

**Klassifikation von Radarsatellitendaten
zur Meereiserkennung mit Hilfe von
Line-Scanner-Messungen**

**Classification of Radar Satellite Data
for Sea Ice Identification
by Means of Line Scanner Measurements**

Axel Bochert

**Ber. Polarforsch. 209 (1996)
ISSN 0176 - 5027**

Axel Bochert

Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung
Columbusstraße
D-27568 Bremerhaven

Die vorliegende Arbeit ist die im Anhang gekürzte Fassung einer Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades *rer. nat.*, die 1996 dem Fachbereich Physik/Elektrotechnik der Universität Bremen vorgelegt wurde.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	VI
Summary	VIII
Vorwort	X
1 Einleitung und Aufgabenstellung	1
1.1 Stand der Forschung	3
1.2 Line-Scanner-Systeme	5
1.3 Synthetic-Aperture-Radar des ERS-1	7
1.4 Datengrundlage	9
1.5 Programme zur Datenauswertung	12
1.6 Überblick über die Arbeit	15
2 Korrektur der Line-Scanner-Daten	16
2.1 Line-Scan-Camera (LSC)	17
2.1.1 Elimination gestörter Bildzeilen	20
2.1.2 Beseitigung der Intensitätssprünge	22
2.1.3 Behebung der Intensitätsvariationen in der Bildzeile	26
2.1.4 Korrektur der Beleuchtungsschwankungen in Flugrichtung	40
2.2 Infrared-Line-Scanner (IRLS)	47
2.2.1 Kalibration des Temperaturbildes	50
2.2.2 Elimination gestörter Bildzeilen	53
2.2.3 Geometrische Entzerrung	55
2.2.4 Atmosphärischer Einfluß und Emissivität der Erdoberfläche	57
2.2.5 Bedeutung der Hintergrundstrahlung	69
2.3 Kombination von LSC und IRLS	75
3 Klassifikation der Line-Scanner-Daten	83
3.1 Segmentierungsverfahren	84
3.1.1 Punktorientierte Verfahren	84
3.1.2 Bereichsorientierte Verfahren	90

3.2	Numerische Klassifikation	92
3.2.1	Hauptkomponententransformation	94
3.2.2	Klassifikationsstrategien	97
3.2.3	Klassifikatoren	98
3.3	Beurteilung der Ergebnisse	99
3.4	Interaktive Klassifikation	103
3.4.1	Clusterbildung	104
3.4.2	Klassifikation	105
3.4.3	Merkmalsextraktion	106
4	Segmentierung der Radardaten	110
4.1	Synthetic-Aperture-Radar	110
4.1.1	Prinzipielle Wirkungsweise	111
4.1.2	Rückstreuungseigenschaften von Meereis	114
4.2	Unterscheidung der Eistypen	121
4.2.1	Mittlerer Rückstreuoeffizient	122
4.2.2	Kenngößen der Verteilungsfunktionen	125
4.2.3	Kennwerte der Co-occurrence-Matrizen	130
4.3	Segmentierung	134
4.3.1	Kantendetektion	135
4.3.2	Bereichswachstum	137
4.3.3	Segmentverschmelzung	140
4.3.4	Segmentinterpretation	140
5	Interpretation der Radardaten	141
5.1	Zuordnung der Line-Scanner-Daten	142
5.2	Beurteilung der statistischen Parameter	144
5.2.1	Fehlinterpretation	144
5.2.2	Histogramme	146
5.3	Klassifikation der Radardaten	157
5.3.1	Feste Klassifikation	159
5.3.2	Optimierte Klassifikation	161

5.4	Klassifikationsvergleich zwischen Line-Scanner und Radar	162
5.4.1	Verfahren	163
5.4.2	Wintersignaturen	174
5.4.3	Sommersignaturen	178
5.4.4	Bewertung	183
5.5	Ausblick	187
6	Literatur	191
A	Meereistypen	199
A.1	New Ice – Neueis	199
A.2	Young Ice – Junges Eis	200
A.3	First-Year Ice – Erstjähriges Eis (FY)	200
A.4	Old Ice – Altes Eis	200
A.5	Erscheinungsformen	201

Zusammenfassung

Als operationeller Satellitensensor steht für die Erstellung von Karten der Meereisbedeckung der Special-Sensor-Microwave/Imager (SSM/I) zur Verfügung, der eine gute Abdeckung der Polarregionen gewährleistet, jedoch nur eine grobe räumliche Auflösung im Bereich von 25 km besitzt. Um die zur Zeit noch unbefriedigende Genauigkeit der mit den Daten des SSM/I erstellten Eiskarten zu verbessern, muß eine hierarchisch gegliederte Validierung mit Meßdaten von unterschiedlicher räumlicher Auflösung und Abdeckung durchgeführt werden. Hierbei werden die Algorithmen, mit denen aus SSM/I-Messungen Eiskarten berechnet werden, anhand der Daten des Synthetic-Aperture-Radar (SAR), des ersten Europäischen Fernerkundungssatelliten ERS-1, verbessert. In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, inwieweit die Daten dieses SAR für die Erstellung von Eiskarten genutzt werden können; hierfür werden neue Algorithmen und Verfahren entwickelt.

Zur Aufnahme der Bilddaten für diese Untersuchung wurden Line-Scanner entwickelt, die sowohl im sichtbaren Spektralbereich als auch im thermischen Infrarotbereich arbeiten. Mit dem ersten Einsatz dieses kombinierten Systems wurden auf der Flugzeugexpedition REFLEX II und der POLARSTERN-Expedition ARK IX mit dem Bordhubschrauber Vergleichsmessungen zu den SAR-Bildern aufgenommen.

Zur Auswertung der Line-Scanner-Daten werden diese radiometrisch und geometrisch korrigiert und entzerrt. Für die Klassifikation der Bilddaten werden herkömmliche Verfahren der digitalen Bildsignalverarbeitung untersucht. Die besten Ergebnisse werden jedoch mit einem neu entwickelten interaktiven Klassifikator erzielt, der auf zweidimensionalen Histogrammen aufbaut. Mit dieser Methode können anhand von Winterdaten etwa sieben Eistypen unterschieden werden. Da die Messungen im infraroten Spektralbereich im Sommer wenig zusätzliche Information zu denen des sichtbaren Spektralbereichs liefern, ist in dieser Jahreszeit die Unterscheidung auf drei Eistypen beschränkt:

Zur Unterscheidung verschiedener Eistypen im Radarbild wird neben den Rückstreuintensitäten die Textur als räumliche Variation der Rückstreuung untersucht. Diese wird durch die Momente der Verteilungsfunktion und die Texturgrößen der Co-occurrence-Matrix beschrieben. Anhand der Literatur wurden neben dem mittleren Rückstreukoeffizienten das 2. normierte Moment, das 3. zentrale Moment und die Texturgrößen Kontrast, inverses Differenzmoment und Entropie für ausführlichere Untersuchungen ausgewählt. Da die Berechnung dieser Größen homogene Bereiche voraussetzt, werden die Radarbilder mit einem aus der Literatur bekannten bereichsorientierten Segmentierungsverfahren für den Vergleich mit den Line-Scanner-Daten vorbereitet. Dieses Segmentierungsverfahren baut auf Kantendetektion und Bereichswachstum auf und vereint hierauf kleinere

Segmente zu großen homogenen Gebieten, in denen die Radarsignaturen sicher berechnet werden können.

Die Interpretation der Radarsignaturen wird anhand der klassifizierten Line-Scanner-Daten durchgeführt, indem beide Bilder so aneinander angepaßt werden, daß gleiche Gebiete auf dem Meereis in beiden Bildern gleiche Koordinaten haben. So dienen die Line-Scanner-Daten zum einen als Trainingsgebiete für einen speziell entwickelten Klassifikator für die Radardaten, zum anderen wird anhand dieser Daten ein Test bezüglich der Klassifikationssicherheit durchgeführt. Die Anwendung dieses Verfahrens auf ein kleines Gebiet von 10 km^2 , in dem eine örtliche Variation der einzelnen Eistypen ausgeschlossen ist, ergab eine Klassifikationsgenauigkeit von 97,4%. Mit dem gleichen Verfahren wurde eine Winter- und eine Sommerszene des SAR klassifiziert. Im Winter konnten mit der Unterscheidung zwischen neuem, erstjährigem und altem Eis eine Klassifikationsgenauigkeit des SAR-Bildes von 78,0% erreicht werden. Neben dem mittleren Rückstreuoeffizienten haben das 2. normierte Moment und die Texturgrößen Kontrast und inverses Differenzmoment effektiv zur Klassifikation beigetragen.

Im Sommer wurde mit der Unterscheidung von offenem Wasser, schneebedecktem Eis und Trümmereis eine Klassifikationsgenauigkeit von 73% erreicht. Eine weitere Unterteilung des schneebedeckten Eises ist mit den verwendeten Line-Scannern im Sommer nicht möglich. Die schlechte Klassifikation ist darauf zurückzuführen, daß offenes Wasser durch Seegang unterschiedliche Radarsignaturen erzeugen kann. Daß hierbei die Texturen an Bedeutung gewinnen, wird dadurch deutlich, daß das Klassifikationsergebnis der Sommerdaten ausschließlich durch Verwendung des 3. zentralen Moments und der Texturmaße Kontrast, inverses Differenzmoment und Entropie erreicht wurde; der mittlere Rückstreuoeffizient und das 2. normierte Moment waren unbedeutend.

Die erreichten Klassifikationsgenauigkeiten werden durch Angaben aus der Literatur überboten. Die dort verwendeten Verfahren stützen sich jedoch nicht auf Vergleichsmessungen, sondern auf empirisch klassifizierte Testgebiete.

Mit der vorliegenden Arbeit ist erstmals ein ausführlicher Vergleich von SAR-Daten des ERS-1 mit anderen flächendeckenden Grundmessungen durchgeführt worden.

Summary

The Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) is available as a satellite sensor for the generation of ice maps and it guarantees an almost complete coverage of the polar regions. It has, however, only a coarse spatial resolution of 25 km. To improve the dissatisfactory accuracy of the ice maps derived from SSM/I data it is necessary to carry out a hierarchical validation of data with different spatial resolution and coverage. The algorithms with which ice maps are calculated from SSM/I measurements can be improved by means of data from the Synthetic Aperture Radar (SAR) of the First European Remote Sensing Satellite (ERS-1). The present work investigates to what extent the data of the SAR may be used for the derivation of ice maps; for this purpose, new algorithms and procedures are developed.

Two line scanners were developed to record image data for this investigation, which operate as well in the visible spectral range as in the thermal infrared range. With the first operation of this combined system, validation measurements for satellite SAR images were made during the airplane expedition REFLEX II and by use of a helicopter during the POLARSTERN cruise ARK IX.

In order to analyse the line scanner data, they are corrected radiometrically and geometrically. Conventional techniques of digital image processing are investigated for the classification into different types of sea ice. However, the best results are achieved by means of a new interactive classifier which bases on two-dimensional histogrammes. By this method, about seven different types of sea ice may be distinguished on the basis of winter data. As summer measurements in the infrared spectral range only give little additional information to the data of the visible spectral range, the distinction is limited to three different types of ice during this period.

Besides the mean backscatter intensity, the texture as a spatial variation of the backscattering is investigated in order to distinguish different types of sea ice. The texture is described by the moments of the probability density function and the texture values of the co-occurrence matrix. Corresponding to the literature in addition to the mean backscatter coefficient, the 2. normalized moment, the 3. central moment and the texture values contrast, inverse difference moment and entropy were chosen for detailed investigations. As the calculation of the parameters require homogeneous areas, the radar images are prepared by a region based segmentation procedure, which is described in literature. This segmentation procedure is based on edge detection and region growing, and unifies smaller segments into larger homogeneous areas in which the radar signatures may be calculated properly.

The interpretation of the radar signatures are carried out by means of the classified line scanner data, fitting the images to each other in a way the identical

areas on the ground have identical coordinates in the images. In this way, the line scanner data serves as training areas for a specially developed classifier for the radar data, on the other hand, the reliability of the classification is tested on these data.

The use of this procedure in a small area of 10 km^2 – excluding a local variability of single ice types – resulted in a classification accuracy of 97,4%. A winter scene and a summer scene of SAR images were classified by this procedure. In winter, a classification accuracy of the SAR image of 78% was achieved with a distinction between young ice, first-year ice and old ice. Besides the mean backscatter coefficient, the 2. normalized moment, the texture values contrast, and inverse difference moment contributed effectively to the classification.

In summer, a distinction between open water, snow-covered ice and brash ice results in a classification accuracy of 73%. Further differentiation of snow-covered ice is not possible during summer with the operated line scanners. The classification accuracy may be led back to the fact that open water may show different radar signatures by different waves. It becomes obvious that the texture becomes more important as the classification result of the summer data is derived by the 3. central moment and the texture values contrast, inverse difference moment and entropy; the mean backscatter coefficient and the 2. normalized moment were insignificant.

The achieved classification accuracy is surpassed by other results from literature. The used procedures are, however, not based on validation measurements but on empirically classified test areas.

In the present work a comparison of SAR data of the ERS-1 has been carried out with other surface covering ground measurements for the first time.

Vorwort

Als Meßgerät für die Eisbedeckung des Meeres verwendet das Alfred-Wegener-Institut seit zehn Jahren einen Kameratyp, der nach dem Prinzip der zeilenweise Abtastung funktioniert. Diese Digitalkameras werden vom Hubschrauber oder Flugzeug aus eingesetzt. Zuerst wurde wegen der damals beschränkten Speicherkapazität schon während der Bildaufnahme entschieden, ob ein Bildpunkt Eis oder Wasser repräsentiert. Meine erste Arbeit mit diesen Kameras war 1989 eine Verbesserung der Line-Scan-Camera, so daß ähnlich einer Schwarzweißaufnahme 256 Graustufen unterschieden werden und mit Methoden der Bildsignalverarbeitung neben Wasser und Eis auch Neueis oder Schmelzpfützen erkannt werden können.

Um die Unterscheidung von Eistypen weiter zu verbessern entwickelte ich 1992 einen Infrared-Line-Scanner. Das Institut für Optoelektronik der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR) stellte mir hierfür einen alten Line-Scanner zur Verfügung. Hiervon konnten Chassis und Spiegeloptik noch verwendet werden, während die Elektronik komplett neu entwickelt wurde. Mit diesem neuen Line-Scanner kann vom Flugzeug aus die Oberflächentemperatur der eisbedeckten Meeresoberfläche erfaßt werden.

Während meiner Dissertation habe ich eine neue einkanalige Line-Scan-Camera für den sichtbaren Spektralbereich entwickelt, die wesentlich verkleinert und im Meßwinkel angepaßt mit dem Infrared-Line-Scanner mechanisch und elektrisch gekoppelt wurde. Der Einsatz der kombinierten Geräte fand erstmals auf den Expeditionen REFLEX II und ARK IX statt, während derer ich die Daten für diese Arbeit aufgenommen habe. Die Auswertung dieser Daten und ihre Anwendung für die Verbesserung der Meereisklassifikation aus Radarsatellitendaten wird hier ausführlich beschrieben.

Im Laufe der Arbeit an diesem Thema stellte sich heraus, daß der kombinierte Einsatz von Line-Scan-Camera und Infrared-Line-Scanner nur im Winter die Unterscheidung von Eistypen verbessern kann. Bisher ungenutzt blieben die im Sommer durch das Schmelzen des Eises verursachten unterschiedlichsten Eisfarben. Blankes und wasserbedecktes Eis schimmert blau bis türkis, algenbesetztes Eis ist braun und grün, braune Sedimente treten hervor. Der Schnee ist je nach Alter grau bis weiß. Gute Erfahrungen mit der Verbindung von Geräteentwicklung und Ausbildung veranlaßten mich dazu, parallel zu meiner Dissertation zusammen mit der Hochschule Bremen eine neue Kamera zu konstruieren, welche mehrere Kanäle im sichtbaren Spektralbereich aufnimmt. Dies führte zum kompakten Color-Line-Scanner, einer digitalen Zeilenkamera mit hoher Auflösung, die für jeden Bildpunkt die Intensität der drei Grundfarben Rot, Grün und Blau mißt. Ihren ersten Einsatz habe ich auf der Flugzeugexpedition REFLEX III im Sommer 1995 betreut. Der Color-Line-Scanner ist im Deutschen Museum

Bonn, einem Museum für zeitgenössische Technik, neben rund hundert anderen Exponaten ausgestellt.

Die Möglichkeit der Erstellung meiner Dissertation verdanke ich meinen Betreuern Prof. Dr. Peter Lemke und Prof. Dr. Gunther Krause. Besonders Herr Prof. Krause hat mich bei allen meinen Arbeiten im Alfred-Wegener-Institut uneingeschränkt unterstützt. Speziellen Dank möchte ich an Klaus Ohm, Rainer Plugge und Dr. Gereon Budéus richten, die mich in meiner Arbeit täglich anregten, kritisierten und kommentierten, mir dabei immer helfend zur Seite standen.

Dem inzwischen leider verstorbenen Dr. Thomas Viehoff als Leiter des Organisationsbüros PIPOR, Dr. René Ramseier und Dr. Stefan Bakan danke ich wegen der unkomplizierten Beschaffung der Radardaten des ERS-1. Darüber hinaus erinnere ich mich gerne daran, daß René Ramseier mich auf unseren ersten gemeinsamen Expeditionen in die interessanten Arbeiten auf dem Meereis eingeführt hat. Besonders erfreut hat mich das offene Entgegenkommen von Dr. Henning Skriver, der mir die Programme aus seiner Dissertation für die Segmentierung der Radardaten überlassen hat. Hierfür danke ich ihm.

Für die Teilnahme an REFLEX II und die freundschaftliche Atmosphäre auf dieser Expedition danke ich Dr. Christoph Kottmeier und seiner gesamten Arbeitsgruppe. Mein Dank gilt auch Dr. Caren Garrity und Dr. Saad El Naggar neben vielem anderen für ihre Zusammenarbeit während ARK IX.

Letztendlich möchte ich mich bei den Piloten der Polarflugzeuge, Horst Heller und Hans-Jürgen Berns, und der Polarhubschrauber, Uwe Lahrmann und Jürgen Büchner, bedanken, die immer geduldig und konzentriert bei den Meßflügen Höhe und Kurs gehalten haben.

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Seit den Anfängen der Polarforschung wurde der Ausdehnung der Meereisbedeckung besondere Aufmerksamkeit zugewandt. Waren die treibenden Kräfte der frühen Forschungsreisen eher wirtschaftliche Interessen [HANSEN, 1974], so verlagerten sie sich nach und nach zu wissenschaftlichen Beweggründen, die auch die ersten deutschen Polarexpeditionen ins Leben gerufen haben (1868 und 1869) [ABEL und JESSEN, 1954]. Den Kenntnisstand im Jahre 1865 über die Meereisbedeckung verdeutlicht das Vorhaben, bis zum Nordpol vorzustoßen, indem man der Strömung des Golfstromes folgt [PETERMANN, 1865]. Solche zwar einleuchtenden aber falschen Einschätzungen stellten lange Zeit für die Seefahrt in den Polargebieten eine Gefahr dar.

In jüngster Zeit sind jedoch wesentlich schwerwiegendere Probleme erkannt worden, die der Polarforschung besondere Bedeutung zumessen. Der Schwerpunkt der heutigen Untersuchungen in den Polarregionen liegt in der Klimaforschung und Abschätzung der Auswirkungen der Umweltverschmutzung. Die bedeutendsten sekundären Ursachen, die das Weltklima beeinflussen, sind die Zunahme der Konzentration von Treibhausgasen (CO_2) in der Atmosphäre und die Ausdünnung der Ozonschicht in der Stratosphäre. Während der Treibhauseffekt die langwellige terrestrische Ausstrahlung einschränkt, verursacht die Ausdünnung der Ozonschicht eine Verstärkung der kurzwelligen solaren Einstrahlung. Primäre Wirkung des gestörten Energiegleichgewichtes auf das Klima ist die Begünstigung einer globalen Erwärmung. Diese ist besonders gut an der Meereisbedeckung zu erkennen.

Die Ausdehnung und Variabilität des Meereises besitzt eine herausragende Bedeutung für die Wechselwirkungsprozesse des globalen Klimageschehens. Zum einen ist die Veränderung der Meereisbedeckung wegen des sensiblen Reagierens Vorbote von Klimaveränderungen, zum anderen ist Meereis ein wichtiges Element in den Wechselwirkungsprozessen zwischen Ozean und Atmosphäre.

Meereis ist im Vergleich zum Ozean und der Atmosphäre nur eine dünne Haut von bis zu einigen Metern Dicke, die aber immerhin in ihrer Maximalausdehnung etwa 10% der gesamten Meeresoberfläche abdeckt. In der nördlichen Hemisphäre ergeben sich jährliche maximale Ausdehnungen von 15 Millionen Quadratkilometern [PARKINSON und CAVALIERI, 1989]. Meereis ist ein schlechter Wärmeleiter und hemmt somit den Energietransport zwischen Ozean und Atmosphäre. Im Winter während der Polarnacht fällt die Energiebilanz des Ozeans durch diese Isolation negativ aus. Da die wachsende Meereisdecke einem höheren Wärmefluß, der durch die vergrößerte Temperaturdifferenz zwischen Atmosphäre und Ozean verursacht wird, entgegenwirkt, ergibt sich eine Gegenkopplung, die das wechselwirkende System stabilisiert.

Im Sommer wechselt das System Ozean–Meereis–Atmosphäre jedoch zu einer

energetischen Mitkopplung. Durch die ständig einstrahlende Sonnenenergie wird die Energiebilanz in den Polarregionen positiv. Das schneebedeckte Meereis hat gegenüber dem offenen Ozean eine etwa neunfach höhere Albedo. Änderungen in der Meereisausdehnung haben somit dramatische Folgen auf die Energiebilanz. Die geöffneten Ozeanflächen bilden zusätzliche Gebiete, in denen durch Folge reduzierter Albedo die Erwärmung vorangetrieben wird, welche wiederum die Ausdehnung des Eises reduziert. Ein solches mitgekoppeltes System reagiert äußerst sensibel auf Änderungen der Randbedingungen, wie sie zum Beispiel die Temperaturen von Ozean und Atmosphäre oder die Strahlungstransmissionseigenschaften von Atmosphäre und Stratosphäre sind. Tatsächlich zeigt eine Analyse von VINJE und KVAMBEKK [1991], daß sich in der Region Barentssee speziell zum Ende der Schmelzphase im August die mittlere Eisbedeckung in den Jahren 1966 bis 1988 um 40% reduziert hat.

Zur Förderung des Verständnisses der aufgeführten Phänomene dienen Untersuchungen, die die physikalischen Eigenschaften des Meereises zum Inhalt haben. Feldmessungen und Laborexperimente konzentrieren sich auf die Untersuchung kleinskaliger thermischer, elastischer und rheologischer Eigenschaften und der Bildungsprozesse von Meereis (zum Beispiel [HELLMANN, 1990] und [EICKEN, 1991]). Die hierbei gewonnen Erkenntnisse sind Grundlage eines konzeptionellen Verständnisses der großskaligen Prozesse [LEMKE, 1987]. Hierauf aufbauend werden numerische Modelle erstellt, die die Meereisbedeckung in den Polarregionen, die Eisdrift und das Frieren und Schmelzen des Meereises simulieren [PRELLER *et al.*, 1992]. Die quantitative Anpassung dieser dynamisch thermodynamischen Modelle an die real vorkommenden Verhältnisse und hiermit ein besseres Verständnis der großskaligen physikalischen Eigenschaften des Meereises geschieht durch empirische Parametrisierung der einzelnen Modellkomponenten.

Ein wesentliches Problem bei dieser Anpassung entsteht durch Unsicherheiten in der Erstellung von Karten der realen Eiskonzentrationen in ausreichender zeitlicher und räumlicher Abdeckung. Diese Eiskarten werden vorrangig aus Mikrowellensatellitendaten gewonnen. Die satellitengestützte Messung der vom Meereis emittierten Mikrowellenstrahlung bietet gegenüber der Messung in anderen spektralen Bereichen den Vorteil, daß sie weitgehend unabhängig von der Bewölkung und nicht auf das Tageslicht angewiesen ist. Wegen der relativ großen Wellenlänge wird die Intensität der Ausstrahlung und deren spektrale Zusammensetzung vom inneren Aufbau des Meereises mitbestimmt. Ein diesen physikalischen Effekt nutzendes System stellt der Special-Sensor-Microwave/Imager (SSM/I) dar, der auf Satelliten des amerikanischen Defense-Meteorological-Satellite-Program (DMSP) eingesetzt wird. Die Daten des SSM/I sind für den Vergleich mit den erwähnten Eisdriftmodellen besonders geeignet, da beide etwa die gleiche räumliche Auflösung besitzen und mit dem SSM/I die Polarregionen täglich flächendeckend vermessen werden. Mit den gegenwärtig vorhandenen Algorithmen zur Bestimmung der Meereiskonzentration werden jedoch noch unzureichende Genauigkeiten

erreicht. Es fehlt besonders die flächendeckende Validierung mit der wirklichen Eisbedeckung. Diese Validierung kann nicht direkt anhand von Feldmessungen durchgeführt werden, da diese punktuell stattfinden und der SSM/I eine grobe Auflösung von 25 km hat.

Die Line-Scanner des Alfred-Wegener-Instituts haben eine hohe räumliche Auflösung im Meterbereich. Vom Flugzeug oder Hubschrauber getragen werden mit ihnen große Meereisgebiete vermessen, um hochaufgelöste Karten der Eiskonzentration zu erstellen, die verschiedene Meereistypen unterscheiden. Ein Vergleich dieser Karten mit den Eiskarten, die aus den Daten des SSM/I abgeleitet werden, scheitert an den zu unterschiedlichen räumlichen Abdeckungen beziehungsweise Auflösungen. Als Übergang zwischen diesen beiden Auflösungsdimensionen werden die Daten des Synthetic-Aperture-Radar (SAR), des ersten europäischen Fernerkundungssatelliten (ERS-1), genutzt, dessen Auflösung von 30 m zwischen der des SSM/I und der der Line-Scanner liegt. Mit dieser Hierarchie wird ein lückenloser Übergang von Feldmessungen zu grob aufgelösten Eiskarten, die zum Vergleich mit Eisdriftmodellen dienen, ermöglicht.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die gründliche Auswertung von Line-Scanner-Daten bis hin zur Erstellung von klassifizierten Eiskarten und hierauf aufbauend auf die Interpretation von Radardaten des ERS-1. Die erzielten Ergebnisse können Grundlage für eine zukünftig verbesserte Validierung der SSM/I-Daten und damit auch der Eisdriftmodelle sein.

1.1 Stand der Forschung

Bezüglich der Validierung von Satellitendaten des SSM/I gibt es unterschiedliche Ansätze. Der einfachste und auch am wenigsten erfolgversprechende wäre der Vergleich der aus SSM/I-Daten berechneten Eiskarten mit Beobachtungen, die vom Schiff aus durchgeführt werden. Solche Untersuchungen werden durchgeführt, da sie praktisch auf jeder Polarexpedition mit Schiffen vorgenommen werden können. Selbst PETERSSON *et al.* [1994] stützen ihre Arbeiten teilweise auf Schiffsbeobachtungen und geben zum Beispiel an, daß der SSM/I-Algorithmus der amerikanischen NASA (National Aeronautics and Space Administration) im Vergleich zu ihren Beobachtungen 25% zu wenig Eis angibt. Zum einen kann eine Beobachtung an einem Ort nicht repräsentativ für ein Meßpunkt des SSM/I von 25 km Durchmesser sein, zum anderen wird die Schätzung der prozentualen Eisbedeckung mit einiger Entfernung vom Schiff und damit flacheren Beobachtungswinkeln wegen der Preßeisrücken und Schollenkanten unmöglich.

Es gibt zwei ausführliche Arbeiten, die sich mit einer flächendeckenden Validierung von SSM/I-Daten beschäftigen. STEFFEN und SCHWEIGER [1991] ermitteln beim Vergleich mit Daten des Landsat-Thematic Mapper (TM) Klassifikationsfehler der SSM/I-Daten je nach Eisbedeckung und Jahreszeit von 1% bis 11%.

Die Einbeziehung von Satellitendaten wie die des Landsat-TM, die den sichtbaren oder infraroten Spektralbereich für ihre Messungen nutzen, sind in den Polarregionen allerdings nur selten verfügbar, da diese Aufnahmen wolkenfreie Gebiete voraussetzen. CAVALIERI *et al.* [1991] ermittelten anhand von flugzeuggestützten Mikrowellenmessungen ähnliche Ergebnisse wie STEFFEN und SCHWEIGER. Für die flächendeckende Vermessung von neun Meßpunkten des SSM/I haben sie ein aufwendiges Meßprogramm geflogen, in dem zwölf SAR-Streifen dicht nebeneinander aufgenommen wurden. Es gibt auch neuere Arbeiten, wie zum Beispiel von CAVALIERI und ONSTOTT [1993], die eine Validierung der SSM/I-Daten mit den SAR-Bildern des ERS-1 zum Inhalt haben. Generell sind die Bilddaten des ERS-1-SAR wegen ihrer räumlichen Abdeckung von SSM/I-Messungen für diesen Vergleich auch geeignet. Die Interpretation der SAR-Daten und hiermit die Erstellung von Eiskarten zur Validierung ist jedoch noch nicht sicher genug.

Die Schwierigkeiten bei der Interpretation der Radardaten des ERS-1 liegen darin begründet, daß das SAR des ERS-1 nur mit einem Spektralbereich und einer Polarisationssebene arbeitet. Zur Deutung der verschiedenen Eistypen mit Hilfe der Rückstreuintensitäten im Radarbild sind zwar viele Untersuchungen durchgeführt worden, die ONSTOTT [1992] zusammengefaßt hat, jedoch zeigen Arbeiten von ULANDER *et al.* [1995] und BARBER *et al.* [1995], daß die Rückstreuintensitäten der einzelnen Eistypen großen Variationen unterliegen können. Beide Arbeiten zeigen Zeitserien von Eisstationen. KWOK und CUNNINGHAM [1994] können weniger zeitliche Variationen erkennen, zeigen jedoch mit der Analyse eines umfangreichen Datensatzes von SAR-Szenen des ERS-1 eine starke örtliche Variation der Radarrückstreuung von Meereis in der BEAUFORT-See.

Die experimentellen Untersuchungen der Radarrückstreuung werden auch zum Anlaß genommen, um Rückstreumodelle von Meereis zu entwickeln oder die Gültigkeit von bestehenden Modellen zu überprüfen [ULANDER *et al.*, 1995; CARLSTRÖM und ULANDER, 1995; SUN *et al.* 1992].

Als weitere Information ist in den SAR-Bildern die räumliche Variation der Rückstreuung enthalten. Diese wird von SUN *et al.* [1992] sowie KWOK und CUNNINGHAM [1994] anhand ihrer Standardabweichung untersucht. Umfassender sind jedoch die Ergebnisse der Arbeiten von SHOKR [1991] sowie NYSTUEN und GARCIA [1992], die sich mit der Untersuchung von Texturgrößen beschäftigen, die aus Co-occurrence-Matrizen abgeleitet werden. Da die Berechnung von Texturgrößen, in Form von analytischer Statistik oder von Verwendung der Co-occurrence-Matrizen, nur innerhalb von homogenen Gebieten sicher durchgeführt werden kann, entwickelte SKRIVER [1989] ein bereichsorientiertes Segmentierungsverfahren für SAR-Bilddaten und wendete die Texturanalyse auf segmentierte Radarbilder an. Mit dieser Methode gibt er für die Klassifikation von SAR-Daten des ERS-1 einen Fehler von nur $\pm 10\%$ an [SKRIVER, 1994].

Alle Arbeiten, die sich bei der Klassifikation von Radardaten auf die Texturana-

lyse stützen, haben gemeinsam, daß der Anwender anhand von Trainingsgebieten entscheidet, welche Eistypen den verschiedenen Radarsignaturen zugeordnet werden. Ein direkter Vergleich mit unabhängigen Messungen wurde bisher nur von PETERSSON *et al.* [1994] durch eine Videoaufnahme durchgeführt, von der ähnliche Bildstreifen gebildet wurden, wie sie in der vorliegenden Arbeit Verwendung finden. Der Vergleich mit den SAR-Daten des ERS-1 ist jedoch nicht zufriedenstellend, da zum einen keine genaue Klassifikation der Videodaten durchgeführt werden konnte und zum anderen die SAR-Daten nur bezüglich der Rückstreuung intensitäten ausgewertet wurden.

1.2 Line-Scanner-Systeme

Im Alfred-Wegener-Institut sind unter anderem für die Validierung von Satellitendaten Line-Scanner entwickelt worden, die sowohl im sichtbaren Spektralbereich als auch im thermischen Infrarot empfindlich sind [BOCHERT und WAMSER, 1994]. Diese Line-Scanner sind Zeilenkameras, die jeweils einzelne Bildzeilen aufnehmen, die zum Beispiel in 512 Bildpunkte unterteilt sind. Bei deren Einsatz auf einem Flugzeug oder Hubschrauber sind diese eindimensionalen Bildzeilen senkrecht zur Flugrichtung auf dem Grund ausgerichtet. Durch die Fortbewegung der Line-Scanner und die fortlaufende Aufnahme der Bildzeilen wird die zweite Bilddimension erzeugt. Durch die maximale Aufnahme von 50 Bildzeilen pro Sekunde ergibt sich zum Beispiel beim Flugzeugeinsatz (Geschwindigkeit: 70 m/s) eine Auflösung auf dem Grund von 1,5 m in Flugrichtung. Die Auflösung senkrecht zur Flugrichtung ist von der Flughöhe abhängig; durch den Blickwinkel von 90° wird zum Beispiel bei einer Flughöhe von 380 m eine Auflösung von 1,5 m erreicht.

Die einkanaleige Line-Scan-Camera [BOCHERT, 1991b] ist im Bereich des sichtbaren Spektralbereichs von 0,4 μm bis 1,1 μm empfindlich. Mit ihr kann das auf dem Untergrund reflektierte Sonnenlicht relativ gemessen werden. Der Sensor dieses Systems ist ein CCD-Element (CCD - Charge Coupled Device), das als Zeilensensor aufgebaut ist. Diese Zeile, die in der Bildebene hinter einem Linseobjektiv montiert ist, enthält 1024 einzelne Sensoren. Zur Erhöhung der Empfindlichkeit wurden für die vorliegende Arbeit die Einzelsensoren jeweils paarweise zusammengefaßt, so daß eine Auflösung von 512 Bildpunkten genutzt werden konnte. Mit der Wandlung des analogen Meßsignals in digitale Daten werden die Helligkeiten in 256 Stufen diskretisiert, so daß die Intensitäten der Bildpunkte in jeweils einem Byte gespeichert werden.

Der Infrared-Line-Scanner des Alfred-Wegener-Instituts [BOCHERT, 1992] unterscheidet sich technisch vollständig von der Line-Scan-Camera. Dies liegt an den physikalischen Erfordernissen, die an seinen Empfindlichkeitsbereich im thermischen Infrarot gekoppelt sind. Der Infrared-Line-Scanner ist für das sogenannte

obere atmosphärische Fenster im Spektralbereich von $8\ \mu\text{m}$ bis $12\ \mu\text{m}$ ausgelegt. In diesem Spektralbereich ist die Transmission der Atmosphäre ausreichend groß, um die thermische Ausstrahlung der Erdoberfläche auch von größeren Höhen aus messen zu können. Das WIENSche Verschiebungsgesetz zeigt, daß im Spektralbereich von $8\ \mu\text{m}$ bis $12\ \mu\text{m}$ die Strahlungsintensität bei Temperaturen, die für die Fernerkundung in den Polargebieten in Frage kommen, ihr Maximum hat. Beim Einsatz werden die Meßwerte der einzelnen Bildpunkte wie bei der Line-Scan-Camera in jeweils ein Byte digitalisiert, wodurch mit einem Meßbereich von 25 K eine Temperaturlösung von 0,1 K erreicht wird. Die gleichzeitige Messung der thermischen Ausstrahlung von temperierten Referenzplatten ermöglicht eine Meßgenauigkeit von etwa ± 1 K.

Die Erfassung von Temperaturbildern wird beim Infrarot-Line-Scanner mit einem einzelnen Sensorelement durchgeführt; die Abtastung erfolgt durch ein optomechanisches System. Abbildung 2.14 auf Seite 70 zeigt die Spiegeloptik des KENNEDY-Scanners, der hier zum Einsatz kommt. Durch einen rotierenden Mehrseitenspiegel wird der punktförmige Sensor zu einem Zeilensensor. Der Infrarot-Line-Scanner ist als optomechanisches System konstruiert, da in optoelektrischen Systemen eingesetzte Linsensystemen eine geringe Transmission haben und noch keine Zeilensensoren im thermischen Infrarotbereich mit der hier notwendigen Auflösung von 512 Bildpunkten entwickelt wurden. Ein Problem beim Einsatz von großen Zeilensensoren ist mit den niedrigen Betriebstemperaturen von -190°C verbunden. Auch der verwendete Sensor des Infrarot-Line-Scanners wird auf -190°C gekühlt. Für die vorliegende Untersuchung wurde er mit einem STERLING-Kühler ausgerüstet, der wegen seines geschlossenen Kühlsystems die Meßeinsätze von der Verfügbarkeit von flüssigem Stickstoff unabhängig macht.

Um die Line-Scan-Camera und den Infrarot-Line-Scanner gemeinsam einzusetzen, wurden sie mechanisch und elektrisch gekoppelt, so daß mit beiden Systemen zeitgleich die gleiche Region erfaßt wird. Ein Beispiel eines solchen Bildpaares zeigt Abbildung 3.12 auf Seite 107. Die Daten beider Spektralbereiche werden mit einem Personal-Computer erfaßt und auf einer Festplatte gespeichert. Die Archivierung erfolgt nach dem Meßflug auf Datenbändern. Das Datenerfassungsprogramm COMBSCAN [BOCHERT, 1993] ermöglicht dem Anwender während des Meßfluges Kommentare einzugeben, die zu einem Protokoll verarbeitet werden. Die Zuordnung der Kommentare zu den einzelnen Bildzeilen und Bildregionen hilft bei der Auswertung der Line-Scanner-Daten.

Die für die Vergleiche mit Satellitendaten notwendigen Navigationsdaten werden beim Einsatz im Hubschrauber direkt von einem Navigationssystem übernommen und mit den Daten der Line-Scanner gespeichert. Bei Flugzeugmissionen werden die Navigationsdaten getrennt aufgezeichnet. Dann wird für die Zuordnung der Navigationsdaten mit den Line-Scanner-Daten der Erfassungsrechner bei der Datenerfassung zeitlich mit dem Bordsystem synchronisiert.

1.3 Synthetic-Aperture-Radar des ERS-1

Im Juli 1991 startete die Europäische Raumfahrtbehörde (ESA - European Space Agency) den ersten Europäischen Fernerkundungssatelliten ERS-1 (first European Remote Sensing Satellite) auf der Rakete ARIANE 4 [ESA, 1992b und 1993]. Das wichtigste Meßgerät auf dem ERS-1 ist ein aktives Mikrowelleninstrument (AMI - Activ Microwave Instrument), mit dem unabhängig von Wolken und Sonnenlicht Bilder von der Erdoberfläche in hoher Auflösung gewonnen werden können. Ähnliche Messungen sind zuvor nur vom kurzlebigen SEASAT [FU und HOLT, 1982] im Jahre 1978 durchgeführt worden.

Neben dem AMI hat der ERS-1 als Nutzlast ein Radaraltimeter und jeweils ein Radiometer für den Infrarot- und Mikrowellenbereich. Zur Navigation auf der Umlaufbahn ist der Satellit mit Laserreflektoren ausgestattet, die von Stationen auf der Erde aus eine Lagebestimmung mit einer Genauigkeit von 0,5 m ermöglichen. Zusätzlich trägt der ERS-1 ein neuentwickeltes Mikrowellennavigationssystem.

Das aktive Mikrowelleninstrument AMI arbeitet im C-Band bei einer Frequenz von 5,3 GHz und mit einer Bandbreite von 15,44 MHz. Seine Polarisation ist sowohl beim Senden als auch beim Empfangen vertikal. Wahlweise kann das AMI als Wind-Scatterometer oder als Synthetic-Aperture-Radar (SAR) eingesetzt werden. Als SAR arbeitet es sowohl im Image-Mode als auch im Wave-Mode mit einem mittleren Meßwinkel von 23°. Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Satellitendaten wurden vom SAR des ERS-1 im Image-Mode aufgenommen. Hierbei erfaßt das SAR auf der Erde einen Streifen von 100 km Breite. Dieser Bildstreifen wird für die wissenschaftlichen Arbeiten üblicherweise in Einzelszenen von 100 km Länge unterteilt, so daß quadratische Bilder entstehen, die in beiden Bilddimensionen einen Bildpunktabstand von 12,5 m haben. Das SAR hat im Image-Mode eine Auflösung von 30 m. Wie diese Auflösung durch die Antenne mit einer Größe von 1 m × 10 m erreicht wird, ist im Abschnitt 4.1.1 auf Seite 111 ausgeführt. Dort wird auf die Funktionsweise des SAR eingegangen.

Das SAR des ERS-1 kann im Image-Mode wegen der begrenzten Energiekapazität nur 12 Minuten pro Satellitenumlauf, der etwa 100 Minuten dauert, arbeiten. Wegen der enormen Datenmengen kann der ERS-1 die SAR-Bilder nicht speichern und ist somit auf eine leistungsfähige Datenübertragung zu den Empfangsstationen angewiesen. Das SAR hat für seine Daten einen eigenen Kanal mit einer Übertragungsrate von 105 MBit/s. Wegen der fehlenden Datenspeicherung setzen die Messungen mit dem SAR voraus, daß sich der Satellit im Empfangsbereich einer Bodenstation befindet. Diese Voraussetzung ist nicht flächendeckend für die gesamte Erde gegeben.

Selbst wenn diese Voraussetzungen gegeben wären, könnten die Messungen des SAR im Image-Mode nicht alle Gebiete der Erde erreichen. Durch den sonnensyn-

chronen Umlauf des Satelliten in einer mittleren Höhe von 785 km ergibt sich eine Inklination von $98,5^\circ$. Mit der einseitigen Meßrichtung des SAR unter einem Winkel von 23° vom Nadir nach rechts ist die maximale geografische Breite der Aufnahmen in den beiden Hemisphären unsymmetrisch etwa 85°N und 80°S . Durch leichte Änderungen von Inklination und Flughöhe werden beim ERS-1 unterschiedliche Abdeckungszyklen erreicht. Beim Dreitagezyklus werden jeweils nach drei Tagen dieselben Gebiete vermessen. Diese schnelle Wiederholung ermöglicht die Untersuchung von dynamischen Prozessen, wie zum Beispiel der Bewegung von Eisgebieten mit Divergenz, Konvergenz und Rotation. Hierbei wird jedoch nur in hohen Breitengraden eine große räumliche Abdeckung erreicht. Der 35-Tagezyklus gewährleistet auch in Äquatornähe eine vollständige Abdeckung mit Messungen des SAR im Image-Mode, ist aber wegen der langen Dauer zwischen zwei Vermessungen desselben Gebiets für die Untersuchung von dynamischen Prozessen ungeeignet. Der 168-Tagezyklus sorgt für eine hohe Abdeckung mit dem Radaraltimeter des ERS-1.

Die unterschiedlichen wissenschaftlichen Arbeiten mit dem ERS-1 sind in Projektphasen gegliedert, in denen die Wiederholzyklen und Prioritäten der Messungen festgelegt sind. Die Satellitenmessungen der vorliegenden Arbeit wurden in der multidisziplinären Phase durchgeführt, die vom 14. April 1992 bis zum 15. Dezember 1993 dauerte. Die Umlaufbahn des Satelliten entsprach hierbei dem 35-Tagezyklus.

Die Bilddaten des SAR kann man von der ESA als unterschiedliche Produkte erhalten. Rohdaten werden für die Entwicklung von neuen Algorithmen zur Berechnung von Radarbildern benötigt. Für die SAR-Interferometrie, die zum Beispiel zur Erstellung von Geländemodellen dient, sind komplexe Bilddaten notwendig. Für operationelle Anwendungen, die auf schnelle Verfügbarkeit angewiesen sind, werden Daten mit einer eingeschränkten Auflösung angeboten, die dem Anwender innerhalb von 24 Stunden zur Verfügung stehen (Fast Delivery Image). Neben diesen einfach verarbeiteten Produkten werden auch geokodierte und sogar geländekorrigierte Bilddaten berechnet. Die Korrektur bezüglich der Erhebungen im Gelände setzt jedoch ein Geländemodell voraus, das zur Zeit noch nicht für alle Regionen der Erde verfügbar ist. Mit den beiden zuletzt genannten Bildprodukten sind wegen der aufwendigen Verarbeitung längere Lieferzeiten verbunden.

In der vorliegenden Arbeit wurde das PRI-Produkt (PRI - Precision Image) verarbeitet, das schnelle Verfügbarkeit und hohe Qualität in sich vereint. Das Rauschen dieser Daten ist durch die Überlagerung von drei Messungen reduziert, die einzelnen Messungen sind bezüglich der Systemfehler korrigiert. Das PRI-Produkt eignet sich besonders für wissenschaftliche Arbeiten am Meereis, da eine Geländekorrektur unnötig ist und eine Geokodierung mit Hilfe der Szenenkoordinaten selbst durchgeführt werden kann. Die Abbildungen 1.1 und 1.3 zeigen Beispiele von PRI-Bildern, die bezüglich der Aufnahmegeometrien korrigiert sind.

Die Intensitäten der einzelnen Bildpunkte werden mit einer Auflösung von 16 Bit geliefert.

1.4 Datengrundlage

Für die Verbesserung der Meereisklassifikation aus Radarsatellitendaten wurden die Line-Scanner im Jahr 1993 auf zwei Expeditionen eingesetzt. Auf der Flugzeugexpedition REFLEX II (Radiation and Eddy Flux Experiment) [KOTTMEIER *et al.*, 1993], die vom 28. Februar bis zum 25. März nördlich von Spitzbergen (78°N, 15°E) durchgeführt wurde, waren die Line-Scanner im Forschungsflugzeug POLAR 2 über einem Rolltor montiert. Im Sommer desselben Jahres wurden weitere Meßflüge in der Umgebung der North-East-Water-Polynya an der Ostküste von Grönland (80°N, 14°W) unternommen. Diese Messungen waren Bestandteil der POLARSTERN-Expedition ARK IX/2 (16. Mai bis 24. Juni) und ARK IX/3 (26. Juni bis 4. August) [HIRCHE und KATTNER, 1994], auf denen die Line-Scanner vom Hubschrauber aus eingesetzt wurden.

Die Messungen auf beiden Expeditionen wurden vom Organisationsbüro des PIPOR (Program for International Polar Oceans Research) durch die Erstellung von Katalogen der SAR-Abdeckung des ERS-1 unterstützt. Mit dieser Hilfe konnten während REFLEX II auf fünf Meßflügen insgesamt neun SAR-Szenen erfolgreich überflogen werden. Entsprechend wurden auf der Expedition ARK IX/2 während elf Meßflügen 17 Szenen und auf ARK IX/3 während sechs Flügen sieben Szenen erfaßt. Tabelle 1.1 gibt einen groben Überblick der Vergleichsmessungen. Neben dem Datum und der Bezeichnung der SAR-Szenen durch Orbit und Frame ist der Zeitpunkt der Satellitenaufnahme angegeben. Im Vergleich mit Start- und Endzeit der Line-Scanner-Messungen kann die Veränderung der Eissituation zwischen beiden Aufnahmen abgeschätzt werden. Zusätzlich ist die Breite des Line-Scanner-Bildes angegeben, die sich aus der Flughöhe während der Messungen ergibt.

Die SAR-Daten des ERS-1 wurden für die vorliegende Arbeit aus zwei unterschiedlichen ESA-Projekten zur Verfügung gestellt. Die Messungen während REFLEX II wurden durch das Projekt PP2.D2 (Use and Verification of SAR Sea Ice Images during a special Observation Period of the GSP/ARKTIS 93) und die Messungen während ARK IX durch PIP.GSP2 (PIPOR) unterstützt.

Für die Interpretation von Winterdaten wird im Abschnitt 5.4.2 das Szenario vom 12. März 1993 (Orbit: 8657, Frame: 1935) bearbeitet. Abbildung 1.1 zeigt diese Radarszene mit der Darstellung von relativen Rückstreuintensitäten. Die Abbildung umfaßt ein Gebiet von 100 km × 100 km. Die Lage dieser Satellitenaufnahme ist in Abbildung 1.2 zusammen mit dem Flugweg bei den Line-Scanner-Messungen dargestellt.

Datum	ERS-1-SAR			Line-Scanner		
	Orbit	Frame	Zeit (UTC)	Start (UTC)	Ende (UTC)	Breite /m
28. Feb.	8485	1935	12:29	13:40	15:18	4270
28. Feb.	8485	1953	12:33	13:58	15:10	4270
28. Feb.	8489	1665	19:08	13:58	15:05	4270
5. März	8561	1647	19:51	12:50	13:07	6100
10. März	8628	1953	12:15	13:44	13:52	3660
12. März	8657	1935	12:48	13:30	14:00	1830
12. März	8661	1647	19:31	13:16	13:35	1830
12. März	8661	1665	19:43	13:35	13:57	1830
19. März	8757	1953	12:32	12:13	12:23	2440
25. Mai	9721	1611	20:45	18:21	18:31	300
25. Mai	9721	1629	20:49	18:31	18:41	300
26. Mai	9731	1971	13:36	13:11	14:34	3660
28. Mai	9764	1647	20:51	18:28	19:09	3660
29. Mai	9774	1935	13:41	13:14	14:40	3660
29. Mai	9774	1953	13:45	14:04	14:18	3660
31. Mai	9807	1647	20:57	18:20	19:40	610
1. Juni	9817	1953	13:47	13:15	14:42	610
1. Juni	9817	1971	13:51	13:43	14:05	610
4. Juni	9860	1935	13:52	13:20	14:33	2440
4. Juni	9864	1647	20:31	13:10	14:33	2440
4. Juni	9864	1665	20:35	13:20	13:10	2440
7. Juni	9903	1953	13:58	13:09	13:42	2440
10. Juni	9946	1953	14:04	13:19	14:20	300
13. Juni	9993	1629	20:48	18:35	19:05	2440
13. Juni	9993	1647	20:52	18:19	19:32	2440
14. Juni	10003	1953	13:38	13:07	14:41	2440
5. Juli	10308	1647	20:57	19:33	21:08	1830
6. Juli	10318	1935	13:47	14:10	15:20	1830
6. Juli	10322	1647	20:25	14:08	15:20	1830
9. Juli	10365	1629	20:31	09:58	11:59	2440
11. Juli	10394	1629	21:08	10:40	11:25	1830
18. Juli	10490	1917	14:10	12:48	13:35	1830
27. Juli	10623	1611	21:05	09:50	10:20	1830

Tabelle 1.1: Satellitenszenen des ERS-1-SAR mit Angabe von Orbit und Frame, in denen Vergleichsmessungen mit den Line-Scannern durchgeführt wurden. Für die Line-Scanner-Messungen sind Start- und Endzeit angegeben, um die Veränderung der Eissituation zwischen den beiden Aufnahmen abschätzen zu können. Zusätzlich ist die Streifenbreite der Line-Scanner-Bilder angegeben. Die waagerechten Unterteilungen trennen die Daten der Expeditionen REFLEX II, ARK IX/2 und ARK IX/3.

Die Interpretation von Sommerdaten wird am Szenario vom 14. Juni 1993 (Orbit: 10003, Frame: 1953) vorgestellt. Die Radarszene ist in Abbildung 1.3 und die Lage dieser Aufnahme in Abbildung 1.4 wiedergegeben.

Für weiterführende Arbeiten stehen die in Tabelle 1.1 zusammengefaßten Datensätze zur Verfügung.



Abbildung 1.1: Radarbild des ERS-1 vom 12. März 1993 (Orbit: 8657, Frame: 1935, ©esa) mit einer Kantenlänge von 100 km. Das Bild hat die Ausrichtung, wie das SAR des ERS-1 es aufgenommen hat.

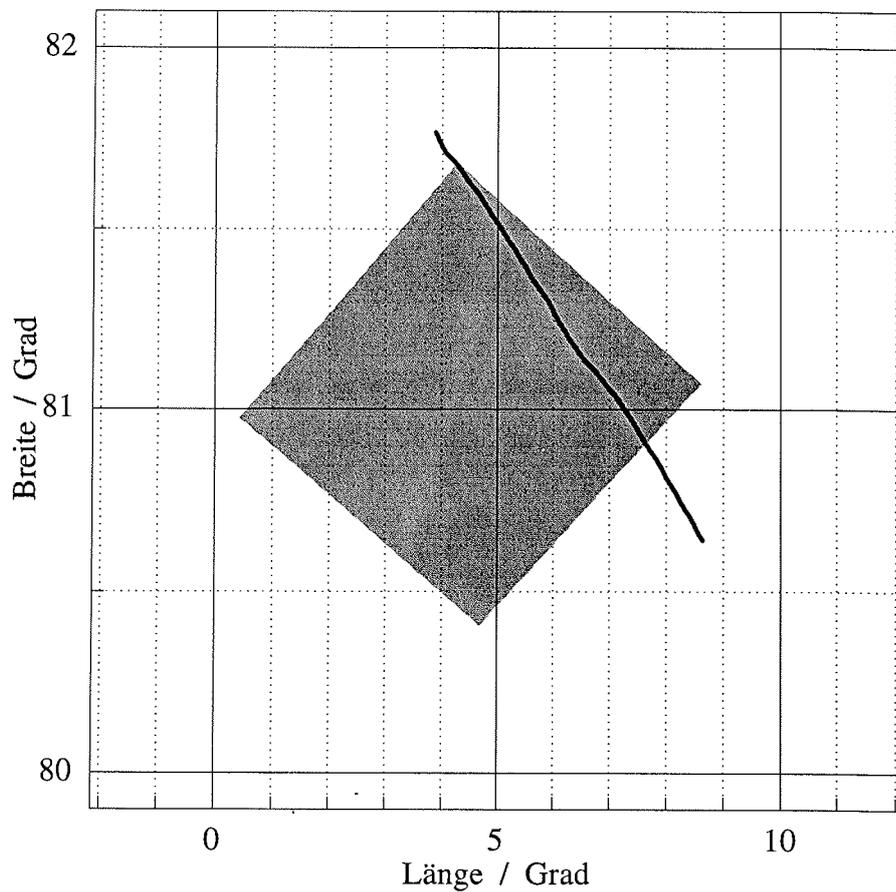


Abbildung 1.2: Lage der Radarszene der ERS-1 aus Abbildung 1.1 und Flugroute während der Vergleichsmessungen mit den Line-Scannern am 12. März 1993. Der ERS-1 flog bei der Aufnahme nach Süd-Westen. Die POLAR 2, deren Flugroute als Linie eingezeichnet ist, nahm ihre Messungen in Richtung Nord-Westen vor.

1.5 Programme zur Datenauswertung

Die Auswertprogramme, die zusammen mit der Entwicklung der beiden Line-Scanner erstellt wurden [BOCHERT, 1991a und 1992], konnten für die vorliegende Arbeit nicht genutzt werden, da mit ihnen die einzelnen Spektralbereiche nur separat bearbeiten werden können.

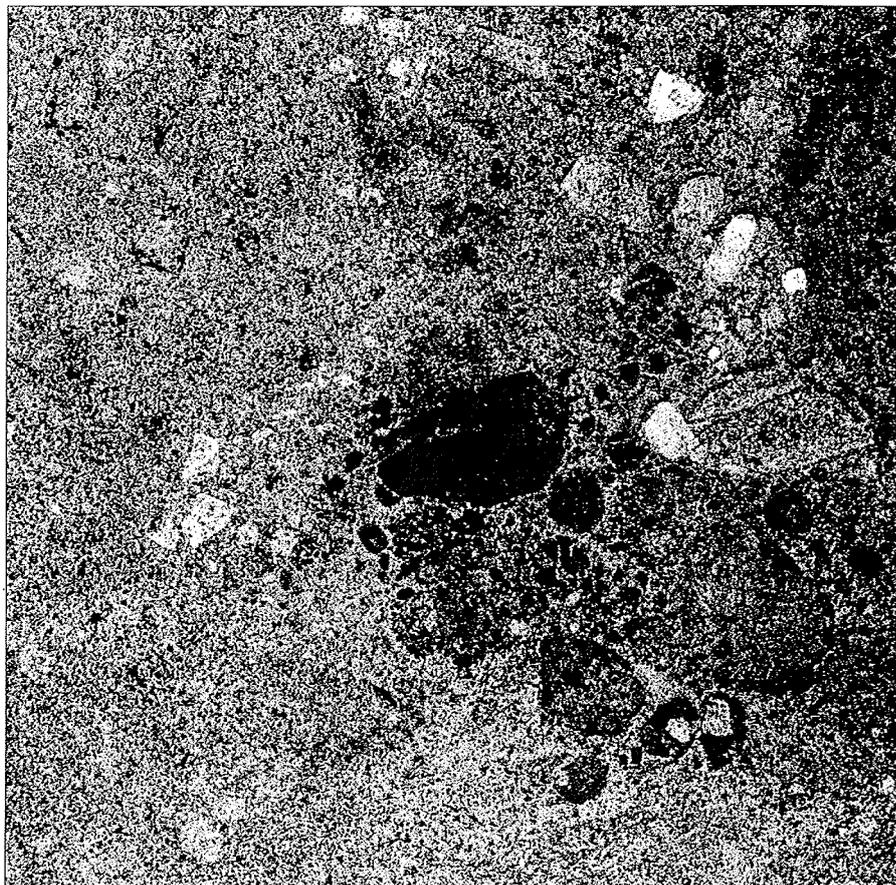


Abbildung 1.3: Radarbild des ERS-1 vom 14. Juni 1993 (Orbit: 10003, Frame: 1953, ©esa) mit einer Kantenlänge von 100 km. Das Bild hat die Ausrichtung, wie das SAR des ERS-1 es aufgenommen hat.

Mit der kombinierten Datenauswertung der Line-Scan-Camera und des Infrarot-Line-Scanners wurde die Arbeit auf eine Workstation übertragen. Hierfür wurde das Auswerteprogramm KHOROS [KHOROS GROUP, 1991] verwendet, ein universelles Bildsignalverarbeitungsprogramm, das die Integration von eigenen Routinen ermöglicht, die auf die Belange der Datenauswertung für die Line-Scanner-Systeme zugeschnitten sind. Diese Routinen werden in der Programmiersprache C geschrieben. KHOROS erleichtert die Entwicklung von komplexen Verarbeitungsstrukturen mit Hilfe der visuellen Programmierung. Im Modul CANTATA werden die einzelnen Routinen in einer Blockstruktur dargestellt, in der durch einfache Verbindungen die Signalwege und hiermit die Reihenfolge der Verarbei-

tungsschritte festgelegt wird. Es werden auch Ablaufstrukturen wie Schleifen, Verzweigungen und bedingte Ausführung unterstützt. Bei der Verarbeitung von größeren Datensätzen können die visuell erstellten Verarbeitungsstrukturen in ein Programm überführt werden.

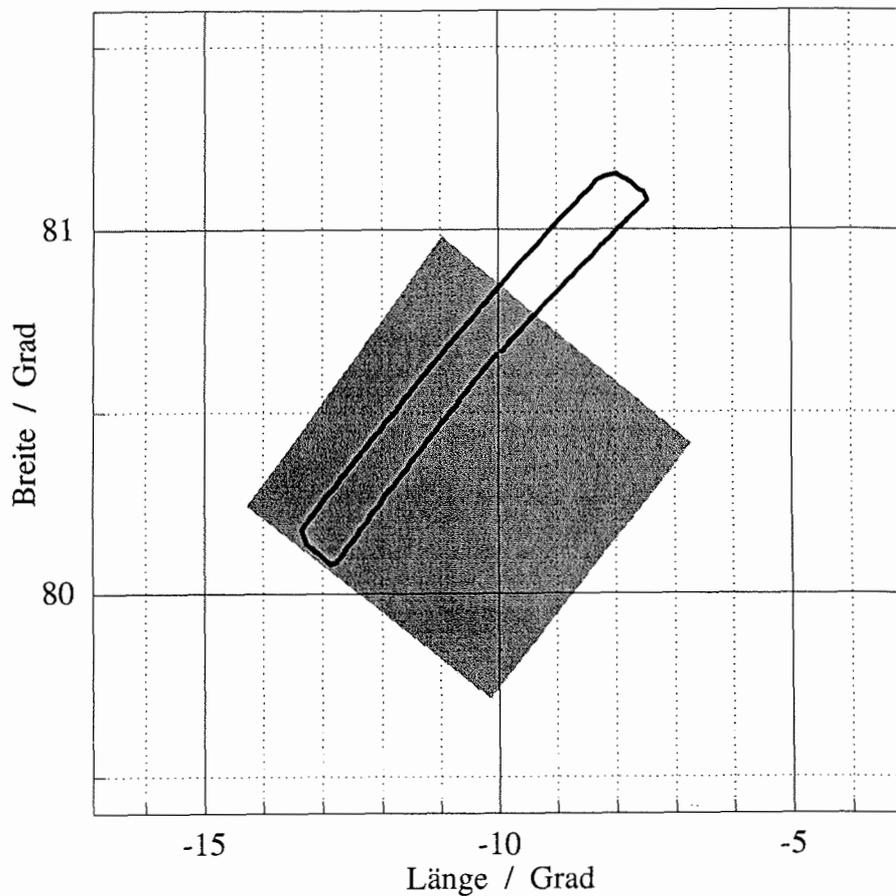


Abbildung 1.4: Lage der Radarszene der ERS-1 aus Abbildung 1.3 und Flugroute während der Vergleichsmessungen mit den Line-Scannern 14. Juni 1993. Der ERS-1 flog bei der Aufnahme nach Süd-Westen. Der Polarhubschrauber flog bei den Messungen das Quadrat mit linker Orientierung ab.

Für die Erstellung von Diagrammen wurde das von HARTMANN [1995] entwickelte Programm KYSS verwendet. KYSS stellt umfangreiche Funktionen für die Datenverarbeitung bereit und ist speziell auf die Belange der Analyse von Meßdaten aus Flugzeugkampagnen angepaßt. Eine Stärke von KYSS ist die Erstellung von

qualitativ hochwertigen Abbildungen, die auch für die vorliegende Ausarbeitung übernommen wurden.

1.6 Überblick über die Arbeit

Die Arbeit ist neben der Einleitung in vier Kapitel und einen umfangreichen Anhang gegliedert.

In Kapitel 2 werden die Verfahren vorgestellt, mit denen die Line-Scanner-Daten bezüglich ihrer zufälligen und systematischen Fehler korrigiert werden. Hierbei wird die Line-Scan-Camera und der Infrared-Line-Scanner separat bearbeitet und anschließend ihre Bilddaten geometrisch so aneinander angepaßt, daß zu jedem Bildpunkt die Information beider Spektralbereiche kombiniert vorliegt.

Aufbauend auf die korrigierten Line-Scanner-Daten werden im Kapitel 3 unterschiedliche Segmentierungs- und Klassifikationsverfahren untersucht, um ihre Eignung für die Bearbeitung der Line-Scanner-Daten zu beurteilen. Ergebnis von Kapitel 3 ist ein interaktiver Klassifikator, mit dem von den aufgenommenen Gebieten Karten mit unterschiedlichen Eistypen erstellt werden können.

Die Bearbeitung der Radardaten des ERS-1 wird in Kapitel 4 behandelt. Nach einer Einführung in die Funktion des Synthetic-Aperture-Radar werden verschiedene statistische Parameter der Bilddaten bezüglich ihrer Ergiebigkeit für die Unterscheidung der Eistypen untersucht. Die für die statistischen Berechnungen notwendigen großen Bildsegmente werden durch ein bereichsorientiertes Segmentierungsverfahren gebildet.

Die Interpretation der Radardaten wird in Kapitel 5 mit der Zusammenführung der klassifizierten Line-Scanner-Daten und segmentierten Radardaten angegangen. Ein spezielles Problem ist hierbei die räumliche Zuordnung der beiden unterschiedlichen Bilddaten. Mit dem Klassifikationsvergleich zwischen den Line-Scanner- und Radardaten wird das Ergebnis der Arbeit bewertet und hierauf aufbauend ein Ausblick auf zukünftige Arbeiten gegeben.

Der Anhang ist in vier Abschnitte* unterteilt. Anhang A gibt einen Überblick der Eistypen, die für die Fernerkundung relevant sind. Die Anwendung der neu entwickelten Routinen, die in das Bildverarbeitungsprogramm KHOROS eingebunden sind, ist im Anhang B beschrieben. Anhang C enthält die Beschreibung der von SKRIVER [1989] übernommenen Segmentierungsprogramme für die SAR-Daten. Die Programme, deren Anwendung im Anhang B beschrieben wird, sind im Anhang D enthalten.

*Die Anhänge B, C und D sind in der vorliegenden Fassung nicht enthalten.

2 Korrektur der Line-Scanner-Daten

Jede Datenerfassung ist durch mehr oder weniger Störungen beeinflusst. Bevor mit dem gesammelten Datenmaterial die vorgesehenen Analysen durchgeführt werden können, muß es von Fehlern befreit werden. Bei diesen handelt es sich sowohl um zufällige Fehler, wie zum Beispiel Bildstörungen in beiden Spektralbereichen, als auch um systematische Fehler, wie die Vignettierung im sichtbaren Spektralbereich und die geometrische Bildverzerrung im infraroten Spektralbereich.

Weiterhin soll die Temperaturkalibration der Infrarotbilder verbessert, für beide Spektralbereiche der atmosphärische Einfluß untersucht und die Bilder beider Spektralbereiche geometrisch aneinander angepaßt werden, so daß zu jedem Bildpunkt die Information beider Spektralbereiche kombiniert vorliegt.

Die Probleme der Auswertung werden verbal behandelt, um dem Leser zusammengefaßt einen Überblick zu geben. Hierauf folgend werden die einzelnen Fehlerquellen ausführlich bearbeitet und die Methoden zur Analyse und Korrektur mathematisch beschrieben. Die Ergebnisse dieser Herleitungen sind, wie im Anhang B dokumentiert, als Routinen für das Bildverarbeitungsprogramm KHOROS [KHOROS GROUP, 1991] realisiert, so daß sie für die Datenkorrektur zur Verfügung stehen. Im Anhang D sind die Programme in der Programmiersprache C enthalten, speziell in einem von KHOROS definierten Standardformat.

Die im folgenden verwendeten Formelzeichen werden im Text definiert. Durchgehend wird als $s(x, y)$ die Bildsignalfunktion beschrieben, wobei x und y die unabhängigen Vektoren im kartesischen Koordinatensystem sind. Der Vektor x ist während der Datenerfassung senkrecht zur Flugrichtung gerichtet, besteht aus diskreten Werten und beschreibt den Abstand vom linken Bildrand. Die Bildbreite und somit die Zeilenlänge oder Spaltenanzahl ist bei der vorliegenden Arbeit für beide Spektralbereiche $X = 512$. In Flugrichtung wird die zweite Bilddimension durch den Vektor y beschrieben. Die Bildhöhe, Zeilenanzahl beziehungsweise Spaltenlänge ist im allgemeinen Fall Y . Der Wert von Y ist von der Abtastgeschwindigkeit und Dauer der Datenerfassung abhängig. Einzelne Bildabschnitte werden in der Regel zu maximal $Y = 20\,000$ Zeilen zusammengefaßt. Hiervon abweichend können die Bildabschnitte jedoch zu beliebigen Spaltenlängen zusammengefügt werden.

Die Funktionswerte $s(x, y)$ liegen wie die Vektoren x und y als diskrete Werte vor. Jeder einzelne Bildpunkt beider Spektralbereiche wird während der Datenerfassung in ein Byte diskretisiert und kann somit $S = 256$ unterschiedliche Werte annehmen. Die zur Datenkorrektur erstellten Routinen können für variable Bildgrößen bezüglich X und Y verwendet werden, sind aber auf eine radiometrische Auflösung von $S = 256$, also auf den Byte-Datentyp, beschränkt.

Während der Datenerfassung werden die Daten der Line-Scan-Camera und des

Infrared-Line-Scanners in einer gemeinsamen Datei gespeichert. Für die Auswertung der Daten ist es sinnvoll, diese vor der Korrektur der Daten zu trennen. Die Routine *cs2viff* ermöglicht diese Trennung und paßt die neuen Datentypen an das KHOROS-Format (Visualisation/Image File Format – VIFF) an. Die vier Datentypen, die als Ausgabe der Routine *cs2viff* entstehen, beinhalten die Daten der Line-Scan-Camera, unkalibrierte Daten des Infrared-Line-Scanners, die Referenzmessungen für die Kalibration der Bilddaten des Infrared-Line-Scanners und optional die Daten des Global-Positioning-System (GPS), sofern sie während der Datenerfassung aufgezeichnet wurden. Auf die Anwendung der Routine *cs2viff* wird im Anhang B.1.1 eingegangen. Das Ergebnis dieser Routine ist Ausgangsmaterial für die im folgenden beschriebene Bearbeitung.

2.1 Line-Scan-Camera (LSC)

Bei den Störungen der Bilddaten des sichtbaren Spektralbereichs handelt es sich um Streifen, die durch einen Fehler in der Takterzeugung entstanden. Durch diesen Fehler wird die Integrationszeit des CCD-Sensors (Charge Coupled Device) zwischen zwei bestimmten Größen variiert. Selten verursacht diese Störung auch, daß die Integrationszeit etwa verdoppelt wird. Darüber hinaus ist die Bildsignalthöhe durch die Vignettierung der Optik und Empfindlichkeitsvariationen entlang der Sensorzeile beeinflusst. Des weiteren werden winkelabhängige Reflektivitätsvariationen in der Szene, Beleuchtungsschwankungen entlang der Flugabschnitte und der Einfluß der atmosphärischen Extinktion behandelt, die spezifisch für die hier angewandte Meßmethode sind. Die einzelnen Bildstörungen und -verfälschungen werden im folgenden genauer beschrieben, um somit die Grundlage zum Algorithmenentwurf für deren Behebung zu liefern.

Gestörte Bildzeilen. Mit den gestörten Bildzeilen sind zum Beispiel einzelne Zeilen gemeint, deren Intensitäten etwa das Doppelte der Nachbarzeilen ausmachen. Dieses ruft auch hervor, daß diese Zeilen teilweise oder komplett übersteuert sind, also einen Wert von 255 aufweisen. Seltener kommen gestörte Zeilen vor, deren Intensitäten geringer als die der umgebenden sind.

Bei der Behebung dieser Störungen bieten sich nach JÄHNE [1989] nichtlineare Filter an, da lineare verschiebungsinvariante Filter die Wellenzahlkomponenten, die über das gesamte Bild verteilt sind, mit einem Faktor versehen und somit keine Unterscheidung zwischen Bildstörung und Bildstruktur möglich ist. Es ist im vorliegenden Fall sogar sinnvoll, einen empirischen Filter einzusetzen, da die Bildstörungen durch ihre eindimensionale Ausdehnung leicht zu detektieren sind. Hierbei kann sichergestellt werden, daß ausschließlich die fehlerhaften Bildzeilen korrigiert werden und die übrigen Bildinformationen unbeeinflusst bleiben.

Zur Behebung dieser Fehler sollen die fehlerhaften Bildzeilen durch die vorhergehende korrekte Bildzeile vollständig ersetzt werden. Es darf keine Mittelung

mehrerer benachbarter Bildzeilen erfolgen, da hierdurch die nachfolgende Korrektur, der Intensitätssprünge in Flugrichtung (siehe unten) eingeschränkt würde.

Intensitätssprünge in Flugrichtung. Die Intensitätssprünge haben die gleiche Ursache wie die Bildzeilenstörungen. Hierbei variiert jedoch die Integrationszeit nur sehr gering, so daß die sichere Erkennung der gestörten Bildbereiche schwer ist. Im Abstand von einer bis etwa zehn Bildzeilen wechselt ihre Helligkeit zwischen zwei Intensitäten. Im Mittel kommen beide Intensitäten gleich häufig vor, so daß willkürlich entschieden werden kann, welche Bildbereiche als gestört angesehen und später angeglichen werden sollen. Aus dem oben genannten Grund soll auch bei der Behebung dieser Störungen ein nichtlinearer empirischer Filter eingesetzt werden. Um den Wertebereich auszunutzen, sollen die Bildbereiche mit den geringeren Intensitäten durch geeignete Skalierung denen mit den höheren Intensitäten angeglichen werden.

Intensitätsvariationen in der Bildzeile. Die bisher genannten Störungen wurden durch technisch bedingte Fehler verursacht und können durch Verbesserung der Line-Scan-Camera in Zukunft vermieden werden. Die im folgenden behandelten Probleme sind, außer dem Einfluß durch Vereisung der Optik, nicht vollständig zu lösen, die Korrekturen können die Fehler jedoch deutlich verringern. Der Fehler ist, daß die Zuordnung einer bestimmten Signalintensität zu den aufgezeichneten Werten entlang der Bildzeilen variiert. Dieses bedeutet, daß gleiche Helligkeitsintensitäten, die in der aufgenommenen Szene an unterschiedlichen Stellen auftreten, im digitalisierten Bild nicht den gleichen Wert aufweisen.

Wie schon angedeutet, nimmt bei den Ursachen eine eventuelle Vereisung der Kamera eine Sonderstellung ein. Durch die lokale Vereisung der Frontlinse wird die Transmission in Bereichen der Bildzeile verringert und zusätzlich die Bildschärfe herabgesetzt.

Ein wesentlicher Einfluß ist die Vignettierung, durch die der Bildrand abgeschattet wird. Bei großem Aufnahmewinkel von etwa 90° , wie er bei der vorliegenden Arbeit verwendet wurde, kann die Vignettierung nicht über alle Blendeneinstellungen durch korrigierende Objektive ausgeglichen werden. Die Vignettierung vergrößert sich mit der Blende. Da bei der Datenerfassung die Blendeneinstellung nicht erfaßt wird und außerdem keine die Vignettierung betreffende Daten über das Objektiv verfügbar sind, kann der Einfluß nicht analytisch erfaßt werden und muß somit aus den Bilddaten abgeleitet werden.

In Bezug auf die Elektronik wird hier nicht näher auf das Verstärker- und Quantisierungsrauschen eingegangen, da diese zufälligen Ursprungs und somit nur durch Mittelwertbildung (Tiefpaß) zu beheben sind. Es sollen aber Fehler des CCD-Sensors betrachtet und untersucht werden, inwieweit eine Korrektur dieser Fehler möglich und nötig ist. Diese Fehler sind insbesondere der Dunkelstrom, Empfindlichkeitsschwankungen, Linearitätsfehler und die Transportineffektivität. Der Dunkelstrom führt sowohl in den Sensor- als auch in den Transportregisterzellen

zur additiven Anhäufung von Ladung. Die Empfindlichkeitsschwankungen unter den einzelnen Sensorelementen werden durch unregelmäßige Herstellung hervorgerufen. Dieses sind im wesentlichen die unterschiedlichen Abmessungen der empfindlichen Flächen für die Bildpunkte und Variationen in der Dotierung des Halbleitermaterials, das als Fotoleiter entsprechend der einfallenden Photonen Ladungspakete abbaut, deren Ladung dann die Strahlungsintensität repräsentiert. Führt dieser Abbau in Sättigung, so entstehen Linearitätsfehler. Es sei aber an dieser Stelle schon angeführt, daß die Dimensionierung moderner CCD-Sensoren so bemessen ist, daß dieser Effekt nicht merkbar auftritt. Die Transportineffektivität bezeichnet die unvollkommene Weiterleitung der Ladungsträger in den Anlogschieberegistern. Dieses sind die Ladungsträgerhaftung in den Registerzellen, Ladungsträgerdiffusion aus den Registerzellen und Drift durch Potentiale benachbarter Elektroden. Durch die Transportineffektivität wird das Übertragungsverhalten des CCD-Sensors verschlechtert.

Neben den bisher angeführten Problemen, die technischer Natur sind, wirkt sich auch die winkelabhängige Reflektivität der Schnee-, Eis- und Wasseroberflächen auf die Datenerfassung aus. Hier kann zwischen dem Einfluß des Aufnahmewinkels und des Einstrahlwinkels (Sonnenstand) unterschieden werden.

Die eingeschränkte Transmission der Atmosphäre wird durch Extinktion an Molekülen und Aerosolen hervorgerufen. Bei den hier benutzten Meßwinkeln von 90° legt die Strahlung der Bildpunkte am Bildrand gegenüber der der mittleren Bildpunkte den $\sqrt{2}$ -fachen Weg durch die Atmosphäre zurück.

Beleuchtungsschwankungen in Flugrichtung. Bilddaten, die mit Line-Scannern aufgenommen werden, repräsentieren keine Momentaufnahme. Mit einer Zeit von 20 ms zwischen der Aufnahme aufeinander folgender Bildzeilen wird ein Bildabschnitt von 20 000 Zeilen innerhalb 6,7 Minuten aufgenommen. Die Beleuchtung der Szene schwankt zeitlich und zudem räumlich durch Veränderung der Bewölkung und des Sonnenstands. Ergebnis dieses Einflusses ist, daß die Helligkeit der erfaßten Bilder selbst bei der Aufnahme von homogenen Gebieten in Flugrichtung schwankt.

Es kann nicht im gleichen Sinn wie bei der Behandlung der Intensitätsvariationen in der Bildzeile von fehlender Monotonie gesprochen werden, denn dieses würde bedeuten, daß die Empfindlichkeit der Line-Scan-Camera schwankt, was prinzipiell nicht auszuschließen wäre. Im vorliegenden Fall variiert jedoch die Strahlungsintensität in der Szene. Für die Unterscheidung von Eistypen ist primär nicht die Helligkeit, sondern die Reflektivität von Bedeutung. Die Datenerfassung ist in Bezug auf die Reflektivität nicht monoton. Ziel ist es, die Intensitätsvariationen, die aus Beleuchtungsveränderungen resultieren, bei der Datenverarbeitung auszugleichen.

Die Funktionswerte $s(x, y)$ repräsentieren bei den Bilddaten der Line-Scan-Camera die Strahlungsintensität im Spektralbereich von $\lambda = 0,4 \mu\text{m}$ bis $\lambda = 1,1 \mu\text{m}$

mit einer Gewichtung entsprechend der spektralen Empfindlichkeit des Sensors. Es handelt sich um eine relative Messung, so daß nur das Verhältnis von Bildpunktintensitäten zueinander behandelt werden kann. Eine absolute Messung der Strahlungsintensität ist nicht möglich, da die Line-Scan-Camera nicht kalibriert und zudem die Blendeneinstellung während der Datenerfassung nicht registriert wird.

2.1.1 Elimination gestörter Bildzeilen

Die Elimination gestörter Bildzeilen kann in zwei Aufgaben unterteilt werden. Erst muß festgestellt werden, ob eine Bildzeile gestört ist und dann muß der Fehler behoben werden. Im vorliegenden Fall liegt das Problem in der Detektion der gestörten Zeilen. Ist ein Fehler gefunden, so wird die entsprechende Zeile durch die in Flugrichtung vorhergehende komplett ersetzt.

Im allgemeinen treten speziell bei Bildern, die mit CCD-Kameras aufgenommen werden, gestörte Bildzeilen auf, die entweder ganz weiß oder schwarz sind oder ein zufälliges Grauwertmuster aufweisen. Die Detektion solcher Bildzeilen wird mit Hilfe der Korrelation von aufeinanderfolgenden Bildzeilen durchgeführt. Bei Bildern aus der Fernerkundung ist der Übergang der Grauwerte von einer Bildzeile zur nächsten in der Regel nicht allzu abrupt. Der Korrelationskoeffizient ist also zwischen benachbarten, ungestörten Bildzeilen relativ groß. Dagegen ist er bei einer korrekten und einer gestörten Bildzeile klein.

Der Korrelationskoeffizient $r_{y,y+1}$ ist eine normierte Größe; er berechnet sich aus der Kovarianz $v_{y,y+1}$ zwischen den Bildzeilen y und $y + 1$ und den Streuungen $v_{y,y}$ und $v_{y+1,y+1}$ der Einzelzeilen.

$$r_{y,y+1} = \frac{v_{y,y+1}}{\sqrt{v_{y,y}v_{y+1,y+1}}} \quad (2.1)$$

Die Kovarianz bzw. Streuungen berechnen sich nach

$$v_{y,y+1} = \frac{1}{X} \sum_{x=0}^{X-1} (s(x,y) - m_y)(s(x,y+1) - m_{y+1}). \quad (2.2)$$

Hierbei ist $s(x,y)$ die Intensitätsfunktion der Bilddaten, in den Dimensionen x und y , wobei x vertikal zur Flugrichtung ausgerichtet ist und aus X Abtastwerten besteht. Die Mittelwerte einzelner Bildzeilen sind durch m_y bzw. m_{y+1} gegeben.

Die Werte des Korrelationskoeffizienten liegen zwischen 1 und -1. Je stärker die betreffenden Bildzeilen gleichsinnig korreliert sind, um so höher liegt dieser Wert. Bei der Anwendung muß ein Schwellwert gefunden werden, bei dessen Unterschreitung die Bildzeilen als gestört erkannt werden.

Bei der Bestimmung dieses Schwellwertes für die LSC-Daten gab es Schwierigkeiten, da die Störungen teilweise eine Verdoppelung der Intensitäten hervorrufen. Die Normierung auf die mittleren Intensitäten der Bildzeilen in Gleichung (2.2) verringert diesen gravierenden Unterschied. Andererseits konnte der Schwellwert nicht zu hoch gesetzt werden, da speziell in der Fernerkundung von Meereis aufeinanderfolgende Bildzeile sich relativ stark voneinander unterscheiden können.

Für die sichere Detektion gestörter Bildzeilen wurden zusätzliche Kriterien entwickelt, die, wegen des hohen Rechenaufwandes bei der Bestimmung der Korrelationskoeffizienten, die oben erwähnte Methode vollständig ersetzen. Gleichung (2.1) wurde angegeben, damit beim Auftreten weiterer Zeilenstörungen auf diese Methode zurückgegriffen werden kann. Hierbei würde sie mit einem relativ geringen Schwellwert ein zusätzliches Kriterium zu den im folgenden erklärten bilden.

Nach dieser besseren Methode werden zur Bestimmung einer gestörten Bildzeile für diese drei quantitative Werte berechnet. Diese Werte werden mit Schwellwerten T verglichen, wobei jeder Vergleich ein Kriterium bildet, nach dem entschieden wird, ob die betreffende Bildzeile gestört ist. Ist die boolsche Variable $C = 1$, so liegt eine gestörte Zeile vor. C bildet sich aus den Einzelkriterien C_1 , C_2 und C_3 .

$$C(y) = C_1(y) \vee C_2(y) \vee C_3(y) \quad (2.3)$$

Mit m_{y-1} , m_y und m_{y+1} als entsprechende Zeilenmittelwerte ergibt C_1 einen absoluten Vergleich benachbarter Bildzeilen:

$$\begin{aligned} C_1(y) &= 1 && \text{wenn} && (m_y - m_{y-1})(m_y - m_{y+1}) > T_{MLO} \\ C_1(y) &= 0 && \text{sonst.} && \end{aligned} \quad (2.4)$$

Ein relativer Vergleich ergibt:

$$\begin{aligned} C_2(y) &= 1 && \text{wenn} && \frac{(m_y - m_{y-1})(m_y - m_{y+1})}{m_{y-1}m_{y+1}} > T_{MRO} \\ C_2(y) &= 0 && \text{sonst.} && \end{aligned} \quad (2.5)$$

Hierbei sind T_{MLO} und T_{MRO} Schwellwerte, die für den speziellen Fall angegeben werden müssen. Die Indizes MLO und MRO bedeuten „Maximum Line Offset“ bzw. „Maximum Relativ Offset“.

$C_3(y)$ wird 1, wenn die Anzahl der Bildpunkte, die den Maximalwert $s(x, y) = 255$ erreichen, größer als der Schwellwert T_{MO} ist, wobei die Bildpunkte der Nachbarzeilen ungleich dem Maximalwert $s(x, y - 1) \neq 255$ und $s(x, y + 1) \neq 255$ sein müssen. T_{MO} muß auch vorgegeben werden, wobei MO „Maximum Overflow“ bedeutet. Mit OV als Anzahl dieser Übersteuerungen ergibt sich somit,

$$\begin{aligned} C_3(y) &= 1 && \text{wenn} && OV > T_{MO} \\ C_3(y) &= 0 && \text{sonst.} && \end{aligned} \quad (2.6)$$

Für den vorliegenden Datensatz wurden die Schwellwerte T_{MLO} , T_{MRO} und T_{MO} bestimmt und bei der Korrekturroutine *vlincorr*, auf die in Anhang B.2.1 eingegangen wird, als Defaultwerte vorgesehen. Soll hiervon abgewichen werden, so können diese Schwellwerte in einem vorgegebenen Bereich variiert werden.

$$\begin{aligned} T_{MLO} &= 45 && 0 \leq T_{MLO} \leq 255 \\ T_{MRO} &= 0,5 && 0 \leq T_{MRO} \leq 2 \\ T_{MO} &= 0,4 && 0 \leq T_{MO} \leq 1 \end{aligned} \quad (2.7)$$

Bei der Bestimmung der Schwellwerte kann die Routine *vlincerr* verwendet werden (siehe Anhang B.2.2), die als Ausgabe für jede Bildzeile die Vergleichswerte liefert, die in den Gleichungen (2.4) bis (2.6) benötigt werden. Zur besseren Darstellung werden nur die positiven Werte ausgegeben.

2.1.2 Beseitigung der Intensitätssprünge

Im Vorspann dieses Abschnittes wurde schon erwähnt, daß die Intensitätssprünge durch einen Fehler bei der Erzeugung der Integrationszeit für den CCD-Sensor verursacht werden. Im ersten Schritt muß erkannt werden, welche Zeilen mit einer kürzeren Integrationszeit erfaßt wurden. Nachfolgend müssen die einzelnen Bildpunkte dieser Zeilen so verstärkt werden, daß sie denen aus den Zeilen, mit längeren Integrationszeiten entsprechen. Die Funktion für diese Korrektur, deren Herleitung in Abbildung 2.1 dargestellt ist, hat neben einem Linearfaktor auch einen Offset, der sich durch eine Verkürzung der Integrationszeit nicht erklären läßt. Da zur Zeit der Algorithmenerstellung die Line-Scan-Camera nicht verfügbar war, konnte diese Unstimmigkeit nicht geklärt werden.

Die Bildzeilen, die eine geringere Intensität aufweisen, werden im folgenden als fehlerhafte Bildzeilen bezeichnet. Um diese zu erkennen, wurde die Routine *vsum* geschrieben, die unter anderem die Intensitäten der einzelnen Bildzeilen summiert. Die Zeilenintensitäten sind somit

$$i(y) = \sum_{x=0}^{X-1} s(x, y). \quad (2.8)$$

An den absoluten Werten von $i(y)$ sind die fehlerhaften Bildzeilen nicht zu erkennen. Man kann nur die Intensitätssprünge erkennen, bei denen zwischen unterschiedlichen Belichtungszeiten gewechselt wurde. Im allgemeinen konnten die fehlerhaften Bildzeilen detektiert werden, indem das Signal $i(y)$ mit der tiefpaßgefilterten Zeilensumme verglichen wurde. Eine Bildzeile wurde als fehlerhaft angesehen, wenn

$$i(y) < \frac{1}{7} \sum_{z=-3}^3 i(y-z). \quad (2.9)$$

Schwierigkeiten traten hierbei auf, wenn lineare Bildstrukturen senkrecht zur Flugrichtung aufgenommen wurden. Bei einem Übergang von einem hellen zu einem dunklen Bereich, wurden die Grenzbereiche auf der hellen Seite immer als korrekt und auf der dunklen Seite immer als fehlerhaft interpretiert.

Bei diesen Arbeiten wurde jedoch ein Zusammenhang erkannt, der sich als hilfreiches Kriterium für die Erkennung von fehlerhaften Bildzeilen erwiesen hat. Durch die fehlerhafte Taktsteuerung ist in den Bildern die linke ($x = 0$) oder rechte ($x = X - 1$) Spalte fehlerhaft. Neben den Intensitäten in Größenordnung der umgebenen Bildpunkte treten hier Bildpunkte auf, die entweder den Wert Null oder nur etwa 75% der umgebenen Bildintensitäten aufweisen. Es wird hierbei immer ein Vergleich mit dem benachbarten Bildpunkt der selben Zeile durchgeführt. Der linke Bildrand ist ausschlaggebend, wenn

$$\sum_{y=0}^{Y-1} |s(0, y) - s(1, y)| > \sum_{y=0}^{Y-1} |s(X-1, y) - s(X-2, y)|. \quad (2.10)$$

Sonst wird der rechte Bildrand zur Detektion der fehlerhaften Bildzeilen untersucht. Ist die boolsche Variable $C = 1$, so liegt eine gestörte Zeile vor. C bildet sich aus den Einzelkriterien C_1 und C_2 .

$$C(y) = C_1(y) \wedge C_2(y) \quad (2.11)$$

Zur Ermittlung von C_1 und C_2 muß nun wegen der unterschiedlichen Anordnung der Bildpunkte differenziert werden:

Linker Bildrand: Ist nach Gleichung (2.10) der linke Term größer, so muß der linke Bildrand untersucht werden:

$$\begin{aligned}
C_1(y) &= 0 && \text{wenn} && s(0, y) = 0 \\
C_1(y) &= 1 && \text{sonst.} && \\
\end{aligned} \tag{2.12}$$

Ist $C_1(y) = 1$, so nimmt der in Gleichung (2.13) zu bildende Quotient einen bestimmten Wert an. Es kann fortgefahren werden mit:

$$\begin{aligned}
C_2(y) &= 1 && \text{wenn} && \frac{s(1, y)}{s(0, y)} < T \\
C_2(y) &= 0 && \text{sonst.} && \\
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Rechter Bildrand: Ist nach Gleichung (2.10) der rechte Term größer, so wird der rechte Bildrand untersucht:

$$\begin{aligned}
C_1(y) &= 0 && \text{wenn} && s(X - 1, y) = 0 \\
C_1(y) &= 1 && \text{sonst.} && \\
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Ist $C_1(y) = 1$, so kann fortgefahren werden mit:

$$\begin{aligned}
C_2(y) &= 1 && \text{wenn} && \frac{s(X - 2, y)}{s(X - 1, y)} < T \\
C_2(y) &= 0 && \text{sonst.} && \\
\end{aligned} \tag{2.15}$$

Der Schwellwert T wurde für einen Beispieldatensatz bestimmt und bei der Routine *vbricorr*, mit der die fehlerhaften Bildzeilen korrigiert werden, als Defaultwert vorgesehen. Soll hiervon bei späteren Analysen abgewichen werden, so kann er in einem vorgegebenen Bereich variiert werden.

$$T = 0,75 \qquad 0 \leq T \leq 1 \tag{2.16}$$

Nachdem durch Gleichung (2.11) nun beschrieben ist, welche Bildzeilen fehlerhaft sind, können die einzelnen Bildpunkte dieser Zeilen nach Gleichung (2.17) korrigiert werden.

$$s(x, y) = a_1 s^*(x, y) + a_0 \quad (2.17)$$

Hierbei bezeichnet $s^*(x, y)$ die fehlerhaften Bilddaten und $s(x, y)$ das bezüglich der Intensitätssprünge korrigierte Bild. Durch die Koeffizienten a_1 und a_0 wird die fehlerhafte Bildzeilenaufnahme ausgeglichen. In Abbildung 2.1 wird verdeutlicht, wie diese Koeffizienten ermittelt werden. Auf der Abszisse sind die Bildpunktintensitäten der fehlerhaften Zeilen aufgetragen. Hierbei kommen nur Bildzeilen in Betracht, die eine Bildzeile mit korrekter Intensität als Nachbarn haben. Die Differenz δ bezeichnet die absolute Intensitätsdifferenz der einzelnen fehlerhaften Bildpunkte zu ihrem direkten Nachbarn der vorangehenden korrekten Nachbarzeile.

Im Konturdiagramm sind normiert die Auftrittshäufigkeiten der Differenz δ zu den Intensitäten s^* aufgetragen. Die große Streuung wird dadurch verursacht, daß neben den Intensitätsvariationen durch fehlerhafte Zeilen auch Bildstrukturen die Differenz δ bestimmen. Andererseits wird durch diese Bildstrukturen erst die Abhängigkeit von δ bezüglich s^* deutlich, da hierdurch erst s^* variiert wird. Der Beispieldatensatz, aus dem Abbildung 2.1 berechnet wurde, bestand aus einem aufgelockerten Schollenmosaik mit kleiner Schollengröße. Die dominante Stelle um $s^* = 75$ enthält Wasserstellen, und der Bereich um $s^* = 180$ wurde aus den Eisschollen gebildet.

Im Beispiel wurde durch lineare Regression die Abhängigkeit der Variablen δ und s^* ermittelt.

$$\delta = 0,01 s^* + 1 \quad (2.18)$$

Für die Koeffizienten aus Gleichung 2.17 ergibt sich somit $a_1 = 1,01$ und $a_0 = 1$. Mit dieser Kenntnis wurde das Beispielbild, aus dem die Koeffizienten abgeleitet wurden, korrigiert, wobei nach der Korrektur auf keine Weise, sowohl im Original als auch mit Hilfe lokaler Spreizungen des Grauerthistoramms oder Zeilensumation, die Fehler durch die Integrationszeitvariation lokalisiert werden konnte.

Die automatische Ermittlung der Korrekturfunktion erweist sich als problematisch, wenn die Variation der Intensität s^* gering ist und die Differenz δ wesentlich durch Bildstrukturen bestimmt wird. Dieser Sachverhalt wird deutlich, wenn man in Abbildung 2.1 den Anteil, der durch Wasser entstanden ist, nicht berücksichtigt. Die Steigung der Korrekturfunktion würde sich erhöhen und der Offset negativ werden, so daß eine nachfolgende Korrektur keinen Erfolg bringt.

Die Untersuchungen unterschiedlicher Bilddaten ergaben annähernd die Koeffizienten aus Gleichung (2.18), so daß auf eine automatische Ermittlung der Korrekturfunktion bei der Datenverarbeitung verzichtet werden kann. In der Prozedur *vbricorr* werden die fehlerhaften Bildzeilen nach Gleichung (2.17) korrigiert, wobei die Koeffizienten, die sich nach Gleichung (2.18) ergeben, als Defaultwerte

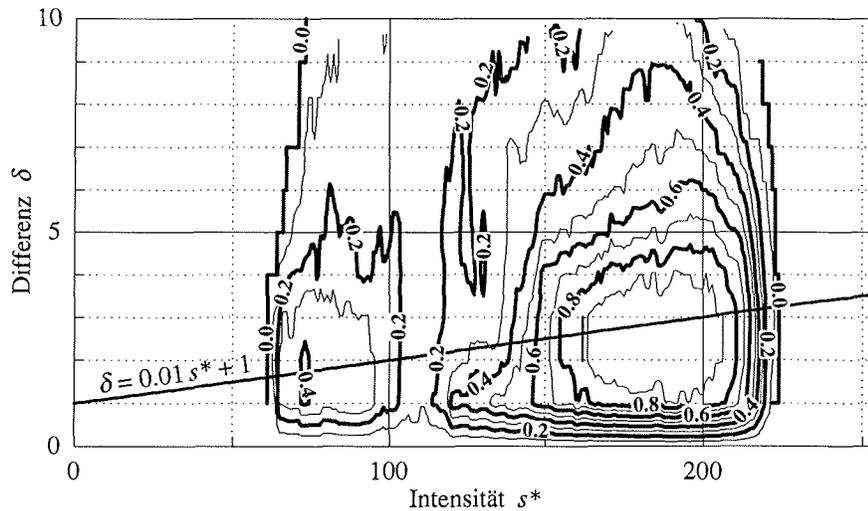


Abbildung 2.1: Konturdiagramm zur Ermittlung der Korrekturfunktion $\delta = f(s^*)$ für die Behebung der Intensitätssprünge (Daten aus cs031213.16c).

vorgegeben sind. Soll hiervon abgewichen werden, so sind begrenzte Variationen möglich.

$$\begin{array}{ll} a_1 = 1,01 & 0 \leq a_1 \leq 10 \\ a_0 = 1 & 0 \leq a_0 \leq 255 \end{array} \quad (2.19)$$

Bei einer neuen Bestimmung der Koeffizienten steht die Prozedur *vbrivar* zur Verfügung, die auch bei der Bestimmung der Defaultwerte verwendet wurde. Sie berechnet die Daten zur Erstellung des Konturdiagramms aus Abbildung 2.1.

2.1.3 Behebung der Intensitätsvariationen in der Bildzeile

Zur Korrektur der Bilddaten bezüglich der Intensitätsvariationen in der Bildzeile wird zuerst auf den Einfluß durch den CCD-Sensor eingegangen. Hierauf folgend werden die Einflüsse durch die Optik und durch die Reflektivitätsvariationen in der Szene behandelt.

Die Transportineffektivität des verwendeten CCD-Sensors TH7802A beträgt typisch $E = 2 \cdot 10^{-5}$ [THOMSON, 1992]. Die Auswirkung der Transportineffektivität läßt sich abschätzen, indem man annimmt, daß nur ein Bildpunkt, der durch das gesamte Analogschieberegister transportiert werden muß, so beleuchtet wird,

daß er gerade den Maximalwert $s = 255$ angenommen hat und die umgebenen Bildpunkte dunkel sind. Der Bildpunkt hat in diesem einfachen Fall nach dem Auslesen (s^*) eine Intensität von

$$s^* = (1 - E)^n s = (1 - 2 \cdot 10^{-5})^{1024} 255 = 250, \quad (2.20)$$

wobei n die Elementanzahl des CCD-Sensors beschreibt. Diese große Verfälschung tritt jedoch nur bei maximalem Kontrast auf. Aber gerade wegen der Abhängigkeit vom Kontrast und nicht von der absoluten Intensität, soll dieser Fehler losgelöst von anderen Faktoren betrachtet werden. Durch die Korrektur wird der Verfälschung des Kontrasts entgegengearbeitet.

Nach GRASS [1986] kann der Ladungstransport in Analogschieberegistern allgemein durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$Q^*(n) = \sum_{x=0}^{n-1} \binom{n-1}{x} Q(n-x)(1-E)^{n-x} E^x. \quad (2.21)$$

Hierbei bezeichnet $Q^*(n)$ die Ladung nach n Ladungstransporten und $Q(n-x)$ die ursprünglich vorhandene Ladung in den Registern. Unter der Annahme, daß wie in Gleichung (2.20) nur ein einzelnes Ladungspaket transportiert wird, ergibt sich nach n Transporttaktten ein um den Faktor $(1-E)^n$ reduzierter Wert. Mit dem binomischen Satz ergibt sich:

$$(1-E)^n = 1 - nE + \frac{n(n-1)}{2} E^2 - \frac{n(n-1)(n-2)}{6} E^3 + \dots \approx 1 - nE. \quad (2.22)$$

Die Näherung ist im vorliegenden Fall gültig, da E sehr klein und n nicht allzu groß ist, so daß der dritte Term um zwei Zehnerpotenzen kleiner ist als der zweite Term. Im extremen Fall von Gleichung (2.20) würde sich das Ergebnis also nur um $\Delta s^* = 0,05$ weiter verringern. Der erste nachlaufende Bildpunkt hat unter der selben Voraussetzung des Eingangsimpulses in guter Näherung die normierte Ladung von $nE - (nE)^2$, der zweite nachlaufende $(nE)^2 - (nE)^3$ und so weiter. Es ergibt sich als Ausgangsfolge die Impulsantwort $s_s^*(x)$ mit ihren Einzelementen zu

$$(1 - nE), (1 - nE) nE, (1 - nE)(nE)^2, \dots \quad (2.23)$$

$$s_s^*(x) = (1 - nE)(nE)^x,$$

wobei x den betrachteten Bildpunkt angibt. Die Übertragungsfunktion des Systems ist die Z-Transformierte der Impulsantwort:

$$H(z) = \mathcal{Z}\{h(x)\} = \mathcal{Z}\{(1 - nE)(nE)^x\} = (1 - nE) \frac{z}{z - nE} \quad (2.24)$$

mit

$$\frac{z}{z - nE} = \frac{1}{1 - nE z^{-1}} = \lim_{j \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^j \left(\frac{nE}{z}\right)^i = 1 + \frac{nE}{z} + \left(\frac{nE}{z}\right)^2 + \dots \quad (2.25)$$

Ein Filter $K(z)$, welcher den Einfluß des Anlogschieberegisters eliminiert, muß die zu $H(z)$ inverse Übertragungsfunktion aufweisen, denn

$$S(z) = S^*(z) K(z) = S(z) H(z) K(z) \quad \text{mit} \quad K(z) = \frac{1}{H(z)}. \quad (2.26)$$

Es ergibt sich also als Korrekturfilter

$$K(z) = \frac{1}{H(z)} = \frac{S(z)}{S^*(z)} = \frac{1}{1 - nE} \frac{1}{1 + nE z^{-1} + (nE)^2 z^{-2} + \dots} \quad (2.27)$$

Mit der Z-Transformierten des Korrekturfilters, aus der auch der Algorithmus zur Korrektur abgeleitet werden kann, wird deutlich, daß es sich hierbei um ein rekursives Filter handelt.

$$s(x) = \frac{s^*(x)}{1 - nE} - nE s(x - 1) - (nE)^2 s(x - 2) - (nE)^3 s(x - 3) - \dots \quad (2.28)$$

Beim CCD-Sensor legen nicht alle Ladungspakete n Schritte in den Anlogschieberegistern zurück; die Anzahl der Schritte hängt vom Eintrittsort, also von x , dem Bildpunkt der CCD-Zeile, ab. Mit $n = x$, der für kleine nE zulässigen Vereinfachung von $(1 - nE)^{-1} \approx 1 + nE$ und dem Vernachlässigen der sehr kleinen Terme ergibt sich aus Gleichung (2.28) das in der Routine *vticorr* programmierte rekursive Filter zur Korrektur der Transportineffektivität.

$$s(x) = (1 + xE) s^*(x) - xE s(x - 1) - (xE)^2 s(x - 2) \quad (2.29)$$

Da für die vorliegende Arbeit schon während der Datenerfassung die Bildzeilen von 1024 Bildpunkten durch Addition jeweils benachbarter Bildpunkte auf 512 Bildpunkte reduziert wurde, ergibt sich eine effektive Transportineffektivität von

$$E_{eff} = E \frac{1024}{512} = 2E = 4 \cdot 10^{-5}, \quad (2.30)$$

die in der Routine *vticorr* als Defaultwert vorgesehen ist.

Die unterschiedlichen Dunkelströme und Empfindlichkeiten der Zellen entlang der Sensorzeile machen es notwendig, für jedes Sensorelement eine separate Korrekturfunktion zu ermitteln. Der Dunkelstrom ist von der Bestrahlungsintensität unabhängig und soll durch den Offset $a_0(x)$ ausgeglichen werden. Der Fehler durch die Empfindlichkeitsschwankungen steigt linear mit der gemessenen Intensität an und wird durch den Faktor $a_1(x)$ berücksichtigt. Ist $s^*(x, y)$ das gestörte Bildsignal, so ergibt sich mit den oben genannten Koeffizienten nach der Korrektur das ungestörte Bild zu

$$s(x, y) = s^*(x, y) a_1(x) + a_0(x). \quad (2.31)$$

Im allgemeinen Teil dieses Abschnittes wurde schon erwähnt, daß auf eine nicht-lineare Korrektur wegen der geringen Linearitätsfehler verzichtet werden kann. Die Koeffizienten a_0 und a_1 müssen für jeden Einzelsensor der CCD-Zeile ermittelt werden. Dieses wird normalerweise durch Labormessungen erreicht, indem homogen ausgeleuchtete helle und dunkle Kalibrierungsvorlagen aufgenommen und über die erfaßten Intensitätsvariationen die Fehler ermittelt werden [HABERÄCKER, 1985]. Da im vorliegenden Fall die Line-Scan-Camera während der Datenauswertung nicht zur Verfügung stand, wurden die Koeffizienten aus den Daten ermittelt. Es wird vorausgesetzt, daß die Einflüsse durch Dunkelstrom und Empfindlichkeitsschwankungen statistisch unabhängig auftreten und somit ein hochfrequentes Signal entlang der Sensorzeile ergeben. Statt der Aufnahme homogener Flächen wurden für die einzelnen Spalten der Bilddaten über gesamte Flugtage Mittelwerte gebildet. Hierbei wurden zusätzlich die Variationen durch die Vignettierung und aufnahmewinkelabhängige Intensitätsvariationen in der Szene erfaßt, die jedoch durch Hochpaßfilterung eliminiert wurden.

Als Bilddaten für die in Abbildung 2.2 dargestellten Graphen wurde eine homogen verteilte Schollenstruktur verwendet, so daß zwei Helligkeitsbereiche zur Verfügung standen, Wasser und schneebedeckte Eisschollen. Vor der Mittelwertbildung der einzelnen Spalten wurde das Bild in helle und dunkle Bereiche segmentiert, um analog zu den angeführten Labormessungen eine helle und dunkle Kalibrierungsmessung zu simulieren. Die Segmentierung wurde nach dem Bearbeiten des Bildes durchgeführt, also nach empirischer Korrektur der Randausschattungen und extreme Tiefpaßfilterung, da die Intensitätsvariation durch Dunkelstrom oder Empfindlichkeitsschwankungen nicht die Segmentierung beeinflussen dürfen.

In Abbildung 2.2 ist als ein Beispiel der hochfrequente Anteil der mittleren Intensitäten, normiert auf die ungefilterten Intensitäten, für die CCD-Elemente $x = 200$ bis $x = 300$ aufgetragen.

Aus der Differenz der Funktionswerte kann, unter Berücksichtigung der ungefilterten Intensitätsunterschiede zwischen hellen und dunklen Bildbereichen, der Offset

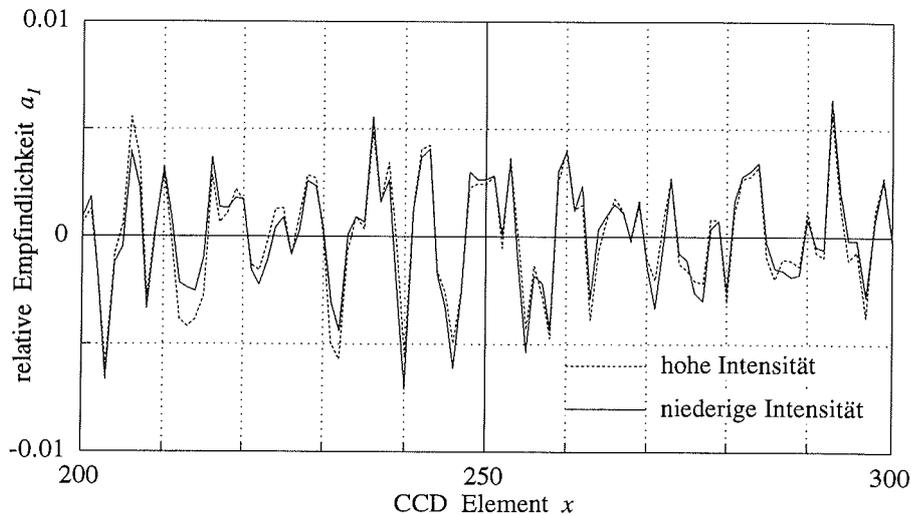


Abbildung 2.2: Hochfrequente normierte Intensitätsvariationen entlang der Bildzeile für niedrige und hohe Intensitäten, zur Bestimmung der Korrekturkoeffizienten $a_0(x)$ und $a_1(x)$ (Daten vom gesamten Flugtag am 16. März 1993).

$a_0(x)$ für Gleichung (2.31) ermittelt werden. Bis auf wenige Ausnahmen ergibt sich jedoch keine Differenz der Funktionswerte, so daß für die gesamte Zeile der Dunkelstrom und somit $a_0(x)$ vernachlässigt werden kann. Abweichungen hiervon, wie zum Beispiel im Bereich von $x = 214$ konnten in anderen Datensätzen nicht bestätigt werden. Der Dunkelstrom übt wegen der kurzen Integrationszeiten keinen Einfluß aus.

Der Mittelwert von beiden Funktionswerten für jede Position x in Abbildung 2.2 ergibt das Koeffizientenarray $a_1(x)$. Für die vorliegende Auswertung wurden die Werte von mehreren Flugtagen gemittelt und im VIFF-Format (float) abgelegt, um so für die Auswertung bereitzustehen. Diese Korrekturkoeffizienten sind nur für ein bestimmtes Kamerasystem gültig und sollten für einzelne Expeditionen neu ermittelt werden, um Variationen durch Alterung zu berücksichtigen. Bei der Ermittlung helfen die Routinen *vcosum*, die eine spezielle Summation einer Vielzahl von Bilddaten unterstützt und *vhivar*, die aus dieser Summation das Koeffizientenarray $a_1(x)$ berechnet. Die Datei hat den standardisierten Namen *ccdint1193.viff*, wenn sie im November 1993 erstellt wurde und sollte weitere Informationen im Comment-Header enthalten. Die Korrektur wird dann mit der Routine *v1dmul* durchgeführt, die im Anhang B.1.3 erklärt ist.

Die im folgenden betrachteten Einflußgrößen können zwar qualitativ, jedoch nicht quantitativ bestimmt werden, da Informationen über ihr Auftreten und Parameter über ihre Erscheinungsform fehlen. Am Ende dieses Abschnittes wird daher eine Methode eingeführt, die annähernd die Modifikation der Bilddaten bestimmt und mit diesen das Bild korrigiert.

Über eine eventuelle Vereisung der Optik kann nur ausgesagt werden, daß ihr Einfluß wegen der Defokussierung niederfrequent in Richtung der Bildaufnahmezeile ist. Zeitlich variiert die Vereisung langsam, so daß sie für einen Flugabschnitt von 20 000 Bildzeilen als konstant angesehen werden kann. Anders verhält sich dagegen die Vignettierung, die bezüglich der mittleren Bildspalten einen symmetrischen Einfluß hat. Ihre Blendeneinstellung könnte im Labor bestimmt werden, was für zukünftige Systeme geplant, aber derzeit nicht möglich ist, da die Blendeneinstellung nicht registriert wird. Auch der Einfluß der Vignettierung ist in Richtung der Bildzeilen niederfrequent und in Richtung der Bildspalten konstant, da die Blendeneinstellung während der Datenaufnahme nicht variiert wurde.

Abbildung 2.3 verdeutlicht die Entstehung der Vignettierung. Hierbei ist A die Fläche eines LAMBERT-Strahlers oder LAMBERT-Reflektors, zum Beispiel frischer Schnee. In der Bildebene wird die Fläche A als Fläche A' abgebildet. Die Größe dieser Fläche ist durch den Abbildungsmaßstab gegeben, wobei b die Bildweite und g die Gegenstandsweite beschreibt:

$$\frac{A}{A'} = \frac{g^2}{b^2}. \quad (2.32)$$

Zwischen Gegenstand und Bild befindet sich das Objektiv mit einer Blendenöffnung, deren effektive Fläche P vom Einstrahlwinkel ω abhängig ist. Für eine Vorderblende würde die Fläche $P = P_v$ mit zunehmendem Einstrahlwinkel ω nach

$$P_v(\omega) = P_v(0) \cos \omega \quad (2.33)$$

verkleinert, sei aber hier als allgemeine Funktion $P(\omega)$ eingeführt.

Die Fläche A strahle nun mit der Strahlungsdichte B , wodurch sich von der Fläche A durch die Objektivöffnung P der Strahlungsfluß Φ_E einstellt:

$$\Phi_E = BA \cos \omega \Theta(\omega). \quad (2.34)$$

Die Abhängigkeit von $\cos \omega$ macht den LAMBERT-Strahler aus. Da sich der Raumwinkel Θ , der sich zwischen einem Flächenelement dA und der Objektivöffnung P aufspannt, vom Winkel ω abhängig ist, gilt als Voraussetzung, daß A sehr viel kleiner als g ist. Der Raumwinkel ist

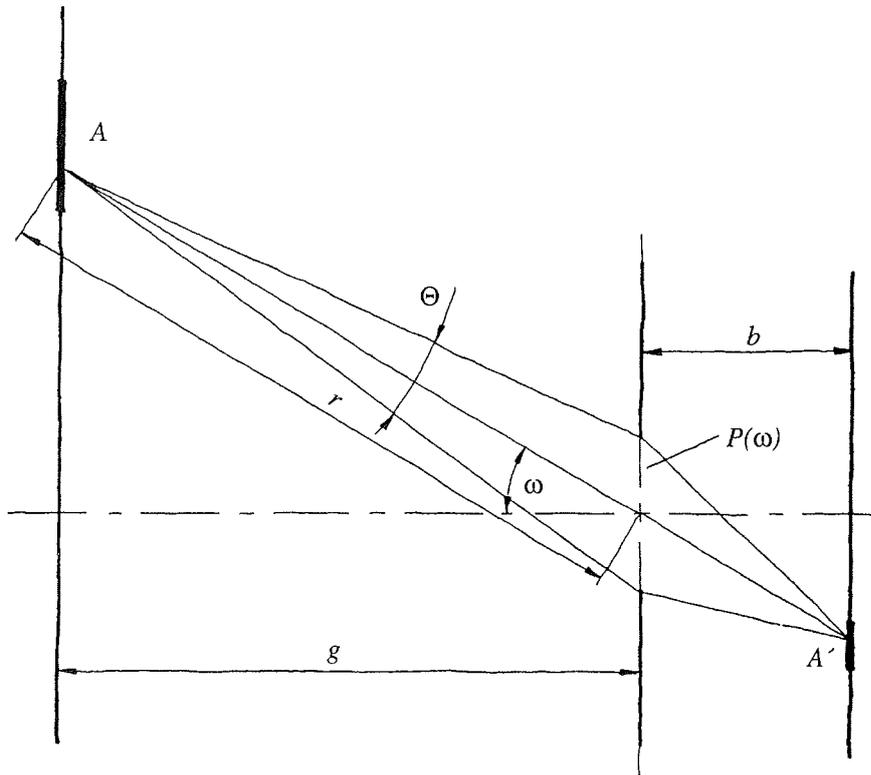


Abbildung 2.3: Geometrie zur Herleitung des Einflusses der Vignettierung, mit Objektebene, Hauptebene der Optik und Bildebene.

$$\Theta(\omega) = \frac{P(\omega)}{r^2} \quad \text{mit} \quad r = \frac{g}{\cos \omega},$$

also

$$\Theta(\omega) = \frac{P(\omega)}{g^2} \cos^2 \omega. \quad (2.35)$$

Hiermit ergibt sich aus Gleichung (2.34)

$$\Phi_E = BA \frac{P(\omega)}{g^2} \cos^3 \omega \quad (2.36)$$

und bezogen auf die Seite der Bildebene mit Gleichung (2.32)

$$\Phi_E = B \frac{A'}{b^2} P(\omega) \cos^3 \omega, \quad (2.37)$$

denn der Strahlungsfluß, der in die als verlustfrei angesehene Optik eintritt, muß diese auf der anderen Seite auch wieder verlassen.

Für das Ausgangssignal des CCD-Sensors, der in der Bildebene den Strahlungsfluß in ein elektrisches Signal umsetzt, ist die Bestrahlungsstärke E relevant, die sich aus dem Verhältnis des Strahlungsflusses und der bestrahlten Fläche A' ergibt.

$$E = \frac{\Phi_{A'}}{A'} \quad (2.38)$$

So bildet sich die Bestrahlungsstärke entlang der Bildzeile winkelabhängig mit Gleichung (2.37) zu

$$E = \frac{B}{b^2} \cos^3(\omega) P(\omega). \quad (2.39)$$

Betrachtet man nun den Fall einer Optik mit Vorderblende, wie es gewöhnlich in Lehrbüchern erfolgt [SLEVOGT, 1974], so ergibt sich mit Gleichung (2.33) ein Abfall der Bestrahlungsstärke zum Rand des Bildes proportional $\cos^4 \omega$. Im vorliegenden Fall variiert der Bestrahlungswinkel zwischen $\omega = -45^\circ$; $\omega = 0^\circ$ bis $\omega = 45^\circ$, wodurch sich ein Abfall der Bestrahlungsstärke zum Rand auf $\cos^4(45^\circ) = 0,25$ ergäbe. Selbst wenn man den Einfluß der Vorderblende als winkelunabhängig betrachten würde, da bei Integration der Blende in die Optik der Strahlungswinkel in der Blende durch Strahlbrechung nicht dem Einstrahlungswinkel entspricht, bleibt ein Randabfall auf $\cos^3(45^\circ) = 0,35$. In Abbildung 2.4 sind einige Vignettierungskurven aufgetragen, wobei wiederum die Mittelwerte für einzelne Bildpositionen x längerer Flugabschnitte gebildet wurden. Die Kurven, die geringe Vignettierung zeigen, wurden mit geschlossener Blende und die großer Vignettierung mit offener Blende aufgenommen. Es ergeben sich bei abgeblendeter Optik nicht im entferntesten Randabschattungen von $\cos^4 \omega$, nicht einmal von $\cos^3 \omega$.

Zur Klärung dieser Diskrepanz wurde die Vignettierung eines Weitwinkelobjektivs (Super Albinar 1:2,8/28 mm) im Optiklabor vermessen, wobei sich bei Blendenöffnungen von 1:22 bis 1:8 eine Vignettierung proportional $\cos \omega$ einstellte. Bei größeren Öffnungen bis zu 1:2,8 stieg die Vignettierung auf proportional $\cos^4 \omega$ an. Als Ursache wurde erkannt, daß die Objektive so konstruiert sind, daß sie die Vignettierung so weit als möglich unterdrücken. Im Idealfall nimmt die Funktion der effektiven Fläche der Blendenöffnung nicht nach Gleichung (2.33) ab, sondern nach

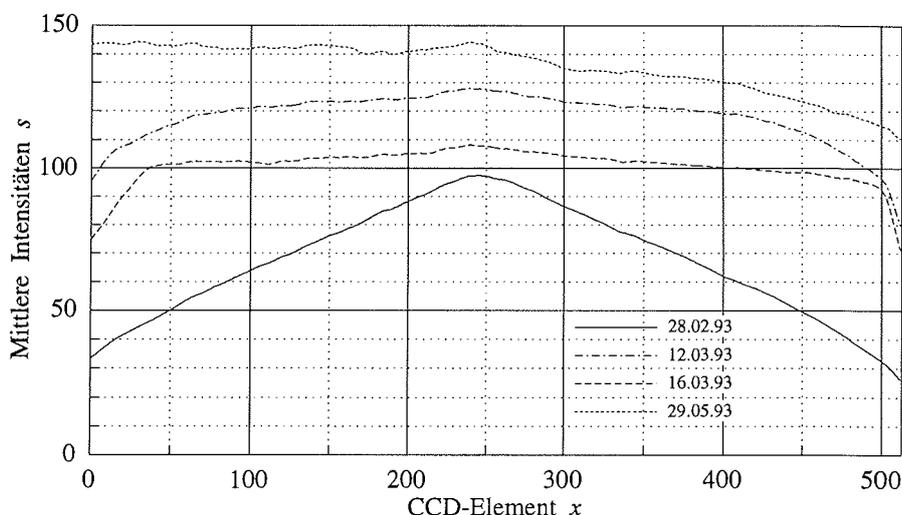


Abbildung 2.4: Mittlere Intensitäten für einzelne Bildpositionen x , zur Verdeutlichung der Vignettierung; Mittelwerte über längere Flugabschnitte vom angegebenen Flugtag.

$$P(\omega) = \frac{P(0)}{\cos^3(\omega)} \quad (2.40)$$

zu, wodurch die Bestrahlungsstärke E in Gleichung (2.39) über alle Winkel ω entlang der Sensorzeile in der Bildebene konstant bleibt. Die Vergrößerung der Blendenöffnung mit zunehmendem Einstrahlwinkel scheint paradox, läßt sich jedoch beobachten, wenn man die Blende eines Weitwinkelobjektivs durch die Frontlinse beobachtet und das Objektiv zunehmend neigt. Bei kleinen Verhältnissen der Flächen von Objektiv- zu Blendenöffnung ist diese Korrektur nicht mehr möglich, nimmt also mit zunehmender Blendenöffnung ab.

In Abbildung 2.4 ist zudem bei der Kurve mit starker Vignettierung die Form einer Dreiecksfunktion auffällig. Dieses kommt dadurch zustande, daß bei vollständig geöffneter Blende Konstruktionsbestandteile des Objektivs eine Blendenfunktion übernehmen. Bei langen Bauweisen können diese Öffnungen in unterschiedlicher Entfernung von der Bildebene liegen. Bei zunehmendem Einstrahlwinkel beschneiden sich die Öffnungen gegenseitig, wodurch die effektive Öffnungsfläche nicht mehr nach Gleichung (2.33) abnimmt.

Da mit der Line-Scan-Camera keine absoluten Intensitätsmessungen durchgeführt werden, spielt die Transmission der Atmosphäre nur eine relative Rolle. Die

Strahlung, die die Helligkeit der Randbildpunkte bestimmt, legt einen längeren Weg durch die Atmosphäre zurück. Mit dem Gesamtmeßwinkel $\Omega = 90^\circ$ ergibt sich ein maximales Längenverhältnis für den Strahlungsweg durch die Atmosphäre von

$$\frac{d_{max}}{d_{nad}} = \frac{1}{\cos \frac{\Omega}{2}} = \sqrt{2}, \quad (2.41)$$

wobei d_{max} der maximalen und d_{nad} der Weglänge im Nadir entspricht.

Die Schwächung der reflektierten Sonnenstrahlung ist entsprechend der Theorie für einfallende Sonnenstrahlung und deren Schwächung durch die Atmosphäre zu behandeln. Diese Extinktion besteht aus Absorption an Aerosolen und Wasserdampf und Streuung, teils an den Molekülen der Luft, teils an Aerosolen. Kondensierter Wasserdampf sei hier außer Betracht gelassen, da durch die geringe gerichtete Transmission eine Datenerfassung durch Wolken nicht möglich ist. Auch Gebiete, in denen Seerrauch auftrat, müssen separat behandelt werden.

Die Extinktion wird durch das BOUGUER-LAMBERT-BEER-Gesetz beschrieben:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\kappa m}. \quad (2.42)$$

Hierbei ist I die Strahlungsintensität, auf die die Intensität I_0 abgefallen ist, nachdem die Strahlung durch die optische Luftmasse m mit dem Extinktionskoeffizienten κ getreten ist. Im vorliegenden Fall ist I_0 die auf der Erdoberfläche reflektierte und I die gemessene Strahlungsintensität. Der Extinktionskoeffizient ist über die Atmosphäre nicht konstant. Hier spielen die Aerosolschichtung, Luftfeuchtigkeitsprofile und Dichte der Luft eine Rolle. Speziell in den Polargebieten enthält die Atmosphäre infolge ihrer geringen Temperatur eine relativ unbedeutende Menge Wasserdampf; gleichzeitig ist die Luft infolge der großen Entfernung von staubproduzierenden Gebieten rein von Aerosolen. Es kommt somit hauptsächlich die RAYLEIGH-Streuung, die Streuung an den Luftmolekülen, in Betracht. Von HARTMANN *et al.* [1994] wurde der Extinktionskoeffizient für das betrachtete Gebiet und wolkenlosem Himmel angegeben:

$$\kappa = 0,066. \quad (2.43)$$

Mit der Voraussetzung von RAYLEIGH-Streuung kann nun die optische Luftmasse bestimmt werden. Es ist $m = 1$, wenn bei einem Luftdruck von $p_0 = 1013$ mbar der vertikale Strahlengang durch die gesamte Atmosphäre betrachtet wird. In Gleichung (2.42) ist die Extinktion somit vom Luftdruckverhältnis zwischen Erdboden und Flugniveau relevant. Mit der barometrischen Höhenformel

$$d_{nad} = \frac{RT}{g} \ln \frac{p_0}{p} \quad (2.44)$$

und somit

$$m = 1 - \frac{p}{p_0} = 1 - e^{-\frac{d_{nad}g}{RT}}, \quad (2.45)$$

wobei $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ die Erdbeschleunigung, $R = 287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ die individuelle Gaskonstante für Luft und $T \approx 260 \text{ K}$ die absolute Temperatur angibt, die über die Höhe als konstant angenommen wird und die im Bereich von $\Delta T = \pm 30 \text{ K}$ keinen wesentlichen Einfluß ausübt, ergibt sich mit Gleichung (2.42) die Extinktion in Abhängigkeit von der Flughöhe.

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\kappa m} = e^{-\kappa(1 - e^{-\frac{d_{nad}g}{RT}})} \quad (2.46)$$

Berechnet man nun mit Gleichung (2.41) und (2.46) die Intensitätsvariation zwischen Bildpunkten entlang der Aufnahmezeile, so ergibt sich bei einer Flughöhe von $d_{nad} = 1500 \text{ m}$, der Standardflughöhe, ein Fehler von maximal $\Delta s = -1$ (bei $s = 255$). Bei der Maximalflughöhe von $d_{nad} = 3000 \text{ m}$ liegt der maximale Fehler bei $\Delta s = -2$. Dieser Fehler ist wesentlich geringer als der Einfluß der Vignettierung, der die gleiche Charakteristik aufweist (Gleichung (2.41)). Da die Vignettierung nicht isoliert zu bestimmen ist, kann der Einfluß durch Extinktion mit dieser im folgenden gemeinsam betrachtet werden.

Intensitätsvariationen entlang der Bildzeile werden aber außerdem auch von der winkelabhängigen Reflexion in der Szene hervorgerufen. Das Reflexions-, Absorptions- und Emissionsvermögen von Wasser-, Eis- und Schneeoberflächen ist keineswegs isotrop bezüglich der Ein- und Ausstrahlrichtung und hängt zudem auch vom Spektralbereich ab [RASCHKE, 1978]. Diesbezüglich sind in der Literatur kaum Untersuchungen bekannt, da die Reflexion von einer Vielzahl von Einflußgrößen abhängt. Eine Ausnahme bildet RASCHKE [1972], wo auf die Reflektivität der Wasseroberfläche eingegangen wird. Auf ebenen Wasseroberflächen ist die Reflexion durch das FRESNELSche Gesetz bekannt. Sie wird durch den Seegang modifiziert. Mit der Annahme, daß die Neigung der Oberflächenelemente einer Wasseroberfläche einer GAUSS-Verteilung entspricht, werden von RASCHKE [1972] die Reflexionsfunktionen für Meeresoberflächen bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten berechnet. Dieses hilft in der vorliegenden Arbeit nicht weiter, da speziell in Packeisgebieten die Aufrauung der Meeresoberfläche neben der Windgeschwindigkeit von der Schollenstruktur abhängt und lokal stark variiert. Von PEROVICH und GRENFELL [1981] und SCHLOSSER [1988] werden Laboruntersuchungen über die Reflektivität von planem Meereis ohne Schneebedeckung vorgestellt, welches aber auch nur entfernt der angetroffenen Realität entspricht.

Die Schneeoberflächen betreffend, der wichtigsten Komponente bei der Fernerkundung von Meereis, liegen nur Untersuchungen vor, die auf die Albedo eingehen. Diese Untersuchungen sind wegen der Integration der Ausstrahlung über den gesamten oberen Halbraum für den Energiehaushalt und somit für die relevante Betrachtung bezüglich Klimafragen wesentlich. Durch die Integration der Ausstrahlung über den gesamten Halbraum treten sowohl in der Meßtechnik als auch in der Beschreibung der reflektierenden Flächen Vereinfachungen auf, da die Strahlung mit einem Sensor erfaßt werden kann und anisotrope Flächen bezüglich der Ausstrahlung näherungsweise als isotrop angesehen werden können. Einige Abhängigkeiten der Reflektivität können jedoch aus den Untersuchungen zur Albedo abgeleitet werden. Bei inhomogener Bewölkung ist die Abhängigkeit der Albedo von der Bewölkung interessant. Sie kommt dadurch zustande, daß die Albedo und auch die Reflektivität von Schnee wellenlängenabhängig zu größeren Wellenlängen abnimmt. Durch zunehmende Bewölkung wird die solare Einstrahlung am Erdboden spektral im Mittel zu niedrigeren Wellenlängen verschoben, so daß bei Verhältnissbildung der Einstrahlung zur reflektierten Ausstrahlung die spektral integrierte Albedo mit der Wolkenbedeckung ansteigt [GRENFELL, 1984].

Nach CARROLL und FITCH [1981] ist die Albedo und hiermit zwangsläufig auch die Reflektivität vom Einstrahlwinkel der Sonne abhängig. Mit zunehmender Erhebung der Sonne über den Horizont nimmt die Albedo bei klarem Himmel von $\alpha = 0,98$ auf $\alpha = 0,84$ bei 20° Erhebungswinkel ab und bleibt dann konstant. Die Ursache hierfür ist noch nicht geklärt.

Die Untersuchungen von CARROLL und FITCH [1981] fanden bei der Amundsen-Scott-Station auf dem Südpol statt, so daß die azimutale Einstrahlrichtung bei gleichem Erhebungswinkel der Sonne variiert wurde. Die dort zur Abschätzung von Fehlern erkannte Abhängigkeit zeigt den Einfluß von Oberflächentexturen. Die azimutale Abhängigkeit zeichnet sich dadurch aus, daß die Albedo maximal ist, wenn der Sonnenazimut parallel zur vorherrschenden Windrichtung liegt und senkrecht hierzu das Minimum erreicht. Von CARROLL und FITCH [1981] wird dieses im wesentlichen auf makroskopische Texturen wie Sastrugi zurückgeführt, welches nicht sinnvoll erscheint, da hiermit auch die Absorption der einfallenden Strahlung mit der Bestrahlungsrichtung dieser Texturen variieren würde. Dieses hätte eine allgemeine Winkelabhängigkeit, der Reflexion zur Folge und auch für hohe Sonnenstände wäre die Albedo vom Einstrahlwinkel abhängig. Die Ursache ist vielmehr in der Struktur der Schneekristalle zu suchen, die sich speziell bei Metamorphose im Wind ausrichten. Schneekristalle müssen als anisotrop betrachtet werden; ihre Wechselwirkung mit Strahlung ist abhängig von ihrer Lage zur Einstrahlrichtung. Mit der Ausrichtung im Wind wird hiermit auch die makroskopisch betrachtete Fläche anisotrop. Die Reflektivität ist von einer Vielzahl von Streuprozessen abhängig; sie nimmt ab mit Anstieg der Kristallgrößen, zunehmender Rundheit der Kristalle, Porosität, Rekristallisation und Krustenentstehung. Also hat trockener, frischer, feinkörniger Schnee die höchste Reflek-

tivität und zeigt das stärkste isotrope Verhalten.

Die vom Ausstrahlungswinkel abhängige Reflektivität hängt aber vom Winkel der Einstrahlung und den Bodentexturen ab, welches bei der Betrachtung der beiden extremen Fälle, einer glatten und einer welligen Fläche (zum Beispiel Sastrugi) erkennbar wird. Die Oberflächen werden jeweils als diffuse LAMBERT-Reflektoren betrachtet. Bei der ebenen Fläche ist die reflektierte Strahlungsdichte nach dem LAMBERT-Gesetz in alle Richtungen gleich und somit die Reflektivität winkelnunabhängig. Betrachtet man nun eine wellige Oberfläche, so richten sich die Normalen einzelner Oberflächenelemente unterschiedlich zur Einstrahlrichtung aus, wodurch die einfallende Bestrahlungsdichte im Gegensatz zu der Betrachtung der ebenen Fläche über die Fläche variiert. Nun hängt es von der Betrachtungsrichtung ab, welcher Anteil der Fläche gesehen wird; sind es im wesentlichen die dunklen oder die hellen Gebiete? Bei der Strahlungsmessung aus Richtung der Sonneneinstrahlung wird die Reflektivität größer sein, als bei der Messung von der sonnenabgewandten Seite. Dieser Unterschied wird extrem bei Schattenwurf.

Weiteres wurde durch Messungen während REFLEX II mit Pyranometern gefunden. Es wurde die kurzwellige Strahlung über den gesamten unteren Halbraum gemessen und durch Rollbewegung des Flugzeuges der Meßwinkel variiert. Mit diesen Messungen, die zur Korrektur von Einbaufehlern durchgeführt wurden, zeigt FREESE [1994] die Ausrichtung der symmetrischen LAMBERT-Keule für Reflexion in die entgegengesetzte Richtung der Sonneneinstrahlung. Dieses ist eine Überlagerung der gerichteten FRESNELSchen Reflexion mit der diffusen LAMBERT-Reflexion und ergibt eine modifizierte LAMBERT-Reflexion, deren Reflexionskeule sich mit zunehmender Metamorphose der Schneeoberfläche von der Sonnenseite abgewandt ausrichtet.

Die Einflüsse von Vignettierung, Vereisung der Optik, Extinktion durch die Atmosphäre und Bestrahlungsunterschieden in der Szene sollen zusammengefaßt korrigiert werden. Es wurde beschrieben, daß die Einflußgrößen nicht getrennt quantitativ erfaßt werden können. Die Korrekturfunktion muß also aus den Bilddaten ermittelt werden. Sie wird in der vorliegenden Arbeit aus den mittleren Intensitäten für einzelne Bildpositionen x abgeleitet, wie sie schon in Abbildung 2.4 dargestellt wurden. Die Korrekturfunktion $k(x)$ enthält Werte größer oder gleich Eins, so daß nach Korrektur der erfaßten Bilddaten $s^*(x, y)$ mit

$$s(x, y) = k(x)s^*(x, y) \quad (2.47)$$

die mittleren Intensitäten für einzelne Bildspalten x (siehe Abbildung 2.4) konstant ihrem vorherigen Maximum entsprechen. Sind

$$\bar{s}^*(x) = \frac{1}{Y} \sum_{y=0}^{Y-1} s^*(x, y) \quad (2.48)$$

die mittleren Intensitäten der Bildspalten x und $\overline{s_{max}^*}$ der sich entlang x ergebende Maximalwert, so berechnet sich die Korrekturfunktion zu

$$k(x) = \frac{\overline{s_{max}^*}}{s^*(x)} \quad (2.49)$$

Mit dieser Korrekturfunktion ist die Bildkorrektur nach Gleichung (2.47) jedoch nur zufriedenstellend, wenn unterschiedliche Bereiche wie zum Beispiel Wasser, Eis oder Schmelztümpel im Bild bezüglich der Koordinate x statistisch verteilt sind. Probleme treten auf, wenn ein Flugabschnitt lange parallel zu linearen Strukturen wie Eiskanten oder Rissen im Eis verlief.

Die Prozedur *vwig*, die zur Korrektur der Intensitätsvariationen entlang der Bildzeilen entwickelt wurde, stellt zwei Methoden zur Auswahl, um das Problem der geordneten Verteilung zu lösen. Im speziellen Fall kann beim Prozeduraufruf ein Bildbereich angegeben werden, aus dem die Korrekturfunktion abgeleitet werden soll. Dieses entspricht einer Variation der Summationsgrenzen in Gleichung (2.48). Werden keine Grenzen angegeben, so wird automatisch ein repräsentatives Gebiet ermittelt, welches möglichst keine geordneten Strukturen enthält. Die Auswahl dieses Gebiets geschieht nach folgender Vorgehensweise. Zuerst wird der gesamte Flugabschnitt, in der Regel 20 000 Bildzeilen, in fünf gleichgroße Bereiche geteilt, so daß jeder Bereich die ursprüngliche Zeilenlänge X , aber nur noch ein Fünftel der Zeilenanzahl enthält. Für jeden dieser Bereiche wird nach Gleichung (2.48) mit angepaßten Summationsgrenzen und Gleichung (2.49) eine potentielle Korrekturfunktion ermittelt. Ist im Gesamtbild eine störende lineare Struktur enthalten, so wird sie in jedem Fall eine und mit geringerer Wahrscheinlichkeit zwei Korrekturfunktionen beeinflussen. Erst wenn eine solche Struktur sehr lang ist, welches aber unwahrscheinlich ist, wird sie drei Bereiche verändern. Es können also drei Bereiche als repräsentativ angesehen werden. Diese werden ermittelt, indem zwischen jeder Paarung der Korrekturfunktionen der Korrelationskoeffizient nach Gleichung (2.1) berechnet und für jeden Bereich die beiden größten Korrelationskoeffizienten ermittelt werden. Die Autokorrelationskoeffizienten bleiben unberücksichtigt, da sie in jedem Fall den Wert Eins annehmen.

Aus den drei Bereichen, mit den größten Summen der jeweils beiden größten Korrelationskoeffizienten, wird nun die endgültige Korrekturfunktion $k(x)$ ermittelt, um nach Gleichung (2.47) das Bild zu verbessern. Zur Beurteilung des Ergebnisses liefert die Prozedur *vwig* neben den korrigierten Bilddaten die Mittelwertfunktion nach Gleichung (2.48) und die entsprechende Funktion für die zusammengefaßten Bereiche, aus denen letztendlich die Korrekturfunktion ermittelt wurde. In jedem Fall sollte das Ergebnis zusätzlich visuell kontrolliert werden.

2.1.4 Korrektur der Beleuchtungsschwankungen in Flugrichtung

Intensitätsschwankungen in den erfaßten Bilddaten, die durch Beleuchtungsvariationen während des Flugverlaufs entstanden, sollen ausgeglichen werden, da für die Interpretation in Bezug auf unterschiedliche Eistypen die Reflektivität auf dem Grund und nicht die absolute Strahlungsintensität relevant ist.

Um die Reflektivität absolut zu bestimmen, muß die einfallende Strahlungsintensität bekannt sein und die vom Grund reflektierte Strahlung absolut gemessen werden. Mit der Line-Scan-Camera ist es nicht möglich, absolute Strahlungsintensitäten zu messen, da dieser Line-Scanner weder kalibriert, noch seine Blendeinstellung registriert wird. Da während der Datenerfassung keine Einstellveränderungen durchgeführt werden, ist jedoch die relative Messung der Strahlungsintensität in einzelnen Bildabschnitten aussagefähig, sofern die schon aufgeführten Korrekturen durchgeführt wurden.

Während der Expedition REFLEX II wurde die einfallende Strahlung am Ort der Meßdatenerfassung gemessen. Verwendet wurde für die Messungen ein Pyranometer, welches die einfallende kurzwellige Strahlung ($0,8 \mu\text{m}$ bis $5 \mu\text{m}$) des gesamten oberen Halbraumes erfaßt [KOTMEIER *et al.*, 1993]. Ein Vergleich dieser Meßreihen mit den Bilddaten, die von der Line-Scan-Camera aufgenommen wurden, zeigt oft eine gute Korrelation, so daß die Korrektur der Beleuchtungsschwankungen direkt aus den Pyranometermessungen abgeleitet werden könnte. Verallgemeinert gilt aber, daß zwischen den Helligkeitsschwankungen, die am Flugzeug gemessen werden und denen, die auf dem Grund zu erkennen sind, ein Zeitversatz besteht. Dieser macht sich besonders bemerkbar, wenn die Helligkeitsschwankungen durch Bewölkung verursacht werden. Liegen hierbei Wolken, Flugzeug und mit der Line-Scan-Camera erfaßter Grund nicht in einer Flucht, so kann die Bewölkung bei Bewegung zum Beispiel erst das Pyranometer und nach einer Weile den aufgenommenen Untergrund abschatten. Der Zeitversatz ist bezüglich Größe und Vorzeichen variabel und hängt vom Sonnenstand, Wolkenhöhe und -bewegung ab. Von FREESE [1994] wird dieses Problem für die Albedobestimmung, das Verhältnis von aufwärts zu abwärts erfaßten Pyranometermessungen, behandelt. Der dort angewendete statistische Ansatz kann auf die Messungen mit der Line-Scan-Camera nicht übertragen werden. Die Korrektur anhand der Pyranometermessungen ist nicht zufriedenstellend.

Deshalb sollen ähnlich der Korrektur von Intensitätsvariationen in den Bildzeilen die Beleuchtungsschwankungen in Flugrichtung aus den Bilddaten selbst ermittelt werden, um sie hierauf folgend zu korrigieren. Eine Vorgehensweise analog Gleichung (2.48) und Korrektur entsprechend der Gleichungen (2.47) und (2.49), wobei die Bilddimensionen x und y vertauscht werden, versagt, da die dort eingeführte Annahme der statistisch verteilten Bereiche wie Wasser, Eis oder Schmelztümpel in Bezug auf die Koordinate y nicht gerechtfertigt ist. Zum einen ist die Grundmenge $X = 512$ für die Mittelwertbildung sehr gering, zum anderen

kann der Inhalt der Szene in Flugrichtung durch das große Verhältnis y/x stark variieren; Kehrwert aus Abschnitt 2.1.3. In einer Szene, die neben Wasser einen Eistyp enthält, dessen Konzentration in Flugrichtung abnimmt, hätte die gleiche Korrekturfunktion als Resultat, wie eine homogene Fläche bezüglich Eistyp und Konzentration, wenn entgegen dem ersten Fall die Beleuchtung abnehmen würde.

Die in dieser Arbeit entwickelte Vorgehensweise zur Korrektur der Beleuchtungsvariationen sei anhand des Flugabschnitts cs031213.16d verdeutlicht, der in Abbildung 2.5 korrigiert und unkorrigiert wiedergegeben ist. Im unkorrigierten Bild, welches in der Mitte dargestellt ist, kann die Beleuchtungsvariation gut erkannt werden. Rechts sind normiert die Zeilenmittelwerte neben der Funktion dargestellt, die für die Datenkorrektur ermittelt wurde. Sie repräsentieren die Beleuchtungsvariation. Die starke Variation der Zeilenmittelwerte zeigt, daß Bildstrukturen wegen der geringen Bildbreite durchschlagen. Selbst in diesem Beispiel mit relativ homogener Eisbedeckung wäre eine Korrektur, die aus den Zeilenmittelwerten abgeleitet würde, auch nach extremer Tiefpaßfilterung im Bereich der Zeilen $y = 10\,000$ bis $y = 15\,000$ fehlerhaft.

Da die folgenden Methoden im Extremfall versagen, seien schon hier Bedingungen angeführt, die die Bilddaten erfüllen müssen. Die Beleuchtungsschwankungen müssen monoton sein, es werden keine Schattenränder korrigiert, wie sie zum Beispiel bei Kumulusbewölkung auftreten können. Die Konzentration unterschiedlicher Eistypen darf variieren. Bei sehr starker Variation entlang der Flugrichtung, bei der im Extremfall erst dominante Eistypen später verschwinden, treten Probleme auf. In jedem Fall sollte das Ergebnis visuell kontrolliert und gegebenenfalls die alternative Methode oder die Methode des relativen Histogramm-Maximums mit variiertem Schwellwert angewendet werden, die im folgenden beschrieben werden.

Beiden Methoden ist gemeinsam, daß sie repräsentative Intensitätsvariationen zwischen vier Bereichen ermitteln; in Flugrichtung dem ersten, zweiten, dritten und vierten Viertel. In Abbildung 2.6 sind die Grauerthistogramme dieser Teilbereiche als $h_i(s)$ mit $i = 1$ bis $i = 4$ dargestellt. Der Index gibt den Teilbereich des Bildes an; s ist die Intensität der Bildpunkte. Grauerthistogramme geben die Häufigkeitsverteilung des Vorkommens einzelner Bildpunktintensitäten an. Am Beispiel ist gut zu erkennen, daß sich die Grauerthistogramme ähneln, jedoch entsprechend der Beleuchtung unterschiedlich skaliert sind. In den Histogrammen $h_1(s)$ und $h_4(s)$ kann zwischen dominanten Helligkeitsbereichen unterschieden werden. Es ergeben sich jeweils drei Bereiche, die zu segmentieren wären. Ein sehr kleiner mit dunklen Bildpunkten in beiden Histogrammen um etwa $s = 50$ und ein mittlerer mit Bildpunktintensitäten um $s = 185$ bei $h_1(s)$ und $s = 120$ bei $h_4(s)$. Das schneebedeckte Eis ändert seine Bildpunktintensitäten von etwa $s = 215$ in $h_1(s)$ auf $s = 145$ in $h_4(s)$. In den beiden Histogrammen $h_2(s)$ und $h_3(s)$ sind die unterschiedlichen Helligkeitsbereiche nicht so gut

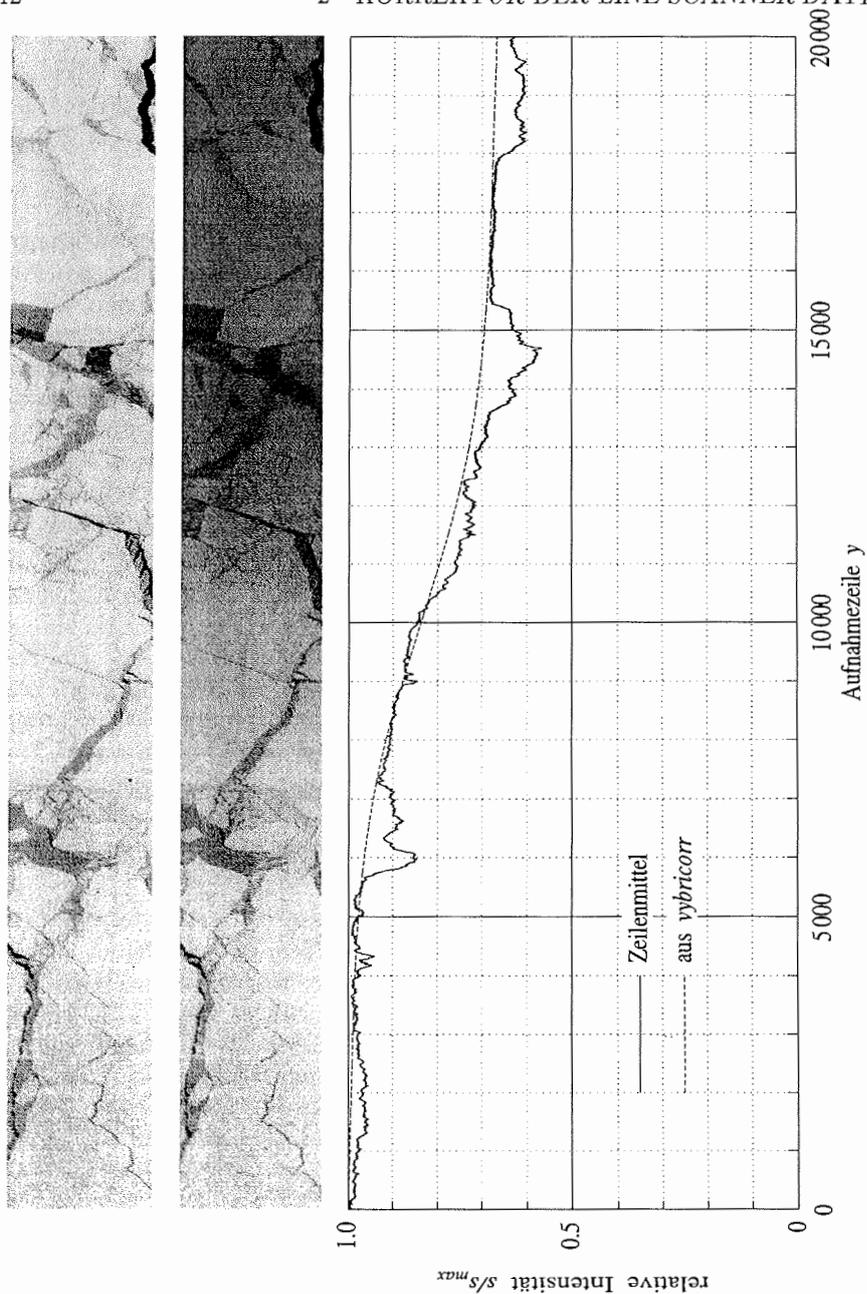


Abbildung 2.5: Bilddaten der Line-Scan-Camera; das linke Bild ($s^*(x, y)$) ergibt sich nach Korrektur der Intensitätsschwankungen mit der Methode der Histogramm-Korrelation und Spline-Interpolation aus dem gestörten Bild ($s(x, y)$) in der Mitte; rechts ist neben der mittleren Zeilenintensität gestrichelt die zur Korrektur abgeleitete Beleuchtungsschwankung aufgetragen (Daten aus cs031213.16d).

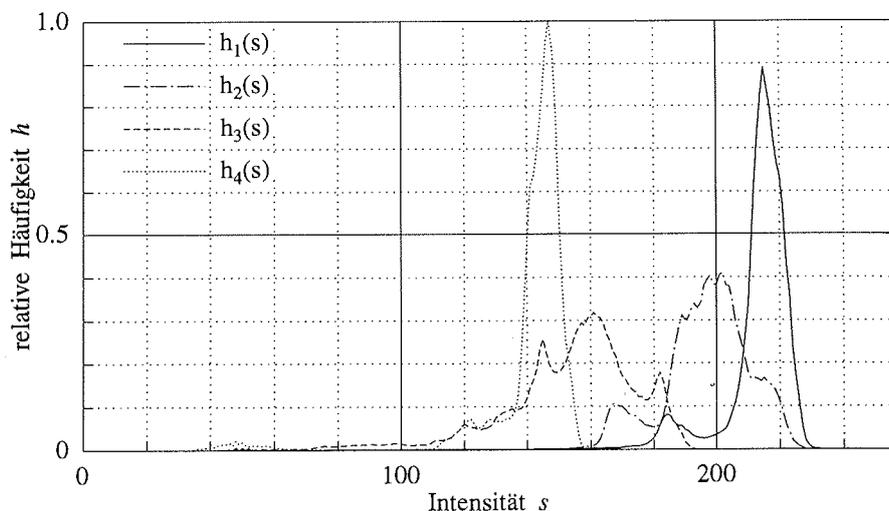


Abbildung 2.6: Grauwertistogramme vom unkorrigierten Bild aus Abbildung 2.5, wobei vier Bildabschnitte in Flugrichtung unterschieden wurden.

ausgeprägt, da in den mittleren Bildabschnitten die wesentliche Beleuchtungsvariation stattfindet. Der Bereich mit schneebedecktem Eis bildet sogar mehrere Maxima in den Histogrammen, wobei das größte als repräsentativ für den jeweiligen Bildabschnitt angesehen werden kann.

Bei der Methode der Histogramm-Korrelation wird der Skalierungsfaktor m ermittelt, mit dem das Histogramm von einem Bildbereich zum nächsten verändert wird. Die Korrelationsfunktion

$$\begin{aligned} \kappa_{i;i+1}(m) &= \frac{1}{S} \sum_{s=0}^{S-1} h_i(s) h_{i+1}(ms) & \text{für } m \leq 1 \\ \kappa_{i;i+1}(m) &= \frac{1}{S} \sum_{s=0}^{S-1} h_i(s/m) h_{i+1}(s) & \text{für } m > 1 \end{aligned} \quad (2.50)$$

erreicht ihren Maximalwert, wenn m den Wert des günstigsten Skalierungsfaktors annimmt. Die obere Summationsgrenze ist $S - 1 = 255$, da die Intensitätswerte zwischen $s = 0$ und $s = 255$ liegen können. Die Definition der Korrelationsfunktion ist bezüglich m in zwei Abschnitte unterteilt, da die Histogramme $h_i(s)$ für $s \geq S$ nicht definiert sind. Wird die Histogramm-Skalierung für das Histogramm

$h_1(s)$ mit $m_1 = 1$ definiert, so ergeben sich mit den Maxima der Korrelationsfunktionen $\kappa_{1,2}(m)$, $\kappa_{2,3}(m)$ und $\kappa_{3,4}(m)$ die Skalierungen m_2 , m_3 und m_4 .

$$\max\left(\kappa_{i;i+1}(m)\right) = \kappa_{i;i+1}\left(\frac{m_{i+1}}{m_i}\right) \quad (2.51)$$

Versagt die Korrelationsmethode, welches durch Betrachten des Ergebnisses erkannt wird, kann mit der folgenden Methode des relativen Histogramm-Maximums eine befriedigendere Lösung versucht werden. Hierbei wird vorausgesetzt, daß ein heller ausgeprägter Bereich im Histogramm über alle vier Bildbereiche vorhanden bleibt, welches für die Mehrzahl der Meßdaten zutrifft. Relevant ist das Maximum von $h_i(s)$, welches für höchste Intensitäten s auftritt und die Bedingung erfüllt, daß sein Wert einen Schwellwert überschreitet, der beim Aufruf der Routine *vybricorr* in Form eines Parameters angegeben wird. Entweder muß der Funktionswert des Maximums $h_i(s_i)$ einen Schwellwert überschreiten

$$h_i(s_i) > T_M \max(h_i(s)), \quad (2.52)$$

oder die Bildfläche mit hohen Intensitäten einen vorgegebenen Anteil des Gesamtbildes ausmachen. Das Maximum ist gültig, wenn

$$\sum_{s=s_i}^{S-1} h_i(s) > T_J \sum_{s=0}^{S-1} h_i(s). \quad (2.53)$$

In beiden Fällen ist s_i die Intensität des relevanten Histogramm-Maximum. T_M und T_J werden beim Aufruf der Routine angegeben. Bei Bedarf können die Werte vom Defaultwert in den vorgegebenen Bereichen variiert werden.

$$\begin{array}{ll} T_M = 0,9 & 0 \leq T_M \leq 1 \\ T_J = 0,1 & 0 \leq T_J \leq 1 \end{array} \quad (2.54)$$

Bei der Berechnung der Skalierung zwischen den einzelnen Histogrammen wird wiederum der erste Bereich mit $m_1 = 1$ vorgegeben. Hiervon ausgehend sind

$$m_i = \frac{s_i}{s_{i-1}} m_{i-1}. \quad (2.55)$$

Bisher wurden jeweils vier Stützpunkte ermittelt, die die Beleuchtungsschwankungen repräsentieren. Die Skalierungsfaktoren m_i gelten für die Bereichsmittelpunkte x_i mit $i = 1$ bis $i = 4$, wobei aus den Stützstellen $(x_i; m_i)$ durch Interpolation die Beleuchtungsfunktion $m(x)$ abgeleitet werden soll.

Zur Interpolation bieten sich unterschiedliche Verfahren an, von denen hier zwei zur Auswahl gestellt werden. Die Verbindung der Stützpunkte durch einen

Strecken zug und somit $m(x)$ als stückweise lineare Funktion hat den Nachteil, daß $m(x)$ an den Stützstellen nicht stetig differenzierbar ist. Dieses würde den vorausgesetzten Eigenschaften der Beleuchtungsschwankungen widersprechen.

Die erste realisierte Möglichkeit ist die Interpolation durch ein Polynom, welches durch die Stützpunkte definiert ist. Es ist hierbei

$$m(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5, \quad (2.56)$$

wobei die Koeffizienten a_0 bis a_5 aus den Stützstellen ermittelt werden. Es wurde ein Polynom fünften Grades gewählt, da Interpolationspolynome außerhalb der Definitionsgrenzen $x < x_1$ und $x > x_4$ sehr schnell stark ansteigen, wodurch eine Extrapolation große Fehler hervorruft. Um die Extrapolation am Bildanfang und -ende zu vermeiden, werden empirisch zwei zusätzliche Stützstellen nach

$$\begin{aligned} m_0 &= m_1 - \frac{m_2 - m_1}{2}; & x_0 &= -x_1 \\ m_5 &= m_4 - \frac{m_3 - m_4}{2}; & x_5 &= X + x_1 \end{aligned} \quad (2.57)$$

gebildet. Zur Lösung der Interpolationsaufgabe wird das LARANGESche Interpolationspolynom herangezogen, welches sich durch die äquidistante Anordnung der Stützstellen mit

$$x_{i+1} - x_i = \Delta x \quad (2.58)$$

zur Form

$$\begin{aligned} m(x) &= -m_0 \frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)(x-x_5)}{120\Delta x} + \\ & m_1 \frac{(x-x_0)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)(x-x_5)}{24\Delta x} - \\ & m_2 \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_3)(x-x_4)(x-x_5)}{12\Delta x} + \\ & m_3 \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)(x-x_4)(x-x_5)}{12\Delta x} - \\ & m_4 \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_5)}{24\Delta x} + \\ & m_5 \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)}{120\Delta x} \end{aligned} \quad (2.59)$$

vereinfacht. Für die Anwendung müssen die Koeffizienten aus Gleichung (2.56) nicht explizit berechnet werden, hierfür ist Gleichung (2.59) ausreichend.

Obwohl das eigentliche Problem der Interpolationspolynome, die Ausartung zwischen den Stützstellen, bei der Anwendung auf die Daten der Line-Scan-Camera nicht beobachtet wurde, ist zur Sicherheit auch die Interpolation durch Splines programmiert worden.

Um starke Schwankungen zwischen den Stützstellen zu vermeiden, setzt man bei der Spline-Interpolation Kurvenstücke von Polynomen niedrigen Grades zusammen, die an den Anschlußstellen neben dem Funktionswert zusätzlich bezüglich ihrer ersten und zweiten Ableitung zusammenpassen. Spline-Funktionen werden nicht durch einen geschlossenen Ausdruck angegeben. Speziell für das vorliegende Problem sollen natürliche kubische Spline-Funktionen angewendet werden. Dieses bedeutet, daß sich die Interpolationsfunktion außerhalb des Intervalls $[x_1, x_4]$ für Extrapolation auf die Tangente der Funktion an den Stützstellen x_1 und x_4 reduziert und daß die einzelnen Spline-Funktionen aus Polynomen dritten Grades bestehen. Im Intervall $[x_1, x_4]$ ist die Beleuchtungsschwankung also

$$m(x) \equiv M_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 \quad (2.60)$$

für $x_i \leq x \leq x_{i+1}$,

wobei der Index von $i = 1$ bis $i = 3$ bedeutet, daß die Koeffizienten von drei Interpolationspolynomen berechnet werden müssen. Um die zwölf Koeffizienten zu bestimmen, werden zwölf Bestimmungsgleichungen aufgestellt, deren Bedingungen bei der Definition der natürlichen kubischen Splines gegeben wurden. Diese sind:

$$\begin{aligned} M_i(x_i) &= m_i && \text{für } i = 1 \text{ bis } i = 3 \\ M_3(x_4) &= m_4 \\ M_i(x_i) &= M_{i-1}(x_i) && \text{für } i = 2 \text{ und } i = 3 \\ M'_i(x_i) &= M'_{i-1}(x_i) && \text{für } i = 2 \text{ und } i = 3 \\ M''_i(x_i) &= M''_{i-1}(x_i) && \text{für } i = 2 \text{ und } i = 3 \\ M''_1(x_1) &= 0 \\ M''_3(x_4) &= 0 \end{aligned} \quad (2.61)$$

Die ersten Bedingungen, die sich auf die Funktionswerte beziehen, gewährleisten, daß die Spline-Funktion durch die Stützstellen (x_i, m_i) verläuft. Die Gleichsetzung der ersten und zweiten Ableitungen sich berührender Polynome ruft hervor, daß die Spline-Funktion an den Stützstellen glatt verläuft. Die rechtsseitigen und linksseitigen Grenzwerte von Steigung beziehungsweise Krümmung sind an den Stützstellen gleich. Die beiden letzten Bedingungen rufen hervor, daß die Krümmung der Spline-Funktion an den Intervallgrenzen x_1 und x_4 verschwinden und somit die Funktion auch an diesen Stützstellen zweimal stetig differenzierbar ist, an denen sie in die Tangenten übergeht.

Auf die Darstellung der Berechnung aller einzelnen Koeffizienten sei hier verzichtet, eine anschauliche Vorgehensweise ist von ENGELN-MÜLLGES und REUTER [1984] dargestellt. Es muß hierbei nicht etwa ein Gleichungssystem vom Grad $4n$ gelöst werden, wobei n der Anzahl der Spline-Polynome entspricht. Kern der Berechnung ist ein Gleichungssystem des Grades $n - 1$, dessen Lösung im vorliegenden Fall auf der Hand liegt. Allgemein bildet sich die Koeffizientenmatrix dieses Gleichungssystems als tridiagonal und diagonal dominant aus, wodurch es stets lösbar und numerisch leicht zu behandeln wird [ENGELN-MÜLLGES und REUTER, 1984].

Nach Ermittlung der Beleuchtungsfunktion $m(x)$ durch Gleichung (2.59) oder Gleichung (2.60) werden bei Anwendung der Routine *vybricorr* die Bilddaten nach

$$s^*(x, y) = \frac{\max(m)}{m(x)} s(x, y) \quad (2.62)$$

korrigiert. Die korrigierte Bildfunktion $s^*(x, y)$ und die gestörte Bildfunktion $s(x, y)$ sind als ein Beispiel in Abbildung 2.5 dargestellt. Die Normierung in Gleichung (2.62) gewährleistet, daß dunkle Bereiche den hellen angeglichen werden und nicht umgekehrt. Zur Kontrolle der abgeleiteten Beleuchtungsfunktion liefert die Routine *vybricorr* optional auch die Funktion $m(x)$ normiert, wie sie im Diagramm der Abbildung 2.5 dargestellt ist.

Ein Erfolg der Korrektur ist auch anhand der Grauerthistogramme des Gesamtbildes aus Abbildung 2.5 zu erkennen, wie sie in Abbildung 2.7 wiedergegeben sind. Für das unkorrigierte Bild ergibt sich die Summe der Grauerthistogramme aus Abbildung 2.6. Beim Vergleich wird deutlich, daß die beiden dominanten Bereiche dem gleichen Eistyp zuzuordnen sind. Während mit dem Grauerthistogramm des unkorrigierten Bildes keine Segmentierung durchzuführen wäre, trennen sich die Bildbereiche im Histogramm des korrigierten Bildes mit relativ schmalen Übergängen.

2.2 Infrared-Line-Scanner (IRLS)

Die Störungen in den Bilddaten des Infrared-Line-Scanner unterscheiden sich grundsätzlich von denen der Line-Scan-Camera, da die technische Realisierung dieses Scanners auf anderen Prinzipien beruht. Gestörte Bildzeilen treten bei extremen Einsatztemperaturen unter -35°C auf. Sie finden ihre Ursache wahrscheinlich im Frequenzvervielfacher zur Erzeugung des Bildpunktakts [BOCHERT, 1992]. Diese Fehlfunktion soll für spätere Einsätze behoben werden. Zur Kalibration des Temperaturbildes sind im Infrared-Line-Scanner zwei temperierte Referenzplatten integriert. Mit der Bestimmung deren Temperatur und Messung

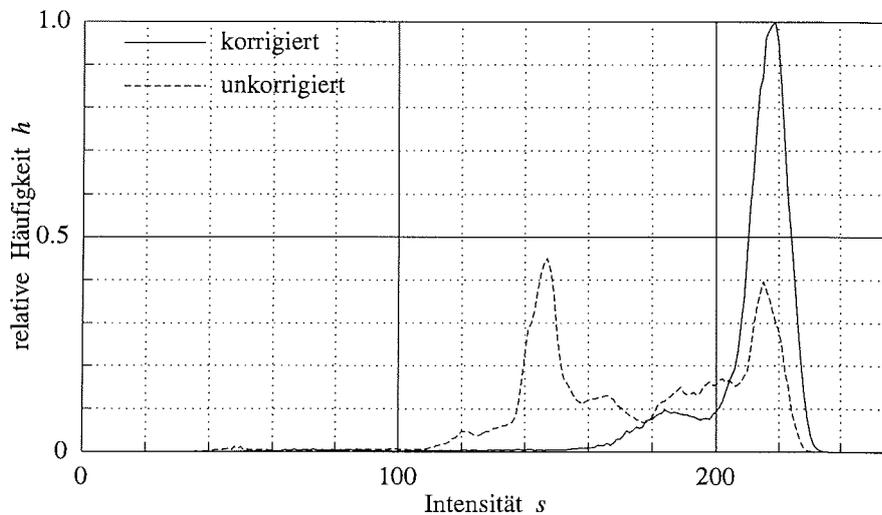


Abbildung 2.7: Grauwertistogramme der korrigierten und unkorrigierten Bilddaten aus Abbildung 2.5. Das Maximum um $s = 50$ ist in diesem Abbildungsmaßstab nicht mehr gut zu erkennen.

der Strahlung durch den Strahlungsempfänger kann jede einzelne Bildzeile kalibriert werden. Die spezielle Abtastgeometrie des Scanners hat zur Folge, daß die aufgenommenen Bildelemente auf dem Untergrund nicht die gleiche Fläche repräsentieren, es tritt eine geometrische Verzerrung auf. Des weiteren muß der Einfluß der Atmosphäre und Fremdstrahlung untersucht werden.

Gestörte Bildzeilen. In den Bilddaten des Infrarot-Line-Scanners treten zwei unterschiedliche Arten von gestörten Bildzeilen auf. Bei der Störung einer gesamten Bildzeile haben alle Bildpunkte entweder einen konstanten oder einen zufälligen Wert, der nicht mit den Werten der Nachbarzeilen in Verbindung steht. Die Zeilen mit diesen Störungen sollen ähnlich der Behandlung im Abschnitt 2.1.1 durch die vorherige Bildzeile ersetzt werden.

Weitere Bildstörungen treten bei extremen Einsatztemperaturen auf. Sie äußern sich durch zunehmend eingefügte Bildpunkte mit dem Wert 255 zwischen den Meßwerten. Durch jeden gestörten Bildpunkt wird der Informationsgehalt der Bildzeile um einen Bildpunkt nach rechts verschoben. Die gestörten Bildpunkte sollen erkannt und die Zeilen so geordnet werden, daß der ursprüngliche Zustand hergestellt wird. Die Bildpunkte, die durch die Verschiebung über den rechten Rand hinausgeschoben wurden und somit verloren sind, sollen durch die entsprechenden Bildpunkte der vorherigen Zeile ersetzt werden.

Die Störungen durch Temperatureinfluß vergrößern sich bei abnehmender Temperatur, so daß die Bilddaten teilweise nicht für die Auswertung verwendet werden können.

Temperaturkalibration. Zur Kalibration des Temperaturbildes sind im Infrarot-Line-Scanner zwei temperierte Referenzplatten integriert. Während der Messung werden ihre Temperaturen am oberen beziehungsweise unteren Bereich des Meßbereichs geregelt. Die aktuelle Temperatur der Referenzplatten wird mittels Temperaturfühler gemessen, die dicht unter der Oberfläche angeordnet sind. Während der Aufnahme der einzelnen Bildzeilen wird neben der Strahlung des Untergrunds am Anfang und Ende der Bildzeile auch die Strahlungsintensität der Referenzplatten gemessen. Über diese Messungen können den Strahlungsintensitäten absolute Temperaturen zugeordnet werden. Bei der Anwendung des Auswerteprogramms IRCALC [BOCHERT, 1992] hat sich gezeigt, daß die Kalibration des Temperaturbildes mit dieser Methode ein streifiges Bild erzeugt, wie es auch charakteristisch für Aufnahmen mit Line-Scannern ist, die im thermischen Infrarot empfindlich sind [SABINS, 1986]. Bei älteren Systemen wird diese Streifigkeit durch die Drift der Infrarotsensoren hervorgerufen. Diese Drift wird durch die Referenzmessungen ausgeglichen. Beim Infrarot-Line-Scanner liefert die Kalibration ein unbefriedigendes Ergebnis, da beim Meßeinsatz die turbulente Luftströmung an den Referenzplatten deren Oberflächen zeitlich variiert abkühlt. Die Variationen sind so hochfrequent, daß sie sich nicht auf die Temperaturfühler, die sich direkt unter der Oberfläche befinden, wohl aber auf die Ausstrahlung auswirken. Dieser störende Einfluß soll bei der Kalibration beachtet und ausgeglichen werden.

Geometrische Verzerrung. Bei der Verwendung des Infrarot-Line-Scanners, bei dem die Abtastung des Untergrundes mittels Drehspiegel erfolgt, tritt eine geometrische Verzerrung auf. Die Abtastung der Bildpunkte erfolgt nicht im gleichen räumlichen Abstand auf dem Grund, sondern mit gleichem Winkelabstand der Empfangsrichtung, da der Bildpunkttakt aus der Stellung des rotierenden Abtastspiegel abgeleitet wird. Als Ergebnis wird der mittlere Bildbereich gestreckt und die äußeren Bildbereiche gestaucht aufgenommen. Diese geometrische Verzerrung soll ausgeglichen werden, damit die Bilddaten winkel- und flächentreu sind und mit den Bilddaten der Line-Scan-Camera kombiniert werden können.

Fremdstrahlung. Als Fremdstrahlung wird die gemessene Strahlung bezeichnet, die den Strahlungssensor erreicht, aber nicht über den vorgesehenen Strahlengang, also der Spiegeloptik, vom zu messenden Untergrund ausgeht. Der Anteil der Fremdstrahlung kann nur mit großem Aufwand meßtechnisch am Infrarot-Line-Scanner bestimmt werden. Daher sollen anhand der Bilddaten Untersuchungen bezüglich der Fremdstrahlung durchgeführt werden. Wegen der zeilenweisen Kalibration ist hierbei nicht der absolute, sondern der relative Anteil von Bedeutung, der durch unterschiedliche Aufnahmewinkel hervorgerufen wird.

Atmosphärischer Einfluß und Emissivität der Erdoberfläche. Die bisher angeführten Probleme sind durch die Konstruktion des Infrared-Line-Scanners bedingt. Hinzu kommen noch die eingeschränkte Transmission der Atmosphäre und Emissivität der Erdoberfläche. Für die Behandlung dieser Probleme ist wichtig, daß diese Medien Strahlungsanteile absorbieren, reflektieren und transmittieren, wobei sich nach dem KIRCHHOFFSchen Gesetz diese Anteile immer zu Eins ergänzen. Hat die Atmosphäre also eine eingeschränkte Transmission, so wird von ihr auch Strahlung von anderen Körpern reflektiert und absorbiert. Der Absorptionsgrad entspricht dem Emissionsgrad, so daß auch die Temperatur der Atmosphäre die Messung beeinflusst. Die Strahlungseigenschaften der unteren Atmosphäre in polaren Regionen hängen im wesentlichen von ihrer Temperatur, Feuchte und ihrem Kohlendioxidgehalt ab. Erst bei der Fernerkundung von Satelliten aus müssen noch weitere Gase berücksichtigt werden, die in der oberen Atmosphäre und Stratosphäre vorhanden sind. Hier ist das Ozon erwähnenswert, welches im Bereich von $9,4 \mu\text{m}$ bis $9,8 \mu\text{m}$ eine Absorptionsbande aufweist und somit die Temperaturmessung im Wellenlängenbereich von $8 \mu\text{m}$ bis $12 \mu\text{m}$ beeinflusst.

Die Emissivität der zu messenden Oberflächen, also Schnee, Eis und Wasser, entspricht nur angenähert der eines schwarzen Strahlers. Die eingeschränkte Emissivität bedeutet, daß die Oberflächen thermische Strahlung aus der Atmosphäre zum Line-Scanner reflektiert. Das Verhältnis der Oberflächentemperatur und Temperatur der Atmosphäre bestimmt, ob die gemessenen Temperaturen zu hoch oder niedrig sind. Die Emissivitäten des Untergrundes sind neben der spektralen Abhängigkeit auch vom Winkel der Ausstrahlung abhängig.

Bei der Auswertung der Temperaturbilder, die mit dem Infrared-Line-Scanner erfaßt wurden, sollen Untersuchungen durchgeführt werden, die den Meßfehler, der durch den atmosphärischen Einfluß und die eingeschränkte Emissivität der Erdoberfläche hervorgerufen wird, in seiner Größenordnung bestimmt. Wenn nötig und möglich, soll dieser Fehler korrigiert werden.

Die Funktionswerte $s(x, y)$ repräsentieren bei den Bilddaten des Infrared-Line-Scanners die Strahlungsintensitäten im Spektralbereich von $8 \mu\text{m}$ bis $12 \mu\text{m}$. Erst durch die Temperaturkalibration kann diesen Funktionswerten eine absolute Temperatur zugeordnet werden. Hierfür werden während der Datenerfassung Referenzmessungen durchgeführt, deren Ergebnisse zusammen mit den Bilddaten gespeichert werden. Im Anhang B.1.1 ist dokumentiert, in welchem Format diese Daten nach der Konvertierung im VIFF-Format vorliegen.

2.2.1 Kalibration des Temperaturbildes

Allein mit einem Strahlungsempfänger ist es nicht möglich, im Spektralbereich von $8 \mu\text{m}$ bis $12 \mu\text{m}$ absolute Intensitäten zu messen und darüber auf die Strah-

lungstemperatur der Gegenstände zu schließen, von denen die Strahlung ausgeht. Die Halbleitersensoren, im Infrared-Line-Scanner ein Fotowiderstand aus Quecksilber-Cadmium-Tellurid (HgCdTe), unterliegen einer Drift mit Perioden bis minimal einigen Sekunden. Die Auswirkung dieser Drift ist im Vergleich zum empfangenen Signal so groß, daß der Videoverstärker des Infrared-Line-Scanners entweder oft übersteuert würde oder seine Verstärkung so weit herabgesetzt werden müßte, daß auch die Signaldynamik unvertretbar verringert würde. Beim Infrared-Line-Scanner wird dieses Problem durch einen Videoverstärker mit programmierbarem Offset gelöst [BOCHERT, 1992]. Während der Datenerfassung im Personal-Computer werden die Meßdaten an den Referenzplatten unter Berücksichtigung des gewählten Meßbereichs beobachtet und die Drift des Strahlungssensors durch Variation des Offsets des Videoverstärkers ausgeglichen. Der Offset des Videoverstärkers kann nur in diskreten Schritten verändert werden. Daher treten in den unkalibrierten Bilddaten des Infrared-Line-Scanners in Richtung der Flugbewegung (y) Intensitätssprünge auf.

Neben den relativen Strahlungsmessungen $s^*(x, y)$ in der Szene werden auch die Strahlungen der linken $s_l(y)$ und rechten $s_r(y)$ Referenzplatte gemessen. Durch die Temperaturmessung in den Referenzplatten (links: $\vartheta_l(y)$; rechts: $\vartheta_r(y)$) kann nun jedem relativen Wert $s^*(x, y)$ eine absolute Temperatur zugeordnet werden. Nach Anwendung der Routine *vtempcal* liegen die Bilddaten $s(x, y)$ als kalibrierte Temperaturwerte vor.

Mit $\vartheta(x, y)$ als Temperaturverteilung und $s(x, y)$ als gespeicherte Ergebnisdaten ergibt sich folgende Beziehung:

$$\vartheta(x, y) = \vartheta_{off} + \frac{\Delta\vartheta}{S-1} s(x, y) \quad (2.63)$$

Hierbei sind ϑ_{off} als Temperaturoffset und $\Delta\vartheta$ als Temperaturbereich im VIFF-Header in der Kommentarzeile gespeichert. $S = 256$ gibt den Wertebereich für $s(x, y)$ an. Beim Einsatz der Routine *vtempcal* werden die Bilddaten $s(x, y)$ nach

$$s(x, y) = a_1(y) s^*(x, y) + a_0(y) \quad (2.64)$$

berechnet, wobei der lineare Zusammenhang zwischen $s(x, y)$ und $s^*(x, y)$ durch Labormessungen bestätigt wurde. Die Koeffizienten $a_1(y)$ und $a_0(y)$ ergeben sich durch die Messungen an der linken und rechten Referenzplatte.

$$a_1(y) = \frac{\vartheta_r(y) - \vartheta_l(y)}{s_r(y) - s_l(y)} \frac{S-1}{\Delta\vartheta} \quad (2.65)$$

$$a_0(y) = \left(\vartheta_l(y) - \vartheta_{off} \right) \frac{S-1}{\Delta\vartheta} - s_l(y) a_1(y) \quad (2.66)$$

Der Temperaturoffset ϑ_{off} und Temperaturbereich $\Delta\vartheta$ werden entweder entsprechend der Einstellungen während der Datenerfassung gewählt oder erst beim Aufruf von *vtempcal* definiert. Hierbei ist eine direkte Vorgabe oder automatische Wahl möglich. Siehe auch Anhang B.3.1.

Wenn man die Temperaturkalibration mit der Routine *vtempcal* durchführt und die Ausgangsdaten der Referenzmessungen verwendet, entsteht ein streifiges Ergebnisbild. Dieses bedeutet, daß die Koeffizienten $a_0(y)$ und $a_1(y)$ aus Gleichung (2.64) störenden Variationen unterliegen. Diese haben zwei Ursachen. Zum einen werden die Oberflächen der Referenzplatten während des Meßbetriebs durch turbulente Luftströmung zeitlich variiert abgekühlt. Die Variationen sind so hochfrequent, daß sie sich nicht auf die Temperaturfühler, die sich dicht unter der Oberfläche befinden, wohl aber auf die Ausstrahlung auswirken. Zum anderen unterliegen die Referenzmessungen einem Quantisierungsrauschen, da sie mit endlicher Auflösung erfaßt werden. Wesentlich wirkt sich das Quantisierungsrauschen bei den Temperaturmessungen $\vartheta_l^*(y)$ und $\vartheta_r^*(y)$ (der * bezeichnet im Gegensatz zu den Gleichungen (2.65) und (2.66) die ursprünglichen Meßdaten) aus, da diese Temperaturen nur etwa jede Sekunde gemessen werden und sich in diesen Zeitabständen Änderungen von bis zu $0,2^\circ\text{C}$ einstellen können. Die hochfrequente Registrierung von $\vartheta_l^*(y)$ und $\vartheta_r^*(y)$ ist also durch sprunghafte Werteänderungen charakterisiert.

Diesem Problem wird durch Anwendung der Routine *vtempcorr* wie folgt abgeholfen. Kontinuierliche Temperaturverläufe $\vartheta_l(y)$ und $\vartheta_r(y)$ werden aus $\vartheta_r^*(y)$ beziehungsweise $\vartheta_l^*(y)$ abgeleitet, indem nur die Temperaturwerte als gültig übernommen werden, die zum Zeitpunkt der Messung gespeichert wurden, also die Werte nach den sprunghaften Änderungen. Die hiermit entstehenden Lücken werden durch einen Polygonzug entlang der gültigen Meßwerte aufgefüllt. Anschließend werden diese Meßreihen durch einen symmetrischen Mittelwerttiefpas gefiltert, wobei die Anzahl der Werte zur Mittelwertbildung aus dem Abstand der signifikanten Temperaturmessungen abgeleitet wird. Diese Anzahl entspricht dem doppelten mittleren Abstand. Ergebnis dieser Berechnungen sind Temperaturwerte $\vartheta_l(y)$ und $\vartheta_r(y)$ ohne Quantisierungsrauschen.

Zur Verbesserung der Strahlungsmessungen $s_l(y)$ und $s_r(y)$ wird zugrunde gelegt, daß die Steigung $a_1(y)$ in Gleichung (2.64) sich nur linear zu y verändert. Es werden analog zu Gleichung (2.65) die vorläufigen Koeffizienten aus den Originalmessungen $s_l^*(y)$ und $s_r^*(y)$ bestimmt.

$$a_1^*(y) = \frac{\vartheta_r(y) - \vartheta_l(y)}{s_r^*(y) - s_l^*(y)} \frac{S - 1}{\Delta\vartheta} \quad (2.67)$$

Die Koeffizienten $a_1(y)$ werden aus $a_1^*(y)$ durch die Anwendung der linearen Regression bestimmt, wobei nur die Werte berücksichtigt werden, bei denen die absoluten Differenzen in Gleichung (2.67) einen empirischen Wert überschreiten

$$(|\vartheta_r(y) - \vartheta_l(y)| > 3^\circ\text{C}; \quad |s_r^*(y) - s_l^*(y)| > 12).$$

Zur Bestimmung von $a_0(y)$ werden die Meßreihen $s_l^*(y)$ und $s_r^*(y)$ geglättet. Da diese Strahlungsgrößen durch die Offsetregelung des Videoverstärkers sprunghafte Änderungen beinhalten, müssen die Meßreihen zuerst in Teilbereiche zwischen den Sprüngen unterteilt werden. Diese Teilbereiche werden separat voneinander behandelt. Schaltstellen des Videooffsets werden erkannt, wenn

$$(s_l^*(y) + s_r^*(y)) - (s_l^*(y-1) + s_r^*(y-1)) > T. \quad (2.68)$$

Da der Schwellwert T von den Einstellungen des Videoverstärkers abhängt, kann er als Parameter beim Aufruf von *vtempcorr* angegeben werden (Defaultwert: $T = 4$). In diesen Teilbereichen werden die beiden Randbereiche (10 Meßwerte) durch ihre lineare Regression ersetzt und darauf die gesamten Teilbereiche separat voneinander durch einen Mittelwertiefpaß gefiltert. Analog zu Gleichung (2.66) könnten nun die Koeffizienten $a_0(y)$ berechnet werden. Die Routine *vtempcal* berechnet die Koeffizienten $a_1(y)$ und $a_0(y)$ jedoch aus den Referenzmessungen, so daß das Ergebnis von *vtempcorr* diese Daten bereitstellen muß. Da $a_1(y)$ durch lineare Regression des Ergebnisses von Gleichung (2.67) vorliegt, wird nur eine Meßreihe der Strahlungsmessungen $s_l(y)$ oder $s_r(y)$ verwendet und die andere über Gleichung (2.65) berechnet. Zunächst wird somit entschieden, welche Meßreihe, $s_l(y)$ oder $s_r(y)$, den geringsten Schwankungen unterliegt. Ist dieses zum Beispiel $s_l(y)$, so berechnet sich nach Gleichung (2.65)

$$s_r(y) = \frac{\vartheta_r(y) - \vartheta_l(y)}{a_1(y)} \frac{S-1}{\Delta\vartheta} + s_l(y). \quad (2.69)$$

Durch das beschriebene Verfahren wurde den störenden hochfrequenten Signalschwankungen und dem Quantisierungsrauschen Rechnung getragen. Durch die Kenntnis, daß sich $a_1(y)$ nur langsam und stetig verändert, wurde auch das Problem gelöst, daß die Referenzplatten zeitweilig ähnliche Temperaturen aufweisen können und somit die Differenzen in Gleichung (2.65) klein und die Fehler bei der Bestimmung von $a_1(y)$ groß werden.

2.2.2 Elimination gestörter Bildzeilen

Auch bei der Erkennung der gestörten Zeilen in den Bilddaten des Infrared-Line-Scanners wird auf die Anwendung der Gleichung (2.1) verzichtet, da diese durch einen empirischen Ansatz sicherer und schneller erkannt werden. Wegen der systemspezifischen Eigenart der Fehler kann nicht auf die Lösungsmöglichkeit zur Korrektur der gestörten Bildzeilen bei der Behandlung der Daten der Line-Scan-Camera zurückgegriffen werden.

In den Bilddaten des Infrarot-Line-Scanners treten zwei unterschiedliche Arten von gestörten Bildzeilen auf. Bei der Störung einer gesamten Bildzeile haben alle Bildpunkte entweder einen konstanten oder einen zufälligen Wert, der nicht mit den Werten der Nachbarzeilen in Verbindung steht. Da häufig die gesamte Bildzeile den Maximalwert $S - 1 = 255$ enthält, wird dieses als erstes Kriterium zur Fehlererkennung herangezogen. Ist

$$\sum_{x=0}^{X-1} (s(x, y) = (S-1) \wedge s(x, y-1) \neq (S-1) \wedge s(x, y+1) \neq (S-1)) > \frac{X}{2}, \quad (2.70)$$

so wird die Bildzeile y als gestört erkannt. Für die Störung mit zufälligen Werten werden die Differenzen von benachbarten Bildpunktintensitäten untersucht. Die Bildzeile y gilt als gestört, wenn

$$\sum_{x=0}^{X-1} ((|s(x, y) - s(x, y-1)| > 5) \wedge (|s(x, y) - s(x, y+1)| > 5)) > \frac{X}{2}, \quad (2.71)$$

also mindestens die Hälfte der Bildpunkte hohe Differenzen zu Nachbarbildpunkten aufweisen. Wenn eine der beiden Bedingungen aus Gleichung (2.70) oder (2.71) erfüllt ist, wird die betreffende Zeile durch die in Flugrichtung vorhergehende Bildzeile ersetzt.

Eine weitere Art von Bildstörungen tritt bei extremen Betriebstemperaturen des Infrarot-Line-Scanners auf. Sie äußern sich durch zunehmend eingefügte Bildpunkte mit dem Maximalwert $S - 1 = 255$ zwischen den Meßwerten. Durch jeden gestörten Bildpunkt wird der Informationsgehalt der Bildzeile um einen Bildpunkt nach rechts verschoben. Die gestörten Zeilen erhalten ein gepunktetes Aussehen, wobei der Punktabstand unter zehn Bildpunkte liegt und der gestörte Bereich bündig am rechten Bildrand anschließt. Zur Erkennung dieser Störungen werden in den Zeilen die Bildpunkte gezählt, die in der Vierernachbarschaft isoliert den maximalen Wert $S - 1$ aufweisen. Wenn der Anteil mindestens ein Zehntel des gestörten Bereichs ausmacht, wird die Bildzeile als gestört bearbeitet. Das bedeutet, daß für jeden gestörten Bildpunkt der auf der rechten Seite liegende Zeilenabschnitt um einen Bildpunkt nach links verschoben wird, wodurch der gestörte Bildpunkt überschrieben wird. Nach Behandlung aller gestörten Bildpunkte der Zeile ist der rechte Bildrand durch die Verschiebung undefiniert. Dieser Bereich wird durch die in Flugrichtung vorhergehende Teilzeile ersetzt. Diese Störungen, die durch niedrige Betriebstemperaturen entstehen, vergrößern sich mit abnehmenden Temperaturen, so daß die Bilddaten teilweise nicht für die Auswertung verwendet werden können.

2.2.3 Geometrische Entzerrung

Die mit dem Infrared-Line-Scanner erfaßten Bilddaten sind in Richtung der Koordinate senkrecht zur Flugrichtung nicht winkeltreu. Um bei der Auswertung der Daten prozentuale Bedeckungen berechnen zu können, besonders für die Kombination dieser Bilddaten mit den Daten der Line-Scan-Camera, muß diese geometrische Verzerrung ausgeglichen werden.

Die Verzerrung tritt durch die Abtastung des Untergrundes mit einem optomechanischen System auf. Die Entfernung vom Scanner zum Untergrund ist an den beiden Randzonen der Bildzeilen größer als im Nadir. Daher ist die Auflösung am linken und rechten Rand kleiner als in der Mitte der Bilddaten. Bild 2.8 macht die Entstehung dieser Verzerrung deutlich. Der Abtastspiegel des Infrared-Line-Scanner rotiert mit konstanter Winkelgeschwindigkeit und die Abtastung erfolgt mit konstanter Frequenz. Hierdurch wird der mittlere Bildbereich gestreckt und die äußeren Bereiche gestaucht aufgenommen. Typisch ist bei dieser Darstellung, daß gerade Strukturen zu einer S-Form entarten.

Zur Entzerrung der Bilddaten ist eine nichtlineare Koordinatentransformation notwendig, wobei x^* der ursprünglichen verzerrten und x der erwünschten unverzerrten Bildpunktcoordinate entspricht. In Abbildung 2.8 ist zu erkennen, daß Ω dem Gesamtwinkel der Bildzeilenaufnahme und

$$\omega' = \frac{\Omega}{X-1} \quad (2.72)$$

dem Winkelinkrement der Abtastung entspricht. Hiermit ergibt sich der Zusammenhang der beiden Koordinaten x^* und x zu

$$\tan\left(\frac{\Omega}{2} - x^* \omega'\right) = \frac{\frac{X-1}{2} - x}{h}, \quad (2.73)$$

wobei sich h , die Flughöhe während der Datenerfassung, auch als

$$h = \frac{X-1}{2 \tan \frac{\Omega}{2}} \quad (2.74)$$

ausdrücken läßt.

Löst man Gleichung (2.73) nach x^* auf und setzt die Gleichungen (2.72) und (2.74) ein, so erhält man die Koordinatentransformation zu

$$x^* = \frac{X-1}{2} - \frac{X-1}{\Omega} \arctan \frac{\frac{X-1}{2} - x}{\frac{X-1}{2 \tan \frac{\Omega}{2}}}. \quad (2.75)$$

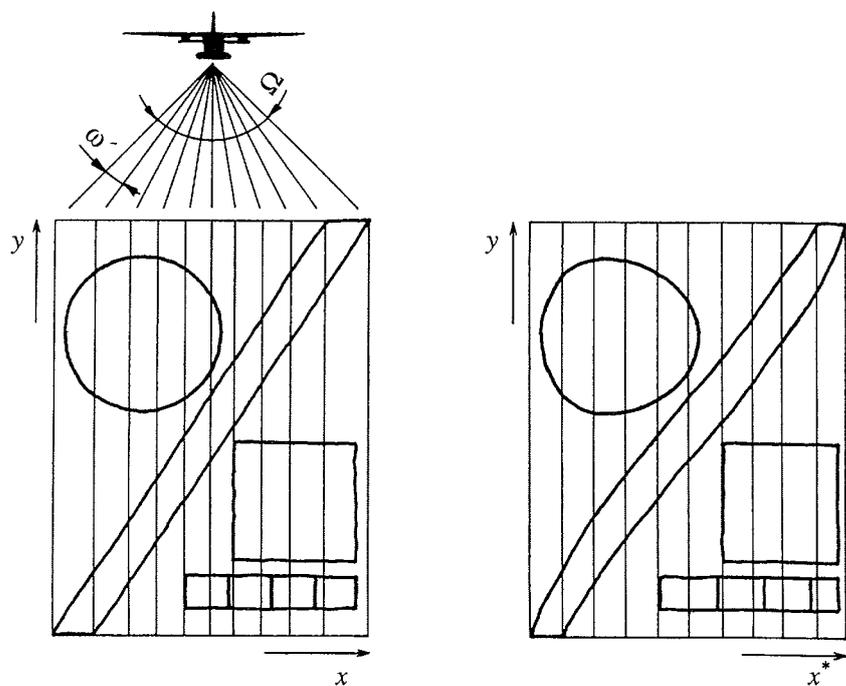


Abbildung 2.8: Verzerrung der Bilddaten bei Verwendung von Line-Scannern mit optomechanischem Abtastsystem. Links ist der abgetastete Untergrund und rechts das gespeicherte Bild dargestellt.

Während der Datenerfassung werden die Werte $s^*(x^*, y)$ für ganzzahlige x^* gespeichert und auch das Ergebnis $s(x, y)$ soll nur für ganzzahlige x berechnet werden. Bei Abbildung der Transformation nach Gleichung (2.75) tritt aber der Fall ein, daß die berechneten Werte x^* nicht ganzzahlig sind und somit keine Bildpunktpositionen im verzerrten Bild bezeichnet werden. Naheliegender wäre, einen gewichteten Mittelwert der beiden naheliegendsten Bildpunkte heranzuziehen, wobei die Gewichtung der Positionen der Koordinate x^* entsprechen würde. Diese lineare Interpolation hätte jedoch eine unerwünschte glättende Eigenschaft, ähnlich einem Tiefpaßfilter.

Um diesen Tiefpaßeffect zu vermeiden wird bei der Koordinatentransformation die Spline-Interpolation verwendet. Auf die Berechnung von natürlichen kubischen Splines wurde schon im Abschnitt 2.1.4 eingegangen. Es wird bei der Transformation von

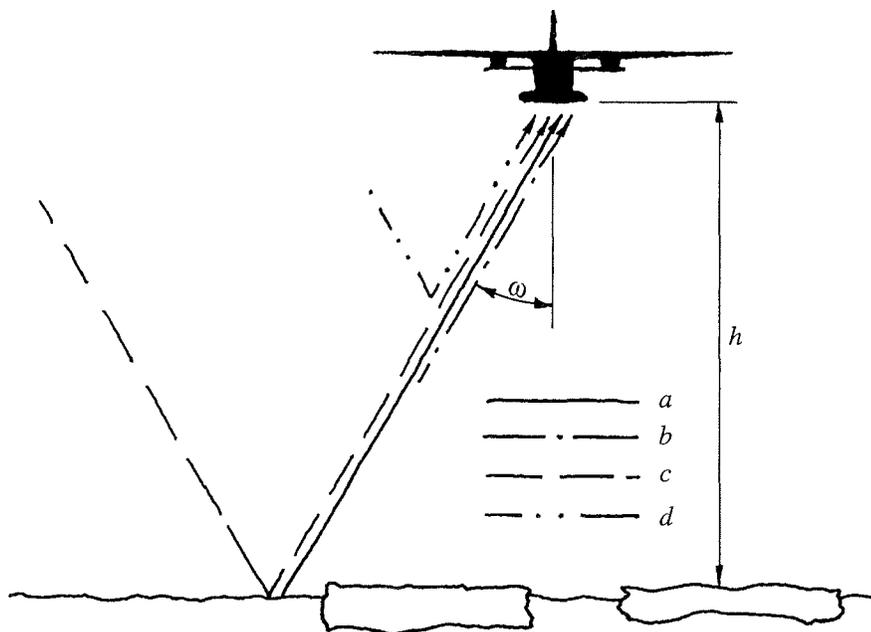


Abbildung 2.9: Strahlungsanteile, die bei der Temperaturmessung mit dem Infrarot-Line-Scanner betrachtet werden. a : relevante Ausstrahlung von der Erdoberfläche, jedoch gedämpft durch die Atmosphäre; b : nach oben gerichtete Ausstrahlung der Atmosphäre; c : nach unten gerichtete Ausstrahlung der Atmosphäre, die am Erdboden reflektiert wird; d : nach unten gerichtete Ausstrahlung der Atmosphäre, die in der Atmosphäre reflektiert wird. Anteil d kann bei der Temperaturmessung mit dem Infrarot-Line-Scanner vernachlässigt werden.

$$s(x, y) = s^*(x^*, y) \quad (2.76)$$

unter Berücksichtigung von Gleichung (2.75) bei jeder gebrochenzahligen Bildpunktposition von x^* eine Spline-Interpolation herangezogen, die Intensitätswerte der vier nächstgelegenen Bildpunktpositionen berücksichtigt.

2.2.4 Atmosphärischer Einfluß und Emissivität der Erdoberfläche

Die thermische Infrarotstrahlung im Wellenlängenbereich von $\lambda = 8 \mu\text{m}$ bis $\lambda = 12 \mu\text{m}$, die vom Infrarot-Line-Scanner empfangen wird, hat neben dem relevanten Anteil vom Untergrund noch Anteile aus der Atmosphäre. Abbildung 2.9 verdeutlicht die einzelnen Anteile, die im folgenden beschrieben werden. Der

Hauptteil (*a*) der Strahlung geht vom zu messenden Untergrund aus und ist über das PLANCKsche Strahlungsgesetz von der Temperatur des strahlenden Körpers abhängig. Als Temperatur ist die Oberflächentemperatur der Körper relevant. Dieses ist bei der Interpretation der Meßdaten besonders wichtig, da hiermit entsprechend der Wellenlängen ($8\ \mu\text{m}$ bis $12\ \mu\text{m}$) nur die obersten Mikrometer ausschlaggebend sind. Im Wasser bedeutet dieses, daß mit dem Infrarot-Line-Scanner die Temperatur der Oberflächenschicht erfaßt wird, die durch den Energieaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre beeinflusst ist. Nach MINNETT [1990] und KEY und HAEFLIGER [1992] ist diese Schicht wegen der Verdunstung um einige zehntel Kelvin kälter als das Temperaturmittel der oberen Zentimeter. Die Sonnenstrahlung erwärmt diese Oberfläche nicht, da kurzwellige Strahlung im Wasser gut transmittiert wird und die Absorption über viele Meter Wassertiefe verteilt ist. Diese Inhomogenität bereitet auch Schwierigkeiten beim Temperaturvergleich zwischen der Strahlungsmessung und *in situ* Messungen mit Kontaktthermometern.

Im Sommer wurden während der Polarsternexpedition ARK IX/2 ähnliche Effekte bezüglich der Oberflächentemperatur von Schnee beobachtet. Da der Schnee die Sonnenstrahlung aber nur gering transmittiert, erwärmt diese kurzwellige Strahlung die Oberfläche. Sublimation erwirkt eine Abkühlung der Oberfläche. Beide Effekte sind stark durch die Topographie bestimmt. So wurde zum Beispiel an einem meterhohen Schneehügel bei bedecktem Himmel, also diffuser kurzwelliger Einstrahlung, auf der windzugewandten Seite eine um etwa 2 K geringere Temperatur gemessen als auf der Seite im Windschatten. Im allgemeinen erwies sich die Messung der Oberflächentemperatur als schwierig und bei steigender Windgeschwindigkeit als unmöglich. Bei geringen Windgeschwindigkeiten kann sich die effektive Schneeoberfläche durch Sonneneinstrahlung stark erwärmen, da der Schnee porös ist und die Hohlräume durch die stehende Luft isoliert werden. Die offenen Hohlräume mit Zugang von der Oberfläche strahlen ähnlich einem Hohlkörperstrahler.

Nur ideale Schwarzkörperstrahler strahlen entsprechend dem PLANCKschen Strahlungsgesetz. Reale Medien haben einen Emissionsgrad ε , der kleiner Eins ist. Der Emissionsgrad ist vom Material, der betrachteten Wellenlänge und dem Ausstrahlungswinkel abhängig und muß bei der Berechnung der Ausstrahlung berücksichtigt werden.

Die von der Oberfläche des Grundes emittierte Strahlung muß einen Teil der Atmosphäre durchdringen, bevor sie den Strahlungsempfänger erreicht. Die Atmosphäre hat jedoch eine eingeschränkte Transmission τ , die bei der Betrachtung der unteren Atmosphäre und geringen Schichtstärken in erster Linie vom Wasserdampfgehalt abhängig ist. Die Einschränkung auf geringe Schichtstärken ist bei der Fernerkundung vom Flugzeug oder Hubschrauber gültig. In den Polarregionen kann der Einfluß von Aerosolen und nach ANDERSON und WILSON [1984]

auch die Einschränkung der Transmission durch andere Gase vernachlässigt werden.

Nach dem KIRCHHOFFSchen Gesetz gilt, daß sich die Summe aus Emissionsgrad ε , Transmissionsgrad τ und Reflexionsgrad ρ eines Mediums zu Eins ergänzen.

$$\varepsilon + \tau + \rho = 1 \quad (2.77)$$

Wie oben erwähnt wurde, hat die Atmosphäre eine eingeschränkte Transmission und somit reflektiert und emittiert sie Strahlung (siehe Abbildung 2.9 *b* und *d*). Nach MINNETT [1990] ist hierbei nur die Emissivität von Bedeutung, die Reflexion von langwelliger Strahlung im unteren Teil der Atmosphäre und somit auch Teil *d* aus Abbildung 2.9 ist vernachlässigbar. Bei der Berücksichtigung der Emission der Atmosphäre ist neben dem Emissionsgrad die Temperatur von Bedeutung und zudem wiederum die Transmission der Atmosphäre zwischen dem Ort der Ausstrahlung und der Strahlungsmessung.

Vom Untergrund geht noch der Strahlungsanteil *c* aus. Ähnlich dem Anteil *b* hat er die Atmosphäre als Ursprung, ist aber nach unten gerichtet und gelangt durch die Reflexion am Untergrund zum Ort der Strahlungsmessung. Der Reflexionsgrad ist nach Gleichung (2.77) der zu Eins ergänzende Teil des Emissionsgrades, da der Untergrund im thermischen Infrarotbereich keine Transmission besitzt.

Zusammengefaßt sind aus Abbildung 2.9 die Strahlungsanteile *a*, *b* und *c* zu berücksichtigen. Sie können mathematisch als

$$\begin{aligned} L_h(\lambda, \omega) = & \varepsilon(\lambda, \omega) L_S(\lambda, T) e^{-\gamma(0, h, \lambda, \omega)} + \\ & \int_0^h L_A(z, \lambda, T_A) \alpha(z, \lambda, \omega) e^{-\gamma(z, h, \lambda, \omega)} dz + \\ & (1 - \varepsilon(\lambda, \omega)) \int_{h_A}^0 L_A(z, \lambda, T_A) \alpha(z, \lambda, \omega) e^{-\gamma(z, 0, \lambda, \omega)} dz e^{-\gamma(0, h, \lambda, \omega)} \end{aligned} \quad (2.78)$$

ausgedrückt werden, wobei $L_h(\lambda, \omega)$ die unter dem Winkel ω gemessene spektrale Strahlungsdichte in der Flughöhe h ist, $L_S(\lambda, T)$ die eines idealen Schwarzkörperstrahlers der Temperatur T , die über das PLANCKSche Strahlungsgesetz berechnet werden kann.

$$L_S(\lambda, T) = \frac{2 c^2 h'}{\lambda^5 (e^{\frac{c h'}{\lambda k T}} - 1)}, \quad (2.79)$$

wobei $h' = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ das PLANCKSche Wirkungsquantum, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ die BOLTZMANN-Konstante und $c = 299,8 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$

die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum beschreibt. $L_A(z, \lambda, T_A)$ ist die Strahlungsdichte der Atmosphäre in der Höhe z , wobei in der Höhe z die Temperatur T_A herrscht. $\varepsilon(\lambda, \omega)$ ist der Emissionskoeffizient des Untergrunds, abhängig von der Wellenlänge und dem Ausstrahlungswinkel.

Die atmosphärische Transmission $\gamma(z_1, z_2, \lambda, \omega)$ wird auch als optische Dicke bezeichnet und berechnet sich aus dem Absorptionskoeffizienten $\alpha(z, \lambda, \omega)$ der Atmosphäre in der Höhe z .

$$\gamma(z_1, z_2, \lambda, \omega) = \int_{z_1}^{z_2} \alpha(z, \lambda, \omega) dz \quad (2.80)$$

Um die spektrale Charakteristik des Sensors zu berücksichtigen, müssen die spektralen Strahlungsdichten aus Gleichung (2.78) noch auf die relative spektrale Empfindlichkeit des Infrarot-Line-Scanners $\Phi(\lambda)$ bezogen werden (siehe auch BOCHERT [1992] und GRASEBY INFRARED [1993]).

$$L_h(\omega) = \frac{\int_0^{\infty} L_h(\lambda, \omega) \Phi(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi(\lambda) d\lambda} \quad (2.81)$$

Die Strahlungsgröße $L_A(z, \lambda, T_A)$ aus Gleichung (2.78) kann mit Hilfe des PLANCKschen Strahlungsgesetzes aus Gleichung (2.79) berechnet werden, sofern die Temperatur T_A der Atmosphäre in den Höhen z bekannt ist. Im letzten Term von Gleichung (2.78), der die nach unten gerichtete atmosphärische Strahlung beschreibt, laufen die Integrationsgrenzen von der Gesamthöhe der Atmosphäre h_A bis zum Erdboden. Die Kenntnis über den Zustand der Atmosphäre liegt im allgemeinen nicht bis in diese Höhe vor. Beim Einsatz von meteorologischen Radiosonden [KOTTMEIER *et al.*, 1993] vom Flugzeug aus können die Integrationsgrenzen wie beim zweiten Term aus Gleichung (2.78) nur bis zur Flughöhe bei der Datenerfassung berücksichtigt werden. Durch diese Vereinfachung treten nur Fehler auf, wenn eventuelle Wolken eine höhere Temperatur als der zu messende Untergrund aufweisen. Eine weitere Vereinfachung wäre durch eine Näherung nach SWINBANK [1973] möglich, wenn man den Einfluß von Wolken vernachlässigen kann. Die Untersuchungen von SWINBANK [1973] beziehen sich auf klaren Himmel und haben als Resultat, daß die nach unten gerichtete Strahlung im wesentlichen vom unteren Teil der Atmosphäre abhängig ist und somit als Näherung über die Lufttemperatur T_{A_0} in Bodennähe beschrieben werden kann. Die integrale Himmelsstrahlungsdichte ist nach SWINBANK [1973]

$$L_{sky} = -170,9 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} + 1,195 \sigma T_{A_0}^4, \quad (2.82)$$

wobei $\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ die STEFAN-BOLTZMANN-Konstante ist.

Informationen über die Atmosphäre sind auch wegen der Berücksichtigung des Absorptionskoeffizienten $\alpha(z, \lambda, \omega)$ in Gleichung (2.78) und über die atmosphärische Transmission $\gamma(z_1, z_2, \lambda, \omega)$ in Gleichung (2.80) wichtig. Nach ROBERTS *et al.* [1976] ist der Absorptionskoeffizient der Atmosphäre näherungsweise

$$\alpha(z, \lambda, \omega) = \frac{1}{\cos \omega} C(\lambda, T_A) n_{\text{H}_2\text{O}}(z) \left(p_{\text{H}_2\text{O}}(z) + 0,001 (p(z) - p_{\text{H}_2\text{O}}(z)) \right), \quad (2.83)$$

mit $n_{\text{H}_2\text{O}}(z)$ als Anzahl der Wassermoleküle im Kubikmeter Luft, $p(z)$ dem Luftdruck und $p_{\text{H}_2\text{O}}(z)$ dem Wasserdampfdruck in der Höhe z . Der Luftdruck nimmt mit der Höhe z nach der barometrischen Höhenformel aus Gleichung (2.44) ab, hierbei ist nur der Bodendruck p_0 zu berücksichtigen. Der Wasserdampfdruck ist über die relative Feuchte $f_{\text{rel}}(z)$ vom Sättigungsdampfdruck $p_{\text{H}_2\text{O} \text{ sat}}$ abhängig.

$$p_{\text{H}_2\text{O}}(z) = f_{\text{rel}}(z) p_{\text{H}_2\text{O} \text{ sat}} \frac{p(z)}{p_0}, \quad (2.84)$$

wobei der Sättigungsdampfdruck von PRUPPACHER und KLETT [1980] als Polynom sechsten Grades genähert von der Lufttemperatur ϑ_A abgeleitet werden kann.

$$p_{\text{H}_2\text{O} \text{ sat}} = \left(a_0 + \frac{\vartheta_A}{^\circ\text{C}} \left(a_1 + \frac{\vartheta_A}{^\circ\text{C}} \left(a_2 + \frac{\vartheta_A}{^\circ\text{C}} \left(a_3 + \frac{\vartheta_A}{^\circ\text{C}} \left(a_4 + \frac{\vartheta_A}{^\circ\text{C}} \left(a_5 + \frac{\vartheta_A}{^\circ\text{C}} \left(a_6 + \frac{\vartheta_A}{^\circ\text{C}} \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \text{hPa} \quad (2.85)$$

Die Koeffizienten sind sowohl für Atmosphären über Wasser als auch über Eis angegeben, wobei Temperaturbereiche von $-10^\circ\text{C} \leq \vartheta_A \leq +50^\circ\text{C}$ beziehungsweise $-50^\circ\text{C} \leq \vartheta_A \leq 0^\circ\text{C}$ als gültig angegeben sind.

über Wasser	über Eis	
$a_0 = 6,107799961$	$a'_0 = 6,109177956$	
$a_1 = 4,436518521 \cdot 10^{-1}$	$a_1 = 5,034698970 \cdot 10^{-1}$	
$a_2 = 1,428945805 \cdot 10^{-2}$	$a_2 = 1,886013408 \cdot 10^{-2}$	(2.86)
$a_3 = 2,650648471 \cdot 10^{-4}$	$a_3 = 4,176223716 \cdot 10^{-4}$	
$a_4 = 3,031240396 \cdot 10^{-6}$	$a_4 = 5,824720280 \cdot 10^{-6}$	
$a_5 = 2,034080948 \cdot 10^{-8}$	$a_5 = 4,838803174 \cdot 10^{-8}$	
$a_6 = 6,136820929 \cdot 10^{-10}$	$a_6 = 1,838826904 \cdot 10^{-10}$	

Die Anzahl der Wassermoleküle pro Kubikmeter Luft $n_{\text{H}_2\text{O}}$ in Gleichung (2.83) ist

$$n_{\text{H}_2\text{O}}(z) = \frac{N_A p_{\text{H}_2\text{O}}(z)}{R T_A}, \quad (2.87)$$

mit der AVOGADRO-Konstanten $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ und der allgemeinen Gaskonstanten $R = 8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$.

Die Größe $C(\lambda, T_A)$ aus Gleichung (2.83) ist von der betrachteten Wellenlänge und der Temperatur abhängig. Die Temperaturabhängigkeit wird von ROBERTS *et al.* [1976] zu

$$C(\lambda, T_A) = C_0(\lambda) e^{1800 \left(\frac{K}{T_A} - \frac{1}{296} \right)} \quad (2.88)$$

angegeben. Die Wellenlängenabhängigkeit wurde bei einer Temperatur von $T = 296 \text{ K}$ von LEE [1973] untersucht und ergibt sich als

$$C_0(\lambda) = a + b e^{-\frac{\beta}{\lambda}}, \quad (2.89)$$

mit $a = 1,23 \cdot 10^{-31} \text{ m}^2 \text{ Pa}^{-1} \text{ mol}^{-1}$, $b = 2,31 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2 \text{ Pa}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ und $\beta = 8,30 \cdot 10^{-5} \text{ m}$.

Die Abhängigkeit vom Blickwinkel ω in Gleichung (2.78) wird für die Strahlung der Atmosphäre über die erhöhte effektive Weglänge durch die einzelnen Atmosphärenschichten berücksichtigt (siehe Gleichung (2.83)). Die Emissivität des Untergrunds ist neben der betrachteten Wellenlänge auch vom Ausstrahlwinkel abhängig. Da die Emissivitäten der betrachteten Medien im allgemeinen für den Wellenlängenbereich von $\lambda = 8 \mu\text{m}$ bis $\lambda = 12 \mu\text{m}$ als konstante Werte angegeben werden, sei auch die vorliegende Arbeit hierauf beschränkt. Aber REES und JAMES [1992] gehen auf die Wellenlängenabhängigkeit ein. Wasser hat im betrachteten Wellenlängenbereich einen relativ konstanten Verlauf des Emissionsgrades. Der Emissionsgrad von Eis fällt im Bereich ab $\lambda = 11 \mu\text{m}$ geringfügig ab, wodurch der integrale Emissionsgrad von Eis geringer ist als der von Wasser. Nach den Daten von BUETTNER und KERN [1965] hat Wasser ein ähnliches Verhalten für Wellenlängen über $\lambda = 12 \mu\text{m}$, also außerhalb des relevanten Bereichs. Diese Messungen zeigen, daß der Wellenlängenbereich um $\lambda = 10 \mu\text{m}$ auch bezüglich der Emissivität von Wasser und Eis ein Optimum bietet, um aus der Strahlung die Temperatur abzuleiten, weil der Emissionsgrad sehr hoch ist.

Die Abhängigkeit der Emissivität ε vom Ausstrahlwinkel ω (siehe Abbildung 2.9) wurde zum Beispiel ausführlich von REES und JAMES [1992] behandelt. Die Messungen wurden mit dem FRESNELSchen Modell verglichen und ergaben gute Übereinstimmung. Somit ist der Emissionsgrad des Untergrunds

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{1}{2} \frac{(\sqrt{n^2 - \sin^2 \omega} - \cos \omega)^2}{(\sqrt{n^2 - \sin^2 \omega} + \cos \omega)^2} - \frac{1}{2} \frac{(n^2 \cos \omega - \sqrt{n^2 - \sin^2 \omega})^2}{(n^2 \cos \omega + \sqrt{n^2 - \sin^2 \omega})^2}, \quad (2.90)$$

wobei n die Brechzahl des betrachteten Mediums ist. Die Brechzahl ist rein reell, der imaginäre Teil kann nach REES und JAMES [1992] vernachlässigt werden. Hierbei wurden nur Oberflächen von Eis und Wasser untersucht. Der Vergleich mit den Messungen von KEY und HAEFLIGER [1992], die die Winkelabhängigkeit bei Schneeoberflächen angeben, zeigt auch eine Übereinstimmung mit dem FRESNELSchen Modell aus Gleichung (2.90).

In der Literatur sind jedoch nur Angaben zu den Emissionsgraden gegeben und nicht bezüglich der Brechzahlen. Da sich die meisten Untersuchungen ohnehin auf senkrechte Ausstrahlung beziehen, kann der Zusammenhang für $\omega = 0$ aus Gleichung (2.90) abgeleitet werden.

$$n = \frac{1 + \sqrt{1 - \varepsilon(\omega = 0)}}{1 - \sqrt{1 - \varepsilon(\omega = 0)}} \quad (2.91)$$

Die größte Unsicherheit besteht bei der Bestimmung des Emissionsgrades für die unterschiedlichen Materialien, hier also Wasser, Eis und Schnee. Von BOCHERT [1992] wurde schon auf unzureichende Untersuchungen hingewiesen. Die dort gemachten Angaben können durch die Messungen von BUETTNER und KERN [1965], BARTON *et al.* [1989], KEY und HAEFLIGER [1992] und LORENZ [1971] ergänzt werden. Hiermit ergeben sich zusammengefaßt folgende Mittelwerte für senkrechte Ausstrahlung:

Wasser:	$\varepsilon = 0,930$	bis	$\varepsilon = 0,993$;	$\bar{\varepsilon} = 0,980$	
Schnee:	$\varepsilon = 0,970$	bis	$\varepsilon = 0,998$;	$\bar{\varepsilon} = 0,990$	(2.92)
Eis:	$\varepsilon = 0,960$	bis	$\varepsilon = 0,985$;	$\bar{\varepsilon} = 0,970$	

Bei der Anwendung von Gleichung (2.90) wird davon ausgegangen, daß die betrachteten Oberflächen eben sind. Dieses ist jedoch in der Natur nicht der Fall. Bei Wasseroberflächen entsteht zum Beispiel Wellenbildung, wodurch Abweichungen des Emissionswinkels ω nach oben und nach unten auftreten, die sich im Mittel gegenseitig aufheben. Da jedoch die Winkelabhängigkeit des Emissionsvermögens nach Gleichung (2.90) nicht linear, sondern mit zunehmendem Winkel ω wesentlich stärker zunimmt, wirken sich die durch Wellen vergrößerten Emissionswinkel stärker aus, als die durch verminderte Winkel. Dieses ist der Grund, weshalb der Meßwinkel bei der Bestimmung der Oberflächentemperatur nicht zu groß gewählt werden sollte. Nach LORENZ [1971] kann der Effekt durch Wellen-

bildung bis zu einem Meßwinkel von $\omega = 45^\circ$ gegenüber der Unsicherheit bei der Bestimmung des Emissionsgrades vernachlässigt werden.

Die Untersuchungen von DOZIER und WARREN [1982] zeigen, daß der Emissionsgrad von Schnee nur vernachlässigbar von der Dichte, der Kristallstruktur und -größe, dem Flüssigwassergehalt und Verunreinigungen abhängt.

Zur Korrektur der mit dem Infrared-Line-Scanner erfaßten Daten wäre eine spektrale Betrachtung, wie sie in Gleichung (2.78) dargestellt ist, naheliegend. Eine ähnliche spektrale Vorgehensweise wird zum Beispiel auch von PRICE [1983] zur Korrektur von Satellitendaten verwendet. Hierfür wird Gleichung (2.78) umgeformt, wobei der zweite und dritte Summand der rechten Seite von Gleichung (2.78) analog zu Abbildung 2.9 als $L_b(\lambda)$ und $L_c(\lambda)$ beschrieben werden. Die Abhängigkeit von λ verdeutlicht, daß es sich um spektrale Strahlungsdichten handelt.

$$L_S(\lambda, T) = \frac{L_h(\lambda, T_h) - L_b(\lambda) - L_c(\lambda)}{\varepsilon(\lambda, \omega) e^{-\gamma(0, h, \lambda, \omega)}}, \quad (2.93)$$

wobei $L_h(\lambda, T_h)$ neben der Wellenlänge λ analog zu Gleichung (2.79) über die Temperatur $T_h = \vartheta_h \text{ K}/^\circ\text{C} + 273,15 \text{ K}$, die vom Infrared-Line-Scanner in der Höhe h gemessen wurde, berechnet wird. Mit Gleichung (2.79) ergibt sich die Temperatur $T = \vartheta \text{ K}/^\circ\text{C} + 273,15 \text{ K}$ auf dem Grund.

$$T = \frac{\lambda k}{c h' \ln \left(1 + \frac{2c^2 h' \varepsilon(\lambda, \omega) e^{-\gamma(0, h, \lambda, \omega)}}{\lambda^5 (L_h(\lambda, T_h) - L_b(\lambda) - L_c(\lambda))} \right)} \quad (2.94)$$

Zur Kontrolle, ob die vorgesehene spektrale Korrektur ausreichend ist, wurden die Werte zur Abbildung 2.10 berechnet, in der unter Verwendung von Gleichung (2.94) die Temperaturdifferenz zwischen gemessener und wahrer Temperatur $\vartheta_h - \vartheta$ über der Wellenlänge λ aufgetragen ist. Es wurde eine Flughöhe $h = 1200 \text{ m}$, ein Bodenluftdruck $p_0 = 1013 \text{ hPa}$ und senkrechte Messung $\omega = 0^\circ$ angenommen. Die relative Feuchte $f_{rel} = 0,9$ bis $f_{rel} = 0,7$ und Temperatur der Atmosphäre $\vartheta_A = -10^\circ\text{C}$ bis $\vartheta_A = -20^\circ\text{C}$ ($T_A = \vartheta_A \text{ K}/^\circ\text{C} + 273,15 \text{ K}$) wurden als linear mit der Höhe abnehmend vorgegeben. Als Parameter sind zwei unterschiedliche Temperaturen, $\vartheta_h = -10^\circ\text{C}$ und $\vartheta_h = 0^\circ\text{C}$, und ein variabler Emissionsgrad ε , der von der Wellenlänge unabhängig ist, angenommen.

Zum einen ist zu erkennen, daß die Differenz $\vartheta_h - \vartheta$ neben dem Einfluß der Atmosphäre signifikant von der gemessenen Temperatur ϑ_h und vom Emissionsgrad ε des Untergrunds abhängig ist. Zum anderen ist die Temperaturdifferenz stark von der betrachteten Wellenlänge abhängig, so daß eine spektrale Korrektur (Berücksichtigung nur einer Wellenlänge), wie sie zum Beispiel von PRICE [1983] dargestellt ist, nicht hinreichend für die angestrebte Genauigkeit ist. Die Betrachtung einer eventuellen mittleren Wellenlänge ist nicht möglich,

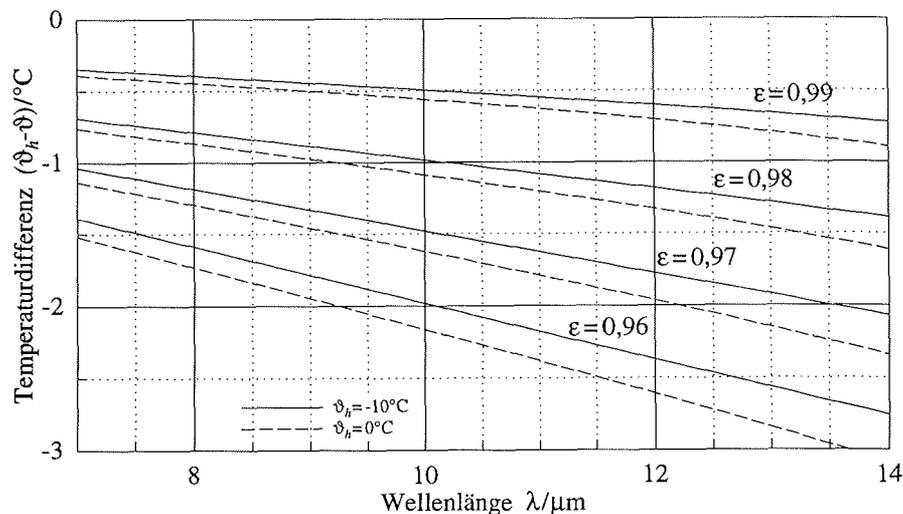


Abbildung 2.10: Temperaturdifferenz zwischen gemessener Temperatur in der Höhe von $h = 1200\text{m}$ und der wahren Temperatur auf dem Grund in Abhängigkeit von der betrachteten Wellenlänge λ . Die Berechnung wurde mit Gleichung (2.94) durchgeführt, mit einer Atmosphäre, wie sie im Text definiert ist. Zu erkennen sind neben der Abhängigkeit vom Emissionsgrad ε des Untergrunds und der Temperatur ϑ_h die starke Abhängigkeit von der Wellenlänge λ .

da die Wellenlängenabhängigkeit der zur Temperaturmessung relevanten Strahlungsdichte neben der Empfindlichkeit des Infrared-Line-Scanners $\Phi(\lambda)$ (siehe Gleichung (2.81)) auch vom PLANCK'schen Strahlungsgesetz (Gleichung (2.79)) beeinflusst wird. Dieses erweist sich als besonders kritisch, da mit Erhöhung der gemessenen Temperatur nicht nur die integrale Strahlungsdichte ansteigt, sondern nach dem WIEN'schen Verschiebungssatz sich auch die Wellenlänge des größten Anteils der spektralen Strahlungsdichte verändert. Mit (siehe zum Beispiel BOCHERT [1992])

$$\lambda_{max} = \frac{c h'}{4,965 k T} \quad (2.95)$$

wandert das Maximum für Temperaturen von $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ bis $\vartheta = -50^\circ\text{C}$ gerade durch den relevanten Wellenlängenbereich von $\lambda = 10\ \mu\text{m}$ bis $\lambda = 13\ \mu\text{m}$. Die Gewichtung der Wellenlängenanteile ist somit neben der Empfindlichkeit des Sensors von der zu messenden Temperatur abhängig, so daß die in Gleichung (2.81) eingeführte Integration notwendig ist. Aus Gleichung (2.78) wird statt

Gleichung (2.93)

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) \varepsilon(\lambda, \omega) L_S(\lambda, T) e^{-\gamma(0, h, \lambda, \omega)} d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) (L_h(\lambda, T_h) - L_b(\lambda) - L_c(\lambda)) d\lambda \quad (2.96)$$

und ist analytisch nicht mehr nach der Temperatur T aufzulösen, zumal $\Phi(\lambda)$ nicht einmal als analytische Funktion vorliegt, sondern aus Labormessungen [GRASEBY INFRARED, 1993] abgeleitet wird. Zur Korrektur der Temperaturdaten des Infrarot-Line-Scanners wird Gleichung (2.96) numerisch gelöst, so daß die Temperaturdifferenz $\vartheta_h - \vartheta$ abhängig von der Atmosphäre, dem Emissionsgrad des Untergrunds, dem Meßwinkel und der gemessenen Temperatur vorliegt. Die Integrationsgrenzen λ_1 und λ_2 ergeben sich aus der spektralen Empfindlichkeit des Infrarot-Line-Scanners zu $\lambda_1 = 7 \mu\text{m}$ und $\lambda_2 = 14 \mu\text{m}$.

Im folgenden wird anhand der Auswertung von Gleichung (2.96) die Sensibilität der Korrektur bezüglich atmosphärischer Schwankungen untersucht, um somit eventuelle Vereinfachungen einzuführen. So hat sich zum Beispiel ergeben, daß die Variation des Bodenluftdrucks praktisch keinen Einfluß auf die Strahlungsmessung hat. Somit wird bei der Korrekturrechnung immer ein Bodenluftdruck von $p_0 = 1013 \text{ hPa}$ angenommen.

In Abbildung 2.11 ist der Fehler der Temperaturmessung gegen die Atmosphären-temperatur aufgetragen. Die Temperatur T_A und die relative Luftfeuchtigkeit f_{rel} sind der Übersichtlichkeit halber bis in die Flughöhe $h = 1200 \text{ m}$ als konstant definiert. Das Diagramm ist für einen Emissionsgrad des Untergrunds von $\varepsilon = 0.98$ berechnet. Parameter sind die relative Luftfeuchtigkeit und die gemessene Temperatur in Flughöhe.

Für extrem niedrige Lufttemperaturen der Atmosphäre ist zu erkennen, daß die Verfälschung der Messungen gering von der Feuchte, der gemessenen Temperatur und der Lufttemperatur abhängig ist. Der Fehler bei der Temperaturmessung ist im wesentlichen auf die eingeschränkte Emissivität des Untergrunds zurückzuführen. Erst bei Atmosphärentemperaturen über $\vartheta_A = 0^\circ\text{C}$ wäre der Einfluß der Atmosphäre so groß, daß eine Korrektur notwendig ist. Zwar treten im Diagramm schon Fehlerwerte von einem Grad auf, aber bei einer Lufttemperatur von $\vartheta_A = 0^\circ\text{C}$ sind weder Meßwerte von $\vartheta_h = -20^\circ\text{C}$ noch von $\vartheta_h = 20^\circ\text{C}$ zu erwarten. Der absolute Fehler, der bei der Temperaturmessung auftritt, ist sogar bei der Atmosphärentemperatur von $\vartheta_A = 20^\circ\text{C}$ vertretbar, wenn man davon ausgeht, daß die Bodentemperatur ähnlich der Atmosphärentemperatur ist. Dieses ist einleuchtend, da der von der Atmosphäre absorbierte Strahlungsfluß bei Temperaturgleichheit $\vartheta = \vartheta_A$ auch von der Atmosphäre emittiert wird. Die zunehmende Steigung der Graphen zeigt jedoch, daß der Kontrast abnimmt und bei Ungleichheit von Atmosphären- und Bodentemperatur große Fehler auftreten.

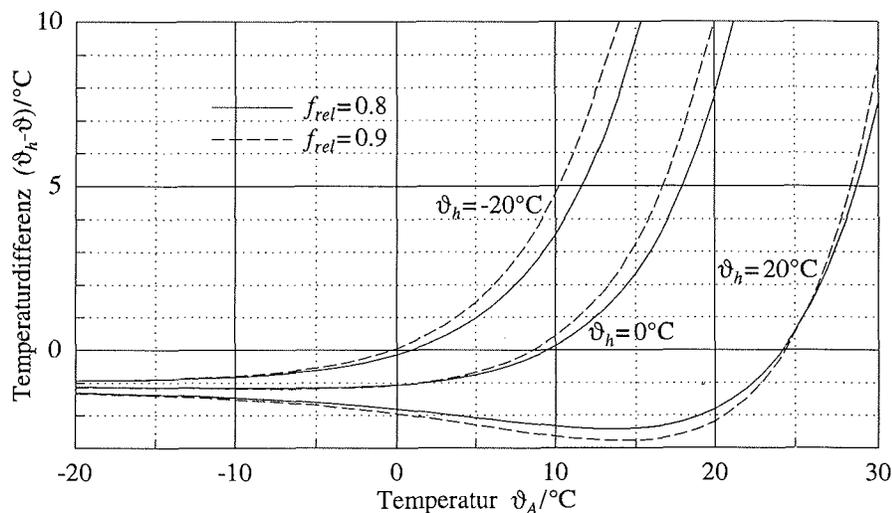


Abbildung 2.11: Temperaturdifferenz zwischen gemessener Temperatur in der Höhe von $h = 1200\text{ m}$ und der wahren Temperatur auf dem Grund in Abhängigkeit von der Atmosphärentemperatur, die konstant mit der Höhe ist. Parameter sind die relative Luftfeuchtigkeit f_{rel} und die gemessene Temperatur ϑ_h in Flughöhe. Bei geringen Atmosphärentemperaturen hat die Atmosphäre nur geringen Einfluß.

Abbildung 2.11 macht deutlich, daß die Strahlungsmessung in den Polarregionen wesentlich unproblematischer ist als in tropischen Gebieten.

Wegen der geringen Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit und der Atmosphärentemperatur wird bei der Korrektur der Temperaturdaten jeweils ein mit der Höhe linearer Verlauf angenommen, so daß die Temperatur- und Feuchtigkeitsangaben nur für den Erdboden und die Flughöhe notwendig sind. Diese Vereinfachung ist nur akzeptabel, wenn die Atmosphärentemperatur wie in der vorliegenden Arbeit nicht zu hoch ist.

Ähnlich ist LORENZ [1973] bei Messungen in gemäßigten Zonen vorgegangen. Er nahm eine konstante relative Luftfeuchtigkeit und einen konstanten Temperaturgradienten an, so daß nur die Lufttemperatur in Flughöhe zur Korrekturrechnung herangezogen wurde. Trotz dieser Vereinfachungen hat LORENZ [1973] sehr gute Übereinstimmung mit *in situ* Messungen auf dem Grund erreicht.

Die Abhängigkeit der Temperatur von der Flughöhe h wird in Abbildung 2.12 verdeutlicht. Es wurde wiederum ein Emissionsgrad von $\varepsilon = 0,98$ angenommen. Die relative Luftfeuchtigkeit ist konstant $f_{rel} = 0,8$ und in der Flughöhe wurde

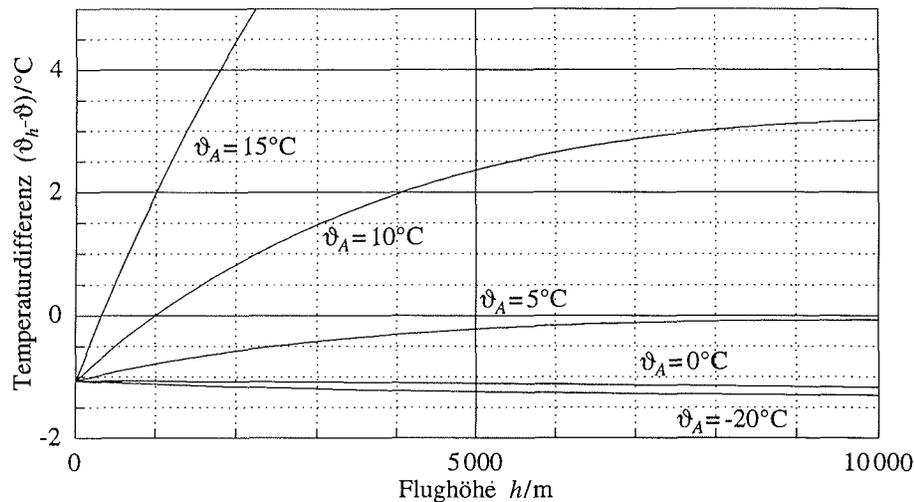


Abbildung 2.12: Temperaturdifferenz zwischen gemessener Temperatur in der Höhe h und der wahren Temperatur auf dem Grund in Abhängigkeit von der Flughöhe. Mit zunehmender Höhe fällt der Luftdruck und somit der Einfluß der Atmosphäre.

immer eine Meßtemperatur von $\vartheta_h = 0^\circ\text{C}$ angenommen. Die Werte für eine Höhe von $h = 0$ m werden ausschließlich von der eingeschränkten Emission des Untergrunds hervorgerufen. Die Variation mit der Flughöhe gibt den Einfluß der Atmosphäre wieder. Bei Atmosphärentemperaturen von unter $\vartheta_A = 5^\circ\text{C}$ haben ungenaue Angaben der Flughöhe nur geringen Einfluß auf die Korrekturrechnung. Besonders bei großen Flughöhen ist durch die Abnahme des Luftdrucks der Gradient der Temperaturdifferenz gering. Erst bei größeren Atmosphärentemperaturen steigt der Einfluß der Atmosphäre und dann wird besonders bei niedrigeren Flughöhen die genaue Angabe der Flughöhe relevant.

Alle Betrachtungen setzen bisher senkrechte Strahlungsmessung voraus. Mit Variation des Meßwinkels ω wird zum einen bei konstanter Flughöhe die Weglänge zwischen Ausstrahlung und Meßort vergrößert, welches in Gleichung (2.83) zum Tragen kommt. Zum anderen ist nach Gleichung (2.90) der Emissionsgrad des Untergrunds vom Emissionswinkel abhängig.

Die Abhängigkeit der Temperaturmessung vom Meßwinkel wird in Abbildung 2.13 dargestellt. Hierbei wurde ein Emissionsgrad für senkrechte Ausstrahlung von $\varepsilon = 0,98$, eine gemessene Temperatur von $\vartheta = 0^\circ\text{C}$ in der Flughöhe von $h = 1000$ m und eine relative Luftfeuchtigkeit von $f_{rel} = 0,8$ angenommen. Es

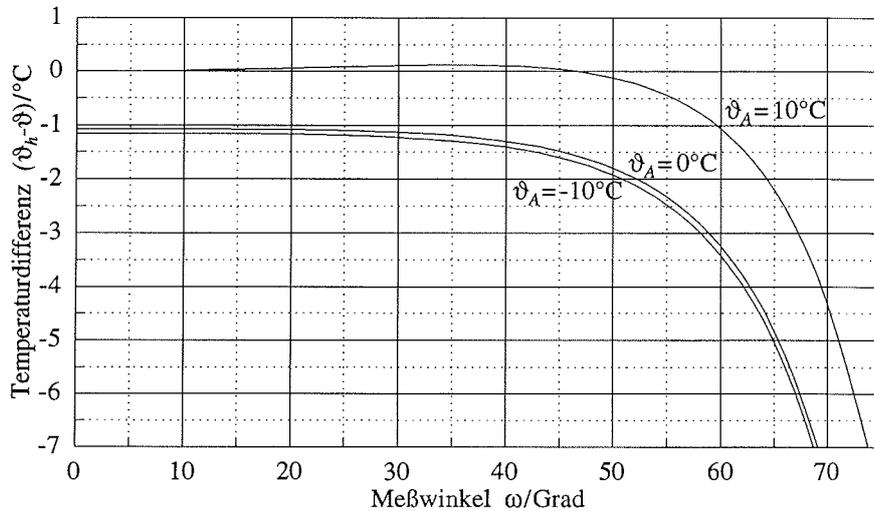


Abbildung 2.13: Temperaturdifferenz zwischen gemessener Temperatur in der Höhe von $h = 1000\text{m}$ und der wahren Temperatur auf dem Grund in Abhängigkeit vom Meßwinkel ω . Der zunehmende Gradient bei großen Meßwinkeln macht eine Strahlungsmessung bei über $\omega = 45^\circ$ unsicher.

ist die Temperaturdifferenz zwischen gemessener Temperatur und wahrer Temperatur auf dem Grund über dem Meßwinkel ω aufgetragen. Als Parameter dient die Atmosphärentemperatur ϑ_A , die über die Höhe konstant ist. Der Verlauf der Kennlinien zeigt, daß eine Korrektur auch bei Meßwinkeln bis $\omega = 45^\circ$ notwendig ist. Gegenüber der Nadirmessung werden hierbei schon annähernd Fehler von einem halben Kelvin erreicht. Der steigende Gradient der Temperaturdifferenz bei großen Meßwinkeln ω verdeutlicht, daß eine Messung bei Winkeln über $\omega = 45^\circ$ große Fehler hervorrufen würde. Da das FRESNELSche Modell nur eine Approximation des Emissionsverhalten ist, kann auch die Korrektur dieser großen Fehler nicht befriedigend greifen. Variationen in der Topographie würden bei großen Meßwinkeln zunehmende Bedeutung gewinnen. Deshalb ist von einer Messung bei Winkeln über $\omega = 45^\circ$ abzuraten. Bei der Messung mit dem Infrared-Line-Scanner wird ein maximaler Meßwinkel von $\omega = 45^\circ$ erreicht.

2.2.5 Bedeutung der Hintergrundstrahlung

Im Abschnitt 2.2.3, in dem auf die geometrische Entzerrung des Temperaturbildes eingegangen wird, wurde schon erwähnt, daß die Abtastung des Untergrunds

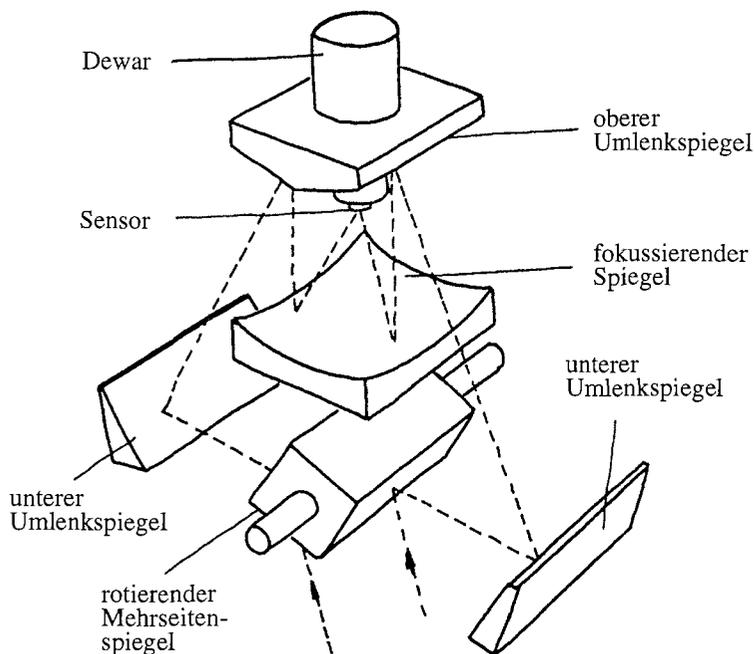


Abbildung 2.14: Spiegeloptik des KENNEDY-Scanners, der im Infrarot-Line-Scanner zum Einsatz kommt. Kennzeichnend für einen KENNEDY-Scanner sind die Zweistrahl-optik mit rotierendem Vierseitenspiegel.

durch einen rotierenden Abtastspiegel erfolgt. Speziell beim KENNEDY-Scanner, mit rotierendem Vierseitenspiegel und Zweistrahl-optik, tritt neben der geometrischen Verzerrung noch ein weiteres Problem auf. Je nach Stellung des rotierenden Abtastspiegels steht für die Temperaturstrahlung vom zu messenden Untergrund eine unterschiedliche effektive Spiegelfläche zur Verfügung. In Abbildung 2.14 ist die Optik des Kennedy-Scanners dargestellt. Bei der eingezeichneten Spiegelstellung kann mehr Strahlung vom Untergrund über den rechten unteren Spiegel des Abtastspiegels als über den linken unteren Spiegel zum Sensor gelangen. Bei der Messung im Nadir sind beide Anteile gleich groß.

Zur genauen geometrischen Untersuchung ist in Abbildung 2.15 der Abtastspiegel in zwei unterschiedlichen Stellungen dargestellt. Auf der linken Seite ist die Spiegelstellung für Nadirmessung und rechts für einen Meßwinkel von etwa $\omega = 45^\circ$ eingezeichnet. Die Strahlungsanteile zwischen den gestrichelten Linien gehen vom zu messenden Untergrund aus. Die Ergänzung bis zu den Strich-

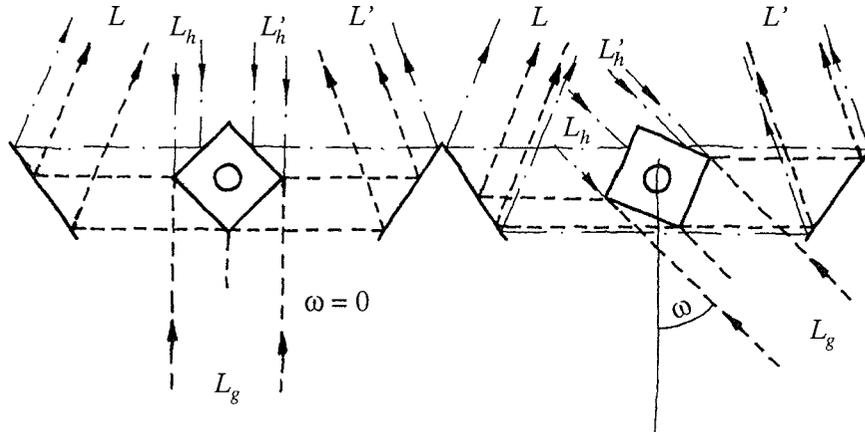


Abbildung 2.15: Verteilung von Strahlungsanteilen des Untergrunds und der Hintergrundstrahlung, die aus dem Infrared-Line-Scanner selbst emittiert wird. Mit zunehmendem Winkel ω wird der Strahlungsanteil vom Untergrund kleiner.

Punkt-Linien und die Anteile zwischen diesen werden hier als Hintergrundstrahlung bezeichnet. In der Darstellung ist zu erkennen, daß die Hintergrundstrahlung ihren Ursprung im Gehäuse des Infrared-Line-Scanners hat. Ihre Intensität ist von der Temperatur des Geräts bestimmt. Allgemein setzt sich die Strahlung die den Strahlungssensor erreicht aus drei Anteilen zusammen.

$$L(\omega) = L_g(\omega) + L_h(\omega) + L_h^* \quad (2.97)$$

Hierbei beschreibt $L_g(\omega)$ den Strahlungsanteil vom zu messenden Untergrund, $L_h(\omega)$ die winkelabhängige Hintergrundstrahlung und L_h^* die winkelunabhängige Hintergrundstrahlung. Die winkelunabhängige Hintergrundstrahlung ist in Abbildung 2.15 nicht eingezeichnet, sie ist eine Streustrahlung, die entweder direkt oder über die feststehenden Spiegel den Sensor erreicht. Da ihr Anteil vom Abtastwinkel ω unabhängig ist, wird er schon bei der Kalibration mit den Messungen an den Referenzplatten durch die Routine *vtempcal* eliminiert, so daß im folgenden nur die winkelabhängigen Anteile aus Gleichung (2.97) berücksichtigt werden müssen. Der Strahlungsanteil $L_g(\omega)$ ist vom Winkel ω entsprechend der Projektion der relevanten Spiegelfläche in Richtung des Strahlungsempfangs abhängig. Aus Abbildung 2.15 läßt sich ableiten, daß

$$L_g(\omega) = L_g \cos\left(\frac{\omega}{2}\right) \quad (2.98)$$

ist. Da sich auf dem Weg zum Sensor die Strahlenbündel vom Winkel ω unabhängig zu einem festen Wert ergänzen müssen, reduziert sich der Anteil der winkelabhängigen Hintergrundstrahlung zu

$$L_h(\omega) = L_h \left(1 - \cos\left(\frac{\omega}{2}\right) \right). \quad (2.99)$$

Die beiden Anteile L_g und L_h bezeichnen die Strahlungsanteile, die sich ohne Winkelabhängigkeit ergeben würden. Mit der vorherrschenden Gerätetemperatur $T_h = \vartheta_h \text{ K} / ^\circ\text{C} + 273,15 \text{ K}$ wird die Hintergrundstrahlung L_h nach dem PLANCKSchen Strahlungsgesetz analog zu Gleichung (2.79) berechnet. Die räumliche Variation der Temperatur im Gerät kann nicht berücksichtigt werden, sie gilt als homogen und wird aus dem Mittelwert zweier Messungen im Scanner gebildet.

Die Strahlungsdichte $L(\omega)$, die den Sensor erreicht, wird über die registrierte Temperatur $T = \vartheta \text{ K} / ^\circ\text{C} + 273,15 \text{ K}$ ermittelt. Die Strahlungsdichte L_g die vom Untergrund ausgeht, kann nun mit Hilfe der Gleichungen (2.97) bis (2.99) zu

$$L_g = \frac{L(\omega) - L_h \left(1 - \cos\left(\frac{\omega}{2}\right) \right)}{\cos\left(\frac{\omega}{2}\right)} \quad (2.100)$$

berechnet werden. Mit Hilfe der inversen Form des PLANCKSchen Strahlungsgesetzes ergibt sich aus der Strahlungsdichte L_h die korrigierte Temperatur des Untergrunds $T_g = \vartheta_g \text{ K} / ^\circ\text{C} + 273,15 \text{ K}$ zu

$$T_g = \frac{\lambda k}{c h' \ln\left(1 + \frac{2c^2 h'}{\lambda^5 L_g}\right)}, \quad (2.101)$$

wobei $h' = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ das PLANCKSche Wirkungsquantum, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ die BOLTZMANN-Konstante und $c = 299,8 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$ die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum beschreibt. Als Wellenlänge wird bei der Korrektur die mittlere Wellenlänge $\lambda = 10 \mu\text{m}$ angenommen. Es wird nicht analog zu Abschnitt 2.2.4 über den relevanten Wellenlängenbereich integriert, da dieses wegen der hierzu notwendigen numerischen Lösung einen sehr hohen Rechenaufwand bedeuten würde. Die hier erklärte Methode ist trotzdem hinreichend.

Zur Verdeutlichung der Auswirkungen der winkelabhängigen Strahlungsverteilung sind in Abbildung 2.16 Signalmittelwerte über die Bildspalten x dargestellt. Aus den Werten s^* läßt sich nach Gleichung (2.63) die dargestellte Temperatur berechnen. Für dieses Beispiel wurde die Bilddatei ir031613.27b ausgewählt, da sie ein homogen verteiltes Schollenfeld darstellt, so daß die mittleren Temperaturen auf dem Grund über die Koordinate x konstant sind. Die Abbildung 2.16 zeigt zwei unterschiedliche Kennlinien. Die obere Kennlinie gibt die Mittelwerte

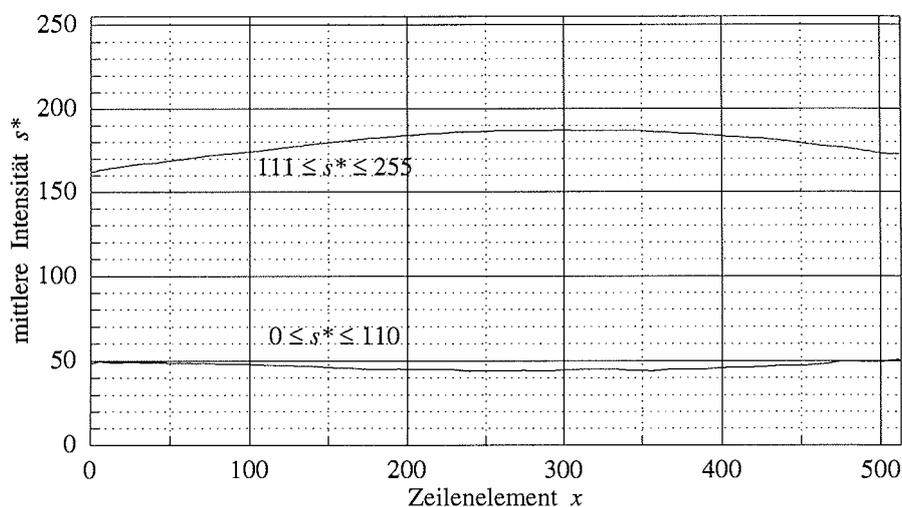


Abbildung 2.16: Mittlere Intensitäten der Spalten x für warme ($111 \leq s^* \leq 225$) und kalte ($0 \leq s^* \leq 110$) Bildbereiche. Der Einfluß der Hintergrundstrahlung nimmt mit zunehmendem Abtastwinkel zu. Daten aus ir031613.27b.

der Spalten x an, wobei nur Werte von $111 \leq s^* \leq 225$ berücksichtigt wurden, die untere Kennlinie wurde aus den Werten $0 \leq s^* \leq 110$ gebildet. Es ist deutlich zu erkennen, daß die mittleren Werte der hohen Strahlungsintensitäten mit zunehmender Entfernung von der Nadirmessung abnehmen. Die Gerätetemperatur war im Beispiel kälter als die warmen Bereiche des Untergrunds und ihr Strahlungsanteil nimmt zu beiden Bildrändern hin zu. Bei der unteren Kennlinie verhält es sich anders, da die kalten Bereiche des Untergrunds kälter waren als die Gerätetemperatur und zu den Bildrändern somit eine Signalerhöhung eintritt. Erst die Trennung in zwei unterschiedliche Temperaturbereiche verdeutlicht den Effekt der Hintergrundstrahlung. Bei einer Spaltensummutation ohne Bereichstrennung würden sich die Fehler angenähert aufheben.

Die Darstellung in Abbildung 2.16 wird fehlerhaft, wenn Bildpunkte des warmen Bereichs am Rand durch die Verfälschung in die Gruppe des kalten Bereichs fallen, oder umgekehrt. Dieser Fehler, der lediglich die hier gezeigten Diagramme beeinflusst und nicht die Korrekturrechnung, ist im vorliegenden Fall gering, da Bildwerte um die Grenze der beiden Bereiche nur gering vertreten sind. Abbildung 2.17 zeigt das Intensitätshistogramm der Beispieldaten. Intensitäten im Bereich um $s^* = 110$ sind nur gering vertreten.

Abbildung 2.18 zeigt die mittleren Intensitäten der warmen und kalten Berei-

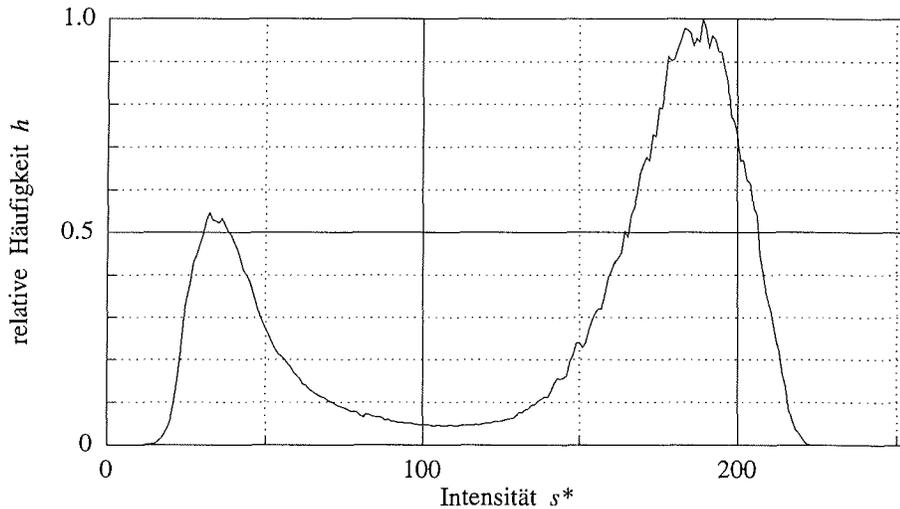


Abbildung 2.17: Intensitätshistogramm der Beispieldaten vor der Korrektur der Hintergrundstrahlung. Daten aus ir031613.27b.

che nach der Korrektur der Hintergrundstrahlung mit Gleichung (2.100). Die Winkelabhängigkeit aus Abbildung 2.16 ist behoben. Einen weiteren Erfolg und damit die Notwendigkeit der Korrekturrechnung der Hintergrundstrahlung zeigt Abbildung 2.19. Im Gegensatz zum Histogramm in Abbildung 2.17 ist im Bereich um $s = 160$ eine weitere Intensitätsklasse zu erkennen, die jedoch stark mit der warmen Hauptklasse überlappt ist. Eine Trennung dieser beiden Bereiche könnte eventuell mit Hilfe des sichtbaren Spektralbereichs erfolgen.

Bisher wurde noch nicht berücksichtigt, daß die Referenzmessungen durch die Hintergrundstrahlung beeinflusst werden. Die Referenzmessungen werden unter einem Winkel von $\omega = 60^\circ$ durchgeführt. Da entsprechend der Referenzmessungen auch der Temperaturbereich berechnet wird, kann die Korrektur am Temperaturoffset ϑ_{off}^* und Temperaturbereich $\Delta\vartheta^*$ (siehe Abschnitt 2.2.1) durchgeführt werden. Mit dem PLANCKschen Strahlungsgesetz werden die Strahlungsdichten der unkorrigierten unteren L_{off}^* beziehungsweise oberen $L_{off+\Delta}^*$ Meßbereichsgrenzen berechnet und analog zu Gleichung 2.100 die Korrektur durchgeführt.

$$L_{off} = \frac{L_{off}^* - L_h \left(1 - \cos\left(\frac{60^\circ}{2}\right)\right)}{\cos\left(\frac{60^\circ}{2}\right)} \quad (2.102)$$

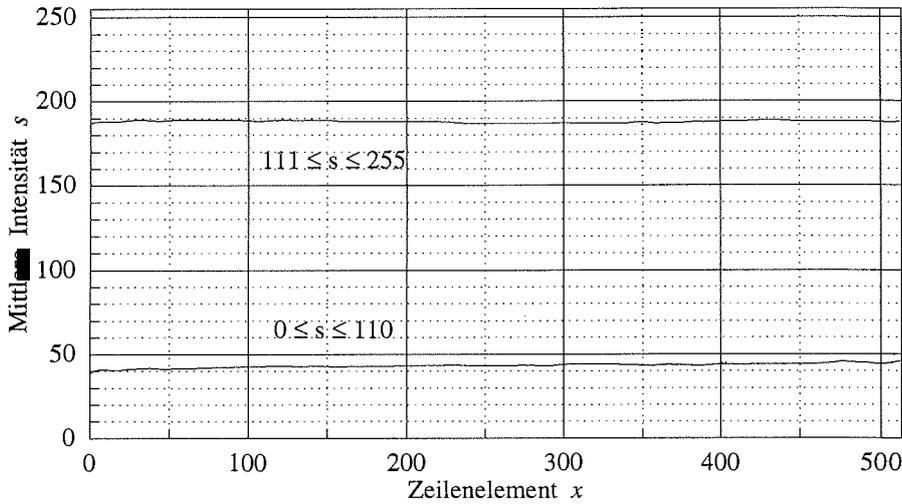


Abbildung 2.18: Mittlere Intensitäten der Spalten x für warme ($111 \leq s \leq 225$) und kalte ($0 \leq s \leq 110$) Bildbereiche nach der Korrektur der Hintergrundstrahlung.

$$L_{off+\Delta} = \frac{L_{off+\Delta}^* - L_h \left(1 - \cos\left(\frac{60^\circ}{2}\right)\right)}{\cos\left(\frac{60^\circ}{2}\right)} \quad (2.103)$$

Die korrigierten Bereichsgrenzen können anschließend analog zu Gleichung (2.101) aus den Strahlungsdichten berechnet werden.

Die Korrektur der Hintergrundstrahlung wird mit Hilfe der Routine *virbkr* durchgeführt.

2.3 Kombination von LSC und IRLS

Bisher wurden die Daten aus den beiden Spektralkanälen voneinander getrennt behandelt, da durch die unterschiedlichen Aufnahmetechniken der Line-Scan-Camera und des Infrared-Line-Scanners auch die zu korrigierenden Fehler grundsätzlich unter verschiedenen Gesichtspunkten behandelt werden mußten. Nachdem nun die verbesserten Bilddaten zur Verfügung stehen, sollen die Daten beider Spektralkanäle geometrisch so aneinander angepaßt werden, daß für jeden Bildpunkt die Information beider Spektralkanäle gemeinsam vorliegt. Es liegt hiermit für jeden Bereich des Untergrundes die gekoppelte Information über seine relative

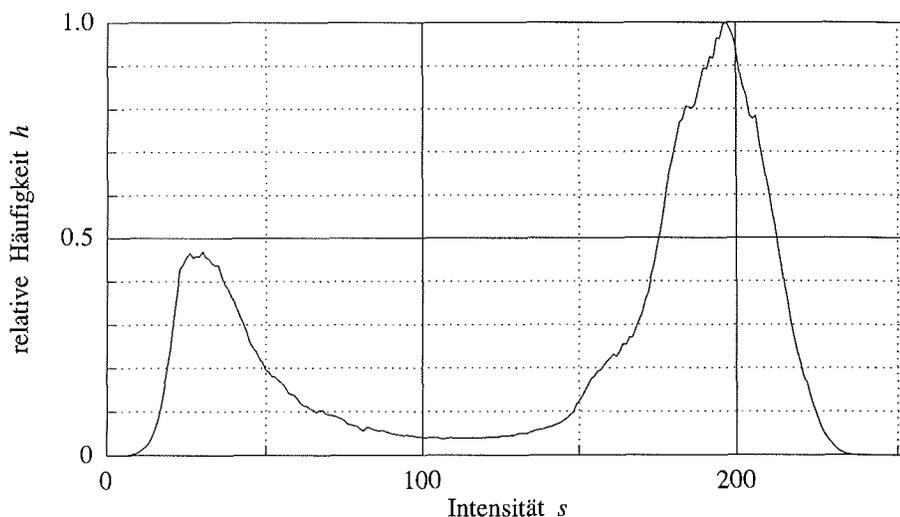


Abbildung 2.19: Intensitätshistogramm der Beispieldaten nach der Korrektur der Hintergrundstrahlung. Im Gegensatz zum Histogramm in Abbildung 2.17 ist im Bereich um $s = 160$ eine dritte Intensitätsklasse zu erkennen, die jedoch stark mit der warmen Hauptklasse überlappt ist.

Reflektivität und Oberflächentemperatur vor.

Für die Kombination der beiden Spektralkanäle wurde eine Line-Scan-Camera gebaut, deren Gesichtsfeld an das des Infrarot-Line-Scanners angepaßt ist. Genau genommen ist der Aufnahmewinkel Ω etwas größer als beim Infrarot-Line-Scanner, damit der Bildbereich des Temperaturbildes in jedem Fall abgedeckt ist. Eine gewisse Toleranz ist notwendig, da die Line-Scan-Camera mechanisch am Infrarot-Line-Scanner montiert ist und eine Justierung im Feldbetrieb zu kompliziert ist.

Zur Kombination muß nun eine Koordinatentransformation gefunden werden, die das Bild des sichtbaren Spektralbereichs auf die Koordinaten des Temperaturbildes abbildet. Die schmalen Randbereiche des sichtbaren Spektralbereichs, die mit dem Infrarot-Line-Scanner nicht erfaßt werden, sollen mit der Transformation verworfen werden, so daß als Ergebnis ein zweikanaliges Bild mit einer Breite von $X = 512$ Bildpunkten vorliegt, das die gleichen Gegenstandspunkte darstellt.

Nach der geometrischen Entzerrung des Bildes vom Infrarot-Line-Scanner aus Abschnitt 2.2.3 wurde zuerst davon ausgegangen, daß beide Bilddaten an sich winkeltreu sind. Zur Anpassung eines winkeltreuen Bildes an ein anderes win-

keltreues Bild ist eine eingeschränkte bilineare Koordinatentransformation der Form

$$\begin{aligned}x &= a_2 y^* + a_1 x^* + a_0 \\y &= b_2 y^* + b_1 x^* + b_0\end{aligned}\tag{2.104}$$

ausreichend. Das angepaßte Bild des sichtbaren Spektralbereichs ist hiermit

$$s(x, y) = s^*(x^*, y^*).\tag{2.105}$$

Die Größen s^* , x^* und y^* beziehen sich auf das Ursprungsbild und s , x und y auf das geometrisch korrigierte Bild. Da für die einzelnen Flugabschnitte eine konstante Fluggeschwindigkeit und -höhe angenommen wird, ist in Richtung y nur eine Verschiebung zu berücksichtigen und somit reduzieren sich die Terme aus Gleichung (2.104), da $a_2 = 0$ und $b_2 = 1$ sind. Wird für die Koordinate y nur die Verschiebung $\Delta y = y - y^*$ der Bildpunkte angegeben, so vereinfacht sich Gleichung (2.104) zu

$$\Delta y = b_1 x^* + b_0.\tag{2.106}$$

Der Linearkoeffizient b_1 ist notwendig, da die Montage der Scanner nicht nur eine konstante Verschiebung der aufzunehmenden Zeilen auf dem Grund bewirkt, sondern zusätzlich eine Schiefstellung. Der Koeffizient b_0 gibt die Verschiebung der Zeilenkoordinate $x^* = 0$ an und b_1 ist ein Maß für die Schiefstellung.

Die Koeffizienten für die Koordinatentransformation werden ermittelt, indem mit Hilfe der KHOROS-Routine *warpimage* in Bildabschnitten beider Spektralbereiche Paßpunkte an markanten Strukturen gesetzt werden. Aus den so entstandenen Koordinatenpaaren wurde mit Hilfe linearer Regression die Koeffizienten aus Gleichung (2.106) ermittelt. Hierbei stellte sich heraus, daß die mechanische Kopplung der beiden Scanner nicht konstant ist. Es ist notwendig, für jeden Flugtag separate Koeffizienten zu ermitteln. Da die Verschiebung Δy des weiteren von der Flughöhe, Fluggeschwindigkeit und Zeilenabtastrate abhängig ist und diese Größen zwar während eines Flugabschnittes, aber nicht für einen gesamten Flugtag konstant sind, können die Koeffizienten für die Koordinatentransformation beim Aufruf der Routine für die Transformation (*vcomb*) auf die Flughöhe und Auflösung normiert angegeben werden (siehe Anhang B.4).

Bei der Auswertung der oben angesprochenen Koordinatenpaare mit deren Hilfe für die einzelnen Flugtage die Koeffizienten für Gleichung (2.104) beziehungsweise (2.106) ermittelt werden sollten, stellte sich ein weiterer Fehler der Datenerfassung heraus. Die Korrektur senkrecht zur Flugrichtung genügt entgegen der Theorie nicht der linearen Transformation. Als Ursache wurde die Verzeichnung

des Objektivs der Line-Scan-Camera gefunden. Das Bild des sichtbaren Spektralbereichs ist somit nicht winkeltreu. Während die geometrische Korrektur des Infrarot-Line-Scanners analytisch ermittelt werden konnte (siehe Abschnitt 2.2.3), wäre für das Objektiv eine Untersuchung im Optiklabor notwendig. Für die vorliegende Arbeit wurde jedoch die Koordinatentransformation in Richtung x aus Gleichung (2.104) derart erweitert, daß die Verzeichnung behoben wird. Die Auswertung der Koordinatenpaare der Paßpunkte zeigte, daß ein Polynom dritten Grades der Korrektur der Verzeichnung genügt. Es ist somit

$$x = a_3(x^*)^3 + a_2(x^*)^2 + a_1x^* + a_0 \quad (2.107)$$

Die Koeffizienten a_i können über entsprechende Koordinatenpaare mit Hilfe der kubischen Regression ermittelt werden. Hierbei entsteht jedoch das Problem, daß die Paßpunkte über die gesamte Bildbreite gleichmäßig verteilt sein müssen. Schwierigkeiten entstehen, wenn es an genügend Bildstruktur mangelt. Da die Koeffizienten a_2 und a_3 jedoch von der Verzeichnung des Objektivs abhängen und nur die Koeffizienten a_0 und a_1 von Flug zu Flug korrigiert werden sollen, wird Gleichung (2.107) in eine modifizierte Nullstellenform gewandelt, um eine eindeutige Zuordnung der Koeffizienten zur Geometrie zu ermöglichen.

$$x = c(x^* - x_1 - x_w^*)(x^* + x_1 - x_w^*)(x^* - x_w^*) + x_w \quad (2.108)$$

Hierbei gibt unter anderem c die Krümmung der kubischen Funktion an und ist ausschließlich von der Stärke der Verzeichnung abhängig. Auch x_1 wird durch die Verzeichnung bestimmt, es ist der absolute Abstand vom Wendepunkt x_w^* , in dem die Funktion $x(x^*)$ dem Funktionswert im Wendepunkt entspricht ($x(x_w^* - x_1) = x(x_w)$). Die Lage des Wendepunkts gibt nun noch eine Verschiebung an. Die Lage des Objektivs und somit der Verzeichnungsfunktion bezüglich der Koordinate x , also des CCD-Sensors wird durch x_w^* beschrieben. Im Idealfall ist $x_w^* = X/2$. Die Verschiebung bezüglich des Infrarot-Line-Scanners ist durch die Wendepunktkoordinate x_w beschrieben. Somit ist x_w die einzige Größe, die für jeden Flug separat ermittelt werden muß. Die anderen Koeffizienten sollten jedoch auch von Zeit zu Zeit kontrolliert werden.

Abbildung 2.20 verdeutlicht diesen Sachverhalt noch einmal. Es sind Paßpunktkoordinaten eines kurzen Flugabschnitts dargestellt, wobei im gesamten Bildabschnitt genügend Struktur zur Paßpunktzuordnung vorhanden ist. Die durchgezogene Kennlinie, die kubische Regression zu allen Paßpunktkoordinaten, gibt die Koordinatentransformation an, deren Koeffizienten der Verzeichnung des Objektivs und der Verschiebung der beiden Scanner zueinander genügen. In diesem Fall ergibt sich eine Standardabweichung der Paßpunkte zur Regressionskurve von $\sigma = 0,59$ Punkten. Ein visueller Vergleich des transformierten Bildes mit dem Temperaturbild zeigt ein gutes Ergebnis.

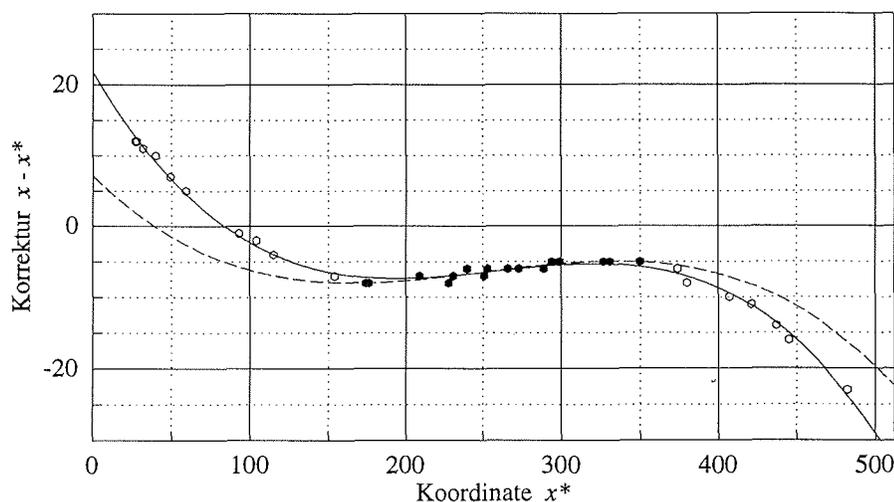


Abbildung 2.20: Regressionskurve der Koordinatentransformation aus Gleichung (2.108). Die gestrichelte Kennlinie verdeutlicht den Fehler bei der Verwendung der Vollkreise als Teilmenge der Paßpunktpaare. Die Paßpunktpaare wurden aus den Bilddaten der Datei cs022812.13a ermittelt.

Die vollen Kreise in Abbildung 2.20 geben eine Teilmenge der Paßpunkte wieder, die bei angenommen fehlender Bildstruktur in den Randbereichen vorhanden wäre. Die kubische Regression dieser Teilmenge ist gestrichelt dargestellt. Bei Anwendung dieser Transformation ergäben sich gegenüber der durchgezogenen Transformationskennlinie Fehler von bis zu $\Delta x = 15$ Bildpunkten.

Paßt man dieser Teilmenge die Transformationsgleichung (2.108) an, wobei nur x_w zu variieren ist und alle anderen Koeffizienten aus der durchgezogenen Regressionskennlinie übernommen werden, so ergibt sich nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate annähernd die durchgezogene Kennlinie. Dieses gilt auch, wenn andere Teilmengen herangezogen werden. Bei der Ermittlung des einzigen Koeffizienten x_w , der sich von Flug zu Flug ändert, ist also eine beliebige Teilmenge von Paßpunktpaaren erforderlich. Es sollten jeweils Bildbereiche mit ausreichender Struktur gewählt werden, wobei es unwesentlich ist, ob die Paßpunktpaare gleichmäßig über die Bildkoordinate x verteilt sind. Abbildung 2.20 verdeutlicht, daß auch Paßpunktmengen aus Randbereichen genügen. Es sollte aber eine ausreichende Anzahl von Paßpunkten ermittelt werden, um der Unsicherheit beim Plazieren der Paßpunkte gerecht zu werden. Wegen der unterschiedlichen Variation von Reflektivität und Oberflächentemperatur erfordert

die Paßpunktsetzung etwas Übung. In der vorliegenden Arbeit wurden jeweils etwa 20 bis 30 Paßpunktpaare gesetzt. Bei der Ermittlung der Koeffizienten wurden dann Ausreißer verworfen, die von der Koordinatentransformation um über $\Delta x > 2$ Bildpunkte abwichen.

Bei der Ausarbeitung dieser Methode wurde eine gute Reproduzierbarkeit sowohl bei mehrfacher Anwendung auf denselben Bildabschnitt als auch auf Bildabschnitte unterschiedlicher Flugtage festgestellt.

Die Umrechnung zwischen den Koeffizienten aus Gleichung (2.107) und (2.108) ist

$$\begin{aligned} a_3 &= c \\ a_2 &= -3 c x_w^* \\ a_1 &= c \left(-x_1^2 + 3(x_w^*)^2 \right) \\ a_0 &= c \left(x_1^2 x_w^* - (x_w^*)^3 \right) + x_w, \end{aligned} \quad (2.109)$$

beziehungsweise

$$\begin{aligned} c &= a_3 \\ x_w^* &= -\frac{a_2}{3c} \\ x_1 &= \sqrt{-\frac{a_1}{c} + 3(x_w^*)^2} \\ x_w &= a_0 - c \left(x_1^2 x_w^* - (x_w^*)^3 \right). \end{aligned} \quad (2.110)$$

Diese Gleichungen sind notwendig, da übliche Regressionsalgorithmen die Koeffizienten für Gleichung (2.107) liefern.

Bei der Bilddatenerfassung mit Line-Scannern hängen die räumlichen Auflösungen in Richtung der Bildkoordinaten zur Flugrichtung (y) und senkrecht hierzu (x) von unterschiedlichen Parametern ab. In Flugrichtung ist sie durch die Flugeschwindigkeit v und die Abtastrate f gegeben.

$$\Delta y = \frac{v}{f} \quad (2.111)$$

Senkrecht zur Flugrichtung ist sie von der Flughöhe h , vom gesamten Blickwinkel Ω und der Bildzeilenlänge X definiert.

$$\Delta x = \frac{2 h}{X} \tan \frac{\Omega}{2} \quad (2.112)$$

Grundsätzlich ist es möglich, durch Anpassung von Flughöhe, Fluggeschwindigkeit und Zeilenabtastrate Bilddaten zu erfassen, die in beiden Bilddimensionen gleiche räumliche Auflösung besitzen. Hierfür müssen die Gleichungen (2.111) und (2.112) gleichgesetzt und nach dem jeweiligen frei wählbaren Parameter aufgelöst werden. Im praktischen Flugbetrieb ist jedoch besser zu realisieren, bei vorgegebener Flughöhe und Fluggeschwindigkeit die Abtastrate so zu wählen, daß die räumliche Auflösung in Flugrichtung größer ist, als senkrecht hierzu und bei der Verarbeitung der Bilddaten die Auflösung anzupassen. Besonders bei den Flugzeugmessungen, bei denen von den Bilddaten abgeleitete Kenngrößen mit anderen Messungen korreliert werden sollen [KOTTMEIER *et al.*, 1993] ist eine einheitliche Abtastrate unabhängig von der Flughöhe notwendig.

Die Anpassung der beiden Auflösungen zueinander findet durch eine Koordinatentransformation statt, wie sie in Gleichung (2.105) angegeben ist. Die Abbildungen der Transformation sind nun jedoch lineare Funktionen, da die Transformation sowohl als Eingabe als auch als Ergebnis einer winkeltreuen Darstellung entspricht. Zudem wird das Bild nur in der Richtung transformiert, die die größere Auflösung enthält. Es werden somit zwei Fälle unterschieden:

$$\left. \begin{array}{l} y = \frac{\Delta x}{\Delta y} y^* \\ x = x^* \end{array} \right\} \quad \text{wenn} \quad \frac{\Delta x}{\Delta y} < 1$$

(2.113)

$$\left. \begin{array}{l} y = y^* \\ x = \frac{\Delta y}{\Delta x} x^* \end{array} \right\} \quad \text{sonst.}$$

Bei der Anwendung der Routine *vrec*, die die Koordinatentransformation ausführt, erhält das Ergebnisbild bezüglich der Spalten- oder Zeilenlänge ein neues Format.

Durch die in diesem Abschnitt erarbeiteten Korrekturen und speziell durch die Kombination der Daten der Line-Scan-Camera und des Infrared-Line-Scanners liegt für ein bearbeitetes Bild zu jedem Bildpunkt die Information beider Spektralbereiche kombiniert vor. Ein solches bearbeitetes Bild ist die Grundlage für die Klassifikation der Line-Scanner-Daten, die im folgenden Kapitel behandelt wird.

Die Ergebnisse der Klassifikation können gegenüber der Arbeit mit den Programmen *LINECALC* [BOCHERT, 1991a] oder *IRCALC* [BOCHERT, 1992] wesentlich verbessert werden, da einerseits erstmals eine solch gründliche Korrektur der Bilddaten beider Spektralbereiche erarbeitet wurde. Andererseits lagen bisher noch keine kombinierten Daten der Line-Scan-Camera und des Infrared-Line-Scanners

vor.

Durch die eingeführte Korrektur der Beleuchtungsschwankungen während der Datenaufnahme für die Line-Scan-Camera und die verbesserte Kalibration des Temperaturbildes müssen nicht mehr wie bei den Programmen LINECALC und IRCALC Bildabschnitte von nur 700 Bildzeilen bearbeitet werden. Mit den korrigierten Bilddaten können Flugabschnitte von bis zu 20 000 Zeilen klassifiziert werden.

Während die geometrische Entzerrung der Bilddaten des Infrarot-Line-Scanners schon mit dem Programm IRCALC durchgeführt werden konnte, ist die Notwendigkeit der Entzerrung der Bilddaten des sichtbaren Spektralbereichs erst mit der Kombination von Line-Scan-Camera und Infrarot-Line-Scanner zu Tage getreten. Erst durch diese Entzerrung und die abschließende Transformation in Bilddaten, die in beide räumliche Dimensionen gleiche Auflösung besitzen, ist ein Vergleich mit Satellitendaten möglich.

3 Klassifikation der Line-Scanner-Daten

Ziel der Klassifikation ist die Unterteilung von Bildern in bedeutungsvolle Teilbereiche. Im vorliegenden Fall sollen Teilbereiche gebildet werden, die bestimmte gemeinsame Eigenschaften besitzen. Diese Teilbereiche müssen im Bild nicht zwangsläufig ein zusammenhängendes Gebiet beschreiben, sie können voneinander getrennt auftreten und trotzdem einer Objektklasse zugeordnet sein. Speziell in dieser Arbeit beschreiben die Klassen unterschiedliche Erscheinungsformen des Meereises und offenes Wasser. Im Anhang A ist auszugsweise zusammengestellt, welche Eistypen bei der Bearbeitung von Fernerkundungsdaten unterschieden werden.

	Bereichsbezeichnung		Wertigkeit	Farbe
OW	open water	offenes Wasser	1	blau
GE	grease ice	Eisschlamm	2	orange
DN	dark nilas	dunkler Nilas	3	rot
LN	light nilas	heller Nilas	4	mittelrot
PC	pancake ice	Pfannkucheneis	5	dunkelrot
GR	grey ice	graues Eis	6	mittelblau
GW	grey-white ice	grauweißes Eis	7	dunkelblau
FY1	thin first-year ice	dünnes erstjähriges Eis	8	grün
FY2	medium first-year ice	mitteldickes erstj. Eis	9	mittelgrün
FY3	thick first-year ice	dickes erstjähriges Eis	10	dunkelgrün
SY	second-year ice	zweijähriges Eis	11	violett
MY	multi-year ice	mehrfjähriges Eis	12	rosa
PU	puddle	Pfütze	13	cyan
BR	brash ice	Trümmereis	14	gelb

Tabelle 3.1: Abkürzungen, Wertigkeiten und farbliche Darstellung der unterschiedlichen Erscheinungsformen des Meereises. Die Wertigkeit und Darstellungsfarben der Bildpunkte werden bei der Arbeit mit dem Bildverarbeitungsprogramm KHOROS verwendet.

Das Ergebnis der Klassifikation der Line-Scanner-Daten sind Bilddaten im Byte-Format, wobei jeder Wert beschreibt, welcher Eistyp dem jeweiligen Bildpunkt zugeordnet ist. Die Zuordnung erfolgt nach den Angaben in Tabelle 3.1.

Soweit es möglich ist, wurde die Wertigkeit entsprechend dem Fortschritt des

Eiswachstums definiert, damit der Klassifikation folgende Rangordnungsoperatoren vorhersehbare Ergebnisse liefern. Bei Eistypen mit gleicher Rangordnung, wie Nilas und Pfannkucheneis mußte die Wertigkeit willkürlich festgelegt werden. Dieses hat jedoch geringen Einfluß, da diese Erscheinungsformen selten gemeinsam vorkommen.

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Verfahren behandelt, mit denen eine Klassifikation durchgeführt werden kann. Die Segmentierungsverfahren beziehen sich auf die Merkmalsextraktion aus einzelnen Spektralkanälen. Diese Verfahren werden beschrieben, da sie Grundlage für die folgenden Klassifikationsverfahren sind. Mit der Kombination der Information zweier Spektralbereiche kann von den Segmentierungsverfahren zur multispektralen Klassifikation übergegangen werden. Nach der Einführung des zweidimensionalen Histogramms wird die Bedeutung der Hauptkomponententransformation beschrieben. Diese ist besonders für weiterführende Arbeiten wichtig, bei denen mehr als zwei Spektralbereiche zur Verfügung stehen [HOLZSCHUHER, 1995]. Allgemeine Klassifikationsstrategien und Klassifikatoren werden vorgestellt, da sie Grundlage für die Methode bilden, mit der die Line-Scanner-Daten bearbeitet wurden. Diese Klassifikatoren liefern jedoch keine zufriedenstellenden Ergebnisse, so daß für die vorliegende Arbeit eine spezielle interaktive Klassifikation entwickelt wurde.

3.1 Segmentierungsverfahren

Im allgemeinen spricht man in der digitalen Bildsignalverarbeitung von Segmentierung, wenn in einem einfachen Grauwertbild vom Hintergrund Objekte zu unterscheiden sind. Das Ergebnis ist dann ein Binärbild mit diskreten Klassen, in dem zum Beispiel für alle Objektbildpunkte eine Eins und für alle Hintergrundbildpunkte eine Null steht. Für das Problem der Unterscheidung verschiedener Eistypen sei die Definition so verändert, daß als Ergebnis verschiedene Objekte voneinander unterschieden werden. Die spezielle Rolle des Hintergrunds entfällt hiermit, da auch dieser eine Objektklasse darstellt.

Ursprung ist also ein Bild, welches die Amplituden eines Spektralbereichs enthält. Ergebnis ist ein Bild im Byte-Format, in dem für gleiche Objekte gleiche Wertigkeiten eingetragen sind. Wie bereits erwähnt, müssen die Objekte nicht zwangsläufig örtlich miteinander verbunden sein.

Bei der Segmentierung unterscheidet man zwischen punktorientierten und bereichsorientierten Verfahren.

3.1.1 Punktorientierte Verfahren

Punktorientierte Verfahren richten sich bei der Zuordnung der Bildpunkte zu den einzelnen Objekten nur nach der Wertigkeit der Bildpunkte. Diese entspricht bei

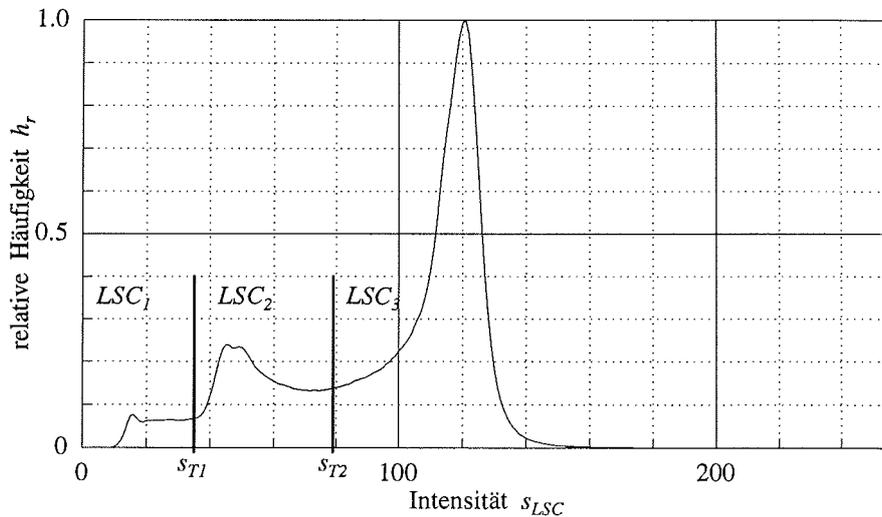


Abbildung 3.1: Grauerthistogramm der Bilddaten nach Aufnahme mit der Line-Scan-Camera. Das Histogramm wurde mit Gleichung (3.1) berechnet und anschließend normiert. Es können die Objektklassen LSC_1 , LSC_2 und LSC_3 unterschieden werden. (Daten aus cs032813.07d)

den Daten der Line-Scan-Camera der Intensität des reflektierten Sonnenlichts und beim Infrared-Line-Scanner der erfaßten Oberflächentemperatur. In den Bilddaten werden diese Eigenschaften als Grauwerte dargestellt.

Punktorientierte Verfahren erfordern die Auffindung einer oder mehrerer Schwellen, an denen die Grauwerte getrennt und unterschiedlichen Objekten zugeordnet werden können. Diese Schwellen können anhand von Grauerthistogrammen gefunden werden. Histogramme werden nach

$$h(s) = \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} P_{xy} \quad \text{mit} \quad P_{xy} = 1 \quad \text{wenn} \quad s_1(x, y) = s \quad (3.1)$$

$$P_{xy} = 0 \quad \text{sonst}$$

berechnet. Hierbei ist $s_1(x, y)$ das Ursprungsbild und s die Koordinate des Histogramms. Abbildung 3.1 zeigt ein solches Histogramm, wie es aus Daten der Line-Scan-Camera berechnet wurde. Hierbei ist die relative Auftrittshäufigkeit h_r von Grauwerten auf den Intensitäten s_{LSC} aufgetragen.

Wünschenswert wäre, wenn sich die Objektklassen unter Verwendung der Bild-

daten eines Spektralbereichs gut voneinander unterscheiden und klar getrennte Maxima hervortreten. Idealerweise gibt es zwischen diesen Maxima jeweils Bereiche, in denen die Häufigkeit auf Null abfällt. Dann kann die Schwelle in diese Bereiche fallen, um die Objektklassen sicher voneinander zu trennen. Bei der Betrachtung von Abbildung 3.1 wird deutlich, daß dieser einfache Fall nicht unbedingt vorausgesetzt werden kann. In vielen Fällen kann man davon ausgehen, daß die Grauwerte einer Objektklasse nach der GAUSSSchen Normalverteilung um das Maximum streuen. Wenn die Streuungen größer sind als der Abstand der Maxima, gibt es bezüglich der Zugehörigkeitsbereiche der Objektklassen Überlappungen. Auch wenn das Histogramm noch getrennte Verteilungen zeigt, bedeutet dieses, daß die Bildpunkte der Überlappungsbereiche nicht eindeutig zugeordnet werden können. Bei der Betrachtung von Abbildung 3.1 fällt jedoch auf, daß die ungenügende Ausprägung des Minimums zwischen den Klassen LSC_2 und LSC_3 nicht allein durch die GAUSSSche Verteilung der Klassen gebildet wurde. Hierfür lägen die Objektklassen zu weit voneinander getrennt. Die GAUSSSche Verteilung wäre hier nur durch die rechte Flanke der Verteilungsfunktion der Objektklasse LSC_3 beschrieben.

Während die Streuungen innerhalb der einzelnen Klassen durch stochastische Variation der jeweiligen Eigenschaft in den Teilbereichen der Objekte des Ursprungsbildes hervorgerufen werden, wird der Übergang zwischen den Klassen LSC_2 und LSC_3 durch den Übergangsbereich von einem zum anderen Objekt hervorgerufen. Zum einen ist die Grenze zwischen zwei Objekten in der Realität nicht zwangsläufig scharf, zum anderen werden bei der Datenerfassung Bildpunkte aufgenommen, die Teile von beiden benachbarten Objekten enthalten. Die Schwelle zwischen den Objektklassen LSC_2 und LSC_3 in Abbildung 3.1 ist noch einfach zu setzen. Der Übergang zur Klasse LSC_1 ist hingegen nicht eindeutig. Beim Finden der Schwellen ist es hilfreich, die Auswirkung der Segmentierung im Ursprungsbild zu betrachten. So wurden in älteren Arbeiten die Schwellen bei der Segmentierung der Bilddaten der Line-Scan-Camera mit Hilfe des Auswerteprogramms LINECALC [BOCHERT, 1991a] manuell festgelegt, indem der Anwender neben dem Grauerthistogramm mit markierten Schwellen das segmentierte und originale Bild betrachten konnte.

Mit dem Wissen, daß die Bereiche zwischen den Histogramm-Maxima durch Bildpunkte der Übergänge zwischen Objektklassen hervorgerufen werden, kann man ein modifiziertes Histogramm heranziehen, um die Minima deutlicher hervorzuheben. Es werden ins Histogramm nur Bildpunkte übernommen, die nicht im Übergangsbereich zwischen zwei Objekten liegen. Der Übergangsbereich kann anhand der Gradientenbildung ermittelt werden. Von OTSU [1973] ist diese Methode ausführlich zur Vorbereitung von Histogrammen für automatische Schwellenfindung beschrieben worden. WESZKA und ROSENFELD [1973] haben unterschiedliche Verfahren zur Gradientenbildung untersucht. Für die Anwendung bei der Segmentierung der Bilddaten der Line-Scan-Camera hat sich der LAPLACE-

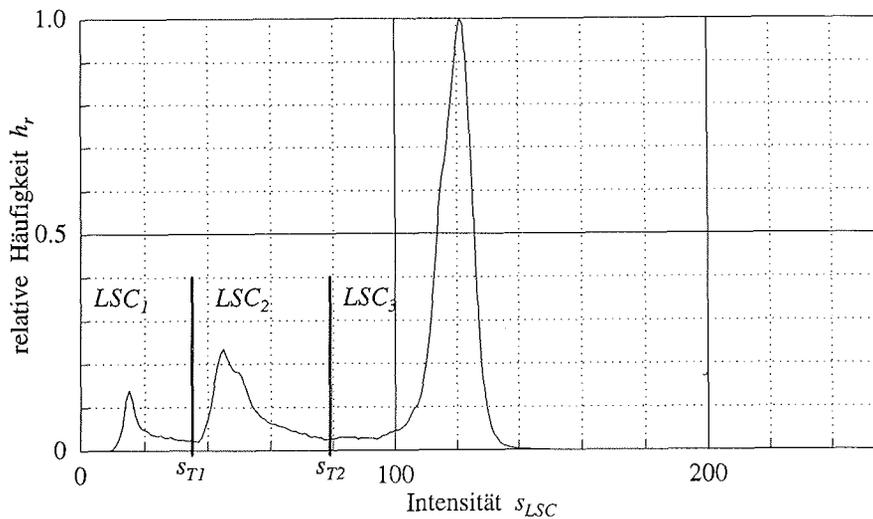


Abbildung 3.2: Modifiziertes Grauwert histogramm derselben Bilddaten (LSC), mit denen das Histogramm in Abbildung 3.1 berechnet wurde. Die Objektklassen LSC_1 , LSC_2 und LSC_3 können deutlicher unterschieden werden.

Operator als am effektivsten herausgestellt. Das Ursprungsbild wird mit der 3×3 -Maske

$$L = \begin{pmatrix} -\frac{1}{8} & -\frac{1}{8} & -\frac{1}{8} \\ -\frac{1}{8} & 1 & -\frac{1}{8} \\ -\frac{1}{8} & -\frac{1}{8} & -\frac{1}{8} \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

gefaltet und hierauf folgend werden vom Ursprungsbild nur Bildpunktwertigkeiten ins Histogramm übernommen, solange der zum Bildpunkt gehörige Gradient eine bestimmte Gradientenschwelle nicht überschreitet. Diese Gradientenschwelle kann durch Beurteilung des Erfolges gefunden werden. Abbildung 3.2 zeigt das modifizierte Histogramm aus denselben Daten, aus denen Abbildung 3.1 gewonnen wurde. Hierbei wird ersichtlich, daß die in Abbildung 3.1 angegebenen Schwellen mit Hilfe des modifizierten Histogramms ermittelt wurden. In diesem Beispiel wurde folgende prozentuale Verteilung der Objektklassenzugehörigkeit ermittelt:

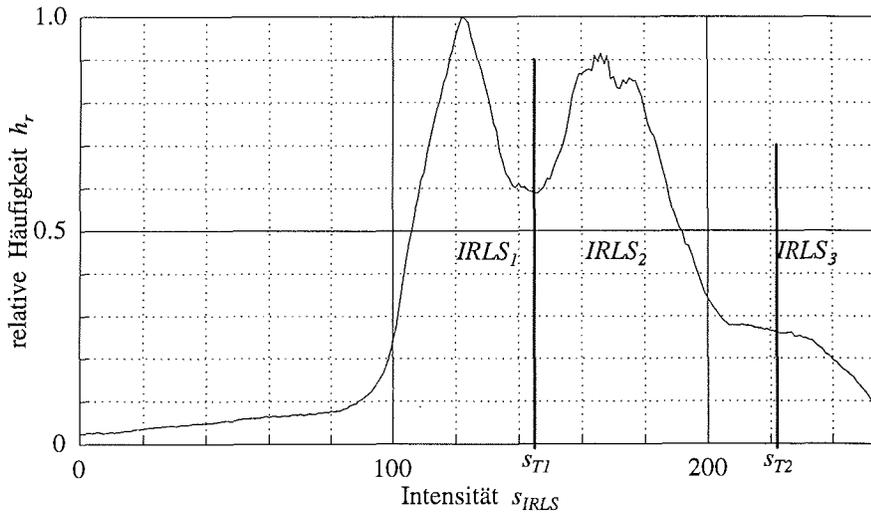


Abbildung 3.3: Grauerthistogramm der Bilddaten nach Aufnahme mit dem Infrarot-Line-Scanner. Es ist dieselbe Szene herangezogen, mit der das Histogramm in Abbildung 3.1 berechnet wurde. Im Histogramm können die Objektklassen $IRLS_1$, $IRLS_2$ und $IRLS_3$ unterschieden werden.

$$\begin{aligned}
 LSC_1 &= 5,0\% \\
 LSC_2 &= 24,1\% \\
 LSC_3 &= 70,9\%
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

Die Erfahrung hat gezeigt, daß mit alleiniger Nutzung der Daten der Line-Scan-Camera zur Segmentierung unterschiedlicher Eistypen operationell drei Objektklassen voneinander getrennt werden können.

Mit dem Infrarot-Line-Scanner stehen nun weitere Informationen zur Verfügung. Die Bilddaten der Oberflächentemperatur können entsprechend der Bearbeitung der Daten der Line-Scan-Camera bearbeitet werden. Abbildung 3.3 zeigt das Grauerthistogramm des Bildes des Infrarot-Line-Scanners, das die gleiche Szene zeigt, aus der die Daten für die Abbildungen 3.1 und 3.2 gebildet wurden. Die Grauwerte entsprechen hierbei der Oberflächentemperatur; es ist der Temperaturbereich von $\vartheta_{min} = -32^\circ\text{C}$ bis $\vartheta_{max} = -2^\circ\text{C}$ dargestellt. Abbildung 3.4 zeigt analog zu Abbildung 3.2 das modifizierte Histogramm zur sicheren Festlegung der Schwellwerte, durch die die drei Objektklassen $IRLS_1$, $IRLS_2$ und $IRLS_3$ voneinander unterschieden werden. Im Vergleich zu den Angaben in Gleichung (3.3) ergeben sich hierbei die prozentualen Verteilungen zu

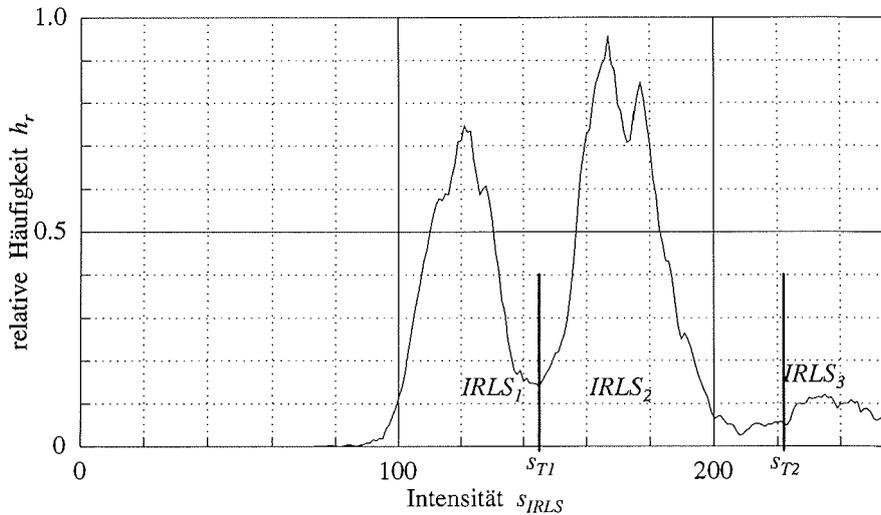


Abbildung 3.4: Modifiziertes, aus homogenen Gebieten aufgebautes, Grauerthistogramm derselben Bilddaten (IRLS), mit denen das Histogramm in Abbildung 3.3 berechnet wurde. Die Objektklassen $IRLS_1$, $IRLS_2$ und $IRLS_3$ können deutlicher unterschieden werden.

$$\begin{aligned}
 IRLS_1 &= 43,3\% \\
 IRLS_2 &= 51,6\% \\
 IRLS_3 &= 5,1\%.
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

Hierbei ist hervorzuheben, daß die jeweiligen Klassenbezeichnungen aus den Gleichungen (3.3) und (3.4) einander nicht entsprechen müssen, da andere Merkmale zur Unterscheidung herangezogen wurden. Wenn aber davon ausgegangen wird, daß mit beiden Spektralbereichen dieselben Objektklassen unterschieden werden sollen, so kann bezüglich der prozentualen Verteilungen nur ein Zusammenhang zwischen den Klassen LSC_1 und $IRLS_3$ gefunden werden. Es sei schon vorweggenommen, daß dieses der Bereich des offenen Wassers ist. Offenes Wasser hat niedrige Intensitäten in den Daten der Line-Scan-Camera und hohe Intensitäten in den Daten des Infrarot-Line-Scanners. Entsprechend bilden sich die Objektklassen LSC_1 in Abbildung 3.2 und $IRLS_3$ in Abbildung 3.4 aus.

Die beiden anderen Objektklassen der jeweiligen Spektralbereiche können nicht einander zugeordnet werden. Es handelt sich bei den verbleibenden Klassen um drei signifikante Objekte, bei denen die hier verwendeten Spektralbereiche nicht korreliert sind. Im Abschnitt 3.2 wird gezeigt, daß die Klasse LSC_3 zwei ei-

gentliche Objektklassen enthält, wobei diese nicht im sichtbaren Spektralbereich voneinander unterschieden werden können. Entsprechend beinhaltet die Klasse $IRLS_2$ ebenfalls zwei signifikante Objektklassen, was auch das Doppelmaximum bei $s_{IRLS} = 173$ in Abbildung 3.4 vermuten läßt. Im Abschnitt 3.2 werden die Bilddaten, aus denen die Histogramme dieses Abschnitts gebildet wurden, mit Hilfe eines zweidimensionalen Histogramms analysiert.

3.1.2 Bereichsorientierte Verfahren

Im Gegensatz zu punktorientierten Verfahren wird bei den bereichsorientierten Verfahren nicht mehr ausschließlich die Wertigkeit eines Bildpunktes herangezogen, um zu entscheiden, welcher Objektklasse er zugeordnet werden soll. Bei der Histogramm-Modifikation im vorherigen Abschnitt wurde zwar schon die Umgebung eines Bildpunktes betrachtet, die eigentliche Zuordnung fand jedoch nur anhand der Wertigkeit der Bildpunkte statt.

Obwohl in der vorliegenden Arbeit keine bereichsorientierten Segmentierungsverfahren untersucht wurden, sollen sie kurz beschrieben werden, um ihre Möglichkeiten zu demonstrieren.

Von WAHL [1989] wird ein Bereichswachstumsverfahren beschrieben, bei dem Nachbarschaftsbeziehungen von Bildpunkten bei der Segmentierung derart berücksichtigt werden, daß ausschließlich zusammenhängende Objekte entstehen. Hierdurch wird es vermieden, daß einzelne isolierte Bildpunkte oder kleine Bereiche entstehen. Als Problem wird sich hierbei herausstellen, daß für jeden Objektbereich ein Anfangspunkt gefunden werden muß. Ausgehend von diesem Anfangspunkt wird ein iterativer Prozeß gestartet, bei dem den entstehenden Objektbereichen benachbarte Bildpunkte mit ähnlichen Eigenschaften zugeordnet werden. Dieses Bereichswachstum wird solange fortgesetzt, bis sämtliche Bildpunkte einem Objektbereich zugeordnet sind. Ein weiteres Verfahren, welches von SPANN und WILSON [1985] vorgestellt wird, wurde von SCHMIDT-GRÖTTRUP [1992] schon exemplarisch erfolgreich mit Bilddaten der Line-Scan-Camera durchgeführt. Es ist durch Integration in eine GAUSSpyramide realisiert [WILSON und SPANN, 1988; JÄHNE, 1989 und HABERÄCKER, 1985].

Der Vorteil dieses Verfahrens wird deutlich, wenn man zunächst davon ausgeht, daß das Originalbild zum Beispiel mit einem Tiefpaßfilter bearbeitet wird, bevor ein Segmentierungsverfahren aus Abschnitt 3.1.1 Anwendung findet. Es handelt sich hierbei nicht mehr um ein rein punktorientiertes Verfahren, da durch die vorhergehende Faltung die Wertigkeiten der einzelnen Bildpunkte von der Nachbarschaft abhängt. Dieses bewirkt zum Beispiel, daß die Streuung der Objektklassen aus Abbildung 3.1 verringert wird. Dieser Sachverhalt ist im Histogramm von Abbildung 3.5 dargestellt. Im Vergleich zu Abbildung 3.1 ist nur ein Erfolg im Bereich der Objektklasse LSC_1 und an der rechten Flanke des Hauptmaximums

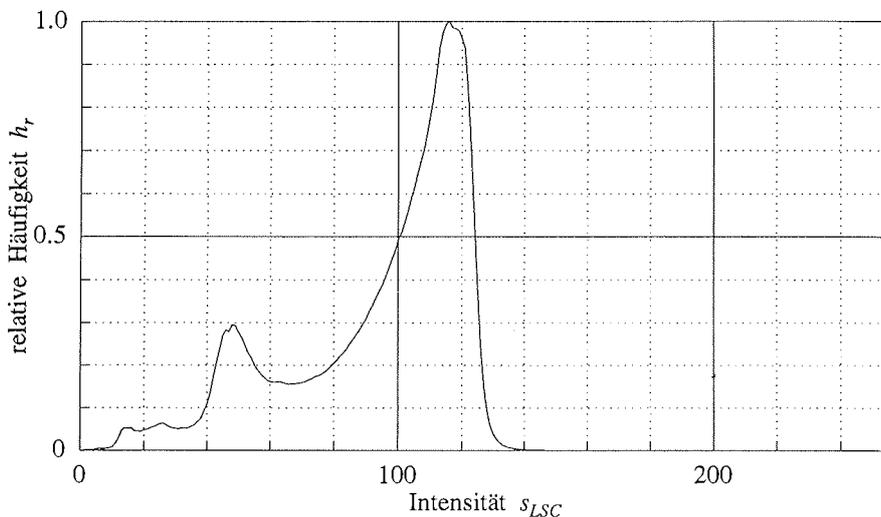


Abbildung 3.5: Grauwert-Histogramm derselben Bilddaten (LSC), mit denen das Histogramm in Abbildung 3.1 berechnet wurde. Vor der Berechnung des Histogramms wurden die Bilddaten mit einem Tiefpaßfilter bearbeitet.

zu erkennen. Im Bereich zwischen den Maxima hat diese Faltung keinen Erfolg, da zwar die Objektbereiche homogenisiert sind, jedoch auch die Objektübergänge unschärfer werden. Eigentlich müßte die Maskengröße des Faltungsoperators an den Objektgrenzen auf die Bildpunkte eines Objektbereichs beschränkt werden. Die Festlegung der Objektgrenzen findet aber erst mit der Segmentierung selbst statt. Der Pyramidenverknüpfungsalgorithmus [JÄHNE, 1989] löst dieses Problem iterativ. Im ersten Durchgang wird das Bild ohne Berücksichtigung der Objektgrenzen bearbeitet, wodurch eine vorläufige Segmentierung durchgeführt wird. Hieraus folgend wird das Bild erneut bearbeitet, jedoch unter Berücksichtigung der vorläufigen Segmentierung und ihren Objektgrenzen, indem die Faltungsmaske an den Objektgrenzen nur ein Objekt berücksichtigt. Dieses Verfahren wird wiederholt, bis es zu einem stabilen Ergebnis konvergiert. Von JÄHNE [1989] ist zu diesem Verfahren ein effektiver Algorithmus angegeben, der als Faltungsmaske nicht unbedingt einen Tiefpaß voraussetzt. Es können mit diesem Verfahren beliebige Merkmale wie zum Beispiel Gradienten zur Kantenfindung oder Texturen herangezogen werden.

Dieses Verfahren wird für die vorliegende Arbeit nicht übernommen, da der Aufwand der Erweiterung zur Berücksichtigung von zwei Spektralkanälen enorm wäre und spezielle Faltungsmasken entwickelt werden müßten.

3.2 Numerische Klassifikation

Der Unterschied zwischen der Segmentierung und der Klassifikation liegt darin, daß bei der Klassifikation die Spektralbereiche nicht mehr nur separat betrachtet, sondern kombiniert werden. Die Berechnung von Histogrammen ist nicht auf Bilddaten eines einzelnen Spektralbereichs beschränkt. Im zweidimensionalen Fall wird es durch

$$h(l, m) = \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} P_{xy} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \text{mit } P_{xy} &= 1 & \text{wenn } (s_1(x, y) = l) \wedge (s_2(x, y) = m) \\ P_{xy} &= 0 & \text{sonst} \end{aligned}$$

berechnet. Hierbei sind $s_1(x, y)$ und $s_2(x, y)$ die beiden Bilder in unterschiedlichen Spektralbereichen, l und m die Koordinaten des Histogramms. Im vorliegenden zweidimensionalen Fall kann das Histogramm noch bildlich dargestellt werden. Die relative Auftrittshäufigkeit von Wertigkeitskombinationen wird als Grauwert kodiert. Abbildung 3.6 zeigt das zweidimensionale Histogramm der Bilddaten, mit denen die Histogramme in Abschnitt 3.1 gebildet wurden. Hohe Werte der Auftrittshäufigkeit $h(s_{LSC}, s_{IRLS})$ aus Gleichung (3.5) werden durch zunehmende Schwärzung dargestellt.

Die Kodierung der relativen Häufigkeit zum Grauwertbild kann auf verschiedene Weise geschehen. Im Anhang B.5.2 ist dargestellt, wie die hier gezeigten Histogramme durch die Routine *vhisto* gebildet wurden.

Es wird von einem zweidimensionalen Histogramm gesprochen, weil der Merkmalsraum zwei Dimensionen hat. Im vorliegenden Fall ist ein Merkmal die Intensität des reflektierten Sonnenlichts s_{LSC} und das zweite die Höhe der Oberflächentemperatur s_{IRLS} . Neben weiteren Spektralbereichen können auch andere Merkmale wie zum Beispiel Texturen oder Kombinationen von Spektralinformation hinzugenommen werden.

In der grafischen Darstellung des Histogramms in Abbildung 3.6 bilden sich im Merkmalsraum zu den einzelnen Objektklassen dunkle Wolken aus, die als Cluster bezeichnet werden. Das Cluster CS_1 liegt im Bereich von geringen Intensitäten s_{LSC} des sichtbaren Spektralbereich und hohen Intensitäten s_{IRLS} des infraroten Spektralbereich. Dieses ist das Cluster, das durch das offene Wasser gebildet wurde. Da er bezüglich beider Merkmale von allen anderen Clustern zu unterscheiden ist, trat diese Objektklasse auch in den eindimensionalen Histogrammen eindeutig hervor. Anders verhält es sich mit den verbleibenden Clustern. Das Cluster CS_2 ist im sichtbaren Spektralbereich, also bezüglich des

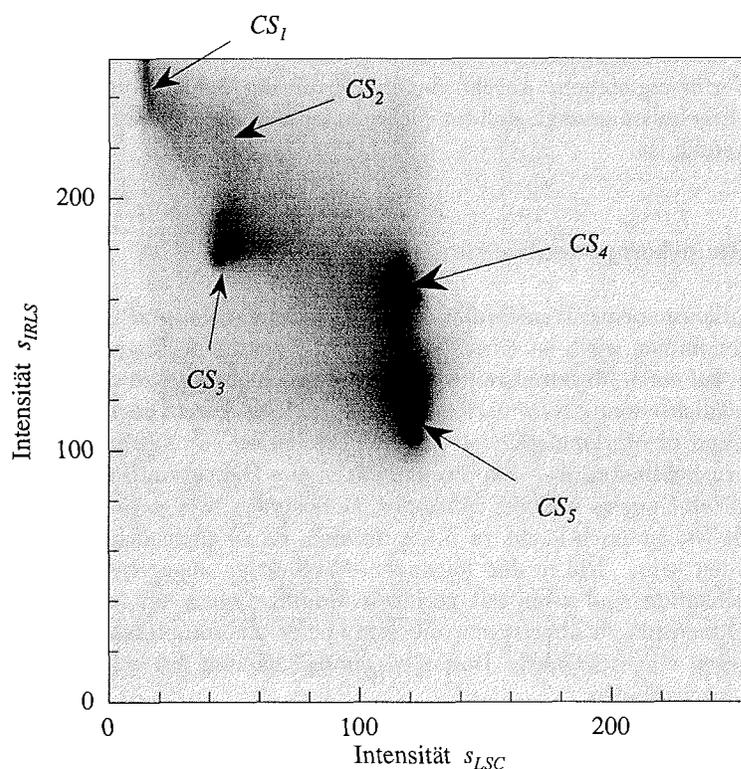


Abbildung 3.6: Zweidimensionales Histogramm derselben Bilddaten, mit denen die Histogramme in den Abbildungen 3.1 bis 3.5 berechnet wurden. Es können vier Objektklassen voneinander unterschieden werden. (Daten aus cs032813.07d)

Merkmals s_{LSC} nicht vom Cluster CS_3 zu unterscheiden. Auch im infraroten Spektralbereich, dem Merkmal s_{IRLS} lag er im Übergangsbereich zwischen den Objektklassen $IRLS_2$ und $IRLS_3$ und wurde der Klasse $IRLS_2$ zugeschlagen. Nur im modifizierten Histogramm von Abbildung 3.4 konnte dieser Bereich überhaupt unterschieden werden. Die Cluster CS_2 und CS_3 sind beide durch dunklen Nilas entstanden, wobei CS_2 aus dünnerem Nilas gebildet wurde; die Intensität im infraroten Spektralbereich ist wesentlich höher. Im sichtbaren Spektralbereich ist kein Unterschied vorhanden, wodurch zu ersehen ist, daß beide Cluster zum dunklen Nilas gehören.

Grauweißes Eis bildet das Cluster CS_4 und einjähriges Eis das Cluster CS_5 . Im sichtbaren Spektralbereich sind die beiden Objektklassen nicht zu unterscheiden, da sie beide mit neuem Schnee bedeckt sind.

In den folgenden Abschnitten wird nun behandelt, wie diese Cluster, die signifi-

kante Objektklassen beschreiben, ermittelt werden können und welche Möglichkeiten als Entscheidungskriterien für die Zuordnung zu den einzelnen Objektklassen zur Verfügung stehen. Anschließend wird mit der Beurteilung der bis dahin erzielten Ergebnisse gezeigt, daß im vorliegenden Fall eine interaktive Klassifikation notwendig ist.

3.2.1 Hauptkomponententransformation

Die Hauptkomponententransformation, die durch eine Hauptachsentransformation vorgenommen wird, ist eine Methode, um einen mehrdimensionalen Merkmalsraum auf einen Merkmalsraum mit geringerer Dimension zu reduzieren, und hierbei möglichst wenig Information zu verlieren. Der Anreiz liegt darin, daß die Klassifikation in Merkmalsräumen höherer Dimension nur mit großem Rechenaufwand zu bearbeiten ist. Ein zweidimensionales Histogramm mit den Daten der Line-Scan-Camera und des Infrarot-Line-Scanners, wie es in Abbildung 3.6 dargestellt ist, ist noch leicht zu interpretieren, da es auch anschaulich dargestellt werden kann. Die in den folgenden Abschnitten angegebenen Methoden zur Klassifikation sind zwar mit geringen Modifikationen auf Merkmalsräume höherer Dimension zu übertragen, die gefundenen Zuordnungsvorschriften sind jedoch wegen eingeschränkter Darstellungsmöglichkeiten nur mit großem Aufwand zu durchschauen.

Die interaktive Klassifikation, auf die im Abschnitt 3.4 eingegangen wird, ist wegen der Notwendigkeit der grafischen Darstellung auf den zweidimensionalen Merkmalsraum beschränkt. Anhand der bispektralen Daten der Line-Scan-Camera und des Infrarot-Line-Scanners sei die Möglichkeit der Hauptkomponententransformation beschrieben, um die hier entwickelten Methoden auch für Daten nutzbar zu machen, die in dieser Arbeit folgenden Untersuchungen aufgenommen werden und aus drei Spektralkanälen bestehen [HOLZSCHUHER, 1995]. Hierbei kann der Merkmalsraum auf zwei Dimensionen reduziert werden, um auch bei den Daten des Color-Line-Scanners die Möglichkeit der interaktiven Klassifikation zu nutzen.

Wenn zwei Merkmale stark miteinander korreliert sind, kann man aus dem einen Merkmal mit mehr oder weniger großer Sicherheit das zweite Merkmal ableiten. Der Extremfall wäre eine lineare Abhängigkeit der beiden Merkmale, so daß die Information eines Merkmals redundant wäre. Auch die Merkmale des Histogramms in Abbildung 3.6 sind miteinander korreliert, welches durch die Lage der Cluster auf einer Diagonalen deutlich wird. Der Begriff der Hauptachsentransformation ist von der Bearbeitung der Kovarianzmatrix eines Merkmalsraumes gebildet worden. Auf der Diagonalen dieser Matrix stehen die Varianzen der einzelnen Merkmale, alle anderen Elemente werden durch die jeweiligen Kovarianzen gebildet. Durch die Hauptachsentransformation läßt sich die Kovarianzmatrix in

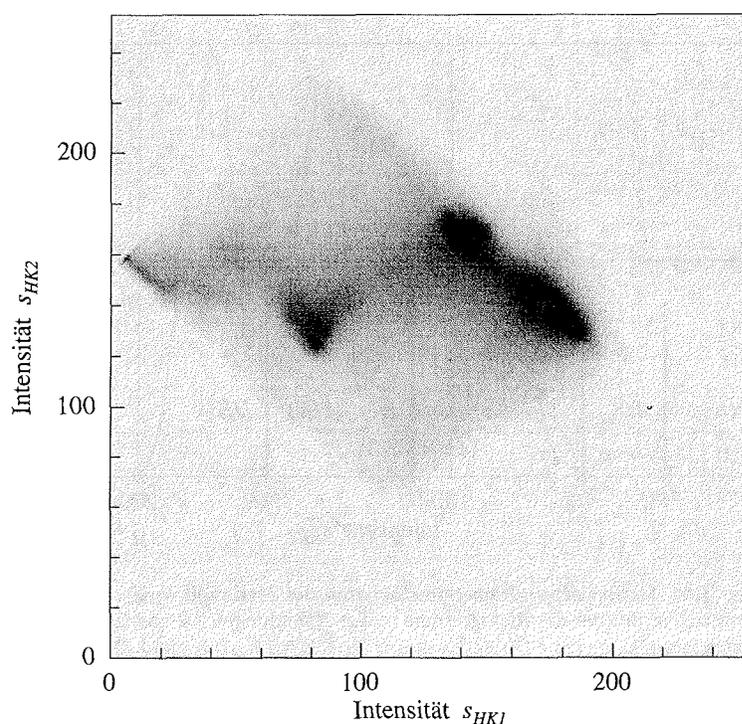


Abbildung 3.7: Ergebnis einer Hauptkomponententransformation des Histogramms aus Abbildung 3.6. Die Merkmale s_{LSC} und s_{IRLS} wurden in die Merkmale s_{HK1} und s_{HK2} überführt. Die wesentliche Information, die zur Trennung in unterschiedliche Objektklassen herangezogen wird, ist im Merkmal s_{HK1} enthalten. (Daten aus cs032813.07d)

das Hauptachsensystem drehen, in dem die Merkmale untereinander unkorreliert sind. Man gewinnt aus den ursprünglichen Merkmalen neue Merkmale, die untereinander unkorreliert sind. Die Kovarianzmatrix enthält nach der Transformation in ihrer Hauptdiagonalen die Varianzen der neuen Merkmale. Die aussagekräftigen Merkmale haben eine große Varianz, die Merkmale mit kleiner Varianz tragen nicht viel zur Trennung der Objektklassen bei und können weggelassen werden, ohne daß die Klassifikation wesentlich verschlechtert wird.

Eine Transformation der Kovarianzmatrix bedeutet eine Koordinatentransformation im Merkmalsraum. Dieses ist beim Übergang von Abbildung 3.6 zur Abbildung 3.7 zu erkennen. Das neue Histogramm wurde durch eine Koordinatendrehung und -verschiebung gebildet. Die neuen Merkmale sind die Intensitäten s_{HK1} und s_{HK2} . Das Merkmal s_{HK1} hat gegenüber dem Merkmal s_{HK2} eine we-

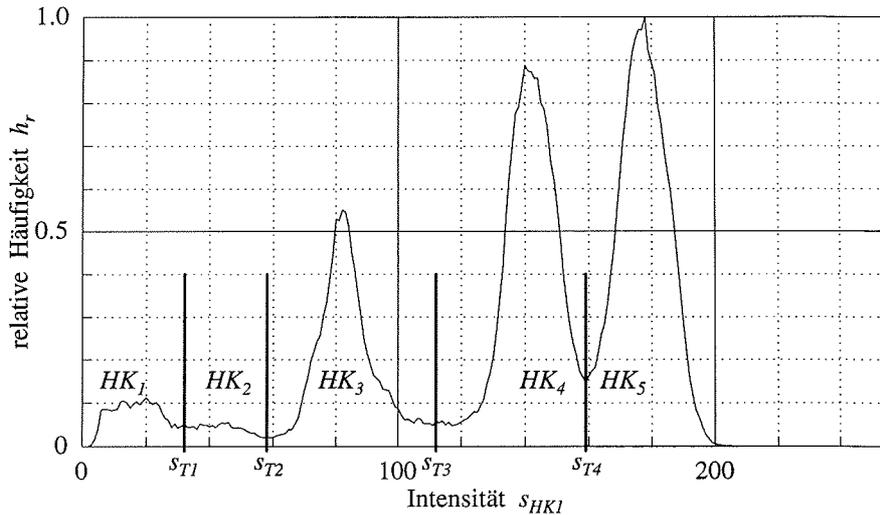


Abbildung 3.8: Modifiziertes Grauerthistogramm des Merkmals s_{HK1} . Es ist die selbe Szene herangezogen, mit der die Histogramme in den Abbildungen 3.2 und 3.4 berechnet wurden. Im Histogramm können die Objektclassen HK_1, HK_2, HK_3, HK_4 und HK_5 unterschieden werden. (Daten aus cs032813.07d)

sentlich höhere Varianz, sein eindimensionales Histogramm ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Es handelt sich wegen der besseren Trennung der Objektclassen um ein modifiziertes Histogramm entsprechend der Abbildungen 3.2 und 3.4.

Dieses Beispiel verdeutlicht, daß ein analytisches Vorgehen nicht immer zum besten Ergebnis führt. Die Varianz des Merkmals s_{HK1} der Kovarianzmatrix, die sich durch die Hauptkomponententransformation für Abbildung 3.7 berechnen läßt, ist nicht maximal. Das Histogramm wurde nach dem Gesichtspunkt der besten Segmentierungsmöglichkeit der Objektclassen gebildet. Die Kovarianz der Merkmale ist stark durch die Korrelation der Merkmale innerhalb der Objektclassen geprägt. Die Kovarianz der Realisationen, die zur Objektclassen CS_5 gehören, ist im ursprünglichen Histogramm sichtlich geringer als im transformierten Histogramm. Beim Histogramm in Abbildung 3.7 ist jedoch die Lage der Cluster, durch die später die Objektclassen gebildet werden, bezüglich der Merkmale gering korreliert. Bei der Anwendung der Hauptkomponententransformation müssen die Daten zur Bildung der Kovarianzen gewichtet werden.

Mit Hilfe des Histogramms vom Merkmal s_{HK1} können die fünf vorkommenden Objektclassen voneinander getrennt werden. Mit den Bezeichnungen und Schwellen aus Abbildung 3.8 ergeben sich im transformierten Bild zu den Objektclassen

folgende prozentuale Verteilungen:

$$\begin{aligned}
 HK_1 &= 2,4\% \\
 HK_2 &= 5,6\% \\
 HK_3 &= 21,3\% \\
 HK_4 &= 34,7\% \\
 HK_5 &= 36,0\%.
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

Durch die Betrachtung der zweidimensionalen Histogramme und den Vergleich mit Gleichung (3.3) wird deutlich, daß die Objektklassen HK_4 und HK_5 gemeinsam die Objektklasse LSC_3 und die Klassen HK_2 und HK_3 die Klasse LSC_2 gebildet haben. Der Vergleich mit Gleichung (3.4) zeigt die Kombination der Objektklassen HK_3 und HK_4 zur Klasse $IRLS_2$. Die Klasse HK_2 ist bei der Betrachtung des infraroten Spektralbereichs auf die Objektklassen $IRLS_2$ und $IRLS_3$ aufgeteilt worden.

Auch wenn die Bearbeitung der Daten, die kombiniert mit der Line-Scan-Camera und dem Infrarot-Line-Scanner erfaßt wurden, einfach mit Hilfe der Hauptkomponententransformation und Segmentierung im Grauwert-Histogramm durchgeführt werden kann, werden zur Erhöhung der Klassifikationsgenauigkeit die Objektklassen im zweidimensionalen Histogramm beschrieben.

3.2.2 Klassifikationsstrategien

Im ersten Schritt der numerischen Klassifikation stellt sich das Problem, wie die einzelnen Cluster im Merkmalsraum bezüglich ihrer Lage gefunden werden können. Man unterscheidet hierbei zwischen überwachten und unüberwachten Strategien [JÄHNE, 1989]. Bei einer überwachten Klassifikation werden im Ursprungsbild Trainingsgebiete ausgewählt, die signifikante Objektklassen repräsentieren. Mit der anschließenden Übertragung dieser Trainingsgebiete in den Merkmalsraum können die typischen Zentren der Objektklassen und darüber hinaus ein Maß der Streuungen der einzelnen Merkmale gefunden werden. Diese überwachte Klassifikationsstrategie setzt voraus, daß für jede vorkommende Objektklasse mindestens ein Trainingsgebiet ausgewählt wurde.

Universeller ist die unüberwachte Klassifikation einzusetzen. Hierbei wird im Merkmalsraum die Lage der Cluster ermittelt. Ausgehend von einem beliebigen Ort im Merkmalsraum als Zentrum eines Clusters wird die Umgebung dieser gebildeten Objektklasse zugeordnet, wenn entsprechende Zuordnungskriterien erfüllt sind. Erfüllt ein Element des Merkmalsraumes dieses Kriterium nicht, wird eine neue Objektklasse gebildet. Da mit der Eröffnung einer neuen Objektklasse schon durchgeführte Zuordnungen eventuell dieser neuen Klasse zugeordnet worden wären, werden diese Klassifikationen iterativ durchgeführt, wodurch lange Rechenzeiten entstehen. Als Ergebnis liegen dann die Zentren der Cluster vor. Je

nach verwendetem Algorithmus werden auch Aussagen über das Gewicht der Cluster und Abschätzungen über die Streuungen der einzelnen Merkmale gemacht. Bei der Zuordnung der Elemente des Merkmalsraumes zu den Objektklassen werden verschiedene Klassifikatoren unterschieden.

3.2.3 Klassifikatoren

Unter dem Klassifizieren versteht man die Zuordnung einzelner Bildbereiche zu bestimmten Objektklassen. Bei der Bearbeitung von Bildern mit einem Spektralbereich kann dieses durch die beschriebene Segmentierung geschehen. Sollen mehrere Merkmale betrachtet werden, so genügt es nicht, einzelne Schwellwerte für die Unterscheidung zu finden. Das eindimensionale Histogramm wächst zum mehrdimensionalen an; es wird auch als Merkmalsraum bezeichnet.

Klassifikatoren unterscheiden sich bezüglich des mathematischen Modells, mit dem die Objektklassen im Merkmalsraum beschrieben werden, und in Bezug auf die Entscheidungskriterien bei der Zuordnung eines Elements des Merkmalsraumes zu einer Objektklasse, wenn dieses Element im Überlappungsbereich von Objektklassen liegt.

Um bei der Klassifikation geringe Rechenzeiten zu erzielen, ist es ratsam, das mehrdimensionale Histogramm in eine Tabelle zu überführen, in dem die Elemente des Merkmalsraumes nicht mehr die Auftrittshäufigkeiten, sondern Marken enthalten, die eine Zuordnung zu den Objektklassen erlauben. Im vorliegenden Fall mit einem zweidimensionalen Merkmalsraum ist diese Methode noch leicht zu realisieren. Bei der Verwendung von mehr als vier Merkmalen wird jedoch der Speicherbedarf enorm. Auch hierbei wird deutlich, wie wichtig die Hauptkomponententransformation ist, denn mit ihrer Hilfe kann bei den meisten Anwendungen die Dimension des Merkmalsraumes erheblich reduziert werden, ohne das Klassifikationsergebnis wesentlich zu verschlechtern.

Das einfachste mathematische Modell der Objektklassen wird bei der Quadermethode verwendet, die ihren Namen aus der Anwendung in einem dreidimensionalen Merkmalsraum hat. Im zweidimensionalen Fall von Abbildung 3.6 würden die Objektklassen durch Rechtecke umhüllt. Vorteil ist hierbei die einfache Zuordnungsvorschrift, da für jedes Merkmal und Objektklasse maximal zwei Vergleiche notwendig sind. Schwierigkeiten ergeben sich, wenn die Merkmale der einzelnen Objektklassen stark miteinander korreliert sind. Hierbei werden die Quader und somit die Wahrscheinlichkeit der Überlappung mit anderen Objektklassen groß.

Andere geometrische Objekte haben den Nachteil, daß sie im mehrdimensionalen Merkmalsraum schwer zu beschreiben sind. Geeignet wären mehrdimensionale Ellipsoide. Diese Realisierung kommt der Methode sehr nahe, in der die Objektklassen durch ihren Schwerpunkt beschrieben werden. Bei der Methode der geringsten Distanz (Minimum-Distance-Classifer) wird von den Elementen des

Merkmalsraumes zu allen Schwerpunkten die EUKLIDische Distanz bestimmt und der Objektklasse mit geringster Distanz zugeordnet. Dieses setzt voraus, daß die Verteilungen der einzelnen Objektklassen etwa die gleiche Varianz haben.

Bei unterschiedlichen Varianzen kann für jede Objektklasse eine mehrdimensionale Wahrscheinlichkeitsfunktion gebildet werden. Hierbei werden die Elemente des Merkmalsraumes der Objektklassen zugeordnet, zu der sie die größte Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit haben (Maximum-Likelihood-Classifier).

Im folgenden werden anhand der Bilddaten der Line-Scanner die Grenzen dieser Verfahren demonstriert. Da durch ihre Anwendung unvermeidbare Unsicherheiten entstehen, wurde in der vorliegenden Arbeit ein interaktive Klassifikation entwickelt, die in Abschnitt 3.4 beschrieben ist.

3.3 Beurteilung der Ergebnisse

In diesem Abschnitt soll zuerst eine quantitative Beurteilung der Ergebnisse erfolgen, die durch die hier vorgestellten Klassifikatoren erzielt wurden. Qualitativ werden diese Ergebnisse dann auch mit den Resultaten der Segmentierungen aus Abschnitt 3.1 und der interaktiven Klassifikation aus Abschnitt 3.4 verglichen.

Zur Beurteilung der Klassifikationssicherheit ist in jedem Fall ein Vergleich des klassifizierten Bildes mit dem Ursprungsbild, welches in den unterschiedlichen Spektralbereichen vorliegt, notwendig. Bei dieser Kontrolle können den Objektklassen auch die entsprechenden Erscheinungsformen des Meereises aus Tabelle 3.1 zugeordnet werden. Wurde die Klassifikation unter Verwendung von Trainingsgebieten durchgeführt, so kann im nachhinein kontrolliert werden, ob die Trainingsgebiete auch durch die Klassifikation entsprechend ihrer Vorgabe beurteilt wurden. Es können auch weitere Gebiete als Stichproben herangezogen werden, die ähnlich der Trainingsgebiete bearbeitet werden, jedoch nicht zur Klassifikation herangezogen werden.

Im vorliegenden zweidimensionalen Fall kann die Güte der Klassifikation direkt im Merkmalsraum beurteilt werden, indem die Grenzen der gebildeten Objektklassen ins zweidimensionale Histogramm übernommen werden. Bei Merkmalsräumen höherer Dimension entfällt diese anschauliche Möglichkeit leider. Welche Bedeutung dieser Methode zukommt, wird bei der Beurteilung der automatischen Algorithmen deutlich.

In Abbildung 3.9 sind zwei Ergebnisse einer automatischen Klassifikation dargestellt. Im Histogramm auf der linken Seite sind die Grenzen der Objektklassen eingetragen, die durch die Anwendung der KHOROS-Routine *kmean* [KHOROS GROUP, 1991], einem Minimum-Distance-Classifer, gefunden wurden. Hierbei wurden keine Zentren der Cluster vorgegeben. Entsprechend der Angaben aus Abbildung 3.6 wurde die Anzahl der Objektklassen auf fünf gesetzt. Auffallend

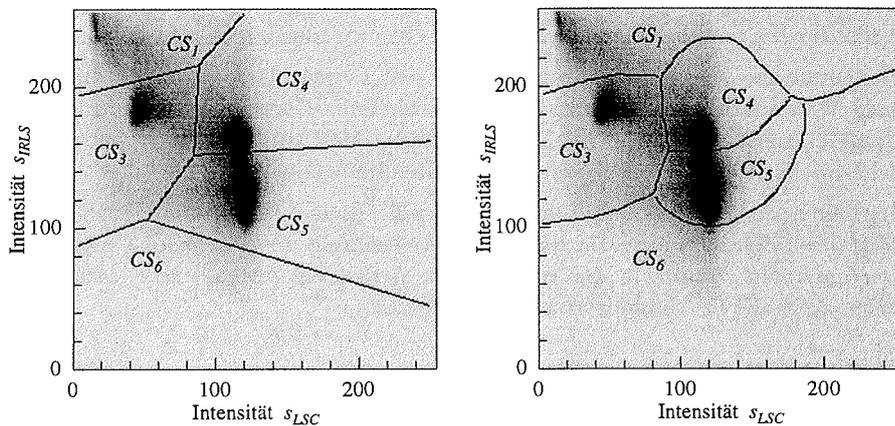


Abbildung 3.9: Zweidimensionales Histogramm mit eingezeichneten Grenzen der Objektklassen. Gezeigt sind die Ergebnisse automatischer Klassifikatoren. Das Resultat des Maximum-Likelihood-Classifier, welches auf der rechten Seite dargestellt ist, bringt gegenüber des Minimum-Distance-Classifier (links) keinen Vorteil. (Daten aus cs032813.07d)

ist, daß die Klasse CS_2 in die Klasse CS_1 integriert wurde. Hingegen wurde im Bereich von niedrigen Intensitäten des infraroten Spektralbereichs die Objektklasse CS_6 gebildet, obwohl in diesem Bereich kein signifikantes Cluster vorhanden ist.

Ausgehend von den Zentren der Cluster, die mit dem Minimum-Distance-Classifier gefunden wurden, wurde das Bild mit einem Maximum-Likelihood-Classifier [PCI, 1994] bearbeitet. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.9 auf der rechten Seite dargestellt. Diese Methode führt zu einem noch schlechteren Ergebnis, was besonders durch aufmerksame Betrachtung der Objektklasse CS_5 zu erkennen ist. Die Grenze zur Klasse CS_4 hat sich nicht wesentlich geändert. In Richtung zu niedrigen Intensitäten des infraroten Spektralbereichs hat sich die Objektgrenze zugunsten der Klasse CS_6 eng an das Cluster der Klasse CS_5 geschoben. Dieses ist dadurch verursacht, daß die Objektklasse CS_6 im Gegensatz zur Klasse CS_5 keinen signifikantes Cluster enthält, wodurch ihre Varianz sehr groß wird. Hiermit wird auch die Wahrscheinlichkeit groß, daß Elemente des Merkmalsraumes in großer Entfernung vom Zentrum noch zur Klasse gehören. Die Objektklasse CS_5 hat ein deutliches Cluster, seine Verteilung eine geringe Varianz und somit fällt gerade diese Objektklasse im Merkmalsraum sehr klein aus.

Der große Vorteil der Objektivität der automatischen Algorithmen wird wegen der schlechten Ergebnisse, die in Abbildung 3.9 dargestellt sind, nicht genutzt. Besonders die Außerachtlassung der Objektklasse CS_2 oder vielmehr die Integration in die Klasse CS_1 ist nicht vertretbar.

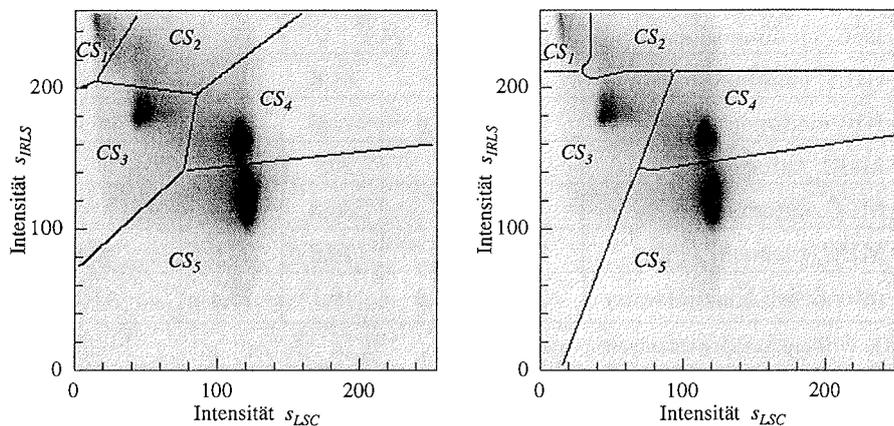


Abbildung 3.10: Zweidimensionales Histogramm mit eingezeichneten Grenzen der Objektzentren. Das linke Diagramm zeigt das Ergebnis eines Minimum-Distance-Classifiers mit manuell vorgegebenen Clusterzentren. Rechts sind die Objektzentren der interaktiven Klassifikation angegeben. (Daten aus cs032813.07d)

Abbildung 3.10 zeigt auf der linken Seite das Ergebnis eines Minimum-Distance-Classifiers, wobei die Objektzentren manuell vorgegeben wurden. Das Ergebnis kann als gut befunden werden. Schwierigkeiten würden auftreten, wenn benachbarte Objektzentren bezüglich ihrer Verteilungen stark unterschiedliche Varianzen aufweisen. Hierbei würden sich die Objektzentren nicht verschieben. Mit den Ergebnissen aus Abbildung 3.9 wurde dargestellt, daß hierbei auch der Maximum-Likelihood-Classifier keine Besserung bewirkt. Auf der rechten Seite der Abbildung 3.10 ist hier schon das Ergebnis der interaktiven Klassifikation angegeben. Der wesentliche Unterschied ist bei der Definition der Objektzentren zu erkennen. Die Grenze zur Klasse CS_3 ist vom Cluster der Klasse CS_3 weiter entfernt. Auch das Cluster der Objektzentren CS_1 wurde nicht so eng beschnitten.

Die Zusammenfassung der Klassifikationsergebnisse der Beispieldaten ist in Tabelle 3.2 dargestellt. In der Kopfzeile sind für die einzelnen Spalten die Eistypen angegeben. Die Abkürzungen sind die der Tabelle 3.1. Dunkler Nilas wurde für dieses Beispiel in zwei Objektzentren unterteilt, da durch unterschiedliche Eisdicken eine Trennung möglich ist. Die einzelnen Bezeichnungen der Objektzentren, wie sie bisher angegeben wurden, ist der Übersicht halber nicht in die Tabelle übernommen worden. Bei der Beschreibung der einzelnen Verfahren wurde schon auf die Zugehörigkeit zu den Eistypen eingegangen. Die qualitative Beurteilung der Lage der Objektzentren im Merkmalsraum hat gezeigt, daß das Ergebnis der interaktiven Klassifikation bei der Beurteilung der Methoden anhand Tabelle 3.2 als Referenz herangezogen werden kann.

alle Angaben in %	OW	DN1	DN2	GW	FY	
LSC, eindimensional	5,0	24,1		70,9		
IRLS, eindimensional	5,1	51,6			43,3	
HK, eindimensional	2,4	5,6	21,3	34,7	36,0	
MDC, automatisch	9,8		20,1	24,5	39,7	5,9
MLC, automatisch	8,0		36,3	11,0	21,6	23,1
MDC, manuell	3,1	10,7	16,8	28,6	40,8	
interaktive Klassifikation	3,6	7,8	19,1	28,4	41,1	

HK = Hauptkomponententransformation

MDC = Minimum-Distance-Classifer

MLC = Maximum-Likelihood-Classifer

Tabelle 3.2: Ergebnisse der unterschiedlichen Segmentierungen und Klassifikationen der Beispieldaten. Die Abkürzungen in der Kopfzeile sind Tabelle 3.1 entnommen. Zum Vergleich der Qualität gelten die Angaben der interaktiven Klassifikation als richtig.

Die ersten beiden Zeilen geben die prozentualen Verteilungen an, die mit den Segmentierungsverfahren aus Abschnitt 3.1 ermittelt wurden. Hierbei wird durch die Anzahl der signifikanten Spalten noch einmal die eingeschränkte Segmentierungsmöglichkeit bei der Bearbeitung von einzelnen Spektralkanälen deutlich. Bezüglich der prozentualen Angaben weichen die Ergebnisse jedoch nicht weit von den Werten der interaktiven Klassifikation ab, wenn hierbei die Summen der entsprechenden Objektklassenbedeckungen herangezogen werden. Die Überschätzung des Anteils von offenem Wasser ist durch die Betrachtung der Abbildung 3.10 zu verstehen. Bei der eindimensionalen Betrachtung würden die Objektklassengrenzen senkrecht oder waagrecht verlaufen. Dieser Anteil wird hingegen beim Ergebnis der Hauptkomponententransformation unterschätzt, da die Grenze im vorliegenden Fall unter 45° verlaufen würde. Bei der Klasse CS_1 in Abbildung 3.10 würde dieses bedeuten, daß der rechte untere Bereich entfallen würde, wobei rechts oben und links unten die Objektklasse um einen gering besetzten Merkmalsraum anwächst.

Mit Hilfe der Hauptkomponententransformation können zwar alle signifikanten Objektklassen unterschieden werden, bei der Trennung zwischen grauweißem und erstjährigem Eis ergibt sich jedoch ein großer Fehler, da die Objektklassengrenzen im zweidimensionalen Histogramm im Winkel von 45° zur Hauptachse der Merkmale beider Objektklassen verläuft.

Die beiden automatischen Klassifikationen versagen bei der Unterscheidung von offenem Wasser und dünnem dunklen Nilas. Bezüglich der prozentualen Verteilung

lungen sind die Werte des Minimum-Distance-Classifier nahe an denen der interaktiven Klassifikation. Wie schon oben erwähnt, wurde das Ergebnis durch den Maximum-Likelihood-Classifier verschlechtert. Hiervon ist besonders die Grenze zwischen dem dunklen Nilas und dem grauweißen Eis betroffen. Die Grenzverschiebung der beiden Objektklassen für erstjähriges Eis fällt hier nicht ins Gewicht, würde aber bei einem anderen Fall zu unvermeidbaren Fehlern führen.

Das Ergebnis des Minimum-Distance-Classifier mit manueller Festlegung der Clusterzentren entspricht praktisch dem der interaktiven Klassifikation. Nur die Verteilung zwischen den beiden Klassen des dunklen Nilas hat sich zu Gunsten des dünneren Nilas verschoben. Bei der Betrachtung von Abbildung 3.10 wird deutlich, daß die Grenze zwischen diesen beiden Klassen sehr eng am Cluster der Objektklasse CS_3 liegt. Hierbei wurde das Zentrum auf den Maximalwert des Clusters von CS_3 gelegt, es wäre aber richtiger gewesen, das Zentrum im Schwerpunkt zu platzieren.

In jedem Fall muß nach der Anwendung der automatischen Algorithmen der Beurteilung der Ergebnisse hohe Aufmerksamkeit geschenkt werden. Durch Veränderung einzelner Parameter bezüglich der Zuordnungskriterien zu den einzelnen Objektklassen können die hier gezeigten Ergebnisse eventuell noch verbessert werden. Für die Darstellungen in diesem Abschnitt wurden die Grundeinstellungen der Algorithmen verwendet. Die Klassifikation der Beispieldaten mit 512×4000 Bildpunkten in fünf Objektklassen dauerte auf einer SUN-SparcStation-10 mit der Routine *kmean* [KHOROS GROUP, 1991] etwa 40 Minuten. Ein optimierter ISO2-Algorithmus [KHOROS GROUP, 1991] liefert annähernd das gleiche Ergebnis und kommt mit der Hälfte der Rechenzeit aus.

Die schlechteren Ergebnisse der automatischen Algorithmen, die aufwendige Kontrolle der Ergebnisse und die hohen Rechenzeiten rechtfertigen eine interaktive Klassifikation.

3.4 Interaktive Klassifikation

Die hier vorgestellte interaktive Klassifikation beruht darauf, daß die Grenzen der Objektklassen im zweidimensionalen Histogramm manuell angegeben werden. Für das Bildverarbeitungsprogramm KHOROS wurden sechs Routinen entwickelt, die diese interaktive Klassifikation unterstützen. Die Anwendung der Routinen ist im Anhang B detailliert erklärt, die Programme selbst sind im Anhang D aufgelistet.

Bei der Clusterbildung wird die Zuordnung der Elemente des Merkmalsraumes in die einzelnen Objektklassen durchgeführt. Die eigentliche Klassifikation wird mit Hilfe einer Tabelle durchgeführt, die bei der Clusterbildung aus dem zweidimensionalen Histogramm als Merkmalsraum entwickelt wurde. Unter Merk-

malsextraktion wird die Zuordnung der Objektklassen zu den unterschiedlichen Erscheinungsformen des Meereises verstanden.

3.4.1 Clusterbildung

Auf die Routine *v2dhisto* wurde schon im Abschnitt 3.2 eingegangen. Mit ihrer Anwendung wird unter Berücksichtigung von Gleichung (3.5) das zweidimensionale Histogramm berechnet. Das Histogramm kann als Bild im Integer-Format angesehen werden, in dem die Elemente des Merkmalsraumes hohe Werte enthalten, wenn die entsprechende Kombination der Merkmale häufig vorkommt. Analog der Bearbeitung der eindimensionalen Grauwert-Histogramme im Abschnitt 3.1.1 kann das zweidimensionale Histogramm als modifiziertes Histogramm berechnet werden (siehe Übergang von Abbildung 3.1 zu Abbildung 3.2). Hierbei werden die Bilddaten beider Spektralkanäle mit dem LAPLACE-Operator aus Gleichung (3.2) gefaltet und nur dann Wertekombinationen ins Histogramm übernommen, wenn die Summe der Gradienten beider Spektralbereiche einen Schwellwert nicht überschreitet. Dieser Schwellwert kann beim Aufruf der Routine *v2dhisto* angegeben werden. Analog zu Abbildung 3.5 sollten die Eingabebilder vor der Bildung des Histogramms durch einen Medianfilter bearbeitet werden. Die Größe der Maske kann beliebig gewählt werden.

Zur Betrachtung und Weiterverarbeitung des Histogramms kann seine Darstellung mit der Routine *vnhisto* normiert werden. Das Ergebnis ist ein Bild im Byte-Format. Neben der Auswahl einer linearen oder logarithmischen Grauwerttransformation kann bei der Übertragung auch die Wurzel der Elemente herangezogen werden. Zur Darstellung hat es sich als sinnvoll erwiesen, die Wertigkeit der Bilddaten zu invertieren, so daß hohe Auftretshäufigkeiten als dunkle Wolken erscheinen.

In Abbildung 3.11 ist ein Beispiel eines Histogramms dargestellt, bei dem die Vorteile der interaktiven Klassifikation besonders deutlich werden. Die dunklen Linien deuten wieder die Grenzen zwischen den einzelnen Objektklassen an. Das linke Bild zeigt das Ergebnis einer automatischen Klassifikation mit einem Minimum-Distance-Classifer von KHOROS. Die Lage der Grenzen orientiert sich nur wenig an den ausgebildeten Clustern. Auf der rechten Seite ist das gleiche Histogramm dargestellt. Die Objektklassen, deren Grenzen in die Abbildung übernommen wurden, sind hierbei manuell mit der Routine *segment* nach der Orientierung an den Clustern gebildet worden. Bei der Arbeit mit der Routine *segment* können mit der Maus Polygone, Kreise, Rechtecke oder freihand gezeichnete Objekte um die Cluster gebildet werden. Beim Abschluß eines Objekts wird der Bereich der jeweiligen Objektklasse eingefärbt. Es stehen verschiedene Farben für die unterschiedlichen Objektklassen zur Verfügung. In den hier dargestellten Histogrammen wurden nur die Objektklassengrenzen in die Histogramme

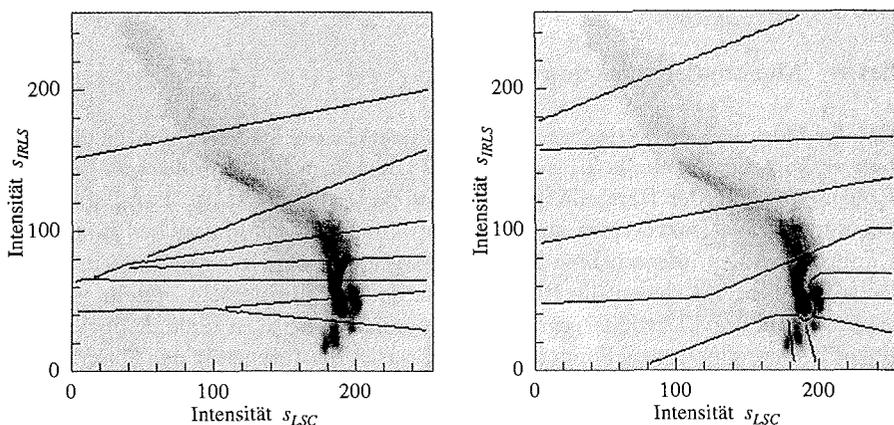


Abbildung 3.11: Zweidimensionales Histogramm mit eingezeichneten Grenzen der Objekt-klassen. Links ist das Ergebnis eines automatischen Minimum-Distance-Classifiers dargestellt. Rechts sind die Objektklassengrenzen der interaktiven Klassifikation angegeben. Bei diesem Beispiel wird der Vorteil der interaktiven Klassifikation besonders deutlich. (Daten aus cs022814.10a)

übernommen, um eine Orientierung zu gewähren.

Bei der Bildung der einzelnen Objekt-klassen muß noch keine Aussage getroffen werden, um was für ein Objekt es sich handelt. Bei der Merkmalsextraktion können später auch mehrere Objekt-klassen zu einer Klasse zusammengefaßt werden.

3.4.2 Klassifikation

Die Klassifikation ist die Übertragung der im Merkmalsraum gebildeten Objekt-klassen in die Raumkoordinaten des Ursprungsbildes. Dieser Schritt wird durch die Routine *v2dclass* durchgeführt. Wenn die Tabelle $m(s_{LSC}, s_{IRLS})$ als Ergebnis der Routine *segment* aus dem zweidimensionalen Histogramm abgeleitete Objekt-klassen enthält, ergibt sich das klassifizierte Bild zu

$$c(x, y) = m(s_{LSC}(x, y), s_{IRLS}(x, y)). \quad (3.7)$$

Hierbei sind x und y die Koordinaten der erfaßten Bilddaten. Bei der Klassifikation wird also neben den Objekt-klassen im Merkmalsraum als Ergebnis der Routine *segment* auch das Ursprungsbild in beiden Spektralkanälen benötigt. Das Ergebnis sind Bilddaten, die für gleiche Objekte auch gleiche Wertigkeiten enthalten. Die Farbpalette wird aus dem Ergebnis der Routine *segment* übernommen,

so daß man sich anhand der Farben orientieren kann.

3.4.3 Merkmalsextraktion

Bei der Merkmalsextraktion werden den Objektklassen die Wertigkeiten und Farben entsprechend Tabelle 3.1 zugeordnet. Diese Zuordnung findet mit Hilfe der Routine *label* an der Darstellung des klassifizierten Bildes statt. Parallel können bei der Merkmalsextraktion auch die ursprünglichen Bilddaten der Line-Scanner-Camera und des Infrared-Line-Scanners dargestellt werden. Ein Ausschnitt der Beispieldaten, aus denen die Histogramme der Abbildung 3.11 erstellt wurden, ist in Abbildung 3.12 wiedergegeben. Auf der linken Seite ist die unkalibrierte Intensität des reflektierten Sonnenlichts und rechts die Intensität der Oberflächentemperatur mit einem Bereich von $\vartheta_{min} = -25^{\circ}\text{C}$ (dunkel) bis $\vartheta_{max} = -2^{\circ}\text{C}$ (hell) dargestellt. Hilfreich sind auch die Angaben, die bei der Datenerfassung als Kommentare angelegt wurden. Durch die Integration eines Editors für Protokolleingaben in die Erfassungsprogramme ist eine Zuordnung dieser Angaben leicht möglich, da alle Eintragungen sowohl den Flugabschnitt als auch die Zeilennummer enthalten [BOCHERT, 1991b und 1992].

Anhand des Protokolls sollten vorab die möglichen Eistypen eingeschränkt werden. Für die Zuordnung jeder einzelnen Objektklasse sollten die Informationen aus den Ursprungsbilddaten, wie zum Beispiel Abbildung 3.12, und aus den Histogrammen (Abbildung 3.11) hinzugezogen werden. In den Ursprungsbildern ist es möglich, neben den Intensitäten auch Texturen und Schollenformen für die Identifikation der Eistypen heranzuziehen. Das Ergebnis der Merkmalsextraktion der Bilddaten aus Abbildung 3.12 mit dem Histogramm aus Abbildung 3.11 ist in Abbildung 3.13 dargestellt. Die linke Seite zeigt das klassifizierte Bild mit unterschiedlichen Grautönen. Die Bedeutung der Grautöne kann aus dem Merkmalsraum entnommen werden. Die farbliche Darstellung ist rechts im unteren Diagramm und die Kennzeichnung der Objektklassen im oberen Diagramm enthalten. Im Vergleich mit Abbildung 3.11 ist die Zusammenfassung der kleinen Objektklassen für niedrige Intensitäten im infraroten Spektralbereich zu erkennen.

Interessant ist die Anordnung der Objektklassen von erstjährigem (FY), zweijährigem (SY) und mehrjährigem Eis (MY). Hierbei sind bezüglich beider Spektralbereiche Überschneidungen zu erkennen. Die Klasse FY ist relativ warm und dunkel, da bei der Aufnahme nur eine geringe Schneedecke vorhanden war. Die Objektklasse SY hat ähnliche Temperatur, jedoch durch die große Porosität des Eises eine höhere Reflektivität im sichtbaren Spektralbereich. Das MY-Eis ist durch die größere Dicke die kälteste Eisklasse. Die Reflektivität ist jedoch geringer als die der Klasse SY, da durch Abschmelzungen an der oberen Seite Staubaablagerungen an der Oberfläche akkumulieren.

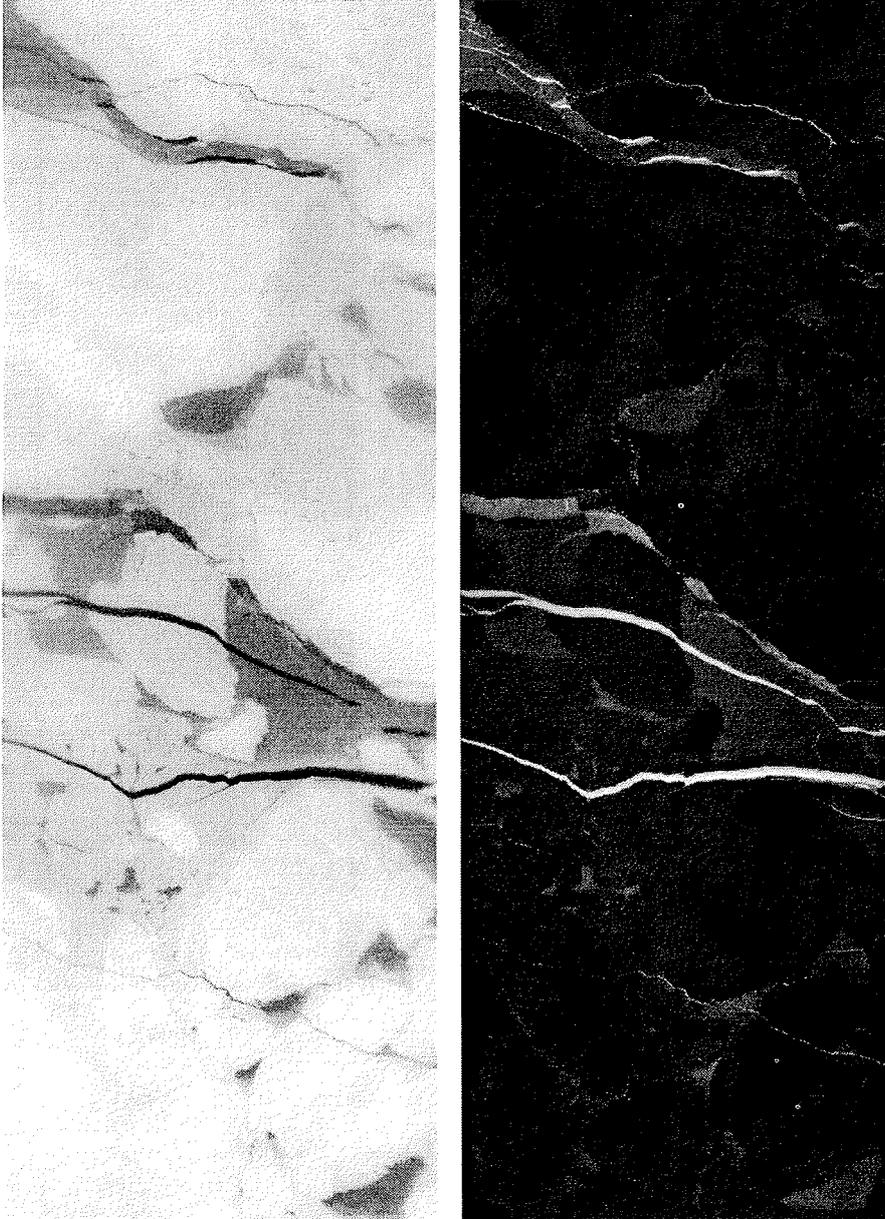


Abbildung 3.12: Bilddaten s_{LSC} der Line-Scan-Camera (links) und s_{IRLS} des Infrarot-Line-Scanners (rechts) als Beispiel für eine interaktive Klassifikation. Die Ausschnitte zeigen ein Gebiet von etwa 3,5 km Breite und 10 km Länge. (Daten aus cs022814.10a)

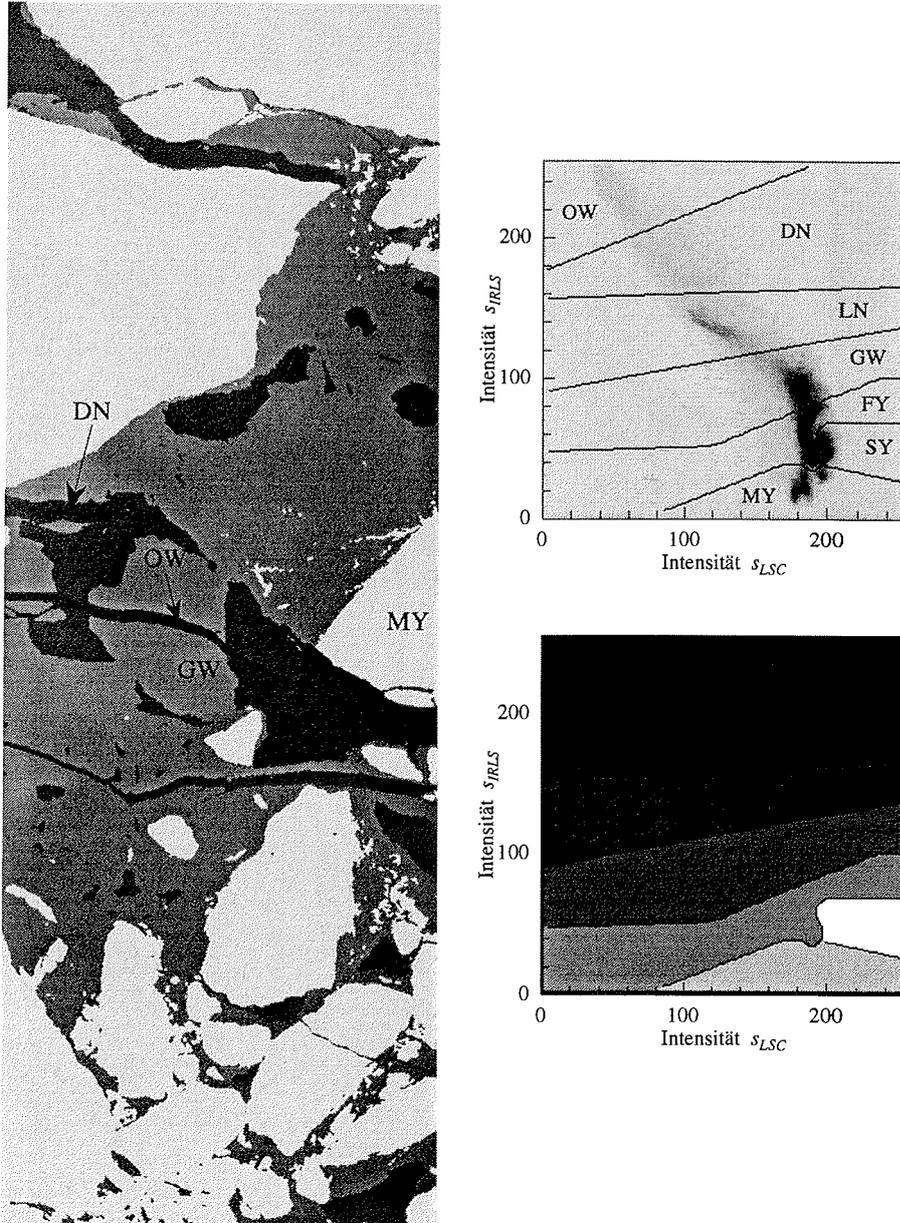


Abbildung 3.13: Darstellung der Objektklassen im Merkmalsraum nach der Merkmalsextraktion und zweidimensionales Histogramm mit eingezeichneten Klassengrenzen. Das klassifizierte Bild ist auf der linken Seite dargestellt. (Daten aus cs022814.10a)

Nach der Merkmalsextraktion kann mit der Routine *vlabhisto* der Merkmalsraum entsprechend der endgültigen Zuordnung der Objektklassen nach Tabelle 3.1 gebildet werden. Aus den Ursprungsbilddaten und dem klassifizierten Bild werden die Objektklassen ähnlich wie in Abbildung 3.13 rechts unten gebildet.

Im vorliegenden Abschnitt, besonders bei der Behandlung der Beispieldaten, wurde deutlich, daß für die Interpretation der Objektklassen und die Merkmalsextraktion Erfahrung und Übung notwendig sind. Lediglich die relative Lage der Objektklassen im Merkmalsraum kann objektiviert werden. Der Abstand der einzelnen Cluster ist jedoch von den Bedingungen der Datenerfassung und der allgemeinen Situation beim Meßflug abhängig. So ist die Intensität im sichtbaren Spektralbereich nicht kalibriert und der Kontrast von der Blendenstellung und der Helligkeit bei der Erfassung abhängig. Die Oberflächentemperatur des Eises wird neben der Eisdicke von der Schneeauflage und im wesentlichen von der Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung und Windgeschwindigkeit bestimmt.

4 Segmentierung der Radardaten

Die Untersuchung der Radarsatellitendaten stützt sich auf die umfangreichen Arbeiten von SKRIVER [1989a]. Er hat neben theoretischen und experimentellen Betrachtungen von statistischen Eigenschaften der Erscheinungsform unterschiedlicher Meereistypen ein Verfahren zur Segmentierung von Radarbildern entwickelt. Dieser bereichsorientierte Segmentierungsalgorithmus ist in der vorliegenden Arbeit übernommen worden.

Im folgenden wird kurz auf die Wirkungsweise des Radars mit synthetischer Antennenapertur, wie es beim ERS-1 Verwendung findet, eingegangen, damit die Mechanismen der Rückstreuung bei Wechselwirkung mit Materie besser verstanden werden können. Speziell wird auf die Rückstreueigenschaften von Meereis eingegangen.

Zur Unterscheidung der Eistypen werden statistische Parameter untersucht. Da der Wert des Rückstreckoeffizienten zur eindeutigen Trennung unterschiedlicher Eistypen nicht ausreicht, müssen zusätzliche Kenngrößen herangezogen werden. Dargestellt werden Kennwerte, die die Form oder Momente der Verteilungsfunktionen beschreiben und Werte, die aus den Co-occurrence-Matrizen gebildet werden können.

Abschließend wird in diesem Kapitel der von SKRIVER [1989a] vorgestellte Segmentierungsalgorithmus beschrieben. Die Segmentinterpretation wird anhand der zuvor eingeführten statistischen Parameter vorgenommen.

4.1 Synthetic-Aperture-Radar

Im allgemeinen kann man Radarsysteme (Radar – Radio Detection and Ranging), die in der Fernerkundung eingesetzt werden, in drei Kategorien einteilen: Altimeter, Scatterometer und abbildende Radarsysteme. Bei der Satellitenfernerkundung werden Altimeter und Scatterometer im wesentlichen für großskalige Untersuchungen des Ozeans eingesetzt. Für die Fernerkundung von Meereis verwendet man auch Scatterometer für experimentelle Untersuchungen, die die Verbesserung von abbildenden Radarsystemen und Interpretation von deren Daten zum Ziel haben.

Abbildende Systeme werden als Seitensicht radar (SLAR – Side Looking Airborne Radar) realisiert, da die Auflösung in einer Abbildungsdimension aus der Signallaufzeit vom Radar zum Objekt und zurück abgeleitet wird. Bei einer Ausrichtung zum Nadir würden durch die Signalanteile auf den beiden Seiten des Nadirs Doppeldeutigkeiten entstehen. Bei der Behandlung der Rückstreueigenschaften von Materie in Abschnitt 4.1.2 wird zudem deutlich, daß die seitliche Ausrichtung für die Fernerkundung von Meereis Vorteile hat.

4.1.1 Prinzipielle Wirkungsweise

Beim Seitensicht radar ist die Antenne auf dem Satelliten oder Flugzeug zu einer Seite senkrecht zur Flugrichtung ausgerichtet. Beim Synthetic-Aperture-Radar (SAR) des ERS-1 beträgt der mittlere Winkel vom Nadir etwa $\alpha_{ref} = 23^\circ$. Seine Antenne ist so dimensioniert, daß senkrecht zur Flugrichtung ein Bereich von typischerweise $\alpha_{near} = 19,5^\circ$ bis $\alpha_{far} = 26,6^\circ$ abgedeckt wird. Dieses entspricht einer Breite von 100 km auf dem Grund.

Obwohl auch das SAR ein Seitensicht radar ist, steht die Bezeichnung SLAR ausschließlich für Seitensicht radars mit realer Antennenapertur. Im oberen Teil von Abbildung 4.1 ist zu erkennen, daß beim SLAR die Antennenkeule so ausgerichtet ist, daß sie den Untergrund senkrecht zur Flugrichtung (Range) breit und in Flugrichtung (Azimuth) sehr schmal ausleuchtet. Die Auflösung der Abbildung in Flugrichtung wird damit ähnlich realisiert wie bei Line-Scannern. Nach Aufnahme einer Bildzeile wird das SLAR einen Bildzeilenabstand weiterbewegt und die nächste Zeile aufgenommen.

Die Aufnahme einer Bildzeile wird durch einen von der Antenne abgestrahlten kurzen Mikrowellenpuls eingeleitet. Der durch diesen Puls abgedeckte Bereich auf dem Grund hängt von der Antennengeometrie ab. Seine Ausdehnung ist umgekehrt proportional zur Antennengröße. Die Auflösung senkrecht zur Flugrichtung d_r wird durch die unterschiedliche Signallaufzeit bei Betrachtung der verschiedenen Bereiche auf dem Grund ermöglicht. Sie ist nach ULABY *et al.* [1981] von der Pulslänge τ abhängig.

$$d_r = \frac{c \tau}{2 \sin(\alpha)} \quad (4.1)$$

Hierbei ist c die Lichtgeschwindigkeit und α der Einfallswinkel der Strahlung auf dem Grund. Hohe Auflösungen senkrecht zur Flugrichtung werden also durch sehr kurze Impulse erreicht. Durch die Verkürzung der Impulse steigt einerseits jedoch die Bandbreite, andererseits muß bei gleichbleibender abgestrahlter Energie durch die Zeitverkürzung die Leistung des Radars gesteigert werden. Da hierbei physikalisch Grenzen gesetzt sind, wird die Auflösung durch frequenzmodulierte Pulse verbessert. Aus Gleichung (4.1) wird

$$d_r = \frac{c}{2B \sin(\alpha)} \quad , \quad (4.2)$$

wobei die Auflösung nun durch die Bandbreite B bestimmt ist und durch freie Wahl der Pulslänge die Leistung des Radars in Grenzen gehalten werden kann. Für das SAR des ERS-1 ergibt sich mit einer Bandbreite von $B = 15,55$ MHz eine mittlere Auflösung senkrecht zur Flugrichtung nach Gleichung (4.2) zu $d_r = 24,7$ m.

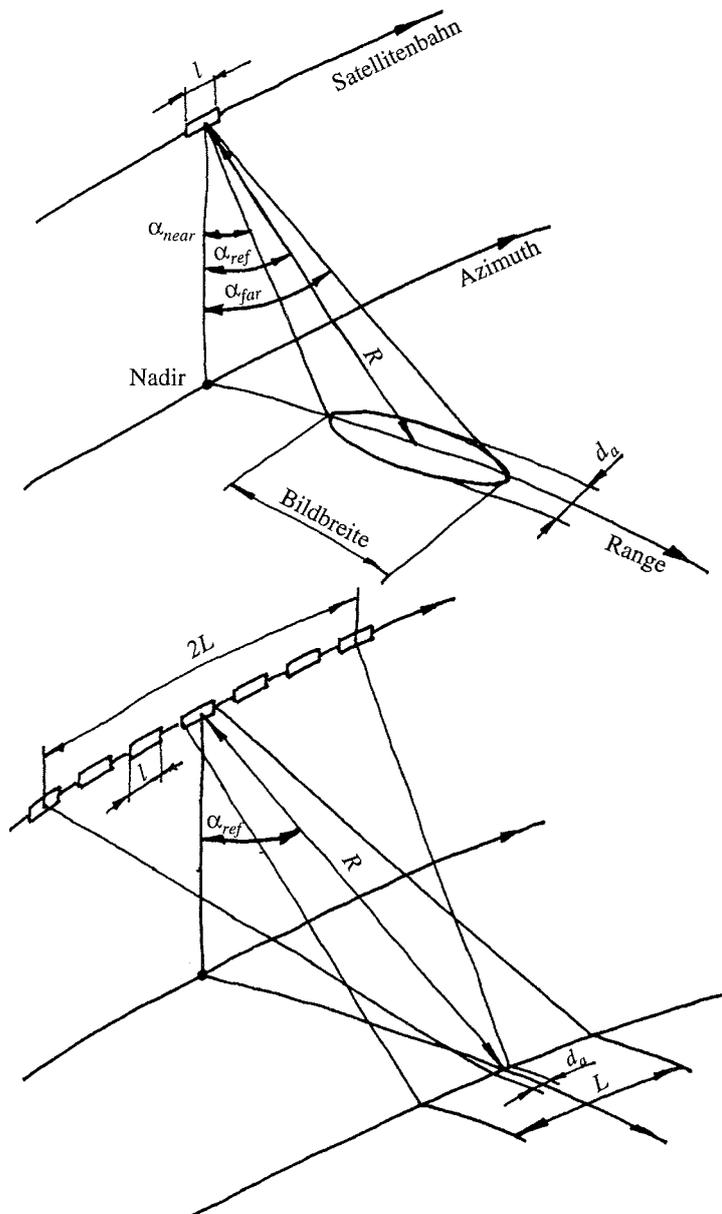


Abbildung 4.1: Aufnahmegeometrien beim Seitensicht-Radar. Im oberen Bild ist für das Radar mit realer Antennenapertur (SLAR) der bestrahlte Bereich dargestellt. Unten ist die Aufnahmegeometrie für das Synthetic-Aperture-Radar (SAR) mit einer synthetischen Antennenapertur von $2L$ skizziert.

Für die Auflösung in Flugrichtung gilt für Radars mit realer Antennenapertur nach ULABY *et al.* [1981]

$$d_a = \frac{R \lambda}{l} \quad , \quad (4.3)$$

mit R als Abstand zum Meßgebiet und l als Länge der Antenne in Flugrichtung. Mit einer Wellenlänge von $\lambda = 56$ mm, einer Antennenlänge von $l = 10$ m und von der Flughöhe und Meßwinkel abhängigem Abstand $R = 850$ km ergäbe sich für die Werte beim ERS-1, jedoch als Realisation eines Radars mit realer Antennenapertur, eine Auflösung von $d_a = 4,8$ km. Bei der realisierten Auflösung von $d_a = 30$ m müßte die Antenne eine nicht zu realisierende Länge von $l = 1600$ m haben.

Das Konzept des Radars mit synthetischer Antennenapertur ist, daß jeder Bereich auf dem aufzunehmenden Untergrund über eine Zeitdauer von

$$t = \frac{L}{v} \quad (4.4)$$

bestrahlt wird. Die Fluggeschwindigkeit des Satelliten ist durch v bestimmt, die Ausdehnung des bestrahlten Untergrunds in Flugrichtung analog zu Gleichung (4.3) mit

$$L = \frac{R \lambda}{l} \quad (4.5)$$

Während der Zeitdauer, in der sich ein bestimmtes Objekt im Sichtbereich des Radars befindet, ändert sich ständig die relative Geschwindigkeit zwischen Radar und Objekt, welches gleichzeitig durch die DOPPLERverschiebung eine Frequenzänderung des empfangenen Signals hervorruft. Durch Auflösung dieser Frequenzunterschiede können in der sichtbaren Szene die Objekte voneinander getrennt werden. Umfangreiche Rechnungen ergeben, daß durch Berücksichtigung dieser Frequenzunterschiede die Ausdehnung des bestrahlten Bereichs äquivalent zur halben synthetischen Antennenapertur ist. Hiermit wird die reale Antennenlänge l aus Gleichung (4.3) durch die doppelte Länge L der synthetischen Antennenapertur aus Gleichung (4.5) ersetzt.

$$d_a = \frac{R \lambda l}{R \lambda 2} = \frac{l}{2} \quad (4.6)$$

Obwohl mit dieser theoretischen Betrachtung die Auflösung in Flugrichtung nur noch von der realen Antennengröße abhängt, kann beim SAR des ERS-1 mit einer Antennenlänge von $l = 10$ m keine Auflösung von $d_a = 5$ m erreicht werden. Die

Einschränkung der nutzbaren Antennenapertur wird durch die Bedingung gegeben, daß die vom Radar empfangene Phasenfront einen linearen Verlauf längs der Apertur aufweisen muß, sich also die Objekte im Fernfeld der Antenne befinden müssen. Die synthetische Antennenapertur ist jedoch sehr groß. Das SAR des ERS-1 hat in Flugrichtung eine Auflösung von $d_a = 30$ m. Mit Gleichung (4.3) ergibt sich somit die Größe der synthetischen Antennenapertur zu $2L = 1600$ m.

4.1.2 Rückstreueigenschaften von Meereis

Daß Radardaten zur Unterscheidung von verschiedenen Typen von Meereis genutzt werden können, resultiert daraus, daß die Rückstreueigenschaften von den physikalischen Eigenschaften des Eises abhängen. Die Intensitäten, die zum Beispiel beim SAR des ERS-1 als Bilddaten gespeichert sind, entsprechen der rückgestreuten Leistung P_r , die von der Antenne des SAR empfangen wird, bezogen auf die relevante Fläche. Nach ULABY *et al.* [1982] ist die zurückgestreute Leistung

$$P_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \frac{P_t G^2}{R^4} \sigma. \quad (4.7)$$

Hierbei ist die gesendete Leistung P_t , der Antennengewinn G , die verwendete Wellenlänge λ und die Entfernung vom Objekt R vom SAR und den Satellitengeometrien vorgegeben. Die empfangene Leistung ist proportional zum Rückstreuungswirkungsquerschnitt σ .

Zur Ermittlung der Leistung, die für die einzelnen Bildpunkte gespeichert wird, ist die Betrachtung des differentiellen Rückstreukoeffizienten σ° notwendig, da alle Größen außer der Wellenlänge λ aus Gleichung (4.7) innerhalb eines Bildpunktes variieren können und die Messungen vom Sensorsystem unabhängig sein sollen.

$$P_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \int_A \frac{P_t G^2}{R^4} \sigma^\circ da \quad (4.8)$$

Hierbei ist A die Fläche eines Bildpunktes. Der spezifische Rückstreukoeffizient σ° wird vereinfacht auch als Rückstreukoeffizient bezeichnet. Der Rückstreukoeffizient kann über die Materialeigenschaften, welche die Wechselwirkungen zwischen der Materie und dem elektromagnetischen Feld bestimmen, über die MAXWELLSchen Gleichungen berechnet werden. Diese Eigenschaften sind die relative Permeabilität μ_r , die relative Permittivität ϵ_r und die spezifische Leitfähigkeit κ . Die Permeabilität μ entspricht bei den betrachteten Materialien unabhängig von der Wellenlänge λ der Permeabilität des Vakuums μ_0 , so daß die relative Permeabilität $\mu_r = 1$ wird.

In der Literatur ist es üblich, die Permittivität und die spezifische Leitfähigkeit κ zur komplexen Dielektrizitätskonstanten zusammenzufassen.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r - j \frac{\kappa}{\omega} \quad (4.9)$$

Hierbei ist ε_0 die Permittivität des Vakuums und ω die Winkelfrequenz. Der Realteil ist die Permittivität, der negative Imaginärteil wird als Dämpfung bezeichnet. Es wird noch verdeutlicht, daß die Dämpfung nicht ausschließlich von diesem Term verursacht wird.

Bei der Anwendung der komplexen Dielektrizitätskonstanten auf die Wellengleichung vereinfacht sich ihr Ansatz aus den MAXWELLSchen Gleichungen zu

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Eine Aussage zum elektrischen Feld \mathbf{E} erhält man, wenn man die erste Gleichung nochmals nach der Zeit t ableitet und die zweite Gleichung einsetzt.

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{H} = -\varepsilon \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (4.11)$$

Unter Anwendung der vektoranalytischen Beziehung

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\Delta \mathbf{E} + \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{E}, \quad (4.12)$$

wobei wegen fehlender Raumladung die Divergenz $\operatorname{div} \mathbf{E} = 0$ ist, ergibt sich die Wellengleichung zu

$$\Delta \mathbf{E} = \varepsilon \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}. \quad (4.13)$$

Eine Lösung der Wellengleichung ist die für Radaranwendungen in Betracht kommende ebene Welle mit \mathbf{E}_0 als Anfangsfeldstärke

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{j(\omega t - k z)}, \quad (4.14)$$

wobei sich der Ausbreitungsfaktor (Wellenzahl) k zu

$$k = \sqrt{\omega^2 \varepsilon \mu_0} = \sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \omega^2 - j \kappa \mu_0 \omega} \quad (4.15)$$

ergibt. Durch die Variable z wird die Richtung der Wellenausbreitung beschrieben.

Mit Gleichung (4.15) beginnt die Kompliziertheit der analytischen Betrachtungen. Durch das Radizieren des komplexen Ausdrucks der Materialeigenschaften kann über die Richtung des resultierenden Vektors, der genau die Hälfte des Verlustwinkels ausmacht, zwar das Verhältnis zwischen imaginären Dämpfungsfaktor und dem realen Phasenfaktor bestimmt werden. Die Beurteilung der Gewichte der Komponenten der Materialeigenschaften gestaltet sich jedoch nicht einfach. Der genannte Verlustwinkel ist der Winkel des Vektors ε aus Gleichung (4.9) und gibt somit über die Materialeigenschaften Auskunft. Mit der Halbierung dieses Winkels durch die Radizierung in Gleichung (4.15) ist der Imaginärteil aus Gleichung (4.9) nicht die Dämpfung, wird jedoch in der Literatur als Dämpfung bezeichnet, da er den wesentlichen Anteil hieran hat.

Es gibt viele Untersuchungen, die die Bestimmung der komplexen Dielektrizitätskonstanten zum Inhalt haben. Von ULABY *et al.* [1986] werden gemessene Werte für unterschiedliche Eistypen bei verschiedenen Temperaturen vorgestellt. DIERKING [1992] beschäftigt sich mit Rückstreumodellen und gibt auch einige Modellergebnisse an, die das frequenzabhängige Verhalten der Dielektrizitätskonstanten unterschiedlicher Eistypen behandeln.

Schon die Bemerkung von DIERKING [1992] in seiner Einleitung, daß die auf eine Eisfläche auftreffende elektromagnetische Strahlung teilweise reflektiert und teilweise gestreut wird, macht einen analytischen Übergang von der Anwendung der Wellengleichung (4.14) zum Rückstreukoeffizienten aus Gleichung (4.8) problematisch. Richtig muß ergänzt werden, daß die auf eine Eisfläche auftreffende elektromagnetische Strahlung teilweise reflektiert, teilweise gestreut und teilweise gebrochen wird. Der aus der Lösung der Wellengleichung abzuleitende Geschwindigkeitswechsel der Wellenausbreitung beim Übergang zwischen unterschiedlicher Materie führt zu den FRESNELSchen Formeln, die entsprechend des Einfallwinkels der Strahlung den reflektierten und ins zweite Medium gebrochenen Anteil angibt. Hierbei würden ausschließlich die Oberflächenanteile, deren Normale zum Radar gerichtet sind, zum Empfangssignal beitragen. Jedoch genügen nur unendlich ausgedehnte plane Grenzschichten den FRESNELSchen Formeln. Die Rauigkeit der betrachteten Oberflächen liegt jedoch in der Größenordnung der beim Radar angewendeten Wellenlänge.

Die Oberflächenrauigkeit wird bei der Verwendung von alternativen Streumodellen statistisch beschrieben. So geben die Standardabweichung der Oberflächenhöhe σ_z und die Korrelationslänge l_z Maße für die Rauigkeit. Nur beim Nilas als Neueis sind diese Größen kleiner als die beim SAR des ERS-1 verwendete Wellenlänge von $\lambda = 57$ mm. Die in der von DIERKING [1992] gegebene Übersicht enthaltenen Angaben reichen leider nur bis zu glattem Eis im bottnischen Meerbusen mit $\sigma_z = 2$ mm und $l_z = 14$ mm. Die Werte von Nilas liegen noch niedriger.

Bei $\lambda > \sigma_z$ und $\lambda > l_z$ gilt bei den Wechselwirkungen an den Grenzflächen die RAYLEIGH-Streuung. Diese glatten Eistypen liefern im SAR-Bild geringe Intensitäten, da bei der RAYLEIGH-Streuung der diffus gestreute gegenüber dem gerichtet reflektierten Anteil sehr gering ist.

In der Übersicht von DIERKING [1992] reichen die statistischen Angaben der Oberflächenrauigkeit bis $\sigma_z = 44\text{mm}$ und $l_z = 180\text{mm}$ und werden in Extremfällen wie bei Preßeisrücken wohl noch überboten. Bei $\lambda < \sigma_z$ und $\lambda < l_z$ ist die RAYLEIGH-Theorie außerhalb ihres Gültigkeitsbereichs; hier kann dann die KIRCHHOFF-Theorie angewendet werden, die zum Beispiel von DIERKING [1992] zur Anwendung von Radarmodellen erklärt wird. Bei der KIRCHHOFF-Theorie ist die gerichtete Reflexion gegenüber der diffusen Streuung vernachlässigbar; der diffuse Anteil ist im Idealfall rotationssymmetrisch, und damit wird ein wesentlicher Signalanteil zurück zum Radar gestreut. Besonders treten Kanten wie Schollenränder oder Preßeisrücken hervor.

Neben den Betrachtungen der Oberflächenstreuung und -reflektion muß die Strahlung betrachtet werden, die an der Oberfläche ins Eis gebrochen wird. Hierbei muß untersucht werden, wie tief die Strahlung in das Eis eindringt und welche Mechanismen eine Rückstreuung im Eis als Volumenstreuung hervorrufen. Abbildung 4.2 zeigt als Übersicht die Eindringtiefe l_p der elektromagnetischen Strahlung in Abhängigkeit von der verwendeten Wellenlänge. Von DIERKING [1992] werden detaillierte Untersuchungen bezüglich der Abhängigkeit vom Eistyp, Salzgehalt, Lufteinschlüssen und Bestrahlungswinkel vorgestellt.

In Abbildung 4.2 ist zu erkennen, daß die Eindringtiefe bei erstjährigem Eis wegen des großen Imaginärteils der Dielektrizitätskonstanten und damit großen Dämpfung wesentlich geringer ist als beim mehrjährigen Eis. Dieses wird durch den mit zunehmendem Alter abfallenden Salzgehalt des Eises hervorgerufen. Der Salzgehalt bestimmt im wesentlichen die Dämpfung im Eis und auch den Anteil der ins Eis gebrochenen Strahlung. Beim erstjährigen Eis ist die Eindringtiefe bei der betrachteten Frequenz von $f = 5,3\text{GHz}$ (ERS-1-SAR) maximal $l_p < 0,2\text{m}$. Hierbei hat die Strahlung wenig Gelegenheit zur Reflexion; zum einen wegen der geringen Weglänge, zum anderen weil erstjähriges Eis im Inneren homogen ist, sich noch keine Strukturen in Größenordnung der Wellenlänge gebildet haben. Beim mehrjährigen Eis dringt die Strahlung bei einer Frequenz von $f = 5,3\text{GHz}$ bis über einen halben Meter ein und findet hier im Gegensatz zum Fall des erstjährigen Eises unterschiedliche Reflexionsmöglichkeiten vor. Diese sind Streuzentren wie Salzkristalle, Soletaschen, Luftbläschen und in seltenen Fällen auch Einlagerungen von Fremdpartikeln. Von DIERKING [1992] werden mit der Untersuchung unterschiedlicher Modellansätze zur Beschreibung der Volumenstreuung die Abhängigkeiten der Rückstreuung von den Konzentrationen der genannten Größen dargestellt. Bei der Beschreibung der Volumenstreuung finden in erster Linie empirische Modelle Anwendung.

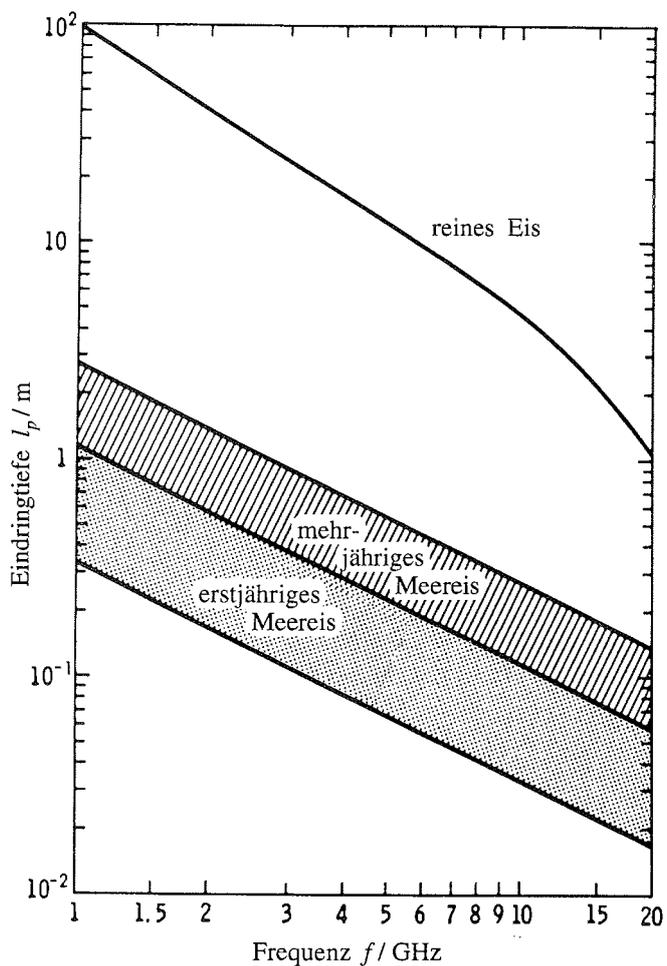


Abbildung 4.2: Eindringtiefe der elektromagnetischen Strahlung in reinem Eis und in erstjährigem und mehrjährigem Meereis bei einer Temperatur von $\vartheta = -10^\circ\text{C}$. Die angegebenen Bereiche ergeben sich durch die aus der Literatur entnommenen komplexen Dielektrizitätskonstanten, die sich aus dem Salzgehalt und der Dichte des Mediums ergeben. Das Diagramm ist von ULABY *et al.* [1986] übernommen.

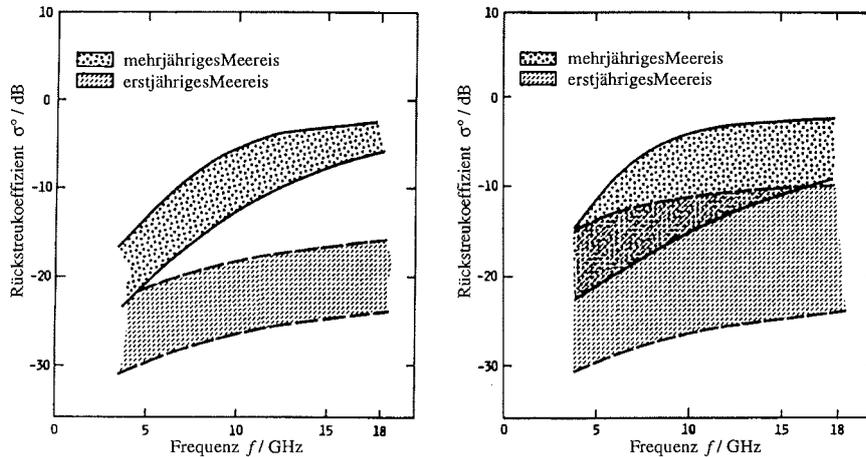


Abbildung 4.3: Frequenzabhängigkeit der Rückstreukoeffizienten σ° von erstjährigem und mehrjährigem Meereis bei einem Meßwinkel von $\alpha = 40^\circ$ und horizontaler Polarisation (HH). Die linke Abbildung, in der beide Eistypen sicher voneinander unterschieden werden können, gilt für normale Wintersituationen. Im rechten Diagramm, welches eine extreme Sommersituation darstellt, ist speziell bei niedrigen Meßfrequenzen wie $f = 5,3$ GHz (ERS-1-SAR) keine sichere Unterscheidung der Eistypen möglich. Die Diagramme sind von ULABY *et al.* [1986] übernommen.

Wichtig bei der Betrachtung von Meereis ist auch die Schneeaufgabe. Bei trockenem Schnee ist bei der betrachteten Wellenlänge von $\lambda = 57$ mm die Dämpfung so gering, daß selbst bei extrem hoher Dichte Eindringtiefen von mindestens 20 Metern [DIERKING, 1992] erreicht werden. Wegen der Homogenität findet keine Volumenstreuung statt, so daß Auflagen von trockenem Schnee nur bei extremen Ausmaßen eine Rolle spielen. Anders verhält es sich bei feuchtem Schnee. Die Dielektrizitätskonstante von feuchtem Schnee liegt in der Größe von mehrjährigem Eis. Oberflächenreflektionen spielen also keine solch große Rolle wie beim erstjährigen Eis. Volumenstreuung findet wegen der internen Homogenität ebenfalls so gut wie nicht statt. Nach DIERKING [1992] liegen die Eindringtiefen beim SAR des ERS-1 für zum Beispiel feuchten Schnee mit einem Flüssigwassergehalt von 6% je nach Dichte bei etwa $l_p = 0,2$ m. Daher treten beim Einsetzen der Schneeschmelze extreme Änderungen in den Radarbildern auf; mit feuchtem Schnee bedecktes Eis liefert nur ein geringes Rückstreusignal.

Offenes Wasser nimmt bei der Klassifikation von eisbedeckten Gebieten eine besondere Position ein. Die Rückstreuung der Radarwellen ist beim Wasser ausschließlich durch Oberflächenstreuung bestimmt, da wegen des hohen Salzgehalts die Eindringtiefe wesentlich geringer als eine Wellenlänge ist. Der Rückstreukoeffizient hängt beim offenen Wasser also nur von der Oberflächenrauigkeit ab,

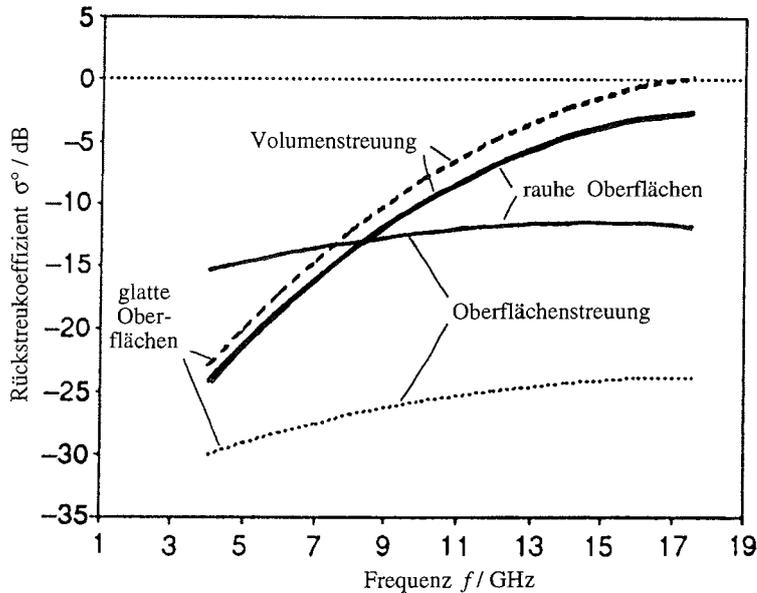


Abbildung 4.4: Anteile von Oberflächen- und Volumenrückstreuung bei mehrjährigem Eis in Abhängigkeit der Frequenz. Die Oberflächenrauigkeit ist mit den statistischen Parametern der Korrelationslänge und Standardabweichung der Oberflächenhöhe gemessen. Die Korrelationslänge entspricht bei allen Kurven $l_z = 86$ mm, die Standardabweichung der Oberflächenhöhe beträgt $\sigma_z = 8,1$ mm für die rauhen und $\sigma_z = 1,5$ mm für die glatten Eisoberflächen. Die Dichte des Eises ist mit 700 Kg/m^3 und der Radius der im Eis eingeschlossenen Luftbläschen mit 1 mm angenommen. Das Diagramm ist von ONSTOTT [1992] übernommen.

die eine hohe Variabilität hat. Je nach Windstärke können größere Rauigkeiten als beim Meereis auftreten oder die Oberfläche kann extrem glatt sein. ONSTOTT [1992] demonstriert an einem Beispieldatensatz eines Meßfluges, der beginnend auf dem offenen Ozean über die Packeisgrenze verläuft, daß der Rückstreuungskoeffizient von offenem Wasser innerhalb von 40 nautischen Meilen von $\sigma^o = -17 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB}$ bis $\sigma^o = -32 \text{ dB} \pm 0,5 \text{ dB}$ variieren kann. Extrem fiel der Rückstreuungskoeffizient beim Überschreiten der Packeisgrenze ab, da das Eis die Wellenbewegung dämpft. Der Rückstreuungskoeffizient erreichte sein Minimum, als durch hohe Schollenkanten der Wind von der Wasseroberfläche abgeschattet wurde.

Zur Veranschaulichung der Größenordnung der Radarrückstreuung stellen die Abbildungen 4.3 und 4.4 ihre Frequenzabhängigkeit für unterschiedliche Anwendungen dar. Die Abbildungen sind von KIM [1984], zitiert nach ULABY *et al.* [1986] beziehungsweise ONSTOTT [1992], übernommen. Abbildung 4.3 zeigt die

Variationsbereiche des Rückstreukoeffizienten für erstjähriges und mehrjähriges Eis. Im linken Teil, in dem die Werte für normale Wintersituationen dargestellt sind, können bei der vom SAR des ERS-1 verwendeten Frequenz von $f = 5,3$ GHz die beiden Eistypen sicher voneinander unterschieden werden. In einer extremen Sommersituation, wie sie dem rechten Diagramm zugrunde liegt, ist die Variation des Rückstreukoeffizienten von beiden Eistypen dahingehend vergrößert, daß ein großer Überlappungsbereich entsteht, in dem durch alleinige Nutzung des Rückstreukoeffizienten keine eindeutige Zuordnung stattfinden kann. Die Untersuchungen fanden zwar mit horizontal polarisierten Radarsignalen (HH) unter einem Meßwinkel von $\alpha = 40^\circ$ statt, die prinzipiellen Verläufe gelten jedoch auch für vertikale Polarisation (VV) und Meßwinkel von $\alpha = 23^\circ$ vom SAR des ERS-1.

Abbildung 4.4 zeigt die Anteile der Oberflächenrückstreuung und Volumenrückstreuung bei mehrjährigem Eis. Es ist zu erkennen, daß die Anteile der Oberflächenrückstreuung beim rauhen Eis gegenüber dem glatten Eis stark dominieren. Abhängig hiervon ist der Anteil der Volumenrückstreuung beim rauhen Eis etwas geringer als beim glatten Eis. Für die beim SAR des ERS-1 verwendete Frequenz von $f = 5,3$ GHz liegt der Anteil der Oberflächenrückstreuung je nach Rauigkeit des Eises über oder unter dem Anteil der Volumenrückstreuung. Die Volumenrückstreuung des älteren Eises macht im Gegensatz zur Volumenrückstreuung beim jüngeren Eis einen signifikanten Anteil aus.

4.2 Unterscheidung der Eistypen

Die Grundlage der Unterscheidung von Eistypen in SAR-Bildern ist die Eigenschaft der Rückstreuung des Radarsignals. Dieses sind sowohl der mittlere Rückstreukoeffizient als auch seine räumliche Variation. Der aussagekräftigste Parameter ist der Mittelwert des Rückstreukoeffizienten. Da dieser zur sicheren Trennung der unterschiedlichen Eistypen nicht ausreicht, werden zusätzlich Parameter, die die örtliche Variation des Rückstreukoeffizienten eines Eistyp beschreiben, herangezogen. Diese umgebungsabhängigen Merkmale werden allgemein auch als Textur bezeichnet.

Eine prinzipielle Schwierigkeit bei der Unterscheidung von Texturen besteht darin, daß das Ergebnis von Texturanalysen von der Größe des Operatorfensters abhängig ist, mit dem die Textur erkannt werden soll. Um eine Textur zu erfassen, muß das Operatorfenster mindestens so groß sein, daß es einige Grundmuster erfaßt. Andererseits möchte man eine bestimmte Textur aber möglichst einem kleinen Bereich zuschreiben. Bei der Bearbeitung von SAR-Bildern ergeben sich allgemein ähnliche Probleme durch die Störung durch Speckle-Rauschen. So wird zum Beispiel von LAUR [1992] bei der Bestimmung des mittleren Rückstreukoeffizienten aus dem PRI-Produkt (Precision Image) eine Einbeziehung von mindestens 500 Bildpunkten gefordert.

Bei der Bearbeitung von großen homogenen Bereichen kann dieser Forderung entsprochen werden. Schwierigkeiten treten am Übergang unterschiedlicher Bereiche auf, da bei großen Operatorfenstern in den Grenzbereichen gemischte Texturen und Mittelwerte bearbeitet werden, die keinen Klassen eindeutig zugeordnet werden können. Wegen dieser gegensätzlichen Anforderung von großen Operatorfenstern zur sicheren Erkennung von Texturen, aber kleinen Operatorfenstern zur Vermeidung von Vermischungsprozessen an Bereichsübergängen, wird in diesem Abschnitt bei der Unterscheidung von Eistypen von homogenen Bereichen ausgegangen, die nur einen Eistyp enthalten. Das Problem der Segmentierung und somit der Bearbeitung von Bereichsgrenzen wird im Abschnitt 4.3 behandelt.

4.2.1 Mittlerer Rückstreukoeffizient

Nach LAUR [1992] berechnet sich der mittlere Rückstreukoeffizient σ° der einzelnen Bereiche auf dem Grund nach

$$\sigma^\circ = \frac{\bar{I}}{K(\alpha)}. \quad (4.16)$$

Hierbei ist \bar{I} die mittlere Intensität, die vom SAR des ERS-1 gemessen wird. $K(\alpha)$ ist ein Proportionalitätsfaktor, der für den Empfangswinkel α während der Kalibration des SAR ermittelt wird und für ein spezielles Datenprodukt und SAR-Prozessor gültig ist. PRI-Produkte, die nach September 1992 prozessiert wurden, sind bis auf den Proportionalitätsfaktor $K(\alpha)$ vollständig kalibriert.

Der Faktor $K(\alpha)$ ist abhängig vom Meßwinkel, wobei die in den Daten angegebenen Werte für den mittleren Einfallswinkel α_{ref} gültig sind.

$$K_{ref} = K(\alpha_{ref}) \quad (4.17)$$

Für andere Winkel α berechnet sich der Faktor K nach LAUR [1992] zu

$$K(\alpha) = K_{ref} \frac{\sin(\alpha_{ref})}{\sin(\alpha)}. \quad (4.18)$$

Entsprechend der Aufnahmegeometrien ergeben sich die Winkel α der einzelnen Bildspalten x unter Einbeziehung der extremen Aufnahmewinkel α_{near} und α_{far} für den Bereich kleinerer Winkel als α_{ref} (Near Range) zu

$$\alpha(x) = \arctan \left(\tan(\alpha_{near}) \left(1 + \frac{x}{X} \left(\frac{\tan(\alpha_{ref})}{\tan(\alpha_{near})} - 1 \right) \right) \right) \quad (4.19)$$

und für den Bereich größerer Winkel α als α_{ref} (Far Range) zu

$$\alpha(x) = \arctan \left(\tan(\alpha_{ref}) \left(1 + \frac{x}{X} \left(\frac{\tan(\alpha_{far})}{\tan(\alpha_{ref})} - 1 \right) \right) \right). \quad (4.20)$$

X bezeichnet die Anzahl der Spalten des Bildes.

Die mittlere Intensität \bar{T} berechnet sich nach LAUR [1992] zu

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d(i))^2 \quad (4.21)$$

$d(i)$ ist der Wert des Bildpunktes i im PRI-Produkt. Er ist proportional zur Quadratwurzel der Intensität I_i , die für einen Bildpunkt ermittelt wurde. Es finden an dieser Stelle nicht wie üblich die Ortskoordinaten x und y Anwendung, die auch die bildliche Struktur verdeutlichen würden, da die Einzugsbereiche zur Intensitätsbildung eine beliebige Form annehmen können. N ist die Anzahl der Bildpunkte eines Segments und i sind die einzelnen Bildpunkte, wobei die Anordnung keine Rolle spielt.

Die Werte für $d(i)$ sind in den Bilddaten (Data Set File) enthalten. Die Werte für den Proportionalitätsfaktor K_{ref} , die Winkel α_{ref} , α_{near} und α_{far} und die Bildzeilenlänge X sind in der Leitdatei (Leader File) gespeichert [ESA, 1992a]. Mit der Routine *prizviff* wird das Rohdatenformat der PRI-Produkte vom D-PAF (German Processing and Archiving Facility) und UK-PAF (United Kingdom) gelesen und nach der Korrektur der winkelabhängigen Komponente des Proportionalitätsfaktors K aus Gleichung (4.18) im KHOROS-Format gespeichert. Die resultierenden Bilddaten im KHOROS-Format ergeben sich mit den Gleichungen (4.16), (4.18) und (4.21) zu

$$s(x, y) = \sqrt{\frac{\sin(\alpha(x))}{\sin(\alpha_{ref})}} d(x, y). \quad (4.22)$$

Der Winkel $\alpha(x)$ kann aus Gleichung (4.19) beziehungsweise Gleichung (4.20) übernommen werden. Der Rückstreukoeffizient der einzelnen Segmente kann nun entsprechend Gleichung (4.16) und Gleichung (4.21) zu

$$\sigma^\circ = \frac{1}{NK_{ref}} \sum_{i=1}^N (s(i))^2 \quad (4.23)$$

berechnet werden.

Abbildung 4.5 gibt eine Illustration, wie die Mittelwertbildung den Auswirkungen des Speckle-Rauschens entgegenwirkt. Es ist der mittlere Rückstreukoeffizient von unterschiedlichen Bildsegmenten über der Segmentgröße aufgetragen.

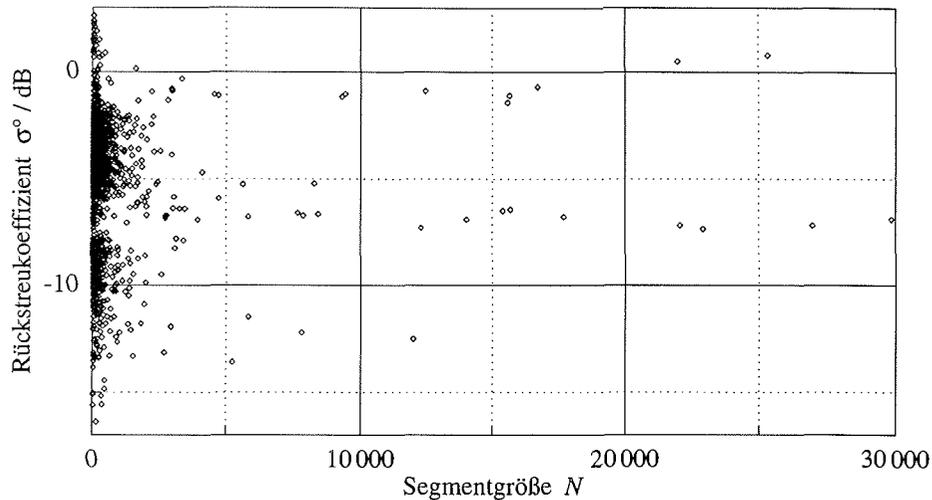


Abbildung 4.5: Abhängigkeit des mittleren Rückstreukoeffizienten von der Segmentgröße. Die Daten sind nicht klassifiziert. Es können jedoch bei den großen Segmenten durch die unterschiedlichen Rückstreukoeffizienten drei Eistypen erkannt werden. (SAR-Daten aus Orbit: 8661, Frame: 1647)

Die Segmente wurden nach dem Verfahren, das in Abschnitt 4.3 beschrieben wird, ermittelt. Anhand der großen Segmente ist zu erkennen, daß bezüglich des Rückstreukoeffizienten zwischen drei Bereichstypen unterschieden werden kann. Mit abnehmender Segmentgröße wird die Variation der mittleren Rückstreukoeffizienten größer, so daß die Unterscheidung unsicherer wird. Da es sich in Abbildung 4.5 um Daten handelt, die bezüglich der Eistypen nicht klassifiziert sind, können keine Werte für die Standardabweichungen der mittleren Rückstreukoeffizienten zu den Segmentgrößen angegeben werden. Von SKRIVER [1994] wird für ERS-1-SAR-Daten gezeigt, daß die Standardabweichung auch noch für Segmentgrößen über 5000 Bildpunkte mit zunehmender Segmentgröße abnimmt. Dieses trifft für mehrjähriges Eis und Neueis unterschiedlicher Rauigkeit zu, bei dem auch die Größen von Strukturen auf dem Eis eine flächenbezogene Variation hervorrufen kann. Bei homogenen Bereichen wie offenem Wasser wird durch Segmentgrößen über 1000 Bildpunkten keine wesentliche Verminderung der Standardabweichung erreicht. Theoretisch hat SKRIVER [1989a] diese Abhängigkeit für unterschiedliche SAR-Systeme behandelt und fand für homogene Gebiete eine quadratische Abhängigkeit zur reziproken Anzahl der Bildpunkte, die zur Mittelwertbildung herangezogen werden. Theoretische Berechnungen zum SAR des ERS-1 liegen nicht vor. Die Arbeiten von SKRIVER zeigen jedoch, daß Segmentgrößen von etwa 200 Bildpunkten dem Einfluß des Speckle-Rauschens aus-

reichend entgegenwirken.

Die Variation der mittleren Rückstreukoeffizienten, die nicht von der Segmentgröße abhängig und somit auch für große Segmente vorhanden ist, ergibt sich aus der Abhängigkeit des Rückstreukoeffizienten vom Einfallswinkel auf dem Grund. Diese Abhängigkeit ist nicht mit dem gerätetechnischen Effekt zu verwechseln der über den winkelabhängigen Proportionalitätsfaktor K aus Gleichung (4.18) behoben wird. Die Winkelabhängigkeit muß für jeden Eistyp bestimmt werden und kann somit erst nach einer Klassifikation korrigiert werden. Nach einer Klassifikation erübrigt sich diese jedoch.

Wegen dieses Widerspruchs werden weitere Kenngrößen zur Unterscheidung herangezogen.

4.2.2 Kenngrößen der Verteilungsfunktionen

Der im letzten Abschnitt behandelte Mittelwert σ° gehört zu einer Reihe von Kenngrößen, die die Verteilungsfunktion des Rückstreukoeffizienten für einen Eistyp beschreiben. Neben dem Mittelwert kann die Streuung der Meßwerte beschrieben werden. Das einfachste Streuungsmaß ist die Spannweite R (Range), die aus der Differenz zwischen dem größten und kleinsten Wert innerhalb eines Bildsegments gebildet wird.

$$R = \max(\sigma^{\circ*}(i)) - \min(\sigma^{\circ*}(i)) \quad (4.24)$$

Hierbei ist entsprechend Gleichung (4.23)

$$\sigma^{\circ*}(i) = \frac{(s(i))^2}{K_{ref}}, \quad (4.25)$$

wobei keine Mittelung über den Bereich eines Bildsegments durchgeführt wurde. Da der Rückstreukoeffizient $\sigma^{\circ*}(i)$ eines Bildpunktes wegen des Speckle-Rauschens alleine keine Aussage zuläßt und nur für die statistischen Berechnungen von Belang ist, bezeichnet σ° immer den mittleren Rückstreukoeffizienten für ein Bildsegment endlicher Größe.

Obwohl die Spannweite R zum Beispiel von SMITH *et al.* [1995] zur Klassifikation von SAR-Daten des ERS-1 verwendet wurde, wird ihr in dieser Arbeit keine weitere Aufmerksamkeit gewidmet. SMITH *et al.* verwenden zur Klassifikation lediglich den mittleren Rückstreukoeffizienten σ° und die Spannweite R . SACHS [1992] verdeutlicht jedoch, daß die Spannweite nur einen Aufschluß über eine Verteilung liefert, wenn die Anzahl der Meßwerte, die hier der Segmentgröße entspricht, einen Umfang von $N \leq 13$ entspricht. Aus Abbildung 4.5 ist zu ersehen, daß dieser Forderung nicht entsprochen werden kann. Der Variationsbereich

sollte dann zumindest durch einen Toleranzbereich beschrieben werden, wodurch auch Ausreißer eliminiert werden.

Die im folgenden behandelten Kenngrößen zur Beschreibung der Verteilungsfunktion werden Momente genannt. Man unterscheidet gewöhnliche und zentrale Momente. Die Momente (gewöhnliche Momente) k -ter Ordnung sind gleich dem Erwartungswert der k -ten Potenz der Meßgröße.

$$m_k = E\left[(\sigma^{\circ*}(i))^k\right] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sigma^{\circ*}(i))^k \quad (4.26)$$

Das 1. Moment bezeichnet den im vorangegangenen Abschnitt eingeführten mittleren Rückstreuoeffizienten

$$m_1 = \sigma^\circ = E[\sigma^{\circ*}(i)] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma^{\circ*}(i), \quad (4.27)$$

der den Mittelwert der Verteilung angibt.

Die zentralen Momente μ_k werden aus den Erwartungswerten der Abweichung vom Mittelwert gebildet.

$$\mu_k = E\left[(\sigma^{\circ*}(i) - E[\sigma^{\circ*}(i)])^k\right] \quad (4.28)$$

Der triviale Fall $\mu_1 = 0$ stellt keine Aussage dar. Das 2. zentrale Moment

$$\mu_2 = E\left[(\sigma^{\circ*}(i) - E[\sigma^{\circ*}(i)])^2\right] = \sigma^2 \quad (4.29)$$

ist die Varianz.

Die absoluten Maße der gewöhnlichen und zentralen Momente sind wenig aussagekräftig im Vergleich zwischen Verteilungen unterschiedlicher Eistypen. Um die Momente von Segmenten mit unterschiedlichen Mittelwerten miteinander vergleichen zu können, werden diese auf die Momente 1. Ordnung normiert. Die normierten gewöhnlichen Momente β_k der k -ten Ordnung ergeben sich zu

$$\beta_k = \frac{m_k}{m_1^k} = \frac{E[(\sigma^{\circ*}(i))^k]}{(E[\sigma^{\circ*}(i)])^k} \quad (4.30)$$

Der triviale Fall $\beta_1 = m_1/m_1 = 1$ ist ohne Aussage. Ein wichtiges Maß für die Klassifikation von SAR-Daten ist das 2. normierte Moment.

$$\beta_2 = \frac{m_2}{m_1^2} = \frac{E[(\sigma^{\circ*}(i))^2]}{(E[\sigma^{\circ*}(i)])^2} \quad (4.31)$$

Es wird in der Literatur oft als PMR (Power to Mean Ratio) bezeichnet. Das 2. normierte Moment β_2 hat von den Kenngrößen der Verteilungsfunktionen neben dem Mittelwert die größte Bedeutung. Von SKRIVER wurde nach umfangreichen theoretischen und praktischen Untersuchungen der Aussagekraft der Momente [SKRIVER, 1989a] für Untersuchungen von SAR-Daten des ERS-1 [SKRIVER, 1994] nur das 2. normierte Moment betrachtet. Es wird noch gezeigt, daß dieses normierte Moment die gleiche Aussage wie die auf den Mittelwert normierte Varianz zuläßt.

Die höheren normierten Momente β_3 und β_4 werden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet, da sie eng mit den normierten zentralen Momenten 3. beziehungsweise 4. Ordnung verwandt sind.

Die normierten zentralen Momente sind definiert durch

$$\gamma_k = \frac{\mu_k}{\sigma^k} = \frac{E[(\sigma^{\circ*}(i) - E[\sigma^{\circ*}(i)])^k]}{(E[(\sigma^{\circ*}(i) - E[\sigma^{\circ*}(i)])^2])^{\frac{k}{2}}} \quad (4.32)$$

Für $k = 1$ gilt $\gamma_1 = 0$ da $\mu_1 = 0$. Da wegen $\mu_1 = \sigma^2$ auch das 2. normierte Moment $\gamma_2 = 1$ trivial ist, wird die Varianz üblich auch auf das Quadrat des Erwartungswertes normiert und VMR (Variance to Mean Ratio) genannt.

$$\frac{\sigma^2}{m_1^2} = \frac{E[(\sigma^{\circ*}(i) - E[\sigma^{\circ*}(i)])^2]}{(E[\sigma^{\circ*}(i)])^2} \quad (4.33)$$

Wegen

$$\begin{aligned} \frac{E[(\sigma^{\circ*}(i) - E[\sigma^{\circ*}(i)])^2]}{(E[\sigma^{\circ*}(i)])^2} &= \frac{E[(\sigma^{\circ*}(i))^2 - 2\sigma^{\circ*}(i)E[\sigma^{\circ*}(i)] + (E[\sigma^{\circ*}(i)])^2]}{(E[\sigma^{\circ*}(i)])^2} \\ &= \frac{E[(\sigma^{\circ*}(i))^2] - 2(E[\sigma^{\circ*}(i)])^2 + (E[\sigma^{\circ*}(i)])^2}{(E[\sigma^{\circ*}(i)])^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{E[(\sigma^{\circ*}(i))^2] - (E[\sigma^{\circ*}(i)])^2}{(E[\sigma^{\circ*}(i)])^2} \\
&= \frac{E[(\sigma^{\circ*}(i))^2]}{(E[\sigma^{\circ*}(i)])^2} - 1 \\
\frac{\sigma^2}{m_1^2} &= \beta_2 - 1 \tag{4.34}
\end{aligned}$$

hat dieser Ausdruck die gleiche Aussage wie β_2 und wird hier nicht weiter betrachtet.

Eine anschauliche Kenngröße der Verteilungsfunktion ist das 3. normierte zentrale Moment

$$\gamma_3 = \frac{\mu_3}{\sigma^3} = \frac{E[(\sigma^{\circ*}(i) - E[\sigma^{\circ*}(i)])^3]}{\left(E[(\sigma^{\circ*}(i) - E[\sigma^{\circ*}(i)])^2]\right)^{\frac{3}{2}}} \tag{4.35}$$

da bei eingipfeligen symmetrischen Verteilungen das 3. zentrale Moment μ_3 und damit auch γ_3 Null ist. Das 3. normierte zentrale Moment ist somit ein Maß für die Schiefe (Skewness) einer Verteilungsfunktion. Liegt der Hauptanteil einer Verteilung bei niedrigen Meßwerten, dann nimmt die Schiefe γ_3 positive Werte an. Negative Schiefen haben ihren Hauptanteil der Meßwerte entsprechend bei höheren Werten als dem Mittelwert.

Mit dem Ausmultiplizieren des Zählers aus Gleichung (4.35) und Erweitern des Nenners mit $(E[\sigma^{\circ*}(i)])^3$ ergibt sich

$$\frac{E[(\sigma^{\circ*}(i) - E[\sigma^{\circ*}(i)])^3]}{\left(E[(\sigma^{\circ*}(i) - E[\sigma^{\circ*}(i)])^2]\right)^{\frac{3}{2}}} = \frac{E[(\sigma^{\circ*}(i))^3] - (E[\sigma^{\circ*}(i)])^3}{\left(\frac{E[(\sigma^{\circ*}(i) - E[\sigma^{\circ*}(i)])^3]}{(E[\sigma^{\circ*}(i)])^2}\right)^{\frac{3}{2}} (E[\sigma^{\circ*}(i)])^3}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\frac{E[(\sigma^{o*}(i))^3]}{(E[\sigma^{o*}(i)])^3} - 1}{\left(\frac{E[(\sigma^{o*}(i) - E[\sigma^{o*}(i)])^3]}{(E[\sigma^{o*}(i)])^2}\right)^{\frac{3}{2}}}}{\gamma_3 = \frac{\beta_3 - 1}{(\beta_2 - 1)^{\frac{3}{2}}},} \quad (4.36)
\end{aligned}$$

was verdeutlicht, daß durch die Analyse des 3. normierten Moments β_3 keine zusätzliche Information gewonnen wird. Es bleibt an dieser Stelle jedoch noch der Beweis offen, daß die Normierung des gewöhnlichen Moments keine Vorteile gegenüber dem zentralen Moment aufweist. Durch die Vergleiche von Klassifikationsergebnissen unter alleiniger Nutzung von γ_3 und β_3 zeigt SKRIVER [1989a] für unterschiedliche SAR-Daten, daß die Schiefe, das 3. normierte zentrale Moment γ_3 gegenüber dem 3. normierten Moment β_3 Vorteile hat.

Neben der Schiefe gilt auch die Wölbung oder auch Exzess (Kurtosis) als anschauliche Kenngröße von Verteilungsfunktionen.

$$\gamma_4 = \frac{\mu_4}{\sigma^4} = \frac{E[(\sigma^{o*}(i) - E[\sigma^{o*}(i)])^4]}{\left(E[(\sigma^{o*}(i) - E[\sigma^{o*}(i)])^2]\right)^2} \quad (4.37)$$

Liegt das Maximum der Verteilungsfunktion bei gleicher Varianz höher als die Normalverteilung so spricht man von einer starken Wölbung. Die Verteilungsfunktion wird zum Mittelwert hin spitzer. Bei schwacher Wölbung liegt das Maximum entsprechend tiefer und die Verteilungsfunktion ist gedrungener. Da das 4. normierte zentrale Moment γ_4 der Normalverteilung den Wert $\gamma_{4N} = 3$ hat, wird der Wölbung in der Literatur oft zur Normierung dieser Wert abgezogen, so daß dann von positiver und negativer Wölbung gesprochen wird.

Analog der Vorgehensweise aus Gleichung (4.36) kann der Zusammenhang zwischen dem 4. normierten zentralen Moment γ_4 und dem 4. normierten gewöhnlichen Moment gefunden werden.

$$\gamma_4 = \frac{\beta_4 - 4\beta_3 - 6\beta_2 - 3}{(\beta_2 - 1)^2} \quad (4.38)$$

Wenn auch der Zusammenhang schwer oder garnicht zu deuten ist, so wird jedoch deutlich, daß durch Kenntnis von β_2 und β_3 über γ_3 (siehe Gleichung (4.37)) durch Hinzunahme von β_4 keine zusätzliche Information gewonnen werden kann.

Bei der Berechnung der Momente ist nach SACHS [1992] TUKEYS Fünferregel zu beachten, die besagt, daß die Momente k -ter Ordnung erst relevant sind, wenn mindestens 5^k Meßwerte vorliegen. Für die Schiefe γ_3 und Wölbung γ_4 müssen die Segmente der Bildbereiche, zu denen diese Kenngrößen der Verteilungsfunktionen berechnet werden, also mindestens $N = 125$ beziehungsweise $N = 625$ Bildpunkte enthalten. In Abschnitt 4.2.1 wurde erwähnt, daß die Segmentgrößen mindestens $N = 200$ Bildpunkte umfassen sollten, um das Speckle-Rauschen zu unterdrücken. Um die Mindestgröße der Bildsegmente nicht soweit zu vergrößern, daß kleinskalige Bildstrukturen verloren gehen, wird auf die Bearbeitung des 4. normierten zentralen Moments, der Wölbung, verzichtet. Dieser Schritt wird unternommen, da SKRIVER [1989a] bei der Untersuchung anderer SAR-Daten erkannte, daß die Wölbung keine zusätzliche Information liefert, die nicht schon aus der Schiefe gewonnen werden kann.

Von den Kenngrößen der Verteilungsfunktion werden also der mittlere Rückstreu-
koeffizient m_1 , das 2. normierte Moment β_2 und die Schiefe γ_3 berücksichtigt, die hier noch einmal zur Übersicht zusammengestellt sind.

$$\begin{aligned}
 m_1 &= \sigma^\circ = E[\sigma^{\circ*}(i)] \\
 \beta_2 &= \frac{m_2}{m_1^2} = \frac{E[(\sigma^{\circ*}(i))^2]}{(E[\sigma^{\circ*}(i)])^2} \\
 \gamma_3 &= \frac{\mu_3}{\sigma^3} = \frac{E[(\sigma^{\circ*}(i) - E[\sigma^{\circ*}(i)])^3]}{\left(E[(\sigma^{\circ*}(i) - E[\sigma^{\circ*}(i)])^2]\right)^{\frac{3}{2}}}
 \end{aligned}
 \tag{4.39}$$

4.2.3 Kennwerte der Co-occurrence-Matrizen

Mit Hilfe der Co-occurrence-Matrizen, die im Deutschen auch Grauwertübergangsmatrizen genannt werden, lassen sich weitere Merkmale zur lokalen oder globalen Bildcharakterisierung berechnen. Diese Methode hat gegenüber anderen Methoden, die eine Aussage über die Textur liefern, den Vorteil, daß die Berechnungen im Ortsbereich durchgeführt werden, wodurch vertretbare Rechenzeiten entstehen. Auch bei der Arbeit mit Co-occurrence-Matrizen treten bei der lokalen Bildcharakterisierung Schwierigkeiten auf, da eine geeignete Aussage große Operatoren erfordert, wodurch Bereichsübergänge verschwimmen und an den Übergangsbereichen keine eindeutige Zuordnung stattfinden kann. Auch hier gilt die Annahme aus den vorangegangenen Abschnitten, daß homogene Bereiche betrachtet werden. Auf die Bildung der homogenen Bereiche wird im Abschnitt 4.3

eingegangen.

Die Co-occurrence-Matrix enthält eine Aussage über Intensitätspaarungen bestimmter Bildpunktconstellationen. Zur Bildung der Co-occurrence-Matrix $p(i, j, \mathbf{r})$ des Bildes oder Bildbereiches $s(x, y)$ muß der Vektor \mathbf{r} vorgegeben werden, der die relative Lage der jeweils betrachteten Bildpunktpaare zueinander festlegt. Die Elemente der Matrix $p(i, j, \mathbf{r})$ geben jeweils die relative Häufigkeit an, mit der Bildpunktpaare mit der durch den Vektor \mathbf{r} festgelegten Lagebeziehung mit den Grauwerten i und j auftreten.

$$p(i, j, \mathbf{r}) = \frac{1}{XY} \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} \left((s(x, y) = i) \wedge (s(x + r_x, y + r_y) = j) \right) \quad (4.40)$$

Hierbei sind X und Y die Größen des Bildbereichs in den beiden Bilddimensionen. Bei der Anwendung auf Bildbereiche mit beliebiger Form muß über alle Bildpunkte summiert werden und die Normierung auf die Anzahl der Bildpunktvergleiche erfolgen. Die Variablen r_x und r_y sind die Komponenten des Vektors \mathbf{r} in die angegebenen Richtungen. Für die Festlegung des Vektors \mathbf{r} ist die Angabe von Betrag $r = |\mathbf{r}|$ und Winkel $\Theta = \angle \mathbf{r}$ vorteilhaft. Da für jeden Betrag und Winkel des Vektors \mathbf{r} für die betrachteten Bildbereiche eine individuelle Matrix erstellt werden kann, wodurch enorme Datenmengen entstehen würden, müssen für den Vektor \mathbf{r} wenige geeignete Realisationen gefunden werden. Der Betrag r kann ein diskretes Vielfaches des Bildpunktabstandes betragen

$$r = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (4.41)$$

und der Winkel zum Beispiel die Orientierungen

$$\Theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ \quad (4.42)$$

annehmen. Bei dieser Auswahl fällt auf, daß die Orientierungen $\Theta + 180^\circ$ nicht betrachtet werden. Dieses liegt darin begründet, daß sich die folgenden Untersuchungen an den Co-occurrence-Matrizen auf die Eintragungen und ihre Lage zur Hauptdiagonalen konzentrieren und sich hiermit die Kennwerte einer Co-occurrence-Matrix der ihrer transponierten entsprechen. Nun entspricht aber gerade die Erweiterung zu den Winkeln aus Gleichung (4.42) um jeweils $\Theta + 180^\circ$ der Berechnung der transponierten von schon berechneten Matrizen.

Bei einer Auswahl von zum Beispiel vier unterschiedlichen Beträgen r und vier Winkeln Θ des Vektors \mathbf{r} ergeben sich schon sechzehn Matrizen zu jedem Bildbereich. Aus jeder Matrix können eine Anzahl unterschiedlicher Kennwerte ermittelt werden. Wie die Variation des Vektors \mathbf{r} weiter sinnvoll eingeschränkt wird, kann nach der Einführung der Kennwerte, die aus den Matrizen gebildet werden, verdeutlicht werden.

Vorher soll jedoch noch auf die Bedeutung der Größe der Co-occurrence-Matrix eingegangen werden. Die Matrix ist quadratisch, da in beiden Dimensionen die Anzahl S der Grauwerte zur Verfügung stehen muß. Da das Quadrat der radiometrischen Auflösung die Größe der Matrix bestimmt und hiervon wesentlich die Rechenzeiten zur Verarbeitung der Bilddaten anhängen, sollte die radiometrische Auflösung der Bilddaten reduziert werden. In der Literatur werden Werte zwischen $S = 16$ bis $S = 64$ angewendet. Von SKRIVER [1989a] wird gezeigt, daß die notwendige Skalierung am besten dadurch realisiert wird, daß die Intensitäten des skalierten Bildes möglichst gleichmäßig über den gesamten zur Verfügung stehenden Grauwertebereich von $s = 0$ bis $s = S - 1$ verteilt werden. Hierdurch werden die Texturmerkmale vom Mittelwert des Rückstreuoeffizienten unabhängig.

HARALICK *et al.* [1973] entwickelten vierzehn Texturmerkmale die aus den Co-occurrence-Matrizen gebildet werden können. Unter Berücksichtigung der Untersuchungen von SKRIVER [1989a und 1994], ULABY *et al.* [1992], NYSTUEN und GARCIA [1992] und SHOKR [1991] wurden für die vorliegende Arbeit die Texturmerkmale Kontrast (Contrast) ξ_{CON} , das inverse Differenzmoment (Invers Differene Moment) ξ_{IDM} und die Entropie (Entropy) ξ_{ENT} ausgewählt.

Das Texturmerkmal Kontrast

$$\xi_{CON}(\mathbf{r}) = \sum_{i=0}^{S-1} \sum_{j=0}^{S-1} ((i-j)^2 p(i, j, \mathbf{r})) \quad (4.43)$$

wird in der Literatur auch oft als Inertia bezeichnet. Der Kontrast ist das Trägheitsmoment der Co-occurrence-Matrix, bezogen auf ihre Hauptdiagonale. $\xi_{CON}(\mathbf{r})$ ist nahe Null, wenn der Bildbereich nur aus homogenen Flächen besteht, hierbei wird im wesentlichen die Hauptdiagonale der Co-occurrence-Matrix besetzt sein. Groß wird $\xi_{CON}(\mathbf{r})$, wenn kontrastreiche Texturen mit häufigen großen Grauwertsprüngen auftreten. Hierbei werden mehr die Matrixelemente besetzt, die von der Hauptdiagonalen entfernt sind.

Das inverse Differenzmoment

$$\xi_{IDM}(\mathbf{r}) = \sum_{i=0}^{S-1} \sum_{j=0}^{S-1} \frac{p(i, j, \mathbf{r})}{1 + (i-j)^2} \quad (4.44)$$

hat einen großen Wert bei Diagonalmatrizen. Daher wird dieses Merkmal auch oft als lokale Homogenität bezeichnet. Bei zunehmender Entfernung der Matrixeinträge von der Hauptdiagonalen wird das inverse Differenzmoment kleiner.

Die Entropie

$$\xi_{ENT}(\mathbf{r}) = - \sum_{i=0}^{S-1} \sum_{j=0}^{S-1} \left(p(i, j, \mathbf{r}) \log(p(i, j, \mathbf{r})) \right) \quad (4.45)$$

ist ein Maß für den Informationsgehalt der Co-occurrence-Matrix. Der Informationsgehalt ist maximal bei einer gleichverteilten Matrix und niedrig bei einer Diagonalmatrix.

In den Gleichungen (4.43) bis (4.45) sind die Kennwerte der Co-occurrence-Matrizen neben den Bilddaten vom Vektor \mathbf{r} abhängig, der die Orientierung der Bildpunktpaare festlegt. Mit Gleichung (4.42) wurden die in Frage kommenden Winkel schon auf vier eingeschränkt, so daß für jede Kenngröße $\xi(\mathbf{r})$ und Beträge des Vektors $|\mathbf{r}|$ vier unterschiedliche Werte gebildet werden. Für die folgenden Untersuchungen wird der Mittelwert dieser vier Ausrichtungen betrachtet.

$$\begin{aligned} \xi(|\mathbf{r}|) = \frac{1}{4} & \left(\xi(|\mathbf{r}|, \Theta = 0^\circ) + \xi(|\mathbf{r}|, \Theta = 45^\circ) + \right. \\ & \left. + \xi(|\mathbf{r}|, \Theta = 90^\circ) + \xi(|\mathbf{r}|, \Theta = 135^\circ) \right) \end{aligned} \quad (4.46)$$

Durch die Mittelwertbildung werden die Kennwerte der Co-occurrence-Matrix richtungsunabhängig, was zur Klassifikation von Meereis notwendig ist. Zwar können durch die Analyse der Winkelabhängigkeiten ausgerichtete Strukturen wie Ridges, Leads, Wellen oder Windstrukturen charakterisiert werden, jedoch soll dieses durch die hier durchgeführte Klassifikation nicht bearbeitet werden. Die Ausrichtung dieser Phänomene kann bezüglich der Bildkoordinaten beliebig sein, so daß der Mittelwert so gebildet werden muß, daß die Texturmerkmale ausreichend isotrop werden. NYSTUEN und GARCIA [1992] haben die Voraussetzungen zur Bildung von isotropen Texturmerkmalen erarbeitet und gefunden, daß die in Gleichung (4.46) berücksichtigten Vektoren ausreichende Mittelung gewährleisten. Bei der Verwendung von drei Vektoren macht sich anisotropes Verhalten schon sehr stark bemerkbar.

Bezüglich des Betrags des Vektors \mathbf{r} , der den Abstand der Bildpunktpaare bezeichnet, ergaben die Untersuchungen von SHOKR [1991] nur geringe Abhängigkeiten in Bezug auf die Werte der Texturmerkmale. Hiervon abweichend sind die Ergebnisse von SKRIVER [1989a] und NYSTUEN und GARCIA [1992]. Sie zeigen übereinstimmend am Beispiel des Kontrasts ξ_{CON} , daß die Werte mit zunehmendem Vektorbetrag r ansteigen. NYSTUEN und GARCIA [1992] erkennen einen Vektorbetrag von $r = 4$ als optimal, da für größere Werte das Texturmerkmal kaum noch ansteigt. Die in ihrer Arbeit erwähnte optimale Separation bei $r = 4$ ist anhand ihrer Daten jedoch nicht zu erkennen. Für die vorliegende Arbeit wird der Vektorbetrag und damit das Texturmerkmal auf

$$\xi = \xi(r = 3) \quad (4.47)$$

festgelegt, da die Gradienten $d\xi(r)/dr$ in den erwähnten Arbeiten ab $r = 3$ relativ gering werden. Die hohen Gradienten für $r = 1$ und $r = 2$ würden die Ergebnisse

verschlechtern, da der Betrag des Vektors \mathbf{r} durch die diskreten Bildpunktdistanzen für die einzelnen Winkel Θ in Gleichung (4.46) Abweichungen unterworfen ist. Diese Abweichungen hätten bei Vektorbeträgen unter $r = 3$ starken Einfluß auf Texturmerkmale. Der Vektorbetrag wird nicht unnötig groß gewählt, da durch seine Vergrößerung bei den Berechnungen an den Bildbereichsgrenzen die Anzahl der Matrizeneinträge verringert würde.

Der einzige verbleibende Freiheitsgrad ist die Größe S , auf die die Bilddaten vor der Berechnung der Co-occurrence-Matrix normiert werden. Nach den Untersuchungen von SKRIVER [1989a] hat die Variation von S nur auf die absoluten Werte der Texturmerkmale Einfluß. Die relativen Unterschiede zwischen den Merkmalen einzelner Eistypen bleiben jedoch in großen Bereichen konstant. Es wird

$$S = 32 \quad (4.48)$$

festgelegt, da hierdurch eine ausreichende radiometrische Auflösung und akzeptable Rechenzeiten gewährleistet sind.

Aus den Gleichungen (4.43) bis (4.45) ergibt sich vereinfacht die Definition des Kontrasts, des inversen Differenzmomentes und der Entropie zu

$$\begin{aligned} \xi_{CON} &= \sum_{i=0}^{S-1} \sum_{j=0}^{S-1} ((i-j)^2 p(i,j)) \\ \xi_{IDM} &= \sum_{i=0}^{S-1} \sum_{j=0}^{S-1} \frac{p(i,j)}{1+(i-j)^2} \end{aligned} \quad (4.49)$$

$$\xi_{ENT} = - \sum_{i=0}^{S-1} \sum_{j=0}^{S-1} \left(p(i,j) \log(p(i,j)) \right),$$

mit der Festlegung eines Vektorbetrags von $r = 3$, einer Mittelung der Texturmerkmale unterschiedlicher Orientierungen nach Gleichung (4.46) und radiometrischer Normierung auf $S = 32$ Grauwerten.

4.3 Segmentierung

Das in diesem Abschnitt vorgestellte Segmentierungsverfahren wurde von SKRIVER [1989a] für unterschiedliche SAR-Daten entwickelt. Speziell für die Anwendung bei den Daten des ERS-1 wurde es von ihm am Electromagnetics-Institute

der Technischen Universität von Dänemark verbessert. Die Anwendung der von ihm zur Verfügung gestellten Programme ist im Anhang C erklärt. Die in Fortran geschriebenen Programm-Listings sind in dieser Arbeit nicht enthalten.

Die Aufgabe der Segmentierung ist die Unterteilung eines Bildes in Bereiche, deren Bildpunkte zu einer Objektklasse gehören. Im allgemeinen unterscheidet man bei der Segmentierung zwischen punktorientierten und bereichsorientierten Verfahren. Im Kapitel 3 wurde bei der Anwendung auf die Daten der Line-Scanner ein punktorientiertes Segmentierungsverfahren vorgestellt. Für die Zuordnung der Bildpunkte zu den unterschiedlichen Objektklassen war lediglich ihre Intensität in den beiden Spektralbereichen ausschlaggebend. Die Wertigkeiten der umgebenen Bildpunkte wurden nicht betrachtet. Diese Methode ist wegen des Speckle-Rauschens bei SAR-Daten nicht anwendbar. In den vorangegangenen Abschnitten wurde verdeutlicht, daß einzelne Bildpunkte nur eine Aussage zulassen würden, wenn die Bilddaten zuvor mit einem großen Tiefpaßfilter bearbeitet würden. Die hierbei entstehende Unschärfe in den Bilddaten ist jedoch nicht vertretbar.

Bei bereichsorientierten Segmentierungsverfahren werden zuerst Regionen gebildet, die anschließend als gesamte Regionen den Objektklassen zugeordnet werden können. Durch die der Klassifikation vorangestellte Segmentierung bleiben einerseits feine Strukturen an den Bereichsgrenzen erhalten, andererseits stehen innerhalb der Regionen genügend Bildpunkte zur Verfügung, die statistisch ausreichende Sicherheit bei der Klassifikation gewährleisten.

Die angewendete bereichsorientierte Segmentierung wird als Bereichswachstumsverfahren (Region Growing) bezeichnet. Ausgehend von im Bild verteilten Anfangspunkten wird ein iterativer Prozeß gestartet, bei dem die umliegenden Bildpunkte den Regionen zugeordnet werden. Dieses Anwachsen wird so lange fortgesetzt, bis ein Übergang zu einem Bildbereich von anderer Struktur erreicht ist. Problematisch sind beim Bereichswachstumsverfahren die Festlegung der Anfangspunkte und die Erkennung von Bereichsübergängen, an denen das Anwachsen stoppen soll. Beim vorliegenden Verfahren werden die Bereichsübergänge durch Kantendetektion gefunden. Die Anfangspunkte werden durch die Maxima einer Distanztransformation des Kantensbildes definiert. Nach Abschluß des Bereichswachstums werden benachbarte Segmente dahingehend untersucht, ob sie einer Objektklasse zugeordnet werden können und gegebenenfalls zu einer verschmolzen. Hierdurch wird die Anzahl der zu interpretierenden Segmente enorm verringert.

4.3.1 Kantendetektion

Mit den Operatoren zur Kantendetektion sollen die Bereichsgrenzen zwischen den Segmenten gefunden werden. Auf dem Weg vom SAR-Bild zum Kantensbild, welches zum einen als Binärdaten für jeden Bildpunkt die Information enthält,

ob der Bildpunkt zu einer Kante gehört oder nicht, zum anderen die Gradientenrichtung der ursprünglichen Kante beinhaltet, werden unterschiedliche Bearbeitungsschritte durchlaufen.

Erst einmal müssen die Kanten hervorgehoben werden, so daß ein Bild entsteht, in dem Bildpunkte, die potentielle Kanten darstellen, hohe Werte und die übrigen niedrige Werte enthalten. Herkömmliche Gradientenoperatoren sind für die Arbeit mit SAR-Daten aus zwei Gründen nicht geeignet.

Ihre Operatoren sind meist zu klein, so daß durch das Speckle-Rauschen in Bereichen mit einem Eistyp Kanten fälschlich erkannt werden. Der in dieser Arbeit verwendete quadratische Operator (Gamma Ratio Edge Detector [MADSEN, 1986]) hat eine Kantenlänge von 21 Bildpunkten. Er ist in neun unabhängige quadratische Bereiche mit Kantenlängen von sieben Bildpunkten unterteilt, deren gemittelte Bildpunktintensitäten mit M_{xy} bezeichnet werden. Die Indices x und y bezeichnen ihre Lage im Operator; sie können jeweils die Werte 1, 2 und 3 annehmen. Bei der Bildbearbeitung werden jeweils die Werte für den mittleren Bildpunkt des mittleren Bereichs M_{22} berechnet. Von SKRIVER [1989a] wurden unterschiedliche Operatorgrößen untersucht, wobei sich für SAR-Daten des ERS-1 die hier verwendete Operatorgröße als günstig erwies [SKRIVER, 1994].

Da das Speckle-Rauschen multiplikativen Charakter hat [MADSEN, 1986], führen herkömmliche Gradientenoperatoren wegen der Verwendung von Differenzbildung unterschiedlicher Operatorelemente zur Kantendetektion zu dem Mißstand, daß die Wahrscheinlichkeit von Fehlinterpretation von den absoluten Bildpunktintensitäten abhängt. Bei der von MADSEN [1989] vorgestellten Methode (Gamma Ratio Edge Detector) werden die Verhältnisse

$$\begin{aligned}
 R_{0^\circ} &= \frac{M_{11} + M_{12} + M_{13}}{M_{31} + M_{32} + M_{33}} \\
 R_{45^\circ} &= \frac{M_{21} + M_{11} + M_{12}}{M_{32} + M_{33} + M_{23}} \\
 R_{90^\circ} &= \frac{M_{11} + M_{21} + M_{31}}{M_{13} + M_{23} + M_{33}} \\
 R_{135^\circ} &= \frac{M_{21} + M_{31} + M_{32}}{M_{12} + M_{13} + M_{23}}
 \end{aligned}
 \tag{4.50}$$

gebildet, wodurch die Sicherheit der Kantendetektion bei allen Eistypen und ihren Helligkeiten gleich ist. Für jeden Bildpunkt wird der Maximalwert der

Quotienten aus Gleichung (4.50)

$$R = \max \left(R_{0^\circ}, R_{45^\circ}, R_{90^\circ}, R_{135^\circ}, \frac{1}{R_{0^\circ}}, \frac{1}{R_{45^\circ}}, \frac{1}{R_{90^\circ}}, \frac{1}{R_{135^\circ}} \right) \quad (4.51)$$

und die Richtung des Gradienten ermittelt. Die Richtung des quantisierten Gradienten entspricht der Ausrichtung der Elemente des maximalen Quotienten. In Abbildung 4.6 ist als Beispiel ein Ausschnitt aus einem SAR-Bild des ERS-1 mit seinen Bearbeitungsschritten dargestellt. Oben links ist das Ursprungsbild mit den Rückstreuintensitäten abgebildet. Das Ergebnis der Kantenherhebung mit den Gleichungen (4.50) und (4.51) (Gamma Ration Edge Detector) ist oben rechts enthalten. Die Abbildung unten links zeigt die Gradientenrichtung als Grauwertbild. Durch die Verwendung des großen Operators bilden sich statt klarer Kanten breite Bereiche mit potentiellen Kantenbildpunkten. Da diese breiten Übergangsbereiche für eine Segmentierung nicht hilfreich sind, werden sie durch die folgende Vorgehensweise auf die Breite eines Bildpunktes reduziert. Jeder Bildpunkt wird mit seinen beiden Nachbarbildpunkten in Gradientenrichtung verglichen. Wenn die Wertigkeiten beider Nachbarbildpunkte geringer sind, handelt es sich um einen potentiellen Kantenbildpunkt, dessen Wertigkeit mit einem Schwellwert verglichen wird. Liegt sein Wert oberhalb des Schwellwertes, wird er als Kante gekennzeichnet. Bei der Erstellung des Kantenbildes aus Abbildung 4.6 wurde ein Schwellwert von $T = 2,0$ gewählt.

Bei der Bearbeitung von SAR-Bildern ergeben sich keine durchgehenden Kanten, die die unterschiedlichen Bereiche des Ursprungsbildes eindeutig einschließen. Die Lücken sind im allgemeinen auch zu groß, als daß sich Algorithmen zur Kantenverfolgung erfolgreich einsetzen lassen. Daher wurde von SKRIVER [1989a] das folgende Bereichswachstumverfahren entwickelt.

4.3.2 Bereichswachstum

Durch das Bereichswachstumverfahren (Region Growing) werden aus den beiden unteren Bildern aus Abbildung 4.6 die Segmente gebildet. Das Anwachsen erfordert Startpunkte, die möglichst in den Zentren der zu bildenden Segmente liegen. Diese Punkte werden gefunden, indem jedem Bildpunkt im Kantenbild seine Entfernung zur nächsten Kante zugewiesen wird. Abbildung 4.7 zeigt im oberen Teil das distanztransformierte Bild mit dem Kantenbild aus Abbildung 4.6. Für geschlossene Bereiche ergeben sich ein oder mehrere Maxima in seiner Mitte, die als Anfangspunkte für das Bereichswachstum verwendet werden. Um die Bildung von unnötig vielen Segmenten zu verhindern, werden dicht benachbarte Maxima zur Bildung eines Segments zusammengefaßt. Diese Segmentkerne erhalten alle unterschiedliche Kennzahlen, um sie in folgenden Verarbeitungsschritten getrennt behandeln zu können. Ausgehend von diesen Segmentkernen werden alle übri-

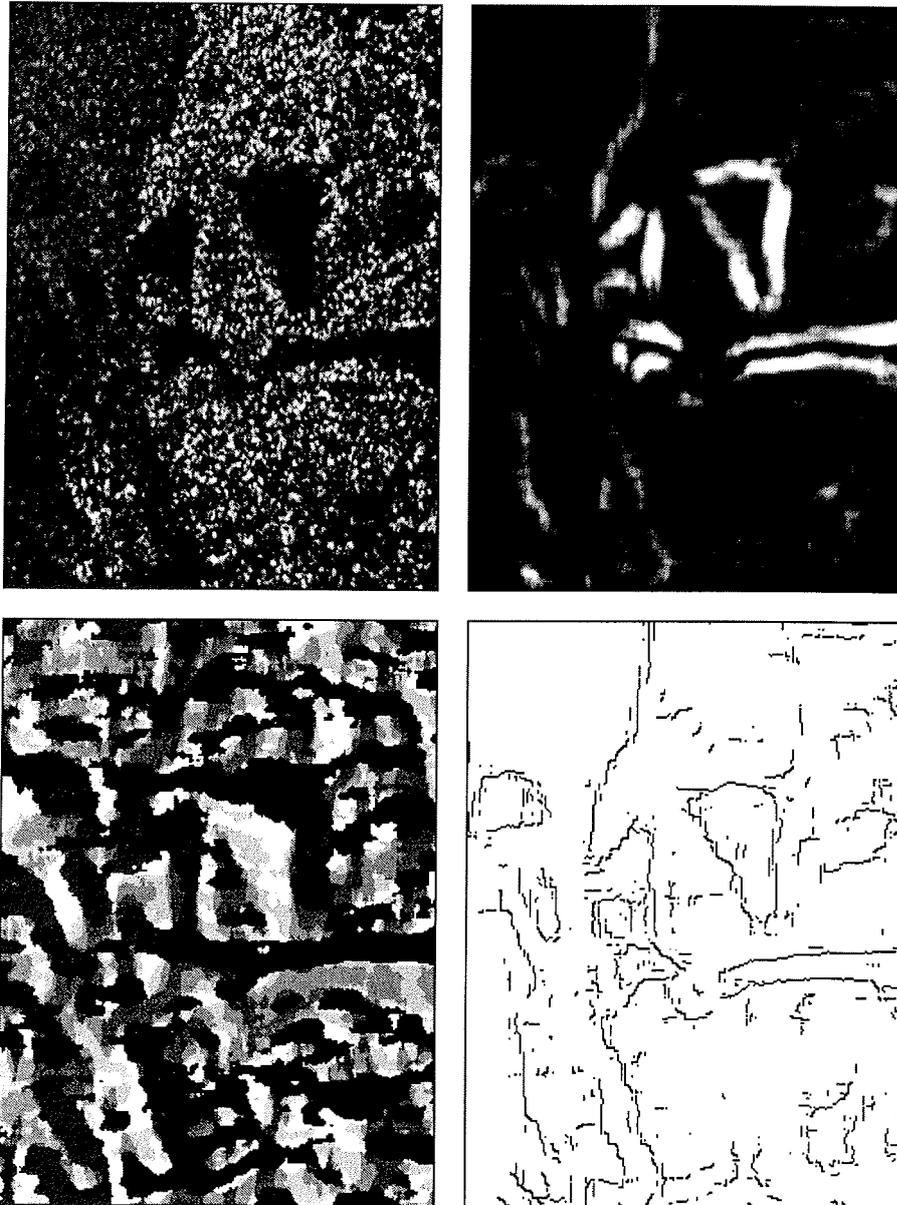


Abbildung 4.6: Verarbeitungsschritte zum feinen Kantenbild. Mit dem Programm *edgdet* wird aus dem originalen SAR-Bild oben links das unscharfe Kantenbild oben rechts und Gradientenbild unten links gebildet. Das Programm *edgthr* berechnet aus diesem Zwischenergebnis feine Kanten. (Daten aus Orbit: 8657, Frame: 1935, vom 12. März 1993)

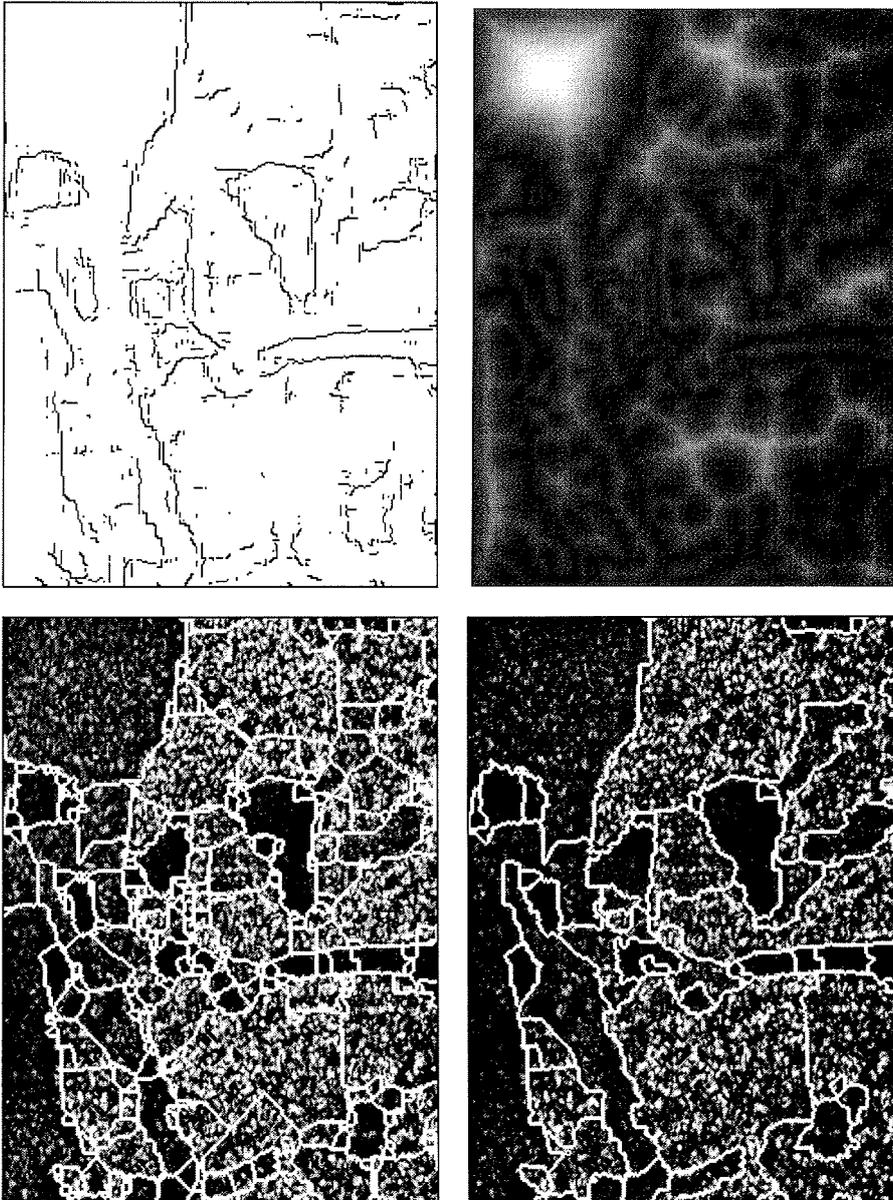


Abbildung 4.7: Verarbeitungsschritte zum segmentierten Bild. Mit den Programmen *sar-seg* und *edglnkm* wird aus dem Kantenbild über die Distanztransformation (oben rechts) das segmentierte Bild gewonnen. Da die Segmente für die Interpretation eine Mindestgröße haben müssen, werden die Segmente teilweise zusammengefaßt.

gen Bildpunkte entsprechend der Gradientenrichtung des distanztransformierten Bildes zugeordnet. Lediglich die Kantenbildpunkte können nicht eindeutig zugeordnet werden, da ihr Gradient im distanztransformierten Bild Null ist. Die Kanten werden mit Hilfe des Gradientenbildes (Gamma Ratio Edge Detector) der Ursprungsdaten zugeordnet. MADSEN [1986] zeigt, daß das von ihm vorgestellte Verfahren die Bereichskanten in Richtung gegen den Gradienten verschiebt.

Abbildung 4.7 zeigt unten links das Ergebnis des Bereichswachstumverfahren. Es ist zu erkennen, daß die fehlenden Kanten im Kantenbild dieses Segmentierungsverfahren nicht beeinträchtigt.

4.3.3 Segmentverschmelzung

Beim vorgestellten Verfahren entstehen viele kleine Segmente, deren Interpretation mit den vorgestellten statistischen Methoden wegen der in Abschnitt 4.2 genannten Gründe nicht möglich ist. Dort wurde auch erwähnt, daß für kleine Bereiche nur der Wert des mittleren Rückstreuoeffizienten gültig ist. Daher wird die Entscheidung, ob benachbarte Segmente vereinigt werden, über den Quotienten ihrer mittleren Rückstreuintensitäten gefällt. Ist dieser kleiner als ein Schwellwert, werden die Segmente verschmolzen.

Die Zusammenführung der Segmente erfolgt im allgemeinen in drei Schritten. Zuerst werden alle Segmente mit einer geringen Größe N (zum Beispiel $N < 50$) den Nachbarsegmenten zugeordnet. Im zweiten Durchgang werden die Segmente bis zur mittleren Größe von etwa $N < 500$ Bildpunkten den Nachbarn zugeordnet, wenn der Quotient deren mittlerer Rückstreuintensitäten kleiner als 2,5 dB ist. Zum Abschluß werden alle Segmente, ungeachtet ihrer Größe, mit ihren Nachbarsegmenten verglichen und verschmolzen, wenn ihr Quotient 1 dB nicht überschreitet. In Abbildung 4.7 ist rechts unten das Ergebnis der Segmentverschmelzung mit den im Text angegebenen Segmentgrößen und Quotienten dargestellt. Die angegebenen Werte können bei SAR-Daten unterschiedlichen Charakters variiert werden, so daß man zufriedenstellende Ergebnisse erhält.

4.3.4 Segmentinterpretation

Die Segmentinterpretation wird anhand der in Abschnitt 4.2 dargestellten statistischen Parameter vorgenommen. Unter Anwendung der Routine *segstat* und *segtex* werden für jedes Segment der mittlere Rückstreuoeffizient σ^0 , das zweite normierte Moment β_2 und die Schiefe γ_3 und die Kennwerte der Co-occurrence-Matrix, der Kontrast ξ_{CON} , das inverse Differenzmoment ξ_{IDM} und die Entropie ξ_{ENT} berechnet. Die berechneten Werte liegen in Form einer Tabelle den Segmenten zugeordnet vor. Die Entscheidungskriterien, welche Wertekombinationen welchem Eistyp entspricht, wird im nächsten Kapitel erarbeitet.

5 Interpretation der Radardaten

Mit dem folgenden Kapitel wird nun das inhaltliche Ziel der vorliegenden Arbeit angegangen. Es sollen die einzelnen Segmente der Radarbilder, die nach der Methode aus Abschnitt 4.3 gebildet wurden, interpretiert werden. Diese Interpretation bezieht sich auf die Eistypen und deren Eigenschaften.

Grundlage sind hierfür die nach Abschnitt 2 korrigierten Line-Scanner-Daten, die mit den Programmen aus Abschnitt 3 klassifiziert werden. Für die Zuordnung der Line-Scanner-Daten zu den Radardaten werden beide Spektralbereiche der Line-Scanner genutzt, für die numerische Auswertung jedoch die klassifizierten Datensätze verwendet. Die zu interpretierenden Radardaten, die entsprechend der Algorithmen aus Abschnitt 4 segmentiert wurden, müssen zur geometrischen Zuordnung der Line-Scanner-Daten als Bild der Rückstreuintensität im Byte-Format vorliegen. Bei der Auswertung wurde deutlich, daß die Navigationsdaten der Line-Scanner, die während der Meßflüge aufgezeichnet wurden, zwar zur groben Lokalisierung des überflogenen Meßgebiets herangezogen werden können, jedoch für die Zuordnung der einzelnen Bildpunkte zu den SAR-Daten nicht von Nutzen sind. Dies gilt besonders, wenn die Aufnahme der Line-Scanner-Daten nicht zeitgleich zur Aufnahme der Radardaten durchgeführt wurde. Daher wird nicht bildpunktweise verglichen, sondern für die numerische Auswertung das segmentierte Radarbild und die zugehörige Tabelle der Statistik und Textur verwendet. Diese sind als Ergebnis aus Abschnitt 4 hervorgegangen.

Die Interpretation der Radardaten wird anhand des in der Einführung erwähnten Szenarios vom 12. März 1993 vorgestellt. Das Radarbild ist in Abbildung 1.1 auf Seite 11 und die Lage der Aufnahme in Abbildung 1.2 dargestellt. Hierbei ist zusätzlich die Flugroute der Line-Scanner-Aufnahme eingetragen, anhand derer sich die Line-Scanner-Daten den Radardaten grob räumlich zuordnen lassen. Das SAR des ERS-1 hat das Radarbild am 12. März 1993 um 12:48 UTC aufgenommen. Dasselbe Gebiet haben wir von 13:30 UTC bis 14:00 UTC durchflogen. Bereits die mittlere Differenz von einer Stunde zwischen den beiden Aufnahmen führt bei Annahme einer gleichmäßigen Driftgeschwindigkeit von 20 cm/s zu einer Positionsänderung des Eises von etwa 700 m.

Innerhalb des vom SAR abgedeckten Gebiets wurde mit den Line-Scannern bei einer Flughöhe von 830 m und einer Geschwindigkeit von 70 m/s eine Fläche von etwa 170 km² aufgenommen. Dieses entspricht einer Million Bildpunkte des SAR, welche 1,6% einer Szene ausmachen. Dieser Anteil scheint im ersten Eindruck nicht allzu groß zu sein. In anderen Arbeiten, die Vergleichsmessungen zum ERS-1 zum Inhalt haben, konnte dieser Anteil wegen der punktuellen Messungen jedoch nicht im entferntesten erreicht werden. So haben zum Beispiel ULANDER *et al.* [1995] ihre Untersuchungen durch sechs Feldmessungen innerhalb drei SAR-Szenen unterstützt. BARBER *et al.* [1995] konnten nur die nahe Umgebung einer

Eisstation über einige Zeit berücksichtigen. Aber auch andere Untersuchungen ohne Vergleichsmessungen benutzen bisher nur geringe Anteile der Bilddaten als Referenzgebiete, denen Eistypen empirisch zugeordnet werden. Sowohl bei den Untersuchungen von SUN *et al.* [1992] an flugzeuggestützten SAR-Daten als auch bei SMITH *et al.* [1995] werden nur etwa 0,2% der Fläche als Trainingsgebiete herangezogen. Eine Ausnahme bilden die Arbeiten von SKRIVER, die bei der Untersuchung von flugzeuggestützten Radarmessungen einen Anteil von etwa 1% [1991] oder sogar 7% [1989b] als Trainingsdaten heranziehen. Hier muß jedoch bemerkt werden, daß die Interpretation ausschließlich auf den Erfahrungen der Autoren basiert und nicht auf unabhängigen Messungen.

Die in dieser Arbeit vorgenommene Klassifikation der Line-Scanner-Daten zeigt, daß in dem überflogenen Gebiet folgendes Eis vorkam: 1,9% dunkler Nilas (DN), 6,5% heller Nilas (LN), 4,8% dünnes erstjähriges Eis (FY1), 20,0% mitteldickes erstjähriges Eis (FY2), 2,4% dickes erstjähriges Eis (FY3), 8,6% zweijähriges Eis (SY) und 55,8% mehrjähriges Eis (MY). Bei der Klassifikation der Line-Scanner-Daten half das Protokoll, das während der Meßflüge erstellt wurde. Das Datenerfassungsprogramm COMBSCAN ermöglicht eine direkte Eingabe von Kommentaren in den Erfassungsrechner, so daß eine genaue Zuordnung der Protokolleinträge zu den Bilddaten erreicht wird.

Nach der Beschreibung der Methode, mit der die Line-Scanner-Daten den Gebieten der Radardaten zugeordnet werden (Abschnitt 5.1), wird die Aussagekraft der statistischen Parameter der Radardaten beurteilt (Abschnitt 5.2). Dort wird an einem Beispiel auch gezeigt, wie leicht bei der Interpretation von Radardaten, ohne die Verwendung von Vergleichsmessungen, Fehlinterpretationen unterlaufen können.

Im Abschnitt 5.3 wird der Klassifikator vorgestellt, der mit der vorliegenden Arbeit entwickelt wurde. Hierauf folgt eine umfassende Beurteilung der erarbeiteten Ergebnisse in Abschnitt 5.4.

5.1 Zuordnung der Line-Scanner-Daten

Ein Problem, von dem die Güte der Interpretation der Radardaten unter Verwendung von Line-Scanner-Daten in hohem Maß abhängt, ist die räumliche Zuordnung zwischen den Line-Scanner-Daten und den Radardaten. Hierbei geht es darum, die örtliche Lage der Line-Scanner-Daten so zu transformieren, daß dieselben Eisgebiete in beiden Datensätzen dieselben Ortskoordinaten aufweisen.

Obwohl es elegantere Methoden gibt, wurden die Line-Scanner-Daten interaktiv an die Radardaten angepaßt. Die beiden naheliegendsten Alternativen hierzu wären die Zuordnung über die während des Meßfluges aufgenommenen Positionsdaten oder die Ermittlung der Transformationsfunktionen durch Korrelation der

beiden Datensätze, beziehungsweise sogar eine Kombination dieser beiden Methoden. Die alleinige Nutzung der Positionsdaten scheidet wegen der eingangs erwähnten Eisdrift zwischen dem Satellitenüberflug und den Flugzeugmessungen aus. Der oben genannten Verschiebung von 700 m entspricht im Radarbild eine Deplazierung um 56 Bildpunkte. Da jedoch im Strömungsfeld des Eises auch Konvergenzen, Divergenzen oder Rotationen zu erwarten sind, könnte eine Lagebestimmung durch die Positionsdaten lediglich den Ausgangspunkt für Bestimmung und Korrektur der Eisdrift zwischen den beiden Messungen mittels nachfolgender Korrelation bilden.

Dieser Möglichkeit wurde nicht nachgegangen, da ihr Erfolg wegen der unterschiedlichen Signaturen der Line-Scanner-Daten und der Radardaten grundsätzlich in Frage gestellt ist. Die Anpassung durch Korrelation dürfte auch mit großem Aufwand kaum an die Güte der interaktiven Anpassung reichen.

Auch die Zuordnung zwischen Line-Scanner-Daten und den Radardaten mittels Paßpunkten wurde nach einem Versuch verworfen. Durch die langgestreckten Line-Scanner-Bilder, die unterschiedlichen Auflösungen von Line-Scanner und SAR, teilweise unscharfen Kanten und eventuelle Rotation in der Eissituation verzerrten die Line-Scanner-Daten bei der Anpassung mittels Paßpunkten bis zur Entartung.

Die in dieser Arbeit verwendete interaktive Methode ist zwar mühsam, da die Zuordnung der Line-Scanner-Daten eines Meßfluges zu einer SAR-Szene einen Arbeitsaufwand von einem Tag benötigt, erscheint jedoch wegen der grundsätzlichen Bedeutung des exemplarischen Vergleichs gerechtfertigt. Hierzu wird folgendermaßen verfahren. Mit Hilfe der Routine *vcinsert*, deren Anwendung im Anhang B.6.4 ausführlich beschrieben ist, erfolgt die Zuordnung der Line-Scanner-Daten in einzelnen Bildabschnitten. Die Größe der Bildabschnitte richten sich nach der Übereinstimmung der Datensätze. Als Eingabe erwartet die Routine sowohl die Radardaten als auch die Line-Scanner-Daten. Nach Eingabe der Flugabschnitte im Line-Scanner-Bild, eines Faktors zur Anpassung der Auflösung, der Positionierung im Radarbild und einer eventuell notwendigen Rotation werden die beiden Eingabebilder in ein zweikanaliges Ergebnisbild überführt. Relevante Ausschnitte dieses Ergebnisbildes können mit der KHOROS-Routine *animate* betrachtet werden. Diese Routine ermöglicht einen ständigen Wechsel der Darstellung beider Bilder auf dem Bildschirm, wodurch die Anpassung gut beurteilt und gegebenenfalls korrigiert werden kann.

Mit dieser Methode werden nun die Line-Scanner-Daten eines gesamten Meßfluges den Radardaten zugeordnet. Bei Unsicherheiten werden entsprechende Abschnitte der Line-Scanner-Daten verworfen. Abbildung 5.1 zeigt als Beispiel einen Ausschnitt angepaßter Bilddaten.

5.2 Beurteilung der statistischen Parameter

Bevor ein Klassifikator für die Radardaten entwickelt werden kann, müssen verschiedene Möglichkeiten zum Vergleich mit den Line-Scanner-Daten untersucht werden. So kann eine Mindestgröße für ein Segment der Radardaten verlangt und damit kleinere Segmente vom Vergleich ausgeschlossen werden. Diese Idee geht zum einen auf die Untersuchungen in Abschnitt 4.2.1 zurück, bei denen für den mittleren Rückstreuoeffizienten Segmentgrößen von über 200 Bildpunkten verwendet werden sollten, um dem Speckle-Rauschen entgegenzuwirken. Im Abschnitt 4.2.2 wurde zum anderen darauf hingewiesen, daß die Berechnung der Momente ebenfalls eine Mindestgröße der Segmente erfordert, um die statistische Sicherheit zu gewährleisten.

Die Möglichkeit, nur ausgewählte Segmente zu berücksichtigen, bezieht sich auf die Auswertung der Eistypenkonzentration im Line-Scanner-Bild. So können entweder die gesamten Anteile der Segmente der Radardaten den entsprechenden Eistypen der Line-Scanner-Daten zugeordnet werden oder nur die Anteile, die in den Line-Scanner-Daten den wesentlichen Eistyp ausmachen.

Vor der Untersuchung dieser Möglichkeiten soll jedoch an einem Beispiel gezeigt werden, wie leicht Fehlinterpretationen unterlaufen können, wenn Radarbilder allein zur Deutung der Eistypen eingesetzt werden.

5.2.1 Fehlinterpretation

Abbildung 5.1 zeigt einen kleinen Ausschnitt der Bilddaten aus dem Szenario vom 12. März 1993. Beide Bilder geben dasselbe Gebiet mit einer Größe von 3,7 km x 2,7 km wieder. Auf der linken Seite sind die Rückstreuintensitäten des ERS-1-SAR und auf der rechten ist das Temperaturbild vom Infrarot-Line-Scanner dargestellt. Das Line-Scanner-Bild ist mit dem in Abschnitt 5.1 beschriebenen Verfahren auf die Koordinaten des Radarbildes transformiert, so daß gleiche Bildkoordinaten miteinander verglichen werden können. Im Line-Scanner-Bild entsprechen dunkle Bereiche niedrigeren Oberflächentemperaturen und somit dickerem Eis als die hellen Bereiche.

Im Line-Scanner-Bild sind unter anderem die Bereiche 1 und 2 gekennzeichnet. Im Radarbild ist der Bereich 1 von geringerer Rückstreuintensität als der Bereich 2, was im Bereich 1 das jüngere Eis vermuten läßt. Man hätte keine Anhaltspunkte, die gegen diese Vermutung sprechen würden, so daß bei der Arbeit mit subjektiv ausgewählten Trainingsgebieten eine entsprechende Festlegung erfolgen würde. Im Bild des Infrarot-Line-Scanner auf der rechten Seite ist anhand der Temperaturen jedoch eindeutig zu erkennen, daß der Bereich 1 kälter und somit dicker und älter ist, als das Eis des Bereichs 2. Bei der Klassifikation der Line-Scanner-Daten wurde der Bereich 1 als dickes erstjähriges Eis und der Be-

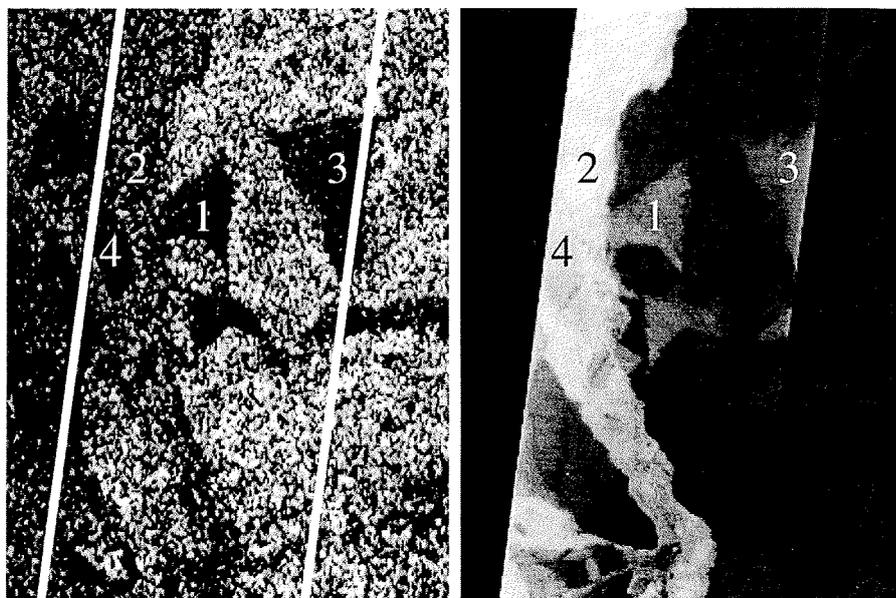


Abbildung 5.1: Ausschnitt aus dem Szenario vom 12. März 1993 mit einer Größe von 3,7 km x 2,7 km. Auf der linken Seite sind die Rückstreuintensitäten des ERS-1-SAR (Orbit: 8657; Frame: 1935; ©ESA) und rechts das Temperaturbild vom Infrarot-Line-Scanner dargestellt. Im Line-Scanner-Bild entsprechen dunkle Bereiche niedrigen Oberflächentemperaturen und somit dickeres Eis als die hellen Bereiche. Die gekennzeichneten Bereiche werden im Text behandelt.

reich 2 als mitteldickes erstjähriges Eis interpretiert. Die Rückstreuintensitäten lassen hier nur eine Aussage über die Umstände während der Eisbildung zu. Bei der Bildung des mitteldicken erstjährigen Eises im Bereich 2 konnte eine glattere Oberfläche entstehen als bei der Bildung des dicken erstjährigen Eises im Bereich 1. Ein Einfluß durch Schmelzprozesse ist in dieser Jahreszeit unwahrscheinlich. Es waren auch nur so geringe Schneemächtigkeiten vorhanden, daß diese keine Auswirkungen auf die Rückstreuintensitäten haben.

Mit dem ausgewählten Bildausschnitt ist auch die Schwierigkeit der räumlichen Anpassung der Line-Scanner-Daten an die Radardaten zu erkennen. In der oberen Bildhälfte sind die Schollenkanten und Eisgebiete eindeutig einander zuzuordnen. Im unteren Drittel hingegen sind visuell in Bereichen mit hohem Kontrast im Line-Scanner-Bild keine eindeutigen Kanten im Radarbild zu erkennen. Dieser Bildabschnitt wurde allerdings dennoch nicht verworfen, da das segmentierte Radarbild die Grenzen noch unterscheidet, wie in Abbildung 4.7 zu erkennen ist.

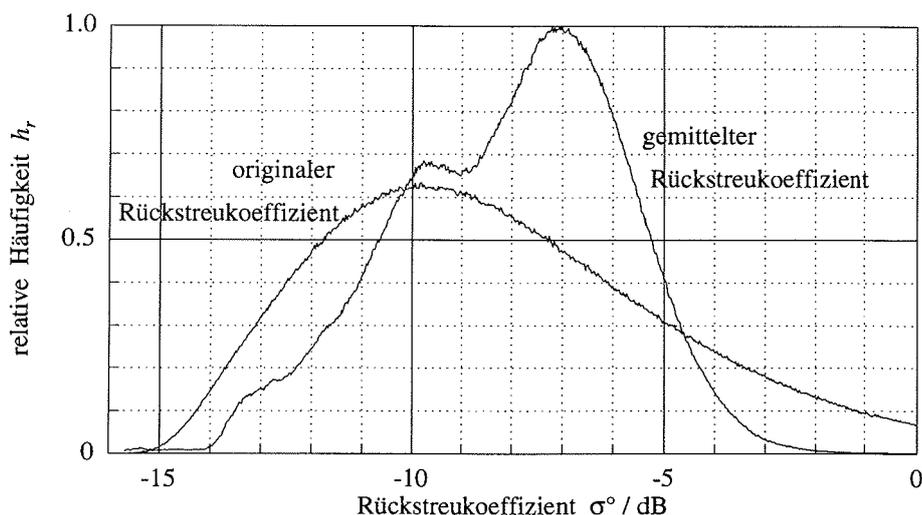


Abbildung 5.2: Histogramme des Radarbildes vom 12. März 1993 (Orbit: 8657; Frame: 1935). Die originalen Rückstreuungskoeffizienten zeigen nur die RAYLEIGH-Verteilung des Speckle-Rauschens. In den gemittelten Daten sind Objektklassen zu erkennen.

5.2.2 Histogramme

In Abschnitt 4 wurden einige Merkmale behandelt, anhand derer die Objektklassen im Radarbild voneinander unterschieden werden können. Neben dem mittleren Rückstreuungskoeffizienten σ^0 sind das 2. normierte Moment β_2 und das 3. zentrale Moment, die Schiefe γ_3 , als Kenngrößen der Verteilungsfunktionen wichtig. Als Texturgrößen werden der Kontrast ξ_{CON} , das inverse Differenzmoment ξ_{IDM} und die Entropie ξ_{ENT} berücksichtigt. Diese Merkmale, oder auch nur eine Auswahl von ihnen, spannen einen mehrdimensionalen Merkmalsraum auf, der zum einen zur Darstellung von Histogrammen dient und für die Klassifikation relevant ist. Die Darstellung von Histogrammen beschränkt sich jedoch auf ein oder zwei Dimensionen. Die Untersuchung der einzelnen statistischen Parameter der Radardaten führt in Abschnitt 5.3 zu einer mehrdimensionalen Klassifikation.

Die wichtigste Größe bei der Interpretation von Radardaten ist der Rückstreuungskoeffizient. Von LAUR [1992] wird angegeben, daß der Rückstreuungskoeffizient wegen des Speckle-Rauschens nur als mittlerer Rückstreuungskoeffizient eines Gebiets mit etwa 500 Bildpunkten gültig ist. Welchen Einfluß das Speckle-Rauschen hat, ist im Histogramm von Abbildung 5.2 zu erkennen. Neben dem Histogramm der Rückstreuungskoeffizienten des originalen Radarbildes ist das Histogramm der Rückstreuungskoeffizienten dargestellt, nachdem sie über 21 x 21 Bildpunkten gemittelt wurden. Während den unbearbeiteten Rückstreuungskoeffizienten lediglich die

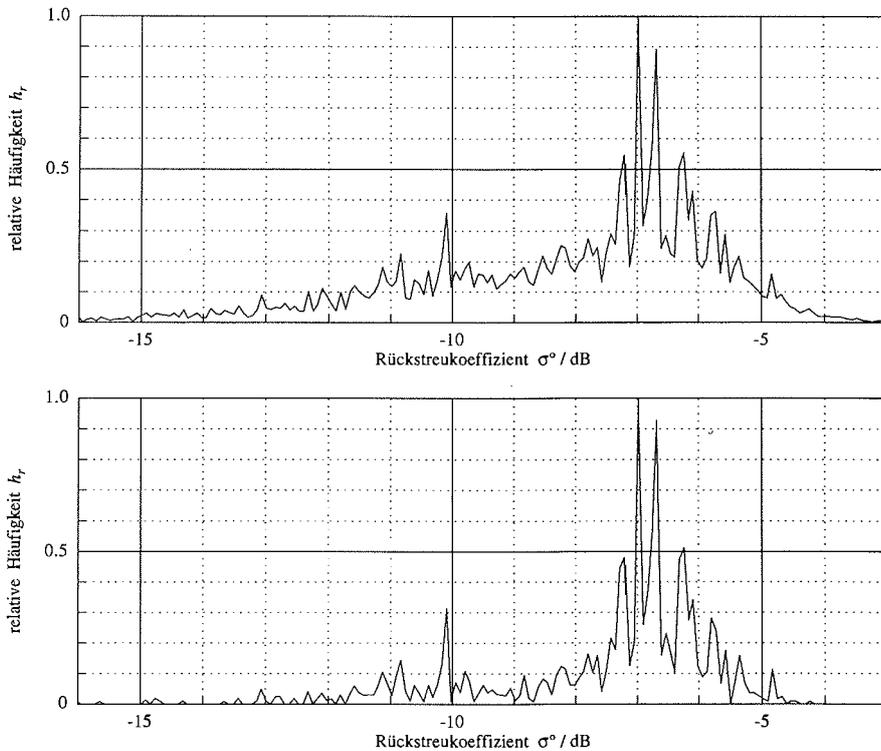


Abbildung 5.3: Histogramme der segmentierten Radardaten entsprechend Abbildung 5.2. Im Gegensatz zum oberen Histogramm wurden im unteren nur Segmente berücksichtigt, die mindestens 2000 Bildpunkte enthalten.

dem Speckle-Rauschen von Radarbildern eigene RAYLEIGH-Verteilung zu entnehmen ist, können in den gemittelten Daten schon unterschiedliche Objektklassen erkannt werden. Diese können aber gerade wegen der Tiefpaßfilterung durch Mittelwertbildung im Histogramm nicht eindeutig voneinander getrennt werden. Die Verteilungen der einzelnen Objektklassen zeigen große Überlappungsbereiche. Zentren liegen bei etwa -7 dB, -10 dB und -13 dB.

Da die Tiefpaßfilterung große Unsicherheiten in den Bereichsübergängen hervorruft, wurde die Segmentierung der Radardaten nicht nach einfacher Mittelwertbildung, sondern nach den Verfahren aus Kapitel 4 durchgeführt, so daß nun statt der Mittelwerte von beliebigen Umgebungen, Mittelwerte aus einzelnen Segmenten betrachtet werden.

Hiermit ergeben sich für dieselben Bilddaten, aus denen Abbildung 5.2 erstellt wurde, die Histogramme aus Abbildung 5.3. Im oberen Diagramm sind die Bild-

punkte aller Segmente der Radardaten enthalten. Die Maxima sind schon stark ausgeprägt. Die Histogramme der segmentierten Radardaten sind inhomogen, da alle Bildpunkte eines Segments bei der Mittelwertbildung denselben Wert erhalten und der Wertebereich der Merkmale bei der Erstellung der Histogramme mit der Routine *vsar1dh* diskretisiert wird. In Abbildung 4.5 auf Seite 124 ist zu erkennen, daß die Bereiche zwischen den Maxima durch kleine Segmente gebildet werden, deren mittlere Rückstreuoeffizienten nicht repräsentativ für einen Eistyp sind. Mit der Einschränkung, daß nur Segmente berücksichtigt werden, die mindesten 2000 Bildpunkte enthalten, entsteht ein Histogramm, bei dem die Anteile zwischen den Maxima wesentlich geringer sind.

Die gezeigten Histogramme der segmentierten Radardaten können mit der Routine *vsar1dh* erstellt werden. Hierbei werden auch die später gezeigten Mittelwerte und Standardabweichungen für die Werte der einzelnen Eistypen berechnet. Die Routine *vsar1dh* verarbeitet das Ergebnis der Routine *vsarstat*, dessen Struktur in Tabelle 5.1 gezeigt wird. Hierbei wird für jedes Segment des Radarbildes neben den statistischen Parametern die jeweilige Konzentration der Eistypen angegeben, die aus den klassifizierten Daten der Line-Scanner ermittelt wurde. Wegen der eingeschränkten Genauigkeit der interaktiven räumlichen Zuordnung der Line-Scanner-Daten werden die durchflogenen Radarsegmente mehrere Eistypen enthalten.

Mit der Zusammenführung der Radardaten und den klassifizierten Line-Scanner-Daten können nun spezielle Histogramme der Radardaten erstellt werden, die ausschließlich die Bereiche eines Eistyps berücksichtigen.

Die Histogramme in Abbildung 5.4 zeigen die Verteilungen der mittleren Rückstreuoeffizienten für einzelne Eistypen. Ausgewählt wurden hierbei heller Nilas (LN), dickes erstjähriges Eis (FY3) und mehrjähriges Eis (MY). In die Histogramme sind als senkrechte Linien die Mittelwerte und, als grauer Bereich, die Standardabweichung eingetragen. Auffallend ist, daß sich die Merkmale des LN und des FY3 fast völlig gleichen. Auch zum MY ist keine ausreichende Unterscheidung vorhanden.

In allen drei Histogrammen tritt zum Beispiel bei einem Rückstreuoeffizienten von $\sigma^{\circ} = -7,2$ dB ein starkes Maximum auf. Die Fehlinterpretation der Bereiche, die einen mittleren Rückstreuoeffizienten von $\sigma^{\circ} = -7,2$ dB haben, kommt durch die unvollkommene räumliche Zuordnung der Line-Scanner-Daten zu den Radardaten zustande. Wenn ein Segment, das ausschließlich mehrjähriges Eis enthält und somit ein hohen mittleren Rückstreuoeffizienten hat, mit den Line-Scanner-Daten verglichen wird, wird der Großteil der Line-Scanner-Daten auch diesen Eistyp bestätigen. Durch leichte räumliche Verschiebungen wird jedoch ein gewisser Anteil des Segmentes im Line-Scanner-Bild als jüngeres Eis interpretiert. Bei der Erstellung der Histogramme aus Abbildung 5.4 wurden alle Bildpunkte, die sowohl mit den Line-Scannern als auch dem Radar abgedeckt

Spaltennr.	Eintrag
0	Segmentnummer
1	Anzahl der Bildpunkte im Segment
2	Objektklasse nach der Klassifikation (0=unklassifiziert)
3	mittlerer Rückstreuoeffizient σ° in dB
4	2. normiertes Moment β_2 aus Gleichung (4.31)
5	3. normiertes Moment β_3 aus Gleichung (4.30)
6	4. normiertes Moment β_4 aus Gleichung (4.30)
7	3. normiertes zentrales Moment oder Schiefe γ_3 aus Glg. (4.35)
8	4. normiertes zentrales Moment oder Wölbung γ_4 aus Glg. (4.37)
9	Angular-Second-Moment ξ_{ASM} nach SKRIVER [1989a]
10	Kontrast ξ_{CON} aus Gleichung (4.49)
11	inverses Differenzmoment ξ_{IDM} aus Gleichung (4.49)
12	Sum-Entropy ξ_{SENT} nach SKRIVER [1989a]
13	Entropy ξ_{ENT} aus Gleichung (4.49)
14	Difference-Entropy ξ_{DENT} nach SKRIVER [1989a]
15	Eistyp 0; Anteil in Prozent; unklassifiziert
16	Eistyp 1; Anteil in Prozent; offenes Wasser
17	Eistyp 2; Anteil in Prozent; Bisschlamm
18	Eistyp 3; Anteil in Prozent; dunkler Nilas
19	Eistyp 4; Anteil in Prozent; heller Nilas
20	Eistyp 5; Anteil in Prozent; Pfannkucheneis
21	Eistyp 6; Anteil in Prozent; graues Eis
22	Eistyp 7; Anteil in Prozent; grauweißes Eis
23	Eistyp 8; Anteil in Prozent; dünnes erstjähriges Eis
24	Eistyp 9; Anteil in Prozent; mitteldickes erstjähriges Eis
25	Eistyp 10; Anteil in Prozent; dickes erstjähriges Eis
26	Eistyp 11; Anteil in Prozent; zweijähriges Eis
27	Eistyp 12; Anteil in Prozent; mehrjähriges Eis
28	Eistyp 13; Anteil in Prozent; Pfütze
29	Eistyp 14; Anteil in Prozent; Trümmereis
30 bis 35	Eistyp 15 bis 20; Anteile in Prozent; frei verfügbar

Tabelle 5.1: Einträge der Ergebnisdaten von der Routine *vsarstat*. Die prozentualen Angaben der Eistypen können mit der Routine *vtypmerge* zusammengefaßt werden. Die Bestimmung der Objektklassen wird durch die Routine *vsarclas* durchgeführt, die im Abschnitt 5.3 beschrieben ist.

wurden, interpretiert. Die einzige Einschränkung stellt die Außerachtlassung von Segmenten dar, die weniger als 700 Bildpunkte enthalten.

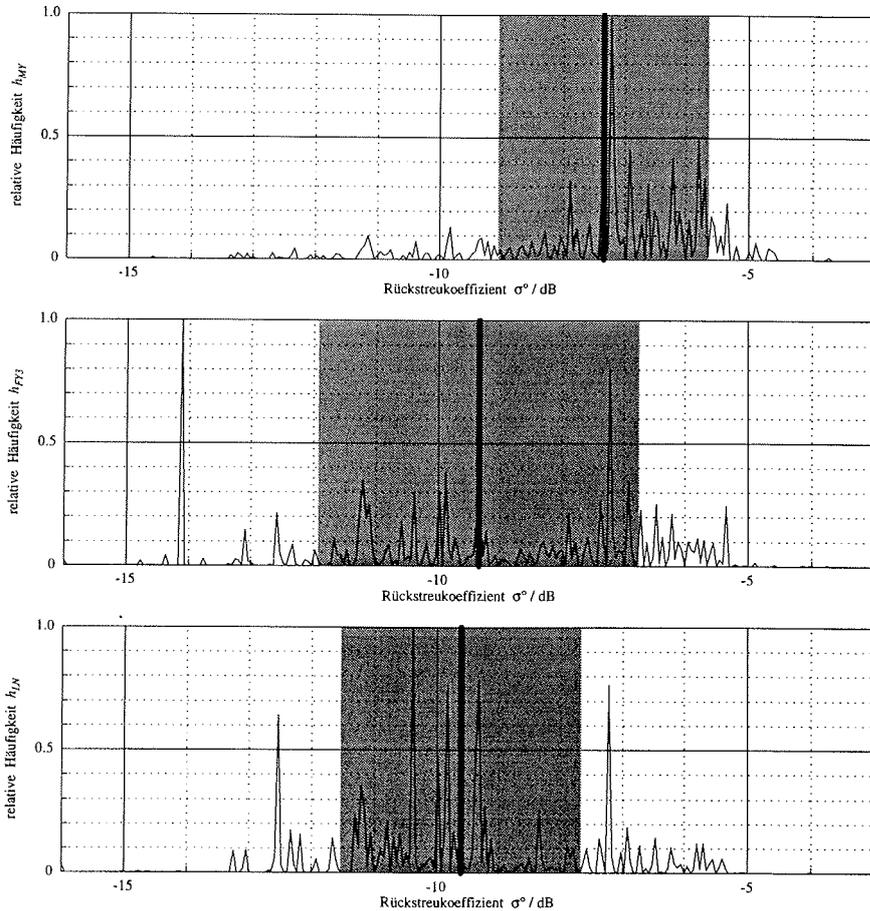


Abbildung 5.4: Histogramme der mittleren Rückstreukoeffizienten für mehrjähriges Eis (h_{MY}), dickes erstjähriges Eis (h_{FY3}) und helles Nilas (h_{LN}). Die senkrechte Linie gibt den jeweiligen Mittelwert und der graue Bereich in beide Richtungen eine Standardabweichung an. Bei der Berechnung der Histogramme wurden alle Bildpunkte berücksichtigt, die in Segmenten enthalten sind, deren Größe 700 Bildpunkte überschreitet

Wenn nur diejenigen Bildpunkte ins Histogramm übernommen werden, deren mit Hilfe der Line-Scanner identifizierter Eistyp in dem jeweiligen Radarsegment den wesentlichen Anteil ausmacht, werden Fehlinterpretationen durch falsche räumliche Zuordnung vermieden. Mit dieser Restriktion werden die Histogramme der einzelnen Eistypen neu berechnet (Abbildung 5.5). Für LN, FY3 und MY zeigen

sich nun klar getrennte Bereiche der Standardabweichungen. Diese drei Bereiche können also anhand der mittleren Rückstreuoeffizienten des Radarbildes unterschieden werden.

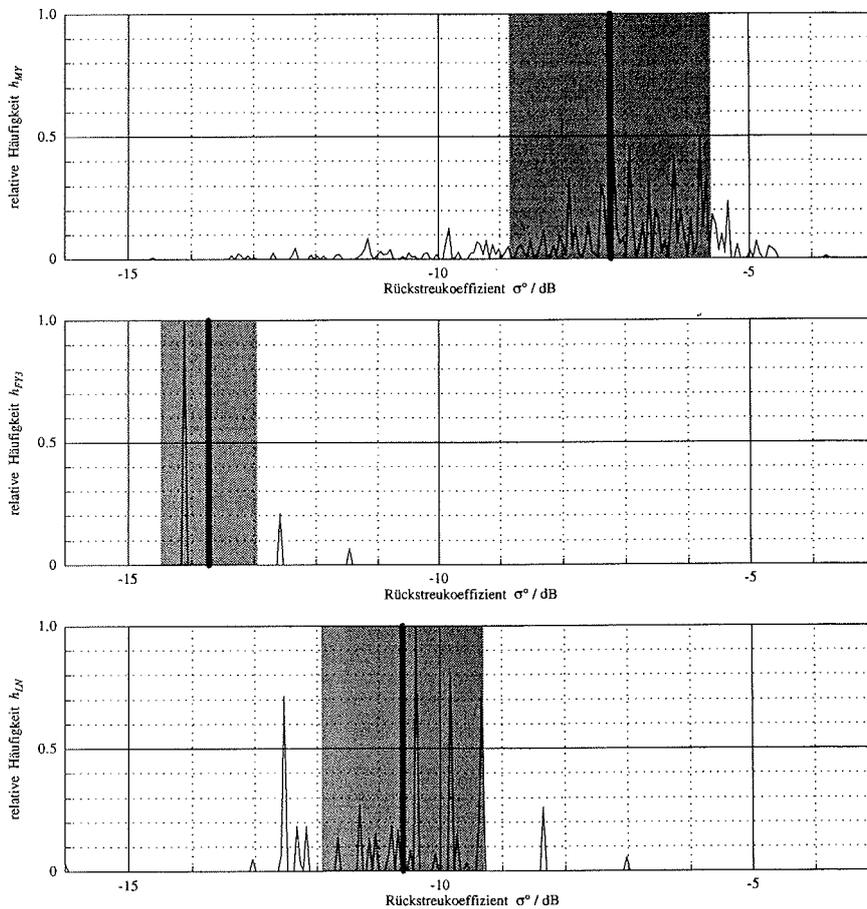


Abbildung 5.5: Histogramme aus Abbildung 5.4. Es wurden jedoch nur die Bildpunkte der Radarsegmente berücksichtigt, die im Line-Scanner-Bild dem Eistyp mit dem wesentlichen Anteil entsprechen.

In den folgenden Diagrammen werden zur Bequemlichkeit nicht mehr die Gesamtverteilungen, sondern nur noch die Mittelwerte und Standardabweichungen dargestellt. Es werden wie zuvor nur die Segmente zur Auswertung herangezogen, die mindestens 700 Bildpunkte groß sind, und aus diesen Segmenten werden wiederum nur die Bereiche mit dem im Line-Scanner-Bild erkannten wesentlichen

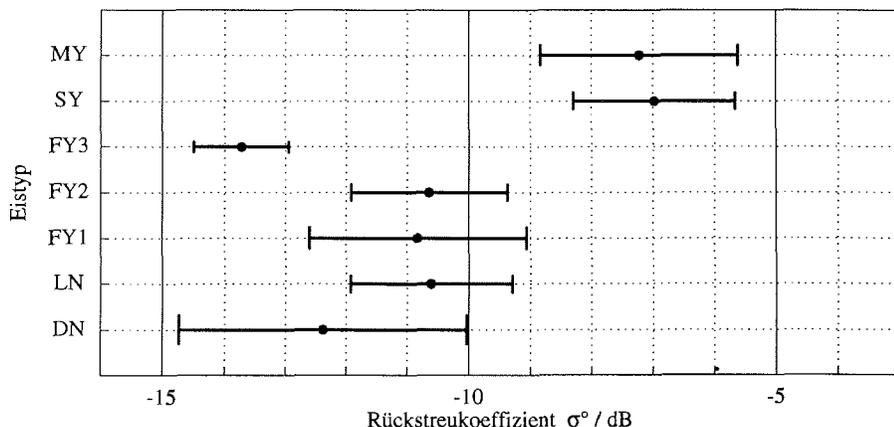


Abbildung 5.6: Mittelwerte und Standardabweichungen für den mittleren Rückstreukoeffizienten σ^0 . Berücksichtigt wurden Bildpunkte von Radarsegmenten mit einer Größe von über 700 Bildpunkten, die als wesentlicher Eistyp im Line-Scanner-Bild erkannt wurden.

Eistyp berücksichtigt, wie sie auch in Abbildung 5.5 zu Grunde lagen. Die Werte aus dieser Abbildung sind mit in Abbildung 5.6 enthalten. Senkrecht sind im Diagramm die Eistypen in der Wachstumsfolge enthalten. Man erkennt, daß altes Eis (SY und MY) durch den mittleren Rückstreukoeffizienten gut von den restlichen Eistypen unterschieden werden kann. SY und MY unterscheiden sich dabei kaum voneinander. Dieses trifft auch für die beiden erstjährigen Eistypen FY1 und FY2 zusammen mit dem hellen Nilas (LN) zu. Von anderem erstjährigem Eis unterscheidet sich FY3, welches vermutlich unter ruhigen Witterungsverhältnissen entstanden ist. Das dunkle Nilas (DN) hat zwar einen Mittelwert, der sich von allen anderen Eistypen stark unterscheidet, dieser wird aber von einer hohen Standardabweichung begleitet.

Die Werte des 2. normierten Moments β_2 sind in Abbildung 5.7 wiedergegeben. Auch hier zeigt sich für DN ein großer Streubereich. Trotzdem kann dieser Eistyp von den anderen Typen, außer von FY3, getrennt werden. Es gibt in den Standardabweichungen sonst nur eine Überlappung mit dem LN. Eine Fehlinterpretation zwischen den beiden Nilas-Typen wäre nicht schwerwiegend, da ihre physikalischen Eigenschaften ähnlich sind. Alle anderen Eistypen können bezüglich des 2. normierten Moments nicht voneinander unterschieden werden.

Da die Werte des 3. und 4. normierten Moments kaum von denen aus Abbildung 5.7 abweichen, werden diese in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt.

Als weitere Kenngröße der Verteilungsfunktionen von Radardaten ist das 3. zentrale Moment, die Schiefe, in Abbildung 5.8 wiedergegeben. Auch hierbei sind

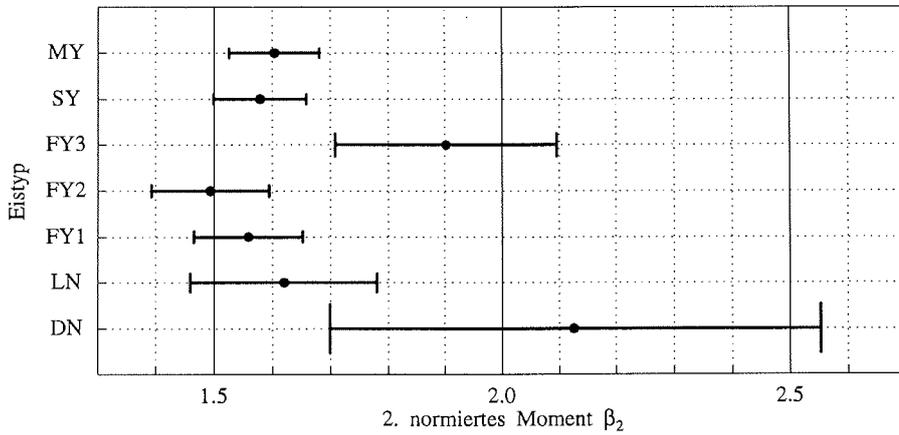


Abbildung 5.7: Mittelwerte und Standardabweichungen für das 2. normierte Moment β_2 . Berücksichtigt wurden Bildpunkte von Radarsegmenten mit einer Größe von über 700 Bildpunkten, die als wesentlicher Eistyp im Line-Scanner-Bild erkannt wurden.

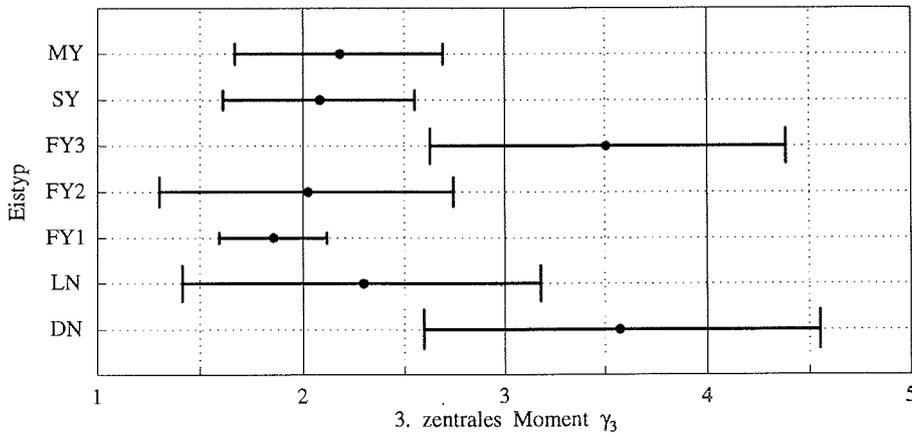


Abbildung 5.8: Mittelwerte und Standardabweichungen für das 3. zentrale Moment, die Schiefe γ_3 . Berücksichtigt wurden Bildpunkte von Radarsegmenten mit einer Größe von über 700 Bildpunkten, die als wesentlicher Eistyp im Line-Scanner-Bild erkannt wurden.

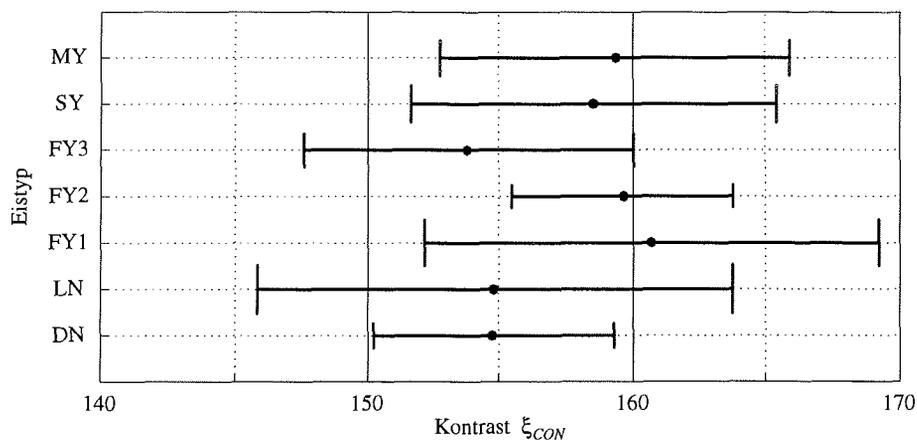


Abbildung 5.9: Mittelwerte und Standardabweichungen für den Kontrast ξ_{CON} . Berücksichtigt wurden Bildpunkte von Radarsegmenten mit einer Größe von über 700 Bildpunkten, die als wesentlicher Eistyp im Line-Scanner-Bild erkannt wurden.

DN und FY3 von den anderen Eistypen zu trennen. Sonst zeichnet sich nur FY1 durch die geringe Standardabweichung aus. Die Wölbung, das 4. zentrale Moment, wird hier nicht verwendet, da sie der Schiefe γ_3 gleicht.

Die Abbildungen 5.9 bis 5.11 zeigen die Mittelwerte und Standardabweichungen der Texturgrößen Kontrast ξ_{CON} , inverses Differenzmoment ξ_{IDM} und Entropie ξ_{ENT} . Beim Kontrast sind die Standardabweichungen wesentlich größer als die Unterschiede zwischen den Eistypen. Der Kontrast wird für die Klassifikation jedoch trotzdem wichtig sein, da sich der Mittelwert des LN vom FY1 und FY2 unterscheidet und diese Trennung mit den bisher genannten Größen nicht vorgenommen werden konnte. Das inverse Differenzmoment und die Entropie sind wichtig für die Trennung von FY1 und FY2. Diese kann aber wegen der großen Standardabweichungen von FY1 nur sehr unsicher durchgeführt werden. Die anderen Texturgrößen, Angular-Second-Moment ξ_{ASM} , Sum-Entropie ξ_{SENT} und Difference-Entropie ξ_{DENT} , die in Tabelle 5.1 auf Seite 149 angegeben sind, können die Unterscheidung der Eistypen nicht verbessern.

Bei der gemeinsamen Darstellung verschiedener Parameter im zweidimensionalen Merkmalsraum wird der Vorteil der kombinierten Anwendung der Parameter ersichtlich. Abbildung 5.12 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen von Abbildung 5.6 und 5.7 im Merkmalsraum, der vom mittleren Rückstreuoeffizienten σ^0 und dem 2. normierten Moment β_2 aufgespannt wird. Betrachtet man zum Beispiel die Möglichkeit der Unterscheidung von DN und LN in den eindimensionalen Darstellungen, so sind jeweils Überlappungsbereiche vorhanden. Im zwei-

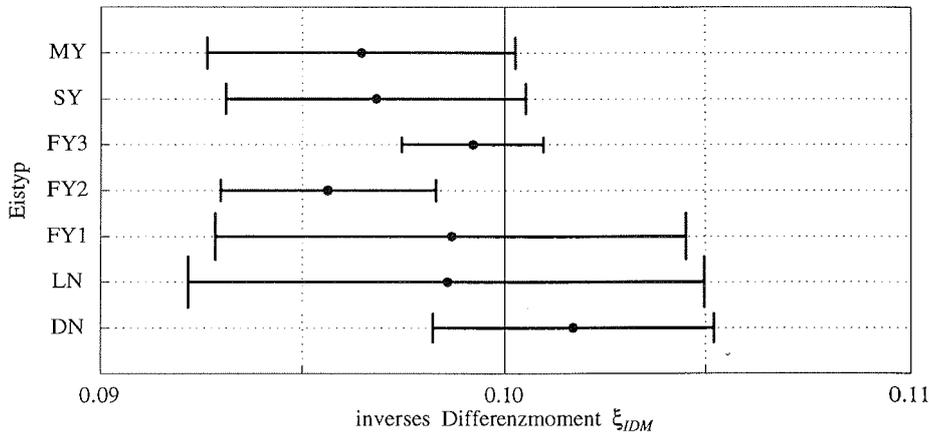


Abbildung 5.10: Mittelwerte und Standardabweichungen für das inverse Differenzmoment ξ_{IDM} . Berücksichtigt wurden Bildpunkte von Radarsegmenten mit einer Größe von über 700 Bildpunkten, die als wesentlicher Eistyp im Line-Scanner-Bild erkannt wurden.

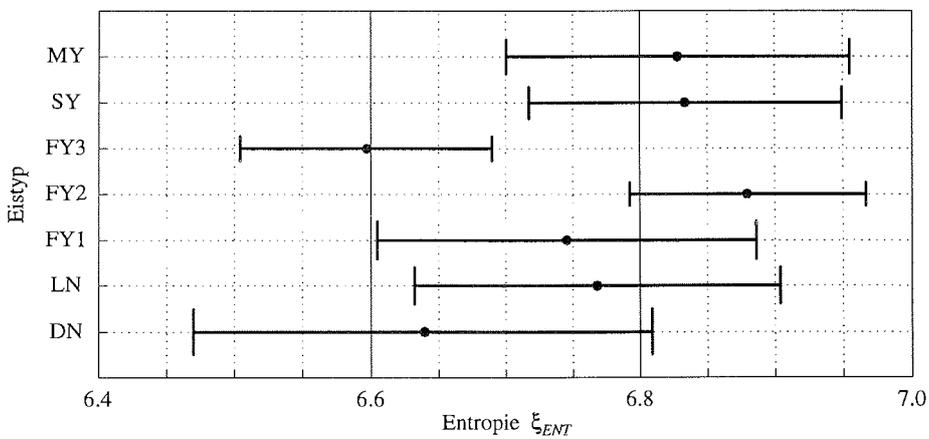


Abbildung 5.11: Mittelwerte und Standardabweichungen für die Entropie ξ_{ENT} . Berücksichtigt wurden Bildpunkte von Radarsegmenten mit einer Größe von über 700 Bildpunkten, die als wesentlicher Eistyp im Line-Scanner-Bild erkannt wurden.

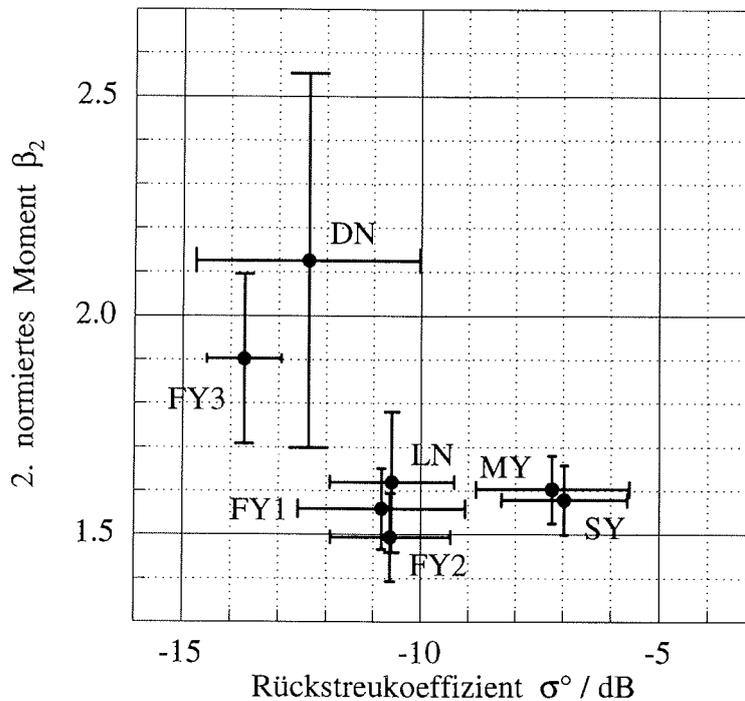


Abbildung 5.12: Zweidimensionaler Merkmalsraum mit Mittelwerten und Standardabweichungen des mittleren Rückstreukoeffizienten σ° und des 2. normierten Moments β_2 . Berücksichtigt wurden Bildpunkte von Radarsegmenten mit einer Größe von über 700 Bildpunkten, die als wesentlicher Eistyp im Line-Scanner-Bild erkannt wurden.

mensionalen Merkmalsraum können die Einzugsgebiete der Eistypen als Ellipsen gedacht werden, deren Achsen durch die Ausdehnung der Standardabweichungen gegeben sind. In Abbildung 5.12 ist zu erkennen, daß hiermit der Überlappungsbereich von DN und LN wesentlich kleiner geworden ist. Die Abstände zwischen den Eistypen prägen sich weiter aus, wenn zusätzliche Parameter mit einbezogen werden. Dieses ist jedoch grafisch nicht mehr darstellbar.

Abbildung 5.13 zeigt den Merkmalsraum aus Entropie ξ_{ENT} und inversem Differenzmoment ξ_{IDM} . MY und SY haben auch hier gleiche Eigenschaften. Die Sonderstellung von FY2 ist jedoch bemerkenswert. Bei Hinzunahme des mittleren Rückstreukoeffizienten aus Abbildung 5.6 als dritte Dimension würde FY2 dann auch von MY und SY getrennt werden können.

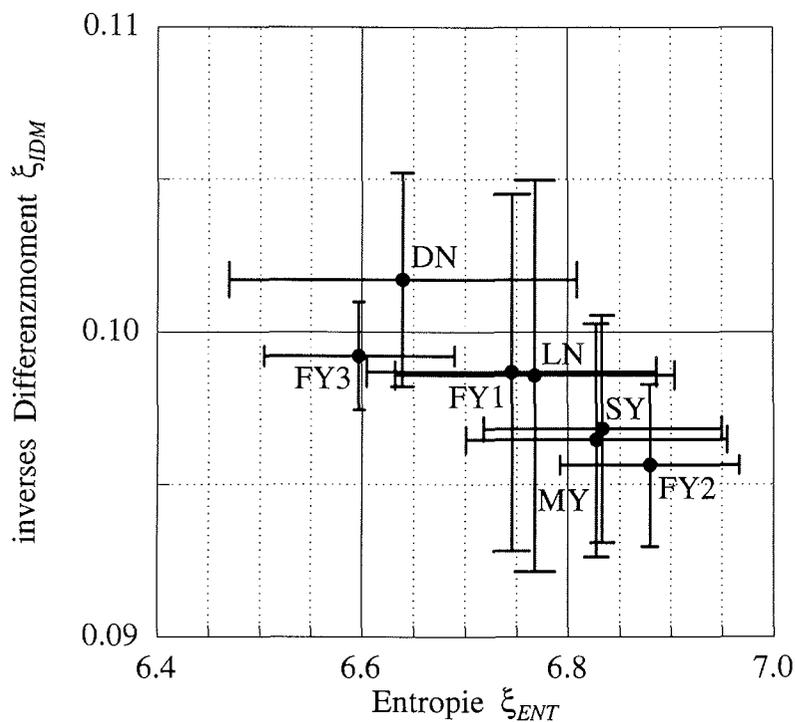


Abbildung 5.13: Zweidimensionaler Merkmalsraum mit Mittelwerten und Standardabweichungen der Entropie ξ_{ENT} und des inversen Differenzmoments ξ_{IDM} . Berücksichtigt wurden Bildpunkte von Radarsegmenten mit einer Größe von über 700 Bildpunkten, die als wesentlicher Eistyp im Line-Scanner-Bild erkannt wurden.

5.3 Klassifikation der Radardaten

Es mag vielleicht naheliegen, zu fragen, ob die Radardaten nicht nach einer ähnlichen Methode klassifiziert werden können, wie sie im Abschnitt 3 für die Line-Scanner-Daten vorgestellt wurde. Daß dies nicht möglich ist, liegt an den sehr unterschiedlichen Voraussetzungen. Mit der Auswertung der Line-Scanner-Daten stehen ja bereits Trainingsgebiete zur Verfügung, die als Referenz für die Klassifikation der Radardaten genutzt werden können. Ohne diese vorangegangene Klassifikation können für die Radardaten keine separaten Histogramme bezüglich der Eigenschaften verschiedener Eistypen erstellt werden, sondern man wäre, wie bei den Line-Scanner-Daten, darauf angewiesen, daß sich die Objektklassen im Merkmalsraum deutlich voneinander unterscheiden. In den Histogrammen der einzelnen Parameter der Radarbilder sind die Streuungen jedoch so groß, daß es kaum möglich ist, signifikante Bereiche zu trennen. Dies wird zum Beispiel

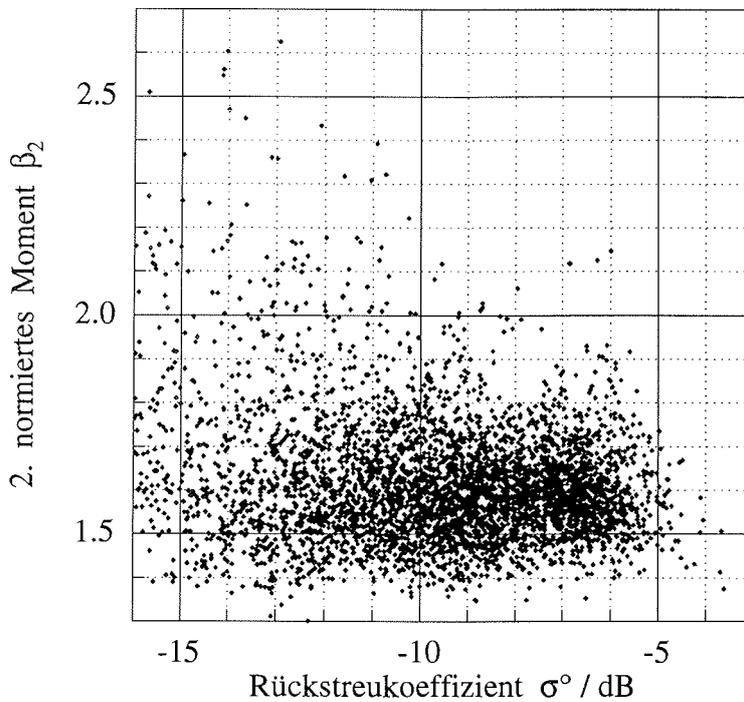


Abbildung 5.14: Zweidimensionaler Merkmalsraum mit der Lage der Segmente des Radarbildes unter Berücksichtigung des mittleren Rückstreuoeffizienten σ° und des 2. normierten Moments β_2 . Berücksichtigt wurden Radarsegmente mit einer Größe von über 700 Bildpunkten. Die Größe der Segmente wurden bei der Darstellung nicht angegeben.

durch die Histogramme aus Abbildung 5.3 verdeutlicht, in denen höchstens zwei Objektklassen voneinander unterschieden werden können. Die mit den Histogrammen in Abbildung 5.5 erkannte Objektklasse des FY3 würde wegen ihres geringen Bedeckungsgrades vernachlässigt werden. Dies liegt nicht daran, daß die Einträge für die entsprechenden Rückstreuoeffizienten im Histogramm nicht vorhanden sind, sondern an den allmählichen Übergängen zwischen den Objektklassen wegen großer Streuungen. Das heißt, in Abbildung 5.3 fehlen nicht die Einträge für FY3, sondern ausgeprägte Minima zwischen FY3 und den anderen Objektklassen.

Abbildung 5.14 zeigt, daß auch ein zweidimensionales Histogramm aus statistischen Parametern der Radardaten kein besseres Ergebnis in Aussicht stellt. In der Abbildung wurden im Merkmalsraum vom mittleren Rückstreuoeffizienten σ° und 2. normierten Moment β_2 alle Segmentmittelwerte ungeachtet der Größe

der Segmente eingetragen. Die einzige Einschränkung liegt wieder im Weglassen der Segmente unterhalb einer Größe von 700 Bildpunkten. Durch die gleichberechtigte Darstellung von kleineren und größeren Segmenten tragen die kleineren Segmente überproportional zur Abbildung bei. Es zeigt sich, daß die Trennung von FY3 und DN von den anderen Eistypen, die in Abbildung 5.12 deutlich ist, in Abbildung 5.14 nicht erkannt werden kann, obwohl die Eistypen FY3 und DN in den Beispieldaten hauptsächlich als kleinere Segmente auftreten. Im dargestellten zweidimensionalen Merkmalsraum können selbst mit gutem Willen nur zwei Objektklassen voneinander unterschieden werden.

Gewiß treten bei der Hinzunahme von weiteren Dimensionen zusätzliche Unterscheidungsmerkmale auf. Diese sind jedoch in ihrer Gesamtheit nicht grafisch darstellbar. Schon daher scheidet eine interaktive Klassifikation wie bei den Line-Scanner-Daten bei der Bearbeitung der Radardaten aus. Bei der Klassifikation, die im folgenden erläutert wird, können hingegen beliebig viele Merkmale gemeinsam ausgewertet werden.

Zur Klassifikation der Radardaten wird ausschließlich die Tabelle, die aus der Anwendung der Routine *vsarstat* mit den Daten des segmentierten Radarbildes und der klassifizierten Line-Scanner-Daten hervorgegangen ist, verwendet. Tabelle 5.1 auf Seite 149 gibt die Einträge wieder. Erst bei der Übertragung der Klassifikationsergebnisse in eine Karte, die Auskunft über die räumliche Verteilung der Eistypen gibt, wird zusätzlich das segmentierte Radarbild herangezogen.

Für die Klassifikation der Radardaten werden die beschriebenen Variationsmöglichkeiten bezüglich der eingeschränkten Nutzung der Segmente übernommen, da diese eine Verbesserung des Ergebnisses ermöglichen. Zur Klassifikation wurde ein spezieller Maximum-Likelihood-Classifier programmiert, der neben den Mittelwerten der Radareigenschaften für jeden Eistyp auch die Standardabweichung berücksichtigt. Bei der Klassifikation können beliebige Kombinationen der Radareigenschaften, die in Abschnitt 4.2 eingeführt wurden, verwendet werden. Die in Tabelle 5.1 zusätzlich aufgelisteten Textureigenschaften ξ_{ASM} (Angular-Second-Moment), ξ_{SENT} (Sum-Entropy) und ξ_{DENT} (Difference-Entropy), die im Abschnitt 4.2 nicht erklärt wurden, sind von HARALICK *et al.* [1973] und SKRIVER [1989a] beschrieben worden. Diese Parameter wurden mit der vorliegenden Arbeit nebenbei auf ihren potentiellen Nutzen für die Klassifikation von Radardaten untersucht. Ihr Einsatz konnte jedoch keine Verbesserung bewirken.

5.3.1 Feste Klassifikation

Unter fester Klassifikation wird verstanden, daß die für die Klassifikation relevanten statistischen Parameter der Radardaten fest vorgegeben und auch ungewichtet bewertet werden. Die Variation zur optimierten Klassifikation wird im nächsten Abschnitt behandelt.

Die Klassifikation der Radardaten wird mit der Routine *vsarclas* durchgeführt. Die Bearbeitung der Daten kann in drei Verarbeitungsschritte aufgeteilt werden. Nach der Bestimmung der statistischen Parameter der Radardaten für jeden Eistyp, wie sie schon im Abschnitt 5.2.2 behandelt wurde, wird die eigentliche Klassifikation durchgeführt. Hierauf folgend wird das Ergebnis der Klassifikation anhand der Klassifikation der Line-Scanner-Daten kontrolliert.

Neben dem Ergebnis der Klassifikation im Format von Daten entsprechend Tabelle 5.1 werden Informationen über die Güte des Ergebnisses und die Mittelwerte und Standardabweichungen der statistischen Parameter der Radardaten für jeden Eistyp in eine Textdatei geschrieben. Zusätzlich wird die jeweilige Anzahl der Bildpunkte im Radarbild, aus denen die Mittelwerte gebildet wurden, gespeichert.

Im Abschnitt 5.2 wurde festgestellt, daß die statistischen Parameter der Radardaten von unterschiedlichen Eistypen sich besser voneinander unterscheiden, wenn nur Segmente mit einer bestimmten Mindestgröße berücksichtigt werden. Diese Mindestgröße kann bei der Bestimmung der statistischen Parameter mit der Routine *vsarclas* angegeben werden. Des weiteren wurde unterschieden, ob die statistischen Parameter eines Radarsegments für alle enthaltenen Eistypen entsprechend ihres prozentualen Anteils bewertet werden sollen oder nur für den Eistyp mit dem hauptsächlichen Anteil. Diese Wahlmöglichkeit bleibt wegen ihrer besseren Ergebnisse aus Abschnitt 5.2 weiterhin bestehen.

Mit den entsprechenden Angaben werden nun diejenigen Segmente der Radardaten bearbeitet, für die auch eine Abdeckung durch Line-Scanner-Daten vorliegt. Es wurden zum Beispiel im Ausschnitt von Abbildung 5.1 auf Seite 145 der dargestellte Bereich sowohl vom SAR als auch von den Line-Scannern erfaßt. Wie in Abbildung 5.16 noch gezeigt wird, ist der Bereich 1 als homogener Bereich und somit als ein Segment erkannt worden. Derselbe Bereich wurde im Line-Scanner-Bild als dickes erstjähriges Eis klassifiziert. Die statistischen Parameter des speziellen Radarsegments, wie mittlerer Rückstreuoeffizient, Momente und Texturgrößen, sind also bezeichnend für dickes erstjähriges Eis. Da ein einzelnes Segment nicht repräsentativ für die gesamte SAR-Szene ist, werden alle statistischen Parameter der Radarsegmente, die zu einem Eistyp gehören, zusammengefaßt. In Abbildung 5.1 wurde so zum Beispiel auch neben vielen anderen der Bereich 3 als dickes erstjähriges Eis interpretiert und dem Bereich 1 zugeordnet. Bei der Bestimmung der Mittelwerte wurde eine Gewichtung anhand der Segmentgrößen vorgenommen und neben dem Mittelwert die Standardabweichung berechnet. Mit diesen beiden Größen für jeden Eistyp und den statistischen Parametern der Radardaten wird die Klassifikation durchgeführt.

Es wurde ein spezieller Maximum-Likelihood-Classifer programmiert, der neben den Clusterzentren, die aus den Mittelwerten gebildet wurden, die Standardabweichung berücksichtigt. Je nach Anzahl der ausgewählten zu berücksichtigenden

statistischen Parameter der Radardaten wird ein mehrdimensionaler Merkmalsraum geschaffen. Mit dem in Abschnitt 4.2 behandelten Mittelwert, den Momenten und Texturgrößen hat der Merkmalsraum sechs Dimensionen und kann mit den Parametern aus Tabelle 5.1 bis zur zwölften Dimension anwachsen.

Für jedes Segment der Radardaten wird nun mit Hilfe der Parameter, aus denen der Merkmalsraum besteht, ein Vektor gebildet. Das Segment wird dem Eistyp zugeordnet, zu dem der Vektor die geringste EUKLIDische Distanz hat. Die Komponenten der einzelnen Parameter dieser Distanz werden jeweils durch die Standardabweichung des zu einem Eistyp gehörenden Parameter dividiert. Diese Normierung erweitert den Minimum-Distance-Classifer zum Maximum-Likelihood-Classifer.

Nach der durchgeführten Klassifikation wird deren Güte anhand der klassifizierten Line-Scanner-Daten bewertet. Im Beispiel von Abbildung 5.1 wurde der Bereich 4 zusammen mit dem Bereich 2 anhand der Line-Scanner-Daten als mitteldickes erstjähriges Eis klassifiziert. Im Radarbild ist der Bereich 4 jedoch gut vom Bereich 2 zu unterscheiden und bildet nach Abbildung 5.16 auch ein eigenes Segment. Sein Rückstreukoeffizient zum Beispiel ist wesentlich kleiner als der vom Bereich 2. Da der Bereich 4 aber nur einen geringen Teil des Gebiets mit mitteldickem erstjährigem Eis ausmacht, wird dieser die Statistik nicht wesentlich beeinflussen. Im Radarbild ähnelt der Bereich 4 eher den Bereichen 1 und 3, die im Line-Scanner-Bild als dickes erstjähriges Eis klassifiziert wurden. Die Bereiche 1 und 3 wurden im Radarbild auch richtig klassifiziert. Im Radarbild wird jedoch fälschlicherweise auch der Bereich 4 als dickes erstjähriges Eis interpretiert. Bei der abschließenden Kontrolle mit den klassifizierten Line-Scanner-Daten wird hier also eine Fehlinterpretation erkannt, da im Line-Scanner-Bild mitteldickes erstjähriges Eis erkannt wurde. Neben den klassifizierten Radardaten und den statistischen Parametern für die Eistypen enthält das Ergebnis der Routine *vsarclas* eine Tabelle, die für alle im Line-Scanner-Bild klassifizierten Eistypen angibt, welcher Anteil der Eistypen mit den Abgaben für das Radarbild übereinstimmen, also richtig klassifiziert wurde.

Bei der Erstellung dieser Fehlerstatistik kann entschieden werden, ob alle Bildpunkte einzeln oder jeweils die zusammengefaßten Segmente des Radarbildes untersucht werden sollen. Bei der Bearbeitung der einzelnen Segmente wird der Eistyp mit dem wesentlichen Anteil verglichen, so daß Fehlklassifikationen, die durch falsche räumliche Zuordnung der Bilddaten an Bereichsübergängen entstehen, unberücksichtigt bleiben.

5.3.2 Optimierte Klassifikation

Bei den Auswertungsarbeiten wurde deutlich, daß die Einbeziehung einiger statistischer Parameter der Radardaten keine Verbesserung des Klassifikationsergeb-

nisses bewirken. Bei einem Beispiel wurde das Ergebnis sogar verschlechtert, nachdem die Klassifikation bei Hinzunahme des 3. normierten Moments β_3 neben dem 2. normierten Moment β_2 durchgeführt wurde. Diese Beobachtung führt dazu, die Skalierung, mit der die einzelnen statistischen Parameter der Radardaten bei der Klassifikation berücksichtigt werden, zu variieren und über gezielte Variation zu optimieren.

Bei herkömmlichen Klassifikatoren aus der digitalen Bildsignalverarbeitung werden mehrbandige Bilddaten verarbeitet, deren Bänder auf einen gemeinsamen Nenner normiert sind. Diese Normierung bereitet beim vorliegenden Datensatz Schwierigkeiten, da sehr unterschiedliche Größen in die Klassifikation einbezogen werden und die Wertebereiche dieser Kenngrößen für unterschiedliche Radarszenen variieren werden. Die Größe dieser Variation ist in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht worden. Diesem Problem wurde dadurch Rechnung getragen, daß neben der Normierung der einzelnen Clusterzentren durch ihre Standardabweichung die einzelnen Dimensionen des Merkmalsraumes unterschiedlich skaliert werden. Die Skalierung bedeutet keine Gewichtung der Merkmale, mit der sie bei der Klassifikation berücksichtigt werden, sie paßt nur die Wertebereiche optimal einander an.

Jeder bei der Klassifikation beteiligte statistische Parameter kann eine Skalierung zwischen 0 und 1 erhalten. Diese Skalierung wird bei der Berechnung der EUKLIDischen Distanz zwischen dem Merkmalsvektor der Radarsektoren und der Cluster der Eistypen für jedes Merkmal angewendet. In einem Optimierungsverfahren wird in der Routine *vsarclas* die beste Konstellation der Skalierung ermittelt und hiermit die Klassifikation der Radardaten vorgenommen. Als Maß für die Güte der Klassifikation wird der Mittelwert der Anteile berechnet, die bei den Radardaten als richtige Eistypen entsprechend der Line-Scanner-Daten erkannt wurden.

Unabhängig davon, ob die Klassifikation fest oder optimiert durchgeführt wurde, kann das Ergebnis der Klassifikation mit Hilfe des segmentierten Radarbildes in eine Karte überführt werden, in der die Eistypen entsprechend der Segmente räumlich dargestellt sind. Hierfür wurde die Routine *vsarlabel* erstellt.

5.4 Klassifikationsvergleich zwischen Line-Scanner und Radar

Die Beurteilung der Interpretation der Radardaten wird anhand der Fehlerstatistik durchgeführt, die bei der Anwendung der Routine *vsarclas* neben der Klassifikation erstellt wird. Um diese besser deuten zu können, werden zuvor die möglichen Fehlerquellen zusammengefaßt, um eine Fehlinterpretation der Statistiken zu vermeiden. In den Statistiken selbst können die Beiträge verschiedener Fehler teilweise nicht voneinander unterschieden werden. Andere Fehler hingegen

haben keinen Einfluß auf die Statistik.

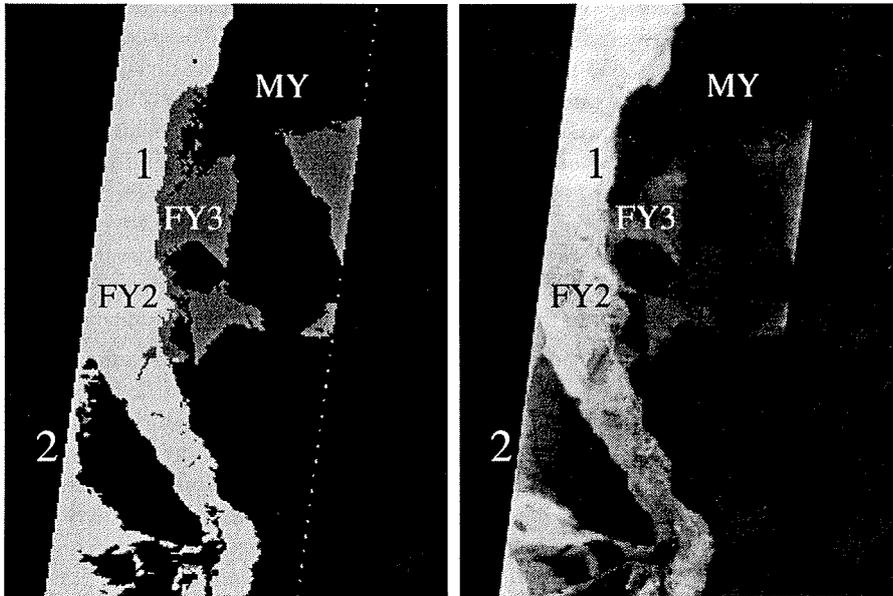


Abbildung 5.15: Ausschnitt aus dem Szenario vom 12. März 1993 entsprechend Abbildung 5.1. Auf der rechten Seite ist das Temperaturbild vom Infrarot-Line-Scanner dargestellt. Das linke Bild enthält das Ergebnis der Klassifikation aus beiden Line-Scannern. Im Bereich 1 liegt eine Fehlklassifikation vor.

5.4.1 Verfahren

Die Line-Scanner-Daten, die mit den Methoden aus Kapitel 2 korrigiert und mit denen aus Kapitel 3 klassifiziert wurden, können Fehlinterpretationen enthalten. Durch unvollständige Korrekturen können beide Spektralbereiche für Gebiete mit gleichen Eistypen unterschiedliche Intensitäten zeigen oder es kann die Unterscheidung von verschiedenen Eistypen wegen fehlender Intensitätsunterschiede unmöglich sein. Da speziell für die Korrektur von meßbedingten Intensitätsvariationen in den Line-Scanner-Daten Verfahren entwickelt wurden, die gute Ergebnisse liefern, wird diese Fehlerquelle geringe Bedeutung haben. Trotzdem bereiten nicht vollständig korrigierte Fehler Schwierigkeiten bei der Segmentierung der Line-Scanner-Daten, wenn die Cluster der signifikanten Eistypen im Merkmalsraum nicht deutlich voneinander getrennt werden können. Die Auswirkung eines solchen Fehlers ist in Abbildung 5.15 zu erkennen, in der auf der

rechten Seite ein Bild des Infrared-Line-Scanners und links die klassifzierten Daten aus beiden Line-Scannern dargestellt sind. Im gezeigten Bereich konnten drei Eistypen voneinander unterschieden werden. Neben dem schwarzen Hintergrund ist das mehrjährige Eis (MY) dunkelgrau, dickes erstjähriges Eis (FY3) mittelgrau und mitteldickes erstjähriges Eis (FY2) hellgrau dargestellt. Im Bereich 1 ist zu erkennen, daß ein Teil des mehrjährigen Eises als dickes erstjähriges Eis klassifiziert wurde. Im Temperaturbild kann eindeutig die Zugehörigkeit zur größeren Scholle erkannt werden. Auch das Radarbild aus Abbildung 5.1 zeigt dieses. Würde nun die Klassifikation mit Clustern durchgeführt werden, die diesen Bereich als mehrjähriges Eis klassifizieren, so würden andere Bereiche einer Fehlklassifikation unterliegen. Im Beispiel von Abbildung 5.15 würde der Bildrand im Bereich 2 fälschlich als mehrjähriges Eis interpretiert werden. Im Temperaturbild kann diese Bereichsgrenze zwar nicht eindeutig erkannt werden, das Radarbild von Abbildung 5.1 bestätigt jedoch diese Schollenkante.

Neben der Segmentierung enthält auch die Klassifikation der Line-Scanner-Daten Fehlermöglichkeiten. Bei der Segmentierung der Bilddaten mit Hilfe des zweidimensionalen Histogramms (Kapitel 3) erhält man eine Unterteilung in Gebiete mit gleichem Charakter. Es wurde dargestellt, daß die Klassifikation dieser Gebiete nicht anhand absoluter Größen der beiden Spektralbereiche der Line-Scanner durchgeführt wird. Dies ist nicht möglich, da im Fall des sichtbaren Spektralbereichs nur die relative Verteilung des reflektierten Sonnenlichts und nicht die Reflektivität der Eisoberfläche gemessen wird. Man kann den Eistypen ohnehin keine absolute Reflektivität zuordnen, da diese im wesentlichen durch aufliegenden Schnee und dessen Alter bestimmt wird.

Mit dem Infrared-Line-Scanner werden zwar absolute Temperaturen gemessen, jedoch hängt die Oberflächentemperatur stark von der Schneeeauflage ab und daneben auch von der Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung. Es ist also auch hier nur eine relative Unterscheidung der Eisdicken möglich.

Nach der Segmentierung der Line-Scanner-Daten wird die Klassifikation der Objektbereiche subjektiv durchgeführt. Die Güte hängt auch von der Güte der Beobachtungen während des Meßfluges ab, nach denen man sich bei der Klassifikation richten kann. Jedoch helfen auch die Bilddaten der Line-Scanner selbst bei der Klassifikation, da einzelne Bereiche der Objektklassen anhand ihrer Form und Struktur von erfahrenen Eisbeobachtern erkannt werden können. Fehlklassifikationen haben keinen Einfluß auf die Rangfolge, da älteres Eis dicker und somit an der Oberfläche im allgemeinen auch kälter ist. Bei jüngerem Eis wird neben dem eindeutigen Temperaturverlauf das Erscheinungsbild mit zunehmender Dicke auch eindeutig heller. Für die vorliegende Untersuchung ist es vor allem wichtig, daß gleiche Eisgebiete zu einen Eistyp zusammengefaßt werden, während die Klassifikation zum richtigen Eistyp zweitrangig ist, da es zuerst zu untersuchen gilt, ob im Radarbild die Eistypen ein einheitliches Erscheinungsbild

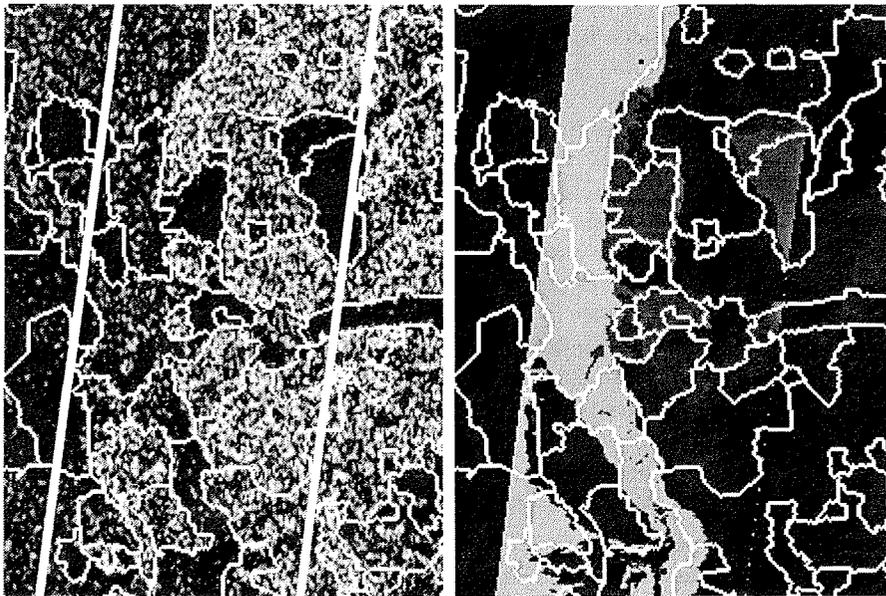


Abbildung 5.16: Ausschnitt entsprechend Abbildung 5.1 und 5.15. Auf der linken Seite sind die Radarsegmentgrenzen dem Bild der Rückstreuintensitäten des Radars überlagert (Orbit: 8657; Frame: 1935; ©ESA). Rechts kann anhand der Zusammenführung dieser Segmentgrenzen und dem klassifizierten Line-Scanner-Bild die räumliche Zuordnung beurteilt werden.

haben. Hierfür ist die Identifizierung der Eistypen nicht notwendig; sie müssen nur voneinander getrennt werden.

Die Klassifikation kann durch die Zuhilfenahme von Feldmessungen sicherer durchgeführt werden. Diese Möglichkeit wurde auf der Expedition ARK IX/2 [HIRCHE und KATTNER, 1994] im Sommer 1993 ausgiebig genutzt, indem alle Messungen, die mit den Line-Scannern durchgeführt wurden, auch von Arbeiten auf dem Eis, die Dickenmessungen und Strukturuntersuchungen beinhalten, begleitet wurden. Für die Flugzeugexpedition REFLEX II [KOTTMEIER *et al.*, 1993], die Anfang 1993 im Winter durchgeführt wurde, liegen nur Feldmessungen in der Umgebung des Forschungsschiffes POLARSTERN vor, das sich zeitweise im Untersuchungsgebiet befand. Auf diese Untersuchungen konnte bei der Interpretation des hier vorgestellten Beispiels zurückgegriffen werden, da der Meßflug das Einsatzgebiet von POLARSTERN passierte.

Vor der gemeinsamen Auswertung der Line-Scanner-Daten und der Satellitendaten werden auch die Radarbilder segmentiert. Im Abschnitt 4.3 wurden mehrere Parameter vorgestellt, die bei der Segmentierung variiert werden können. Mit

der visuellen Beurteilung der Zwischen- und Endergebnisse wird die Segmentierung optimiert. Die Segmentierung des Beispielausschnittes ist in Abbildung 5.16 wiedergegeben. Auf der linken Seite sind die Segmentgrenzen dem Bild der Rückstreuintensitäten des Radars überlagert. Interpretationsfehler sind daran zu erkennen, daß Segmente mehrere Eistypen enthalten, also der Algorithmus bei der Segmentierung Bereichsübergänge erkannt hat. Die Parameter sollten so eingestellt werden, daß, wie beim Ergebnis von Abbildung 5.16, möglichst keine Mischsegmente auftreten. Die Klassifikation von kleinen Bereichen wird in jedem Fall unsicherer sein als die von größeren, da bei großen Segmenten neben dem Speckle-Rauschen auch Variationen im Erscheinungsbild der Eisflächen durch Mittelwertbildung ausgeglichen und Texturen besser erkannt werden. Die Unterteilung von sehr großen homogenen Bereichen in mehrere mittelgroße Segmente hat jedoch keinen Einfluß, da die Segmente bei der Klassifikation wieder zusammengefaßt werden. Die Auswirkung für die Variation von Parametern bei der Segmentierung der Radardaten wird durch den Vergleich von Abbildung 5.16 und Abbildung 4.7 auf Seite 139, in der unten rechts fast derselbe Ausschnitt dargestellt ist, deutlich. Die Segmentgrenzen sind zwar teilweise anders gewählt, sie enthalten jedoch kein widersprüchliches Ergebnis.

Die rechte Seite von Abbildung 5.16 zeigt nun die Segmentgrenzen des Radarbildes, überlagert von den klassifizierten Line-Scanner-Daten. Bei einer perfekten räumlichen Zuordnung zwischen Line-Scanner-Daten und Radardaten sowie gleicher Trennung der Bereiche müßten die Segmentgrenzen des Radarbildes mit den Grenzen zwischen den Eistypen im Line-Scanner-Bild zusammenfallen. Zusätzliche Segmentgrenzen sind wegen der oben genannten Gründe von geringer Bedeutung. Im gezeigten Beispiel sind für fast sämtliche Bereichsgrenzen der Line-Scanner-Daten auch Segmentgrenzen vorhanden, wenn diese auch nicht genau deckungsgleich sind. Nur im Bereich 1 von Abbildung 5.15 fehlt eine Segmentgrenze im Radarbild. Als Grund wurde auch schon die fehlerhafte Segmentierung der Line-Scanner-Daten gefunden. Im Modus der Klassifikation der Radardaten mit der Routine *vsarclas*, in dem der wesentliche Anteil der Eisklasse im Line-Scanner-Bild für ein gesamtes Radarsegment gilt, wird jedoch auch dieses Segment richtig als mehrjähriges Eis interpretiert.

Die Verschiebung zwischen den Segmentgrenzen des Radarbildes und den Klassifikationsgrenzen des Line-Scanner-Bildes liegt in der zeitlichen Differenz zwischen den beiden Aufnahmen begründet. Auch hierbei kompensiert die Interpretation der Radarsegmente als denjenigen Eistyp, der den wesentlichen Anteil im Line-Scanner-Bild ausmacht, diese Verschiebung fast vollständig. Schwierigkeiten treten erst auf, wenn die Fehler in der Größenordnung der Segmentgrößen liegen, wie es speziell in Rissen bei Nilas oder offenem Wasser vorkommen kann.

Im Beispielausschnitt lieferte die Analyse mit der Routine *vsarclas* folgende mittlere Rückstreuoeffizienten und Standardabweichungen für mitteldickes und dickes

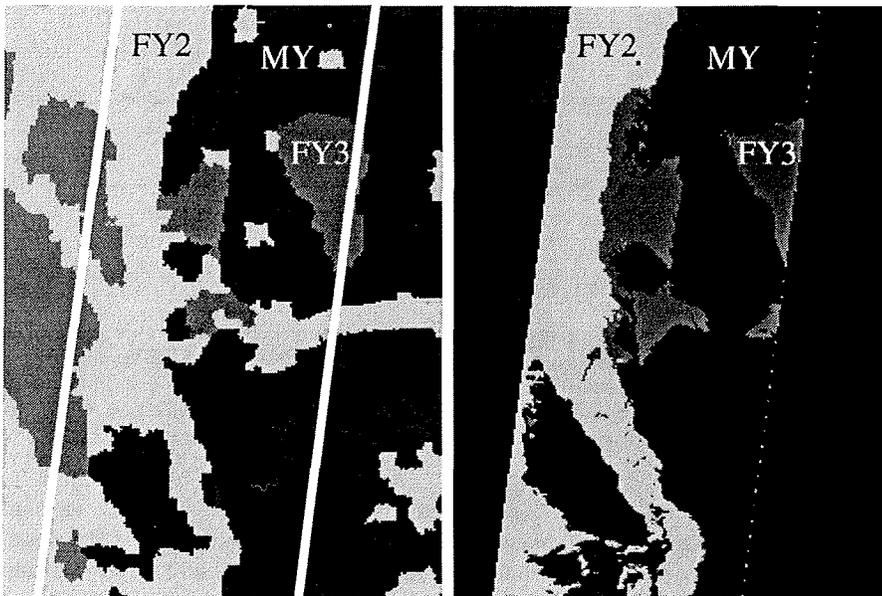


Abbildung 5.17: Klassifiziertes Radar- und Line-Scanner-Bild. Das Radarbild (links) wurde nur anhand der mittleren Rückstreuoeffizienten σ° klassifiziert und liefert schon gute Übereinstimmung mit den Line-Scanner-Daten.

erstjähriges Eis und mehrjähriges Eis:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{FY2}^{\circ} &= -10,4 \text{ dB} \pm 1,3 \text{ dB} \\
 \sigma_{FY3}^{\circ} &= -13,3 \text{ dB} \pm 1,7 \text{ dB} \\
 \sigma_{MY}^{\circ} &= -6,3 \text{ dB} \pm 1,1 \text{ dB}
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

Eine allein mit diesen Größen durchgeführte Klassifikation ist in Abbildung 5.17 im Vergleich zum klassifizierten Line-Scanner-Bild wiedergegeben. Die alleinige Nutzung der mittleren Rückstreuoeffizienten liefert schon ein optisch recht gutes Ergebnis, das jedoch durch Tabelle 5.2 noch nicht bestätigt wird.

Die Angaben in der Tabelle werden von der Routine *vsarclas* zur Abschätzung der Güte der Klassifikation berechnet. Tabelle 5.2 enthält in der obersten Zeile die prozentualen Anteile der vorhandenen Eistypen, wie sie aus dem Line-Scanner-Bild klassifiziert wurden. Die linke Spalte enthält die gleichen Angaben für die klassifizierten Radardaten im Bildbereich der Line-Scanner. Beim Vergleich dieser Angaben ist zu erkennen, daß im Radarbild 36,9% als mitteldickes erstjähriges Eis (FY2) klassifiziert wurde, wobei im Line-Scanner-Bild nur 31,3% vorgegeben

			Line-Scanner-Klassen in %		
			FY2	FY3	MY
			31,3	13,2	55,5
Radar- klassen in %	FY2	36,9	78,5	24,6	16,4
	FY3	13,1	11,4	55,5	4,0
	MY	50,0	10,1	19,9	79,6

mittlere Übereinstimmung: 71,2%

Tabelle 5.2: Prozentuale Anteile der Eistypen im Radar- und Line-Scanner-Bild von Abbildung 5.17. Zusätzlich ist angegeben, welche Anteile der Objektklassen des Line-Scanner-Bildes mit den Objektklassen des Radarbildes zusammenfallen. Die mittlere Übereinstimmung wird als Mittelwert der Angaben aus der Hauptdiagonalen berechnet. Die Klassifikation wurde nur mit Hilfe der mittleren Rückstreuoeffizienten σ° durchgeführt.

waren. Die Anteile vom dicken erstjähriges Eis (FY3) stimmen sehr gut überein, jedoch wird im Radarbild zu wenig mehrjähriges Eis (MY) erkannt. Die unteren drei Einträge der zweiten Spalte geben an, daß die Gebiete des FY2 vom Line-Scanner-Bild im Radarbild zu 78,5% richtig als FY2, zu 11,4% als FY3 und zu 10,1% als MY klassifiziert wurden. Entsprechende Angaben enthalten die restlichen Einträge für FY3 und MY der Line-Scanner-Daten. In dieser Tabelle enthalten die Hauptdiagonalelemente Angaben über die richtige Zuordnung. Ihr Mittelwert gibt als mittlere Übereinstimmung eine Aussage über die Güte der Klassifikation an. Tabelle 5.2 entstand auf Basis von Bildpunktvergleichen der beiden Bilder aus Abbildung 5.17. Die schlechten Ergebnisse der richtigen Zuordnung sind im wesentlichen auf die fehlerhafte Übereinstimmung der Segmentgrenzen des Radarbildes mit den Line-Scanner-Daten zurückzuführen, auf die mit Abbildung 5.16 hingewiesen wurde. Ein Vergleich der Anteile der drei Eistypen aus der Gesamteisbedeckung bleibt jedoch auch bei einer leichten Verschiebung und somit einer schlechten räumlichen Übereinstimmung gültig.

Das Problem der räumlichen Zuordnung zwischen Line-Scanner- und Radardaten und die damit verbundenen Schwierigkeiten wurden dadurch gelöst, daß nur die wesentlichen Anteile der Line-Scanner-Klassen in den Radarsegmenten zur Interpretation herangezogen wurden. Genauso wird nun auch bei der Kontrolle der Klassifikation vorgegangen. Statt des Vergleichs von einzelnen Bildpunkten werden Segmente im Radarbild untersucht. In die Fehlerstatistik gehen dann nur die Gebiete ein, die den wesentlichen Anteil der Line-Scanner-Klassen im Radarsegment ausmachen. Dieses Verfahren führt zu Tabelle 5.3.

Man beachte, daß die Angaben der Bedeckung mit unterschiedlichen Eistypen in beiden Bilddaten nicht mehr denen aus Tabelle 5.2 entsprechen, da nur noch

		Line-Scanner-Klassen in %			
		FY2	FY3	MY	
		33,6	9,6	56,8	
Radar- klassen in %	FY2	34,9	85,0	6,3	10,1
	FY3	12,6	12,4	87,8	0,0
	MY	52,5	2,6	5,9	89,9

mittlere Übereinstimmung: 87,6%

Tabelle 5.3: Prozentuale Anteile der Eistypen im Radar- und Line-Scanner-Bild von Abbildung 5.17, wobei nur ausgewählte Gebiete berücksichtigt wurden (siehe Text). Die Klassifikation wurde nur mit Hilfe des mittleren Rückstreuoeffizienten durchgeführt.

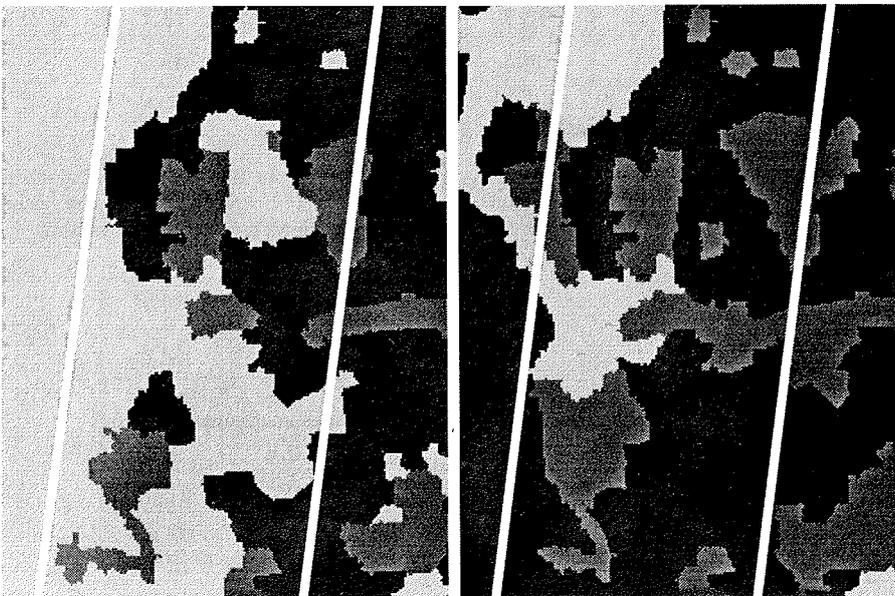


Abbildung 5.18: Klassifizierte Radarbilder von demselben Gebiet wie in Abbildung 5.17. Das linke Bild wurde ausschließlich unter Verwendung des 2. normierten Moments β_2 klassifiziert. Im rechten Bild lagen nur die Werte des inversen Differenzmoments ξ_{IDM} vor.

ausgewählte Gebiete berücksichtigt werden. Durch gemeinsame Betrachtung von Abbildung 5.16 und 5.17 können die Segmente mit Fehlinterpretationen gefunden werden. Es handelt sich im wesentlichen um kleine Gebiete. Die mittlere Übereinstimmung wächst so bereits auf 87,6% an.

Bevor nun die Ergebnisse der Klassifikation durch eine Kombination von verschiedenen statistischen Parametern der Radardaten gezeigt werden, wird anhand des 2. normierten Moments β_2 und des inversen Differenzmoments ξ_{IDM} der Textur das Potential der Verwendung dieser Größen dargestellt. Abbildung 5.18 zeigt auf der linken Seite das anhand von β_2 klassifizierte Radarbild. Die rechte Seite enthält dagegen die Klassifikation, die unter Verwendung der Texturgröße ξ_{IDM} durchgeführt wurde. Die Fehlerstatistiken sind in den Tabellen 5.4 und 5.5 dargestellt.

		Line-Scanner-Klassen in %			
		FY2		FY3	
		FY2	FY3	MY	
		33,6	9,6	56,8	
Radar- klassen in %	FY2	47,8	74,2	0,0	40,4
	FY3	15,7	4,6	87,4	10,1
	MY	36,5	21,2	12,6	49,5

mittlere Übereinstimmung: 70,4%

Tabelle 5.4: Prozentuale Anteile der Eistypen im Line-Scanner-Bild und dem Radarbild von Abbildung 5.18 (linke Seite), wobei nur ausgewählte Gebiete berücksichtigt wurden (siehe Text). Die Klassifikation wurde nur mit Hilfe des 2. normierten Moments β_2 durchgeführt.

		Line-Scanner-Klassen in %			
		FY2		FY3	
		FY2	FY3	MY	
		33,6	9,6	56,8	
Radar- klassen in %	FY2	13,8	41,3	0,0	0,0
	FY3	26,7	14,8	100,0	21,36
	MY	59,4	43,9	0,0	78,64

mittlere Übereinstimmung: 73,3%

Tabelle 5.5: Prozentuale Anteile der Eistypen im Line-Scanner-Bild und dem Radarbild von Abbildung 5.18 (rechte Seite), wobei nur ausgewählte Gebiete berücksichtigt wurden (siehe Text). Die Klassifikation wurde nur mit Hilfe des inversen Differenzmoments ξ_{IDM} durchgeführt.

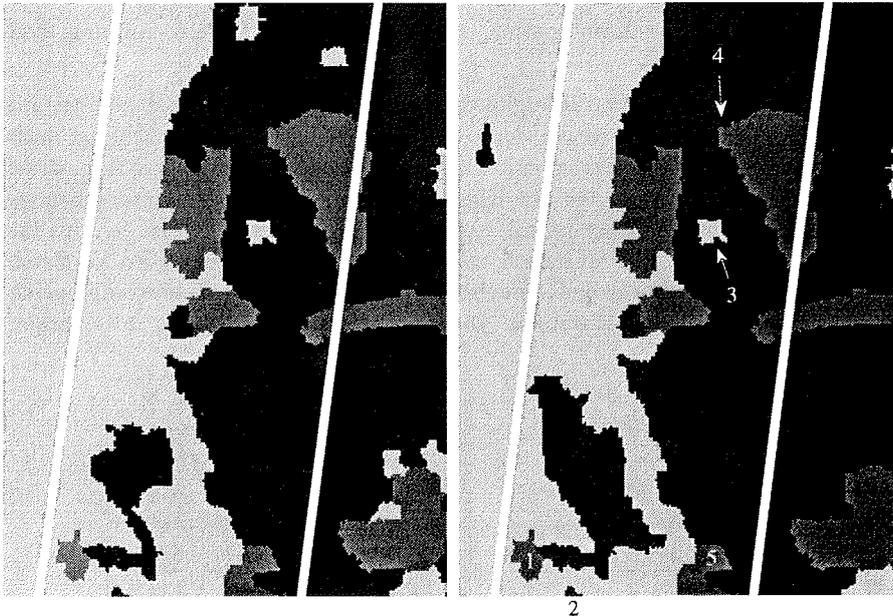


Abbildung 5.19: Klassifizierte Radarbilder von demselben Gebiet wie in Abbildung 5.17. Das linke Bild wurde mit dem kombinierten Einsatz des mittleren Rückstreuoeffizienten σ° und dem 2. normierten Moment β_2 klassifiziert. Das rechte Bild zeigt das beste Klassifikationsergebnis mit einer mittleren Übereinstimmung von 97,4%. Seine Fehlerstatistik ist in Tabelle 5.6 dargestellt.

In beiden Tabellen ist die große Abweichung der Eistypenverteilung im Radarbild von der im Line-Scanner-Bild auffallend. Die relativ hohen mittleren Übereinstimmungen von 70,4% bei β_2 und sogar 73,3% bei ξ_{IDM} zeigen, daß diese Größen trotzdem als zusätzliche Kriterien bei der Klassifikation der Radardaten erfolgversprechend sind. Bei alleiniger Nutzung eines einzelnen statistischen Parameters brachte der mittlere Rückstreuoeffizient σ° mit einer mittleren Übereinstimmung von 87,6% das beste Ergebnis. Die normierten Momente ergaben für β_2 : 70,4%; β_3 : 74,9% und β_4 : 56,1%; die zentralen Momente für γ_3 : 61,1% und γ_4 : 70,6%. Bei den Texturmaßen lagen neben dem inversen Differenzmoment ξ_{IDM} mit 73,3% und dem Kontrast ξ_{CON} mit 50,7% nur schlechte Übereinstimmungen vor.

Bei der gleichzeitigen Verwendung mehrerer statistischer Parameter wird die im vorigen Abschnitt erklärte optimierte Klassifikation angewendet. Als Kriterium zur Optimierung wird die mittlere Übereinstimmung herangezogen. Das beste Ergebnis, welches mit der Kombination von zwei Parametern, nämlich dem mittleren Rückstreuoeffizienten σ° und dem 2. normierten Moment β_2 , erzielt wurde, ist in Abbildung 5.19 auf der linken Seite und als Fehlerstatistik in Tabelle 5.6

dargestellt. Mit dieser Kombination wird eine mittlere Übereinstimmung von 94,8% erreicht.

Die Kombination von β_2 und β_3 ergibt dagegen mit 74,9% keine Verbesserung im Vergleich zur alleinigen Nutzung von β_3 . Diese beiden Größen korrelieren nach SKRIVER [1989a] auch sehr stark miteinander. Es macht daher keinen Sinn, diese beiden Größen gemeinsam bei der Klassifikation einzusetzen. Entsprechendes gilt für die Kombination der normierten zentralen Momente γ_3 und γ_4 und für die Texturgröße ξ_{CON} in Verbindung mit ξ_{IDM} . Eine Verbesserung im Vergleich zu den jeweiligen Einzelwerten konnte beim Einsatz der Schiefe γ_3 in Kombination mit ξ_{CON} oder ξ_{IDM} erzielt werden. Diese Größen sind nicht stark miteinander korreliert.

		Line-Scanner-Klassen in %			
		FY2	FY3	MY	
		33,6	9,6	56,8	
Radar- klassen in %	FY2	36,9	95,3	0,0	8,7
	FY3	12,4	4,6	100,0	2,2
	MY	50,7	0,1	0,0	89,1

mittlere Übereinstimmung: 94,7%

Tabelle 5.6: Prozentuale Anteile der Eistypen im Line-Scanner-Bild und dem Radarbild von Abbildung 5.19 (linke Seite), wobei nur ausgewählte Gebiete berücksichtigt wurden (siehe Text). Die Klassifikation wurde mit Hilfe des mittleren Rückstreukoeffizienten σ^0 und des 2. normierten Moments β_2 durchgeführt.

		Line-Scanner-Klassen in %			
		FY2	FY3	MY	
		33,6	9,6	56,8	
Radar- klassen in %	FY2	32,4	95,3	0,0	0,7
	FY3	12,4	4,6	100,0	2,2
	MY	55,2	0,1	0,0	97,1

mittlere Übereinstimmung: 97,4%

Tabelle 5.7: Prozentuale Anteile der Eistypen im Line-Scanner-Bild und dem Radarbild von Abbildung 5.19 (rechte Seite), wobei nur ausgewählte Gebiete berücksichtigt wurden (siehe Text). Dies ist die beste Klassifikation des Beispielausschnittes. Es wurde unter Verwendung des mittleren Rückstreukoeffizienten σ^0 , des 2. normierten Moments β_2 und des inversen Differenzmoments ξ_{IDM} erzielt.

Abschließend zeigt das rechte Bild von Abbildung 5.19 das Ergebnis der Klassifikation unter gleichzeitiger Verwendung des mittleren Rückstreuoeffizienten σ° , des 2. normierten Moments β_2 und des inversen Differenzmoments ξ_{IDM} . Es wird hiermit eine mittlere Übereinstimmung von 97,4% erzielt. Beim Vergleich von Tabelle 5.7 mit Tabelle 5.6 fällt erst einmal die Verbesserung der Eistypenverteilung im Radarbild auf, die in der linken Spalte angegeben ist. Der Anteil des FY3 wird überschätzt, da die Bereiche des FY3 aus den Line-Scanner-Daten sämtlich richtig klassifiziert wurden und die Fehlklassifikation des FY2 und MY einen Zuwachs des FY3 ergeben. In Abbildung 5.19 sind die fünf Bereiche gekennzeichnet, die falsch klassifiziert wurden. Mit Hilfe der Abbildung 5.16, in der die Segmentgrenzen des Radarbildes und die klassifizierten Line-Scanner-Daten enthalten sind, und der Abbildung 5.1 auf Seite 145 mit den originalen Bilddaten können die Ursachen der Fehlklassifikation erkannt werden.

Die Fehlklassifikation des FY2 als FY3, die mit 4,6% angegeben ist, wird ausschließlich durch den Bereich 1 in Abbildung 5.19 verursacht. Betrachtet man in diesem Bereich in Abbildung 5.1 die Daten des Infrarot-Line-Scanners, so kann man davon ausgehen, daß es sich in diesem Bereich tatsächlich nicht um FY3 handelt, also eine Fehlklassifikation in den Line-Scanner-Daten und nicht in den Radardaten vorliegt. Wenn man dies korrigiert, steigt die mittlere Übereinstimmung der Klassifikation sogar auf 99,0% an. Bei der Klassifikation des FY2 als MY handelt es sich um den Bereich 2. Dieser hat keine Bedeutung, da er bei der Bildung des Beispielausschnittes als kleiner Randbereich entstanden ist. MY ist in den Bereichen 3, 4 und 5 falsch klassifiziert. Die Bereiche 3 und 5 sind Fehlklassifikationen, da die Radarsignaturen in diesen Segmenten nicht ihrem Eistyp entsprechen. Der Bereich 4 umfaßt nur eine sehr kleine Ecke des mittelgrauen FY3. Im ursprünglichen Radarbild ist zu erkennen, daß sich dieses Segment tatsächlich auf einer Schollenkante, die unterschiedliche Eistypen trennt, befindet. So wie dieses Segment gebildet ist, kann es durchaus sowohl als MY als auch als FY3 interpretiert werden. Die Fehlklassifikation ist hier auf die fehlerhafte räumliche Anpassung der Datensätze zurückzuführen.

Dieses Beispiel wurde ausführlich behandelt, um die Leistungsfähigkeit der verwendeten Methode zu untersuchen. Dabei wurde der Ausschnitt nicht nach der guten mittleren Übereinstimmung ausgewählt, sondern zur Veranschaulichung der Fehlinterpretation im Abschnitt 5.2.1. Um auf diese noch einmal zurückzukommen, ist auch bemerkenswert, daß der Bereich 4 aus Abbildung 5.1 im endgültigen Ergebnis richtig klassifiziert wurde. Im Vergleich zwischen Abbildung 5.17 und 5.18 ist zu erkennen, daß dieser Bereich durch das 2. normierte Moment β_2 als FY2 richtig klassifiziert wird.

5.4.2 Wintersignaturen

Obwohl mit der vorliegenden Methode nicht allgemeingültige Radarsignaturen für unterschiedliche Eistypen gefunden werden sollen, sind diese Größen für das gesamte Szenario vom 12. März 1993 in Tabelle 5.8 der Vollständigkeit halber zusammengefaßt. Die Tabelle zeigt die Werte für eine Segmentmindestgröße von 500 Bildpunkten, für die die besten Ergebnisse ermittelt wurden. Mit nur leichten Abweichungen entstanden die Abbildungen aus Abschnitt 5.2.2 unter Verwendung dieser Werte.

	$\frac{\sigma^\circ}{\text{dB}}$	β_2	γ_3	ξ_{CON}	$\frac{\xi_{IDM}}{10^{-3}}$	ξ_{ENT}
DN	-12,19 $\pm 1,93$	2,24 $\pm 0,49$	3,21 $\pm 1,16$	147,4 $\pm 12,1$	103,3 $\pm 5,5$	6,48 $\pm 0,24$
LN	-10,61 $\pm 1,42$	1,62 $\pm 0,15$	2,29 $\pm 0,90$	155,2 $\pm 9,7$	98,4 $\pm 6,7$	6,74 $\pm 0,18$
FY1	-11,05 $\pm 1,81$	1,56 $\pm 0,11$	1,85 $\pm 0,31$	161,3 $\pm 8,6$	97,7 $\pm 6,2$	6,69 $\pm 0,20$
FY2	-10,63 $\pm 1,28$	1,49 $\pm 0,10$	2,02 $\pm 0,71$	159,9 $\pm 4,5$	95,5 $\pm 2,9$	6,86 $\pm 0,13$
FY3	-13,76 $\pm 0,71$	1,87 $\pm 0,19$	3,44 $\pm 0,82$	156,7 $\pm 8,7$	96,8 $\pm 5,8$	6,56 $\pm 0,19$
SY	-7,06 $\pm 1,42$	1,58 $\pm 0,08$	2,06 $\pm 0,46$	159,4 $\pm 7,4$	96,5 $\pm 4,0$	6,79 $\pm 0,18$
MY	-7,26 $\pm 1,63$	1,60 $\pm 0,08$	2,17 $\pm 0,52$	159,8 $\pm 7,2$	96,2 $\pm 4,1$	6,81 $\pm 0,16$

Tabelle 5.8: Mittelwerte und Standardabweichungen der Radarsignaturen, wie sie für das Szenario vom 12. März 1993 ermittelt wurden. Berücksichtigt wurden Bildsegmente mit einer Größe von mindestens 500 Bildpunkten.

Mit der Ausdehnung der Interpretation über einen größeren räumlichen Bereich in der Radarszene verschlechtern sich die Ergebnisse der Fehlerstatistiken. Hierbei schlägt die Veränderlichkeit der einzelnen Eistypen über größere Distanzen zu Buche, die im behandelten Beispiel keinen Einfluß hatte. Diese Größen werden im folgenden untersucht.

Tabelle 5.9 zeigt die Ergebnisse der Klassifikation der gesamten Szene, bei der

		Line-Scanner-Klassen in %						
		DN	LN	FY1	FY2	FY3	SY	MY
		0,4	3,4	1,5	21,3	0,4	6,1	66,9
DN	4,6	7,7	23,7	12,3	10,3	12,7	0,4	2,0
LN	20,5	6,0	48,6	59,0	55,0	0,0	4,5	8,8
FY1	7,4	13,9	12,9	11,3	20,2	4,0	3,6	3,3
FY2	0,6	5,4	3,0	4,3	0,7	2,3	1,2	0,3
FY3	3,4	55,5	3,0	10,8	8,4	75,2	0,0	1,3
SY	35,1	1,7	2,3	0,1	0,3	0,0	46,6	47,9
MY	28,4	9,8	6,5	2,2	5,1	5,8	43,7	36,4

mittlere Übereinstimmung: 32,4%

Tabelle 5.9: Prozentuale Anteile der Eistypen im Line-Scanner-Bild und dem Radarbild vom 12. März 1993. Diese Ergebnisse wurden unter ausschließlicher Verwendung des mittleren Rückstreukoeffizienten σ° erzielt.

nur der mittlere Rückstreukoeffizient σ° zur Unterscheidung herangezogen wurde. Der Vergleich der mittleren Übereinstimmung von nur 32,4% mit dem Wert aus Tabelle 5.2 (71,2%) bei deren Berechnung ebenfalls allein der mittlere Rückstreukoeffizient σ° berücksichtigt wurde, macht deutlich, welche Variationen die Radarsignaturen über größere Gebiete haben. Dies schlechte Ergebnis kommt im wesentlichen durch die Fehlinterpretation von DN, FY1 und FY2 zustande. DN wird in großen Teilen als FY3 interpretiert, da der Einzugsbereich von FY3 nach Abbildung 5.6 mit dem des DN überlagert ist und wegen der geringen Standardabweichung von FY3 dieser Eistyp bevorzugt wird. Entsprechendes gilt für FY1 und FY2. Beide Eistypen werden im wesentlichen als LN klassifiziert. Diese drei Typen bilden nach Abbildung 5.6 ebenfalls einen gemeinsamen Einzugsbereich und können mit ausschließlicher Nutzung des mittleren Rückstreukoeffizienten nicht voneinander unterschieden werden. Bei der Betrachtung der beiden letzten Reihen und Spalten sind die bereits in Abschnitt 5.2.2 ständig auftretenden übereinstimmenden Eigenschaften der beiden alten Eistypen SY und MY zu erkennen. Die Unterscheidung kann auch bei Hinzunahme von weiteren statistischen Parametern der Radardaten kaum verbessert werden, so daß diese Typen später auch als altes Eis (OI - old ice) zusammengefaßt werden.

Mit der Hinzunahme des 2. normierten Moments β_2 verbessert sich die mittlere Übereinstimmung auf 50,8%. Diese Steigerung kommt durch die bessere Klassifikation der Anteile von DN, FY1 und FY2 zustande. In Abbildung 5.12 ist

		Line-Scanner-Klassen in %						
		DN	LN	FY1	FY2	FY3	SY	MY
		0,4	3,4	1,5	21,3	0,4	6,1	66,9
DN	6,2	78,3	21,9	12,4	8,3	38,5	7,7	3,9
LN	18,7	10,0	66,7	32,5	19,4	12,6	5,7	17,0
FY1	4,8	0,0	7,6	41,6	9,7	0,0	2,3	2,5
FY2	13,4	0,0	1,0	10,6	59,7	0,0	0,0	0,7
FY3	0,6	2,3	0,0	2,9	0,8	48,9	0,5	0,3
SY	31,4	8,0	1,9	0,0	1,2	0,0	67,4	40,3
MY	24,9	1,4	0,9	0,0	0,9	0,0	16,4	35,3

mittlere Übereinstimmung: 56,8%

Tabelle 5.10: Prozentuale Anteile der Eistypen im Line-Scanner-Bild und dem Radarbild vom 12. März 1993. Dies ist die erfolgreichste Klassifikation mit Unterscheidung von sieben Eistypen. Es wurden bei der Klassifikation der mittlere Rückstreukoeffizient σ° , das 2. normierte Moment β_2 , das 3. zentrale Moment γ_3 und die Texturmaße, der Kontrast ξ_{CON} und das inverse Differenzmoment ξ_{IDM} ausgewertet.

im zweidimensionalen Merkmalsraum zu erkennen, warum DN nicht mehr zu so großen Anteilen als FY3 klassifiziert wird. Das Einzugsgebiet von FY3 deckt nur noch einen Quadranten des DN ab. Auch hat das 2. normierte Moment β_2 von FY3 eine nicht so extrem geringe Standardabweichung. Mit Hilfe des 2. normierten Moments β_2 können auch die drei Eistypen LN, FY1 und FY2 besser getrennt werden.

Das beste Ergebnis, das bei der Unterscheidung von sieben Eistypen erzielt wurde, ist in Tabelle 5.10 wiedergegeben. Hierbei wurden keine Segmentmindestgrößen verwendet. Es wurde mit der gemeinsamen Nutzung von fünf Merkmalen erzielt. Neben dem mittleren Rückstreukoeffizienten σ° und dem 2. normierten Moment β_2 wurden das 3. zentrale Moment γ_3 und die beiden Texturmaße, der Kontrast ξ_{CON} und das inverse Differenzmoment ξ_{IDM} , berücksichtigt. Die mittlere Übereinstimmung konnte hiermit auf 56,8% gesteigert werden. Abgesehen von der Fehlklassifikation zwischen den beiden alten Eistypen SY und MY wird das Ergebnis durch die schlechte Identifizierung des erstjährigen Eises begrenzt. Von allen drei Entwicklungsstadien des erstjährigen Eises werden große Anteile als Nilas erkannt. Untereinander und zum alten Eis gibt es nur geringe Fehlklassifikationen. Bei der Ermittlung der Merkmale aus Segmenten mit einer Mindestgröße von 500 Bildpunkten konnte dieses Ergebnis geringfügig verbessert werden. Die Aussagekraft des inversen Differenzmoments ξ_{IDM} wurde hierbei unbedeutend, so

		Line-Scanner-Klassen in %			
		NI	FY	OI	
			3,7	23,2	73,1
Radar- klassen in %	NI	25,1	66,6	64,8	10,4
	FY	11,4	24,3	30,0	4,8
	OI	63,5	9,1	5,2	84,8

mittlere Übereinstimmung: 60,5%

Tabelle 5.11: Prozentuale Anteile der Eistypen im Line-Scanner-Bild und im Radarbild. Diese Tabelle wurde mit den Daten aus Tabelle 5.9 gebildet, indem die Eistypen in drei Gruppen zusammengefaßt wurden.

daß die Berücksichtigung von vier Merkmalen zum optimierten Ergebnis führte.

Die Klassifikation kann genauer durchgeführt werden, wenn die Anzahl der Eistypen reduziert wird, also die Typen in gemeinsamen Gruppen zusammengefaßt werden. Im vorliegenden Fall bietet sich eine Reduktion auf drei Eistypen an. DN und LN werden als Nilas (NI) zusammengefaßt. Die drei Entwicklungsstadien des erstjährigen Eises werden zum FY. Als altes Eis (OI - old ice) werden SY und MY vereint. Die Statistiken werden sich um den Teil verbessern, bei dem die Fehlklassifikation innerhalb der gebildeten Gruppen stattfand. Die Fehlklassifikation des FY1 und FY2 zum LN wird sich auch weiterhin auswirken.

Bei der Zusammenfassung gibt es zwei Möglichkeiten. Ungünstig wäre es, von vornherein nur noch mit drei Eistypen zu arbeiten. Schon bei der Betrachtung der mittleren Rückstreuoeffizienten in Abbildung 5.6 wird deutlich, daß bei der Zusammenführung von FY1, FY2 und FY3 ein Mittelwert entstehen könnte, der keinem dieser drei Typen gerecht werden würde. Dieses wird ebenfalls bezüglich des Nilas deutlich. Nur beim alten Eis (OI) würde es keine Schwierigkeiten geben. Wenn jedoch die Klassifikation mit allen Eistypen durchgeführt und erst bei der Erstellung der Fehlerstatistik in Gruppen zusammengefaßt wird, können sowohl die Unterschiede der einzelnen Typen genutzt als auch durch die Zusammenfassung die Klassifikationssicherheit erhöht werden.

Durch die Zusammenfassung in Gruppen wird Tabelle 5.9 in Tabelle 5.11 überführt und die mittlere Übereinstimmung auf 60,5% gesteigert, wobei allein der Rückstreuoeffizient σ° genutzt wird. Mit der Zusammenfassung der Eistypen vor der Klassifikation würde dagegen eine mittlere Übereinstimmung von nur 58,0% erreicht. Das Ergebnis ist im Detail jedoch weitaus schlechter als das aus Tabelle 5.11, da FY zu fast 92% als NI klassifiziert wird.

Durch die gleichzeitige Nutzung fünf statistischer Parameter wird Tabelle 5.12 aus

		Line-Scanner-Klassen in %			
		NI	FY	OI	
		3,7	23,2	73,1	
Radar- klassen in %	NI	24,9	88,6	29,2	20,3
	FY	18,8	8,0	69,0	3,4
	OI	56,3	3,4	1,8	76,3

mittlere Übereinstimmung: 78,0%

Tabelle 5.12: Prozentuale Anteile der Eistypen im Line-Scanner-Bild und dem Radarbild. Diese Tabelle wurde mit den Daten aus Tabelle 5.10 gebildet, indem die Eistypen in drei Gruppen zusammengefaßt wurden. Dies ist die beste Klassifikation des gesamten Radarbildes. Es wurde unter Verwendung des mittleren Rückstreuoeffizienten σ^0 , des 2. normierten Moments β_2 , des 3. zentralen Moments γ_3 und der Texturmaße, des Kontrasts ξ_{CON} und des inversen Differenzmoments ξ_{IDM} erzielt.

Tabelle 5.10 gebildet. Die mittlere Übereinstimmung beträgt dann 78,0%. Mit einem besonderen Optimierungsverfahren konnte noch eine geringe Verbesserung auf eine mittlere Übereinstimmung von knapp über 80% erreicht werden. Die bei dieser Optimierung verfolgte Idee eröffnet jedoch neue Probleme, daher wird dieses Sachgebiet lediglich im Ausblick (Abschnitt 5.5) angesprochen. So kann Tabelle 5.12 in guter Näherung als Endergebnis der Klassifikationsgenauigkeit für die dargestellte Wintersituation angegeben werden.

5.4.3 Sommersignaturen

Als Beispiel der Interpretation von Sommersignaturen wird das Szenario vom 14. Juni 1993 ausgewertet. Das Radarbild ist in Abbildung 1.3 auf Seite 13 und die Lage der Aufnahme in Abbildung 1.4 dargestellt. Das Radarbild wurde vom SAR des ERS-1 um 13:38 UTC aufgenommen. Dasselbe Gebiet haben wir mit den Line-Scannern von 13:07 UTC bis 14:41 UTC durchflogen. Teilweise wurden die Aufnahmen also zeitgleich durchgeführt. Die größte Differenz zwischen beiden Aufnahmen beträgt 63 Minuten, innerhalb derer das Eis bei einer angenommenen Driftgeschwindigkeit von 20 cm/s etwa um 750 m oder 60 Bildpunkte des SAR verschoben wurde.

Innerhalb des vom SAR abgedeckten Gebiets wurde mit den Line-Scannern bei einer Flughöhe von 1200 m und einer Geschwindigkeit von 51 m/s beziehungsweise 66 m/s eine Fläche von etwa 350 km² aufgenommen. Dieses entspricht etwa 3,6% der gesamten SAR-Szene.

Beim schneebedeckten Eis handelt es sich im durchflogenen Gebiet im wesent-

lichen um dickes erstjähriges Eis (FY3) und um zweijähriges Eis (SY). Gelegentlich trat auch dünnes erstjähriges Eis (FY1) auf, bei dem anhand der Oberflächenstrukturen zu erkennen war, daß dieses Eis kurz vor der Bildung von Schmelzpfützen stand. Diese drei Eistypen konnten während des Meßfluges wegen ihrer unterschiedlichen Oberflächenstrukturen gut voneinander unterschieden werden. Bei der Klassifikation mit den Line-Scannern konnten diese Eistypen nicht voneinander unterschieden werden, da der Infrared-Line-Scanner im Sommer wegen der gleichen Oberflächentemperaturen der verschiedenen Eistypen keine zusätzliche Information liefert. Die Oberflächentemperatur des Eises hängt im Sommer im wesentlichen von Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung und kaum von der Eisdicke ab; sie liegt nahe der Wasseroberflächentemperatur. Die Temperatur der Schneeoberfläche liegt bei Lufttemperaturen um -2°C , wie sie im vorliegenden Fall herrschten, sogar über der Wassertemperatur, da die nicht reflektierte Sonneneinstrahlung zu einem großen Teil in den obersten Millimetern absorbiert wird und diese erwärmt. Durch die poröse Schneeoberfläche kann sich hiermit auch die oberste Schicht erwärmen, ohne daß diese durch den Wind gleich wieder abgekühlt wird.

Mit der Line-Scan-Camera konnte das FY1, FY2 und SY nicht voneinander unterschieden werden, da die Schneeaufgabe aller drei Eistypen etwa die gleiche Reflektivität hatte. Mit den beiden Line-Scannern konnte eine Klassifikation des aufgenommenen Gebiets in drei Eistypen zusätzlich zum offenen Wasser erfolgen. 12,7% des Gebiets bestanden aus offenem Wasser (OW). An den Schollenrändern und dicht an den Gebieten mit Trümmereis (BR - Brash Ice) konnten insgesamt 0,7% der Fläche als Eisschlamm (GE - Grease Ice) erkannt werden. Das schneebedeckte Eis (SI - Snow Covered Ice) machte 75,9% der Fläche aus. 10,7% waren mit Trümmereis (BR) bedeckt. Mit der Auswertung der Radardaten wurde festgestellt, daß die schmalen Streifen des Eisschlammes, die nur an den Randbereichen des offenen Wassers vorkamen, vom Radar nicht aufgelöst werden konnten. Der Anteil des Eisschlammes wurde deshalb dem offenen Wasser zugerechnet.

Für die drei verbleibenden Bereichstypen ergeben sich die in Tabelle 5.13 zusammengefaßten Mittelwerte und Standardabweichungen des mittleren Rückstreuoeffizienten und der statistischen Parameter des Radarbildes.

Bei der Auswertung der Sommerdaten wurde keine Einschränkung bezüglich der Segmentgrößen vorgenommen. Im Gegensatz zur Wintersituation verschlechtern sich die Klassifikationsergebnisse, wenn eine Mindestgröße der zu berücksichtigenden Segmente eingeführt wird. Diese Verschlechterung liegt in den allgemein kleinen Segmenten von Trümmereis (BR) und offenem Wasser (OW) begründet. Im relevanten Gebiet lagen BR und OW im wesentlichen in kleinen Bereichen vor und lieferten somit auch in den Radardaten kleine Segmente. Durch die Einführung einer Mindestgröße bei der Interpretation der Radardaten würden nur die untypischen großen Segmente herangezogen. Die Berücksichtigung der

kleinen Segmente schränkt andererseits natürlich die Sicherheit der Berechnung der statistischen Parameter ein (siehe auch Abschnitt 4.2.1 und 4.2.2).

	$\frac{\sigma^\circ}{\text{dB}}$	β_2	γ_3	ξ_{CON}	$\frac{\xi_{IDM}}{10^{-3}}$	ξ_{ENT}
OW	-9,25	1,44	1,78	164,0	93,9	6,87
	$\pm 0,91$	$\pm 0,06$	$\pm 0,28$	$\pm 5,7$	$\pm 2,9$	$\pm 0,21$
SI	-9,05	1,47	1,77	164,0	94,1	6,83
	$\pm 1,68$	$\pm 0,07$	$\pm 0,35$	$\pm 6,8$	$\pm 4,6$	$\pm 0,26$
BR	-7,26	1,50	1,58	169,3	93,5	6,51
	$\pm 1,36$	$\pm 0,12$	$\pm 0,31$	$\pm 11,7$	$\pm 9,5$	$\pm 0,56$

Tabelle 5.13: Mittelwerte und Standardabweichungen der Radarsignaturen, wie sie für das Szenario vom 14. Juni 1993 in der North-East-Water-Polynya ermittelt wurden. Es wurden alle Radarsegmente ungeachtet ihrer Größe berücksichtigt.

		Line-Scanner-Klassen in %			
		OW	SI	BR	
		10,1	89,1	0,8	
Radar- klassen in %	OW	21,2	1,5	23,6	0,0
	SI	59,3	94,7	55,7	9,8
	BR	19,5	3,8	20,7	90,2

mittlere Übereinstimmung: 49,1%

Tabelle 5.14: Prozentuale Anteile der Eistypen im Line-Scanner-Bild und im Radarbild vom 14. Juni 1993. Die Unterscheidung zwischen offenem Wasser (OW), schneebedecktem Eis (SI) und Trümmereis (BR) basiert ausschließlich auf die Verwendung des mittleren Rückstreuoeffizienten σ° .

Tabelle 5.14 zeigt das Ergebnis der Klassifikation unter Berücksichtigung des mittleren Rückstreuoeffizienten σ° . Es wurde eine mittlere Übereinstimmung von nur 49,1% erreicht. Die Klassifikation der Winterdaten im vorangegangenen Abschnitt lieferte bei alleiniger Verwendung des mittleren Rückstreuoeffizienten σ° für die Unterscheidung von drei Eistypen ein um mehr als 10% besseres Ergebnis. Tabelle 5.14 zeigt, daß dies im wesentlichen durch die schlechte Trennung von OW und SI zustande kommt.

Diese beiden Typen können mit Hilfe des mittleren Rückstreuoeffizienten σ° nicht voneinander unterschieden werden, da die offenen Wasserflächen wegen der

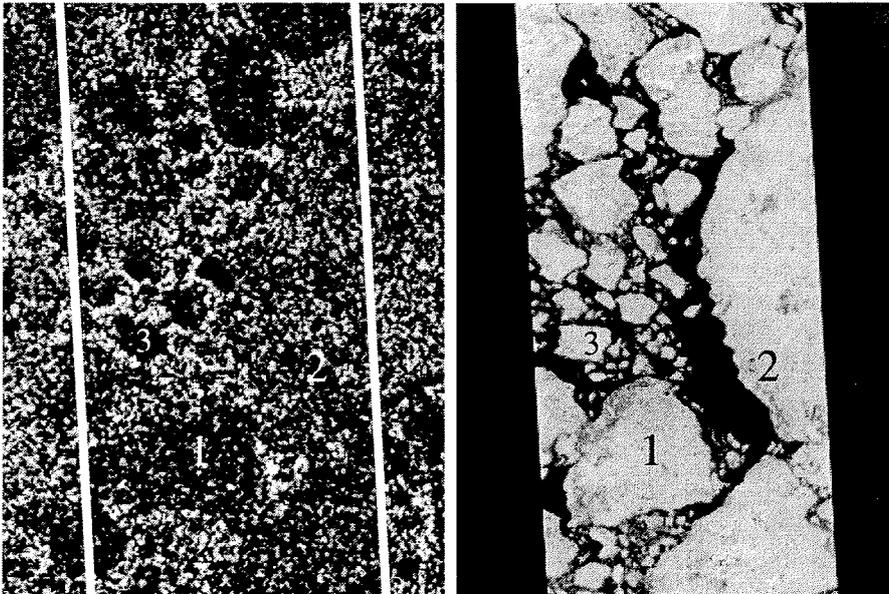


Abbildung 5.20: Ausschnitt aus dem Szenario vom 14. Juni 1993 mit einer Größe von 3,7 km x 2,7 km. Auf der linken Seite sind die Rückstreuintensitäten des ERS-1-SAR (Orbit: 10003; Frame: 1953; ©esa) und rechts das Bild des sichtbaren Spektralbereichs von der Line-Scan-Camera dargestellt. Der Übergang vom schneebedeckten Eis zum offenen Wasser ist im Bereich 2 im Radarbild nicht zu erkennen.

hohen Windgeschwindigkeit von 5 m/s mit kleinen Wellen bedeckt waren. Das allgemeine Problem, daß wellenbedeckte Wasserflächen je nach Windgeschwindigkeiten einen beliebigen mittleren Rückstreukoeffizienten annehmen können, ist auch hier gegenwärtig. In welchem Maß hierdurch Probleme entstehen, zeigt das verblüffende Beispiel aus Abbildung 5.20, in dem nebeneinander dieselbe Region als SAR-Bild des ERS-1 und als Bild des sichtbaren Spektralbereichs der Line-Scan-Camera abgebildet ist. Beide Bildausschnitte zeigen ein Gebiet von 3,7 km x 2,7 km. Die eingezeichnete Lage der Line-Scanner-Abdeckung im Radarbild und die mit Ziffern markierten Gebiete helfen beim Vergleich von denselben Gebieten in beiden Bildern. Erstaunlich ist, daß die linke Kante der Scholle 2, bei der das schneebedeckte Eis in offenes Wasser übergeht, im Radarbild nicht zu erkennen ist. Für den Betrachter sind nicht einmal Texturunterschiede zu erkennen. Im Radarbild treten dagegen die Bereiche mit Trümmereis durch erhöhte Rückstreuintensitäten deutlich hervor. Diese sind zum Beispiel rechts unter der Scholle 1 zu erkennen. Die schneebedeckten Schollen im Bereich 3 sind ebenfalls von Trümmereis umgeben.

		Line-Scanner-Klassen in %			
		OW	SI	BR	
		10,1	89,1	0,8	
Radar- klassen in %	OW	19,3	55,3	15,4	0,0
	SI	54,3	31,0	57,3	13,7
	BR	26,4	13,7	27,3	86,3

mittlere Übereinstimmung: 66,3%

Tabelle 5.15: Prozentuale Anteile der Eistypen im Line-Scanner-Bild und im Radarbild vom 14. Juni 1993. Zur Klassifikation wurden die beiden Texturmaße, das inverse Differenzmoment ξ_{IDM} und die Entropie ξ_{ENT} , verwendet.

Im Gegensatz zur Interpretation der Winterdaten nimmt der mittlere Rückstreu-
koeffizient σ° gegenüber den anderen statistischen Parametern keine herausra-
gende Rolle ein. Bei der Verwendung nur eines Parameters wird mit dem 2. nor-
mierten Moment β_2 eine größere mittlere Übereinstimmung von 51,6% erreicht.
Auch die Texturmaße stehen diesem Ergebnis nicht nach. Mit der Entropie ξ_{ENT}
können die Daten zu 51,8% richtig klassifiziert werden. Hierbei wurde besonders
die Unterscheidung von OW und SI verbessert, was darauf hindeutet, daß bei
der Interpretation von Sommerdaten des SAR den Texturmaßen eine besondere
Bedeutung zukommt und ihr Klassifikationspotential im Gegensatz zu Winter-
situationen höher liegt als das des mittleren Rückstreu-
koeffizienten σ° oder der
Momente β_2 und γ_3 .

Durch die gemeinsame Verwendung von zwei Parametern werden die Ergebnisse
schon wesentlich verbessert. Mit der Kombination des mittleren Rückstreu-
koeffizienten σ° und des 2. normierten Moments β_2 wird eine mittlere Übereinstim-
mung von 62,3% erreicht. Dies Ergebnis wird von der Kombination der beiden
Texturmaße, dem inversen Differenzmoment ξ_{IDM} und der Entropie ξ_{ENT} , noch
überboten. Tabelle 5.15 zeigt, daß hiermit eine mittlere Übereinstimmung von
66,3% erreicht wird.

Während sich das Ergebnis der Kombination von σ° und β_2 auf die sichere Er-
kennung des BR stützt, wird bei der Verwendung der Texturmaße auch die Un-
terscheidung von OW und SI verbessert.

Wenn man sich bei der Hinzunahme von weiteren Parametern im wesentlichen
auf den mittleren Rückstreu-
koeffizienten σ° und die Momente stützt, kann das
Ergebnis aus Tabelle 5.15 nicht verbessert werden. Die Kombination von σ° , β_2 ,
 γ_3 und ξ_{CON} führt zum Beispiel zu einer mittleren Übereinstimmung von nur
65,9%.

		Line-Scanner-Klassen in %			
		OW	SI	BR	
		10,1	89,1	0,8	
Radar- klassen in %	OW	10,5	63,8	4,5	0,0
	SI	70,5	25,1	76,2	20,7
	BR	19,0	11,1	19,3	79,3

mittlere Übereinstimmung: 73,1%

Tabelle 5.16: Prozentuale Anteile der Eistypen im Line-Scanner-Bild und im Radarbild vom 14. Juni 1993. Zur Klassifikation wurden das 3. zentrale Moment γ_3 und die Texturmaße ξ_{CON} , ξ_{IDM} und ξ_{ENT} herangezogen. Der mittlere Rückstreuoeffizient σ° und das 2. normierte Moment β_2 erwiesen sich bei der Optimierung als unbedeutend.

Als günstigstes Klassifikationsergebnis, das in Tabelle 5.16 dargestellt ist, ergab sich eine mittlere Übereinstimmung von 73,1%. Bei der Optimierung stellte sich heraus, daß der mittlere Rückstreuoeffizient σ° und das 2. normierte Moment β_2 für die Klassifikation unbedeutend sind. Die Klassifikation wurde daher anhand des 3. zentralen Moments γ_3 und der Texturmaße, des Kontrastes ξ_{CON} , des inversen Differenzmoments ξ_{IDM} und der Entropie ξ_{ENT} durchgeführt. In Tabelle 5.16 ist zu erkennen, daß SI und BR zu jeweils etwa 20% untereinander falsch klassifiziert wurden. Der Übergang zwischen diesen beiden Eistypen ist auch nicht eindeutig, da auch das BR aus größeren schneebedeckten Eisstücken zusammengesetzt ist. Die Fehlklassifikationen werden also teilweise durch diese Unsicherheit hervorgerufen.

5.4.4 Bewertung

Um das nicht vollständig befriedigende Ergebnis doch noch zu verbessern, wurde an eine Erweiterung des Klassifikators gedacht, bei der die Clusterzentren der einzelnen Eistypen in Range-Richtung im Radarbild variieren. Dieser Idee liegt die Arbeit von PETERSSON *et al.* [1995] zugrunde, in der für einzelne Eistypen eine entsprechende Abhängigkeit vermutet wurde. Bei erstjährigem Eis reicht diese Abhängigkeit in ihren Untersuchungen bis zu Unterschieden von $\Delta\sigma^\circ = 8$ dB beim mittleren Rückstreuoeffizienten. Eine einheitliche Abhängigkeit haben sie nur beim MY erkennen können, die zwischen Near-Range und Far-Range jedoch nur etwa $\Delta\sigma^\circ = 1$ dB ausmacht. Abbildung 5.21 zeigt die Abhängigkeit des mittleren Rückstreuoeffizienten σ° vom Range für die hier bearbeiteten Daten. Zur Berechnung wurde das Radarbild in Range-Richtung in acht Teile geteilt und diese wurden getrennt ausgewertet. Zur besseren Lesbarkeit wurde eine

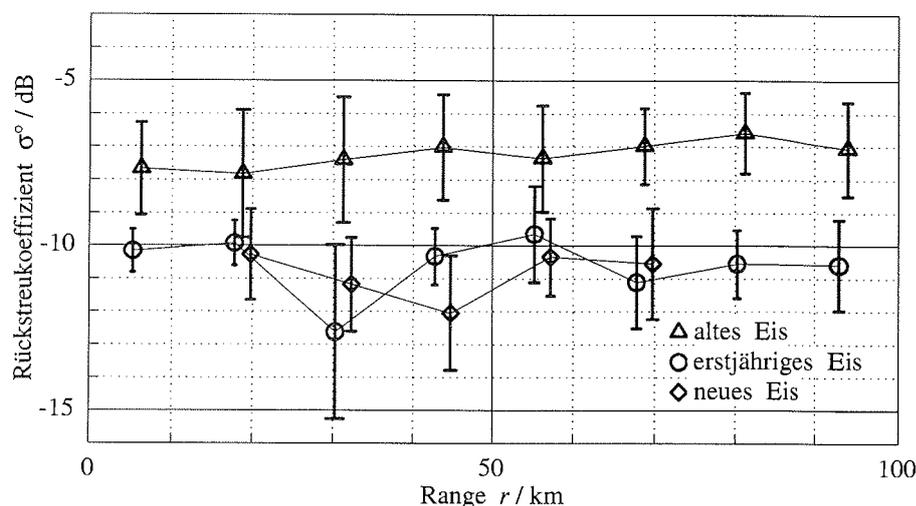


Abbildung 5.21: Abhängigkeit des mittleren Rückstreukoeffizienten in Range-Richtung für das Szenario vom 12. März 1993. Für diese Untersuchung wurde das Radarbild in acht Teile unterteilt.

leichte Verschiebung der Meßpunkte in Range-Richtung durchgeführt. Bei der Abhängigkeit für altes Eis würde eine lineare Regression ebenfalls eine Differenz von $\Delta\sigma^\circ = 1$ dB zwischen Near-Range (0 km) und Far-Range (100 km) ergeben. Der Gradient hat nun aber ein anderes Vorzeichen als bei PETERSSON *et al.* [1995], so daß es sich im hier untersuchten Bild nicht um eine Winkelabhängigkeit des Rückstreuvermögens, sondern um eine Variation des alten Eises im abgedeckten Gebiet handelt, die in jede beliebige Richtung verlaufen kann und nicht zwangsläufig monoton ist.

Mit den statistischen Parametern der Radardaten, die in Tabelle 5.8 zusammengefaßt wurden, wird die gesamte durchflogene Radarszene klassifiziert. Es kann hierbei natürlich vorkommen, daß im Radarbild Eistypen enthalten sind, die nicht mit den Line-Scannern aufgenommen wurden. Diese scheiden für die Klassifikation aus. Daher muß beim Durchfliegen von Radaraufnahmen darauf geachtet werden, daß möglichst große Gebiete von den Line-Scannern erfaßt werden. Ein langer Flug, der quer durch die Radarszene führt, ist besser als eine hohe räumliche Auflösung in einer kleineren Region.

Die räumliche und zeitliche Variation der Radarsignaturen von gleichen Erscheinungsformen des Meereises bereitet bei der separaten Klassifikation einzelner Radarbilder keine Probleme. Bezüglich des mittleren Rückstreukoeffizienten sind in der Literatur neben der erwähnten Arbeit von PETERSSON *et al.* [1995] keine größeren Variationen gefunden worden als sie in Abbildung 5.21 dargestellt sind.

So haben auch KWOK *et al.* [1994] über eine Distanz von etwa 400 km im Winter in der BEAUFORT-See für MY maximale Variationen von nur $\Delta\sigma^\circ = 2$ dB ermitteln können. Der Vorteil der vorliegenden Arbeit ist, daß zeitliche Variationen der Radarsignaturen keinen Einfluß haben, da die statistischen Parameter zur Klassifikation für jede Szene neu ermittelt werden. Gerade an der zeitlichen Veränderlichkeit scheitert aber die genaue operationelle Klassifikation längerer Zeitreihen von Radarszenen. BARBER *et al.* [1995] geben für Untersuchungen, die im März 1993 in der kanadischen Arktis durchgeführt wurden, Variationen für FY von $\Delta\sigma^\circ > 5$ dB innerhalb eines Monats an. Bis zum Sommer zeigten sich Variationen von über $\Delta\sigma^\circ > 10$ dB. Ähnlich große Variationen zeigen auch PETERSSON *et al.* [1995] für den Herbst 1991.

Scheinbar präsentiert die Arbeit von STEFFEN und HEINRICHS [1994] bessere Genauigkeiten als die hier erzielten. Sie untersuchen die Durchführbarkeit der Klassifikation von Meereis mittels ERS-1-SAR für Radarszenen vom April 1992 aus der BEAUFORT-See. Die Kombination mit Daten des Landsat-Thematic-Mapper (TM) zeigt einen zum hier vorgestellten ähnlichen Ansatz. Leider wurde jedoch nicht konsequent ein Vergleich der beiden Datensätze durchgeführt. Zur Klassifikation wurden sie kombiniert ausgewertet, woraus Klassifikationsgenauigkeiten von über 90% resultierten. Die vorangegangenen Analysen von STEFFEN und HEINRICHS [1994] bezüglich des SAR zeigen aber bereits, daß das Radar bei der Klassifikation nicht viel helfen kann. Dies ist leider nicht explizit dargestellt; es wird nicht zwischen dem Klassifikationsvermögen des SAR und dem des Landsat-Thematic-Mapper unterschieden. Darüber hinaus lassen die in ihrer Arbeit abgebildeten Szenen die erwähnte Klassifikationsgenauigkeit bei weitem nicht erkennen. Kalibrationsfehler des Landsat-Thematic-Mapper bringen Strukturen in die Daten, die statt der angegebenen Klassifikationsgenauigkeiten von 98% und 90% bei FY und OI eine geschätzte Genauigkeit von etwa 60% ergeben.

Es gibt Untersuchungen von SKRIVER [1994], die am selben Tag in derselben Region wie die vorliegenden Arbeiten stattfanden. Die dort für die Klassifikation angegebenen Genauigkeiten liegen um etwa 10% höher, als sie in der vorliegenden Arbeit ermittelt wurden. Diese Differenz repräsentiert jedoch in Wirklichkeit keine höhere Klassifikationsgenauigkeit, sondern ist in der Unsicherheit der Testdaten begründet. Durch empirische Definition von Trainings- und Testgebieten werden Fehlinterpretationen, wie sie in Abschnitt 5.2.1 behandelt wurden, entstehen. Zudem werden gerade unsicher zu definierende Segmente bei der manuellen Interpretation gern umgangen. Bei vielen Arbeiten dieser Art wird konsequent eine Trennung von Trainings- und Testgebieten beibehalten, obwohl keine unterschiedlichen Anforderungen an die beiden Gebietstypen gestellt werden. Dabei könnte der Unterschied zwischen Trainings- und Testgebieten bezüglich der statistischen Parameter der Radardaten durch die Berechnung der jeweiligen Standardabweichungen aussagekräftig ermittelt werden. Mit der Nutzung aller definierten Gebiete, sowohl als Trainings- als auch als Testgebiet, könnte die Beur-

teilung der Klassifikations- und Testsicherheit erhöht werden.

Daß eine Steigerung der hier gefundenen Genauigkeit nicht erreicht werden kann, wird auch durch die Arbeiten von SKOHR [1991] sowie NYSTUEN und GARCIA [1992] gestützt. Beide beschäftigen sich sehr ausführlich mit dem Potential der Texturanalyse von Radardaten für die Klassifikation von Meereis. In beiden Arbeiten werden flugzeuggestützte Radarmessungen durchgeführt. Die Interpretation der notwendigen Testgebiete konnte mit einer hohen Sicherheit durchgeführt werden, da die relevanten Gebiete von den Autoren selbst während der Meßflüge in Augenschein genommen werden konnten und sie sich nicht allein auf die Radarsignaturen stützen mußten. NYSTUEN und GARCIA [1992] haben im April 1987 in der Grönlandsee mit einer ähnlichen Unterscheidung der Eistypen wie in Tabelle 5.12 auf Seite 178 Genauigkeiten von 89% durch die Verwendung von Texturanalyse erreicht.

Die Arbeiten von SKOHR [1991] zeigen die schlechtesten Ergebnisse für ein C-Band-Radar, wie auch das ERS-1-SAR eines ist. Im Vergleich zu Tabelle 5.11 und 5.12 ermittelte er ohne Verwendung von Texturparametern Klassifikationsgenauigkeiten von etwa 64%. Durch die Hinzunahme von Texturgrößen konnten die Ergebnisse bis 74% verbessert werden.

Zu den beiden letzten Arbeiten muß noch angeführt werden, daß auch hier die Auswahl der Trainings- und Testgebiete subjektiv erfolgte, während in die Line-Scanner-Auswertung zwangsläufig auch schwer zu deutende Regionen einfließen. Die in Tabelle 5.12 angegebene mittlere Übereinstimmung von 78% bedeutet also tatsächlich eine bisher mit anderen Methoden nicht erreichte Klassifikationsgenauigkeit.

Ein Vergleich des Klassifikationsergebnisses der Sommerdaten mit denen der Literatur scheitert daran, daß bisher keine Untersuchungen der Klassifikationsmöglichkeiten von Radardaten unter sommerlichen Bedingungen veröffentlicht wurden. Allgemein wird es jedoch als unmöglich angesehen, im Sommer eine Klassifikation mit dem SAR des ERS-1 durchzuführen. Der Grund hierfür liegt im Vorkommen von Oberflächenwellen im offenen Wasser und der Veränderung der Oberflächeneigenschaften mit dem Beginn der Schmelzphase.

Eine grundsätzliche Schwierigkeit entsteht bei der Anwendung des in dieser Arbeit verwendeten Verfahrens durch die Tatsache, daß durch die Line-Scanner das schneebedeckte Eis im Sommer nicht weiter klassifiziert werden kann. Dadurch entfällt die Grundlage, auf der die weiteren Testschritte aufbauen. Dagegen ließen sich in den Radarbildern vermutlich schon unter Verwendung des mittleren Rückstreuoeffizienten σ° verschiedene Eistypen trennen. In der vorliegenden Arbeit ist der mittlere Rückstreuoeffizient unbedeutend, da nur der Mittelwert der unterschiedlichen Eistypen berechnet werden kann. Der Mittelwert läßt jedoch keine Erkennung der einzelnen Eistypen zu.

5.5 Ausblick

Im Ausblick werden zwei Aspekte behandelt. Zum Beginn wird diskutiert, in welchem Maße und mit Hilfe welcher Mittel die in der vorliegenden Ausarbeitung erreichten Klassifikationsgenauigkeiten erhöht werden können. Hierbei handelt es sich zum einen um die Entwicklung eines verbesserten Klassifikators, zum anderen um den Einsatz mehrspektraler Line-Scanner für die Interpretation von Sommersignaturen. Abschließend wird auf Arbeiten eingegangen, die auf den hier erzielten Ergebnissen aufbauen.

Im Abschnitt 5.4.2 wurde erwähnt, daß die erreichten Klassifikationsgenauigkeiten durch die Entwicklung eines optimierten Klassifikators verbessert werden könnten. Der im Abschnitt 5.3 vorgestellte Klassifikator skaliert in seiner Optimierungsroutine nur die einzelnen Dimensionen des Merkmalsraumes. In der vorliegenden Arbeit wurde ein relativ einfacher Algorithmus programmiert, der die Skalierung der einzelnen Dimensionen in jeweils zehn Stufen variiert und nach der Skalierung und Berechnung aller Möglichkeiten die beste Realisation als Ergebnis liefert.

Die Klassifikationsgenauigkeit könnte verbessert werden, wenn für jede Dimension des Merkmalsraumes die Mittelwerte und Bewertungen aller Eistypen in einem Optimierungsprogramm angepaßt würden. Die Bewertung der Cluster wurde in der vorliegenden Arbeit durch die Standardabweichung der Verteilungen vorgenommen. Bei der Unterscheidung von drei Eistypen ergeben sich für jede Dimension des Merkmalsraumes sechs zu optimierende Variablen. Sollen zum Beispiel fünf statistische Parameter der Radardaten in die Klassifikation einbezogen werden, so ergeben sich 30 bei der Optimierung zu berücksichtigende Freiheitsgrade. Hiermit entsteht ein Problem, das in der vorliegenden Arbeit nicht gelöst werden konnte.

Die Berechnung der Klassifikation ohne Optimierung benötigt auf einer Workstation (SUN SparcStation 10) etwa 0,8 Sekunden. Mit der hier implementierten Optimierung durch Skalierung der Merkmalsdimensionen entsteht für jede Dimension nur ein Freiheitsgrad. Unter der Berücksichtigung von vier statistischen Parametern der Radardaten, also vier Freiheitsgraden der Optimierung, ergaben sich schon Rechenzeiten von gut 2,2 Stunden, bei fünf Freiheitsgraden entsprechend 22 Stunden. So ist bereits die Berechnung mit den oben erwähnten 30 Freiheitsgraden und dieser einfachen Optimierungsroutine unpraktikabel.

Als Alternative zu diesem einfachen Optimierungsalgorithmus wurde testweise ein Gradientenverfahren programmiert, mit dem die Klassifikationsergebnisse um einige Prozent verbessert werden konnten. Mit der Variation der Anfangsbedingungen lieferte der Optimierungsalgorithmus jedoch ständig andere Ergebnisse, da das Verfahren gegen lokale Minima konvergierte. Es wurde erkannt, daß die Entwicklung eines aufwendigeren Optimierungsverfahrens für die Klassifikation

der Radardaten den Umfang der vorliegenden Arbeit deutlich gesprengt hätte. Bei weiterführenden Projekten wäre die Beschäftigung mit diesem Problem jedoch angebracht.

Bei der Auswertung der Sommerdaten wurde als Manko erkannt, daß mit der Kombination von Line-Scan-Camera und Infrared-Line-Scanner die schneebedeckten Eistypen nicht voneinander unterschieden werden konnten. Wegen der in Abschnitt 5.4.3 angeführten Gründe liefert der Infrared-Line-Scanner wenig zusätzliche Information zu denen der Line-Scan-Camera. Eine Verbesserungsmöglichkeit besteht jedoch für Sommersituationen, in denen Schmelzpfützen oder andere Oberflächenveränderungen auftreten. Das bisherige System ist hierfür zwar nicht geeignet, da eine Unterscheidung von Schmelzpfützen und Wolken Schatten aufgrund der gleichen Helligkeiten im Grauwertbild nicht möglich ist. Wenn man jedoch die spektrale Signatur im sichtbaren Spektralbereich erfaßt, kann dies zu einer verbesserten Unterscheidung von Eistypen im Sommer führen. Erste Untersuchungen bezüglich der spektralen Eigenschaften unterschiedlicher Eistypen wurden zum Beispiel von PEROVICH und GRENPELL [1981] sowie SCHLOSSER [1988] durchgeführt. Derzeit werden auch von der Meereisgruppe des Alfred-Wegener-Instituts umfangreiche Untersuchungen der spektralen Albedo von Schmelzpfützen und Meereis vorgenommen. Besondere Aufmerksamkeit wird dabei auch der Bedeutung von Sedimenteinschlüssen gewidmet, die in Sommersituationen sichtbar sind.

Mit der Erkenntnis, daß durch eine spektrale Auflösung der Line-Scanner-Aufnahmen das Klassifikationspotential erhöht werden kann, wurde parallel zur vorliegenden Ausarbeitung in Zusammenarbeit mit der Hochschule Bremen ein Color-Line-Scanner entwickelt [HOLZSCHUHER, 1995; BOCHERT und HOLZSCHUHER, 1995], der die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau voneinander unterscheiden kann. Bezüglich der radiometrischen und räumlichen Auflösung ist der Color-Line-Scanner zu den in dieser Arbeit verwendeten Line-Scannern kompatibel. Der neue Line-Scanner wurde erstmals auf der Sommerkampagne REFLEX III [HARTMANN *et al.*, 1996] im Jahr 1995 nördlich von Spitzbergen erprobt. Die Auswertung der Daten bezüglich der spektralen Information ist noch nicht so weit vorangeschritten, daß eine Aussage über den Grad des Nutzens gemacht werden kann.

Der realisierte Color-Line-Scanner ist eine einfache Version eines Multispektral-Scanners, dessen Spektralbereiche an die Empfindlichkeit des menschlichen Auges angepaßt sind. Selbstverständlich sind mit einem Einsatz von Multispektral-Scannern wie dem ROSIS [VAN DER PIEPEN, 1995] und dem DAIS-7915 [OERTEL, 1993], die beide etwa 80 Spektralbereiche unterscheiden und von der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR) eingesetzt werden, noch bessere Ergebnisse bezüglich der Unterscheidung von verschiedenen Meereistypen zu erwarten. Auch einer Kooperation des Alfred-Wegener-Instituts mit der DLR

bezüglich eingehender Untersuchungen unter Verwendung der beiden genannten Multispektral-Scanner stünde prinzipiell nichts im Wege. Die betreffenden Geräte haben im Vergleich zu den Line-Scannern des Alfred-Wegener-Instituts jedoch den entscheidenden Nachteil, daß sie so schwer und groß sind, daß sie ein Polarflugzeug vollständig auslasten und ein Einsatz mit Hubschraubern völlig ausscheidet. Des weiteren genügen ihre Erfassungswinkel von 16° beziehungsweise 64° nicht den Anforderungen an die Meßdatenerfassung in den Polarregionen. Nur mit großen Erfassungswinkeln um 90° , wie sie mit den Line-Scannern des Alfred-Wegener-Instituts realisiert sind, können bei den zwangsläufig niedrigen Flughöhen genügend breite Gebiete des Untergrundes erfaßt werden. Meßflüge in größeren Höhen scheiden in den Polarregionen wegen der nahezu permanenten Wolkenbedeckung aus. Auch bei der Erfassung der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Daten mußte jeweils knapp unter der Wolkenuntergrenze geflogen werden.

Die Geräte der DLR könnten jedoch mit großem Gewinn eingesetzt werden, um zu untersuchen, welche Spektralbereiche für die Meereisfernerkundung besonders relevant sind. Für den Vergleich mit Satellitendaten müßte jedoch ein Multispektral-Scanner entwickelt werden, der einen ausreichenden Erfassungswinkel hat. Von der hohen spektralen Auflösung der Line-Scanner der DLR kann für unsere Zwecke jedoch abgesehen werden. Eine geeignete Auswahl von wenigen signifikanten Spektralbereichen wäre ausreichend.

Letzten Endes ist jedoch immer der Special-Sensor-Microwave/Imager (SSM/I) vom Defense-Meteorological-Satellite-Program (DMSP) der USA Zielsystem bei der Validierung von Satellitendaten, da seine Messungen weitgehend von der Wolkenbedeckung unabhängig sind und mit ihm eine tägliche flächendeckende Erfassung der Polarregionen möglich ist. Dies sind Grundvoraussetzungen für die Untersuchung der Variabilität der dortige Eisbedeckung und für den flächendeckenden Vergleich mit Eisdriftmodellen.

Für einen Vergleich von Radarklassifikationsergebnissen mit Daten von anderen Satellitensensoren, wie zum Beispiel dem SSM/I, ist wegen der nicht allzu großen Klassifikationssicherheit der Radardaten große Vorsicht angeraten. Vergleiche mit anderen publizierten Methoden zur SAR-Klassifikation müssen zwingend erfolgen. Dies wird deutlich am Beispiel von SKRIVER [1994], der eine SAR-Szene desselben Gebiets der hier bearbeiteten Winterdaten am 12. März 1993 klassifiziert und 13% der Fläche als offenes Wasser erkannt hat. Die Line-Scanner-Daten und hiermit auch die in der vorliegenden Arbeit durchgeführte Klassifikation enthalten dagegen kein offenes Wasser. Der von SKRIVER angegebene hohe Anteil des offenen Wassers ist auch tatsächlich unwahrscheinlich, da in den Tagen der Datenerfassung im erwähnten Gebiet Lufttemperaturen von unter -40°C herrschten und es sich nicht um ein Eisrandgebiet handelt. Auch Beobachtungen von POLARSTERN aus, die sich zur selben Zeit im vermessenen Gebiet aufhielt, konn-

ten keine offenen Wasserflächen erkennen lassen [VIEHOFF *et al.*, 1993; ergänzt durch EICKEN und HAAS, 1996]. SKRIVER gibt für Daten desselben Gebiets, aufgenommen vom SSM/I, einen erkannten Anteil von 26% offenen Wassers an und interpretiert die Differenz zu der SAR-Klassifikation als Identifikationsunsicherheit. Dieses Beispiel zeigt, welche Unsicherheiten noch immer bei der Interpretation der Satellitendaten bestehen. Sie sind im wesentlichen durch die ungenügende Kenntnis der wirklichen Eisbedeckung verursacht.

Flächendeckende und umfassende Validierungen des SSM/I wurden bisher nur von STEFFEN und SCHWEIGER [1991] und CAVALIERI *et al.* [1991] ausgiebig versucht. STEFFEN und SCHWEIGER ermittelten bei Vergleichen von Bilddaten des Landsat-Thematic-Mapper je nach Eisbedeckung und Jahreszeit Fehlinterpretationen von 1% bis 11%. CAVALIERI *et al.* ermittelten anhand von flugzeuggestützten Mikrowellenmessungen ähnliche Ergebnisse. Beide Arbeiten, und auch die neuere Arbeit von CAVALIERI und ONSTOTT [1993], in der ein Vergleich mit Daten des ERS-1-SAR durchgeführt wird, haben aber einen nachlässigen Übergang zum SSM/I gemeinsam. Statt der Rohdaten der unterschiedlichen Kanäle des SSM/I mit ihren verschiedenen Auflösungen und Empfangscharakteristiken wird zum Vergleich das grober gerasterte und aus mehreren Überflügen gemittelte Ergebnis einer Klassifikation verwendet. Hiermit wird, auch in räumlich stark variablen Eisgebieten, ein Vergleich mit ungewichteten quadratischen Gebieten von Eiskarten aus Vergleichsdaten durchgeführt. Dieser Vergleich birgt bereits methodisch große Unsicherheiten. Beim Vergleich zwischen Karten der Eiskonzentration, die aus den Daten des ERS-1-SAR gewonnen werden, mit den Daten des SSM/I muß dieser Problematik erhöhte Aufmerksamkeit zukommen.

Eine Validierung von SSM/I-Daten mit Hilfe der SAR-Daten des ERS-1 und ERS-2 steht auch auf dem Programm des vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung (BMBF) geförderten Projektverbund, Fernerkundung von Meereiseigenschaften und Prozessen (FEME) und wird vom Institut für Umweltphysik der Universität Bremen in Angriff genommen. Es ist zu wünschen, daß die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit hierfür einen Beitrag geliefert haben.

6 Literatur

- ABEL, H.; JESSEN, H.: *Kein Weg durchs Packeis. Anfänge der deutschen Polarforschung*. Schönemann-Verlag. Bremen. 1954
- ANDERSON, J.M.; WILSON, S.B.: *The Physical Basis of Current Infrared Remote Sensing Techniques and the Interpretation of Data from Aerial Surveys*. Int. J. Remote Sensing. Vol. 5, No. 1. pp. 1–18. 1984
- BARBER, D.G.; PAPAKYRIAKOU, T.N.; LEDREW, E.F.; SHOKR, M.E.: *An Examination of the relation between the Spring Period Evolution of the Scattering Coefficient (σ°) and Radiative Fluxes over Landfast Sea-Ice*. Int. J. Remote Sensing. Vol. 16, No. 17. pp. 32343–3363. 1995
- BARTON, I.J.; ZAVODY, A.M.; O'BRIEN, D.M.; CUTTEN, D.R.; SAUNDERS, R.W.; LLEWELLYN-JONES, D.T.: *Theoretical Algorithms for Satellite-Derived Sea Surface Temperatures*. J. Geophys. Res.. Vol. 94, No. D3. pp. 3365–3375. 1989
- BOCHERT, A.: *LINECALC 1.0. Programm zur Bilddatenauswertung der LINE-SCAN-Daten*. Alfred-Wegener-Institut. Bremerhaven. 1991
- BOCHERT, A.: *LINESCAN 2.0. System zur Datenerfassung mit den Line Scan Cameras*. Alfred-Wegener-Institut. Bremerhaven. 1991
- BOCHERT, A.: *Entwicklung eines Infrarot Linescanners für die Erdfernerkundung in Polargebieten und digitale Verarbeitung der erfaßten Signale*. Diplomarbeit. Alfred-Wegener-Institut. Bremerhaven. 1992
- BOCHERT, A.: *COMBSCAN 1.0. System zur Datenerfassung mit der Line-Scan-Camera und dem Infrared-Line-Scanner*. Alfred-Wegener-Institut. Bremerhaven. 1993
- BOCHERT, A.; HOLZSCHUHER, R.: *Einsatz des Color-Line-Scanners*. Alfred-Wegener-Institut. Longyearbyen. 1995
- BOCHERT, A.; WAMSER, CH.: *New Airborne Line Scanner Systems for High Resolution Sea Ice Observation*. The Global Atmosphere and Ocean System. Vol. 2. pp. 247–251. 1994
- BUETTNER, K.J.K.; KERN, C.D.: *The Determination of Infrared Emissivities of Terrestrial Surfaces*. J. Geophys. Res.. Vol. 70, No. 6. pp. 1329–1337. 1965
- BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE: *Nautischer Funkdienst. Wetter- und Eisfunk*. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Bd. III. Nachtr. 2/90. 1990

- CARROLL, J.J.; FITCH, B.W.: *Effects of Solar Elevation and Cloudiness on Snow Albedo at the South Pole*. J. Geophys. Res.. Vol. 86, No. C3. pp. 5271–5276. 1981
- CARLSTRÖM, A.; ULANDER, L.M.H.: *Validation of Backscatter Models for level and deformed Sea-Ice in ERS-1 SAR Images*. Int. J. Remote Sensing. Vol. 16, No. 17. pp. 3245–3266. 1995
- CARSEY, F.D.; BARRAY, R.G.; WEEKS, W.F.: *Introduction*. In: *Microwave Remote Sensing of Sea Ice*. Geophysical Monograph 68. pp. 1–7. American Geophysical Union. Washington. 1992
- CAVALIERI, D.J.; CRAWFORD, J.P.; DRINKWATER, M.R.; EPPLER, D.T.; FARMER, L.D.; JENTZ, R.R.; WACKERMAN, C.C.: *Aircraft Active and Passive Microwave Validation of Sea Ice Concentration from the Defense Meteorological Satellite Program Special Sensor Microwave Imager* J. Geophys. Res.. Vol. 96, No. C12. pp. 21989–22008. 1991
- CAVALIERI, D.J.; ONSTOTT, R.G.: *Arctic Coastal Polynya Observation with ERS-1 SAR and DMSP SSM/I*. *Proceedings of the First ERS-1 Symposium. Space at the Service of our Environment*. ESA. Cannes. pp. 295–299. 1993
- DIERKING, W.: *Sensitivity Studies of Selected Theoretical Scattering Models with Applications to Radar Remote Sensing of Sea Ice*. Berichte aus dem Fachbereich Physik. Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung. Bremerhaven. 1992
- DOZIER, J.; WARREN, S.G.: *Effect of Viewing Angle on the Infrared Brightness Temperature of Snow*. Water Resources Res.. Vol. 18, No. 5. pp. 1424–1434. 1982
- EICKEN, H.: *Quantifizierung von Meereiseigenschaften: Automatische Bildanalyse von Dünnschnitten und Parametrisierung von Chlorophyll- und Salzgehaltsverteilungen*. Ber. Polarforsch. 82. Bremerhaven. 1991
- EICKEN, H.; HAAS, CH.: Persönliche Mitteilung. 1996
- ESA: *ERS User Handbook*. ESA SP-1148. European Space Agency. 1993
- ESA: *ERS-1 SAR.PRI Product CCT Format*. Earthnet Programme Office. ESA. 1992
- ESA: *ERS-1 System*. ESA SP-1146. European Space Agency. 1992
- FREESE, D.: *Emissions- und Extinktionseigenschaften niedriger Wolken in der arktischen Eisrandzone*. Diplomarbeit. Alfred-Wegener-Institut. Bremerhaven. 1994

- FU, L.L.; HOLT, B.: *Seasat Views Oceans and Sea Ice with Synthetic Aperture Radar*. JPL Publication 81-120. NASA, Pasadena, California. 1982
- ENGELN-MÜLLGES, G.; REUTTER, F.: *Formelsammlung zur numerischen Mathematik mit Standard-FORTRAN-Programmen*. Wissenschaftsverlag. Bibliographisches Institut. Mannheim, Wien, Zürich. 1984
- GRASEBY INFRARED: *Detector Test Report S-18577 HCT-100-B*. Graseby Infrared und Polytec. Waldbronn-Karlsruhe. 1983
- GRASS, E.: *Shadingkorrektur in Echtzeit*. Humboldt-Universität zu Berlin. Berlin. 1986
- GRENFELL, D.K.: *Spectral Albedos of Sea Ice and Incident Solar Irradiance in the Southern Beaufort Sea*. J. Geophys. Res.. Vol. 89, No. C3. pp. 3573-3580. 1984
- HANSEN, T.: *Jens Munk. Über den Nordpol nach China?* Erdmann-Verlag. Tübingen, Basel. 1974
- HABERÄCKER, P.: *Digitale Bildverarbeitung. Grundlagen und Anwendungen*. Hanser-Verlag. München, Wien. 1985
- HARALICK, R.M.; SHANMUGAM, K.; DINSTEN, I.: *Textural features for image classification*. IEEE Trans. Syst. Man Cybern.. Vol. 3. pp. 610-621. 1973
- HARTMANN, J.: KYSS. *Datenverarbeitungsprogramm*. Installiert auf dem Rechnernetz des Alfred-Wegener-Instituts. Adelaide, Bremerhaven. 1989 - 1995
- HARTMANN, J.; BOCHERT, A.; FREESE, D.; KOTTMEIER, CH; NAGEL, D.; REUTER, A.: *Radiation and Eddy Flux Experiment 1995 (REFLEX III)*. Ber. Polarforsch.. In Vorbereitung. Bremerhaven. 1996
- HARTMANN, J.; KOTTMEIER, CH.; WAMSER, CH.; AUGSTEIN, E.: *Aircraft Measured Atmospheric Momentum, Heat and Radiation Fluxes over Arctic Sea Ice*. In: *The Polar Oceans and Their Role in Shaping the Global Environment: the Nansen centennial volume*. Geophysical Monograph 85. American Geophysical Union. Washington. 1994
- HELLMANN, H.: *Abhängigkeiten elastischer und rheologischer Eigenschaften des Meereises vom Eisgefüge*. Ber. Polarforsch. 69. Bremerhaven. 1990
- HIRCHE, H.J.; KATTNER, G.: *The 1993 Northeast Water Expedition. Scientific Cruise Report of RV Polarstern". Arctic Cruises ARK IX/2 and 3, USCG Polar Sea" Cruise NEWP and the NEWLand Expedition*. Ber. Polarforsch. 142. Bremerhaven. 1994

- HOLZSCHUHER, R.: *Entwicklung eines Color-Line-Scanners für die Erdfernerkundung*. Diplomarbeit. Hochschule Bremen und Alfred-Wegener-Institut. Bremen, Bremerhaven. 1995
- JÄHNE, B.: *Digitale Bildverarbeitung*. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo. 1989
- KERNIGHAN, B.W.; RITCHIE, D.M.: *Programmieren in C*. Hanser-Verlag. München, Wien. 1990
- KEY, J.; HAEFLIGER, M.: *Arctic Ice Surface Temperature Retrieval from AVHRR Thermal Channels*. J. Geophys. Res.. Vol. 97, No. D5. pp. 5885–5893. 1992
- KHOROS GROUP: *KHOROS MANUAL Vol. I-III*. Department of Electrical and Computer Engineering. University of New Mexico. Albuquerque. 1991
- KIM, Y.S.: *Theoretical and Experimental Study of Radar Backscatter from Sea Ice*. Ph. D. Dissertation. University of Kansas. Lawrence, Kansas. 1984
- KOTTMEIER, CH.: *User Handbook for the POLAR 2 and POLAR 4 Research Aircraft*. Alfred-Wegener-Institut. Bremerhaven. 1993
- KOTTMEIER, CH; HARTMANN, J.; WAMSER, CH.; BOCHERT, A.; LÜPKES, CH.; FREESE, D.; COHRS, W.: *Radiation and Eddy Flux Experiment 1993 (REFLEX II)*. Ber. Polarforsch. 133. Bremerhaven. 1994
- KWOK, R.; CUNNINGHAM, G.F.: *Backscatter Characteristics of the Winter Ice Cover in the Beaufort Sea*. J. Geophys. Res.. Vol. 99, No. C4. pp. 7787–7802. 1994
- KWOK, R.; RIGNOT, E.; HOLT, B.; ONSTOTT, R.: *Identification of Sea Ice Types in Spaceborne Synthetic Aperture Radar Data*. J. Geophys. Res.. Vol. 97, No. C2. pp. 2391–2402. 1992
- LAUR, H.: *Derivation of Backscatter Coefficient σ° in ERS-1.SAR.PRI Products*. ESA. 1992
- LEE, A.C.L.: *A Study of the Continuum Absorption within the 8-13 μm Atmospheric Window*. Quart. J. R. Met. Soc.. Vol. 99. pp. 490–505. 1973
- LEMKE, P.: *A Coupled One-Dimensional Sea Ice–Ocean Model*. J. Geophys. Res.. Vol. 92. pp. 13164–13172. 1987
- LORENZ, D.: *Die radiometrische Messung der Boden- und Wasseroberflächentemperatur und ihre Anwendung insbesondere auf dem Gebiet der Meteorologie*. Zeitschrift für Geophysik. Band 39. pp. 627–701. 1973

- LORENZ, D.: *Zur Methodik der radiometrischen Messung der Wasseroberflächentemperatur*. Meteorol. Rdsch.. 24. Jg, Heft 5. pp. 148 – 156. 1971
- MADSEN, S.N.: *Speckle Theory. Modelling, Analysis and Applications related to Synthetic Aperture Radar Data*. Ph. D. Thesis. LD 62. Electromagnetics Institute. Technical University of Denmark. 1986
- MINNETT, P.J.: *The Regional Optimization of Infrared Measurements of Sea Surface Temperature From Space*. J. Geophys. Res.. Vol. 95, No. C8. pp. 13497–13510. 1990
- NYSTUEN, J.A.; GARCIA, F.W.: *Sea Ice Classification Using SAR Backscatter Statistics*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 30. No. 3. 1992
- OERTEL, D.: *Detailed Information about the Development Status of DAIS-7915, its Calibration Facility and the Data Processing*. DLR. Oberpfaffenhofen. 1993
- ONSTOTT, R.G.: *SAR and Scatterometer Signatures of Sea Ice*. In: *Micro-wave Remote Sensing of Sea Ice*. Geophysical Monograph 68. pp. 73–104. American Geophysical Union. Washington. 1992
- OTSU, N.: *A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms*. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics. Vol. SMC-9. No. 1. pp. 62–66. 1978
- PARKINSON, C.L.; CAVALIERI, D.J.: *Arctic Sea Ice 1973–1987. Seasonal, Regional, and Interannual Variability*. J. Geophys. Res.. Vol. 94. pp. 14499–14523. 1989
- PCI INC.: *PCI Software. Version 5.3 EASI/PACE*. Ontario. Canada. 1994
- PETERMANN, A.: *Die Erforschung der arktischen Central-Region durch die Deutsche Nordfahrt*. Mittheilungen aus Justus Perthes Geographischer Anstalt. Erg.-H. 16. pp. 1–14. Gotha. 1865
- PETTERSSON, M.I.; ASKNE, J.; CAVALIERI, D.J.: *Classification of Ice Properties in the Arctic during Freeze-Up using ERS-1 SAR and SSM/I*. Proceedings 14th EARSel Symposium. pp. 211–217. 1994
- PERIVICH, D.K.; GRENFELL, T.C.: *Laboratory Studies of the Optical Properties of Young Sea Ice*. Journal of Glac.. Vol. 27. pp. 331–346. 1981
- PIEPEN, HEINZ VAN DER: *Nutzung und Anwendung des abbildenden Spektrometers ROSIS*. DLR-Nachrichten. Köln. 1995

- PRELLER, R.H.; WALSH, J.E.; MASLANIK, J.A.: *The Use of Satellite Observation in Ice Cover Simulation*. In: *Microwave Remote Sensing of Sea Ice*. Geophysical Monograph 68. pp.1-7. American Geophysical Union. Washington. 1992
- PRICE, J.C.: *Estimating Surface Temperatures from Satellite Thermal Infrared Data — A Simple Formulation for the Atmospheric Effect*. Remote Sensing of Environment. Vol. 13. pp. 353-361. 1983
- PRUPPACHER, H.R.; KLETT, J.D.: *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Reidel Publishing Company. Dordrecht, Boston, London. 1980
- RASCHKE, E.: *Multiple Scattering Calculation of the Transfer of solar radiation in an Atmosphere-Ocean System*. Cont. Atm. Phys.. 45. pp. 1-19. 1972
- RASCHKE, E.: *Energiehaushalt und Zirkulation der Atmosphäre*. Harald Boldt Verlag KG. Boppard. 1978
- REES, W.G.; JAMES, S.P.: *Angular Variation of the Infrared Emissivity of Ice and Water Surfaces*. Int. J. Remote Sensing. Vol. 13, No. 15. pp. 2873-2886. 1992
- ROBERTS, R.E.; SELBY, J.E.A.; BIBERMAN, L.M.: *Infrared Continuum Absorption by Atmospheric Water Vapour in the 8-12 μ Window*. Appl. Optics. 15. pp. 2085. 1976
- SABINS, F.F.: *Remote Sensing. Principles and Interpretation*. Freeman and Company. New York. 1986
- SACHS, L.: *Angewandte Statistik*. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York. 1992
- SCHLOSSER, E.: *Optische Messungen auf dem antarktischen Meereis*. Leopold-Franzens-Universität. Innsbruck. 1988
- SCHMIDT-GRÖTTRUP, M.: Persönliche Mitteilung. 1992 und 1995.
- SHOKR, M.E.: *Evaluation of Second-Order Texture Parameters for Sea Ice Classification from Radar Images*. J. Geophys. Res.. Vol. 96. No. C6. pp. 10625-10640. 1991
- SKRIVER, H.: *Extraction of Sea Ice Parameters from Synthetic Aperture Radar Images*. Ph. D. Thesis. LD 74. Electromagnetics Institute. Technical University of Denmark. 1989
- SKRIVER, H.: *Determination of Sea Ice Parameters from SAR Data*. Proceedings 9th EARSel Symposium. pp. 143-148. 1989

- SKRIVER, H.: *Sea Ice Type Concentration from MIZEX-87 SAR Data*. International Geoscience and Remote Sensing Symposium. pp. 415-418. 1991
- SKRIVER, H.: *The EMI Image Header System for Remote Sensing Images*. R 463. Electromagnetics Institute. Technical University of Denmark. 1992
- SKRIVER, H.: *On the Accuracy of Estimation of Ice Type Concentration from ERS-1 SAR Images*. Proceedings 14th EARSeI Symposium. Gothenborg. 1994
- SLEVOGT, H.: *Technische Optik*. Sammlung Göschen. W. de Gruyter. Berlin, New York. 1974
- SMITH, D.M.; BARRETT, E.C.; SCOTT, J.C.: *Sea-Ice Type Classification from ERS-1 SAR Data based on Grey-Level and Texture Information*. Polar Record 31 (177). pp. 135-146. 1995
- SPANN, M.; WILSON R.: *A Quad-Tree Approach to Image Segmentation which combines Statistical and Spatial Information*. Pattern Recognition. Vol. 18. pp. 257-269. 1985
- STEFFEN, K.; HEINRICH, J.: *Feasibility of Sea Ice Typing with Synthetic Aperture Radar (SAR): Merging of Landsat Thematic Mapper and ERS-1 SAR Satellite Imagery*. J. Geophys. Res.. Vol. 99, No. C11. pp. 22413-22424. 1994
- STEFFEN, K.; SCHWEIGER, A.: *NASA Team Algorithm for Sea Ice Concentration Retrieval from Defense Meteorological Satellite Program Special Sensor Microwave Imager: Comparison with Landsat Satellite Imagery*. J. Geophys. Res.. Vol. 96, No. C12. pp. 21971-21987. 1991
- SUN, Y.; CARLSTRÖM, A.; ASKNE, J.: *SAR Image Classification of Ice in the Gulf of Bothnia*. Int. J. Remote Sensing. Vol. 13, No. 13. pp. 2489-2514. 1992
- SWINBANK, W.C.: *Long Wave Radiation from Clear Skies*. Quart. J. R. Met. Soc.. Vol. 89. pp. 339-348, 1973
- THOMSON COMPOSANTS MILITAIRES ET SPATIAUX: *CCD Products*. Courbevoie Cedex. 1992
- TRIMBLE NAVIGATION: *S'Vee Six Manual. Revision B*. Trimble Navigation Limited. 1992
- ULABY, F.T.; MOORE R.K.; FUNG, A.K.: *Microwave Remote Sensing. Active and Passive. Vol. I: Fundamentals and Radiometry*. Addison-Wesley Publishing Company. Reading, Massachusetts. 1981

- ULABY, F.T.; MOORE R.K.; FUNG, A.K.: *Microwave Remote Sensing. Active and Passive. Vol. II: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory.* Addison-Wesley Publishing Company. Reading, Massachusetts. 1982
- ULABY, F.T.; MOORE R.K.; FUNG, A.K.: *Microwave Remote Sensing. Active and Passive. Vol. III: From Theory to Applications.* Addison-Wesley Publishing Company. Reading, Massachusetts. 1986
- ULABY, F.T.; KOUYATE, F.; BERISCO, B.; WILLIAMS, L.T.H.: *Textural Information in SAR Images.* IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. GE-24. pp. 235-245. 1986
- ULANDER, L.M.H.; CARLSTRÖM, A.; ASKNE, J.: *Effect of Frost Flowers, rough saline Snow and Slush on the ERS-1 SAR Backscatter of thin Arctic Sea-Ice.* Int. J. Remote Sensing. Vol. 16, No. 17. pp. 3287-3305. 1995
- VIEHOFF, T.; EICKEN, H.; RAMSEIER, R.; WADHAMS, P.: *Sea Ice Conditions during ARK IX/1a,b with RV POLARSTERN: Shipboard Observations and Satellite Imagery.* Berichte aus dem Fachbereich Physik. Report 43. Alfred-Wegener-Institut. 1993
- VINJE, T.; KVAMBEKK, Å.S.: *Barents Sea Drift Ice Characteristics.* pp. 59-68 in SAKSHAUG, E.; HOPKINS, C.C.E.; ØRITSLAND, N.A. (Hrsg.): *Proceedings of the Pro Mare Symposium on Polar Marine Ecology, Trondheim, May 1990.* Polar Research. Oslo. 1991
- WAHL, F.M.: *Digitale Bildsignalverarbeitung.* Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong. 1989
- WEBER, H.: *Einführung in die Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik für Ingenieure.* Teubner Studienskripte. Stuttgart. 1988
- WESZKA, J.S.; ROSENFELD, A.: *Histogram Modification for Threshold Selection.* IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics. Vol. SMC-9. No. 1. pp. 38-52. 1978
- WILSON, R.; SPANN, M.: *Image Segmentation and Uncertainty.* Research Studies Press LTD. Wiley & Sons Inc.. New York, Chichester, Toronto, Brisbane und Singapore. 1988

A Meereistypen

Damit die Klassifikation der Line-Scanner- und Radardaten einheitlich durchgeführt werden, sind im folgenden die wichtigsten Definitionen der Eisbezeichnungen wiedergegeben, die bei der Fernerkundung von Meereis in Betracht kommen. Die Definitionen wurden vom BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE [1990] übernommen.

A.1 New Ice – Neueis

Eine allgemeine Bezeichnung für kürzlich gebildetes Eis, die freischwebende Eisnadeln und Eisplättchen, Eisschlamm, Schneeschlamm (Schneebrei) und Eisbreiklumpchen einschließt. Diese Eisformen sind aus Eiskristallen zusammengesetzt, die nur leicht zusammengefroren sind und nur beim Schwimmen eine bestimmte Form annehmen. Nilas ist eine dünne elastische Eiskruste, von matter Oberfläche.

Grease Ice – Eisschlamm (GR): Kennzeichnet ein späteres Stadium des Gefriervorgangs als die Eisnadeln oder Eisplättchen. Die Eisnadeln oder Eisplättchen sind zusammengefügt und bilden an der Wasseroberfläche eine dünne suppenartige Schicht. Eisschlamm reflektiert wenig Licht und gibt der See ein mattes Aussehen.

Nilas – Nilas: Eine dünne elastische Eiskruste, von matter Oberfläche und bis zu 10 cm dick. Sie wird durch Seegang und Dünung leicht verbogen; durch seitlichen Druck entsteht das auf- und untergeschobene Eis. Unterteilungen sind dunkler Nilas und heller Nilas.

Dark Nilas – Dunkler Nilas (DN): Nilas, weniger als 5 cm dick und von sehr dunkler Farbe.

Light Nilas – Heller Nilas (LN): Nilas, mehr als 5 cm dick und von hellerer Farbe als dunkler Nilas.

Pancake Ice – Pfannkucheneis (PC): Vorwiegend kreisförmige Eisstücke mit einem Durchmesser von 30 cm – 3 m, bis zu 10 cm dick und mit erhöhten Rändern, die durch das Aneinanderstoßen der einzelnen Stücke entstehen. Es wird bei leichter Dünung aus dem Eisschlamm, Schneeschlamm oder aus Eisbreiklumpchen gebildet, oder es entsteht durch Zerbrechen der Eishaut des Nilas und, bei schwerem Seegangs- und Dünungsverhältnissen, des grauen Eises. Es bildet sich manchmal auch innerhalb der Wassersäule an der Grenzschicht zwischen zwei physikalisch verschiedenen Wasserkörpern, von der es an die Oberfläche aufschwimmt. Pfannkucheneis kann rasch weite Wasserflächen bedecken.

A.2 Young Ice – Junges Eis

Eis im Übergangsstadium vom Nilas zum erstjährigen Eis, 10 cm – 30 cm dick. Es kann unterteilt werden in graues Eis und grauweißes Eis.

Grey Ice – Graues Eis (GI): Junges Eis, 10 cm – 15 cm dick. Es ist weniger elastisch als Nilas und wird durch die Dünung zerbrochen. Durch seitlichen Druck wird es übereinandergeschoben.

Grey-White Ice – Grauweißes Eis (GW): Junges Eis, 15 cm – 30 cm dick. Durch seitlichen Druck wird es mehr gepreßt als übereinandergeschoben.

A.3 First-Year Ice – Erstjähriges Eis (FY)

Meereis, das sich aus dem jungen Eis entwickelte und in nur einem Winter gebildet wurde; Eisdicke 30 cm bis 2 m. Es kann unterteilt werden in dünnes erstjähriges Eis/weißes Eis, mitteldickes erstjähriges Eis und dickes erstjähriges Eis.

Thin First-Year Ice – Dünnes erstjähriges Eis: Erstjähriges Eis, 30 cm – 70 cm dick.

Medium First-Year Ice – Mitteldickes erstjähriges Eis: Erstjähriges Eis, 70 cm – 120 cm dick.

Thick First-Year Ice – Dickes erstjähriges Eis: Erstjähriges Eis, mehr als 120 cm dick.

A.4 Old Ice – Altes Eis

Meereis, das die Eisschmelze von mindestens einem Sommer überdauert hat. Die meisten seiner morphologischen Merkmale sind glatter als beim erstjährigen Eis. Es wird unterteilt in zweijähriges Eis und mehrjähriges Eis.

Second-Year Ice – Zweitjähriges Eis (SY): Altes Eis, das die Eisschmelze eines Sommers überdauert hat mit einer typischen Dicke bis zu 2,5 m und mehr. Da es dicker und weniger dicht als das erstjährige Eis ist, ragt es höher über den Wasserspiegel hinaus. Gegenüber dem mehrjährigen Eis entsteht während des Schmelzens auf dem Eis ein regelmäßiges Muster von zahlreichen kleinen Pfützen. Schneefreie Flecken und Pfützen haben gewöhnlich eine grünlich-blaue Farbe.

Multi-Year Ice – Mehrjähriges Eis (MY): Altes Eis, bis zu 3 m und mehr dick; überdauerte die Eisschmelze von mindestens zwei Sommern und ist fast salzfrei. Die Preßeishügel sind noch mehr abgerundet als beim zweijährigen Eis. Wo eine Schneedecke fehlt, hat das Eis gewöhnlich eine blaue Farbe. Während der Eisschmelze bilden sich auf dem Eis große, untereinander verbundene Pfützen; das Abflußsystem ist gut entwickelt.

A.5 Erscheinungsformen

Bare Ice – Schneefreies Eis: Eis ohne Schneedecke.

Brash Ice – Trümmereis (BR): Ansammlung von kleinen Eisbruchstücken (Durchmesser kleiner als 2 m); Trümmerform von anderen Eisarten.

Crack – Reiß/Spalte: Jeder Bruch im Festeis, zusammenhängendem Eis oder in einer einzelnen Eisscholle, der zu einer Trennung von wenigen cm bis zu 1 m führen kann.

Finger Rafting – Auf- und Unterschieben des Eises: Eine Art des Über-einanderschiebens des Eises, wodurch Teile einer Eisscholle fingerartig abwechselnd über und unter eine andere Scholle geraten. Tritt im allgemeinen bei Nilas und beim grauen Eis auf.

Floe – Eisscholle: Ein verhältnismäßig flaches Stück Meereis, dessen Durchmesser 20 m oder mehr beträgt. Je nach Größe werden die Bezeichnungen aus Tabelle A.1.1 unterschieden.

riesig große Eisschollen	giant floes	Ø über 10 km
sehr große Eisschollen	vast floes	Ø = 2 km – 10 km
große Eisschollen	big floes	Ø = 500 m – 2 km
mittelgroße Eisschollen	medium floes	Ø = 100 m – 500 m
kleine Eisschollen	small floes	Ø = 20 m – 100 m

Tabelle A.1.1: Bezeichnungen der Schollengrößen und ihre Durchmesser.

Lead – Rinne: Jeder befahrbare Bruch oder Durchgang im Meereis.

Level Ice – Ebenes Eis: Meereis, das noch nicht deformiert worden ist.

Open Water – Offenes Wasser (OW): Eine große, unbehindert befahrbare Wasserfläche.

Puddle – Pfütze (PU): Eine auf dem Eis vorhandene Ansammlung von Schmelzwasser, hauptsächlich durch schmelzenden Schnee hervorgerufen, tritt aber auch im vorgeschrittenen Stadium der Eisschmelze auf.

Rafted Ice – Übereinandergeschobenes Eis: Eine Form des deformierten Eises, gebildet durch das Aufschieben eines Eisstückes auf ein anderes.

Ridge – Preßeisrücken: Aufgepreßtes Eis in Form eines Rückens oder Walles, wobei die Eisschollen übereinandergehäuft wurden. Der Rücken kann auch verwittert sein. Sein im Wasser nach unten ragender Teil wird Eiskiel genannt.

Shearing – Scherbewegung: Ein Treibeisgebiet ist einer Scherung unterworfen, wenn die Geschwindigkeit des Eises sich eindeutig in der Normalen zur Bewegungsrichtung ändert, so daß Scherkräfte auftreten.

Thaw Holes – Schmelzwasserlöcher: Vertikale Löcher im Meereis; sie entstehen, wenn die auf der Eisoberfläche vorhandenen Pfützen sich durch das Eis bis zum darunterliegenden Wasser hindurchschmelzen.