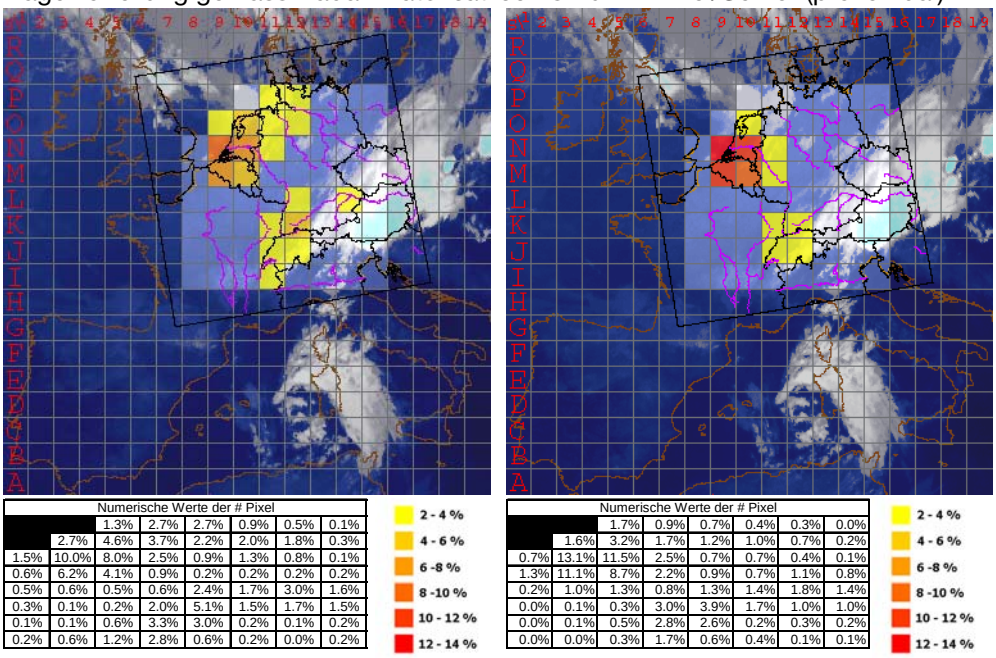
In den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen Datensätze einander gegenübergestellt und die Verteilung der Radar-Echos und der Direktsuche auf dem Satellitenbild mit Hilfe statistischer Tests geprüft.

Die *Pearson-Korrelation* und auch ein *t-Test* setzen eine Normalverteilung und konstante Varianz der Residuen voraus. Dies kann mit einem *Normalitätstest nach Kolmogorov-Smirnov* und einem *Levene Mediantest* ermittelt werden. Sind die Residuen nicht normalverteilt und/oder haben nicht konstante Varianz, wird die *Spearman-Korrelation* und der *Mann-Whitney Rank Sum Test* bevorzugt.
Unter Abweichung von der Normalverteilung leidet die Sensitivität des *t-Tests*, daher ist der *Mann-Whitney Rank Sum Test* meist besser. Das Niveau des *t-Tests* ist gegenüber starken Abweichungen von der Normalverteilung aber robust und wichtiger als die Sensitivität. Aus diesen Gründen werden jeweils mehrere erwähnte Tests auf die Datensätze angewendet, und dies jeweils auf dem 5 % Signifikanz-Niveau.

4.2.3.1 Radar vs. Radar

Der Vergleich der beiden Radar-Datensätze *Datansatz99* und *Datensatz02* liefert folgende Ergebnisse:

ABBILDUNG 4-16 Hagelverteilung gemäss Radar: *Datensatz99* vs. *-02* in Pixel/Sektor (prozentual)



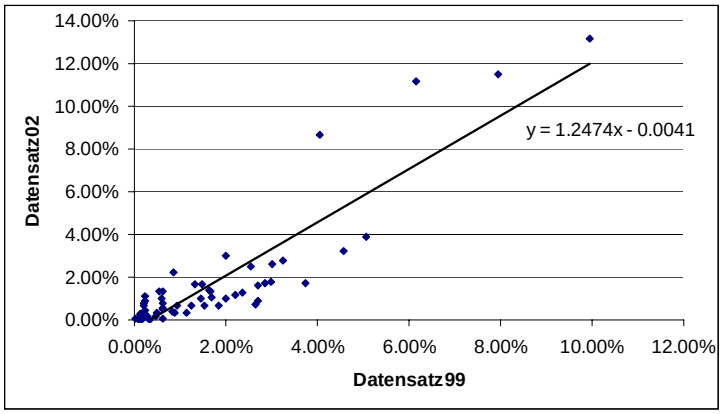
links: Verteilung der Radar-Echos mit *Datensatz99* / rechts: Verteilung der Radar-Echos mit *Datensatz02*

Auch *Datensatz02* zeigt die auffällige Verteilung mit den zwei Häufigkeitszentren. Die Region im Einzugsgebiet der Radarstation *De Bilt* in Holland und *Wideumont* in Belgien weist ein weiteres Mal extreme Werte auf (betrifft die Sektoren M9, N9, M10, N10).

Normalitätstest (Kolmogorov-Smirnov)
Beide Populationen erfüllen diesen Test nicht und sind somit von einer Population mit Normalverteilung signifikant verschieden (*Datensatz99:* K-S Distanz[28] = 0.201; P < 0.001, *Datensatz02:* K-S Distanz = 0.302; P < 0.001).

Korrelationskoeffizient
Der Korrelationskoeffizient der beiden Datensätze beträgt 0.89 (Spearman: 0.83), das Bestimmtheitsmass R^2 somit 0.80 (Spearman: 0.69). Die Verteilung wird massgeblich von den extremen Werten um die Station *De Bilt* beeinflusst.

ABBILDUNG 4-17 Korrelation der Verteilungen: *Datensatz99* vs. *Datensatz02*

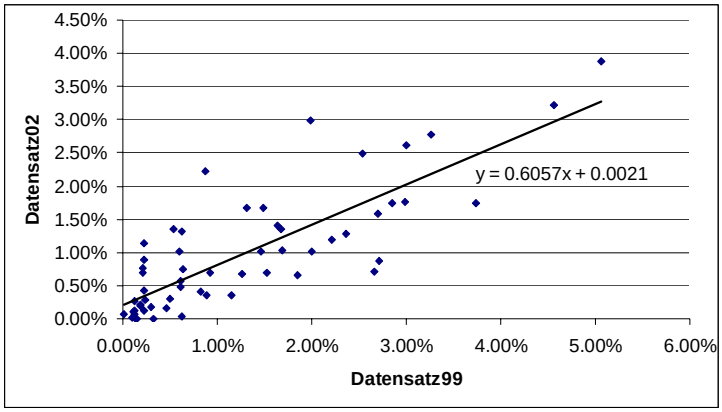


Scatter-Plot mit linearer Trendlinie: Die vier extremen Werte in der Region Niederlande / Belgien beeinflussen die Korrelation der beiden Datensätze in erheblichem Masse.

Werden die vier Sektoren um *De Bilt* und *Wideumont* in beiden Datensätzen eliminiert (M9, N9, M10, N10 - Diese Sektoren weisen in *Datensatz02* Werte von je über 8 % auf.), wird der Korrelationskoeffizient mit 0.81 (Spearman: 0.80) und Bestimmtheitsmass R^2 von 0.66 (Spearman: 0.63) bestimmt.
Auch mit den verbleibenden 57 Werten wird eine positive Korrelation zwischen den beiden Datensätzen festgestellt.

28. Die K-S Distanz (Kolmogorov-Smirnov Distanz) entspricht der maximalen kumulativen Distanz zwischen dem Histogramm der Testdaten und einer Gaussverteilungskurve der Testdaten.

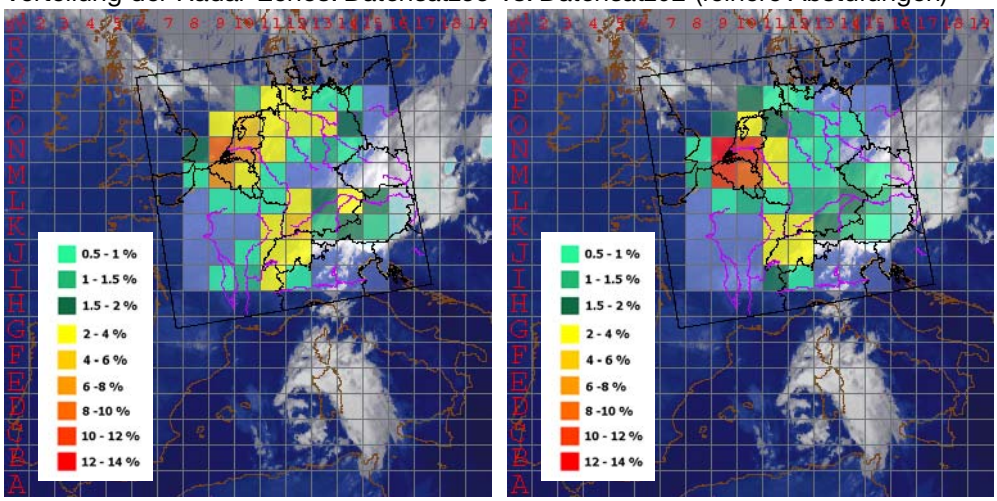
ABBILDUNG 4-18 Korrelation der Verteilungen: *Datensatz99* vs. *Datensatz02*, Extremwerte eliminiert



Scatter-Plot mit linearer Trendlinie: Die neun Sektoren mit Werten über 4 % wurden eliminiert.

Wird die Auflösung der Farbcodierung im untersten Bereich verfeinert und dem Bild in drei Grünabstufungen überlagert, kann auch ohne die Berücksichtigung der Extremwerte eine Aufteilung in zwei Gebiete ausgemacht werden: Norddeutschland/Niederlande/Belgien und die Schweiz/Süddeutschland/Oesterreich werden durch eine Zone geringerer Gewitterhäufigkeit getrennt, die quer durch Deutschland verläuft (siehe Abbildung 4-19).

ABBILDUNG 4-19 Verteilung der Radar-Echos: *Datensatz99* vs. *Datensatz02* (feinere Abstufungen)



links: Verteilung der Radar-Echos mit *Datensatz99* / rechts: Verteilung der Radar-Echos mit *Datensatz02*
In grünen Farbtönen sind dem Satellitenbild zusätzlich zur Skala der Abbildung 4-14 die untersten Abstufungen (0.5 % - 2 %) überlagert. Die prozentualen Werte entsprechen den prozentualen Pixelzahlen je Sektor. Die hell hervorgehobene Fläche wurde auf 100 % normiert.

Ein *t-Test* soll zeigen, ob die beiden Verteilungen signifikant verschieden sind.

t-Test[29]

H_0: Es besteht kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Verteilungen.
H_1: Es gibt einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Verteilungen.

29. Die t-Test Statistik entspricht folgendem Verhältnis:
t = (Differenz der Mittelwerte) / (Standardfehler der Differenz zwischen den Mittelwerten)

Der t-Test wird ebenfalls nur mit den 57 Werten durchgeführt. Nach der Eliminierung der vier Sektoren erfolgt erneut ein Test nach Normalität:

Normalitätstest (Kolmogorov-Smirnov)
Die Populationen erfüllen diesen Test nicht und sind somit von einer Population mit Normalverteilung signifikant verschieden ($P < 0.001$). Es wird zusätzlich zum *t-Test* ein *Mann-Whitney Rank Sum Test* durchgeführt.

Der *t-Test* liefert folgende Ergebnisse:

	Mittelwert	Standardabw.	Standardfehler des Mittelwerts
Datensatz99	724.04	698.72	92.55
Datensatz02	471.47	438.90	58.13

Differenz: 252.56
t = 2.311 mit 112 Freiheitsgraden ($P_{zweiseitig} = 0.023$)
95 % Konfidenzintervall für Differenz der Mittelwerte: 36.014 bis 469.109

Somit besteht ein statistisch signifikanter Unterschied ($P_{zweiseitig} = 0.023$) zwischen den Verteilungen, H_0 wird verworfen.

Die Sensitivität des Tests mit $\alpha = 0.050$ beträgt 0.534 und liegt somit unter dem gewünschten Wert von 0.8.

Mann-Whitney Rank Sum Test, durchgeführt mit 57 Werten:

	Median	25 %.	75 %
Datensatz99	477.0	130.0	1‘143.0
Datensatz02	341.0	121.0	662.0

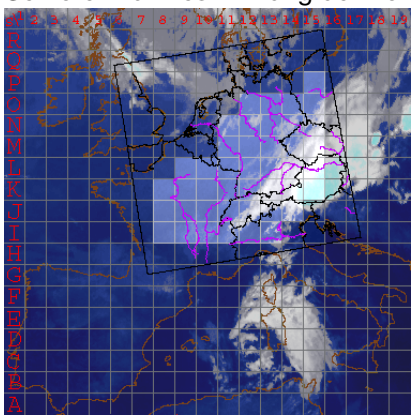
T = 3‘587.00	n(klein) = 57	n(gross) = 57	P = 0.080

Dieser Test akzeptiert mit einem P von 0.080 die Nullhypothese.

4.2.3.2 Satellit vs. Radar

Die beiden Datensätze der Direktsuche enthalten die Werte, die durch eine Suche bis Farbwert 35 und Fläche 30 Pixel limitiert worden sind. Obwohl 30 als Limite für den Farbwert und 15 Pixel als maximale Fläche bei Farb-Delta 2 gemäss deskriptiver Statistik als vernünftige Wahl erscheinen, wird geprüft, ob mit anderen Parametern des Datensatzes eine bessere Korrelation zwischen Radar- und Satellitenverteilung erzielt werden kann. Dazu werden die verschiedenen Flächen/Farbindex Kombinationen aus den Datensätzen der Direktsuche extrahiert. Zur Berechnung der Korrelationen werden nur Sektoren ohne Küstenlinien (braune Pixel) zugelassen. Ebenfalls werden die vier Sektoren um *De Bilt / Wideumont* eliminiert. Somit verbleiben 43 Sektoren zur Bestimmung der Korrelationswerte.

ABBILDUNG 4-20 Sektoren zur Bestimmung der Korrelationen



Die Sektoren um *De Bilt* / *Wideumont* und Sektoren mit Küstenlinien (braune Pixel) werden zur Bestimmung der Korrelationen nicht berücksichtigt. Die Fläche mit akzeptierten Sektoren ist hervorgehoben.

Nachfolgende Tabellen zeigen die Korrelationswerte zwischen den Verteilungen der Direktsuchen mit verschiedenen Suchparametern und den Verteilungen, die durch die Radar-Echos entstanden sind. Gelb hervorgehoben sind die jeweiligen Korrelationsmaxima der Spalten. Schwarz hinterlegt wurde der Wert mit Fläche 15 Pixel und Farbindex 30. Links im Bild sind die Korrelationen zu sehen, die mit Hilfe sämtlicher Satellitenbilder berechnet worden sind (*Direktsuche99 / -02* vs. *Datensatz99 /-02)*, rechts im Bild diejenigen, die nur mit der Schnittmenge der Bilder der beiden Datensätze erstellt worden sind (*Direktsuche99*-R / *-02*-R vs. *Datensatz99 /-02).*

TABELLE 4-2 Korrelationen zwischen den Datensätzen (*Datensatz99* vs. *Direktsuche99*)

Daten: 97-99	Flächen, bestimmt mit Farb-Delta 2								Daten: 97-99	Flächen, bestimmt mit Farb-Delta 2							
Direktsuche	3 Pixel		7 Pixel		15 Pixel		30 Pixel		Direktsuche-R	3 Pixel		7 Pixel		15 Pixel		30 Pixel	
Farbindex	R	R^2	R	R^2	R	R^2	R	R^2	Farbindex	R	R^2	R	R^2	R	R^2	R	R^2
35	0.21	0.04	**0.27**	**0.07**	**0.34**	**0.11**	**0.35**	**0.12**	35	**0.25**	**0.06**	0.28	0.08	0.24	0.06	0.25	0.06
34	**0.21**	**0.04**	0.27	0.07	0.31	0.10	0.31	0.09	34	0.23	0.05	0.30	0.09	0.25	0.06	0.24	0.06
33	0.20	0.04	0.26	0.07	0.28	0.08	0.27	0.08	33	0.22	0.05	0.32	0.10	0.26	0.07	0.26	0.07
32	0.19	0.04	0.25	0.06	0.26	0.07	0.25	0.06	32	0.21	0.04	0.33	0.11	0.26	0.07	0.27	0.08
31	0.16	0.02	0.24	0.06	0.24	0.06	0.24	0.06	31	0.19	0.04	0.36	0.13	0.29	0.08	0.31	0.09
30	0.15	0.02	0.23	0.05	**0.24**	**0.06**	0.23	0.05	30	0.23	0.05	0.35	0.12	**0.30**	**0.09**	0.32	0.10
29	0.15	0.02	0.24	0.06	0.20	0.04	0.18	0.03	29	0.19	0.04	0.43	0.18	0.38	0.14	0.42	0.18
28	0.15	0.02	0.23	0.05	0.19	0.03	0.16	0.02	28	0.22	0.05	0.42	0.18	0.38	0.15	0.42	0.17
27	0.15	0.02	0.23	0.05	0.19	0.04	0.16	0.02	27	0.23	0.05	0.43	0.19	0.41	0.17	0.44	0.20
26	0.15	0.02	0.21	0.04	0.18	0.03	0.13	0.02	26	0.21	0.04	0.40	0.16	0.40	0.16	0.46	0.21
25	0.15	0.02	0.22	0.05	0.18	0.03	0.14	0.02	25	0.21	0.05	0.42	0.18	0.43	0.18	0.49	0.24
24	0.14	0.02	0.21	0.04	0.17	0.03	0.13	0.02	24	0.18	0.03	0.44	0.20	**0.45**	**0.20**	0.52	0.27
23	0.14	0.02	0.21	0.04	0.16	0.02	0.13	0.02	23	0.17	0.03	**0.45**	**0.20**	0.44	0.19	**0.54**	**0.29**
22	0.16	0.03	0.20	0.04	0.13	0.02	0.13	0.02	22	0.20	0.04	0.39	0.15	0.38	0.14	0.52	0.27
21	0.14	0.02	0.19	0.04	0.11	0.01	0.12	0.01	21	0.16	0.02	0.38	0.15	0.32	0.10	0.51	0.26
20	0.16	0.02	0.17	0.03	0.12	0.02	0.13	0.02	20	0.18	0.03	0.33	0.11	0.33	0.11	0.52	0.27
19	0.17	0.03	0.16	0.02	0.10	0.01	0.13	0.02	19	0.12	0.01	0.30	0.09	0.31	0.10	0.52	0.27
18	0.14	0.02	0.14	0.02	0.10	0.01	0.12	0.01	18	0.13	0.02	0.29	0.09	0.31	0.10	0.50	0.25
17	0.18	0.03	0.15	0.02	0.12	0.01	0.11	0.01	17	0.11	0.01	0.28	0.08	0.28	0.08	0.45	0.20
16	0.20	0.04	0.18	0.03	0.13	0.02	0.13	0.02	16	0.13	0.02	0.25	0.06	0.24	0.06	0.43	0.18
15	0.16	0.03	0.16	0.03	0.07	0.01	0.13	0.02	15	0.04	0.00	0.21	0.04	0.16	0.03	0.36	0.13
14	0.15	0.02	0.14	0.02	0.08	0.01	0.17	0.03	14	-0.01	0.00	0.19	0.03	0.12	0.02	0.38	0.14
13	0.12	0.01	0.10	0.01	0.09	0.01	0.18	0.03	13	-0.09	0.01	0.07	0.01	0.11	0.01	0.33	0.11
12	-0.03	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.16	0.03	12	-0.17	0.03	-0.04	0.00	0.07	0.01	0.31	0.10
11	-0.04	0.00	-0.09	0.01	0.00	0.00	0.12	0.02	11	-0.10	0.01	-0.16	0.03	0.05	0.00	0.27	0.07
10	0.10	0.01	0.03	0.00	0.05	0.00	0.23	0.05	10	-0.06	0.00	0.00	0.00	0.08	0.01	0.31	0.10
9	0.04	0.00	0.02	0.00	0.13	0.02	0.32	0.10	9	-0.15	0.02	-0.04	0.00	0.09	0.01	0.33	0.11
8	0.06	0.00	0.08	0.01	0.09	0.01	0.24	0.06	8	-0.11	0.01	0.04	0.00	0.07	0.00	0.30	0.09
7	0.10	0.01	0.05	0.00	0.10	0.01	0.21	0.04	7	-0.09	0.01	-0.04	0.00	-0.01	0.00	0.21	0.04
6	0.16	0.03	-0.04	0.00	0.17	0.03	0.16	0.03	6	-0.13	0.02	-0.05	0.00	0.03	0.00	0.12	0.01

Korrelationen bei verschiedenen Suchparametern. Die Auswertung wurde für die Farbindizes 35 bis 6 und die Flächen 3, 7, 15 und 30 Pixel vorgenommen, die mit Delta-2 bestimmt worden sind.
links: Korrelation zwischen *Datensatz99* und *Direktsuche99 (*alle Bilddaten des Satelliten-Datensatzes der Sommermonate 1997-99).
rechts: Korrelation zwischen *Datensatz99* und *Direktsuche99-R (*nur Satellitenbilder, die über ein zeitlich korrespondierendes Radarbild verfügen).

Je grösser die Werte bei Farbindex und Maximalfläche sind, desto toleranter wird die Suche. Die Wahrscheinlichkeit, eine vom Radar detektierte Zelle zu treffen, steigt. Im Gegenzug steigt aber auch die Wahrscheinlichkeit, dass zu viele potentielle Gewitterzellen gefunden werden.

Das Maximum der Korrelationskoeffizienten wird bei der grössten Flächentoleranz von 30 Pixel erreicht. Sämtliche Vergleiche weisen eine positive wenn auch schwache Korrelation auf. *Datensatz99-R* zeigt zudem um den Farbwert 23 höhere Korrelationswerte. Diese werden aber durch den entscheidenden[30] *Datensatz99* nicht bestätigt.
Es war zu erwarten, dass die Korrelation von *Datensatz99* mit *Direktsuche99-R* grössere Werte liefert, als diejenige mit *Direktsuche99*, was bestätigt werden kann.

Die kleinen Korrelationswerte weisen darauf hin, dass auf dem Satellitenbild zu viele Wolken erkannt werden, die vom Radar nicht als potentielle Gewitterzellen detektiert werden (z.B. Zirren, die in Folge der Höhe den Kältefarbwert unterschreiten und gleichzeitig auch die Flächentoleranz einhalten).

Die statistisch bestimmten Grenzwerte von 30 beim Farbindex und 15 Pixel bei der Flächenlimite bei Suche auf Farb-Delta 2 führen nicht zu maximalen Korrelationswerten. Das Bestimmtheitsmass R^2 liegt bei sämtlichen Korrelationsmaxima zwischen 0.04 und 0.29, was bedeutet, dass im besten Fall nur gerade 29 % der Streuung von *Datensatz99* durch lineare Abhängigkeit von *Direktsuche99* erklärt werden können. Über die Signifikanz des ermittelten Zusammenhangs wird dabei nichts ausgesagt.
Die nachfolgenden statistischen Tests werden mit den Daten des kompletten Datensatzes (*Datensatz99 / Direktsuche99*) mit Parameter 30 beim Farbwert und 15 Pixel bei der Flächenlimite durchgeführt.

Normalitätstest (Kolmogorov-Smirnov)
Die Populationen erfüllen diesen Test nicht und sind somit von einer Population mit Normalverteilung signifikant verschieden ($P < 0.001$). Es wird zusätzlich zum *t-Test* ein *Mann-Whitney Rank Sum Test* durchgeführt.

H_0: Es besteht kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Verteilungen.
H_1: Es gibt einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Verteilungen.

t-Test
Der *t-Test* (durchgeführt mit 43 Werten der Sektoren) liefert folgende Ergebnisse:

	Mittelwert	Standardabw.	Standardfehler des Mittelwerts
Datensatz99	664.65	649.299	99.017
Direktsuche99	9‘145.40	1‘839.53	280.53

Differenz: -8‘480.74
$t = -28.51$ mit 84 Freiheitsgraden ($P_{zweiseitig} < 0.001$)
95 % Konfidenzintervall für Differenz der Mittelwerte: -9‘072.330 bis -7‘889.158

Der Unterschied zwischen den Datensätzen ist grösser, als dies durch Zufall erfolgen kann. Somit besteht ein statistisch signifikanter Unterschied ($P_{zweiseitig} < 0.001$) zwischen den Verteilungen, H_0 wird verworfen.

Die Sensitivität des Tests mit $\alpha = 0.050$ beträgt 1.00 und liegt somit über dem gewünschten Wert von 0.8.

30. Die Direktsuche auf Satellitenbildern darf nicht auf eine Vorselektion durch Radardaten angewiesen sein. Ziel ist es, Parameter zu finden, die ohne jegliche Unterstützung durch Radar zu Prognosen potentieller Gewitterzellen führen.

Mann-Whitney Rank Sum Test, durchgeführt mit 43 Werten:

	Median	25 %.	75 %
Datensatz99	365.00	129.50	1'037.50
Direktsuche99	8'805.00	7'804.75	10'388.75

T = 946.00 n(klein) = 43 n(gross) = 43 P < 0.001

Auch dieser Test verwirft mit einem P < 0.001 die Nullhypothese.

Als Vergleich wird die Auswertung mit Hilfe von *Direktsuche02* herbeigezogen:

TABELLE 4-3 Korrelation zwischen den Datensätzen (*Datensatz02* vs. *Direktsuche02*)

Daten: 00-02 Direktsuche	Flächen, bestimmt mit Farb-Delta 2								Daten: 00-02 Direktsuche-R	Flächen, bestimmt mit Farb-Delta 2							
	3 Pixel		7 Pixel		15 Pixel		30 Pixel			3 Pixel		7 Pixel		15 Pixel		30 Pixel	
Farbindex	R	R^2	R	R^2	R	R^2	R	R^2	Farbindex	R	R^2	R	R^2	R	R^2	R	R^2
35	0.09	0.01	0.20	0.04	**0.22**	**0.05**	**0.26**	**0.07**	35	0.20	0.04	0.27	0.07	0.27	0.07	0.27	0.07
34	0.03	0.00	0.11	0.01	0.15	0.02	0.20	0.04	34	0.20	0.04	0.30	0.09	0.30	0.09	0.31	0.10
33	0.00	0.00	0.10	0.01	0.13	0.02	0.19	0.03	33	0.18	0.03	0.29	0.09	0.31	0.10	0.35	0.12
32	0.00	0.00	0.09	0.01	0.11	0.01	0.18	0.03	32	0.21	0.04	0.30	0.09	0.33	0.11	0.36	0.13
31	0.00	0.00	0.07	0.01	0.08	0.01	0.16	0.03	31	0.23	0.05	0.33	0.11	0.36	0.13	0.39	0.15
30	0.00	0.00	0.06	0.00	**0.07**	**0.00**	0.14	0.02	30	0.25	0.06	0.34	0.12	**0.37**	**0.14**	**0.40**	**0.16**
29	0.08	0.01	0.11	0.01	0.05	0.00	0.12	0.02	29	0.26	0.07	0.30	0.09	0.34	0.12	0.34	0.12
28	0.08	0.01	0.12	0.01	0.09	0.01	0.14	0.02	28	0.25	0.06	0.32	0.10	0.36	0.13	0.35	0.12
27	0.08	0.01	0.12	0.01	0.10	0.01	0.13	0.02	27	0.27	0.07	0.33	0.11	0.36	0.13	0.35	0.12
26	0.09	0.01	0.13	0.02	0.10	0.01	0.12	0.01	26	0.27	0.07	0.32	0.11	0.36	0.13	0.35	0.12
25	0.10	0.01	0.13	0.02	0.11	0.01	0.13	0.02	25	0.29	0.08	0.30	0.09	0.35	0.12	0.35	0.12
24	0.13	0.02	0.13	0.02	0.11	0.01	0.12	0.02	24	0.34	0.11	0.29	0.09	0.33	0.11	0.35	0.12
23	0.15	0.02	0.15	0.02	0.11	0.01	0.11	0.01	23	**0.36**	**0.13**	0.28	0.08	0.32	0.10	0.36	0.13
22	0.16	0.03	0.14	0.02	0.10	0.01	0.10	0.01	22	0.34	0.12	0.22	0.05	0.30	0.09	0.34	0.11
21	0.11	0.01	0.13	0.02	0.09	0.01	0.09	0.01	21	0.31	0.10	0.21	0.04	0.25	0.06	0.30	0.09
20	0.10	0.01	0.14	0.02	0.09	0.01	0.09	0.01	20	0.30	0.09	0.23	0.05	0.26	0.07	0.33	0.11
19	0.06	0.00	0.11	0.01	0.11	0.01	0.09	0.01	19	0.26	0.07	0.20	0.04	0.27	0.07	0.34	0.11
18	0.08	0.01	0.12	0.01	0.08	0.01	0.07	0.00	18	0.25	0.06	0.14	0.02	0.22	0.05	0.31	0.10
17	0.14	0.02	0.14	0.02	0.11	0.01	0.07	0.00	17	0.32	0.10	0.13	0.02	0.20	0.04	0.28	0.08
16	0.09	0.01	0.11	0.01	0.10	0.01	0.10	0.01	16	0.31	0.10	0.07	0.00	0.17	0.03	0.29	0.08
15	0.01	0.00	0.08	0.01	0.07	0.00	0.13	0.02	15	0.28	0.08	0.05	0.00	0.11	0.01	0.29	0.09
14	0.05	0.00	0.14	0.02	0.09	0.01	0.13	0.02	14	0.24	0.06	0.10	0.01	0.11	0.01	0.25	0.06
13	0.07	0.01	0.20	0.04	0.09	0.01	0.19	0.04	13	0.22	0.05	0.17	0.03	0.01	0.00	0.22	0.05
12	0.10	0.01	0.18	0.03	0.03	0.00	0.19	0.04	12	0.24	0.06	0.14	0.02	-0.03	0.00	0.20	0.04
11	0.13	0.02	0.14	0.02	-0.01	0.00	0.13	0.02	11	0.25	0.06	0.08	0.01	-0.05	0.00	0.14	0.02
10	0.19	0.04	0.11	0.01	-0.05	0.00	-0.01	0.00	10	0.14	0.02	-0.01	0.00	-0.08	0.01	0.10	0.01
9	**0.21**	**0.05**	0.14	0.02	-0.05	0.00	-0.02	0.00	9	0.12	0.01	-0.08	0.01	-0.13	0.02	0.06	0.00
8	0.19	0.04	0.14	0.02	-0.06	0.00	-0.08	0.01	8	0.13	0.02	0.04	0.00	-0.05	0.00	-0.01	0.00
7	0.08	0.01	0.18	0.03	0.04	0.00	0.07	0.00	7	0.17	0.03	0.21	0.04	0.09	0.01	0.10	0.01
6	0.19	0.04	**0.27**	**0.07**	0.16	0.02	0.20	0.04	6	0.15	0.02	**0.35**	**0.12**	0.12	0.01	0.17	0.03

Korrelationen bei verschiedenen Suchparametern. Die Auswertung wurde für die Farbindizes 35 bis 6 und die Flächen 3, 7, 15 und 30 Pixel vorgenommen, die mit Delta-2 bestimmt worden sind.
links: Korrelation zwischen *Datensatz02* und *Direktsuche02 (*alle Bilddaten des Satelliten-Datensatzes der Sommermonate 1997-99).
rechts: Korrelation zwischen *Datensatz02* und *Direktsuche02-R (*nur Satellitenbilder, die über ein zeitlich korrespondierendes Radarbild verfügen).

Die maximale Korrelation liegt bei diesem Datensatz bei 0.4 (*Direktsuche02-R* bei Farbwert 30 / Fläche 30 Pixel). Der für die generelle Direktsuche ohne jegliche Hilfe von Radardaten viel relevantere Korrelations-Maximalwert des Datensatzes *Direktsuche02* liegt bei nur 0.27.

Zusammenfassend betrachtet kristallisiert sich kein eindeutiges Parameter-Paar heraus, das gleichzeitig bei den Daten beider Zeitperioden (1997-99 und 2000-02) zu maximalen Korrelationswerten führt. Bei den Kompletten Datensätzen liegen sämtliche Korrelationswerte in einem engen Band zwischen 0.21 und 0.35. Bei den reduzierten Datensätzen (Schnittmengen der Radar- und Satellitenbilder gleicher Aufnahmezeit) reicht dieser Bereich von 0.25 bis 0.54.

ABBILDUNG 4-21 Gegenüberstellung der Korrelationen beider Zeitperioden (1997-99 vs. 2000-02)

Daten: 97-99 Direktsuche	Flächen, bestimmt mit Farb-Delta 2							
	3 Pixel		7 Pixel		15 Pixel		30 Pixel	
Farbindex	R	R^2	R	R^2	R	R^2	R	R^2
35	0.21	0.04	**0.27**	**0.07**	**0.34**	**0.11**	**0.35**	**0.12**
34	**0.21**	**0.04**	0.27	0.07	0.31	0.10	0.31	0.09
33	0.20	0.04	0.26	0.07	0.28	0.08	0.27	0.08
32	0.19	0.04	0.25	0.06	0.26	0.07	0.25	0.06
31	0.16	0.02	0.24	0.06	0.24	0.06	0.24	0.06
30	0.15	0.02	0.23	0.05	**0.24**	**0.06**	0.23	0.05
29	0.15	0.02	0.24	0.06	0.20	0.04	0.18	0.03
28	0.15	0.02	0.23	0.05	0.19	0.03	0.16	0.02
27	0.15	0.02	0.23	0.05	0.19	0.04	0.16	0.02
26	0.15	0.02	0.21	0.04	0.18	0.03	0.13	0.02
25	0.15	0.02	0.22	0.05	0.18	0.03	0.14	0.02
24	0.14	0.02	0.21	0.04	0.17	0.03	0.13	0.02
23	0.14	0.02	0.21	0.04	0.16	0.02	0.13	0.02
22	0.16	0.03	0.20	0.04	0.13	0.02	0.13	0.02
21	0.14	0.02	0.19	0.04	0.11	0.01	0.12	0.01
20	0.16	0.02	0.17	0.03	0.12	0.02	0.13	0.02
19	0.17	0.03	0.16	0.02	0.10	0.01	0.13	0.02
18	0.14	0.02	0.14	0.02	0.10	0.01	0.12	0.01
17	0.18	0.03	0.15	0.02	0.12	0.01	0.11	0.01
16	0.20	0.04	0.18	0.03	0.13	0.02	0.13	0.02
15	0.16	0.03	0.16	0.03	0.07	0.01	0.13	0.02
14	0.15	0.02	0.14	0.02	0.08	0.01	0.17	0.03
13	0.12	0.01	0.10	0.01	0.09	0.01	0.18	0.03
12	-0.03	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.16	0.03
11	-0.04	0.00	-0.09	0.01	0.00	0.00	0.12	0.02
10	0.10	0.01	0.03	0.00	0.05	0.00	0.23	0.05
9	0.04	0.00	0.02	0.00	0.13	0.02	0.32	0.10
8	0.06	0.00	0.08	0.01	0.09	0.01	0.24	0.06
7	0.10	0.01	0.05	0.00	0.10	0.01	0.21	0.04
6	0.16	0.03	-0.04	0.00	0.17	0.03	0.16	0.03

Daten: 97-99 Direktsuche-R	Flächen, bestimmt mit Farb-Delta 2							
	3 Pixel		7 Pixel		15 Pixel		30 Pixel	
Farbindex	R	R^2	R	R^2	R	R^2	R	R^2
35	**0.25**	**0.06**	0.28	0.08	0.24	0.06	0.25	0.06
34	0.23	0.05	0.30	0.09	0.25	0.06	0.24	0.06
33	0.22	0.05	0.32	0.10	0.26	0.07	0.26	0.07
32	0.21	0.04	0.33	0.11	0.26	0.07	0.27	0.08
31	0.19	0.04	0.36	0.13	0.29	0.08	0.31	0.09
30	0.23	0.05	0.35	0.12	**0.30**	**0.09**	0.32	0.10
29	0.19	0.04	0.43	0.18	0.38	0.14	0.42	0.18
28	0.22	0.05	0.42	0.18	0.38	0.15	0.42	0.17
27	0.23	0.05	0.43	0.19	0.41	0.17	0.44	0.20
26	0.21	0.04	0.40	0.16	0.40	0.16	0.46	0.21
25	0.21	0.05	0.42	0.18	0.43	0.18	0.49	0.24
24	0.18	0.03	0.44	0.20	**0.45**	**0.20**	0.52	0.27
23	0.17	0.03	**0.45**	**0.20**	0.44	0.19	**0.54**	**0.29**
22	0.20	0.04	0.39	0.15	0.38	0.14	0.52	0.27
21	0.16	0.02	0.38	0.15	0.32	0.10	0.51	0.26
20	0.18	0.03	0.33	0.11	0.33	0.11	0.52	0.27
19	0.12	0.01	0.30	0.09	0.31	0.10	0.52	0.27
18	0.13	0.02	0.29	0.09	0.31	0.10	0.50	0.25
17	0.11	0.01	0.28	0.08	0.28	0.08	0.45	0.20
16	0.13	0.02	0.25	0.06	0.24	0.06	0.43	0.18
15	0.04	0.00	0.21	0.04	0.16	0.03	0.36	0.13
14	-0.01	0.00	0.19	0.03	0.12	0.02	0.38	0.14
13	-0.09	0.01	0.07	0.01	0.11	0.01	0.33	0.11
12	-0.17	0.03	-0.04	0.00	0.07	0.01	0.31	0.10
11	-0.10	0.01	-0.16	0.03	0.05	0.00	0.27	0.07
10	-0.06	0.00	0.00	0.00	0.08	0.01	0.31	0.10
9	-0.15	0.02	-0.04	0.00	0.09	0.01	0.33	0.11
8	-0.11	0.01	0.04	0.00	0.07	0.00	0.30	0.09
7	-0.09	0.01	-0.04	0.00	-0.01	0.00	0.21	0.04
6	-0.13	0.02	-0.05	0.00	0.03	0.00	0.12	0.01

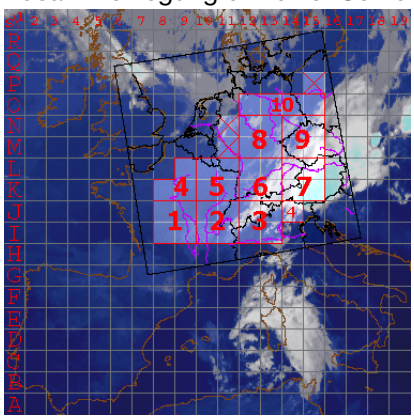
Daten: 00-02 Direktsuche	Flächen, bestimmt mit Farb-Delta 2							
	3 Pixel		7 Pixel		15 Pixel		30 Pixel	
Farbindex	R	R^2	R	R^2	R	R^2	R	R^2
35	0.09	0.01	0.20	0.04	**0.22**	**0.05**	**0.26**	**0.07**
34	0.03	0.00	0.11	0.01	0.15	0.02	0.20	0.04
33	0.00	0.00	0.10	0.01	0.13	0.02	0.19	0.03
32	0.00	0.00	0.09	0.01	0.11	0.01	0.18	0.03
31	0.00	0.00	0.07	0.01	0.08	0.01	0.16	0.03
30	0.00	0.00	0.06	0.00	**0.07**	**0.00**	0.14	0.02
29	0.08	0.01	0.11	0.01	0.05	0.00	0.12	0.02
28	0.08	0.01	0.12	0.01	0.09	0.01	0.14	0.02
27	0.08	0.01	0.12	0.01	0.10	0.01	0.13	0.02
26	0.09	0.01	0.13	0.02	0.10	0.01	0.12	0.01
25	0.10	0.01	0.13	0.02	0.11	0.01	0.13	0.02
24	0.13	0.02	0.13	0.02	0.11	0.01	0.12	0.02
23	0.15	0.02	0.15	0.02	0.11	0.01	0.11	0.01
22	0.16	0.03	0.14	0.02	0.10	0.01	0.10	0.01
21	0.11	0.01	0.13	0.02	0.09	0.01	0.09	0.01
20	0.10	0.01	0.14	0.02	0.09	0.01	0.09	0.01
19	0.06	0.00	0.11	0.01	0.11	0.01	0.09	0.01
18	0.08	0.01	0.12	0.01	0.08	0.01	0.07	0.00
17	0.14	0.02	0.14	0.02	0.11	0.01	0.07	0.00
16	0.09	0.01	0.11	0.01	0.10	0.01	0.10	0.01
15	0.01	0.00	0.08	0.01	0.07	0.00	0.13	0.02
14	0.05	0.00	0.14	0.02	0.09	0.01	0.13	0.02
13	0.07	0.01	0.20	0.04	0.09	0.01	0.19	0.04
12	0.10	0.01	0.18	0.03	0.03	0.00	0.19	0.04
11	0.13	0.02	0.14	0.02	-0.01	0.00	0.13	0.02
10	0.19	0.04	0.11	0.01	-0.05	0.00	-0.01	0.00
9	**0.21**	**0.05**	0.14	0.02	-0.05	0.00	-0.02	0.00
8	0.19	0.04	0.14	0.02	-0.06	0.00	-0.08	0.01
7	0.08	0.01	0.18	0.03	0.04	0.00	0.07	0.00
6	0.19	0.04	**0.27**	**0.07**	0.16	0.02	0.20	0.04

Daten: 00-02 Direktsuche-R	Flächen, bestimmt mit Farb-Delta 2							
	3 Pixel		7 Pixel		15 Pixel		30 Pixel	
Farbindex	R	R^2	R	R^2	R	R^2	R	R^2
35	0.20	0.04	0.27	0.07	0.27	0.07	0.27	0.07
34	0.20	0.04	0.30	0.09	0.30	0.09	0.31	0.10
33	0.18	0.03	0.29	0.09	0.31	0.10	0.35	0.12
32	0.21	0.04	0.30	0.09	0.33	0.11	0.36	0.13
31	0.23	0.05	0.33	0.11	0.36	0.13	0.39	0.15
30	0.25	0.06	0.34	0.12	**0.37**	**0.14**	**0.40**	**0.16**
29	0.26	0.07	0.30	0.09	0.34	0.12	0.34	0.12
28	0.25	0.06	0.32	0.10	0.36	0.13	0.35	0.12
27	0.27	0.07	0.33	0.11	0.36	0.13	0.35	0.12
26	0.27	0.07	0.32	0.11	0.36	0.13	0.35	0.12
25	0.29	0.08	0.30	0.09	0.35	0.12	0.35	0.12
24	0.34	0.11	0.29	0.09	0.33	0.11	0.35	0.12
23	**0.36**	**0.13**	0.28	0.08	0.32	0.10	0.36	0.13
22	0.34	0.12	0.22	0.05	0.30	0.09	0.34	0.11
21	0.31	0.10	0.21	0.04	0.25	0.06	0.30	0.09
20	0.30	0.09	0.23	0.05	0.26	0.07	0.33	0.11
19	0.26	0.07	0.20	0.04	0.27	0.07	0.34	0.11
18	0.25	0.06	0.14	0.02	0.22	0.05	0.31	0.10
17	0.32	0.10	0.13	0.02	0.20	0.04	0.28	0.08
16	0.31	0.10	0.07	0.00	0.17	0.03	0.29	0.08
15	0.28	0.08	0.05	0.00	0.11	0.01	0.29	0.09
14	0.24	0.06	0.10	0.01	0.11	0.01	0.25	0.06
13	0.22	0.05	0.17	0.03	0.01	0.00	0.22	0.05
12	0.24	0.06	0.14	0.02	-0.03	0.00	0.20	0.04
11	0.25	0.06	0.08	0.01	-0.05	0.00	0.14	0.02
10	0.14	0.02	-0.01	0.00	-0.08	0.01	0.10	0.01
9	0.12	0.01	-0.08	0.01	-0.13	0.02	0.06	0.00
8	0.13	0.02	0.04	0.00	-0.05	0.00	-0.01	0.00
7	0.17	0.03	0.21	0.04	0.09	0.01	0.10	0.01
6	0.15	0.02	**0.35**	**0.12**	0.12	0.01	0.17	0.03

links: Korrelationen der Zeitperiode 1997-99 / rechts: Korrelationen der Zeitperiode 2000-02

Durch den Zusammenschluss einzelner Sektoren kann die Auflösung der betrachteten Fläche verkleinert werden, so dass die Korrelationswerte möglicherweise zunehmen. Aus diesem Grund werden einzelne Sektoren gemäss Abbildung 4-22 zusammengelegt:

ABBILDUNG 4-22 Zusammenlegung einzelner Sektoren



Zusammenlegung einzelner Sektoren: neu werden nur noch 10 Sektoren gleicher Fläche betrachtet. J14 wird als Ersatz für L8 zu Sektor 4 addiert. M11, N11 und P15 werden eliminiert.

Das Testgebiet wird durch die Eliminierung der drei Sektoren M11, N11 und P15 verkleinert, damit alle Sektoren Gebiete gleicher Fläche abdecken. Die Korrelationswerte steigen in Folge der Sektorzusammenlegung tatsächlich an (siehe Abbildung 4-23).

ABBILDUNG 4-23 Korrelationen nach Vergrösserung der Sektorflächen

Daten: 97-99	Flächen, bestimmt mit Farb-Delta 2							
Direktsuche	3 Pixel		7 Pixel		15 Pixel		30 Pixel	
Farbindex	R	R^2	R	R^2	R	R^2	R	R^2
35	0.36	0.13	**0.42**	**0.18**	**0.54**	**0.29**	0.58	0.33
34	0.33	0.11	0.40	0.16	0.47	0.22	0.49	0.24
33	0.31	0.10	0.38	0.15	0.42	0.18	0.44	0.19
32	0.31	0.09	0.36	0.13	0.40	0.16	0.41	0.17
31	0.25	0.06	0.36	0.13	0.40	0.16	0.42	0.17
30	0.21	0.04	0.33	0.11	**0.39**	**0.15**	0.40	0.16
29	0.19	0.04	0.33	0.11	0.34	0.12	0.34	0.11
28	0.20	0.04	0.34	0.11	0.34	0.12	0.32	0.10
27	0.19	0.04	0.35	0.12	0.34	0.12	0.31	0.10
26	0.18	0.03	0.31	0.10	0.32	0.10	0.28	0.08
25	0.19	0.04	0.31	0.10	0.30	0.09	0.26	0.07
24	0.19	0.04	0.30	0.09	0.30	0.09	0.27	0.07
23	0.20	0.04	0.30	0.09	0.29	0.09	0.27	0.07
22	0.22	0.05	0.30	0.09	0.26	0.07	0.25	0.06
21	0.21	0.04	0.26	0.07	0.25	0.06	0.24	0.06
20	0.23	0.05	0.27	0.08	0.28	0.08	0.26	0.07
19	0.29	0.08	0.29	0.08	0.26	0.07	0.26	0.07
18	0.29	0.08	0.29	0.08	0.28	0.08	0.28	0.08
17	0.32	0.10	0.33	0.11	0.29	0.08	0.26	0.07
16	0.35	0.12	0.39	0.15	0.31	0.09	0.29	0.08
15	0.34	0.12	0.32	0.10	0.20	0.04	0.24	0.06
14	**0.39**	**0.15**	0.24	0.06	0.15	0.02	0.20	0.04
13	0.33	0.11	0.14	0.02	0.15	0.02	0.15	0.02
12	0.31	0.09	0.11	0.01	0.11	0.01	0.15	0.02
11	0.04	0.00	-0.09	0.01	0.09	0.01	0.13	0.02
10	0.12	0.01	0.07	0.00	0.19	0.04	0.34	0.12
9	-0.04	0.00	0.10	0.01	0.39	0.15	0.43	0.19
8	-0.12	0.02	0.12	0.01	0.30	0.09	0.45	0.21
7	0.07	0.01	-0.04	0.00	0.47	0.22	**0.59**	**0.35**
6	0.38	0.15	-0.08	0.01	0.50	0.25	0.54	0.29

Daten: 97-99	Flächen, bestimmt mit Farb-Delta 2							
Direktsuche-R	3 Pixel		7 Pixel		15 Pixel		30 Pixel	
Farbindex	R	R^2	R	R^2	R	R^2	R	R^2
35	0.26	0.07	0.20	0.04	0.08	0.01	0.09	0.01
34	0.24	0.06	0.24	0.06	0.09	0.01	0.07	0.01
33	0.25	0.06	0.30	0.09	0.17	0.03	0.12	0.01
32	0.27	0.07	0.37	0.13	0.21	0.05	0.16	0.03
31	0.26	0.07	0.44	0.20	0.28	0.08	0.22	0.05
30	0.27	0.07	0.43	0.18	**0.29**	**0.08**	0.21	0.04
29	0.42	0.18	0.56	0.31	0.45	0.20	0.40	0.16
28	0.43	0.19	0.57	0.32	0.48	0.23	0.37	0.14
27	0.45	0.20	0.57	0.33	0.52	0.27	0.44	0.20
26	0.50	0.25	0.56	0.32	0.52	0.27	0.47	0.22
25	0.50	0.25	0.60	0.36	0.56	0.32	0.50	0.25
24	0.45	0.21	0.62	0.38	0.61	0.37	0.58	0.33
23	0.46	0.21	**0.65**	**0.43**	**0.61**	**0.38**	0.61	0.37
22	0.47	0.22	0.61	0.37	0.56	0.31	0.57	0.33
21	0.53	0.29	0.61	0.37	0.53	0.29	0.56	0.32
20	0.55	0.30	0.60	0.35	0.55	0.31	0.58	0.33
19	0.53	0.28	0.56	0.32	0.54	0.29	0.60	0.36
18	**0.58**	**0.34**	0.56	0.32	0.59	0.35	**0.64**	**0.41**
17	0.49	0.24	0.57	0.32	0.55	0.30	0.60	0.36
16	0.52	0.27	0.58	0.33	0.46	0.21	0.59	0.34
15	0.48	0.23	0.51	0.26	0.32	0.10	0.46	0.21
14	0.50	0.25	0.39	0.16	0.24	0.06	0.40	0.16
13	0.42	0.17	0.27	0.07	0.25	0.06	0.29	0.09
12	0.30	0.09	0.12	0.01	0.19	0.03	0.28	0.08
11	0.11	0.01	-0.30	0.09	-0.11	0.01	0.04	0.00
10	0.06	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.16	0.03
9	-0.13	0.02	-0.06	0.00	0.08	0.01	0.18	0.03
8	-0.07	0.00	0.16	0.03	0.21	0.04	0.28	0.08
7	0.03	0.00	0.18	0.03	0.34	0.11	0.38	0.14
6	0.05	0.00	-0.01	0.00	0.35	0.12	0.43	0.19

Daten: 00-02	Flächen, bestimmt mit Farb-Delta 2							
Direktsuche	3 Pixel		7 Pixel		15 Pixel		30 Pixel	
Farbindex	R	R^2	R	R^2	R	R^2	R	R^2
35	0.15	0.02	0.29	0.09	0.18	0.03	0.23	0.05
34	0.09	0.01	0.18	0.03	0.13	0.02	0.24	0.06
33	0.06	0.00	0.15	0.02	0.16	0.03	0.32	0.10
32	0.05	0.00	0.13	0.02	0.19	0.03	0.32	0.10
31	0.08	0.01	0.15	0.02	0.17	0.03	0.32	0.10
30	0.11	0.01	0.15	0.02	**0.15**	**0.02**	0.29	0.08
29	0.22	0.05	0.21	0.04	0.16	0.03	0.23	0.06
28	0.21	0.04	0.23	0.05	0.21	0.04	0.25	0.06
27	0.21	0.04	0.24	0.06	0.24	0.06	0.24	0.06
26	0.20	0.04	0.26	0.07	0.24	0.06	0.25	0.06
25	0.23	0.05	0.29	0.08	0.28	0.08	0.26	0.07
24	0.25	0.06	0.28	0.08	0.29	0.08	0.27	0.07
23	0.23	0.05	0.26	0.07	0.26	0.07	0.23	0.05
22	0.22	0.05	0.26	0.07	0.25	0.06	0.21	0.04
21	0.23	0.05	0.27	0.07	0.27	0.07	0.20	0.04
20	0.18	0.03	0.27	0.08	0.26	0.07	0.18	0.03
19	0.13	0.02	0.24	0.06	0.28	0.08	0.15	0.02
18	0.20	0.04	0.26	0.07	0.26	0.07	0.13	0.02
17	0.29	0.08	0.38	0.14	0.33	0.11	0.12	0.01
16	0.29	0.09	0.36	0.13	0.35	0.12	0.17	0.03
15	0.27	0.07	0.34	0.12	0.37	0.14	0.26	0.07
14	0.26	0.07	0.34	0.12	0.39	0.15	0.30	0.09
13	0.20	0.04	0.33	0.11	0.43	0.18	0.43	0.19
12	0.23	0.05	0.39	0.15	0.43	0.19	0.48	0.23
11	0.33	0.11	0.53	0.28	0.61	0.37	**0.67**	**0.45**
10	0.36	0.13	0.55	0.30	0.63	0.40	0.56	0.32
9	**0.42**	**0.18**	0.55	0.30	**0.75**	**0.56**	0.57	0.32
8	0.36	0.13	0.44	0.19	0.58	0.34	0.35	0.12
7	0.36	0.13	0.71	0.50	0.59	0.35	0.45	0.21
6	0.39	0.16	**0.72**	**0.52**	0.66	0.43	0.64	0.42

Daten: 00-02	Flächen, bestimmt mit Farb-Delta 2							
Direktsuche-R	3 Pixel		7 Pixel		15 Pixel		30 Pixel	
Farbindex	R	R^2	R	R^2	R	R^2	R	R^2
35	0.31	0.10	0.36	0.13	0.23	0.05	0.17	0.03
34	0.33	0.11	0.36	0.13	0.24	0.06	0.22	0.05
33	0.30	0.09	0.35	0.12	0.26	0.07	0.28	0.08
32	0.37	0.14	0.38	0.14	0.31	0.10	0.31	0.10
31	0.42	0.17	0.42	0.18	0.35	0.12	0.35	0.12
30	0.49	0.24	0.48	0.23	**0.39**	**0.16**	0.37	0.14
29	0.29	0.09	0.35	0.13	0.35	0.12	0.32	0.10
28	0.25	0.06	0.38	0.15	0.35	0.12	0.36	0.13
27	0.27	0.07	0.38	0.14	0.38	0.14	0.40	0.16
26	0.17	0.03	0.41	0.17	0.42	0.18	0.44	0.20
25	0.23	0.05	0.44	0.19	0.45	0.20	0.46	0.21
24	0.27	0.07	0.38	0.14	0.41	0.17	0.50	0.25
23	0.20	0.04	0.31	0.10	0.37	0.14	0.48	0.23
22	0.25	0.06	0.25	0.06	0.32	0.10	0.47	0.22
21	0.38	0.14	0.32	0.10	0.35	0.12	0.48	0.23
20	0.33	0.11	0.37	0.13	0.34	0.12	0.48	0.23
19	0.25	0.06	0.31	0.10	0.40	0.16	0.46	0.21
18	0.28	0.08	0.25	0.06	0.35	0.12	0.45	0.20
17	0.49	0.24	0.40	0.16	**0.53**	**0.28**	0.51	0.26
16	0.51	0.26	0.32	0.11	0.44	0.19	0.50	0.25
15	0.51	0.26	0.24	0.06	0.38	0.15	0.53	0.28
14	0.41	0.17	0.31	0.10	0.30	0.09	0.45	0.21
13	0.39	0.15	0.26	0.07	0.22	0.05	0.53	0.28
12	0.39	0.15	0.36	0.13	0.24	0.06	0.51	0.26
11	0.57	0.32	0.42	0.18	0.41	0.17	**0.72**	**0.52**
10	0.52	0.27	0.43	0.19	0.38	0.15	0.50	0.25
9	0.46	0.21	0.23	0.05	0.31	0.09	0.55	0.30
8	0.75	0.57	0.18	0.03	0.06	0.00	0.30	0.09
7	**0.79**	**0.62**	0.47	0.22	0.13	0.02	0.00	0.00
6	0.65	0.42	**0.64**	**0.41**	0.19	0.04	0.13	0.02

oben: Korrelationen der Zeitperiode 1997-99 / unten: Korrelationen der Zeitperiode 2000-02
Beide Berechnungen basieren auf den Werten der zusammengelegten Sektoren.

Die höchsten Korrelationen beider Perioden tendieren nun zu „kälteren" Farbwerten. Eine Gegenüberstellung der neuen Korrelationsmaxima zeigt Abbildung 4-24:

ABBILDUNG 4-24 Gegenüberstellung der höchsten Korrelationen

Fläche	Max. Korrel.-koeffizient in Periode 1997-99	Farb-Limit	Periode 2000-02 bei gleichen Parametern
3	**0.39**	**14**	0.26
7	**0.42**	**35**	0.29
15	**0.54**	**35**	0.18
30	**0.59**	**7**	0.45
Fläche	**Max. Korrel.-koeffizient in Periode 2000-02**	**Farb-Limit**	**Periode 1997-99 bei gleichen Parametern**
3	**0.42**	**9**	-0.04
7	**0.72**	**6**	-0.08
15	**0.75**	**9**	0.39
30	**0.67**	**11**	0.13

In Periode 97-99 liegt der maximale Korrelationskoeffizient bei 0.59 (Farbwert: 7 / Fläche: 30). Der Korrelationskoeffizient gleicher Parameter liegt in Periode 00-02 bei 0.45.
In Periode 00-02 liegt der maximale Korrelationskoeffizient bei 0.75 (Farbwert: 9 / Fläche: 15). Der Korrelationskoeffizient gleicher Parameter liegt in Periode 97-99 bei 0.39.

Bei beiden Datensätzen liefert die Direktsuche wesentlich kleinere Werte, als es die Radarstationen detektiert haben (siehe Mittelwerte im nachfolgenden *t-Test*). Dies kann dem extrem „kalten" Farbwert-Filter zugeschrieben werden.

Auf die Daten beider Zeitperioden wird erneut ein t-Test angewendet:

Zeitperiode 1997-99: Test *Datensatz99* mit *Direktsuche99*
(Korrelation: 0.59 / Farbwert: 7 / Fläche: 30)

Normalitätstest (Kolmogorov-Smirnov)
Die Populationen erfüllen diesen Test nicht und sind somit von einer Population mit Normalverteilung signifikant verschieden (P = 0.004). Es wird zusätzlich zum *t-Test* ein *Mann-Whitney Rank Sum Test* durchgeführt.

t-Test
H_0: Es besteht kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Verteilungen.
H_1: Es gibt einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Verteilungen.

Der *t-Test* (durchgeführt mit 10 Werten der zusammengefassten Sektoren) liefert folgende Ergebnisse:

	Mittelwert	Standardabw.	Standardfehler des Mittelwerts
Datensatz99	2'656.20	1'914.05	605.27
Direktsuche99	300.80	112.52	35.58

Differenz: 2'355.40
t = 3.885 mit 18 Freiheitsgraden ($P_{zweiseitig}$ = 0.001)
95 % Konfidenzintervall für Differenz der Mittelwerte: 1'081.571 bis 3'629.229

Der Unterschied zwischen den Datensätzen ist grösser, als dies durch Zufall erfolgen kann. Somit besteht ein statistisch signifikanter Unterschied ($P_{zweiseitig}$ = 0.001) zwischen den Verteilungen, H_0 wird verworfen.

Die Sensitivität des Tests mit α = 0.050 beträgt 0.957 und liegt somit über dem gewünschten Wert von 0.8.

Mann-Whitney Rank Sum Test, durchgeführt mit 10 Werten:

	Median	25 %.	75 %
Datensatz99	2'138.50	793.00	4'459.00
Direktsuche99	290.50	214.00	351.00

T = 155.00	n(klein) = 10	n(gross) = 10	P < 0.001

Auch dieser Test verwirft mit einem P < 0.001 die Nullhypothese.

Zeitperiode 2000-02: Test *Datensatz02* mit *Direktsuche02*
(Korrelation: 0.75 / Farbwert: 9 / Fläche: 15)

Normalitätstest (Kolmogorov-Smirnov)
Die Populationen erfüllen diesen Test nicht und sind somit von einer Population mit Normalverteilung signifikant verschieden (P = 0.003). Es wird zusätzlich zum *t-Test* ein *Mann-Whitney Rank Sum Test* durchgeführt

t-Test
H_0: Es besteht kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Verteilungen.
H_1: Es gibt einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Verteilungen.

Der *t-Test* (durchgeführt mit 10 Werten der zusammengefassten Sektoren) liefert folgende Ergebnisse:

	Mittelwert	Standardabw.	Standardfehler des Mittelwerts
Datensatz02	1‘827.80	1‘123.88	355.40
Direktsuche02	200.40	60.90	19.26

Differenz: 1‘627.40
t = 4.572 mit 18 Freiheitsgraden ($P_{zweiseitig} < 0.001$)
95 % Konfidenzintervall für Differenz der Mittelwerte: 879.633 bis 2‘375.167

Der Unterschied zwischen den Datensätzen ist grösser, als dies durch Zufall erfolgen kann. Somit besteht ein statistisch signifikanter Unterschied ($P_{zweiseitig} < 0.001$) zwischen den Verteilungen, H_0 wird verworfen.

Die Sensitivität des Tests mit $\alpha = 0.050$ beträgt 0.993 und liegt somit über dem gewünschten Wert von 0.8.

Mann-Whitney Rank Sum Test, durchgeführt mit 10 Werten:

	Median	25 %.	75 %
Datensatz02	1‘648.50	1‘166.00	2‘584.00
Direktsuche02	198.50	169.00	221.00

T = 145.00 n(klein) = 10 n(gross) = 10 P = 0.003

Auch dieser Test verwirft mit einem P = 0.003 die Nullhypothese.

4.2.3.3 Fazit aus der Betrachtung der Korrelationswerte zwischen den Datensätzen

Die statistische Auswertung bringt keine eindeutigeren Parameter hervor, die zu statistisch signifikant besseren Korrelationen führen würden. Wird beachtet, dass über 99 % aller vom Radar detektierten Zellen eine Fläche kleiner 15 Satellitenpixel aufweisen(entspricht einer Fläche von ca. 450 km^2!!! Die durchschnittliche Gewitterzellengrösse beträgt 3 Satellitenpixel.), erscheint dieser Grenzwert nach wie vor die äusserste Limite für den Flächenparameter zu sein. Eine Verschiebung des Farbwertparameters in Richtung „kälterer“ Werte eliminiert die tiefer gelegenen, wärmeren Wolken. Eine Anpassung bei diesem Wert ergäbe somit mehr Sinn. **Da aber auch hier nur eine arbiträre Änderung vorgenommen werden kann, wird auf eine Anpassung der Parameter verzichtet und weiterhin mit Farbwert-Limite 30 und Flächen-Limite 15 gearbeitet** (siehe Abschnitt 3.3.3 auf Seite 33 und Abschnitt 4.2.2 auf Seite 43). Dabei wird in Kauf genommen, dass tendenziell zu viele Wolken als potentielle Gewitterzellen identifiziert werden.

4.2.3.4 Statistische Trefferquote der Direktsuche

Die Statistische Trefferquote der Direktsuche ist eine konstruierte Grösse um festzustellen, wieviele Gewitterzellen, die durch die Radarmessungen erfasst worden sind, auch durch die Direktsuche auf dem Satellitenbild erfasst werden.

Die prozentuale Differenz der Werte wird pro Sektor berechnet und anschliessend durch die Fläche und Zeit der Beobachtungsperiode in Monaten dividiert. Pro Zelle entsteht auf diese Weise ein positiver oder negativer Wert, der für eine Region (= Sektorfläche) die Über- oder Unterschätzung in Prozent pro Fläche und Zeit angibt. Das arithmetische Mittel aller Sektorwerte zeigt an, ob die Erkennung potentieller Hagelzellen tendenziell zu hohe oder zu tiefe Werte liefert (positive und negative Werte heben sich dabei gegenseitig auf). Das arithmetische Mittel aller Absolutbeträge gibt an, wie stark die prozentuale Abweichung (unabhängig der Richtung) ist.

Beispiel:	
Pixel, durch Radar erfasst:	500
Pixel, durch Direktsuche erfasst:	800
Prozentuale Differenz der Pixel:	800 / 500 - 1 = 0.6 = 60 %
Zeitperiode (3 Jahre à 4 Monate):	12 Monate
Sektorfläche:	$(20 \times 6.5)^2 = 16'900\ km^2$
Normierungsfaktor:	1'000
Berechnung:	60 % / 12 Monate / $16'900\ km^2$
Score:	*+ 0.296 %/1'000 km²/Monat*

Für die beiden Zeitperioden ergibt die Berechnung dieses Scores folgendes Bild:

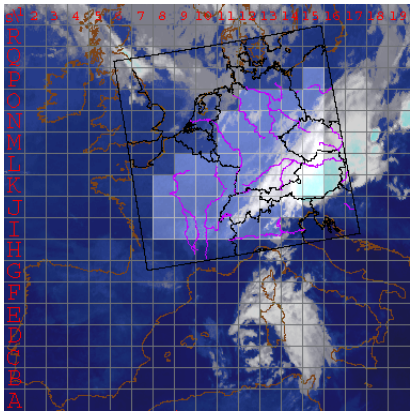
ABBILDUNG 4-25 Score (Trefferquote) der beiden Datensätze

Datensatz99

	8	9	10	11	12	13	14	15
P								10.48
O					0.19	0.08	-0.03	3.84
N				0.05	1.24	0.57	1.21	11.32
M				1.55	6.22	6.77	6.23	6.11
L		1.95	3.06	2.78	0.31	0.36	0.10	0.60
K	3.19	11.71	5.90	0.62	-0.11	0.85	0.65	0.87
J	10.84	14.92	2.39	0.17	0.31	9.68	15.90	
I	10.24	2.66	1.19	0.20	3.08	5.00		

Datensatz02

	8	9	10	11	12	13	14	15
P								49.06
O					0.52	0.64	1.15	6.51
N				0.08	1.38	1.80	3.33	14.35
M				0.38	1.33	1.53	0.74	1.07
L		1.21	0.71	2.05	1.14	0.58	0.36	0.43
K	-	36.93	5.03	0.26	-0.04	0.57	1.52	1.37
J	-	11.69	2.88	0.37	0.25	8.24	6.80	
I	-	48.43	3.77	0.58	2.91	3.30		



Trefferquoten von *Direktsuche99* (oben) und *Direktsuche02* (unten). Rechts: Korrespondierendes Gebiet. Die Einheit der Scores beträgt: Prozent pro 1'000 km^2 pro Monat. Positive Werte weisen auf Überschätzung, negative auf Unterschätzung der realen Verhältnisse hin. Ein Nullwert deutet auf exakte Prognose hin. Bei *Datensatz02* weisen die Sektoren I8 bis K8 keine Treffer beim Radar auf - der Score kann somit nicht berechnet werden.

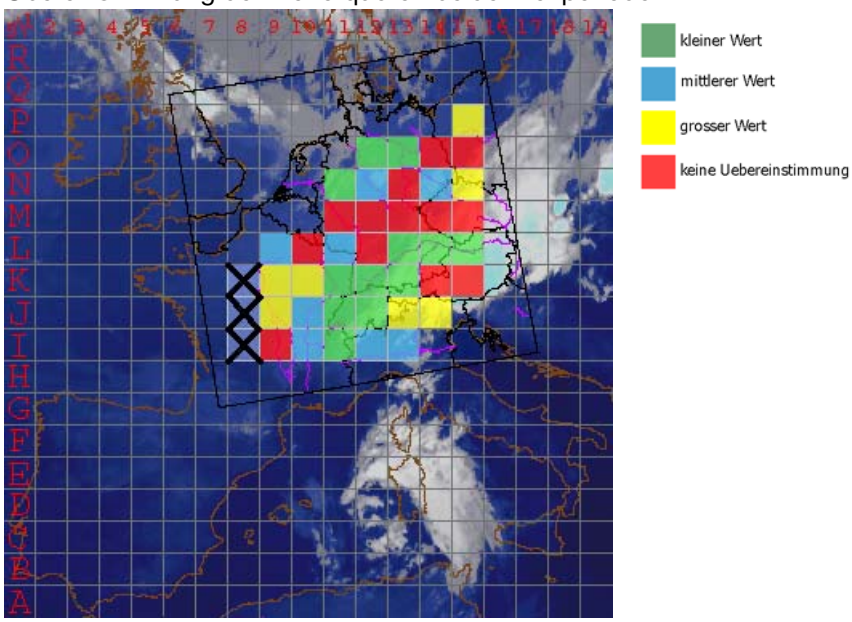
Die grösste absolute Abweichung zeigt Sektor P15 bei *Datensatz02*, die kleinste wird bei *Datensatz99* in Sektor O14 registriert.
Das arithmetische Mittel bei *Datensatz99* beträgt 3.84 (Median: 1.95) %/1'000 km^2/Monat, dasjenige von *Datensatz02* 5.63 (Median: 1.35) %/1'000 km^2/Monat. Alle Werte bis auf zwei Ausnahmen bei *Datensatz99* und einer Ausnahme bei *Datensatz02* zeigen positive Abweichungen gegenüber den Radardaten. **Ein weiteres Mal wird gezeigt, dass die Direktsuche auf dem Satellitenbild tendenziell zu viele potentielle Gewitterzellen findet und die Abweichungen keine Systematik zeigen.**

Bemerkenswert ist, dass es trotzdem gewisse Parallelen zwischen den Datensätzen gibt. Folgende Fälle gibt es zu verzeichnen:

- Sektoren mit sehr grossen Abweichungswerten > 5 %/1'000 km^2/Monat *in beiden Datensätzen*. Dies sind die Sektoren J9, K9, K10, J13, J14, P15 und N15.
- Sektoren mit ähnlich grossen Abweichungswerten im Bereich von 1 bis 5 %/1'000 km^2/Monat *in beiden Datensätzen*.
  Dies sind die Sektoren L9, J10, I10, L11, N12, I12, I13 und N14.
- Sektoren mit relativ kleinen Abweichungswerten < 1 %/1'000 km^2/Monat *in beiden Datensätzen*. Dies sind die Sektoren N11, K11, J11, I11, O12, K12, J12, O13, L13, K13, L14 und L15.

- Die übrigen 13 (von betrachteten 40) Sektoren zeigen *keine Parallelen* in den beiden Datensätzen.

ABBILDUNG 4-26 Übereinstimmung der Trefferquoten beider Zeitperioden



Übereinstimmung beider Datensätze bezüglich der Abweichung in der Trefferquote. Sektoren, die **in beiden Datensätzen** kleine Abweichungswerte zeigen, werden grün, solche mit mittlerer Abweichung rot und solche mit extrem grossen Werten gelb abgebildet. Rot werden Sektoren mit keiner Übereinstimmung markiert. Die Sektoren I8, J8 und K8 werden ausgeschlossen, da *Datensatz02* für diese Zellen infolge fehlender Radartreffer keine Werte liefert.

Abbildung 4-26 entspricht in gewissem Sinne der inversen Version von Abbildung 4-19 auf Seite 47: die zwei Zonen im Norden und Süden mit grossen Werten in den Radar-Datensätzen führen zu kleineren Trefferabweichungen gegenüber der Satellitenbild-Direktsuche, während die Mittelzone quer durch Deutschland sehr unterschiedliche Trefferabweichungen liefert.

4.2.3.5 Satellit vs. Satellit

Obwohl die statistischen Auswertungen zwischen den Radar- und Satellitenbilddatensätzen keine hohen, statistisch signifikanten Korrelationswerte ergeben, werden im Folgenden die Ergebnisse der Direktsuchen auf den Satellitenbildern einander gegenübergestellt. Dabei wird nach wie vor davon ausgegangen, dass eine gewisse Anzahl potentieller Gewitterzellen richtig detektiert wird und die zusätzlich akzeptierten hohen Wolken einer Zufallsverteilung unterliegen.

Direktsuche99-R vs. *Direktsuche02-R*

Der Vergleich zwischen *Direktsuche99-R* und *Direktsuche02-R* (mit Limit 30 bei Farbindex und 15 Pixel bei der Fläche) über dem Radar-Testgebiet (siehe Abbildung 4-25 auf Seite 56) führt zu folgendem Resultat:

Der Korrelationskoeffizient beträgt 0.71 ($R^2 = 0.51$).

Normalitätstest (Kolmogorov-Smirnov): Wird mit einem Wert von $P > 0.05$ erfüllt.

Equal Variance Test (Levene Mediantest): Wird mit einem Wert von $P = 0.099$ erfüllt.

t-Test
H_0: Es besteht kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Verteilungen.
H_1: Es gibt einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Verteilungen.

Der *t-Test* (durchgeführt mit 43 Werten der einzelnen Sektoren) liefert folgende Ergebnisse:

	Mittelwert	Standardabw.	Standardfehler des Mittelwerts
Direktsuche99-R	1'959.70	406.29	61.96
Direktsuche02-R	1'588.56	343.90	52.45

Differenz: 371.14
t = 4.572 mit 84 Freiheitsgraden ($P_{zweiseitig} < 0.001$)
95 % Konfidenzintervall für Differenz der Mittelwerte: 209.714 bis 532.565

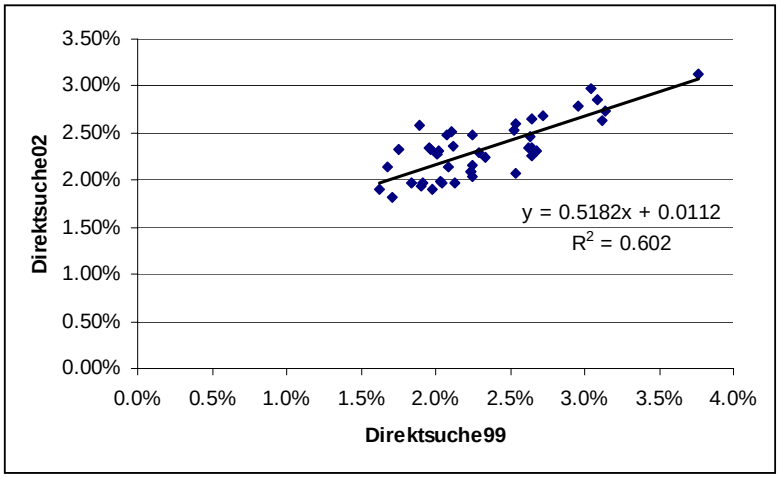
Der Unterschied zwischen den Datensätzen ist grösser, als durch Zufall erklärt werden kann. Somit besteht ein statistisch signifikanter Unterschied ($P_{zweiseitig} < 0.001$) zwischen den Verteilungen, H_0 wird verworfen.

Die Sensitivität des Tests mit $\alpha = 0.050$ beträgt 0.997 und liegt somit über dem gewünschten Wert von 0.8.

Direktsuche99 vs. *Direktsuche02*
Ein weiterer Vergleich zwischen den vollständigen Datensätzen *Direktsuche99* und *Direktsuche02* unter gleichen Bedingungen führt zu folgendem Resultat:

Der Korrelationskoeffizient beträgt 0.78 ($R^2 = 0.60$).

ABBILDUNG 4-27 Scatter-Plot: *Direktsuche99* vs. *Direktsuche02* (Pixel / Sektor, prozentual)



Normalitätstest (Kolmogorov-Smirnov):
Die Populationen erfüllen diesen Test nicht und sind somit von einer Population mit Normalverteilung signifikant verschieden (P = 0.029). Es wird zusätzlich zum *t-Test* ein *Mann-Whitney Rank Sum Test* durchgeführt

t-Test
H_0: Es besteht kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Verteilungen.
H_1: Es gibt einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Verteilungen.

Der *t-Test* (durchgeführt mit 43 Werten der einzelnen Sektoren) liefert folgende Ergebnisse:

	Mittelwert	Standardabw.	Standardfehler des Mittelwerts
Direktsuche99	9‘145.40	1‘839.53	280.53
Direktsuche02	8‘870.88	1‘191.81	181.75

Differenz: 274.51
t = 0.821 mit 84 Freiheitsgraden ($P_{zweiseitig}$ = 0.414)
95 % Konfidenzintervall für Differenz der Mittelwerte: -390.193 bis 939.216

Der Unterschied zwischen den Datensätzen ist nicht gross genug, um durch Zufall erklärt zu werden. Somit besteht kein statistisch signifikanter Unterschied ($P_{zweiseitig}$ = 0.414) zwischen den Verteilungen, H_0 wird angenommen.

Die Sensitivität des Tests mit α = 0.050 beträgt 0.050 und liegt somit unter dem gewünschten Wert von 0.8.

Mann-Whitney Rank Sum Test, durchgeführt mit 43 Werten:

	Median	25 %.	75 %
Direktsuche99	8‘805.00	7‘804.75	10‘388.75
Direktsuche02	8‘811.00	7‘909.50	9‘615.00

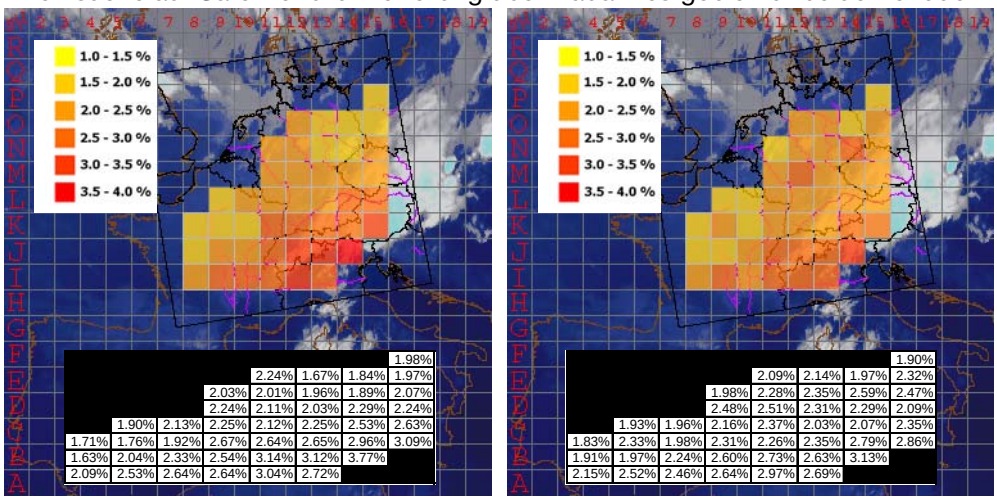
T = 1‘909.00 n(klein) = 43 n(gross) = 43 P = 0.743

Auch dieser Test akzeptiert H_0 mit einem P = 0.743.

Die Korrelation des zweiten Tests ist somit auf dem 5 % Niveau statistisch signifikant. Die Vorselektion durch die verfügbaren Radarbilder bei den reduzierten Datensätzen beeinflusst die Ergebnisse unwesentlich und unerwarteterweise in ungünstiger Richtung (R kleiner als bei den kompletten Datensätzen).

Die Verteilungen über dem Testgebiet ist flach. Die Fläche wurde auf 100 % normiert, die einzelnen Sektorwerte bewegen sich zwischen 1.63 % und 3.77 % (siehe Abbildung 4-28).

ABBILDUNG 4-28 Direktsuche auf Satellitenbild: Verteilung über Radar-Testgebiet für beide Perioden



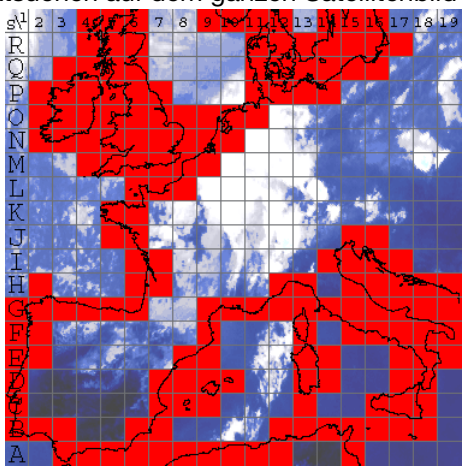
links: Periode 1997-99 (kompletter Datensatz) / rechts: Periode 2000-02 (kompletter Datensatz)
Die Fläche wurde auf 100 % normiert. Sämtliche Werte entsprechen der prozentualen Anzahl Pixel je Sektor.

Vergleich über dem ganzen Satellitenbild

Der Vergleich wird nun auf das ganze Satellitenbild ausgedehnt und es werden erneut die Korrelationskoeffizienten zwischen den kompletten Datensätzen bestimmt. Um „Küsteneffekte“ zu vermeiden, die durch die braun überlagerten Küstenlinien mit zum Teil auffälligen Ringstrukturen entstehen können, werden nur Sektoren in die Auswahl genommen, die keine Land-Wasser-Grenze enthalten (siehe dazu auch Fussnote 27 auf Seite 44).

ABBILDUNG 4-29 Korrelationskoeffizienten zwischen den Direktsuchen auf dem ganzen Satellitenbild

97-99 vs. 00-02 (ohne Küstenpixel)	Flächen, bestimmt mit Farb-Delta 2							
	3 Pixel		7 Pixel		15 Pixel		30 Pixel	
Farbindex	R	R^2	R	R^2	R	R^2	R	R^2
35	**0.88**	**0.77**	**0.90**	**0.82**	**0.93**	**0.86**	**0.94**	**0.88**
34	0.88	0.77	0.90	0.81	0.92	0.84	0.93	0.87
33	0.88	0.77	0.90	0.80	0.91	0.83	0.93	0.86
32	0.87	0.76	0.89	0.79	0.91	0.83	0.92	0.85
31	0.87	0.76	0.88	0.78	0.90	0.81	0.92	0.84
30	0.87	0.76	0.89	0.78	**0.90**	**0.81**	0.91	0.84
29	0.87	0.75	0.90	0.80	0.91	0.82	0.92	0.84
28	0.87	0.75	0.89	0.80	0.91	0.83	0.92	0.85
27	0.86	0.74	0.89	0.80	0.91	0.83	0.92	0.85
26	0.86	0.73	0.89	0.80	0.91	0.83	0.92	0.85
25	0.85	0.73	0.89	0.80	0.91	0.83	0.93	0.86
24	0.86	0.74	0.90	0.80	0.91	0.83	0.93	0.86
23	0.85	0.72	0.89	0.79	0.91	0.83	0.93	0.86
22	0.85	0.71	0.88	0.78	0.91	0.83	0.93	0.86
21	0.84	0.71	0.87	0.76	0.90	0.81	0.92	0.85
20	0.84	0.70	0.87	0.75	0.90	0.80	0.92	0.84
19	0.83	0.70	0.86	0.74	0.89	0.79	0.91	0.83
18	0.82	0.67	0.86	0.74	0.88	0.78	0.90	0.81
17	0.77	0.59	0.85	0.71	0.87	0.75	0.89	0.79
16	0.78	0.60	0.84	0.70	0.86	0.74	0.87	0.76
15	0.70	0.49	0.81	0.66	0.83	0.69	0.84	0.71
14	0.65	0.43	0.79	0.63	0.81	0.65	0.81	0.66
13	0.61	0.38	0.79	0.62	0.79	0.62	0.78	0.62
12	0.56	0.31	0.77	0.59	0.79	0.63	0.77	0.59
11	0.52	0.27	0.70	0.49	0.75	0.57	0.73	0.53
10	0.42	0.17	0.63	0.39	0.69	0.48	0.65	0.42
9	0.39	0.15	0.61	0.37	0.66	0.43	0.60	0.35
8	0.25	0.06	0.56	0.31	0.61	0.37	0.55	0.30
7	0.26	0.07	0.58	0.34	0.61	0.37	0.61	0.37
6	0.18	0.03	0.61	0.37	0.56	0.31	0.61	0.38



links: Korrelationskoeffizienten bei verschiedenen Suchparametern zwischen den einzelnen Sektorwerten der kompletten Datensätzen der Direktsuche auf dem Satellitenbild.
rechts: Sektoren mit Küstenlinien (rot eingefärbt) wurden zur Berechnung der Korrelationswerte eliminiert, um die Einflüsse der „Küstenpixel“ zu beseitigen.

Eine generelle Tendenz zu höheren Korrelationswerten bei der Wahl grösserer Toleranzwerte ist nicht zu übersehen. Der absolut höchste Korrelationswert von 0.94 wird mit den Parametern maximaler Toleranz erreicht (Flächenlimite 30 Pixel auf Farb-Delta 2 und Farblimite 35). Die bisher verwendeten Suchparameter (im Bild schwarz hinterlegt) führen zu einem Wert von 0.90. Dieser Wert wird erneut durch einen *t-Test* geprüft:

Normalitätstest (Kolmogorov-Smirnov)

Die Populationen erfüllen diesen Test nicht und sind somit von einer Population mit Normalverteilung signifikant verschieden ($P < 0.001$). Es wird zusätzlich zum *t-Test* ein *Mann-Whitney Rank Sum Test* durchgeführt

t-Test

H_0: Es besteht kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Verteilungen.
H_1: Es gibt einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Verteilungen.

Der *t-Test* (durchgeführt mit 195 Werten der einzelnen Sektoren) liefert folgende Ergebnisse:

	Mittelwert	Standardabw.	Standardfehler des Mittelwerts
Direktsuche99	7‘659.28	2‘416.03	173.02
Direktsuche02	6‘949.31	2‘496.53	178.78

Differenz: 709.97
t = 2.854 mit 388 Freiheitsgraden ($P_{zweiseitig}$ = 0.005)
95 % Konfidenzintervall für Differenz der Mittelwerte: 220.823 bis 1‘199.115

Der Unterschied zwischen den Datensätzen ist grösser, als durch Zufall erklärt werden kann. Somit besteht ein statistisch signifikanter Unterschied ($P_{zweiseitig}$ = 0.005) zwischen den Verteilungen, H_0 wird verworfen.

Die Sensitivität des Tests mit α = 0.050 beträgt 0.772 und liegt somit unter dem gewünschten Wert von 0.8.

Mann-Whitney Rank Sum Test, durchgeführt mit 195 Werten:

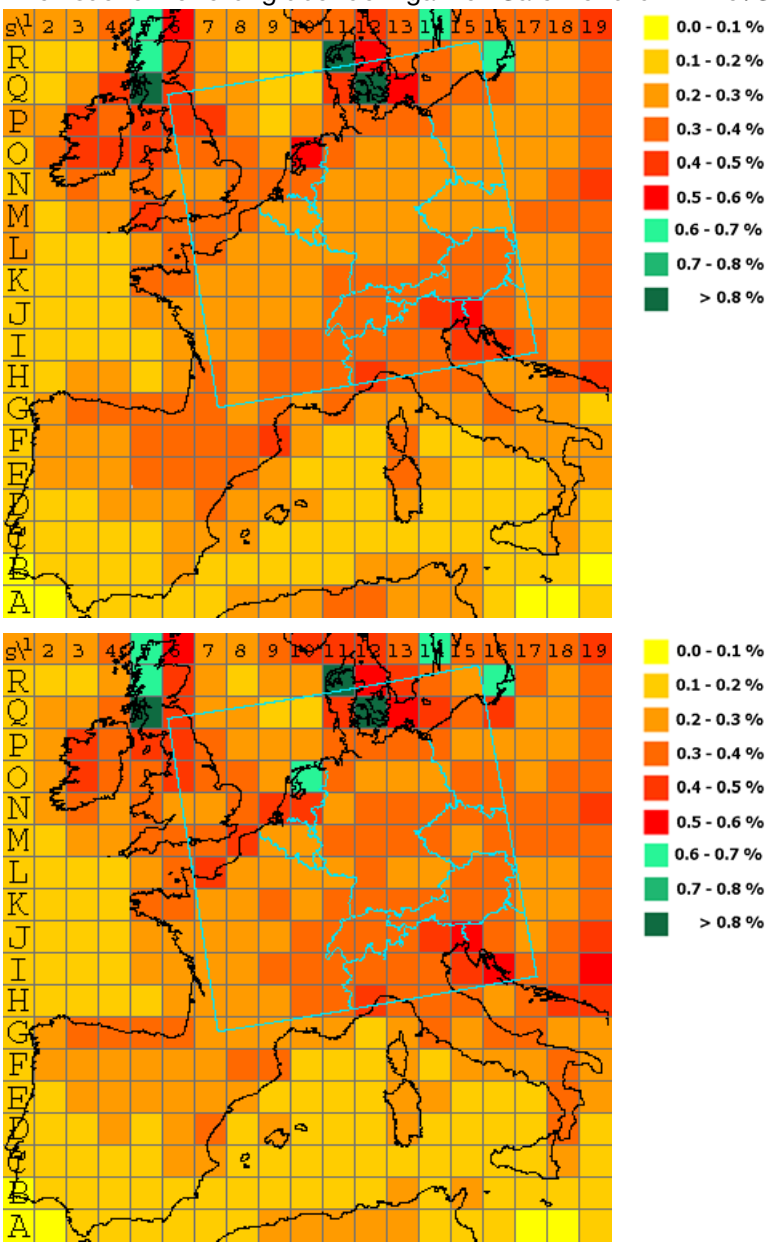
	Median	25 %.	75 %
Direktsuche99	7‘575.0	5‘764.5	9‘320.8
Direktsuche02	7‘038.0	4‘868.8	8‘828.3

T = 41‘406.00 n(klein) = 195 n(gross) = 195 P = 0.003

Auch dieser Test verwirft mit einem P = 0.003 die Nullhypothese.

Die Verteilung über dem ganzen Satellitenbild wird in folgender Abbildung wiedergegeben:

ABBILDUNG 4-30 Direktsuche: Verteilung über dem ganzen Satellitenbild in Pixel/Sektor (prozentual)

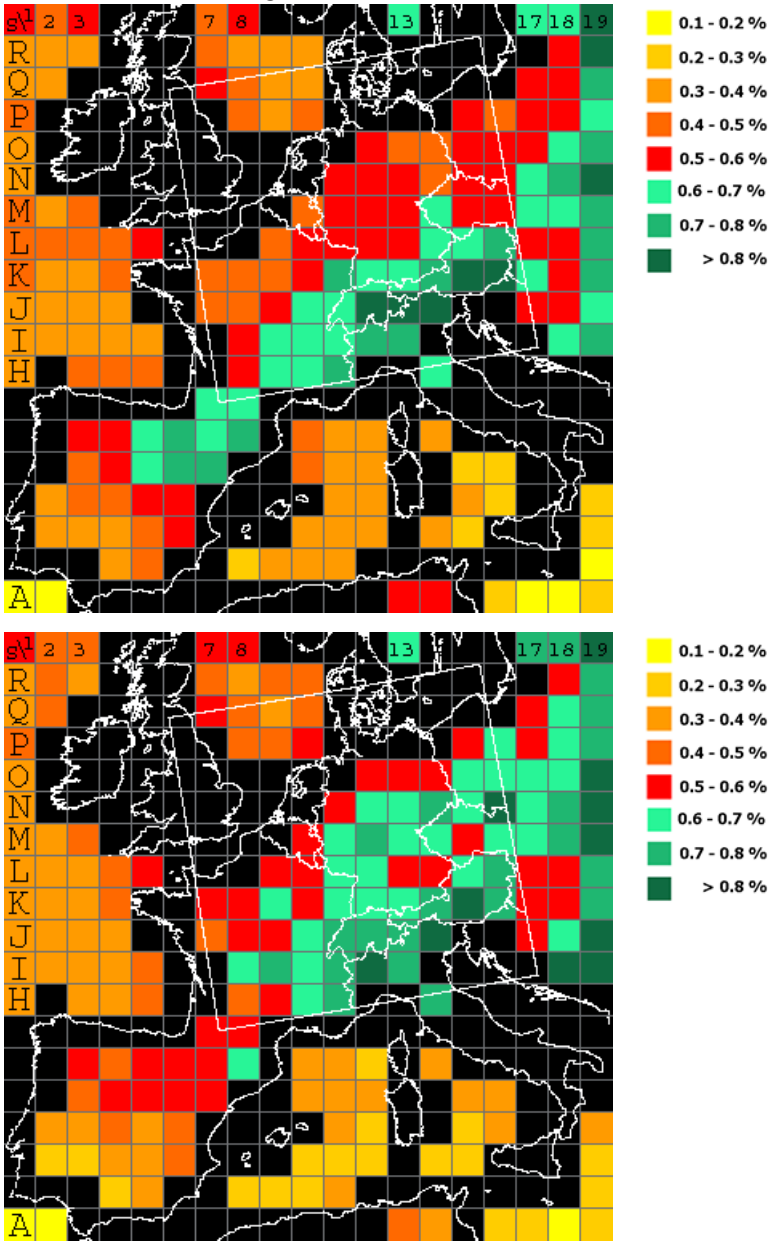


oben: Verteilung der Pixel in der Periode 1997-99 / unten: Verteilung der Pixel in der Periode 2000-02
Jedes Pixel ist Element einer potentiellen Hagelzelle. Die Verteilungen basieren auf den Daten der Direktsuche mit Grenzparameter 15 Pixel bei der Fläche auf Delta 2 und Farbwert 30. Die Flächen wurden auf je 100 % normiert. Deutlich ist die Land/Wasser Verteilung und die Einflüsse der Küstenlinien zu erkennen, die zu relativ höheren Werten führen.

Deutlich ist die Land/Wasser Verteilung zu erkennen: über dem Kontinent werden vermehrt potentielle Gewitterzellen detektiert als über den Meeren. Dies dürfte durch die stärkere Erwärmung der Luftmassen über dem Land und der daraus resultierenden konvektiven Wolkenbildung zu erklären sein.
Die Sektoren mit den höchsten Werten sind in den Küstengebieten zu finden: es handelt sich dabei um Artefakte, die durch die braunen Pixel der Küstenlinien auf dem Satelli-

tenbild entstanden sind (einseitige Limitierung bei der Flächenbestimmung durch den Algorithmus oder kleine Ringstrukturen, welche die Flächenlimite günstig beeinflussen). Aus diesem Grund werden im folgenden Bild nur Sektoren ohne Küstenanstoss betrachtet. Die Fläche wird erneut auf 100 % normiert - die Prozentwerte sind somit nicht vergleichbar mit den Werten in Abbildung 4-30.

ABBILDUNG 4-31 Direktsuche: Verteilung über dem Sat.-Bild ohne Küsten in Pixel/Sektor (prozentual)



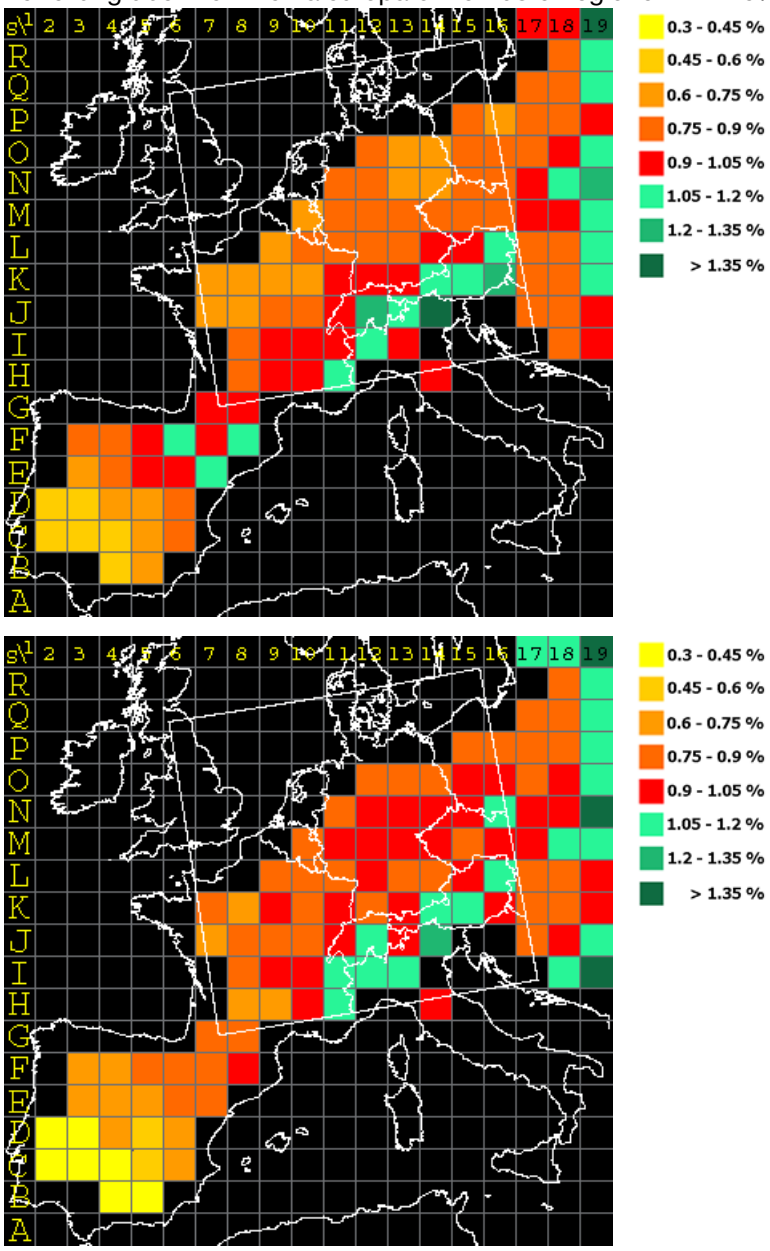
oben: Verteilung der Pixel in der Periode 1997-99 / unten: Verteilung der Pixel in der Periode 2000-02
Jedes Pixel ist Element einer potentiellen Hagelzelle. Die Verteilungen basieren auf den Daten der Direktsuche mit Grenzparameter 15 Pixel bei der Fläche auf Delta 2 und Farbwert 30. Die Flächen wurden auf je 100 % normiert. Sektoren, die Küstenlinien enthalten, wurden eliminiert.

Die Land/Wasser Verteilung ist auch auf diesen Bildern sichtbar. Beide Datensätze zeigen über den Alpen höhere und in Richtung zu den Ebenen und Küsten abnehmende Häufigkeiten. Über Spanien nehmen die schon relativ geringen Werte ausgehend von den Pyrenäen in Richtung Südwesten ab. Italien wird nicht erfasst, da der „Stiefel“ zu

schmal ist, um ganze Sektoren ohne Küstenlinien zuzulassen.
Die Werte an den Bildrändern sind mit Vorsicht zu geniessen: Die Ränder können den Algorithmus zur Flächenbestimmung beeinflussen.

Als Letztes wird die Betrachtung auf das Gebiet Kontinentaleuropas (ohne Sektoren mit Küstenanstoss) beschränkt. Durch das Wegfallen der Meeres-Sektoren und die erneute Normierung der Fläche auf 100 % wird die Glättung der Werte reduziert, so dass als einziger Unterschied zu Abbildung 4-31 die regionalen Unterschiede ausgeprägter dargestellt werden.

ABBILDUNG 4-32 Verteilung über Kontinentaleuropa ohne Küstenregionen in Pixel/Sektor (prozentual)



oben: Verteilung der Pixel in der Periode 1997-99 / unten: Verteilung der Pixel in der Periode 2000-02
Jedes Pixel ist Element einer potentiellen Hagelzelle. Die Verteilungen basieren auf den Daten der Direktsuche mit Grenzparameter 15 Pixel bei der Fläche auf Delta 2 und Farbwert 30. Die Flächen wurden auf je 100 % normiert. Sektoren, die Küstenlinien enthalten oder über Meer sind, wurden eliminiert.

5 Schlussfolgerungen

Hagel-Parameter auf Satellitenbildern. Die statistischen Grössen von potentiellen Gewitterzellen auf Satellitenbildern sind mit Hilfe von zwei Datensätzen in sehr guter Übereinstimmung bestimmt worden. Sie können für weiterführende Arbeiten mit Satellitenbildern selber Art weiterverwendet werden.

Hagelklimatologie mit Radarbildern. Beide Datensätze zeigen über den Alpen und an der Nordwestküste Deutschlands erhöhte Häufigkeiten von starken Radar-Echos. Die positive, statistisch signifikante Korrelation zwischen den Häufigkeitsverteilungen weist auf regionale Unterschiede bezüglich der Gewitterhäufigkeit hin. Fehlinformationen infolge Clutter oder „Radarblindheit" in den Alpentälern können dabei nicht ausgeschlossen werden.

Hagelklimatologie mit Satellitenbildern. Die Direktsuche nach potentiellen Hagelzellen mit Hilfe der statistisch bestimmten Suchparameter (siehe dazu Abschnitt 4.2.3.3 auf Seite 55) akzeptiert grundsätzlich zu viele Wolken und führt zu einer flacheren Verteilung, als dies mit Hilfe der Radardaten erfolgt. Dies entspricht der Erwartung nach regionalen Unterschieden in kleiner Bandbreite. Unterschiede von Faktor 4 bis 5 zwischen dem geringsten und höchsten Sektorwert, wie dies bei der Verteilung mittels Radardaten auftritt, können nicht plausibel begründet werden. Qualitativ kann über den Alpen und Pyrenäen eine höhere Gewitterhäufigkeit eruiert werden, obwohl die Korrelation zwischen der Radar- und Satellitenverteilung über dem ganzen Testgebiet keine hohen, statistisch signifikanten Werte zeigt.

Der Vergleich der Verteilungen, die durch Direktsuche auf dem Satellitenbild bestimmt worden sind, führt sowohl für das Testgebiet wie auch für das ganze Satellitenbild zu positiven Korrelationswerten. Dabei werden über den Landmassen der Kontinente vermehrt potentielle Gewitterwolken detektiert, als dies über den Meeren der Fall ist.
Positiv zu werten ist, dass eine hohe Korrelation zwischen den Datensätzen beider Zeitperioden besteht, was wiederum auf existierende regionale Unterschiede betreffend der Häufigkeit potentieller Gewitterzellen hindeutet. Negativ schlägt zu Buche, dass nicht exakt festgestellt werden kann, wieviele Wolken irrtümlicherweise durch den Algorithmus als potentielle Hagelzellen identifiziert werden. Schon gar nicht ist eine Aussage über die effektiv eingetretenen Hagelereignisse zulässig.

Probleme. Clutter auf den Radarbildern beeinflusst die statistische Auswertung stärker, als dies erst vermutet worden ist. Einzelne Regionen um Antwerpen zeigen gegenüber allen anderen Standorten extreme Häufigkeiten starker Radar-Echos. Diese Gebiete können nicht ohne weitere Nachforschungen als Areale grösserer Hagelwahrscheinlichkeit deklariert werden.

Die dem Satellitenbild überlagerten Küstenlinien beeinflussen die numerische Auswertung und dürfen nicht ignoriert werden.

Die Positionsbestimmung von Objekten mittels Radargeräten weist eine grössere Genauigkeit auf, als die Messung der Intensität, die durch einen Volume Scan entsteht. Es ist durchaus möglich, dass die Anzahl Pixel höchster Intensität auf den Radarbildern mit weit grösseren Fehlern bezüglich der Intensität behaftet ist als angenommen.

Die Auflösung der Satellitenbilder ist mit 5 km/Pixelkante am äussersten Limit, um kleinskalige Hagelereignisse zu detektieren. Satelliten vom Typ *Meteosat Second Generation* werden die Auflösung der Bilder beinahe verdoppeln, was sich positiv auf die zukünftigen Möglichkeiten auswirken wird.

Bedeutung. Die Bestimmung von grossflächigen Hagelklimatologien unter Anwendung computergestützter Prozesse auf Satellitenbildern ist ein neues Gebiet, zu dem nur wenige Informationen verfügbar sind. Das Potential und die Möglichkeiten zur Verbesserung der Trefferquoten sind noch bei weitem nicht alle ausgeschöpft.
Für Versicherungen, die hauptsächlich an der Wiederkehrperiode *starker* Hagelzüge mit grossem Schadenpotenzial interessiert sind, ist vorliegende Arbeit nur vorbereitend. Starke Hagelstürme können aber erst detektiert werden, falls bei der Suche nach „generellen" Hagelereignissen höhere Trefferquoten erreicht werden. In diese Richtung zielt vorliegende Arbeit: die statistischen Grössen von potentiellen Hagelzellen auf dem Satellitenbild werden dargelegt und ein positiver Ausblick betreffend der Existenz einer Hagelklimatologie kann gegeben werden. Die Trefferquote der Häufigkeitsverteilungen für potentielle Gewitterzellen über Europa muss erst exakter evaluiert werden. Eine mögliche Anwendung wäre beispielsweise die Anpassung von Versicherungsprämien proportional zu den regionalen Häufigkeitswerten.

Vergleich. In guter Übereinstimmung beschreibt [van Delden 2001], der als Ausgangslage für seine Untersuchungen eine Gewitterklimatologie der Jahre 1996 bis 1999 (Sommermonate April bis Oktober) anhand der Daten von mehr als 200 synoptischen Wetterstationen erstellte, eine erhöhte Gewitterhäufigkeit über den Alpen. Ebenso stellt er über den Pyrenäen eine häufigere Gewitterbildung fest, die aber deutlich schwächer ausgeprägt ist, als dies in den Alpen der Fall ist.

Ein Vergleich mit den Resultaten aus [Brooks 2003], die mit Hilfe von Modellen erarbeitet wurden, zeigt ebenfalls gute Übereinstimmung. Ein breiter Streifen erhöhter Gewitterwahrscheinlichkeit, ausgehend von Spanien über Südfrankreich, die Schweiz, Süddeutschland, Kroatien in Richtung Osteuropa, resultiert aus seiner Publikation. Die Maximalwerte über Spanien und der Küste vor Kroatien können in vorliegender Arbeit aber nicht bestätigt werden.

Die Publikation von [Vinet 2001] zeigt über Südwestfrankreich und den Französischen Alpen höhere Häufigkeitswerte für Hagelereignisse. Dies zeigt sich auch bei [Collier 1994], der die gleichen Gebiete und zusätzlich die Bretagne als Geburtsstätten von Stürmen deklariert. Die Französischen Alpen weisen auch in vorliegender Arbeit hohe Häufigkeitswerte auf. Für Südwestfrankreich und die Bretagne kann infolge der Eliminierung der Küstenregionen kein Vergleich vorgenommen werden (siehe Abbildung 4-32).

Die Po Ebene ist bekannt als Gebiet mit grosser Häufigkeit konvektiver Gewitterzellenbildung. Dies geht aus verschiedenen Untersuchungen von [Morgan 1973], [Prodi 1974], [Cacciamani et al. 1995] und [Costa et al. 2001] hervor, um nur einige Autoren zu nennen. Vorliegende Arbeit zeigt bei der Verteilung, die mit Hilfe von Radar erstellt worden ist, keine erhöhten Werte in der Po Ebene. Das Gebiet liegt im unteren Randbereich des Europa-Komposits, wo die Radarabdeckung nicht mehr optimal gewährleistet ist (siehe orange-braune Sichtfeld-Linien in Abbildung 2-3). Bei der Verteilung mit Hilfe der Direktsuche auf dem Satellitenbild wird der Sektor I14 infolge der Küstenline von der Betrachtung ausgeschlossen. Sektor I13 weist hingegen einen höheren Wert auf, der sich aber von den Häufigkeitswerten über den Alpen nicht abhebt.

Ausblick. Es bleiben noch viele Fragen ungeklärt. Eine Ausweitung der Berechnungen und verschiedene zusätzliche Untersuchungen sind nötig, um gesicherte Resultate zu erhalten. Anregungen und Hinweise dazu gibt Kapitel 6.

6 Ausblick

6.1 Motivation

Die vorliegende Diplomarbeit musste sich auf Grund der zeitlichen Beschränkung auf sechs Monate inhaltlich einschränken, entsprechend blieben noch einige notwendige und interessante Untersuchungen unberücksichtigt. Dieses Kapitel möchte daher einige Anregungen – zum Beispiel für zukünftige Diplomarbeiten – festhalten.

6.2 Vorschläge für weiterführende Arbeiten zum Thema

6.2.1 Qualitätskontrolle (Trefferquote) der potentiellen Hagelzellen auf dem Satellitenbild

Die rechnerisch konstruierte Trefferquote, wie sie in Abschnitt 4.2.3.4 auf Seite 55 vorgestellt wird, kann durch eine exaktere Auswertung ersetzt werden, bei der jede auf dem Satellitenbild gefundene potentielle Hagelzelle auf einem zeitlich korrespondierenden Radarbild geprüft wird. Das Radarbild soll sämtliche Radar-Intensitäten zeigen, so dass statistisch erfasst werden kann, wieviele Wolken auf je eine Intensitätsstufe treffen und wieviele Fehlanzeigen (potentielle Gewitterzellen, die kein korrespondierendes Radar-Echo haben) erfasst worden sind.
Eine solche Auswertung ist rechenintensiv und konnte aus Zeitgründen bei vorliegender Arbeit nicht vorgenommen werden.

6.2.2 Verbesserung der Hagelerkennung mit Hilfe von Wasserdampf-Satellitenbildern

Die Direktsuche auf den Satellitenbildern kann verbessert werden, indem potentielle Gewitterzellen einem „Wasserdampf-Test“ unterzogen werden. Im Gegensatz zu allen anderen hohen Wolken, die durch ein Temperatur-/Flächen-Limit erfasst werden können, weisen potentielle Gewitterzellen auf einem WV-Satellitenbild sehr hohe Werte auf. Die exakte Position einer potentiellen Zelle kann somit auf einen charakteristischen Wert überprüft werden. Dieser Wert muss, ähnlich der Bestimmung der Farb-/Flächen-Parameter in vorliegender Arbeit, erst bestimmt werden.
Mit dieser zusätzlichen Methode könnte die Anzahl der fälschlicherweise akzeptierten Wolken (z.B. Zirren) minimiert werden.

6.2.3 Vergleich von Hagelstatistiken mit Radarbildern

Die Qualitätskontrolle der Radar-Echos ist eine Voraussetzung, um gesicherte Aussagen und Vergleiche mit anderen Technologien wie Satellitenaufnahmen zuzulassen. Clutter kann die Statistiken in starkem Masse beeinflussen und zu falschen Vergleichen führen. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, die Datenbasis einer sorgfältigen Qualitätskontrolle zu unterziehen und womöglich Vergleiche mit Hagelstatistiken vorzunehmen. Eine sorgfältige Prüfung der einzelnen Radarstationen betreffend dem Einsatz gleichwertiger Technologie und Messverfahren oder andersweitiger bekannter Probleme kann dazu führen, dass einzelne Gebiete frühzeitig als Störfaktoren erkannt und aus der Statistik eliminiert werden können.
Die Messdaten der Radarstationen De Bilt (Niederlande) und Wideumont (Belgien) bieten sich für eine erweiterte Untersuchung an. Im Einzugsgebiet dieser beiden Stationen wurden grosse Häufigkeiten von Radar-Echos hoher Intensität registriert, die gemäss Auskunft[31] des DWD auf Störechos durch grosse Wasserflächen im Lande ausgelöst werden.

6.2.4 Umgang mit den eingezeichneten Küstenlinien auf den Satellitenbildern

Für weiterführende Untersuchungen ist es sehr empfehlenswert, Satellitenbilder ohne die überlagerten Küstenlinien zu verwenden. Diese Küstenlinien, dargestellt durch braune Pixel, beeinflussen die digitale Suche in beträchtlichem Masse.
Falls nur Satellitenbilder mit Küstenlinien verfügbar sind, empfiehlt es sich, die braunen Pixel durch Interpolation der Farbwerte der benachbarten nicht-braunen Pixel zu ersetzen (z.B. arithmetisches Mittel aller nicht-braunen benachbarten Pixel). Die Wiederholung der Direktsuche, wie sie in vorliegender Arbeit vorgestellt wird, lässt somit auch Aussagen für die Küstenregionen zu.

31. Zitat aus E-Mail von Sabine Hafner, DWD (Sabine.Hafner@dwd.de) vom 6.10.2004: „... laut Auskunft meines Kollegen, ist uns bekannt, dass die NL-Daten echolevelmässig über unseren liegen. Sie haben viele Störechos und nächtliche Störeinflüsse (Clutter) durch ihre grossen Wasserflächen im Lande. Über die Filterung ist uns hier wenig bekannt. Für Detailfragen wenden Sie sich doch bitte an den holländischen Kollegen Iwan Holleman (iwan.holleman@knmi.nl)“.

7 Terminologie, Abkürzungen und Formelzeichen

7.1 Terminologie

Array	Bei einem Array handelt es sich um eine Gruppe von Variablen, die unter einem gemeinsamen Namen gespeichert werden, vergleichbar mit einem Vektor bestehend aus N Speicherelementen. Arrays werden benötigt, um einerseits eine große Anzahl von Variablen mit geringem Aufwand zu definieren und um andererseits die Voraussetzung zu schaffen, direkt auf ein bestimmtes Variablenelement durch Angabe eines numerischen Werts, dem sogenannten Index (Platznummer des Speicherelementes), zuzugreifen.
Clutter	Der Erdboden und sein Bewuchs sowie Häuser, Kamine, Hochspannungsleitungen etc. streuen, wenn sie vom Radarstrahl getroffen werden, einen Teil der Strahlung zurück und sind dann als Bodenechos (englisch: clutter) auf den Radarbildern zu erkennen. Da sich insbesondere der Bodenbewuchs zeitlich verändert und die Rückstreueigenschaften durch Nässe stark verändert werden, sind Bodenechos nicht in allen Bildern gleich stark. Bodenechos können mit Filtern teilweise aus den Radar-Rohdaten eliminiert werden. Dabei geht jedoch in der Regel auch immer ein Teil der Niederschlagssignale verloren.
Datensatz99	Dieser Datensatz enthält die Ergebnisse, die mit Hilfe von Radarbildern gefunden worden sind. Er wurde mit Daten der Jahre 1997 bis 1999 (Sommermonate) erstellt.
Datensatz02	Dieser Datensatz enthält die Ergebnisse, die mit Hilfe von Radarbildern gefunden worden sind. Er wurde mit Daten der Jahre 2000 bis 2002 (Sommermonate) erstellt und zur Validierung des *Datensatz99* eingesetzt.
Direktsuche99 / -R	Dieser Datensatz enthält die Ergebnisse der Direktsuche auf den Satellitenbildern. Er wurde mit Daten der Jahre 1997 bis 1999 (Sommermonate) erstellt. *Direktsuche99-R* enthält nur Bilder, die in *Datensatz99* ein zeitlich korrespondierendes Bild aufweisen.
Direktsuche02 / -R	Dieser Datensatz enthält die Ergebnisse der Direktsuche auf den Satellitenbildern. Er wurde mit Daten der Jahre 2000 bis 2002 (Sommermonate) erstellt. *Direktsuche02-R* enthält nur Bilder, die in *Datensatz02* ein zeitlich korrespondierendes Bild aufweisen.
Doppler Mode	Raumabtastung durch das Radar im Bereich über dem Intensity Mode, zwischen 4.5° und 37.0° ([DWD]).
Duplexer	Ein Gerät in Radarsystemen, das den Sender vom Empfänger isoliert und gleichzeitig den Gebrauch *einer* gemeinsamen Antenne zulässt.
Falschfarben-Bilder	Bilder, deren Original-Farbindex (oft 256-Graustufe) durch eine frei gewählte Farbskala ersetzt wird. Jeder Intensitäts-

	stufe des Originalbildes wird eine Farbe zugewiesen, was zu viel anschaulicheren Bildern führt. Der Informationsgehalt des Bildes bleibt dabei unverändert, kann aber visuell besser aufgenommen werden.
Indizierte Bilder	Mit 8 Bit können 2^8 (=256) Werte dargestellt werden. In diesem Fall 256 Farben, wenn indizierte Farben verwendet werden. Jedes Pixel ist dabei durch die X- und Y-Koordinate und der Platznummer der Farbe auf dem Farbindex (Farbtabelle) definiert. Dank der beschränkten Anzahl der Farben benötigen indizierte Bilder weniger Speicherplatz als True Color Formate.
Intensity Mode	Raumabtastung durch das Radar im untersten Elevationsbereich von 0.5° bis 4.5° ([DWD]).
Isotroper Strahler	Ein Strahler, der nach allen Richtungen hin gleiche Mengen Energie abstrahlt.
K-S Distanz	Die K-S Distanz (Kolmogorov-Smirnov Distanz) entspricht der maximalen kumulativen Distanz zwischen dem Histogramm der Testdaten und einer Gaussverteilungskurve der Testdaten.
Log-File	Datei, in der bestimmte Prozesse, die in einem Computer ablaufen, protokolliert werden.
Orographie	Beschreibung der Gebirgsformen
Pixel	Abkürzung für **Pict**ure **El**ement, dt. „Bildelement“ *das* oder *der*, das grundlegende Bildelement, nämlich das kleinste Einzelelement des Punktrasters, mit dem ein Bild dargestellt wird. Solche Punktraster kommen bei jeder digitalen Darstellung oder Erzeugung von Bildern zum Einsatz ([Brockhaus 2004]).
Precipitation Scan	Raumabtastung durch das Radar im tiefsten Elevationswinkel (0.5° bis 1.8°) und Zeitintervallen von 5 Min., um möglichst zeitnahe Niederschlagsdaten zu gewinnen.
Reflektivität	Die Reflektivität ist ein Mass für den Rückstreuquerschnitt von Zielen, die mit Radar detektiert werden können. Sie ist proportional zur Energie, die von sämtlichen Streuteilchen im Radarstrahl zur Antenne zurückgestreut wird. Da die von der Antenne empfangene Energie aber von vielen Faktoren abhängt - unter anderem von der Entfernung, der Strahlungswellenlänge, der Antennenform und der ausgesendeten Energie - wurde für meteorologische Ziele die Reflektivität speziell definiert. Sie hängt nur noch von den Eigenschaften der Ziele ab. Bei Regen ist sie umso grösser, je mehr und je grössere Regentropfen in der Luft enthalten sind. Die Reflektivität wird meist in der logarithmischen Einheit dBZ angegeben, wobei dB das übliche Kürzel für Dezibel ist und Z für Reflektivität steht. Eine Erhöhung um 10 dBZ entspricht also einer Verzehnfachung der Reflektivität, eine Erhöhung um 30 dBZ einer Vertausendfachung.

	Reflektivitäten (Z) bzw. deren logarithmische Werte (dBZ) können mit der folgenden Beziehung in Niederschlagsraten (R, in mm/h) umgerechnet werden: $Z = aR^b$ d. h. $R = (Z/a)^{1/b} = (10^{dBZ/10}/a)^{1/b}$ $dBZ = 10\log Z$ - *a* ist im Sommer 300 und im Winter für Regen 200 und für Schnee 1800 - *b* ist im Sommer 1.5 und im Winter für Regen 1.6 und für Schnee 2.2 Diese Werte für *a* und *b* haben sich auf Grund von längerfristigen Beobachtungen als geeignet erwiesen. Zur quantitativen Analyse der Niederschlagsintensität müssen jedoch jeweils weitere Vergleichsmessungen herangezogen werden [RadarInfo].
Thermales Infrarot	Jeder Körper strahlt elektromagnetische Wellen ab. Bei Temperaturen der Erdoberfläche (-70°C bis +60°C) ist dies Wärmestrahlung, die *thermales Infrarot* genannt wird.
True Color Bilder	Mit 3 Bytes können jedem Pixel 3 Farben zugewiesen werden. Jede dieser Grundfarben ist in 256 Schattierungen zur Verfügung. Bei 24 Bit Farbtiefe (in RGB (Rot/Grün/Blau)) wird jeder Pixelkoordinate je Grundfarbe ein Farbton zugewiesen, der als Farbmischung ausgegeben wird (additive Farbmischung). Es stehen hierbei 16‘777‘216 Farbmöglichkeiten zur Verfügung. Bei 32 Bit Farbtiefe (in CMYK (Cyan, Magenta, Yellow, Schwarz für Tiefenwirkung)) werden 4 Grundfarben zur Darstellung verwendet (subtraktive Farbmischung). True Color Bilder benötigen in Folge der grösseren Bildinformation mehr Speicherplatz als indizierte Formate.
Volume Scan	Raumabtastung durch das Radar: alle 15 Minuten werden 18 verschiedene Elevationswinkel von 37.0° bis 0.5° abgescannt.

7.2 Abkürzungen

dBZ	Einheit der Reflektivität des Radars (siehe Reflektivität)
DWD	Deutscher Wetterdienst, http://www.dwd.de/
DVD	Digital Versatile Disc, Optisches Speichermedium mit grosser Speicherkapazität.
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites, http://www.eumetsat.de/
IDL™	Interactive Data Language by RSI Research Systems Inc., http://www.rsinc.com
IR	Infrarot, unsichtbarer Teil des elektromagnetischen Spektrums, der sich an den langwelligen Anteil (rot) des sichtbaren Lichtes anschliesst und Wellenlängen λ zwischen etwa 800 nm und 1 mm umfasst; er wird unterteilt in nahes Infrarot (780 nm−3 µm), mittleres Infrarot (3−25 µm) und fernes

	Infrarot (25 µm−1 mm). Das Infrarot äussert sich hauptsächlich als Wärmestrahlung und wird v. a. durch Thermoelemente, Bolometer sowie besondere Photozellen gemessen ([Brockhaus 2004]). Das im Meteosat verwendete Radiometer deckt im IR-Bereich die Wellenlänge 10.5 − 12.5 µm ab ([EUMETSAT]). IR Bilder zeigen die Temperatur der abstrahlenden Oberflächen und zeigen im Gegensatz zu VIS Bildern einen guten Kontrast zwischen hohen und tiefen Wolken.
MSG	Meteosat Second Generation: zweite Generation der Meteosat-Satellitenreihe, die im Vergleich zur ersten Generation über mehr Spektralkanäle verfügt (12 Kanäle im Vergleich zu 3 Kanälen bei Meteosat First Generation) und Bilder mit sowohl zeitlich als auch räumlich besserer Auflösung erstellt. Der erste MSG (Meteosat-8) ist seit Januar 2004 in Betrieb ([EUMETSAT]).
RADAR	Radio Detection and Ranging, ein Gerät, welches in der Lage ist, elektromagnetische Wellen auszusenden und ein von einem Objekt zurückgeworfenes Echo zu empfangen.
RBZ	Radarbetriebszentrale
RGB	Rot, Grün, Blau - die Grundfarben von 24-bit True Color Bildern.
S-Pixel	Abkürzung für Satellitenpixel
VIS	*Visible* Aufnahmebereich: wird von Meteosat tagsüber genutzt um von der Erde/Atmosphäre reflektiertes Sonnenlicht aufzunehmen. Die Intensität ist dabei abhängig von der Albedo (Reflektivität) der darunterliegenden Erdoberfläche bzw. Wolke. Das im Meteosat verwendete Radiometer deckt im VIS-Bereich die Wellenlänge 0.5 − 0.9 µm ab ([EUMETSAT]).
WV	*Water Vapor* Aufnahmebereich: wird von Meteosat genutzt um den Wasserdampf in der Atmosphäre zu bestimmen. Das im Meteosat verwendete Radiometer deckt im WV-Bereich die Wellenlänge 5.7 − 7.1 µm ab ([EUMETSAT]). WV Bilder sind besonders nützlich, um die Feuchteverhältnisse in der *oberen* Troposphäre abzuschätzen.

7.3 Formelzeichen

Allgemeine Zeichen:

<=	kleiner / gleich
>=	grösser / gleich

Griechische Buchstaben:

α	Bei t-Test: Alpha entspricht der akzeptierbaren Wahrscheinlichkeit, dass inkorrekterweise ein signifikanter Unterschied zwischen den Testgruppen festgestellt wird.
λ	Wellenlänge [m]
π	Konstante (3.141592653589793); transzendente reelle Zahl, die das konstante Verhältnis von Kreisumfang zum Durchmesser angibt.
σ	Rückstrahlfläche [m^2]

Kleinbuchstaben:

h_-	Kalter Teil einer Hagelzelle (oberhalb der Nullgradgrenze)
h_+	Warmer Teil einer Hagelzelle (unterhalb der Nullgradgrenze)
r	Radius

Grossbuchstaben:

A	geometrische Antennenfläche [m^2]
A_W	wirksame Antennenfläche [m^2]
G	Antennengewinn
H_V	Höhe des Wolkentops einer Hagelzelle [m]
H_{ZM}	Höhe der maximalen Reflektivität einer Hagelzelle [m]
K_a	Wirkungsfaktor der Radarantenne
N	Natürliche Zahl
P	Wahrscheinlichkeit
P_E	Empfangsleistung [W]
P_r	reflektierte Leistung [W]
P_S	Sendeleistung [W]
R	Korrelationskoeffizient
R^2	Bestimmtheitsmass
R_R	Reichweite des Radars [m]
R_1	Entfernung Antenne - Ziel [m]
R_2	Entfernung Ziel - Antenne [m]
S_e	Leistungsdichte am Empfangsort [W/m^2]
S_g	gerichtete Leistungsdichte [W/m^2]
S_u	ungerichtete Leistungsdichte [W/m^2]
T_V	Temperatur des Wolkentops einer Hagelzelle [°C]
T_{ZM}	Temperatur auf Höhe der maximalen Reflektivität einer Hagelzelle [°C]

Z_M	Intensität der maximalen Reflektivität innerhalb einer Hagelzelle [dBZ]

8 Literatur

[Adler & Fenn 1977] Adler, A., D. Fenn, 1977: *Preprints, 10th Conf. on Severe Storms*, 8-15. Am. Meteorol. Soc., Boston, MA.

[Bielec-Bakowska 2003] Bielec-Bakowska, Z., 2003: Long-term variability of thunderstorm occurrence in Poland in the 20th century. *Atmos. Res.*, **67-68,** pp. 35-52.

[Brockhaus 2004] DER BROCKHAUAS multimedial 2004
© Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG, 2004.

[Brooks 2003] Brooks, H. E., J. W. Lee, and J. P. Craven, 2003: The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. *Atmos. Res.*, **67-68,** pp. 73-94.

[Cacciamani et al. 1995] Cacciamani, C., F. Battaglia, P. Patruno, A. Selvini, S. Tibaldi, 1995: A climatological study of thunderstorm activity in the Po valley. *Theor. Appl. Climatol.,* **50**, pp. 185-203.

[Collier 1994] Collier, C.G., R.B.E. Lilley, 1994: Forecasting thunderstorm initiation in north-west Europe using thermodynamic indices, satellite and radar data. *Meteorol. Appl.*, **1,** pp. 75-84.

[Costa et al. 2001] Costa, S., P. Mezzasalma, V. Levizzani, P. P. Alberoni, and S. Nanni, 2001: Deep convection over northern Italy: synoptic and thermodynamic analysis. *Atmos.Res.*, **56,** pp. 73-88.

[Delden 2001] van Delden, A., 2001: The synoptic setting of thunderstorms in Western Europe. *Atmos. Res.*, **56,** pp. 89-110.

[DWD] Deutscher Wetterdienst, http://www.dwd.de, Stand: 08/2004.

[DWD - Radarverbund] Deutscher Wetterdienst, *Der Radarverbund des Deutschen Wetterdienstes* im PDF Format. Copyright © DWD, 1996-2004.

[EUMETSAT] EUMETSAT, http://www.eumetsat.de, Stand: 08/2004.

[EUMETSAT-MAUH] EUMETSAT, 2001: *The Meteosat Archive User Handbook* im PDF Format. http://www.eumetsat.de/en/area2/publications/marf_td06.pdf, Stand: 10/2004.

[FZK] Forschungszentrum Karlsruhe, Meteorological Satellite Applications, http://imk-msa.fzk.de/index.htm. Stand: 10/2004.

[Geresdi & Horváth 2000] Geresdi, I., Á. Horváth, 2000: Severe convective storms and associated phenomena in Hungary. *Atmos. Res.*, **56,** pp. 127-146.

[López 2001] López, L., J. L. Marcos, J. L. Sánchez, A. Castro, R. Faile, 2001: CAPE values and hailstorms on northwestern Spain. *Atmos. Res.*, **56,** pp. 147-160.

[MeteoRadar] http://www.meteoradar.ch, Stand: 08/2004.

[MeteoSchweiz] http://www.meteoschweiz.ch, Stand: 08/2004.

[Morgan 1973] Morgan, G. M., 1973: A general description of the hail problem in the Po valley of northern Italy. *J. Appl. Meteorol.*, **12,** pp. 338-353.

[Negri & Adler 1981] Negri, A. J. & R. F. Adler, 1981: Relation of satellite-based thunderstorm intensity to radar-estimated rainfall. *J. Appl. Meteorol.*, **20,** pp. 288-300.

[Prodi 1974] Prodi, F., 1974: Combined photo and radar observations of storms in the Po valley. *Riv. Ital. Geofis.* **XXIII ((1/2))**, pp. 82-88.

[RadarInfo] Radar-Info ist ein privater Anbieter von zeitlich- und räumlich hochaufgelösten Niederschlagsdaten für Südwestdeutschland, http://radar-info.fzk.de/, Stand: 08/2004.

[Rinehart 1997] Rinehart, Ronald E., Ph.D., 1997: *Radar for Meteorologists, 3rd Edition*. Rinehart Publishing, ISBN 0-9658002-0-2.

[Schmetz et al. 2002] Schmetz, J., P. Pili, S. Tjemkes, D. Just, J. Kerkmann, S. Rota, and A. Ratier, 2002: An Introduction to Meteosat Second Generation (MSG). *Bull. American Meteor. Soc.*, **83,** pp. 977-992.

[SturmW] Sturmwetter.de, http://www.sturmwetter.de, Stand: 08/2004.

[Vinet 2001] Vinet, F., 2001: Climatology of hail in France. *Atmos. Res.*, **56,** pp. 309-323.

[Waldvogel 1979] Waldvogel, A., B. Federer, and P. Grimm, 1979: Criteria for the Detection of Hail Cells. *J. Appl. Meteor.*, **18,** pp. 1521-1525.

[Webb et al. 2001] Webb J. D. C., D. M. Elsom, D. J. Reynolds, 2001: Climatology of severe hailstorms in Great Britain. *Atmos. Res.*, **56,** pp. 291-308.

[Wolff] Wolff, Christian. Radargrundlagen, http://www.itnu.de/radargrundlagen/index.html, Stand: 10/2004.

9 Abbildungen und Tabellen

9.1 Abbildungen

ABBILDUNG 1-1 Funktionsweise eines Radars 2

ABBILDUNG 1-2 Radar-Antenne 3

ABBILDUNG 1-3 Radar-Reflektivitäten innerhalb einer Hagelzelle 7

ABBILDUNG 1-4 Position und Gesichtsfeld von Meteosat 8

ABBILDUNG 1-5 Kommunikation zwischen Meteosat und Bodenstation / Rechenzentrum 8

ABBILDUNG 1-6 IR-Abstrahlung der Erde 9

ABBILDUNG 1-7 IR-Aufnahmen von Meteosat-7 10

ABBILDUNG 2-1 DWD - Radarverbund 11

ABBILDUNG 2-2 DWD - Radarkomposit 12

ABBILDUNG 2-3 DWD - Radarkomposit mit den zwei höchsten Intensitätsstufen 12

ABBILDUNG 2-4 Meteosat-IR - Falschfarbenbild 13

ABBILDUNG 2-5 Gewitterwolken aus Sicht des Satelliten 14

ABBILDUNG 2-6 Gegenüberstellung Radar- / Satellitenbild 15

ABBILDUNG 3-1 Koordinatentransformation 16

ABBILDUNG 3-2 Koordinatentransformation der Staatsgrenzen 18

ABBILDUNG 3-3 Übertragung der Radarpixel auf das Satellitenbild 18

ABBILDUNG 3-4 Projektion sehr hoher Wolken aus Sicht des Satelliten 19

ABBILDUNG 3-5 Trigonometrische Bestimmung des Korrekturterms für hohe Wolken 20

ABBILDUNG 3-6 Auswirkungen des Korrekturterms für hohe Wolken 21

ABBILDUNG 3-7 Eliminierung von Clutter und „kurzlebigen“ Hagelzellen 23

ABBILDUNG 3-8 Bestimmung der Schwerpunktskoordinaten einer Hagelzelle 23

ABBILDUNG 3-9 Bestimmung des Kältezentrums der potentiellen Hagelwolke 24

ABBILDUNG 3-10 Delta-Werte zur Bestimmung der Flächen auf verschiedenen Farbniveaus 25

ABBILDUNG 3-11 Flächenbestimmung je Delta-Wert bei einer Hagelzelle 25

ABBILDUNG 3-12 Parameter für den Export in eine Datei 26

ABBILDUNG 3-13 Gemeinsames Kältezentrum für mehrere Zellen 26

ABBILDUNG 3-14 Grössenverteilung der Hagelzellenflächen auf dem Sat.-Bild, detektiert mit Radar 27

ABBILDUNG 3-15 Verteilung der errechneten Zellenflächen bei verschiedenen Farb-Deltas 28

ABBILDUNG 3-16 Durchschnittliche errechnete Flächen in Pixel pro Farb-Delta 28

ABBILDUNG 3-17 Medianwerte der errechneten Flächen in Pixel pro Farb-Delta 29

ABBILDUNG 3-18 Scatter-Plot der Flächen der Hagelzellen, bestimmt mit Radar / durch Berechnung 29

ABBILDUNG 3-19 Häufigkeitsverteilung der Farbindizes 30

ABBILDUNG 3-20 Häufigkeitsverteilung der Farbindizes, Fallunterscheidung Nord / Süd 30

ABBILDUNG 3-21 Häufigkeitsverteilung der Abstände (Schwerpunkt Hagelzelle - Kältezentrum) 31

ABBILDUNG 3-22 Häufigkeitsverteilung der Azimutwinkel (Schwerpunkt Hagelzelle - Kältezentrum) 32

ABBILDUNG 3-23 Wahrscheinlichkeiten für n*45°-Winkel in Abhängigkeit verschiedener Radien 32

ABBILDUNG 3-24 Häufigkeitsverteilung der Azimutwinkel, 4 Klassen à 90° 33

ABBILDUNG 3-25 Zwischenprodukte bei der Direktsuche nach Hagelzellen auf dem Sat.-Bild 34

ABBILDUNG 3-26 Vergleich Direktsuche vs. Radar-Echos 35

ABBILDUNG 4-1 Radar-Clutter 38

ABBILDUNG 4-2 Grössenverteilung der Hagelzellenflächen auf dem Sat.-Bild, detektiert mit Radar 38

ABBILDUNG 4-3 Verteilung der errechneten Zellenflächen bei verschiedenen Farb-Deltas 39

ABBILDUNG 4-4 Durchschnittliche errechnete Flächen in Pixel pro Farb-Delta 39

ABBILDUNG 4-5 Medianwerte der errechneten Flächen in Pixel pro Farb-Delta 39

ABBILDUNG 4-6 Scatter-Plot der Flächen der Hagelzellen, bestimmt mit Radar / durch Berechnung 39

ABBILDUNG 4-7 Häufigkeitsverteilung der Farbindizes 40

ABBILDUNG 4-8 Prozentuale Häufigkeitsverteilung der Farbindizes 40

ABBILDUNG 4-9 Häufigkeitsverteilung der Farbindizes, Fallunterscheidung Nord / Süd 41

ABBILDUNG 4-10 Häufigkeitsverteilung der Abstände (Schwerpunkt Hagelzelle - Kältezentrum) 41

ABBILDUNG 4-11 Häufigkeitsverteilung der Azimutwinkel (Schwerpunkt Hagelzelle - Kältezentrum) 41

ABBILDUNG 4-12 Häufigkeitsverteilung der Azimutwinkel, vier Klassen à 90° 42

ABBILDUNG 4-13 Raster zur Bestimmung der Hagelverteilung 42

ABBILDUNG 4-14 Hagelverteilung mit Hilfe des Radars (Datensatz99) in Pixel pro Sektor (prozentual) 43

ABBILDUNG 4-15 Hagelverteilung gemäss Direktsuche99-R in Pixel pro Sektor (prozentual) 44

ABBILDUNG 4-16 Hagelverteilung gemäss Radar: Datensatz99 vs. -02 in Pixel/ Sektor (prozentual) 45

ABBILDUNG 4-17 Korrelation der Verteilungen: Datensatz99 vs. Datensatz02 46

ABBILDUNG 4-18 Korrelation der Verteilungen: Datensatz99 vs. Datensatz02, Extremwerte eliminiert 47

ABBILDUNG 4-19 Verteilung der Radar-Echos: Datensatz99 vs. Datensatz02 (feinere Abstufungen) 47

ABBILDUNG 4-20 Sektoren zur Bestimmung der Korrelationen 49

ABBILDUNG 4-21 Gegenüberstellung der Korrelationen beider Zeitperioden (1997-99 vs. 2000-02) 52

ABBILDUNG 4-22 Zusammenlegung einzelner Sektoren 52

ABBILDUNG 4-23 Korrelationen nach Vergrösserung der Sektorflächen 53

ABBILDUNG 4-24 Gegenüberstellung der höchsten Korrelationen 53

ABBILDUNG 4-25 Score (Trefferquote) der beiden Datensätze 56

ABBILDUNG 4-26 Übereinstimmung der Trefferquoten beider Zeitperioden 57

ABBILDUNG 4-27 Scatter-Plot: Direktsuche99 vs. Direktsuche02 (Pixel / Sektor, prozentual) 58

ABBILDUNG 4-28 Direktsuche auf Satellitenbild: Verteilung über Radar-Testgebiet für beide Perioden 59

ABBILDUNG 4-29 Korrelationskoeffizienten zwischen den Direktsuchen auf dem ganzen Satellitenbild 60

ABBILDUNG 4-30 Direktsuche: Verteilung über dem ganzen Satellitenbild in Pixel/Sektor (prozentual) 62

ABBILDUNG 4-31 Direktsuche: Verteilung über dem Sat.-Bild ohne Küsten in Pixel/Sektor (prozentual) 63

ABBILDUNG 4-32 Verteilung über Kontinentaleuropa ohne Küstenregionen in Pixel/Sektor (prozentual) 64

9.2 Tabellen

TABELLE 3-1 Beschreibende statistische Grössen (Datensatz 1997-99) 27

TABELLE 4-1 Vergleich statistischer Grössen beider Datensätze 37

TABELLE 4-2 Korrelationen zwischen den Datensätzen (Datensatz99 vs. Direktsuche99) 49

TABELLE 4-3 Korrelation zwischen den Datensätzen (Datensatz02 vs. Direktsuche02) 51

Anhänge

Die folgenden Anhänge stellen nur einen Auszug aus den zur Verfügung stehenden Daten dar. Sie beschränken sich auf das, was besonders interessant oder wichtig erscheint und sich für die Darstellung in Papierform eignet.

Die vollständige Sammlung aller Daten steht auf der CD / DVD zur vorliegenden Diplomarbeit zur Verfügung.

A Excel TM Arbeitsblätter / Allgemeines

A.1 Meteosat-IR: Falschfarben-Index, zugewiesen durch MeteoSchweiz

Index-Nr.	R (rot)	G (grün)	B (blau)	Farbe	Index-Nr.	R (rot)	G (grün)	B (blau)	Farbe
0	6	6	7		53	197	197	207	
1	124	125	137		54	195	195	204	
2	241	245	253		55	192	192	202	
3	167	251	255		56	190	190	200	
4	102	255	255	cyan-ton, intensiv	57	187	187	198	
5	107	255	255		58	185	185	196	
6	113	255	255		59	182	182	193	
7	119	255	255		60	180	180	191	
8	125	255	255		61	177	177	189	
9	130	255	255		62	175	175	187	
10	135	255	255		63	172	172	184	
11	140	255	255		64	170	170	182	
12	146	255	255		65	155	159	183	blau-grau
13	151	255	255		66	141	148	182	
14	157	255	255		67	126	137	183	
15	162	255	255	cyan-ton, hell	68	112	126	182	
16	168	255	255		69	97	116	183	
17	174	255	255		70	83	105	182	hellblau
18	179	255	255		71	80	102	177	
19	185	255	255		72	78	99	172	
20	191	255	255		73	75	96	167	
21	197	255	255		74	73	93	162	
22	203	255	255		75	70	90	160	
23	209	255	255		76	67	87	158	
24	216	255	255		77	64	84	155	
25	222	255	255		78	61	80	153	
26	228	255	255		79	58	77	150	
27	235	255	255		80	55	74	147	
28	242	255	255		81	52	71	144	
29	248	255	255		82	49	68	140	
30	255	255	255	weiss	83	46	65	137	
31	253	252	252		84	43	62	133	
32	250	250	250		85	41	59	129	
33	247	248	248		86	38	55	125	
34	245	245	246		87	35	52	120	
35	242	242	244		88	33	49	115	
36	240	240	242		89	30	46	110	
37	237	237	240		90	28	43	105	
38	235	235	238		91	25	40	100	
39	232	232	236		92	23	37	94	
40	230	230	234	hellgrau	93	21	34	88	
41	227	227	232		94	18	31	81	
42	225	225	230		95	16	28	75	dunkelblau
43	222	222	228		96	14	24	68	
44	220	220	226		97	12	21	61	
45	217	217	224		98	10	18	53	
46	215	215	221		99	8	15	45	
47	212	212	219		100	6	12	37	
48	210	210	217		101	5	9	28	
49	207	207	215		102	3	6	19	schwarz-blau
50	205	205	213	grau	103	168	112	0	braun
51	202	202	211		104	255	255	0	gelb
52	200	200	209		105	0	255	204	cyan-ton
					Index-Nr. > 105 sind schwarz				

A.2 Grössenverteilung der Hagelzellenflächen auf dem Sat.-Bild, detektiert mit Radar

Klassen der Flächen	Anzahl 1997-99	Anzahl 2000-02	Klassen der Flächen	Anzahl 1997-99	Anzahl 2000-02
1..2	17706	11093	**51..52**	1	5
3..4	4839	3615	**53..54**	1	3
5..6	1430	1302	**55..56**	1	1
7..8	643	585	**57..58**	0	2
9..10	314	351	**59..60**	0	1
11..12	178	195	**61..62**	0	1
13..14	99	106	**63..64**	1	0
15..16	60	74	**65..66**	0	1
17..18	40	47	**67..68**	0	2
19..20	43	35	**69..70**	0	0
21..22	22	31	**71..72**	0	0
23..24	25	19	**73..74**	0	0
25..26	16	10	**75..76**	0	1
27..28	8	18	**77..78**	0	2
29..30	11	8	**79..80**	0	1
31..32	5	3	**81..82**	0	0
33..34	6	5	**83..84**	0	0
35..36	5	8	**85..86**	0	0
37..38	4	3	**87..88**	0	0
39..40	1	4	**89..90**	0	0
41..42	4	4	**91..92**	0	1
43..44	2	5	**93..94**	0	0
45..46	3	2	**95..96**	0	0
47..48	0	2	**97..98**	0	0
49..50	0	1	**99..100**	0	1

Betrifft: Abbildung 3-14

A.3 Verteilung der errechneten Zellenflächen bei verschiedenen Farb-Deltas

Periode 1997-99					
Klassen der Flächen	**# bei Delta 1**	**# bei Delta 2**	**# bei Delta 3**	**# bei Delta 4**	**# bei Delta 5**
1..5	11793	7484	5049	3615	2652
6..10	3681	3608	3070	2613	2159
11..15	1647	1964	1802	1618	1412
16..20	908	1249	1255	1178	1088
21..25	686	944	904	816	871
26..30	473	690	772	699	642
31..35	332	553	575	580	530
36..40	283	456	586	541	492
41..45	215	377	472	426	417
46..50	188	323	371	415	354
51..55	165	288	352	354	367
56..60	120	233	284	333	340
61..65	118	216	274	308	332
66..70	99	171	216	251	256
71..75	86	172	225	250	250
76..80	67	145	227	218	224
81..85	67	152	241	197	207
86..90	71	128	202	207	202
91..95	62	122	187	154	154
96..100	42	95	160	192	163
101..105	46	109	162	196	163
106..110	41	72	120	141	148
> 111	2021	3660	5705	7909	9788

Periode 2000-02					
Klassen der Flächen	**# bei Delta 1**	**# bei Delta 2**	**# bei Delta 3**	**# bei Delta 4**	**# bei Delta 5**
1..5	7404	4732	3248	2338	1774
6..10	2335	2289	1998	1612	1350
11..15	1269	1341	1172	1110	956
16..20	672	920	870	781	718
21..25	464	631	616	648	607
26..30	308	472	523	512	456
31..35	267	374	427	395	428
36..40	228	303	370	337	360
41..45	186	250	270	330	290
46..50	141	240	275	250	252
51..55	122	183	217	227	271
56..60	92	152	203	218	193
61..65	131	177	198	184	171
66..70	107	159	187	199	174
71..75	84	149	167	203	182
76..80	66	101	146	144	157
81..85	61	110	155	159	161
86..90	37	91	141	152	153
91..95	54	102	147	109	151
96..100	48	105	106	122	128
101..105	33	78	118	119	122
106..110	48	71	104	119	107
> 111	1732	2859	4231	5621	6728

Betrifft: Abbildung 3-15 / Abbildung 4-3

A.4 Häufigkeitsverteilung der Farbindizes

Klassen der Farbindizes	1997-99		2000-02	
	Anzahl	%	Anzahl	%
1..5	197	0.8%	81	0.5%
6..10	1314	5.7%	1031	6.5%
11..15	2254	9.7%	2665	16.8%
16..20	2471	10.6%	2161	13.6%
21..25	2409	10.4%	1520	9.6%
26..30	2966	12.8%	2156	13.6%
31..35	1273	5.5%	774	4.9%
36..40	972	4.2%	678	4.3%
41..45	1370	5.9%	512	3.2%
46..50	1157	5.0%	523	3.3%
51..55	1189	5.1%	593	3.7%
56..60	1193	5.1%	552	3.5%
61..65	1451	6.3%	609	3.8%
66..70	1481	6.4%	895	5.6%
71..75	1081	4.7%	656	4.1%
76..80	394	1.7%	464	2.9%
81..85	39	0.2%	19	0.1%
86..90	0	0	0	0.0%

Betrifft: Abbildung 3-19 / Abbildung 4-7 / Abbildung 4-8

A.5 Häufigkeitsverteilung der Farbindizes, Fallunterscheidungen Nord (> 50°) / Süd (< 50°)

Klassen der Farbindizes	1997-99		2000-02	
	Nord	Süd	Nord	Süd
1..5	0.84%	0.86%	0.33%	0.85%
6..10	6.46%	4.56%	3.90%	11.38%
11..15	8.20%	11.79%	12.70%	24.46%
16..20	8.46%	13.65%	9.95%	20.50%
21..25	10.42%	10.33%	8.65%	11.30%
26..30	12.89%	12.63%	15.16%	10.56%
31..35	5.63%	5.29%	5.71%	3.29%
36..40	4.31%	4.03%	5.16%	2.58%
41..45	5.64%	6.26%	4.01%	1.73%
46..50	4.80%	5.24%	4.37%	1.25%
51..55	5.11%	5.14%	5.01%	1.33%
56..60	5.12%	5.17%	4.41%	1.71%
61..65	7.03%	5.18%	4.50%	2.58%
66..70	7.84%	4.37%	7.14%	2.78%
71..75	5.76%	3.13%	5.06%	2.36%
76..80	1.40%	2.11%	3.78%	1.29%
81..85	0.11%	0.25%	0.16%	0.04%
86..90	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Betrifft: Abbildung 3-20 / Abbildung 4-9

A.6 Häufigkeitsverteilung der Abstände (Schwerpunkt Hagelzelle - Kältezentrum)

Klassen der Abstände	1997-99	2000-02
0..0.5	815	963
0.5..1	1434	1453
1..1.5	795	650
1.5..2	1118	949
2..2.5	1254	941
2.5..3	1508	1045
3..3.5	1036	702
3.5..4	1820	1167
4..4.5	2460	1539
4.5..5	2276	1429
5..5.5	3031	1803
5.5..6	5432	3056
6..6.5	105	95
6.5..7	91	75
7..7.5	11	11
7.5..8	17	4
8..8.5	3	4
8.5..9	4	2

Betrifft: Abbildung 3-21 / Abbildung 4-10

A.7 Häufigkeitsverteilung der Azimutwinkel (Schwerpunkt Hagelzelle - Kältezentrum)

Klassen der Azimutwinkel	1997-99	2000-02	Klassen der Azimutwinkel	1997-99	2000-02	Klassen der Azimutwinkel	1997-99	2000-02	Klassen der Azimutwinkel	1997-99	2000-02
1..3	1797	1164	91..93	0	0	181..183	0	0	271..273	0	0
4..6	0	0	94..96	0	0	184..186	0	0	274..276	0	0
7..9	0	0	97..99	1	1	187..189	0	0	277..279	1	1
10..12	217	139	100..102	159	110	190..192	181	105	280..282	164	112
13..15	167	99	103..105	116	86	193..195	124	76	283..285	118	58
16..18	1	1	106..108	0	0	196..198	0	0	286..288	0	0
19..21	232	127	109..111	104	87	199..201	97	78	289..291	114	79
22..24	268	144	112..114	181	99	202..204	173	96	292..294	213	126
25..27	457	270	115..117	248	166	205..207	214	140	295..297	251	202
28..30	0	0	118..120	0	1	208..210	0	0	298..300	0	0
31..33	330	155	121..123	246	125	211..213	308	196	301..303	360	189
34..36	197	89	124..126	94	73	214..216	94	56	304..306	106	73
37..39	199	105	127..129	132	76	217..219	145	80	307..309	163	90
40..42	1	0	130..132	0	0	220..222	0	0	310..312	1	0
43..45	941	616	133..135	582	442	223..225	563	368	313..315	683	441
46..48	0	0	136..138	0	0	226..228	0	0	316..318	0	0
49..51	2	0	139..141	1	0	229..231	0	0	319..321	1	1
52..54	191	125	142..144	163	103	232..234	126	79	322..324	178	104
55..57	155	83	145..147	101	53	235..237	88	55	325..327	127	83
58..60	372	177	148..150	316	183	238..240	244	132	328..330	286	149
61..63	0	0	151..153	0	0	241..243	0	0	331..333	0	0
64..66	374	253	154..156	258	202	244..246	197	130	334..336	286	221
67..69	216	129	157..159	204	144	247..249	167	112	337..339	191	93
70..72	141	134	160..162	136	80	250..252	98	63	340..342	154	96
73..75	1	1	163..165	1	0	253..255	0	1	343..345	1	0
76..78	127	89	166..168	119	78	256..258	111	57	346..348	131	108
79..81	181	100	169..171	192	106	259..261	150	86	349..351	209	126
82..84	0	0	172..174	0	0	262..264	0	1	352..354	1	3
85..87	0	0	175..177	0	0	265..267	0	0	355..357	0	0
88..90	2097	1681	178..180	1864	1544	268..270	1695	1220	358..360	0	0

Betrifft: Abbildung 3-22 / Abbildung 4-11

A.8 Häufigkeitsverteilung der Azimutwinkel (90°-Klassen)

Klassen der Azimutwinkel	1997-99	2000-02
0°..89°	6567	4000
90°..179°	5451	3896
180°..269°	4944	3455
270°..359°	5434	3575

Betrifft: Abbildung 3-24 / Abbildung 4-12

A.9 Vergleich der Grössenverteilung der Hagelzellenflächen auf dem Sat.-Bild, detektiert mit Radar in den beiden Zeitperioden

Klassen der Flächen	1997-99	2000-02	Klassen der Flächen	1997-99	2000-02
1..2	69.5%	63.2%	51..52	0.0%	0.0%
3..4	19.0%	20.6%	53..54	0.0%	0.0%
5..6	5.6%	7.4%	55..56	0.0%	0.0%
7..8	2.5%	3.3%	57..58	0.0%	0.0%
9..10	1.2%	2.0%	59..60	0.0%	0.0%
11..12	0.7%	1.1%	61..62	0.0%	0.0%
13..14	0.4%	0.6%	63..64	0.0%	0.0%
15..16	0.2%	0.4%	65..66	0.0%	0.0%
17..18	0.2%	0.3%	67..68	0.0%	0.0%
19..20	0.2%	0.2%	69..70	0.0%	0.0%
21..22	0.1%	0.2%	71..72	0.0%	0.0%
23..24	0.1%	0.1%	73..74	0.0%	0.0%
25..26	0.1%	0.1%	75..76	0.0%	0.0%
27..28	0.0%	0.1%	77..78	0.0%	0.0%
29..30	0.0%	0.0%	79..80	0.0%	0.0%
31..32	0.0%	0.0%	81..82	0.0%	0.0%
33..34	0.0%	0.0%	83..84	0.0%	0.0%
35..36	0.0%	0.0%	85..86	0.0%	0.0%
37..38	0.0%	0.0%	87..88	0.0%	0.0%
39..40	0.0%	0.0%	89..90	0.0%	0.0%
41..42	0.0%	0.0%	91..92	0.0%	0.0%
43..44	0.0%	0.0%	93..94	0.0%	0.0%
45..46	0.0%	0.0%	95..96	0.0%	0.0%
47..48	0.0%	0.0%	97..98	0.0%	0.0%
49..50	0.0%	0.0%	99..100	0.0%	0.0%

Betrifft: Abbildung 4-2

A.10 Korrelation der Radar-Echos (*Datensatz99* vs. *Datensatz02*) über der Testfläche

Sektor	1999	2002	1999	2002	Sektor	1999	2002	1999	2002
N8	878	334	1.53%	0.69%	N12	533	332	0.93%	0.69%
M8	358	635	0.62%	1.31%	M12	129	434	0.22%	0.90%
L8	265	74	0.46%	0.15%	L12	1357	618	2.36%	1.28%
K8	190	0	0.33%	0.00%	K12	2909	1876	5.07%	3.88%
J8	76	0	0.13%	0.00%	J12	1723	1263	3.00%	2.61%
I8	87	0	0.15%	0.00%	I12	355	272	0.62%	0.56%
O9	1553	769	2.70%	1.59%	P13	509	173	0.89%	0.36%
N9	5719	6359	9.96%	13.14%	O13	1149	488	2.00%	1.01%
M9	3533	5393	6.15%	11.15%	N13	722	330	1.26%	0.68%
L9	344	487	0.60%	1.01%	M13	120	336	0.21%	0.69%
K9	75	31	0.13%	0.06%	L13	962	656	1.68%	1.36%
J9	71	62	0.12%	0.13%	K13	852	811	1.48%	1.68%
I9	362	19	0.63%	0.04%	J13	111	95	0.19%	0.20%
P10	754	810	1.31%	1.67%	I13	131	204	0.23%	0.42%
O10	2618	1556	4.56%	3.22%	P14	285	149	0.50%	0.31%
N10	4567	5559	7.95%	11.49%	O14	1061	318	1.85%	0.66%
M10	2333	4202	4.06%	8.68%	N14	477	194	0.83%	0.40%
L10	312	653	0.54%	1.35%	M14	132	548	0.23%	1.13%
K10	139	135	0.24%	0.28%	L14	1715	852	2.99%	1.76%
J10	355	230	0.62%	0.48%	K14	967	498	1.68%	1.03%
I10	662	168	1.15%	0.35%	J14	75	126	0.13%	0.26%
P11	1555	426	2.71%	0.88%	I14	8	33	0.01%	0.07%
O11	2144	840	3.73%	1.74%	P15	61	8	0.11%	0.02%
N11	1458	1207	2.54%	2.49%	O15	169	82	0.29%	0.17%
M11	499	1078	0.87%	2.23%	N15	62	50	0.11%	0.10%
L11	365	364	0.64%	0.75%	M15	122	374	0.21%	0.77%
K11	1141	1444	1.99%	2.98%	L15	939	680	1.64%	1.41%
J11	1870	1346	3.26%	2.78%	K15	838	487	1.46%	1.01%
I11	1636	840	2.85%	1.74%	J15	110	106	0.19%	0.22%
P12	1527	341	2.66%	0.70%	I15	126	57	0.22%	0.12%
O12	1267	575	2.21%	1.19%					

Betrifft: Abbildung 4-17/ Abbildung 4-18

A.11 Gegenüberstellung der höchsten Korrelationswerte

Sektor	97-99 Radar	Sat99-A30-CI7	97-99 Radar	Sat99-A30-CI7
Big1	596	214	2.24%	7.11%
Big2	4523	280	17.03%	9.31%
Big3	2320	266	8.73%	8.84%
Big4	1957	351	7.37%	11.67%
Big5	6080	301	22.89%	10.01%
Big6	4459	515	16.79%	17.12%
Big7	1504	317	5.66%	10.54%
Big8	793	150	2.99%	4.99%
Big9	684	178	2.58%	5.92%
Big10	3646	436	13.73%	14.49%

Sektor	00-02 Radar	Sat02-A15-CI9	D02 BigSektors	Suche02-A15-CI9
Big1	81	130	0.44%	6.49%
Big2	2584	277	14.14%	13.82%
Big3	1834	205	10.03%	10.23%
Big4	2596	169	14.20%	8.43%
Big5	3961	315	21.67%	15.72%
Big6	2517	221	13.77%	11.03%
Big7	1432	175	7.83%	8.73%
Big8	1166	203	6.38%	10.13%
Big9	644	194	3.52%	9.68%
Big10	1463	115	8.00%	5.74%

Betrifft: Abbildung 4-24

A.12 Scatter-Plot *Direktsuche99* vs. *Direktsuche02*

Sektor	99All-A15-CI30	02All-A15-CI30	99All-A15-CI30	02All-A15-CI30
K8	6714	6965	1.7%	1.83%
J8	6405	7272	1.6%	1.91%
I8	8215	8188	2.1%	2.15%
L9	7469	7379	1.9%	1.93%
K9	6907	8886	1.8%	2.33%
J9	8024	7521	2.0%	1.97%
I9	9941	9626	2.5%	2.52%
L10	8386	7491	2.1%	1.96%
K10	7537	7540	1.9%	1.98%
J10	9177	8560	2.3%	2.24%
I10	10364	9388	2.6%	2.46%
N11	7974	7558	2.0%	1.98%
M11	8820	9455	2.2%	2.48%
L11	8841	8247	2.2%	2.16%
K11	10511	8795	2.7%	2.31%
J11	9982	9915	2.5%	2.60%
I11	10398	10084	2.6%	2.64%
O12	8801	7962	2.2%	2.09%
N12	7891	8704	2.0%	2.28%
M12	8280	9582	2.1%	2.51%
L12	8350	9024	2.1%	2.37%
K12	10397	8615	2.6%	2.26%
J12	12367	10412	3.1%	2.73%
I12	11974	11311	3.0%	2.97%
O13	6581	8155	1.7%	2.14%
N13	7693	8974	2.0%	2.35%
M13	7965	8811	2.0%	2.31%
L13	8850	7761	2.3%	2.03%
K13	10404	8974	2.6%	2.35%
J13	12272	10043	3.1%	2.63%
I13	10704	10271	2.7%	2.69%
O14	7240	7519	1.8%	1.97%
N14	7440	9867	1.9%	2.59%
M14	9023	8717	2.3%	2.29%
L14	9964	7892	2.5%	2.07%
K14	11632	10659	3.0%	2.79%
J14	14807	11954	3.8%	3.13%
P15	7776	7239	2.0%	1.90%
O15	7755	8867	2.0%	2.32%
N15	8142	9436	2.1%	2.47%
M15	8805	7967	2.2%	2.09%
L15	10328	8959	2.6%	2.35%
K15	12146	10903	3.1%	2.86%

Betrifft: Abbildung 4-27

A.13 Verteilungen über dem Satellitenbild (Direktsuche mit Farbindex-Limite 30 / Flächen-Limite 15 Pixel), Werte in # Pixel je Sektor

Zeitperiode 1997-99																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
S	7605	7119	7634	12346	20804	17911	7278	7680	9071	11786	12170	13429	9971	20509	10213	10956	10096	10071	13924
R	5997	5675	5778	8246	20997	15078	6411	5575	5439	5760	27525	16992	12611	10771	7012	20437	9054	8509	12105
Q	5924	5831	7477	13422	28761	14095	7573	6506	5738	5933	14572	25439	16297	10577	10475	12009	8490	8234	11494
P	7058	7921	14136	10918	13772	14070	13257	7026	5857	6693	12096	11978	9703	11523	7776	6999	8577	7797	9599
O	5699	9614	15118	13584	13320	12523	12389	10083	7972	16763	9753	8801	6581	7240	7755	7771	8648	9388	11995
N	5562	8928	10304	9334	11519	9431	8838	10513	12228	12117	7974	7891	7693	7440	8142	8689	9336	10809	13655
M	6545	5567	6690	8285	12824	9693	10298	12113	8331	7075	8820	8280	7965	9023	8805	8095	10305	10371	11350
L	6576	6048	6041	6274	7575	10028	11867	8310	7469	8386	8841	8350	8850	9964	10328	10931	7781	8629	11510
K	6256	5829	5705	6189	10179	11663	7055	6714	6907	7537	10511	10397	10404	11632	12146	12396	9077	8882	11020
J	5569	5780	5236	5856	6330	7756	6946	6405	8024	9177	9982	12367	12272	14807	16831	12605	8631	8644	10391
I	5197	5156	5363	5801	5743	8223	9374	8215	9941	10364	10398	11974	10704	11476	14474	14717	10024	9116	10765
H	5603	6010	6553	6664	6299	9134	10616	8134	10204	10344	11280	13001	10710	10489	11793	8675	9017	10014	13241
G	5698	9456	10877	10643	11711	11061	10191	9275	11251	9067	10171	6732	9139	8816	8119	10711	8916	7882	6151
F	5835	7932	8747	8049	10447	10840	9911	10850	14224	6640	5461	5365	10011	5520	5976	6978	8087	9482	7917
E	6292	7278	7421	8250	9798	10628	10954	9947	6980	6293	5557	4853	9487	7202	4468	4496	5117	9401	6496
D	5608	5457	6009	6710	7595	8405	10157	7476	8747	7277	5617	5145	8265	5800	4553	4200	4718	8762	4199
C	5267	5128	5404	5247	6231	7980	9051	6461	5565	4969	5342	5261	5108	4830	4117	5886	5182	6373	3443
B	2708	3551	4165	4675	6250	7221	5916	4469	5301	5304	5928	6891	8260	6919	7171	4064	3860	3280	2736
A	2233	2531	3817	5218	5607	5891	5255	7432	9196	9373	10048	9615	8393	7928	7347	3814	2845	2309	3405

Zeitperiode 2000-02																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
S	7172	6062	5912	11226	18473	15021	7370	7013	8874	11994	11791	13361	9097	18346	10215	10596	10314	10372	13613
R	5298	5593	4444	5775	19072	11775	6036	4997	5831	6237	25398	15067	11825	10404	6622	18759	8803	7507	10233
Q	5434	5713	5846	10531	27162	12554	6823	5887	5119	5583	12981	23150	14555	11451	9463	11443	8029	8223	10567
P	5690	6300	12159	9134	11465	12307	11003	6056	5739	7050	11316	10826	10135	10992	7239	8431	8158	8393	10552
O	4904	7033	11547	10696	10215	11662	10158	9010	7415	17248	9548	7962	8155	7519	8867	8834	8507	8666	11338
N	4523	7766	8764	7796	9322	8413	8137	10835	12175	11976	7558	8704	8974	9867	9436	11093	9501	9990	13208
M	4459	4826	5837	7426	11144	10149	10213	11622	8210	7359	9455	9582	8811	8717	7967	8888	8725	10676	11220
L	4968	5079	4904	5664	7116	8635	12048	8033	7379	7491	8247	9024	7761	7892	8959	10558	7928	7393	10064
K	4458	4350	4597	5467	10258	10799	7389	6965	8886	7540	8795	8615	8974	10659	10903	9724	7976	7447	9651
J	4480	4532	4982	4708	6190	8274	6204	7272	7521	8560	9915	10412	10043	11954	14703	10305	8050	9208	11427
I	4771	5072	4857	4627	5888	7921	8461	8188	9626	9388	10084	11311	10271	10345	11574	14884	10217	11228	14708
H	4232	4364	5101	5266	5544	7223	8473	6708	7019	9512	10303	11992	11237	9837	10485	7512	10741	12175	14088
G	4801	7715	9330	9548	10075	9988	7560	7255	8283	7531	7871	5031	7833	8963	8510	10397	9114	6575	7047
F	5146	6379	7038	6638	7311	7861	7433	9523	10441	4578	4849	3958	8073	4941	6203	7413	8406	9544	6920
E	4582	5554	6008	7029	6917	7215	7327	7985	5159	4142	4128	4557	8517	6439	4091	4234	4899	9429	7173
D	4627	4137	4224	5871	5209	6364	8776	5296	6060	5500	4134	4047	7460	5381	3188	4131	5349	10918	5042
C	4429	3825	3910	4097	5289	6527	6151	4854	3784	3553	3668	3717	4591	3920	3526	5441	5637	7040	3606
B	2775	3619	3377	3502	4231	5477	4539	3743	3376	3950	5011	5352	7235	5593	6281	3084	2852	3026	3301
A	1924	1988	3730	4207	4910	4061	3413	4922	5772	6902	7414	6581	6538	5070	4790	3033	2739	2518	3031

Betrifft: Abbildung 4-30 / Abbildung 4-31 / Abbildung 4-32

A.14 Gegenüberstellung der Verteilungen, Periode 1997-99 (hervorgehoben der Bereich mit guter Radarabdeckung, ohne Küsteneinflüsse)

Datensatz RADAR (Zeitperiode 1997-99)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	104	18	26	4	0	0	0
Q	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	57	1257	2132	48	45	39	0	0	0
P	0	0	0	0	0	0	0	80	454	754	1555	1527	509	285	61	41	0	0	0
O	0	0	0	0	0	0	0	783	1553	2618	2144	1267	1149	1061	169	57	0	0	0
N	0	0	0	0	0	0	0	878	5719	4567	1458	533	722	477	62	44	0	0	0
M	0	0	0	0	0	0	0	358	3533	2333	499	129	120	132	122	301	1	0	0
L	0	0	0	0	0	0	57	265	344	312	365	1357	962	1715	939	712	66	0	0
K	0	0	0	0	0	0	66	190	75	139	1141	2909	852	967	838	399	84	0	0
J	0	0	0	0	0	0	35	76	71	355	1870	1723	111	75	110	65	19	0	0
I	0	0	0	0	0	0	239	87	362	662	1636	355	131	8	126	191	100	0	0
H	0	0	0	0	0	0	146	17	87	255	151	206	171	147	44	0	0	0	0
G	0	0	0	0	0	0	22	37	51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Direktsuche REDUZIERTER DATENSATZ (Zeitperiode 1997-99)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
S	1102	1343	1380	2280	3494	3195	1190	1087	1489	1746	1784	1986	1732	3150	1685	1978	1569	1228	1831
R	1041	1017	1062	1446	4071	2356	1002	829	1081	1108	5458	3869	2191	2254	1307	3314	946	1114	1925
Q	722	979	1076	2300	4877	2263	1176	1174	1094	1468	3641	6030	4004	2244	2053	1503	1612	1317	1862
P	680	1040	2178	1669	1818	2330	2241	1263	1126	1284	2765	2684	1992	2125	1358	1079	1489	1193	1699
O	729	1418	2340	1987	2219	1865	1993	1663	1614	3490	1957	1759	1339	1004	1485	1142	1355	1373	1798
N	938	1688	1614	1558	1916	1804	1425	2159	3308	3007	1603	1872	1557	1643	1485	1527	1361	1547	2091
M	998	820	1237	1643	2627	2019	1815	2666	1893	1437	2068	1756	1768	1801	1634	1622	1431	1084	1407
L	1065	1167	1080	1176	1739	1869	2475	1751	1703	2250	2422	2217	1673	2078	2076	2046	909	1096	1409
K	1020	863	995	1120	2440	2401	1594	1420	1856	1801	2581	2255	2313	2239	2310	1762	1139	1219	1101
J	1189	873	1144	1182	1304	1927	1738	1746	2220	2077	2526	2792	2290	2494	2967	1232	907	1308	1196
I	922	778	1005	1369	1307	1802	2228	1893	2318	2255	2297	2574	1459	1498	1591	1291	1117	943	1455
H	1117	1247	1042	1127	1178	2060	2574	2250	1983	2291	1596	1840	999	1220	1365	946	724	1117	1415
G	1007	1736	1553	1626	2400	2719	2504	2353	2371	1678	1850	809	1121	1301	967	1310	931	816	610
F	1014	1080	1416	1310	1840	2423	2287	2368	2650	1336	876	846	1452	920	610	778	1187	1213	808
E	928	1318	1516	1475	1902	2146	2282	2275	1500	795	825	827	1534	1168	699	658	522	1085	933
D	1023	770	985	1442	1779	1293	2505	1714	1726	1548	1217	1058	1416	876	644	558	597	1195	651
C	692	723	867	1087	1272	1712	2111	1618	1160	1353	1348	1118	708	817	781	1241	793	1057	469
B	492	647	889	1045	1401	1526	1413	1065	1121	1372	1256	1616	1330	1601	1398	675	599	369	394
A	570	699	956	1193	1204	1028	1076	1396	1976	2234	2269	2342	1736	1490	1373	689	393	261	605

Direktsuche VOLLSTÄNDIGER DATENSATZ (Zeitperiode 1997-99)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
S	7605	7119	7634	12346	20804	17911	7278	7680	9071	11786	12170	13429	9971	20509	10213	10956	10096	10071	13924
R	5997	5675	5778	8246	20997	15078	6411	5575	5439	5760	27525	16992	12611	10771	7012	20437	9054	8509	12105
Q	5924	5831	7477	13422	28761	14095	7573	6506	5738	5933	14572	25439	16297	10577	10475	12009	8490	8234	11494
P	7058	7921	14136	10918	13772	14070	13257	7026	5857	6693	12096	11978	9703	11523	7776	6999	8577	7797	9599
O	5699	9614	15118	13584	13320	12523	12389	10083	7972	16763	9753	8801	6581	7240	7755	7771	8648	9388	11995
N	5562	8928	10304	9334	11519	9431	8838	10513	12228	12117	7974	7891	7693	7440	8142	8689	9336	10809	13655
M	6545	5567	6690	8285	12824	9693	10298	12113	8331	7075	8820	8280	7965	9023	8805	8095	10305	10371	11350
L	6576	6048	6041	6274	7575	10028	11867	8310	7469	8386	8841	8350	8850	9964	10328	10931	7781	8629	11510
K	6256	5829	5705	6189	10179	11663	7055	6714	6907	7537	10511	10397	10404	11632	12146	12396	9077	8882	11020
J	5569	5780	5236	5856	6330	7756	6946	6405	8024	9177	9982	12367	12272	14807	16831	12605	8631	8644	10391
I	5197	5156	5363	5801	5743	8223	9374	8215	9941	10364	10398	11974	10704	11476	14474	14717	10024	9116	10765
H	5603	6010	6553	6664	6299	9134	10616	8134	10204	10344	11280	13001	10710	10489	11793	8675	9017	10014	13241
G	5698	9456	10877	10643	11711	11061	10191	9275	11251	9067	10171	6732	9139	8816	8119	10711	8916	7882	6151
F	5835	7932	8747	8049	10447	10840	9911	10850	14224	6640	5461	5365	10011	5520	5976	6978	8087	9482	7917
E	6292	7278	7421	8250	9798	10628	10954	9947	6980	6293	5557	4853	9487	7202	4468	4496	5117	9401	6496
D	5608	5457	6009	6710	7595	8405	10157	7476	8747	7277	5617	5145	8265	5800	4553	4200	4718	8762	4199
C	5267	5128	5404	5247	6231	7980	9051	6461	5565	4969	5342	5261	5108	4830	4117	5886	5182	6373	3443
B	2708	3551	4165	4675	6250	7221	5916	4469	5301	5304	5928	6891	8260	6919	7171	4064	3860	3280	2736
A	2233	2531	3817	5218	5607	5891	5255	7432	9196	9373	10048	9615	8393	7928	7347	3814	2845	2309	3405

oben: Verteilung der potentiellen Gewitterzellen in Pixel / Sektor, erstellt mit Radar.

mitte: Verteilung der potentiellen Gewitterzellen in Pixel / Sektor, erstellt mit der Direktsuche, nur Schnittmenge zu Radar-Datensatz.

unten: Verteilung der potentiellen Gewitterzellen in Pixel / Sektor, erstellt mit der Direktsuche auf sämtlichen Satellitenbildern.

A.15 Gegenüberstellung der Verteilungen, Periode 2000-02 (hervorgehoben der Bereich mit guter Radarabdeckung, ohne Küsteneinflüsse)

Datensatz RADAR (Zeitperiode 2000-02)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	86	33	0	0	0	0	0
Q	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1066	2655	36	0	0	0	0	0
P	0	0	0	0	0	0	0	45	477	810	426	341	173	149	8	0	0	0	0
O	0	0	0	0	0	0	0	186	769	1556	840	575	488	318	82	0	0	0	0
N	0	0	0	0	0	0	0	334	6359	5559	1207	332	330	194	50	29	0	0	0
M	0	0	0	0	0	0	0	635	5393	4202	1078	434	336	548	374	170	0	0	0
L	0	0	0	0	0	0	0	74	487	653	364	618	656	852	680	426	60	0	0
K	0	0	0	0	0	0	0	0	31	135	1444	1876	811	498	487	248	45	0	0
J	0	0	0	0	0	0	0	0	62	230	1346	1263	95	126	106	84	6	0	0
I	0	0	0	0	0	0	0	0	19	168	840	272	204	33	57	91	36	0	0
H	0	0	0	0	0	0	0	0	70	171	129	120	90	79	23	0	0	0	0
G	0	0	0	0	0	0	0	28	56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Direktsuche REDUZIERTER DATENSATZ (Zeitperiode 2000-02)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
S	410	442	702	1269	2130	1852	1099	966	944	995	984	1266	1284	1957	1104	1058	984	991	1585
R	481	357	383	494	2252	1228	679	589	809	820	2800	2147	1422	1054	627	1215	1036	904	1523
Q	503	516	452	1312	3775	1317	794	848	693	693	2043	3388	1907	977	751	887	749	719	1121
P	581	602	994	751	1108	1389	1387	976	871	990	2078	1578	1190	1369	804	999	656	761	902
O	477	808	1205	968	912	1400	1781	1541	1168	2813	1667	1180	1126	1058	1165	1266	903	1073	971
N	479	848	802	623	1296	1066	1365	1603	2140	2029	1392	1263	1532	1504	1505	1519	1190	1062	1210
M	441	745	825	877	1587	1528	1611	2146	1926	1730	1914	1605	1381	1369	1183	1319	1295	1321	1217
L	495	698	624	705	1329	1318	2147	1783	1684	1598	1877	2043	1427	1481	1273	1314	1129	1085	1160
K	626	641	563	791	1871	1785	1333	1516	2353	1512	2201	1740	1754	2031	1843	1466	1257	978	1174
J	642	752	768	876	1154	1376	1327	1189	1532	1574	2347	1915	1683	1864	2141	1574	1469	1404	1467
I	673	755	929	935	1151	1567	1621	1282	1885	1454	1825	1876	1568	1501	1422	1641	1729	1942	1858
H	441	778	928	1202	1287	1255	1721	1488	1437	1346	1529	1807	1560	1309	1325	1020	1020	1184	1337
G	657	1065	1271	1600	1657	1855	1741	1787	1506	1223	883	730	1223	1088	1116	1490	1366	712	503
F	873	975	1054	1211	1348	1449	1634	1757	1912	757	872	641	739	750	655	620	1021	1111	800
E	772	903	1014	744	1095	1072	1297	1119	1005	863	632	548	958	881	471	247	331	884	761
D	723	695	611	904	1019	996	1606	981	1467	1215	607	512	818	540	304	209	358	923	432
C	567	640	742	512	591	1056	1140	1177	964	570	658	514	442	483	415	420	639	865	326
B	356	482	463	460	644	841	932	832	714	867	893	896	1014	966	723	342	277	364	371
A	275	159	498	449	566	600	550	1094	1192	1413	1832	1276	1050	611	539	349	383	204	601

Direktsuche VOLLSTÄNDIGER DATENSATZ (Zeitperiode 2000-02)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
S	7172	6062	5912	11226	18473	15021	7370	7013	8874	11994	11791	13361	9097	18346	10215	10596	10314	10372	13613
R	5298	5593	4444	5775	19072	11775	6036	4997	5831	6237	25398	15067	11825	10404	6622	18759	8803	7507	10233
Q	5434	5713	5846	10531	27162	12554	6823	5887	5119	5583	12981	23150	14555	11451	9463	11443	8029	8223	10567
P	5690	6300	12159	9134	11465	12307	11003	6056	5739	7050	11316	10826	10135	10992	7239	8431	8158	8393	10552
O	4904	7033	11547	10696	10215	11662	10158	9010	7415	17248	9548	7962	8155	7519	8867	8834	8507	8666	11338
N	4523	7766	8764	7796	9322	8413	8137	10835	12175	11976	7558	8704	8974	9867	9436	11093	9501	9990	13208
M	4459	4826	5837	7426	11144	10149	10213	11622	8210	7359	9455	9582	8811	8717	7967	8888	8725	10676	11220
L	4968	5079	4904	5664	7116	8635	12048	8033	7379	7491	8247	9024	7761	7892	8959	10558	7928	7393	10064
K	4458	4350	4597	5467	10258	10799	7389	6965	8886	7540	8795	8615	8974	10659	10903	9724	7976	7447	9651
J	4480	4532	4982	4708	6190	8274	6204	7272	7521	8560	9915	10412	10043	11954	14703	10305	8050	9208	11427
I	4771	5072	4857	4627	5888	7921	8461	8188	9626	9388	10084	11311	10271	10345	11574	14884	10217	11228	14708
H	4232	4364	5101	5266	5544	7223	8473	6708	7019	9512	10303	11992	11237	9837	10485	7512	10741	12175	14088
G	4801	7715	9330	9548	10075	9988	7560	7255	8283	7531	7871	5031	7833	8963	8510	10397	9114	6575	7047
F	5146	6379	7038	6638	7311	7861	7433	9523	10441	4578	4849	3958	8073	4941	6203	7413	8406	9544	6920
E	4582	5554	6008	7029	6917	7215	7327	7985	5159	4142	4128	4557	8517	6439	4091	4234	4899	9429	7173
D	4627	4137	4224	5871	5209	6364	8776	5296	6060	5500	4134	4047	7460	5381	3188	4131	5349	10918	5042
C	4429	3825	3910	4097	5289	6527	6151	4854	3784	3553	3668	3717	4591	3920	3526	5441	5637	7040	3606
B	2775	3619	3377	3502	4231	5477	4539	3743	3376	3950	5011	5352	7235	5593	6281	3084	2852	3026	3301
A	1924	1988	3730	4207	4910	4061	3413	4922	5772	6902	7414	6581	6538	5070	4790	3033	2739	2518	3031

oben: Verteilung der potentiellen Gewitterzellen in Pixel / Sektor, erstellt mit Radar.

mitte: Verteilung der potentiellen Gewitterzellen in Pixel / Sektor, erstellt mit der Direktsuche, nur Schnittmenge zu Radar-Datensatz.

unten: Verteilung der potentiellen Gewitterzellen in Pixel / Sektor, erstellt mit der Direktsuche auf sämtlichen Satellitenbildern.

B Beschreibung der IDL Prozeduren und Funktionen

Die Systematik der Präfixe bei der Bezeichnung der verschiedenen Programm-Codes im IDL^{TM}-Projekt ist wie folgt angelegt:

- „F_“ für Funktionen
- „P_“ für Prozeduren
- „Z_main“ für Hauptprogramme
- „Z_test“ für Testprogramme

B.1 Funktionen & Prozeduren

Funktion „F_CENTER_OF_GRAVITY“. Berechnet die Schwerpunkte sämtlicher roten Pixel-Gruppen auf einem Bild.

Rückgabewert: 3D-Vektor, der X-/Y-Koordinaten der Zentren und die # Pixel der jeweiligen Gruppen enthält.

Funktion „F_CLOUD_DEVIATION_CALC“. Berechnet den längen-/breitenabhängigen Korrekturtherm zur Bestimmung der effektiven Position hoher Wolken auf der Erdoberfläche.

Rückgabewert: Delta des Winkels.

Funktion „F_IMG_INDEXED_TO_TRUE. Konvertiert ein indiziertes .PNG zu einem True-Color .PNG.

Rückgabewert: True-Color .PNG.

Funktion „F_REMOVE_CLUTTER_ON_RADPIC. Entfernt rote Pixel auf Radar-Bildern, falls nicht auf mindestens einem weiteren Bild (zeitlich direkt vor- oder nachher) im Radius von 15 Pixel erneut ein rotes Pixel zu finden ist.

Rückgabewert: bearbeitetes Radarbild, auf dem rote Pixel, die nur auf einem Bild "aufblitzen" (Clutter), entfernt worden sind.

Funkton „F_SQUARE_TO_CIRCLE“. Erstellt aus einem Quadratischen (oder rechteckigen) Bildausschnitt einen RUNDEN Suchbereich, indem sämtliche Pixel > R (Radius um definierten Mittelpunkt) schwarz gesetzt werden. Diese Funktion wurde geschrieben, da ein Satellitenpixel in Realität um die 6.5 Km Kantenlänge aufweist. Es entsteht somit bezüglich der Fläche ein wesentlicher Unterschied, ob in einem Bild die Eck-Pixel ebenfalls als Suchregion zugelassen werden oder nicht.

Rückgabewert: eckiger Bildausschnitt, auf dem die Eck-Pixel schwarz gesetzt wurden ' Suchbereich wird somit rund.

Prozedur „P_DISPLAY_RADPIX_ON_SATPIC“. Sucht auf einem Radarbild (true-color) die Pixel mit Farbwerten R,G,B, konvertiert die Koordinaten zu Satellitenkoordinaten und zeigt diese Pixel auf dem Satellitenbild in definierten R,G,B Farbe an. Als Option berücksichtigt diese Prozedur die Korrektur für hohe Wolken (Parameter: 'CloudDeviation_YES' oder 'CloudDeviation_NO').

Rückgabewert: .PNG mit übertragenen Pixel.

Prozedur „P_ELIMINATE_NEIGHBOURS“. Eliminiert Pixel (in 2D-Array), welche sich innerhalb eines bestimmten Abstandes befinden oder nicht mindestens X benachbarte Pixel mit gleicher Farbe aufweisen (für X = 0 wird dieses Nachbar-Kriterium deaktiviert).

Rückgabewert: 2D-Array mit allen Werten, welche die definierten Kriterien erfüllen.

Prozedure „GET_COLOR_TABLE“. Liest eine Farbtabelle eines .PNG und liefert die Tabelle in einem Array zurück.

Rückgabewert: R,G,B-Farbtabelle.

Die Prozedur ist in der Datei „p_max_hail_intensity.pro“ integriert.

Prozedure „P_GET_SIZE_OF_HAILZONE“. Bestimmt die # zusammenhängender Pixel einer Hagelzelle.

Rückgabewert: # Pixel der Hagelzell-Fläche

CENTER_OF_GRAVITY liefert ebenfalls die # Pixel einer Hagelzell-Fläche.

Prozedure „P_GLGB_TO_PIXXY“. Berechnet aus der geographischen Länge und Breite die entsprechenden Koordinaten auf den Satellitenbildern.

Rückgabewert: X-/Y-Koordinaten der Satellitenpixel.

Prozedure „P_LAT_LON_CORRECTION“. Korrigiert die Länge und Breite um den Korrekturtherm.

Rückgabewert: korrigierte Länge und Breite.

Prozedure „P_LOOK_FOR_BIG_PIXELS“. Sucht innerhalb eines True-Color Bildes Pixel bestimmter R,G,B-Farbe, die mindestens X Nachbarn haben. Um Mehrfachpositionen innerhalb der gleichen Fläche zu eliminieren, kann ein Radius gesetzt werden, in dem ein Pixel, welches das Nachbar-Kriterium erfüllt, ignoriert wird.

Rückgabewert: Array mit Pixel-Koordinaten.

Prozedure „P_MAGIC_WAND“. Sucht (ausgehend von einem gegebenen Startpixel in einem True-Color Bild) diejenigen Pixel, welche bis zu X Farbstufen in die eine und Y Farbstufen in die andere Richtung der Farbtabelle vom Wert des Start-Pixels abweichen. Benötigt eine Farbtabelle und den Index des Startpixels als Input.

Rückgabewert: Bild, worauf die gefundenen Pixel rot markiert sind.

Prozedure „P_MAX_HAIL_INTENSITY“. Sucht in einem Bild(ausschnitt) ausgehend von einem Start-Pixel an Hand der Farbe nach den ‚kältesten' Pixel. Zudem wird die Distanz und der Peilungswinkel des nächstgelegenen Fundes berechnet.

Rückgabewert: Koordinaten des nächsten, ‚kältesten' Satellitenpixel und dessen Distanz und Peilungswinkel (alle Werte ausgehend vom Start-Pixel).

Prozedure „P_PIXXY_TO_GLGB“. Berechnet aus den Koordinaten der Radarbilder die entsprechenden geographischen Längen und Breiten. Die ursprünglichen Parameter von Willi Schmid wurden dabei angepasst (Abweichung speziell in nördlichen Breiten).

Rückgabewert: Geographische Länge/Breite des Pixels.

Prozedure „P_READRAD_WRITESAT_AND_EXPORT“. Wurde zum Entwickeln und Finden von Parametern gebraucht, die anschliessend in ‚STATISTIC_001' umgesetzt wurden.

Wird nicht mehr gebraucht und wird durch ‚STATISTIC_001‘ abgelöst!

B.2 „Batch-Prozesse“: Funktionen & Prozeduren

Prozedure „Z_MAINBATCHPROCESS“. Hauptprogramm zur Steuerung der Filenamen & Ordner der drei Hageltagen 21.7., 1.8. und 12.8.1998, zusammen mit der Prozedur RADSATCROP.

Programm nur zusammen mit P_RADSATCROP verwendbar!

Prozedure „Z_MAINCREATESTAT001“. Hauptprogramm zur Steuerung der Prozedur ‚STATISTIC_001': Berechnet Filenamen und setzt Parameter.

Prozedure „Z_MAINDIRECTSEARCH_ON_SATELLITE“. Steuerprogramm zur Direktsuche auf den Satellitenbildern. Zuerst werden die Dateinamen berechnet und anschliessend die Prozedur zur Bestimmung der potentiellen Gewitterzellen („P_FIND_HAIL_ON_SATELLITE“) aufgerufen.

Prozedure „Z_MAINEUROPEDISTRIBUTION“. Erstellt die Verteilungsstatistik über dem Gebiet des Satellitenbildes. Jedem Sektor werden alle Pixel zugeteilt, die einer Zelle angehören, deren Schwerpunkt innerhalb der Sektorgrenzen liegt.

Prozedure „Z_MAINEUROPEDISTRIBUTIONLAND_ONLY“. Gleicher Code wie „Z_MAINEUROPEDISTRIBUTION“ mit der Ausnahme, dass nur Pixel über den Landmassen berücksichtigt werden.

Prozedure „Z_MAIN_NEW_MARK_OLD_ELEMENTS“. Markiert die Dateien, die gleichzeitig im File der Direktsuche und im File zur Bestimmung der Radar-Parameter vorhanden sind. Diese Markierung ist nötig, um nur Vergleiche zwischen Datensätzen mit korrespondierenden Bildern zuzulassen.

Prozedur „P_FIND_HAIL_ON_SATELLITE“. Sucht auf dem Satellitenbild nach Pixeln, die die Kriterien der Suchparameter erfüllen und stellt die so gefundenen potentiellen Hagelzellen als rote Pixel auf einem .PNG dar.

Prozedur „P_FIND_HAIL_ON_SATELLITE_INDEXED“. Selbe Prozedur wie „P_FIND_HAIL_ON_SATELLITE“ mit dem einzigen Unterschied, dass sie für indizierte Bilder entwickelt wurde. Der Hintergedanke dabei war, dass die Suche mit indizierten Bildern effizienter und somit schneller ablaufen würde. Die paar Testbilder konnten diese Vermutung aber nicht bestätigen, so dass schlussendlich trotzdem die TrueColor-Version verwendet wurde.
Die Indexed-Version liefert (verglichen mit der RGB-Version) infolge einer anderen Sortierreihenfolge der Pixelkoordinaten nicht identische Resultate.

Prozedure „P_RADSATCROP“. Überträgt Start- und Endpunkte der Env.-Zellen der drei "Hagel-Tage" einmal mit und einmal ohne Korrektur für hohe Wolken in verschiedenen Farben. Schneidet zudem die Hagelzellen (roten Pixel) aus.

Output: .PNG mit drei Reihen und X Spalten (für X gefundene Env-Zellen). Reihe 1: nur Startpunkte (grün [mit Korrektur] & gelb [ohne Korrektur] für Start-/Endkoordinaten gemäss .DAT File von Willi. Reihe 2: identischer Ausschnitt des Satellitenbildes, unverändert. Reihe 3: Zusätzlich zu den Einträgen der Reihe 1 wird auch die Env-Zelle abgebildet.

Prozedure „P_STATISTIC_001“. Prozedur, welche nur zusammen mit ‚mainCreateStat001' gebraucht werden kann: filtert Clutter auf den Radarbildern, überträgt die roten Radar-Pixel auf die Satellitenbilder, sucht die Schwerpunkte der Hagelzellen, sucht innerhalb eines flächen- und fehlerabhängigen (Genauigkeit bei Koordinatentransformation) Radius nach dem nächsten, kühlsten Pixel und bestimmt den Abstand

vom Schwerpunkt und den Peilungswinkel. Das gefundene, kühlste Pixel dient als Startpunkt für die Bestimmung der Fläche bei Farbindex-Deltas in fünf Stufen. Pro Delta-Stufe wird die jeweils gefundene Fläche bestimmt. Ein Log-File mit sämtlichen Parametern (File-Name; Farbindex des Schwerpunktes; Koordinaten und Farbindex des zum Schwerpunkt nächstgelegenen Kältemaximums; die gefundene Fläche je Delta-Wert des Farbindexes; die # Pixel, welche die Radarzelle nach dem Übertragen auf das Satellitenbild aufweist; die Distanz Kältemaximum <> Schwerpunkt, der Peilungswinkel des Kältemaximums, gesehen vom Schwerpunkt) wird exportiert.

B.3 Hilfsfunktionen & -prozeduren zur Effizienzsteigerung beim Betrachten / Auswerten

Prozedure „F_APPEND_IMAGE“. Hilfsfunktion zum Zusammenfügen zweier Bilder mit mindestens einer gemeinsamen Dimension an beliebiger Position (rechts, links, oben, unten)

Rückgabewert: zusammengefügtes Bild.

Prozedure „Z_MAINCROP_AND_SAVE“. Schneidet aus einem Env-Radarbild die Envelope aus und exportiert den Bildausschnitt als .PNG.

Prozedure „Z_MAINIMPORT_RAD_IN_SAT“. Liest grüne und rote Pixel auf Radarbild und überträgt sie, einmal mit und einmal ohne Korrekturterm für hohe Wolken, aufs Satellitenbild.

Rückgabewert: Satellitenbild mit roten und gründen Radar-Echos, entweder als Bildschirmausgabe oder als .PNG (je nachdem, wie der Schluss des Codes kommentiert ist.)

Prozedure „Z_MAINSATELLITE_CALIBRATION“. Gebraucht für die Kontrolle der Koordinaten-transformation. Die Grenzen der Staaten, welche auf dem Radarbild eingezeichnet sind, müssen perfekt mit den Konturen der Kontinente übereinstimmen.

Prozedure „P_OUTPUT_MERGER“. Fügt zwei Bilder zusammen (an beliebiger Position rechts, links, oben, unten - vorausgesetzt, die Dimension der Schnittstellen ist identisch).

Rückgabewert: schreibt neues .PNG, das die beiden zusammengefügten Bilder enthält.

Benötigt die Funktion „F_APPEND_IMAGE“.

Prozedure „P_ZOOM_PICTURE“. Zoom-Prozedur zur Ausgabe von indizierten oder true-color Bildausschnitten auf dem Bildschirm. Je nach Parameter wird das Resultat in einer Slide-Box oder als fixes Fenster ausgegeben. Der Zoom-Faktor kann beliebig gesetzt werden.

C Inventar der CD zur vorliegenden Diplomarbeit

C.1 Ordner „Diplomarbeit_(Bericht)“

Enthält den Bericht im PDF-Format. Zu öffnen mit Adobe® Reader® ab Version 5.0.

Unterordner „Bilder“. Enthält sämtliche Bilder, die im Bericht enthalten sind, in gängigen Graphik-Formaten (.JPG / .GIF / .TIF / .PNG)

C.2 Ordner „Direktsuche“

Enhält ein animiertes .GIF, das an einem Einzelbild den Ablauf der Direktsuche auf dem Satellitenbild demonstriert.

C.3 Ordner „IDL“

Enthält sämtliche IDL™-Codes, die während der Diplomarbeit erstellt wurden als einziges Projekt (Projektname: „Prog5.prj“)

C.4 Ordner „Koordinaten_Kalibrierung“

Enthält das Excel™-Sheet mit dessen Hilfe die Kalibrierung der Koordinatentransformationen vorgenommen wurde. Ebenfalls sind die Graphik-Dateien enthalten, die zum Test der Kalibrierparameter verwendet wurden.

C.5 Ordner „Parametersuche“

Enthält die Excel™-Files, welche die Daten der Parametersuche mit Hilfe der Radarbilder enthalten. Die Dateien enthalten je Zeitperiode zwei Datensätze: einen kompletten und einen reduzierten Datensatz, der keine Mehrfachen Zellen enthält.

C.6 Ordner „RadSat_Korrelation“

Enthält die Excel™-Files, welche die Sektorwerte über dem Testgebiet bei verschiedenen Suchparametern (extrahiert aus dem vollständigen Datensatz) enthalten. Aus Teilmengen dieser Datensätze wurden die Korrelationskoeffizienten zwischen den Verteilungen mit Hilfe von Radar- und Satellitendaten berechnet.

C.7 Ordner „RadSat-Viewer“

Enthält ein VB Standalone-Tool (RadSatView.exe), das speziell zu Betrachtung von Radar- und Satellitenbilder korrespondierender Zeit entwickelt wurde. Optional kann das eine Bild festgehalten werden, so dass z.B. bei Bildern mit eingezeichneter Radar-Envelope beobachtet werden kann, wie die Wolken bei dieser Fläche vorbeiziehen.

Unterordner „1xFix_1xFlexibel“. Beispiel zur Benutzung des Tools: Ein Radarbild wird festgehalten, während im zweiten Fenster die Satellitenbilder je Mausclick vor- oder rückgespult werden.

Unterordner „Vergleich Sat-Rad Bilder“. Beispiel zur Benutzung des Tools: Beide Bilder wechseln je Mausclick zur nächstmöglichen Zeitperiode.

C.8 Ordner „Rohdaten“

Enthält sämtliche Rohdaten (IDL™-Outputs), die durch die verschiedenen Programm-Codes erzeugt worden sind.

Unterordner „Direktsuche“. Enthält je Zeitperiode einen Datensatz, der die Daten der Direktsuche auf dem Satellitenbild enthält.

Unterordner(2) „Europa-Verteilung“. Enthält die durch einen IDL^{TM}-Code ausgezählten Pixelwerte, die in die verschiedenen Sektoren über dem Testgebiet fallen.

Unterordner „Parametersuche“. Enthält je Jahr einen Datensatz („Result*.txt“), der mit Hilfe der Radarbilder aus den Satellitenbildern berechnet wurde. Die „process*.txt“ enthalten die Dateinamen der bearbeiteten Dateien.

C.9 Ordner „Sat_Verteilung“

Enthält die Satellitenverteilungen über dem ganzen Satellitenbild, die mit Hilfe verschiedener Parameter erstellt wurden. Die Daten sind einerseits in „Flächendarstellung“ (jeder Wert entspricht der korrespondierenden Satellitenbild-Position) und andererseits in „Spaltendarstellung“ aufgeführt. Die „Spaltendarstellung“ lässt die einfachere Berechnung der Korrelationskoeffizienten zu, wohingegen die „Flächendarstellung“ zur optischen Aufarbeitung in Bilddateien bevorzugt wird.

D Inventar der DVD zur vorliegenden Diplomarbeit

D.1 Ordner „1997“ bis „2002“

Die Ordner, bezeichnet mit Jahrzahlen, enthalten die Satellitenbilder des kompletten Datensatzes. Auf jedem Bild sind die Pixel, welche die Suchkriterien (Farbindex kleiner 35 und Fläche kleiner 30 Pixel auf Farb-Delta 2) erfüllen, in roter Farbe eingezeichnet. Gut erkennbar ist, dass bei der Suche mit diesen Parametern viel zu viele potentielle Gewitterzellen erkannt werden.
Aus diesem Datensatz wurden Teilmengen mit enger gefassten Suchkriterien extrahiert.