

# **Untersuchungen zur Abbildung biogener und anthropogener Oberflächenfilme auf dem Meer mit Hilfe von Radarsensoren**

Dissertation zur Erlangung des  
Doktorgrades der Naturwissenschaften  
im Fachbereich Geowissenschaften  
der Universität Hamburg

vorgelegt von

**Martin Gade**

aus Lüneburg

Hamburg 1996

Als Dissertation angenommen vom Fachbereich  
Geowissenschaften der Universität Hamburg

auf Grund der Gutachten von Prof. Dr. Werner Alpers

und PD Dr. Heinrich Hühnerfuß

Hamburg, den 05. Juni 1996

Professor Dr. Martin Dunst  
(Sprecher des Fachbereichs Geowissenschaften)

## **Studies on the imaging of biogenic and anthropogenic surface films on the sea using radar sensors**

*Keywords: surface films, radar sensors, oil spill detection*

**Abstract** - Radar signatures of sea surface films of different origin are studied, which have been acquired by the airborne multifrequency/multipolarization scatterometer HELISCAT as well as by the multifrequency/multipolarization *Shuttle Imaging Radar-C / X-Band Synthetic Aperture Radar* („SIR-C/X-SAR“) during the two shuttle missions in 1994. During both missions, controlled surface film experiments were performed in the German Bight, where various artificial biogenic substances as well as mineral oil were deployed on the sea surface. The goal of these experiments was to study the radar signatures caused by the surface films of different visco-elastic properties. In addition, results of laboratory experiments which were carried out in the wind-wave tank of the University of Hamburg are presented. The knowledge of the specific radar signatures of the different surface films is necessary to allow a better discrimination and, therefore, an effective oil surveillance.

From the results obtained by HELISCAT it is shown that the damping behavior (i.e., the ratio of the radar backscatter from a slick-free and a slick-covered water surface) of the same substance depends strongly on the wind speed, which is explained by means of the source terms of the action balance equation. Damping ratios of natural surface films measured by HELISCAT are found to agree well with those obtained from artificial biogenic surface films. Furthermore, a model is developed to simulate measured damping ratios for different surface films at high wind speeds ( $> 10$  m/s). The simulated values are in good agreement with the experimental results.

The comparison of results obtained by HELISCAT and by SIR-C/X-SAR shows that the damping ratios agree well at L band (1.25 GHz) whereas the SAR measures lower values at C and X band (5.3 and 9.6 GHz, respectively). This effect is hypothesized to be due to a lower signal-to-noise ratio of SIR-C/X-SAR and to the larger size of its resolution cell. However, recent results obtained by an airborne SAR over natural surface films give rise to the assumption that the measured differences at C and X band are caused by the different imaging mechanisms of the different radar sensors.

SIR-C/X-SAR images from natural surface films and mineral oil spills are analyzed and the measured damping ratios are compared. It turns out that the radar signatures are most different at L band where the signal-to-noise-ratio is sufficiently high. For mineral oil spills the damping ratio increases with Bragg wavenumber, whereas for natural surface films a minimum of the damping behavior is measured at C band.

The results from the wind-wave tank measurements show that at X and Ka band the radar backscattering from a slick-free water surface is caused by bound as well as by free propagating ripples. In the presence of a monomolecular surface film at certain wind speeds only bound or only free propagating ripples are responsible for the backscattering at X band, which can explain higher measured damping ratios.

It is concluded that the discrimination of natural and man-made surface films seems to be possible at low to moderate wind speeds whereas it is problematic at high wind speeds. Further studies of the differences between the experimental results of the different radar sensors are needed.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zusammenfassung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Einleitung.....</b>	<b>5</b>
2.1 Ölverschmutzung der Weltmeere.....	5
2.2 Die beiden SIR-C/X-SAR-Missionen 1994 .....	8
<b>3 Theoretische Grundlagen .....</b>	<b>11</b>
3.1 Radar-Rückstreuung an der Wasseroberfläche .....	11
3.1.1 Bragg-Streuung .....	11
3.1.2 Andere Streumechanismen .....	12
3.1.3 Grundlagen der Polarimetrie .....	14
3.2 Energiefluß an der Wasseroberfläche.....	15
3.2.1 Viskose und Marangoni-Dämpfung .....	15
3.2.2 Andere Quellterme .....	17
3.3 Morphologie monomolekularer Oberflächenfilme .....	19
3.4 Erzeugung gebundener Rippelwellen .....	21
<b>4 Beschreibung der unterschiedlichen Sensoren .....</b>	<b>25</b>
4.1 HELISCAT.....	25
4.2 SAR-Sensoren an Bord der "Endeavour" .....	27
4.2.1 X-Band ("X-SAR").....	28
4.2.2 L- und C-Band ("SIR-C") .....	29
4.3 Sensoren am Windwellenkanal.....	30
4.3.1 Windwellenkanal.....	30
4.3.2 X- und Ka-Band.....	31
4.3.3 Wellendraht- und Lasersonde.....	33
<b>5 Ergebnisse der Messungen mit dem HELISCAT.....</b>	<b>35</b>
5.1 Oleylalkohol bei mittlerer Windgeschwindigkeit .....	35
5.1.1 Zeitliche Entwicklung des Dämpfungsverhaltens.....	36
5.1.2 Unterschiedliche Flugrichtungen und Polarisationen .....	37
5.1.3 Diskussion der Ergebnisse.....	37
5.2 Verschiedene gelöste Substanzen vor Helgoland .....	39
5.2.1 Vergleich zwischen gelösten und ungelösten Substanzen .....	41
5.2.2 Vergleich zwischen verschiedenen Substanzen .....	43
5.2.3 Diskussion der Ergebnisse.....	45
5.3 Natürliche Oberflächenfilme vor Amrum.....	47
5.3.1 Vergleich zwischen Filmabschnitten unterschiedlicher Dämpfung ...	49
5.3.2 Vergleich mit den künstlichen Oberflächenfilmen .....	50
5.3.3 Diskussion der Ergebnisse.....	51
5.4 Oberflächenfilme bei hoher Windgeschwindigkeit .....	53
5.4.1 Vergleich innerhalb der biogenen Substanzen .....	55

5.4.2 Vergleich zwischen Mineralöl und biogenen Substanzen.....	60
5.4.3 Vergleich mit den im April gewonnenen Daten.....	62
5.4.4 Diskussion der Ergebnisse .....	63
5.5 Zusammenfassung der HELISCAT-Ergebnisse .....	77
<b>6 Analyse von SAR-Aufnahmen verschiedener Testgebiete.....</b>	<b>81</b>
6.1 Erstes Oberflächenfilm-Experiment / April 1994 .....	83
6.1.1 Ergebnisse der Auswertung der SAR-Aufnahmen .....	84
6.1.2 Diskussion der Ergebnisse .....	86
6.2 Zweites Oberflächenfilm-Experiment / Oktober 1994.....	90
6.2.1 Dämpfungsverhältnisse der Oberflächenfilme .....	92
6.2.2 Polarimetrische Untersuchungen.....	98
6.2.3 Diskussion der Ergebnisse .....	101
6.3 Beispiele für natürliche Oberflächenfilme.....	107
6.3.1 Natürliche Oberflächenfilme in der Nordsee.....	108
6.3.2 Natürliche Oberflächenfilme in der Ostsee .....	113
6.3.3 Natürliche Oberflächenfilme im östlichen Pazifik .....	114
6.3.4 Diskussion der Ergebnisse .....	116
6.4 Beispiele für Mineralölfilme .....	120
6.4.1 Inhomogener Mineralölfilm in der Ostsee.....	120
6.4.2 Mineralölfilm in einem Regengebiet im Atlantik .....	123
6.4.3 Mineralölfilme im Persischen Golf .....	126
6.4.4 Mineralölfilme in der Straße von Malacca .....	127
6.4.5 Polarimetrische Untersuchungen.....	130
6.4.6 Diskussion der Ergebnisse .....	131
6.5 Zusammenfassung der SAR-Ergebnisse .....	133
<b>7 Ergebnisse der Messungen im Windwellenkanal.....</b>	<b>137</b>
7.1 Erzeugung gebundener Rippelwellen .....	138
7.2 Winderzeugte Rippelwellen.....	143
7.3 Filmbedeckte Wasseroberfläche .....	149
7.4 Zusammenfassung der Meßergebnisse .....	154
<b>8 Fazit und Ausblick.....</b>	<b>157</b>
<b>9 Danksagung .....</b>	<b>159</b>
<b>10 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>161</b>



## 1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden Datensätze ausgewertet, die mit Hilfe mehrerer Radarsensoren im Rahmen der Beteiligung der Universität Hamburg an den beiden deutsch-italienisch-amerikanischen *Shuttle Imaging Radar-C / X-Band Synthetic Aperture Radar*- („SIR-C/X-SAR“-) Missionen 1994 über zahlreichen Seegebieten gewonnen wurden. Dabei handelt es sich einerseits um Daten des hubschraubergetragenen Mehrfrequenz-Multipolarisations-Scatterometers HELISCAT der Universität Hamburg und andererseits um diverse SIR-C/X-SAR-Aufnahmen, die von Bord der amerikanischen Raumfähre *Endeavour* aus gemacht wurden. Diese SAR-Aufnahmen wurden bei verschiedenen Radarfrequenzen, Polarisationen und Einfallswinkeln aufgenommen und zeigen sowohl biogene als auch anthropogene Oberflächenfilme auf dem Meer. Damit steht erstmals ein Datensatz großer Bandbreite zur Verfügung, der sowohl den Vergleich von Radarsignaturen unterschiedlicher Oberflächenfilme bei unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen als auch den Vergleich zwischen den verschiedenartigen Radarsensoren erlaubt.

Um die Radarsignaturen von Oberflächenfilmen bekannter Zusammensetzung untersuchen zu können, fanden im April und im Oktober 1994 Experimente in der Deutschen Bucht statt, während derer sowohl künstliche biogene Oberflächenfilme als auch Mineralölfilme auf die Wasseroberfläche ausgebracht wurden. Von der Raumfähre *Endeavour* aus wurden SIR-C/X-SAR-Aufnahmen dieser Oberflächenfilme gemacht, und parallel fanden zahlreiche Überflüge mit dem HELISCAT statt. Die experimentellen Ergebnisse werden verglichen mit denjenigen weiterer Oberflächenfilm-Experimente mit dem HELISCAT sowie mit weiteren SIR-C/X-SAR-Aufnahmen von natürlichen Oberflächenfilmen und von Mineralölfilmen an verschiedenen Stellen der Weltmeere. Die Datenanalyse wird ergänzt durch die Auswertung unterstützender Labormessungen, die am Windwellenkanal der Universität Hamburg durchgeführt wurden.

Ziel der Untersuchungen ist es, einen Beitrag zum besseren Verständnis der Radarsignaturen zu liefern, die durch Oberflächenfilme unterschiedlicher viskoelastischer Eigenschaften auf dem Meer verursacht werden. Diese können nicht nur anthropogenen Ursprungs sein (wie Mineralölfilme, die z.B. durch das illegale Ablassen von Öl und Bilgenwasser von Schiffen entstehen), sondern auch biogenen Ursprungs (wie die natürlichen Oberflächenfilme, die sich während der Planktonblüte in Küstengewässern an der Wasseroberfläche ansammeln). Da durch Oberflächenfilme beiderlei Ursprungs die kurzen Wasserwellen gedämpft werden, die für die Rückstreuung von Mikrowellen vergleichbarer Wellenlänge verantwortlich sind, wird eine Unterscheidung mit Hilfe von Radarsensoren erschwert, wenn nur eine Radarfrequenz verwendet wird. Diese Unterscheidung ist aber beispielsweise für eine effektive Ölüberwachung der Weltmeere vom Weltraum aus nötig. Sowohl beim SIR-C/X-SAR als auch beim HELISCAT handelt es sich um mehrfrequente Radarsensoren, so daß als Maß für das spezifische Dämpfungsvermögen der Oberflächenfilme das gemessene Dämpfungsverhältnis, also das Verhältnis von rückgestreuter Radarleistung über film-

freier und filmbedeckter Wasseroberfläche, als Funktion der („Bragg-“) Wellenzahl der Wasserwellen betrachtet werden kann.

Die Auswertung der mit dem HELISCAT gewonnenen Meßdaten ergibt, daß dieselbe biogene Substanz (Oleylalkohol, „OLA“) bei unterschiedlichen Windverhältnissen ein verändertes Dämpfungsverhalten zeigt. Dieser Effekt kann mit Hilfe der Quellterme der Strahlungsbilanz-Gleichung erklärt werden. Qualitative Abschätzungen des Energieeintrags durch den Wind und durch nichtlineare Wellenwechselwirkung einerseits und des Energieverlusts durch viskose Dissipation und Wellenbrechen andererseits ermöglichen es, die gemessenen Unterschiede, vor allem den deutlichen Anstieg im Dämpfungsverhalten bei mittleren Bragg-Wellenzahlen, zu erklären.

Erstmals wurden mit dem HELISCAT neben künstlichen biogenen Oberflächenfilmen verschiedener Zusammensetzung (und verschiedener Morphologie) auch natürliche Oberflächenfilme unter denselben meteorologischen Bedingungen überflogen. Anhand des gewonnenen Datensatzes kann gezeigt werden, daß durch die gewählten künstlichen biogenen Substanzen das Dämpfungsverhalten der stark dämpfenden Bereiche der natürlichen Oberflächenfilme im Bereich mittlerer bis großer Wellenzahlen nachgebildet werden kann. Unterschiede im Dämpfungsverhalten treten nur bei niedrigen Wellenzahlen auf, was auf die wesentlich größere Ausdehnung der natürlichen Oberflächenfilme zurückgeführt wird.

Die HELISCAT-Messungen des zweiten Oberflächenfilm-Experimentes, das bei hoher Windgeschwindigkeit (über 10 m/s) stattfand, liefern deutlich niedrigere Dämpfungsverhältnisse als sie während des ersten Experimentes bei mittlerer Windgeschwindigkeit (5 m/s) gemessen wurden. Dieser Effekt kann ebenfalls durch eine qualitative Betrachtung der Quellterme der Strahlungsbilanz-Gleichung erklärt werden: Bei hohen Windgeschwindigkeiten überwiegen die Einflüsse der Oberflächenfilme auf den Energieeintrag durch den Wind und auf das Wellenbrechen gegenüber ihren Unterschieden in der viskosen Dissipation, so daß unterschiedliche Oberflächenfilme ein vergleichbares Dämpfungsverhalten zeigen.

Für diesen Datensatz wird zusätzlich ein theoretischer Ansatz geliefert, mit dessen Hilfe die gemessenen Dämpfungskurven in guter Übereinstimmung simuliert werden können. Damit ist es erstmals möglich, mit dem HELISCAT gemessene Daten auch quantitativ zu reproduzieren. Aufgrund dieser Simulationen kann gezeigt werden, daß sich das theoretische Dämpfungsverhalten der unterschiedlichen Oberflächenfilme bei hoher Windgeschwindigkeit qualitativ noch leicht unterscheidet, daß im Bereich der betrachteten Wellenzahlen ein Maximum im Dämpfungsverhalten (wie es sich aus der *Marangoni-Dämpfungstheorie* ergibt) allerdings nicht zu erwarten ist.

Der Vergleich mit den Dämpfungsverhältnissen, die die Bildanalyse der SIR-C/X-SAR-Aufnahmen lieferte, zeigt, daß die mit dem HELISCAT gemessenen Werte bei größeren Radarfrequenzen (C-Band, 5.3 GHz, und X-Band, 9.6 GHz) grundsätzlich höher sind als die aus den SAR-Aufnahmen ermittelten, während sie im L-Band (1.25 GHz) sehr gut übereinstimmen. Neben dem kleineren Signal-zu-Rausch-Verhältnis beim SIR-C/X-SAR kann die Ursache hierfür dessen weitaus geringere Auflösung im C- und X-Band (und daraufhin eine stärkere Mittelung in der Auflösungszelle) sein. Aufgrund von Vergleichen derjenigen Meßergebnisse, die mit Hilfe

beider Radarsensoren während der beiden Oberflächenfilm-Experimente in der Deutschen Bucht gewonnen wurden, wird jedoch vermutet, daß die Unterschiede in den Radarsignaturen systembedingt sind. Erste Ergebnisse, die mit dem flugzeuggetragenen DOSAR der Firma Dornier im C- und X-Band über natürlichen Oberflächenfilmen erzielt wurden, bestätigen diese Vermutung: Auch bei kleineren Auflösungszellen und einem geringeren Systemrauschen werden gleiche Dämpfungsverhältnisse gemessen wie mit dem SIR-C/X-SAR, so daß der Unterschied in den Meßergebnissen zum HELISCAT bleibt.

SIR-C/X-SAR-Aufnahmen von natürlichen Oberflächenfilmen in unterschiedlichen Seegebieten werden auf das Dämpfungsverhalten dieser Filme hin untersucht. Dabei stellt sich heraus, daß die gemessenen Dämpfungsverhältnisse im L-Band sehr groß sind, was durch die Ergebnisse der HELISCAT-Messungen bestätigt wird. Nicht bestätigt werden allerdings die vom SIR-C/X-SAR im C-Band gemessenen niedrigsten Dämpfungsverhältnisse, was auf das zu geringe Signal-zu-Rausch-Verhältnis zurückgeführt werden kann. Anhand einer SIR-C/X-SAR-Aufnahme wird jedoch gezeigt, daß auch die Meeresoberfläche zwischen den (deutlich sichtbaren) großen Oberflächenfilmen mit einer dünnen Substanzschicht bedeckt sein kann, so daß die Ursache für ein relativ niedriges Dämpfungsverhältnis im C-Band auch in der großflächigen Bedekung der Meeresoberfläche mit natürlichen Oberflächenfilmen liegen kann.

Die Analyse von SIR-C/X-SAR-Aufnahmen von Mineralölfilmen in unterschiedlichen Seegebieten zeigt ein für diese Filmart einheitliches qualitatives Dämpfungsverhalten. In jedem der vorgestellten Fälle wird ein Anstieg der gemessenen Dämpfungsverhältnisse mit der Bragg-Wellenzahl beobachtet (Ausnahme bildet hier nur der sehr kleine Schwerölfilm des zweiten Oberflächenfilm-Experimentes, dessen Radarsignaturen sich nicht von denen der biogenen Oberflächenfilme unterscheiden).

Polarimetrische Untersuchungen der SIR-C/X-SAR-Aufnahmen im L- und C-Band zeigen, daß sowohl bei filmfreier als auch bei filmbedeckter Wasseroberfläche die Radar-Rückstreuung bei mittleren Einfallswinkeln durch den Bragg-Streumechanismus erklärt werden kann, daß diese Art der Datenanalyse aber kein Hilfsmittel zur Unterscheidung verschiedenartiger Oberflächenfilme darstellt. Bei steilen Einfallswinkeln kann mit Hilfe der Polarisationsanalyse gezeigt werden, daß der Radar-Rückstreuquerschnitt von einer filmfreien Wasseroberfläche teilweise durch spekulare Reflexion verursacht wird, während die Polarisations-Signatur der filmbedeckten Wasseroberfläche weiterhin auf Bragg-Streuung schließen läßt. In diesem Fall kann allerdings der höhere Rauschanteil, vor allem im C-Band, nachgewiesen werden.

Zur Ergänzung der in den Feldexperimenten bzw. über dem offenen Meer ermittelten Daten werden Meßergebnisse, die im Windwellenkanal der Universität Hamburg gewonnen wurden, herangezogen. Zunächst wird gezeigt, daß mechanisch erzeugte Dezimeterwellen mit Frequenzen zwischen 3 und 5 Hz an ihren Kämmen Rippelwellen erzeugen, die für die Radar-Rückstreuung im X- und Ka-Band verantwortlich sind und die sich mit der Phasengeschwindigkeit der Dezimeterwellen bewegen (gebundene Rippelwellen). Dieser Effekt wird bei längeren Dezimeterwellen mit einer Frequenz von 2 Hz nicht beobachtet.

Diese Ergebnisse werden auf den Fall winderzeugter Wellen übertragen. Es wird gezeigt, daß die Radar-Rückstreuung im X-Band bei Referenz-Windgeschwindigkeiten bis 5 m/s und filmfreier Wasseroberfläche vor allem von gebundenen Rippelwellen verursacht wird, während bei höheren Windgeschwindigkeiten sowohl gebundene als auch frei propagierende Rippelwellen für die Radar-Rückstreuung im X-Band verantwortlich sind. Der Radar-Rückstreuquerschnitt im Ka-Band wird dagegen im gesamten betrachteten Windgeschwindigkeitsbereich (2–10 m/s) hauptsächlich von frei propagierenden Rippelwellen verursacht.

Im Fall einer (mit Oleylalkohol) filmbedeckten Wasseroberfläche ist erst bei einer Referenz-Windgeschwindigkeit von etwa 4.5 m/s der Energieeintrag durch den Wind groß genug, damit Wasserwellen erzeugt werden können. Es wird gezeigt, daß bei etwa 6 m/s der Radar-Rückstreuquerschnitt im X-Band ausschließlich durch gebundene Rippelwellen verursacht wird und bei 8 m/s ausschließlich durch frei propagierende Rippelwellen. Die Unterdrückung der unterschiedlichen Erzeugungsmechanismen für Rippelwellen bei Filmbedeckung der Wasseroberfläche ist demnach eine Möglichkeit, die mit Hilfe des Scatterometers gemessenen höheren Dämpfungsverhältnisse (in einem bestimmten Bereich der Windgeschwindigkeit) zu erklären. Im Ka-Band ist dieser Effekt weniger stark ausgeprägt.

Aufgrund der Ergebnisse der Untersuchungen, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgestellt werden, scheint die Unterscheidung von biogenen und anthropogenen Oberflächenfilmen mit einem weltraumgestützten mehrfrequenten SAR zumindest bei niedrigen bis mittleren Windgeschwindigkeiten (unterhalb von 10 m/s) möglich zu sein. Bei hohen Windgeschwindigkeiten ist diese Unterscheidung aufgrund der Ergebnisse des zweiten Oberflächenfilm-Experimentes offensichtlich nicht möglich. Weitere gezielte Untersuchungen der aufgezeigten Unterschiede zwischen den verschiedenen Radarsensoren sind jedoch nötig, um die Radarsignaturen von biogenen und anthropogenen Oberflächenfilmen besser zu verstehen und somit die Grundlage für eine effektive Ölüberwachung zu liefern.

## 2 Einleitung

### 2.1 *Ölverschmutzung der Weltmeere*

Obwohl die Verschmutzung der Weltmeere durch Mineralöl in den letzten Jahrzehnten (entgegen einer weitverbreiteten Meinung) abgenommen hat [GESAMP (*Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution*), 1993], stellt sie immer noch einen erheblichen Eingriff in das marine Ökosystem dar (in GESAMP [1993] wird darauf hingewiesen, daß dieser geschätzte Rückgang unter anderem auch auf verbesserte Schätzmethode zurückgeführt werden kann, also nicht zwangsweise durch eine tatsächliche Reduktion der Ölimmissionen bedingt sein muß). Aktuelle Zahlenwerte für die weltweite Ölverschmutzung und deren Aufteilung auf die verschiedenen Verschmutzungsursachen variieren wegen der Komplexität dieses Datensatzes naturgemäß [National Research Council, 1985; Lean und Hinrichsen, 1992; GESAMP, 1993]; dennoch stimmen die Kernaussagen sämtlicher zur Verfügung stehender Quellen überein (siehe Tabelle 2.1): Während die an der Küste liegenden Verursacher etwa gleich stark

<i>Quelle der Verschmutzung</i>	<i>frühere Quellen [GESAMP, 1993]</i>	<i>National Res. Council, 1985</i>	<i>Lean und Hinrichsen, 1992</i>
<b>städtische und ländliche Abwässer</b>	1430-2500	1080	1260
<b>operationeller Schiffsbetrieb</b>	600-1080	700	880
<b>Tankerunfälle</b>	300-390	400	500
<b>andere Ursachen durch Schifffahrt</b>	200-750	320	360
<b>Eintrag durch die Atmosphäre</b>	300-600	300	380
<b>natürliche Ölquellen</b>	300-600	200	300
<b>Raffinerien an den Küsten</b>	60-200	100	120
<b>andere Ursachen an den Küsten</b>	50-150	50	140
<b>Offshore-Ölförderung</b>	50-80	50	60
<b>GESAMT</b>	<b>3570-6110</b>	<b>3200</b>	<b>4000</b>

Tabelle 2.1: Ursachen der jährlichen Ölverschmutzung der Weltmeere, Schätzwerte in tausend Tonnen.

ins Gewicht fallen wie natürliche Ölquellen (jeweils 6-8%), sind die wesentlichen Quellen weltweiter Ölverschmutzung mit jeweils über 40% zu gleichen Teilen im Binnenland und auf See zu suchen (hier wurde der atmosphärische Eintrag ebenfalls zu den im Binnenland liegenden Quellen gerechnet).

Es sind nicht nur die großen (und bekannten) Tankerunglücke (wie die der Amoco Cadiz 1978, der Exxon Valdez 1989, der Braer 1993 oder der Sea Empress 1996), die die Ölverschmutzung auf See ausmachen (obwohl sie natürlich lokal zu einer Umweltkatastrophe führen). Vielmehr wird weltweit der größere Anteil der Verschmutzung während des normalen, operationellen Betriebes der Schiffe verursacht, häufig im Schutze der Dunkelheit.

In der Nordsee stellt die von der Seeschifffahrt verursachte Ölverschmutzung mit 3% zwar nur einen relativ geringen Anteil dar (zum Vergleich: 28% fallen hier auf die Offshore-Ölproduktion und 12% auf das Verklappen auf See [GESAMP, 1993]), dafür ist gerade das Wattenmeer der Nordsee als hochsensibles Ökosystem besonders anfällig für Meeresverschmutzungen. Aus diesem Grund ist in diesem Seegebiet, wie auch in anderen vergleichbar sensiblen Seegebieten, eine möglichst umfangreiche Ölaufklärung von besonderer Bedeutung.

Um die Grundlagen für eine strafrechtliche Verfolgung von Umweltsündern zu schaffen, wurde 1973 das internationale Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe, das dann durch das Protokoll von 1978 geändert wurde und das als „MARPOL 1973/78“ bekannt ist, von der internationalen Seeschifffahrtsorganisation (IMO) geschlossen. Nach diesem Abkommen, das 1983 in Kraft trat, sollen alle durch die Schifffahrt verursachten Verschmutzungen verhindert (oder zumindest auf ein Mindestmaß begrenzt) werden. So ist außerhalb der 50-Meilen-Zonen (und außerhalb spezieller Seegebiete) das Ablassen von Mineralöl auf ein Maximum von 60 Litern je Seemeile beschränkt. Bilgenwasser muß durch Ölabscheidevorrichtungen derart gereinigt sein, daß in einer Distanz von bis zu 3 Seemeilen zur Küste der Ölan teil nicht 15 ppm (Millionstel) überschreitet und innerhalb von 12 Seemeilen nicht 100 ppm. Außerdem sind spezielle Seegebiete (wie z.B. die Ostsee) definiert, wo jegliches Ablassen von Öl untersagt ist [z.B. Grüner et al., 1991; Koopmann, 1987].

Die größten Schwierigkeiten bereitet die Entdeckung des auf See verursachten Anteils der Ölverschmutzung, so daß Verursacher nur schwer ausfindig zu machen sind. In den letzten Jahren wurden immer häufiger Fernerkundungsmethoden für die Detektierung von unterschiedlichen Oberflächenfilmen vorgeschlagen [Hühnerfuss et al., 1987; Onstott und Rufenach, 1992; Kasilingam, 1994; Tseng und Chiu, 1994; Barni et al., 1995; Gade und Alpers, 1995, 1996; Masuko et al., 1995; Wismann et al., 1996a,b] bzw. befinden sich teilweise schon im operationellen Einsatz [Grüner et al., 1991; Wahl et al., 1994; Pellemans et al., 1995; Sloggett und Jory, 1995]. Dabei wird besonders die Eigenschaft aktiver Radarverfahren ausgenutzt, vom Wetter und von der Tageszeit unabhängig zu sein, da die Mikrowellen Wolken und Nebel nahezu ungehindert durchdringen und ein aktives System bei Nacht ebenso funktioniert wie bei Tag. Satellitengestützte Radarsysteme zeichnen sich weiterhin durch eine schnelle und große Überdeckung des zu beobachtenden Seeraumes aus, was einen weiteren Vorteil darstellt.

Radarwellen werden von der Wasseroberfläche rückgestreut, wenn ihre Wellenlänge mit der der Wasserwellen vergleichbar ist. Auf diese Weise ist die rückgestreute Radarleistung ein Maß für den spektralen Anteil dieser Wasserwellen am gesamten Ozeanwellenspektrum [Valenzuela, 1978]. Da die für die Rückstreuung verantwortlichen Wasserwellen nun durch Mineralölfilme gedämpft werden („Öl glättet die Wogen“), sind diese häufig auf Radarbildern als dunkle Flecken sichtbar.

Nun sind Mineralölteppiche aber nicht die einzigen Oberflächenfilme, die auf den Weltmeeren zu finden sind. Ein großer Anteil der vor allem bei niedrigen Wind-

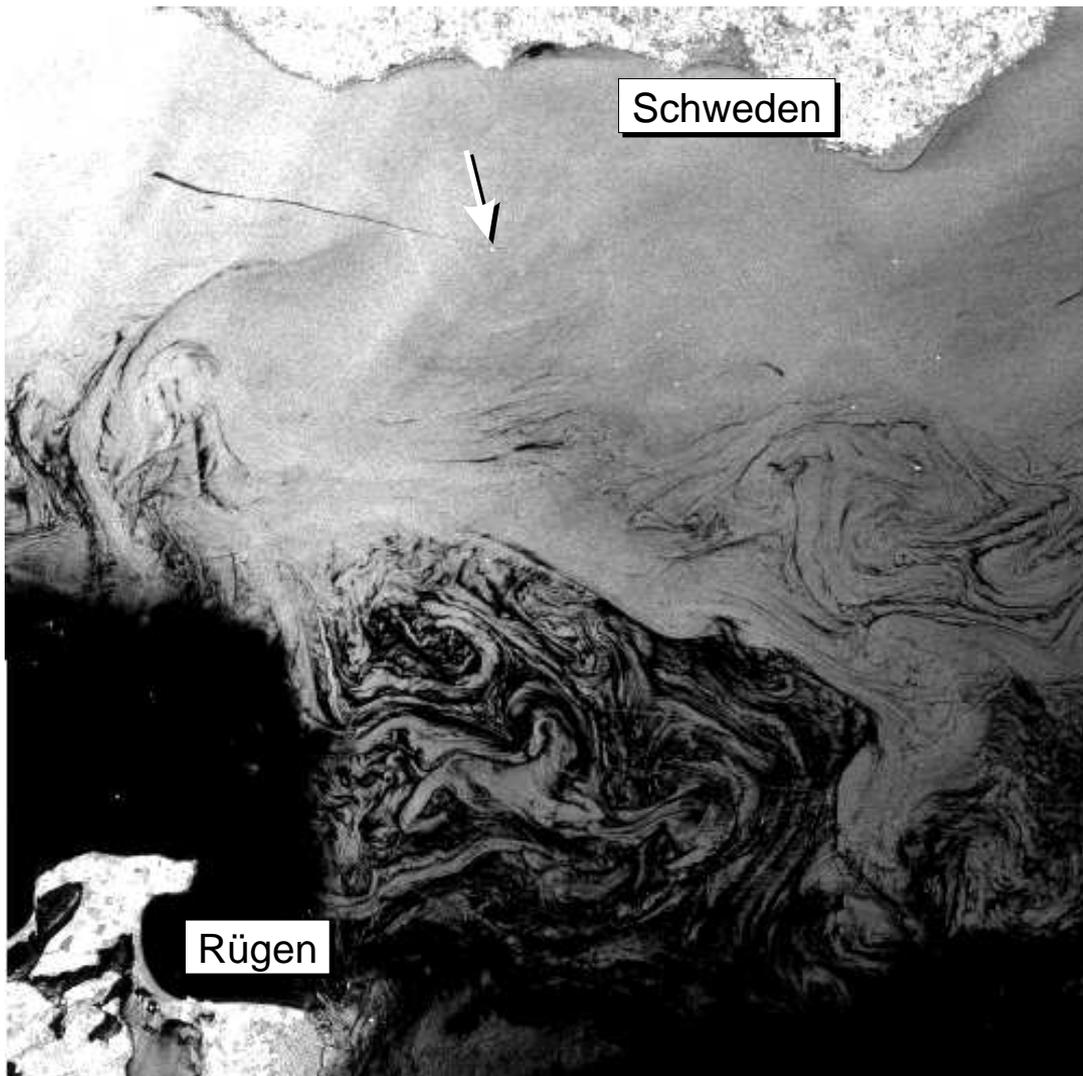


Abbildung 2.1: Kombination zweier ERS-1-Radarbilder, die am 16. April 1994 um 23:04 MESZ über der südlichen Ostsee aufgenommen wurden. In der unteren Hälfte sind die dunklen Strukturen ausgedehnter natürlicher Oberflächenfilme zu sehen – Im linken oberen Drittel befindet sich ein geradliniger, dunkler Streifen, der höchstwahrscheinlich durch gerade abgelassenes Mineralöl verursacht wurde. Der Pfeil markiert das Schiff, das als heller Fleck am rechten Rand des Ölstreifens zu erkennen ist.  
(© ESA, Orbit 14390, Frames 879 und 880)

geschwindigkeiten in küstennahen Gebieten zu beobachtenden Oberflächenfilme ist natürlichen Ursprungs: Algen und Plankton, Fische und Korallen scheiden in bestimmten Jahreszeiten oder unter bestimmten atmosphärischen Bedingungen ölhaltige Sekrete ab, die sich dann als monomolekulare Filme an der Wasseroberfläche ansammeln [Hunter und Liss, 1981; Hühnerfuss, 1983]. Diese besitzen ebenso wie Mineralölfilme die Fähigkeit, Oberflächenwellen zu dämpfen, was seit geraumer Zeit hinlänglich bekannt ist [z.B. Cini und Lombardini, 1978; Alpers und Hühnerfuss, 1989; Bock und Frew, 1993], und was demnach eine Erschwerung der Ölaufklärung mit Hilfe von aktiven Radarverfahren darstellt. In Abbildung 2.1 ist ein Radarbild dargestellt, das am 16. April 1994 um 23:04 MESZ vom ersten europäischen Fernerkundungssatelliten, dem ERS-1, aus aufgenommen wurde. Die in der unteren Hälfte zu erkennenden natürlichen Oberflächenfilme und der in der oberen Bildhälfte zu erkennende Mineralölfilm sind hier nur deshalb klar zu unterscheiden, weil sie erstens räumlich deutlich getrennt und zweitens in verschiedenen Strukturen angeordnet (d.h. einmal spiralförmig und einmal geradlinig) sind – aufgrund der „Schwärzung“ des Bildes sind sie nicht zu unterscheiden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, inwieweit die Verwendung mehrfrequenter Multipolarisations-Radarsensoren eine Erleichterung der eindeutigen Unterscheidung der vielfältigen Oberflächenfilme darstellen kann. Zahlreiche Radarbilder sowie Datensätze nicht-abbildender Radarsensoren, welche vor allem im Rahmen der beiden SIR-C/X-SAR-Missionen 1994 gewonnen wurden, werden zur Auswertung und Beurteilung herangezogen, um so einen Beitrag zur Beantwortung der Frage zu liefern, inwieweit ihre Kombination einen sinnvollen Fortschritt in der Ölaufklärung bieten kann.

## 2.2 Die beiden SIR-C/X-SAR-Missionen 1994

Am 09. April 1994 um 07:05 Ortszeit (EDT, also 13:05 MESZ) startete die amerikanische Raumfähre „*Endeavour*“ vom Kennedy-Raumfahrtzentrum in Florida, USA, aus zur ersten von zwei SIR-C/X-SAR-Missionen in den Weltraum (SIR-C/X-SAR steht für „*Shuttle Imaging Radar – C / X-Band Synthetic Aperture Radar*“). Während der folgenden elf Tage wurden über 150 streifenförmige Radarbilder mit zum Teil über 1000 km Länge und einer Breite von bis zu 80 km aufgenommen. Der Start zur zweiten Mission erfolgte, nachdem er wegen technischer Probleme im August verschoben worden war, am 30. September 1994 um 07:16 Ortszeit (EDT, in diesem Fall 12:16 MEZ).

Ziel beider Missionen, die in einer Zusammenarbeit sowohl der amerikanischen Raumfahrtorganisation NASA als Teil ihrer *Mission to Planet Earth* als auch der Deutschen Raumfahrtagentur DARA und der italienischen Raumfahrtagentur ASI durchgeführt wurden, war der erstmalige Einsatz eines neuen multifrequenten Radarsystems, mit dem die weltraumgestützte Radarfernerkundung der Erdoberfläche revolutioniert werden sollte [z.B. Keydel und Öttl, 1988]. Zu diesem Zweck wurden weltweit 19 Gebiete besonderen Interesses ausgewählt, die sogenannten *Supersites*. Daneben wurden Ersatz- (*Backup*) *Supersites* sowie „normale“ Testgebiete (*Testsites*) definiert, so daß ins-

gesamt fast 400 Testgebiete für Untersuchungen zur Kalibrierung des Systems, zur elektromagnetischen Feldtheorie sowie zur Ökologie, Geologie, Hydrologie und zur Ozeanographie existierten [Jet Propulsion Laboratory, 1993; Stofan et al., 1995].

Eines dieser Testgebiete war die Deutsche Bucht, ein Teil der Nordsee, wo unter anderem Untersuchungen zur Abbildung verschiedenartiger Oberflächenfilme durch unterschiedliche Fernerkundungsmeßmethoden durchgeführt wurden. Während beider Missionen wurden jeweils mehrere Oberflächenfilme, die aus verschiedenen Substanzen bestanden, auf die Meeresoberfläche ausgebracht, um daraufhin mit Fernerkundungssensoren „vermessen“ zu werden. Zu diesen Sensoren gehörten neben dem auf der *Endeavour* befindlichen SIR-C/X-SAR das an der Universität Hamburg entwickelte und gebaute hubschraubergetragene Mehrfrequenz-Scatterometer HELISCAT sowie verschiedene optische und Mikrowellen-Sensoren an Bord eines deutschen Ölüberwachungsflugzeugs (Do 228 des Marinefliegergeschwaders 3 in Nordholz, Schleswig-Holstein). Bei dem zweiten, größeren Experiment im Oktober 1994 wurden außerdem Radarbilder mit dem mehrfrequenten Synthetik-Apertur-Radar (SAR) der Firma Dornier (das auf einer Transall stationierte DOSAR) sowie optische Messungen direkt von Bord eines der beteiligten Ölbekämpfungsschiffe (*MS Scharhörn*) vorgenommen.

In dieser Arbeit wird derjenige Teil des (umfangreichen) Datensatzes untersucht, der während der beiden Oberflächenfilm-Experimente mit Hilfe von *aktiven Mikrowellen-Sensoren* gewonnen wurde. Außerdem werden Ergebnisse von Labormessungen zur Interpretation mit herangezogen, die im Rahmen der Vorbereitung der Meßkampagnen am Windwellenkanal der Universität Hamburg durchgeführt worden sind. Zum Vergleich der Abbildung anderer Oberflächenfilme an diversen Stellen der Weltmeere werden schließlich zahlreiche SAR-Aufnahmen beider Shuttle-Missionen ausgewertet, so daß im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein erstmals in diesem Umfang analysierter Datensatz vorgestellt wird. Erste Ergebnisse, die sich aus der Analyse der SAR-Aufnahmen und der Scatterometer-Daten ergaben, sind von *Gade et al.* [1996c,d] bereits vorgestellt worden.

Nach einer Beschreibung der theoretischen Grundlagen in Kapitel 3 werden in Kapitel 4 die unterschiedliche Sensoren, mit denen die für die vorliegende Arbeit relevanten Ergebnisse erzielt wurden, vorgestellt. In den Kapiteln 5 bis 7 werden dann die (nach den Sensoren sortierten) Ergebnisse vorgestellt und diskutiert, und schließlich wird in Kapitel 8 nach einem Fazit ein Ausblick gegeben.



### 3 Theoretische Grundlagen

Um die Möglichkeit zu haben, die aufgenommenen Radarbilder und Meßdaten zu interpretieren und die gewonnenen Ergebnisse zu verstehen, müssen sowohl die Theorie der Rückstreuung von elektromagnetischen Wellen an der Wasseroberfläche als auch die hydrodynamischen Vorgänge an eben dieser Wasseroberfläche berücksichtigt werden. Einen weiteren wichtigen Gesichtspunkt für die Interpretation der gewonnenen Daten stellt die molekulare Beschaffenheit der Wasseroberfläche dar. Ziel dieses Kapitels ist es, die theoretischen Grundlagen für eine Auswertung der gewonnenen Radardaten zu liefern.

#### 3.1 Radar-Rückstreuung an der Wasseroberfläche

Zuerst wird hier die Rückstreuung von Mikrowellen an der Wasseroberfläche vorgestellt, wobei im Bereich mittlerer Einfallswinkel hauptsächlich Bragg-Streuung vorliegt. Da im Rahmen dieser Arbeit auch auf die polarimetrische Untersuchung von Radardaten eingegangen wird, werden auch polarimetrische Grundlagen aufgezeigt.

##### 3.1.1 Bragg-Streuung

Die von einem Punktziel rückgestreute Radarleistung  $P_R$  hängt neben der ausgesendeten Radarleistung  $P_T$  auch von geometrischen Faktoren und solchen ab, die sowohl die Antennenkonfiguration als auch die (Rückstreu-) Eigenschaften des Streuobjekts berücksichtigen:

$$P_R \propto \sigma_0 \cdot \frac{A}{R^4} \cdot P_T \quad . \quad (3.1)$$

Hier bezeichnen  $\sigma_0$  den normierten Radar-Rückstreuquerschnitt,  $A$  die beleuchtete Fläche und  $R$  den Abstand vom Punktziel zum Radar.

Im Bereich mittlerer Einfallswinkel (also etwa zwischen  $20^\circ$  und  $75^\circ$ ) wird die Rückstreuung von Radarwellen an der Wasseroberfläche dominiert durch den (aus der Festkörperphysik bekannten) Bragg-Streumechanismus [Wright, 1968; Valenzuela, 1978]. Danach koppeln die Radarwellen resonant an diejenigen Wasserwellen an, deren Wellenzahl mit der der Radarwellen über die Bragg-Bedingung in Beziehung steht:

$$k_B = 2 k_0 \sin \vartheta \quad , \quad (3.2)$$

wobei  $k_B$  die Wellenzahl der „Bragg“-Wasserwellen,  $k_0$  die der Radarwellen und  $\vartheta$  der Einfallswinkel sind. Nach der Bragg-Streutheorie ist der normierte Radar-Rückstreuquerschnitt proportional zur spektralen Energiedichte  $\Psi$  derjenigen Braggwellen, deren Ausbreitungsrichtung parallel ist zur Blickrichtung des Radars:

$$\sigma_{0,ij} = T_{ij} \cdot \left( \Psi(\vec{k}_B) + \Psi(-\vec{k}_B) \right) . \quad (3.3)$$

Hier wird durch die beiden Vorzeichen des Bragg-Wellenzahlvektors der Tatsache Rechnung getragen, daß die Braggwellen zum Radar hin sowie vom Radar weg propagieren können. Das Spektrum  $\Psi$  ist derart definiert, daß das Integral über den gesamten Wellenzahlbereich die mittlere quadratische Auslenkung ergibt. Die beiden Indizes  $i$  und  $j$  bezeichnen die Polarisationsrichtung der gesendeten resp. empfangenen Radarstrahlen (jeweils  $H$  für horizontal und  $V$  für vertikal). Der Proportionalitätsfaktor  $T_{ij}$  ist nach *Wright* [1968]:

$$T_{ij} = 8\pi k_0^4 \cos^4 \vartheta \left| g_{ij} \right|^2 . \quad (3.4)$$

$g_{ij}$  ist der (komplexe) Streukoeffizient der (rauh)en Wasseroberfläche, der vom Einfallswinkel (und – z.B. bei bistatischen Antennenkonfigurationen – vom Azimutwinkel) sowie von den dielektrischen Eigenschaften des Wassers abhängt. Für das (salzhaltige) Seewasser ist der Betrag der komplexen relativen Dielektrizitätskonstante  $\varepsilon$  groß [*Saxton und Lane*, 1952], so daß die folgenden Vereinfachungen zulässig sind [*Romeiser et al.*, 1994]:

$$\begin{aligned} g_{HH} &= 1 \\ g_{VV} &= \frac{\varepsilon^2 (1 - \sin^2 \vartheta)}{(\varepsilon \cos \vartheta + \sqrt{\varepsilon})^2} . \end{aligned} \quad (3.5)$$

Nach (3.3) bis (3.5) kann der Quotient aus rückgestreuter Radarleistung bei HH- und VV-Polarisation theoretisch berechnet werden und ist dann nur noch abhängig vom Einfallswinkel, der Radar-Wellenzahl und der Dielektrizitätskonstanten des Wassers, also unabhängig von der spektralen Energiedichte der Braggwellen. Diese wird aber beeinflußt von unterschiedlichen Parametern wie der Windgeschwindigkeit oder einer Bedeckung der Wasseroberfläche mit einem Oberflächenfilm. Um das zu berücksichtigen, hat *Romeiser* [1993] ein verbessertes Modell für die Rückstreuung von Radarwellen an der Wasseroberfläche entwickelt, in dem auch Streuterme höherer Ordnung berücksichtigt werden, so daß die rückgestreute Radarleistung auch von der mittleren quadratischen Neigung der Wasserwellen abhängig ist.

Werden nun die (mittleren) rückgestreuten Radarleistungen von einer filmfreien und einer filmbedeckten Wasseroberfläche miteinander verglichen, also deren Quotient gebildet, so sollte dieser Quotient nach (3.3) proportional sein zum Verhältnis der entsprechenden spektralen Energiedichten  $\Psi_i$ .

### 3.1.2 Andere Streumechanismen

Die Bragg-Streuung ist nicht der einzige Mechanismus, der für die Rückstreuung von Radarstrahlen an der Meeresoberfläche verantwortlich ist, sondern dominiert nur,

wie im letzten Abschnitt schon erwähnt, im Bereich mittlerer Einfallswinkel, also etwa zwischen  $20^\circ$  und  $75^\circ$ . Bei niedrigen Einfallswinkeln (kleiner als  $20^\circ$ ) finden vor allem spekulare und quasi-spekulare Reflexion statt, bei großen Einfallswinkeln (größer als  $75^\circ$ ) dominieren Abschattungseffekte und Kantenstreuung [Valenzuela, 1978]. Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit aber nur Daten untersucht werden, die bei mittleren Einfallswinkeln aufgenommen wurden, sollen diese beiden Streumechanismen hier keine weitere Berücksichtigung finden.

Neben der dominanten Bragg-Streuung findet auch eine Rückstreuung an den Kämmen brechender Wellen statt, so daß der (normierte) Radar-Rückstreuquerschnitt als Summe dieser beiden Streuteile geschrieben werden kann [Phillips, 1988]:

$$\sigma_0 = \sigma_B + \sigma_{ss} . \quad (3.6)$$

Hier ist  $\sigma_B$  der Bragg-Anteil und  $\sigma_{ss}$  derjenige Anteil, der durch gelegentliches Wellenbrechen hervorgerufen wird (*sea spikes*). Mit dem von Phillips [1985] vorgeschlagenen Spektrum erhält man für den Bragg-Anteil [Phillips, 1988]:

$$\sigma_B = 2^{-3/2} \pi \beta |\cos \varphi|^{1/2} \sin^{1/2} \vartheta \cot^4 \vartheta |g_{ij}|^2 \left( \frac{u_*^2 k_0}{g} \right)^{1/2} . \quad (3.7)$$

Hier ist  $\beta \approx 100$  ein Skalierungsfaktor,  $\varphi$  der Winkel zwischen Wind- und Radarblickrichtung,  $g$  die Erdbeschleunigung und  $u_*$  die Schubspannungsgeschwindigkeit. Für den durch Wellenbrechen hervorgerufenen Term erhält Phillips [1988]:

$$\sigma_{ss} = F(\vartheta, \varphi) \left( \frac{u_*^2 k_0}{g} \right)^{3/2} . \quad (3.8)$$

Die Funktion  $F(\vartheta, \varphi)$  wird von ihm nicht explizit angegeben, vielmehr soll sie anhand von Parameteranpassungen bestimmt werden.

Der Vergleich der beiden Anteile des Radar-Rückstreuquerschnittes,  $\sigma_B$  und  $\sigma_{ss}$ , zeigt, daß für niedrige Windgeschwindigkeiten der Bragg-Anteil dominiert, da hier die Schubspannungsgeschwindigkeit nur linear eingeht. Bei ansteigender Windgeschwindigkeit wird aber derjenige Anteil, der durch Wellenbrechen hervorgerufen wird, dominant, denn hier geht  $u_*$  in dritter Potenz ein. Bei großen Werten für die Schubspannungsgeschwindigkeit und für die Wellenzahl kann er also nicht mehr vernachlässigt werden. Da durch die Bedeckung der Wasseroberfläche mit einem Oberflächenfilm die Schubspannungsgeschwindigkeit verringert wird [Mitsuyasu und Honda, 1986; Gade, 1992], ist die Betrachtung des Radar-Rückstreuquerschnittes unter Berücksichtigung der Schubspannungsgeschwindigkeit von Bedeutung und wird deshalb auch später zur Deutung der gewonnenen Meßergebnisse herangezogen.

### 3.1.3 Grundlagen der Polarimetrie

Die Polarimetrie, d.h. die Berücksichtigung nicht nur der absoluten rückgestreuten Radarleistung sondern auch der speziellen polarimetrischen Rückstreuungseigenschaften des Streuobjektes, ist ein Bereich der Radarfernerkundung, der in letzter Zeit an Bedeutung gewonnen hat. Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit auch polarimetrische Daten untersucht wurden, die aus SAR-Bildern von unterschiedlichen Oberflächenfilmen gewonnen wurden, sollen hier in kurzer Form einige Grundlagen vorgestellt werden, um eine Interpretation der gewonnenen Daten zu ermöglichen. Für eine vertiefende Beschreibung dieses Themas sei auf das Buch von *Ulabiy und Elachi* [1990] sowie auf die Arbeiten von *van Zyl* [1986] bzw. *van Zyl et al.* [1987] verwiesen.

Das Feld einer elektromagnetischen Welle kann durch den *Jones-Vektor* beschrieben werden:

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_h \\ E_v \end{pmatrix} = a \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \chi \\ -i \sin \chi \end{pmatrix}. \quad (3.9)$$

Hier sind  $E_h$  und  $E_v$  der horizontal bzw. vertikal polarisierte Anteil des Feldvektors und  $a$  seine Amplitude. Die beiden Winkel  $\psi$  und  $\chi$  beschreiben den Polarisationszustand der Welle, wobei der Orientierungswinkel  $\psi$  die Lage der großen Hauptachse relativ zur Horizontalachse und der Tangens des Elliptizitätswinkels  $\chi$  das Verhältnis der beiden Hauptachsen der Polarisationsellipse angibt. Der Orientierungswinkel durchläuft Werte zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  und der Elliptizitätswinkel zwischen  $-45^\circ$  und  $45^\circ$ . Mit Hilfe der Komponenten des Jones-Vektors läßt sich der *Stokes-Vektor* beschreiben:

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_h E_h^* + E_v E_v^* \\ E_h E_h^* - E_v E_v^* \\ E_h E_v^* + E_h^* E_v \\ -i E_h E_v^* + i E_h^* E_v \end{pmatrix} = a^2 \begin{pmatrix} 1 \\ \cos 2\psi \cos 2\chi \\ \sin 2\psi \cos 2\chi \\ \sin 2\chi \end{pmatrix}. \quad (3.10)$$

Die von einer Radarantenne empfangene Leistung  $P$  läßt sich nun in Form einer Matrizenmultiplikation darstellen:

$$P = \vec{S}_r^T \mathbf{M} \vec{S}_t, \quad (3.11)$$

wobei die Indizes  $r$  und  $t$  sich auf das empfangene resp. gesendete Signal beziehen und mit  $T$  die Transponierung bezeichnet wird. Handelt es sich um eine monostatische Antennenkonfiguration, so sind die beiden Stokes-Vektoren  $S_r$  und  $S_t$  gleich.  $\mathbf{M}$  ist die symmetrische *Müller-Matrix*, mit der der Streuvorgang durch das Zielobjekt beschrieben wird. Ihre (reellen) Koeffizienten  $M_{ij}$  werden aus den Streukoeffizienten des beleuchteten Objektes gebildet. Sind diese Koeffizienten bekannt (liegt also z.B. ein komplexes SAR-Bild in sämtlichen Polarisierungen vor), so kann man durch Variation

von Orientierungs- und Elliptizitätswinkel die sogenannte *Polarisationsanalyse* durchführen, bei der die rückgestreute Radarleistung für unterschiedliche Polarisationszustände untersucht wird. Man erhält als Funktion der beiden Winkel eine dreidimensionale Polarisations-Signatur, die, je nach Art des Streuobjektes, eine typische Gestalt hat.

### 3.2 Energiefluß an der Wasseroberfläche

In der Gegenwart von Oberflächenfilmen wird die spektrale Energiedichte der Ozeanwellen verändert. Der in diesem Fall auftretende Energiefluß soll daher in diesem Abschnitt beschrieben werden, um einen Vergleich der gemessenen Daten mit den nach der Theorie zu erwartenden Werten zu ermöglichen. Zuerst wird die spezielle Form der Dämpfung durch monomolekulare Oberflächenfilme beschrieben, danach werden dann die weiteren Terme des Energieflusses, die sogenannten Quellterme, vorgestellt.

#### 3.2.1 Viskose und Marangoni-Dämpfung

Auch an einer sauberen – also filmfreien – Wasseroberfläche werden die Oberflächenwellen gedämpft. Der (räumliche) Dämpfungskoeffizient  $\Delta_0$  wird durch die *Stokes-Gleichung* beschrieben:

$$\Delta_0 = \frac{4k^2 \eta \omega}{\rho g + 3\tau k^2} , \quad (3.12)$$

wobei  $\eta$  die (dynamische) Viskosität des Wassers,  $\rho$  seine Dichte und  $\tau$  die Oberflächenspannung bedeutet.  $\omega = \omega(k)$  ist die (intrinsische Kreis-) Frequenz der Wasserwellen. Für die Bedeckung der Wasseroberfläche mit einem monomolekularen Oberflächenfilm ist von *Hühnerfuss* [1986] das Verhältnis der Dämpfungskoeffizienten für filmbedeckte und filmfreie Wasseroberfläche,  $\Delta_s$  und  $\Delta_0$ , berechnet worden:

$$y(k) = \frac{\Delta_s}{\Delta_0} = \frac{1 + X(\cos\theta - \sin\theta) + XY - Y \sin\theta}{1 + 2X(\cos\theta - \sin\theta) + 2X^2} , \quad (3.13)$$

mit

$$X = \frac{|E|k^2}{\sqrt{2\rho\eta\omega^3}} ; \quad Y = \frac{|E|k}{4\eta\omega} .$$

$|E|$  und  $\theta$  sind Betrag und Phase des Dilatationsmoduls  $E = |E| \exp(i\theta - \pi)$ , einer substanzspezifischen Größe, die von den physiko-chemischen Eigenschaften des Filmmaterials abhängt. Das Dämpfungsverhältnis  $y(k)$  beschreibt also denjenigen Faktor, um den die Dämpfung der Wasserwellen in Anwesenheit eines monomolekularen Oberflächenfilms erhöht wird. Die Funktion zeigt ein Maximum im Bereich

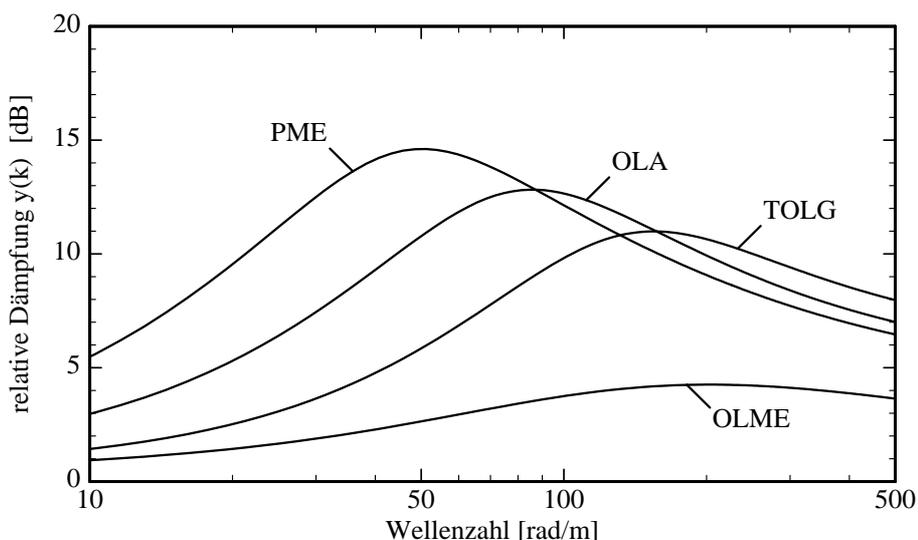


Abbildung 3.1: Theoretische Dämpfungskurven  $y$  für verschiedene oberflächenaktive Substanzen als Funktion der Wellenzahl  $k$ . Die Kurven wurden berechnet nach (3.13) mit den entsprechenden Werten aus Tabelle 3.1.

mittlerer Wellenzahlen ( $k \approx 50\text{--}250$  rad/m, vgl. Abbildung 3.1), das für die *Marangoni-Dämpfung*, also die Dämpfung durch monomolekulare Oberflächenfilme, typisch ist.

Die Werte für den Dilatationsmodul aus Tabelle 3.1, die zur Berechnung der theoretischen Dämpfungskurven verwendet wurden, sind von *Hühnerfuss* [1986] durch Messungen am Windwellenkanal bestimmt worden. Es handelte sich hierbei zwar um Messungen der Dämpfung von Wasserwellen, deren Frequenz unterhalb von 3 Hz lag (also mit Wellenzahlen unterhalb von 40 rad/m, d.h. das Dämpfungsmaximum wurde durch die Messungen nicht abgedeckt), jedoch stellen die durch Anpassung der Parameter gewonnenen Werte für  $|E|$  und  $\theta$  die genauesten zur Verfügung stehenden Werte dar. Die Marangoni-Dämpfungstheorie, und speziell (3.13), be-

<i>oberflächenaktive Substanz</i>		<i>Dilatationsmodul</i>	
<i>Abkürzung</i>	<i>chemische Bezeichnung</i>	$ E $ [ $\text{Nm}^{-1}$ ]	$\theta$ [°]
<b>OLA</b>	Oleylalkohol	0.0238	-175
<b>OLME</b>	Ölsäuremethylester	0.01	-5
<b>PME</b>	Palmitinsäuremethylester	0.046	-176
<b>TOLG</b>	Triolein	0.0115	-175

Tabelle 3.1: Parameter verschiedener oberflächenaktiver Substanzen (zur besseren Übersicht sind die Phasen der Dilatationsmoduli im Grad- und nicht im Bogenmaß angegeben).

schreibt die Auswirkung eines monomolekularen Oberflächenfilms auf existierende Wasserwellen, berücksichtigt allerdings nicht die Auswirkung auf deren Erzeugungsmechanismen.

### 3.2.2 Andere Quellterme

Der Energiefluß in einem entwickelten Ozeanwellenspektrum kann mit Hilfe der Strahlungsbilanz-Gleichung beschrieben werden [Hasselmann, 1960; Phillips, 1985]:

$$\frac{dN}{dt} = 0 = S_{wi} + S_{nl} - S_{vd} - S_{br} \quad . \quad (3.14)$$

Hier ist  $N$  die spektrale Wirkungsichte, und die vier Terme auf der rechten Seite beschreiben die Quellterme, also den Energieeintrag durch den Wind,  $S_{wi}$ , und nichtlineare Wellenwechselwirkung,  $S_{nl}$ , sowie den Energieverlust durch viskose Wellendämpfung,  $S_{vd}$ , und Wellenbrechen,  $S_{br}$ . Um das Verhältnis der spektralen Energiedichten der filmfreien bzw. filmbedeckten Wasseroberfläche berechnen zu können, müssen die einzelnen Quellterme bekannt sein, was für den Windeintrag und die viskose Dämpfung auch zutrifft. Die beiden übrigen Quellterme, die durch Wellenbrechen und nichtlineare Wellenwechselwirkung hervorgerufen werden, sind allerdings nicht exakt zu bestimmen, so daß eine numerische Simulation der Ergebnisse erschwert ist.

Der Quellterm der viskosen Wellendämpfung kann mit Hilfe der im letzten Abschnitt vorgestellten Dämpfungsraten angegeben werden [z.B. Phillips, 1977]:

$$S_{vd}^i = 2 \Delta_i c_g N_i(k) \quad , \quad (3.15)$$

wobei der Index  $i$  jeweils 0 (bei filmfreier) und s (bei filmbedeckter Wasseroberfläche) sein kann.  $N_i(k) = \omega/k \cdot \Psi_i(k)$  ist die spektrale Wirkungsichte, und durch die Gruppengeschwindigkeit  $c_g$  wird berücksichtigt, daß nach (3.14) die zeitliche Dämpfungsrate betrachtet werden muß. Der Quellterm für den Energieeintrag durch den Wind ist von Plant [1982] vorgeschlagen worden:

$$S_{wi}^i = \beta_i N_i(k) \quad , \quad (3.16)$$

mit

$$\beta_i = M (\cos \varphi)^{2p} \left( \frac{u_*^{(i)}}{c} \right)^2 \omega \quad . \quad (3.17)$$

Er setzt  $M=0.04$  und  $p=0.5$ . Durch Kombination von (3.14), (3.15) und (3.16) erhält man das Verhältnis der spektralen Wirkungsichten (und somit der spektralen Energiedichten) von filmfreier und filmbedeckter Wasseroberfläche:

$$\frac{N_0(k)}{N_s(k)} = \frac{\Psi_0(k)}{\Psi_s(k)} = \frac{\beta_s - 2\Delta_s c_g}{\beta_0 - 2\Delta_0 c_g} \cdot \frac{S_{nl}^0 - S_{br}^0}{S_{nl}^s - S_{br}^s} \quad (3.18)$$

Der zweite Faktor auf der rechten Seite enthält die Quellterme für Wellenbrechen und nichtlineare Wellenwechselwirkung und ist nicht explizit anzugeben (vor allem die analytische Darstellung des Termes für die nichtlineare Wellenwechselwirkung bereitet Schwierigkeiten), so daß man eine exakte Berechnung von (3.18) durchführen kann, wohl aber einige qualitative Überlegungen anstellen:

Reduktionen der Schubspannungsgeschwindigkeit über Oberflächenfilmen sind mehrfach gemessen worden. Im Windwellenkanal fanden *Mitsuyasu und Honda* [1986] Reduktionen auf Werte zwischen 68% und 100% und *Gade* [1992] auf Werte zwischen 48% und 65% (die Unterschiede mögen ihre Ursache in den unterschiedlichen Meßaufbauten haben). Auf freier See (über natürlichen Oberflächenfilmen) wurden von *Wei und Wu* [1992] Reduktionen auf Werte zwischen 84% und 97% gemessen und während des *SAXON-FPN*-Experimentes 1989 über einem OLA-Film eine Reduktion auf einen Wert von 70% [S. *Stolte*, pers. Mitteilung]. Da letzterer Wert der für die hier betrachteten Experimente repräsentativste ist, wird in den folgenden Betrachtungen grundsätzlich von einer Reduktion der Schubspannungsgeschwindigkeit auf 70% des Wertes über einer filmfreien Wasseroberfläche ausgegangen.

In Abbildung 3.2 sind die Faktoren der Quellterme (hier auch als *Quellfaktoren* bezeichnet) für den Energieeintrag durch den Wind sowie für die viskose Dissipation bei filmfreier und filmbedeckter Wasseroberfläche dargestellt. Zu sehen ist, daß die Relation  $\beta > 2\Delta c_g$  im Falle einer filmbedeckten Wasseroberfläche nur bei hohen Windgeschwindigkeiten überall gilt, während sie für die filmfreie Wasseroberfläche immer zutrifft. Aus diesem Grund ist der erste Faktor auf der rechten Seite von (3.18) teilweise negativ und ändert an bestimmten Stellen sogar das Vorzeichen. Das Verhältnis der spektralen Wirkungs- und Energiedichten muß aber positiv sein, so daß eine weitere Vorzeichenumkehr durch den zweiten Faktor bewirkt werden muß. Physikalisch bedeutet dies, daß im Falle einer größeren viskosen Dämpfung ein zusätzlicher Energieeintrag zu den Wellen kurzer Wellenlänge durch nichtlineare Wellenwechselwirkung stattfinden muß, während bei hohen Windgeschwindigkeiten der Energieeintrag durch den Wind ausreicht, um die viskose Energiedissipation auszugleichen.

Nach *Phillips* [1985] dominieren im wesentlichen die drei Quellterme für Windeintrag, viskose Dissipation und Wellenbrechen, wobei letzterer in seiner Größe derart variiert, daß er die Beiträge der beiden anderen ausgleicht, so daß die Strahlungsbilanz ausgeglichen ist. Eine ähnliche Aussage findet sich bei *Donelan und Pierson* [1987]. Im Falle einer filmbedeckten Wasseroberfläche und bei niedrigen bis mittleren Windgeschwindigkeiten ( $U_{10} < 10$  m/s) wird sich dieses Verhältnis umkehren, d.h. die nichtlineare Wellenwechselwirkung nimmt zu, und die Dissipation durch Wellenbrechen nimmt ab. Konsequenterweise wird auch der zweite Faktor auf der rechten Seite von (3.18) sein Vorzeichen ändern, so daß die Forderung, der gesamte Ausdruck müsse positiv sein, erfüllt bleibt. Dieser Vorzeichenwechsel wird (sowohl aus mathematischen als auch aus physikalischen Gründen) dort stattfinden, wo die viskose Dissipation größer wird als der Windeintrag, also bei niedrigen bis mittleren Wellenzahlen,

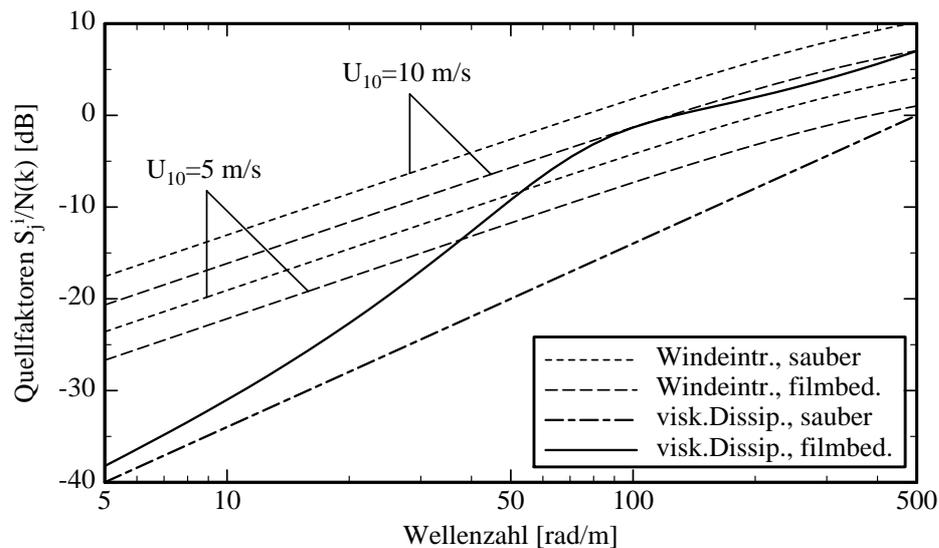


Abbildung 3.2: Faktoren der beiden linearen Quellterme für den Windeintrag,  $\beta_i$ , und die viskose Dissipation,  $2\Delta_i c_g$  in doppelt logarithmischer Darstellung für Windgeschwindigkeiten von 5 und 10 m/s. Das Verhältnis von Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  zur Windgeschwindigkeit  $U_{10}$  wurde als 3.5% und die Reduktion der Schubspannungsgeschwindigkeit bei Filmbedeckung als 30% angenommen.

denn der Verlust spektraler Energie oberhalb dieser Wellenzahlen muß nach (3.14) ausgeglichen werden, damit der Gleichgewichtszustand erhalten bleibt (bzw. wiederhergestellt wird).

### 3.3 Morphologie monomolekularer Oberflächenfilme

Natürliche Oberflächenfilme biogenen Ursprungs werden durch Fische, Algen, Plankton oder Korallen erzeugt und beinhalten hauptsächlich Fette, Kohlenhydrate, Proteine, Sterole und Fettsäuren [Hunter und Liss, 1981]. Typisch für diese oberflächenaktiven Substanzen ist die hydrophobe Kohlenstoff- (Alkyl-) Kette (mit Längen zwischen  $C_{14}$  und  $C_{20}$ ) auf der einen und die hydrophile Kopfgruppe (z.B. Ester) auf der anderen Seite. Dieser molekulare Aufbau führt zu einer Ansammlung derartiger Oberflächenfilme an der Grenzschicht zwischen Wasser und Luft, also an der Wasseroberfläche. Die Hauptbestandteile natürlicher Oberflächenfilme sind  $C_{16}$ - und  $C_{18}$ -Verbindungen [z.B. Hühnerfuss et al., 1982; Hühnerfuss, 1986], weshalb für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit beschriebenen Experimente gerade derartige Substanzen ausgewählt wurden.

Je nach Stärke der Wechselwirkungen der Filmmoleküle untereinander können Oberflächenfilme in drei Klassen aufgeteilt werden [Feindt, 1985; Hühnerfuss, 1986]:

- *Flüssig-kondensierte* Filme, bei denen die Wechselwirkung der hydrophoben Alkylketten am größten ist. Änderungen der Moleküldichte (bzw. der Fläche je

Molekül) haben demnach große Auswirkungen auf die Oberflächenspannung, weshalb das Dämpfungsvermögen dieser Klasse am größten ist.

- *Flüssig-expandierte* Filme, die eine geringere Wechselwirkung zwischen den Filmmolekülen zeigen. In diesem Fall ist demnach mit schwächeren Dämpfungscharakteristika zu rechnen.
- *Gasartige* Filme, bei denen (wie der Name vermuten läßt) praktisch keine Wechselwirkung der Filmmoleküle untereinander auftritt. Demzufolge zeigt diese Klasse das geringste Dämpfungsvermögen.

Die Fähigkeit monomolekularer Oberflächenfilme, Wasserwellen zu dämpfen, ist seit geraumer Zeit bekannt [z.B. *Lucassen-Reynders und Lucassen*, 1969; *Cini und Lombardini*, 1978; *Hühnerfuss und Garrett*, 1981; *Hühnerfuss*, 1986; *Alpers und Hühnerfuss*, 1989]. Dabei wurden unterschiedliche Annahmen über die Eigenschaften des Dilatationsmoduls  $E$  gemacht: Während er bei *Cini und Lombardini* [1978] als frequenzabhängig angenommen wird, schlägt *Hühnerfuss* [1986] die in Kapitel 3.2.1 vorgestellte frequenzunabhängige Form vor. Neuere Untersuchungen haben nun ergeben, daß dieselbe Substanz, wenn sie auf unterschiedliche Art auf die Wasseroberfläche ausgebracht wird, ein unterschiedliches Dämpfungsverhalten zeigt, was auf eine Variation des Dilatationsmoduls schließen läßt [*Hühnerfuss et al.*, 1994; 1996]. Diese Variation wird begründet mit dem *Morphologie-Effekt*, also der unterschiedlichen Anordnung und Wechselwirkung der Filmmoleküle an der Wasseroberfläche.

Der Morphologie-Effekt bedeutet, daß dieselbe filmformende Substanz an der Wasseroberfläche in unterschiedlicher Art angeordnet sein kann:

- Die Moleküle können homogen verteilt sein,
- sie sind in inselartigen Strukturen, sogenannten *Domänen*, angeordnet, deren Größe einige wenige bis einige hundert Mikrometer betragen kann [*Hönig et al.*, 1992],
- die hydrophoben Kohlenwasserstoff-(Alkyl-) Ketten der Moleküle sind, je nach Substanz, Temperatur oder Kompression, unterschiedlich geneigt (stehen also nicht senkrecht zur Wasseroberfläche),
- sie besitzen einen Knick, der zu einer sterischen Behinderung führt, oder
- die (hydrophile) Kopfgruppe wird durch die Kompression des Oberflächenfilms verändert, was wiederum Auswirkungen auf die Wechselwirkung mit den angrenzenden Wassermolekülen hat.

Durch die unterschiedliche Anordnung der Moleküle und/oder die unterschiedliche Form und Orientierung der langen Alkylketten wird die hydrophobe Wechselwirkung der Moleküle untereinander beeinträchtigt, was wiederum zu einer Veränderung des Dilatationsmoduls führt. Werden nun eins oder mehrere der angeführten Kriterien verändert, z.B. durch das Ausbringen der oberflächenaktiven Substanz in gelöster Form, so ist auch mit einer Veränderung des spezifischen Dämpfungsverhaltens zu rechnen. Erste Experimente auf offener See bestätigten diese Hy-

pothese [Hühnerfuss et al., 1994]. Die Ergebnisse, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgestellt werden, liefern eine weitere Bestätigung.

Neben der Morphologie sind auch die innere Struktur der Domänen sowie die Struktur des Wasserkörpers für die Dämpfungseigenschaften des Oberflächenfilms von Bedeutung [Hühnerfuss et al., 1994]. Beeinflusst werden diese Faktoren durch Parameter wie Salzgehalt, Temperatur und pH-Wert des Wassers oder die Kompression/Dilatation des Oberflächenfilms durch die Orbitalbewegung der Wellen. Ebenso kommt eine Beeinflussung durch windinduzierte mechanische Effekte in Frage, wie z.B. eine zusätzliche Kompression des Filmes an den windzugewandten Seiten der (langen) Wellen oder das bei steigender Windgeschwindigkeit einsetzende (Mikro-) Brechen der Wellen. Da aber eine Untersuchung der molekularen Struktur eines Oberflächenfilmes unter dynamischen Bedingungen (und erst recht *in situ*, also auf hoher See) unmöglich erscheint, müssen qualitative Betrachtungen an dieser Stelle ausreichen.

### 3.4 Erzeugung gebundener Rippelwellen

Für die Erzeugung der für die Radar-Rückstreuung verantwortlichen Braggwellen wurden in Kapitel 3.2.2 der Energieeintrag durch den Wind und die nichtlineare Wellenwechselwirkung verantwortlich gemacht. Eine Unterdrückung (bzw. Dämpfung) dieser Wellen findet demnach durch die viskose Dissipation sowie durch das Wellenbrechen statt (vgl. (3.14)). Durch Wellenbrechen werden aber wiederum an den Kämmen der längeren Wellen kleine Rippelwellen erzeugt, die dann mit der „Trägerwelle“ mitlaufen können und die ebenfalls einen Beitrag zur rückgestreuten Radarleistung liefern.

Theoretische Untersuchungen zur Erzeugung von Kapillarwellen (also Wellen kleiner Wellenlänge) an den Kämmen von Schwerewellen sind mehrfach durchgeführt worden [Longuet-Higgins, 1963; Crapper, 1970; Longuet-Higgins und Cleaver, 1993; Longuet-Higgins et al., 1994]. Die Oberflächenspannung des Wassers hat demnach auf die langen Schwerewellen kaum Einfluß (daher deren Name). Sind diese Wellen nun aber hinreichend steil, so daß an den Wellenkämmen Stellen großer (lokaler) Krümmung entstehen, gewinnt die Oberflächenspannung dort an Bedeutung. Longuet-Higgins [1963] leitet in einer Störungsrechnung die Erzeugung *gebundener* Kapillarwellen in der Nähe der Wellenkämme der Schwerewellen her, wobei für diese Erzeugung ein „Druck“  $-\tau\kappa$  verantwortlich ist, der das Produkt aus der Oberflächenspannung  $\tau$  und der lokalen Krümmung  $\kappa$  ist. Bei den auf diese Weise erzeugten Kapillarwellen handelt es sich um lineare Wellen, die auf nichtlinearen Schwerewellen erzeugt werden.

Crapper [1970] benutzt einen Lagrange-Formalismus, um die Verteilung der Steilheit von Kapillarwellen verschiedener (normierter) Wellenlänge entlang der Schwerewellen unterschiedlicher Phasengeschwindigkeit zu bestimmen. Das Ergebnis ist ebenfalls, daß die gebundenen Wellen auf der Vorderseite der Schwerewellen anzutreffen sind.

Erste präzise experimentelle Ergebnisse von Messungen hochfrequenter Kapillarwellen entlang von Schwerewellen wurden von *Chang et al.* [1978] vorgestellt. In ihren Experimenten erzeugten sie mit Hilfe eines Wellengenerators Schwerewellen mit großer Steilheit, also großem Produkt aus Wellenzahl und Amplitude, und Frequenzen zwischen 3 Hz und 6 Hz. In Übereinstimmung mit der Theorie von *Longuet-Higgins* [1963] stellten sie fest, daß die Wellenlänge der Kapillarwellen mit zunehmendem Abstand vom Wellenkamm der Schwerewelle immer kleiner (also die Frequenz immer größer, vgl. Abbildung 3.3) wird. Die Frequenzen der gemessenen Kapillarwellen lagen zwischen 50 Hz und 300 Hz, was Wellenlängen zwischen 5.9 mm und 1.7 mm entspricht.

Gleiche Werte wurden von *Ebuchi et al.* [1987] gefunden, die Messungen der Wellenlängen der Kapillarwellen in Abhängigkeit von der Schubspannungsgeschwindigkeit und der lokalen Krümmung am Wellenkamm durchführten und mit Simulationen verglichen. Diese Autoren unterteilen die Oberfläche der Schwerewellen in eine Region mit stromlinienförmigen Streifen (*streamwise streaks*) und, an deren vorderem Ende, eine Region mit Kapillarwellen (siehe Abbildung 3.3). Der obere Bereich des Wellenberges ist ein Gebiet großer Wirbeligkeit, wo die starke lokale Krümmung (wie

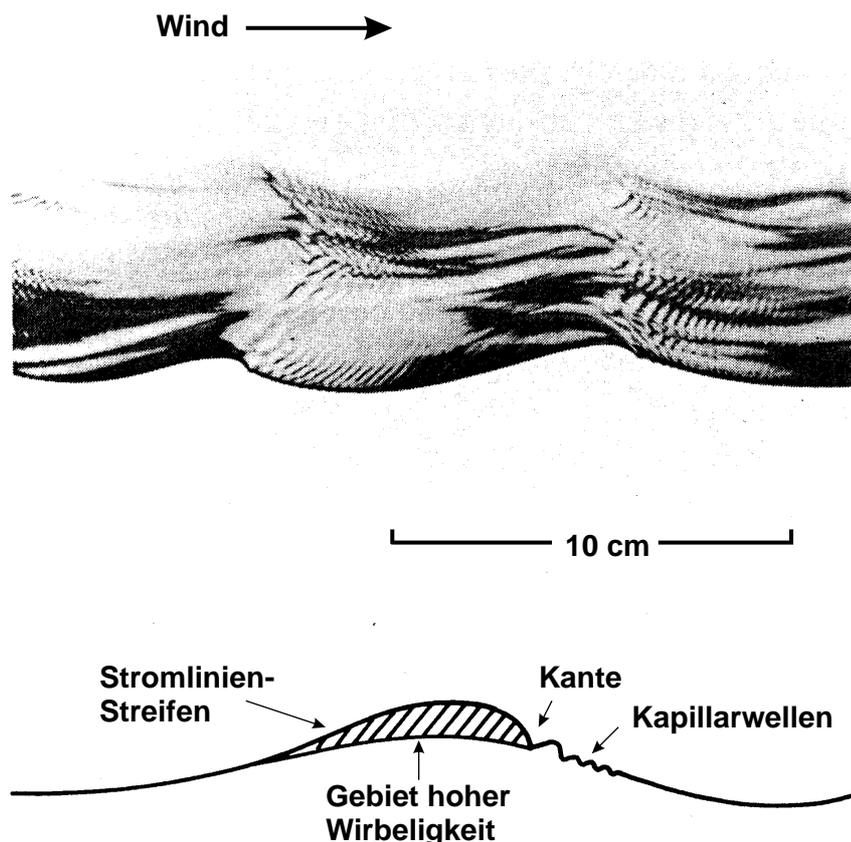


Abbildung 3.3: Fotografie und schematische Darstellung der Strukturen an der Wasseroberfläche entlang der Schwerewellen bei einer Windgeschwindigkeit von 6 m/s. Nach *Ebuchi et al.* [1987].

von Longuet-Higgins [1963] beschrieben) zur Generierung von Kapillarwellen führt.

Weitere Meßergebnisse, die mit einem X-Band-Mikrowellen-Scatterometer, das bei einer Frequenz von 10.5 GHz und unter unterschiedlichen Einfallswinkeln arbeitete, gewonnen wurden, haben Ebuchi *et al.* [1992] vorgestellt. Sie benutzten kein kohärentes Scatterometer sondern ermittelten die Propagationsgeschwindigkeit der Braggwellen über eine Spektralanalyse der Zeitserien für die Radar-Rückstreuung. Diese Autoren kommen zu dem Ergebnis, daß sich die Streuobjekte (also die Braggwellen) bei Windgeschwindigkeiten im Bereich zwischen 3 m/s und 14 m/s nicht mit der eigenen Phasengeschwindigkeit sondern mit der der dominanten Welle fortbewegen. Auch diese Ergebnisse unterstützen die Theorie bzw. die Beobachtungen, daß eine kleinskalige Wellenstruktur an der Vorderseite der Wellenkämme der Schwerewellen erzeugt wird und mit ihnen „mitreitet“.



## 4 Beschreibung der unterschiedlichen Sensoren

Die Daten, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht wurden, sind mit Hilfe unterschiedlicher Sensoren gewonnen worden: Das Radar mit synthetischer Apertur (SAR, z.B. das SIR-C/X-SAR) ermöglicht die Aufzeichnung zweidimensionaler Bilder, während ein Scatterometer (wie das HELISCAT) eine Zeitserie der rückgestreuten Radarleistung liefert. Die Laborbedingungen eines Windwellenkanals erlauben zudem die gezielte Variation relevanter Randbedingungen, wie z.B. der Windgeschwindigkeit, sowie den Einsatz weiterer Sensoren wie Wellendraht oder Lasersonde.

Die SIR-C/X-SAR-Aufnahmen wurden fertig prozessiert vom Jet Propulsion Laboratory (JPL) in Pasadena, Kalifornien, bzw. der Deutschen Agentur für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen zur Verfügung gestellt, während die Daten des HELISCAT sowie der Sensoren am Windwellenkanal im Institut für Meereskunde der Universität Hamburg prozessiert wurden.

In diesem Abschnitt wird neben den unterschiedlichen Sensoren sowie dem Windwellenkanal der Universität Hamburg auch die Vorgehensweise bei der Datenprozessierung vorgestellt. Technische Details sowie der Abbildungsmechanismus des SAR bleiben dagegen ausgespart.

### 4.1 HELISCAT

Das HELISCAT ist ein 5-Frequenz-Multipolarisations-Scatterometer, das im Institut für Meereskunde der Universität Hamburg entwickelt und gebaut wurde. Es wurde konstruiert für den Einsatz in einem Bo 105-Helikopter und arbeitet mit den Frequenzen 1.0 GHz (L-Band), 2.4 GHz (S-Band), 5.3 GHz (C-Band), 10.0 GHz (X-Band) und 15.0 GHz (Ku-Band) und mit den vier Polarisationskombinationen VV, HH, VH und HV (der erste Buchstabe steht für die Polarisation der gesendeten, der zweite für die der empfangenen Strahlung; H für horizontal und V für vertikal). Durch Schwenken der Parabolantenne können Einfallswinkel im Bereich zwischen 23 und 65° eingestellt und daraufhin – nach (3.2) – Bragg-Wellenzahlen zwischen 16 und 570 rad/m abgedeckt werden (während der hier beschriebenen Experimente wurde der Einfallswinkel nur in Zehnerschritten zwischen 23° und 53° variiert, da bei größeren Einfallswinkeln der Beleuchtungsfleck – relativ zu den Oberflächenfilmen – zu groß geworden wäre, vgl. Tabelle 4.1). Die Steuerlogik ist derart konstruiert, daß die Daten in den einzelnen Kanälen praktisch simultan aufgezeichnet werden (die Pulsrate, also die Wiederholrate der Sendepulse der einzelnen Kanäle, beträgt 40 kHz). Bei dem HELISCAT handelt es sich um ein kohärentes System, es werden also Dopplersignale (genauer: die rückgestreuten, Doppler-verschobenen und auf den Bereich einiger kHz heruntergemischten Radarsignale) aufgezeichnet. Polarimetrische Messungen sind mit dem HELISCAT nicht möglich.

Während der Messungen wurden die analogen Daten auf VHS-Kassetten aufgezeichnet und später im Institut für Meereskunde digitalisiert. Die digitalen Zeitserien

wurden jeweils abschnittsweise fouriertransformiert und in den auf diese Weise berechneten Dopplerspektren diejenigen Frequenzbereiche ausgewählt, in denen das Übersprech-Signal (zur „internen Kalibrierung“) sowie das Nutzsignal lagen. Außerdem wurde ein Frequenzbereich zur Bestimmung des Geräterauschens definiert. Die Integration über die entsprechenden Frequenzbereiche lieferte dann die Zeitserien für die relative Radar-Rückstreuung in den einzelnen Radarbändern und Polarisationen, also insgesamt 20 parallel aufgezeichnete Zeitserien. Auf eine absolute Kalibrierung konnte verzichtet werden, da für die hier beschriebenen Untersuchungen nur das Verhältnis der Radar-Rückstreuquerschnitte von Interesse ist.

Für jeden Überflug (*Run*) wurden nun aus den Zeitserien der Radar-Rückstreuung die Bereiche der filmfreien und filmbedeckten Wasseroberfläche ausgewählt und jeweils über diese Bereiche gemittelt. Dabei mußte – wegen der zum Teil sehr hohen Dämpfung des Radarsignals – darauf geachtet werden, daß das Signal jederzeit, also auch in den Gebieten mit filmbedeckter Wasseroberfläche, nicht im Rau-

	<i>HELISCAT-System</i>				
<b>Scatterometer Typ</b>	Superheterodynes Doppler-Scatterometer				
<b>Antenne</b>	Parabolantenne, Ø 96 cm				
<b>Polarisationen</b>	VV, HH, VH, HV				
<b>nominelle Flughöhe [m]</b>	150				
<b>nominelle Geschwindigkeit über Grund [m/s]</b>	50				
<b>Einfallswinkel [°]</b>	23 bis 65				
<b>Pulsrate [kHz]</b>	40				
<b>Frequenzbänder</b>	<i>L</i>	<i>S</i>	<i>C</i>	<i>X</i>	<i>Ku</i>
<b>Frequenz [GHz]</b>	1.0	2.4	5.3	10.0	15.0
<b>Wellenlänge [cm]</b>	30.0	12.5	5.7	3.0	2.0
<b>Ausgangsleistung [mW]</b>	150	100	40	10	10
<b>Breite der Antennenkeule (2-Wege; 3dB) [°]</b>	17.0	7.1	3.2	1.7	1.1
<b>Beleuchtungsfleck bei</b>					
$\vartheta = 23^\circ$ [m × m]	53.1×24.4	22.0×10.1	9.9×4.6	5.3×2.4	3.4×1.6
$\vartheta = 53^\circ$ [m × m]	128.9×37.3	51.7×15.5	23.2×7.0	12.3×3.7	8.0×2.4

Tabelle 4.1: System-Parameter des HELISCAT-Systems (Zur Berechnung der Dimensionen des Beleuchtungsflecks wurden jeweils der kleinste und der größte eingestellte Einfallswinkel verwendet).

schen verschwand. Datensätze, die dieses Kriterium nicht erfüllten, sind aussortiert und für die weitere Interpretation der Meßergebnisse nicht mehr herangezogen worden.

Aus den mittleren Werten für die Neigung des Hubschraubers („Stampfen und Rollen“, *pitch and roll*) sowie aus der Antennencharakteristik (Breite der Antennenkeule, siehe Tabelle 4.1) wurden schließlich die *effektiven* Einfallswinkel und daraus wiederum die Bragg-Wellenzahlen berechnet. Datensätze, bei denen der effektive Einfallswinkel unter  $20^\circ$  liegt, wurden ebenfalls aussortiert, da in diesem Fall nicht mehr von Bragg-Streuung ausgegangen werden kann (vgl. Abschnitt 3.1.1).

Auf die Darstellung der Fehlerbalken zu sämtlichen Datenpunkten wird verzichtet, da die Übersichtlichkeit der Abbildungen wegen der großen Anzahl an Meßpunkten darunter leiden würde. Typische Werte für die aus der Mittelung über mehrere Datenpunkte resultierenden Fehler liegen bei etwa 3–5 dB.

Für eine genauere Beschreibung der technischen Details sowie der Qualitätsmerkmale der einzelnen Datensätze sei auf *Wismann [1994]* resp. *Wismann [1995]* verwiesen.

## 4.2 SAR-Sensoren an Bord der "Endeavour"

Während beider Missionen befanden sich dieselben Radargeräte (Abbildung 4.1) an Bord der Raumfähre *Endeavour*, wodurch nicht nur multitemporale Untersuchungen (also Radaraufnahmen derselben Gebiete zu verschiedenen Jahreszeiten) möglich waren, sondern auch aufwendige Aus- und Einbauten sowie Umkonstruktionen ver-

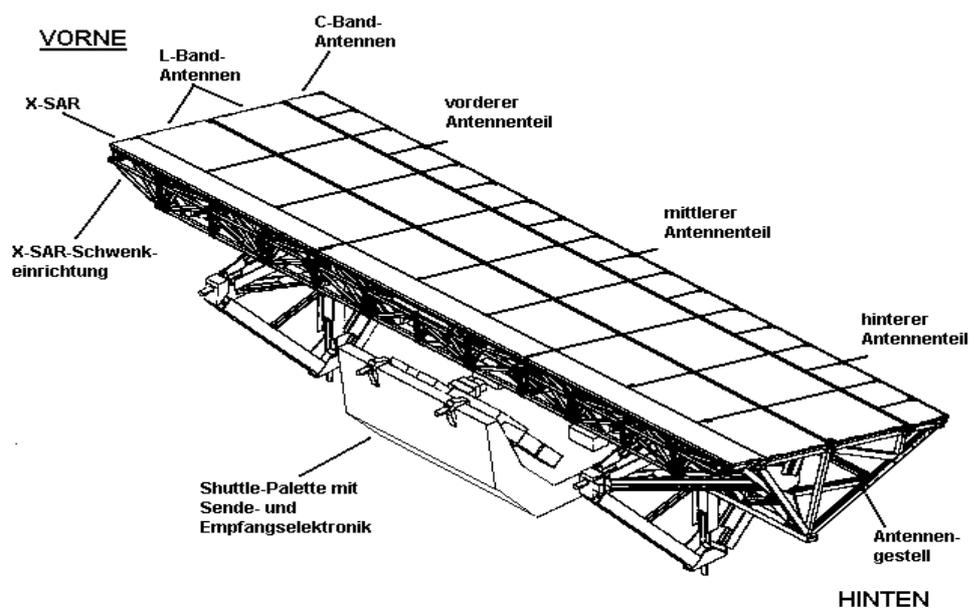


Abbildung 4.1: Darstellung des SIR-C/X-SAR-Systems

(Quelle: JPL)

hindert wurden. Die „Blickrichtung“ beider Antennen war variabel, so daß der Einsatz unter verschiedenen Beobachtungswinkeln möglich war (also den Winkeln zwischen der Antennenblickrichtung und dem Lot, bzw. der Verlängerung des Erdradius – der Einfallswinkel auf der Meeresoberfläche war wegen der Flughöhe der Raumfähre und der Erdkrümmung jeweils etwas größer). Durch diesen im Bereich zwischen 17° und 63° variablen Beobachtungswinkel variierte auch die Breite des Schwades, also des von der Antenne beleuchteten Streifens. Eine genaue Beschreibung des SIR-C/X-SAR findet sich beispielsweise bei *Jordan et al.* [1995].

#### 4.2.1 X-Band ("X-SAR")

Das X-Band Synthetik- Apertur-Radar ("X-SAR") wurde in deutsch-italienischer Gemeinschaftsproduktion entwickelt und von der deutschen Firma Dornier gebaut. Es handelt sich um ein kohärentes Radar mit passiver Antenne (Hohlleiterschlitzen-Array). Mit dieser mechanisch schwenkbaren Antenne, die an die L- und C-Band-Antennen montiert war (Abbildung 4.1), wurden Radaraufnahmen bei 9.6 GHz (X-Band) und ausschließlich vertikaler Polarisation (VV) gemacht. Durch die Beschränkung auf eine Polarisation sind keine polarimetrischen Untersuchungen mit X-SAR-Bildern möglich. Die Breite des Schwades variierte zwischen 15 km und 40 km, die Auflösung war stets 25 m (siehe Tabelle 4.2). Eine genaue Beschreibung der Daten findet sich z.B. bei *Zink und Bamler* [1995].

	<i>SIR-C/X-SAR</i>		
<b>Orbithöhe [km]</b>	225		
<b>Inklination [°]</b>	57		
<b>Erdumläufe</b>	183 pro Mission		
<b>Beobachtungswinkel [°]</b>	20 bis 55		
<b>Auflösung [m×m]</b>	25 × 25 (an der Oberfläche)		
<b>Pulsrate [Hz]</b>	1240 / 1736		
<b>Gesamtgewicht [kg]</b>	11.000		
<b>Frequenzbänder</b>	<i>L-Band</i>	<i>C-Band</i>	<i>X-Band</i>
<b>Frequenz [GHz]</b>	1.249	5.3	9.6
<b>Wellenlänge [cm]</b>	23.5	5.8	3.1
<b>Schwadbreite [km]</b>	15 bis 90	15 bis 90	20 bis 70

Tabelle 4.2: Parameter des SIR-C/X-SAR [*Jordan et al.*, 1995; *Zink und Bamler*, 1995]

#### 4.2.2 L- und C-Band ("SIR-C")

Das Shuttle-Imaging-Radar-C (SIR-C) besteht aus einem L-Band- und C-Band-Synthetik-Apertur-Radar, dessen Sende- und Empfangsmodule auf Halbleiterbasis konstruiert sind. Mit diesen Modulen werden *Phased Arrays* mit beschränkter Schwenkmöglichkeit des Antennendiagramms angesteuert, die Antenne ist also (im Gegensatz zum X-SAR) elektronisch schwenkbar. Die neuere Technik des SIR-C ermöglichte auch ein „beam forming“, also die Anpassung der Antennenkeule an die Schwadbreite. SIR-C bot die Möglichkeit, Radaraufnahmen bei 1.24 GHz (L-Band) und 5.3 GHz (C-Band) sowie in sämtlichen Kombinationen von vertikaler und horizontaler Polarisation zu machen. Je nach eingestellter Betriebsart (*Mode*) wurde nun eine bestimmte Anzahl an Kombinationen von Radarband und Polarisation aufgenommen, siehe Tabelle 4.3 (also z.B. im Mode 16 sämtliche Polarisationen in beiden Bändern, im Mode 13 dagegen nur die Kopolarisationen, also HH und VV, usw.). Auf diese Weise standen für die Auswertung von Radarbildern teilweise mehrere Polarisationen zur Verfügung.

Betriebsart	L-Band				C-Band				X-Band
	HH	HV	VV	VH	HH	HV	VV	VH	VV
7x	➔	-	-	-	➔	-	-	-	➔
9x	-	-	➔	-	-	-	➔	-	➔
11x	➔	➔	-	-	➔	➔	-	-	➔
13x	➔	-	➔	-	➔	-	➔	-	➔
16x	➔	➔	➔	➔	➔	➔	➔	➔	➔

Tabelle 4.3: Auswahl einiger Betriebsarten des SIR-C/X-SAR. Markiert sind die jeweils eingeschalteten Polarisationen der drei Radarbänder.

Neben sämtlichen Kombinationen der beiden Radarbänder L und C mit den vier Polarisationskombinationen HH, VV, HV und VH bot SIR-C auch die Möglichkeit, komplexe Bildinformationen, also z.B. die Phaseninformation zwischen horizontaler und vertikaler Polarisation, zu erhalten. Ein derartiger, vollständiger Satz an komplexen Radardaten ist für die im vorigen Kapitel vorgestellte Polarisations-synthese nötig, da nur in diesem Fall die Komponenten der Müller-Matrix  $\mathbf{M}$  (vgl. Abschnitt 3.1.3, (3.11)) aus dem Bild ermittelt werden können. Polarimetrische Untersuchungen waren demnach – wenn die geeignete Betriebsart eingestellt war – im L-Band und im C-Band möglich. Eine genauere Beschreibung der SIR-C-Daten (sowie deren Kalibrierung und Qualität) haben *Freeman et al.* [1995] gegeben.

### 4.3 Sensoren am Windwellenkanal

Um genaue Erkenntnisse über den Einfluß unterschiedlicher Größen wie beispielsweise der Windgeschwindigkeit auf die gewonnenen Meßergebnisse zu erhalten, sind im Rahmen der vorliegenden Arbeit Untersuchungen am Windwellenkanal der Universität Hamburg durchgeführt worden. Ein Windwellenkanal bietet den Vorteil, daß viele der relevanten Parameter gezielt variiert werden können, wobei immer berücksichtigt werden muß, daß es sich hierbei um Laborbedingungen handelt.

Umfangreiche Radarmessungen an einer filmbedeckten Wasseroberfläche sind u.a. von *Feindt* [1985] und *Gade* [1992] durchgeführt worden. Dort werden auch jeweils Windwellenkanal und Meßapparaturen genau beschrieben, so daß ihre Vorstellung in diesem Abschnitt kurz gehalten werden kann. Für weitere detaillierte Beschreibungen sei zudem auf *Hühnerfuss et al.* [1976], *Lobemeier* [1981] und *Lange et al.* [1982] verwiesen.

#### 4.3.1 Windwellenkanal

Der Windwellenkanal der Universität Hamburg befindet sich in einer Halle auf dem Gelände der Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, in Hamburg-Rissen. Er hat eine Gesamtlänge von 26 m mit einer effektiven Windwirklänge von 19 m, eine Breite von 1 m und eine Höhe von 1.5 m. Bei ruhiger Wasseroberfläche ist die Wassertiefe 0.5 m, so daß die Luftstromhöhe (also die Höhe des Luftraumes innerhalb des Kanals) 1 m beträgt (siehe Abbildung 4.2). Der Luftstrom mit Geschwindigkeiten zwischen 1.5 m/s und 25 m/s wird durch ein Radialgebläse erzeugt und beim Eintritt in den Windwellenkanal durch eine Wabenscheibe homogenisiert. Nach 1.5 m wird in einer Höhe von 0.65 m die Referenz-Windgeschwindigkeit  $U_r$  mit Hilfe eines Propeller-Anemometers gemessen. Der Meßort befindet sich in einem Abstand von 15.5 m vom Windeintritt.

Neben den Windwellen können auch mechanisch erzeugte Wasserwellen im Frequenzbereich zwischen 0.7 Hz und 2.5 Hz (das entspricht Wellenlängen zwischen 2.39 m und 0.25 m) mit Hilfe einer Wellenklappe generiert werden. Außerhalb dieses

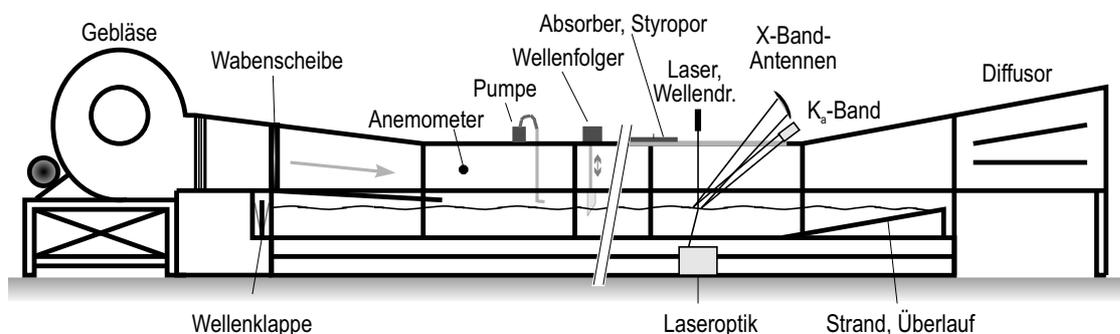


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung des Windwellenkanals.

Frequenzbereiches ist die Erzeugung sinusförmiger Wasserwellen nicht mehr möglich, da sich bei zu großen Wellenlängen die geringe Wassertiefe bemerkbar macht und bei zu hohen Frequenzen Nichtlinearitäten und Oberschwingungen schon bei der Wellenerzeugung an der Wellenklappe auftreten. Für Wasserwellen im Frequenzbereich zwischen 3 und 5 Hz (Wellenlängen zwischen 17.5 und 6.7 cm) sorgte ein „Wellenfolger“, in den eine Sinusspannung entsprechender Frequenz eingespeist wurde und der die Wellen durch Auf- und Abbewegen eines angeschrägten Styroporblocks in einer Distanz von 4 m vom Meßort erzeugte (Abbildung 4.2).

Am leeseitigen Ende des Windwellenkanals sorgt ein aus Kokosmatten bestehender Strand für das Auslaufen und somit für eine minimale Reflexion der Wasserwellen.

#### 4.3.2 X- und Ka-Band

Um die Leistung sowie die Dopplerverschiebung der rückgestreuten Mikrowellen bei unterschiedlicher Filmbedeckung, Wellenhöhe und Windgeschwindigkeit zu messen, waren am Meßort zwei kohärente Scatterometer installiert, die unter verschiedenen Einfallswinkeln jeweils gegen die Windrichtung (*upwind*) blickten. Während das X-Band-Scatterometer zur ständigen Ausstattung des Windwellenkanals gehört, war das Ka-Band-Scatterometer während einer gemeinsamen deutsch-russischen Meßkampagne installiert worden [Gade *et al.*, 1996a]. Die Parameter der beiden Mikrowellensonden finden sich in Tabelle 4.4.

Das X-Band-Scatterometer arbeitet bei 9.8 GHz (Mikrowellenlänge 3.1 cm) und

<i>Radarband</i>	<i>X</i>	<i>Ka</i>
<b>Scatterometer-Typ</b>	Superheterodynes Doppler-Scatt.	Doppler-Scatt.
<b>Frequenz [GHz]</b>	9.8	37
<b>Polarisation</b>	VV	VV
<b>Radarwellenlänge [cm]</b>	3.06	0.81
<b>Breite der Antennenkeule (1-Weg; 3dB) (vert./horiz.) [°]</b>	4 / 3.5	2.5 / 2.5
<b>Einfallswinkel [°]</b>	35	53
<b>Beleuchtungsfleck (längs × quer) [cm × cm]</b>	15 × 18	20 × 31
<b>Bragg-Wellenlänge [cm]</b>	2.67	0.51
<b>Bragg-Wellenzahl [rad/m]</b>	236	1239

Tabelle 4.4: Parameter der beiden Scatterometer am Windwellenkanal.

VV-Polarisation, wobei die bistatische Antennenkonfiguration eine beliebige Kombination der Polarisierungen für Senden und Empfang zulässt (allerdings nicht das gleichzeitige Messen unterschiedlicher Polarisationskombinationen). Der Durchmesser der beiden Parabolantennen, die mit einem Stahlrahmen am Hallendach befestigt sind, ist jeweils 0.56 m und der (konstante) Abstand zur Wasseroberfläche etwa 2.5 m [Feindt, 1985]. Der Einfallswinkel wurde während der gesamten Messungen konstant bei  $35^\circ$  gehalten. Durch die Verwendung zweier getrennter interner Oszillatoren (und nachgeschalteter nichtlinearer Mischelemente) wird das empfangene Mikrowellensignal in einem ersten Schritt auf 50 MHz heruntergemischt (das entspricht der Differenz der Frequenzen der beiden Oszillatoren). In einem weiteren Schritt wird das Signal mit Hilfe eines externen, sehr stabilen Oszillators auf eine konstante Offset-Frequenz von 80 Hz heruntergemischt. Diese aufwendigere Technik erlaubt es, positive und negative Dopplerverschiebungen zu unterscheiden.

Das Ka-Band-Scatterometer arbeitete bei 37 GHz (Mikrowellenlänge 0.8 cm) und ebenfalls VV-Polarisation, wobei die monostatische Konstruktion aus einem Sendehorn und einer Linse mit 10 cm Durchmesser bestand, mit deren Hilfe die Mikrowellen auf die Wasseroberfläche fokussiert wurden. Da als Mikrowellenquelle nur eine einzelne Gunnediode diente, war das (Wechselspannungs-) Ausgangssignal nicht mit einer Offset-Frequenz belegt, es konnte also nur der Absolutbetrag der Dopplerverschiebung gemessen werden.

Typische Dopplerspektren, die mit beiden Scatterometern bei einer Referenz-Windgeschwindigkeit von 5 m/s und filmfreier Wasseroberfläche aufgenommen wurden, sind in Abbildung 4.3 dargestellt. Das Ka-Band zeigt wegen seiner höheren Frequenz sowohl eine größere Dopplerverschiebung als auch -bandbreite (also Breite

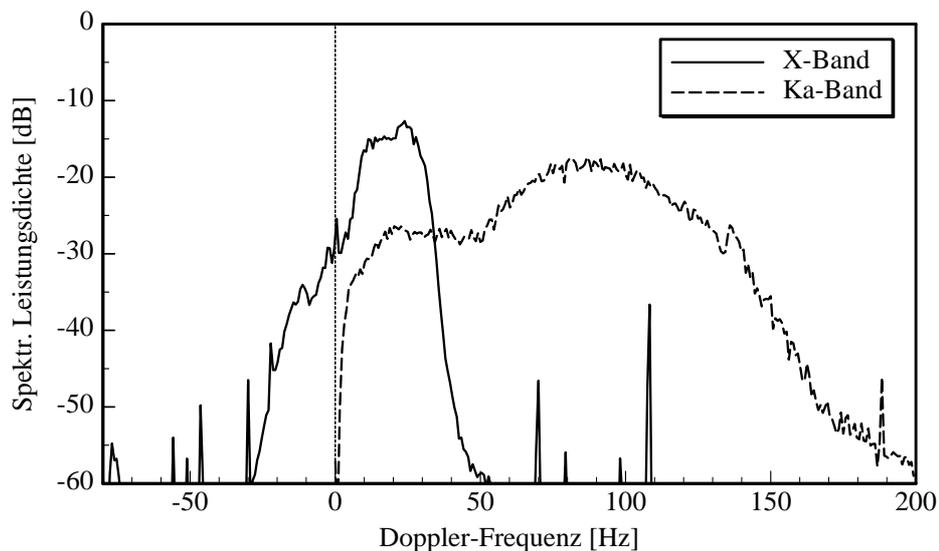


Abbildung 4.3: Typische Dopplerspektren, die mit den beiden am Windwellenkanal installierten Scatterometern im X-Band und Ka-Band bei einer Windgeschwindigkeit von 5 m/s und filmfreier Wasseroberfläche aufgenommen wurden.

des spektralen Maximums). Wegen des unterschiedlichen Aufbaus der Geräte sind mit dem X-Band-Scatterometer auch negative Dopplerverschiebungen meßbar.

Die Datenprozessierung verlief bei beiden Sensoren gleichermaßen: Von den mit einer Abtastrate von 500 Hz aufgezeichneten Zeitserien wurde jeweils das Dopplerspektrum berechnet. Die Integration über das spektrale Maximum innerhalb seiner 3 dB-Grenzen lieferte ein Maß für den relativen Rückstreuquerschnitt  $\sigma_{rel}$ , die Berechnung des Frequenz-Schwerpunktes, also des (mit der Leistung gewichteten) ersten Moments des Spektrums, die (mittlere) Dopplerverschiebung. Von absoluten Kalibrierungen der Scatterometer am Windwellenkanal wurde – ebenso wie beim HELISCAT – abgesehen, da auch hier nur relative Änderungen des Radar-Rückstreuquerschnitts gemessen werden sollten.

#### 4.3.3 Wellendraht- und Lasersonde

Für die Messung von Wellenauslenkung und -neigung waren am Meßort eine Wellendraht- resp. eine Lasersonde installiert (siehe Abbildung 4.2). Die Wellendrahtsonde besteht aus einem 0.075 mm starken Wolframdraht, in den ein hochfrequentes Wechselfeld eingespeist wird (mit dem Rahmen des Windwellenkanals als anderem Pol). Eine nachgeschaltete Elektronik sorgt dafür, daß die Ausgangsspannung proportional ist zur Eindringtiefe des Drahtes in das Wasser [Lobemeier, 1981]. Das theoretische digitale Auflösungsvermögen liegt bei der gewählten Verstärkung bei 0.035 mm [Gade, 1992]. Das zeitliche Auflösungsvermögen liegt bei 78 Hz [Lange et al., 1982], das effektive Auflösungsvermögen allerdings bei etwa 30 Hz.

Die Lasersonde besteht aus einem 2 mW-HeNe-Laser, der derart am Kanaldach befestigt ist, daß er senkrecht auf die Wasseroberfläche strahlt. Der in das Wasser eindringende Laserstrahl (mit einem Durchmesser von 1 mm) wird an der (geneigten) Wasseroberfläche gebrochen und gelangt durch ein Fenster im Kanalboden und eine Fresnellinse auf eine Streuscheibe. Unterhalb dieser Streuscheibe ist eine Photodiode mit zweidimensionaler Auflösung von jeweils 2.5  $\mu\text{m}$  montiert, so daß auf diese Weise die Wellenneigung sowohl längs der Kanalachse als auch quer dazu aufgezeichnet wird. Das theoretische Auflösungsvermögen der Wellenneigung liegt bei  $2.7 \cdot 10^{-4}$  rad [Gade, 1992], das zeitliche Auflösungsvermögen bei etwa 100 Hz [Lange et al., 1982].



## 5 Ergebnisse der Messungen mit dem HELISCAT

Das SIR-C/X-SAR bot zwar den Vorteil einer großen und schnellen Überdeckung der Testgebiete, dies aber jeweils nur für eine kurze Zeit. Um nun beispielsweise die zeitliche Entwicklung des Dämpfungsverhaltens eines Oberflächenfilms zu studieren, fanden daher während beider Missionen auch Meßkampagnen mit dem HELISCAT der Universität Hamburg statt, in denen dieselben Oberflächenfilme überflogen wurden, die auch von den SAR-Systemen an Bord der Raumfähre erfaßt wurden.

In einem zusätzlichen Experiment wurde im April 1994 eine weitere Gruppe von Oberflächenfilmen überflogen, die in der Nähe von Helgoland auf die Wasseroberfläche ausgebracht worden waren, um zu ermitteln, welche Auswirkung das Ausbringen in gelöster Form auf das Dämpfungsvermögen hat. Einen weiteren Datensatz lieferte die Überfliegung von natürlichen Oberflächenfilmen, die sich zu dieser Zeit westlich von Amrum auf der Meeresoberfläche bildeten.

Die Oberflächenfilme wurden jeweils parallel oder quer zur Windrichtung überflogen, so daß – neben den Unterschieden in der Radarfrequenz und Polarisation – drei Unterscheidungskriterien für die Radarblickrichtung bestehen: Sie kann *mit* der Windrichtung erfolgen (*downwind*), *gegen* die Windrichtung (*upwind*) oder *quer* zum Wind (*crosswind* – hier macht eine Unterscheidung der beiden Quer-Flugrichtungen keinen Sinn).

### 5.1 Oleylalkohol bei mittlerer Windgeschwindigkeit

Am 18. April 1994 wurde im Seegebiet westlich der Insel Sylt ein großer Oberflächenfilm erzeugt, indem von einem (zweiten) Helikopter aus 80 g schwere Würfel, die aus insgesamt 120 Litern gefrorenem Oleylalkohol (OLA – siehe Tabelle 3.1) bestanden, auf der Meeresoberfläche verteilt wurden. Indem diese Würfel schmolzen, bildeten sie innerhalb weniger Minuten einen monomolekularen Film mit einer Größe von ca. 1.5 km<sup>2</sup> aus, der mit Hilfe der SAR-Sensoren an Bord der Raumfähre *Endeavour* aufgenommen wurde (siehe Abschnitt 6.1). Während dieser ersten Weltraum-Mission wurde nur ein einzelner, großer OLA-Film ausgebracht, da das Dämpfungsverhalten dieser Substanz sehr gut, das Abbildungsverhalten der SAR-Sensoren an Bord der Raumfähre bezüglich dieses Oberflächenfilmes allerdings noch nicht bekannt waren.

Nach dem Abwerfen dieser Würfel startete der zweite Hubschrauber mit dem HELISCAT. Die meteorologischen sowie ozeanographischen Bedingungen während dieses ersten Meßfluges sind in Tabelle 5.1 zusammengefaßt (Die Wetterdaten wurden durch die Sensoren am *Meßpfahl Westerland* gewonnen, die Tidendaten sind der Gezeitentabelle entnommen – sämtliche Richtungsangaben sind physikalisch, geben also an, in welche Richtung die Strömung verläuft!). Der OLA-Film wurde insgesamt 29mal überflogen, wobei wegen eines Fehlers bei der Datenaufnahme Meßergebnisse der letzten sechs Überflüge nicht zur Verfügung stehen.

<i>Erster Meßflug am 18. April 1994 vor Sylt</i>	
<b>Position</b>	54° 54' N / 7° 50' E
<b>Zeitraum [MESZ]</b>	06:54 – 07:52
<b>Windgeschwindigkeit [m/s]</b>	5
<b>Windrichtung [°N]</b>	210
<b>sign. Wellenhöhe [m]</b>	1.5
<b>Wellenlaufrichtung [°N]</b>	135
<b>Lufttemperatur [°C]</b>	3.3
<b>Wassertemperatur [°C]</b>	7
<b>Gezeitenströmung [m/s]</b>	0.2
<b>Gezeitenrichtung [°N]</b>	330

Tabelle 5.1: Meteorologische und ozeanographische Bedingungen während des ersten Meßfluges mit dem HELISCAT am 18. April 1994 vor Sylt

Im folgenden werden die Meßergebnisse, die während dieses ersten Fluges gewonnen wurden, auf die unterschiedliche Aufnahmegeometrie und -technik (also Flugrichtung, Einfallswinkel und Polarisation) hin untersucht sowie auf die zeitliche Änderung der gemessenen Dämpfungskurven. Es wird darauf verzichtet, die einzelnen Überflüge getrennt auszuwerten – näheres findet sich bei *Wismann* [1995].

### 5.1.1 Zeitliche Entwicklung des Dämpfungsverhaltens

Abbildung 5.1 zeigt Daten, die über demselben Oberflächenfilm gewonnen wurden, unterteilt nach dem Zeitpunkt der Messung. Diese Unterteilung zeigt den deutlichen Unterschied zwischen den beiden Datengruppen:

- Diejenigen Meßwerte, die von den Überflügen 4 bis 7, also 8 bis 14 Minuten nach Beginn der Messungen, stammen, liegen deutlich unterhalb derer, die aus den Überflügen 8 bis 22 resultieren, also 14 bis 44 Minuten nach Beginn der Messungen gewonnen wurden. Dieses Ergebnis ist unabhängig von Polarisation und Flugrichtung sowie vom (nominellen) Einfallswinkel.

Es ist zu erkennen, daß sich das Dämpfungsverhalten des OLA-Films in den ersten Minuten ändert, also zu einem Zeitpunkt, zu dem er noch nicht vollständig auseinander gespreitet ist, daß es danach aber (für den Rest der Messungen) konstant bleibt. Aufgrund dieser Tatsache wird bei der weiteren Diskussion dieser Daten nur auf den späteren Datensatz zurückgegriffen (Runs 8–22), da der OLA-Film in diesem Fall über einen langen Zeitraum ein konstantes Dämpfungsverhalten gezeigt hat.

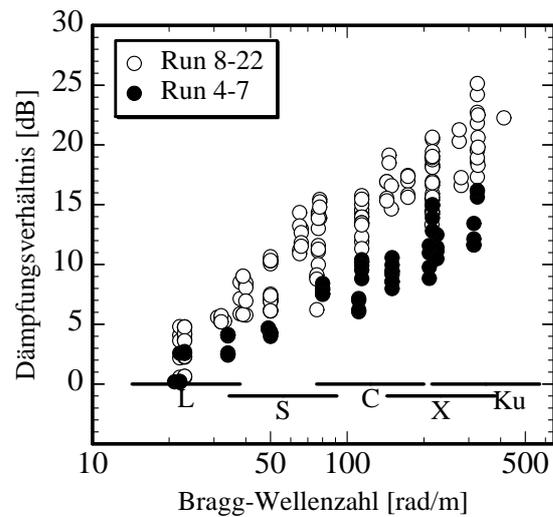


Abbildung 5.1: Mit dem HELISCAT gemessene Dämpfungsverhältnisse für den großen OLA-Film am 18. April 1994 vor Sylt, unterteilt nach dem Zeitpunkt des Überfluges.

### 5.1.2 Unterschiedliche Flugrichtungen und Polarisationen

In Abbildung 5.2 sind die Meßdaten, die während der Überflüge 10 bis 22 ermittelt wurden, dargestellt, wobei in Abbildung 5.2a nach der Beobachtungsrichtung und in Abbildung 5.2b nach der Polarisation unterschieden wurde. Die Streuung der Daten ist relativ gering.

In beiden Teilabbildungen ist die Abhängigkeit der gemessenen Dämpfungsverhältnisse von der Länge der Wasserwellen deutlich zu erkennen: Die Werte steigen mit zunehmender Bragg-Wellenzahl an. Eine Abhängigkeit von der Antennenblickrichtung des Scatterometers sowie von seiner Polarisation ist dagegen nicht zu erkennen.

### 5.1.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Meßergebnisse, die durch die Überflüge mit dem HELISCAT über einen reinen OLA-Film erzielt wurden, bestätigen diejenigen von früheren Meßkampagnen bei ähnlicher Windgeschwindigkeit [Wismann *et al.*, 1996b]. Im vorliegenden Fall konnte allerdings eine größere Anzahl von Meßwerten bei hohen Bragg-Wellenzahlen (also im X- und Ku-Band) Verwendung finden, und gerade aufgrund dieser Werte ist zu erkennen, daß kein Maximum im gemessenen Dämpfungsverhalten gefunden wurde.

Das Fehlen dieses Maximums kann im Prinzip zwei Ursachen haben:

- die theoretischen Werte für Betrag und Phase des Dilatationsmoduls sind nicht richtig bzw. beschreiben die physiko-chemischen Eigenschaften der oberflächenaktiven Substanz OLA unter diesen Bedingungen nicht korrekt.

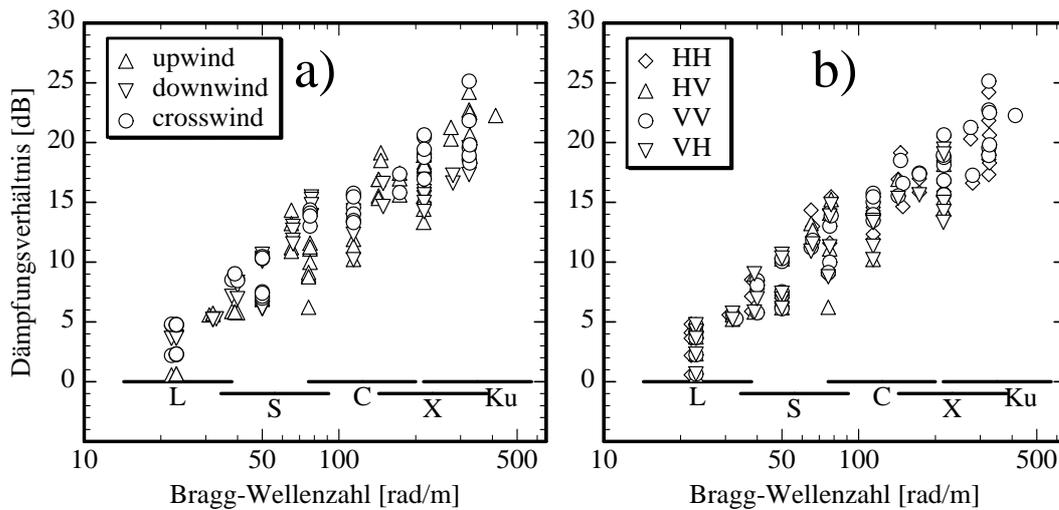


Abbildung 5.2: Mit dem HELISCAT gemessene relative Dämpfungsverhältnisse für den großen OLA-Film am 18. April 1994 vor Sylt, unterteilt a) nach der Blickrichtung und b) nach der Polarisation des Scattermeters.

- die Marangoni-Dämpfung stellt nicht – zumindest nicht über den gesamten Wellenzahlbereich – den dominanten Dämpfungsmechanismus dar, sondern wird vor allem bei großen Wellenzahlen durch die filmbedingte Reduktion von Windeintrag und Wellenbrechen in ihrer Wirkung übertroffen.

Wie schon bei Einführung der Marangoni-Dämpfung erwähnt, wurden die substanzspezifischen Parameter, mit denen die theoretischen Kurven berechnet wurden, durch Laborexperimente bei niedrigen Frequenzen der Wasserwellen und ohne Windeinflüsse bestimmt. Da Messungen der Dämpfungskoeffizienten über den gesamten Frequenz- bzw. Wellenzahlbereich nicht vorliegen, kann hier keine eindeutige Beurteilung der ersten Fehlerursache vorgenommen werden. *Ermakov et al.* [1986] haben allerdings bei einer sehr niedrigen Windgeschwindigkeit von 1 m/s und ölbedeckter Wasseroberfläche ein deutliches Maximum der spektralen Dämpfung bei einer Frequenz von 4 Hz ( $k \approx 65$  rad/m) gemessen, was auf die Richtigkeit des resonanzartigen Dämpfungsverhaltens schließen läßt.

Mehrfach sind in letzter Zeit Versuche unternommen worden, die von der Marangoni-Theorie abweichenden gemessenen Dämpfungsverhältnisse qualitativ und quantitativ zu beschreiben [*Vesecky*, 1995; *Macklin*, 1995], wobei allerdings eine Übereinstimmung der vorgestellten Modelle mit den Meßwerten allenfalls in bestimmten Bereichen der Windgeschwindigkeit auftrat. Einigkeit besteht indes darüber, daß die bloße Beschreibung der gemessenen Dämpfungsverhältnisse mit Hilfe der Marangoni-Dämpfung, also ohne Einbeziehung des Windes, nicht ausreicht.

Messungen der spektralen Dämpfungen von OLA bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten sind am Hamburger Windwellenkanal mit dem Wellendraht durchgeführt worden [*Gade*, 1992]. Es zeigte sich, daß bei einer Referenz-

Windgeschwindigkeit von 5 m/s die gemessene spektrale Dämpfung im Bereich zwischen 4 und 20 Hz ( $k \approx 60 - 500$  rad/m) deutlich oberhalb der theoretischen liegt, daß sie aber mit zunehmender Windgeschwindigkeit auf Werte abfällt, die mit den theoretischen vergleichbar oder kleiner als diese sind.

Diese Messungen führen, zusammen mit denen von *Ermakov et al.* [1986], zu dem Schluß, daß die charakteristische Marangoni-Dämpfung nur bei sehr niedrigen Windgeschwindigkeiten zu messen ist (wenn windinduzierte Einflüsse zu vernachlässigen sind). Bei mittleren Windgeschwindigkeiten (wie im vorliegenden Fall) ist die Beeinträchtigung windinduzierter Einflüsse durch den Oberflächenfilm von vergleichbarer Größe wie die Marangoni-Dämpfung, so daß deren deutliches Maximum neben der ebenso starken Dämpfung bei höheren Wellenzahlen verschwindet. Bei hohen Windgeschwindigkeiten schließlich muß die Beeinflussung windinduzierter Effekte dominieren, so daß mit einer Abnahme der gemessenen Dämpfungen auf Werte zu rechnen ist, die sich aus einer Reduktion der Schubspannungsgeschwindigkeit ergeben.

Diese Hypothesen werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit anhand des umfangreichen Datenmaterials überprüft – eine genauere Betrachtung windinduzierter Einflüsse erfolgt direkt in den anschließenden Abschnitten.

Sämtliche mit dem HELISCAT aufgenommenen Daten zeigen eine Unabhängigkeit von der Antennenblickrichtung (relativ zur Windrichtung). Nach (3.3) ist die rückgestreute Radarleistung abhängig von denjenigen Wellenkomponenten, die parallel zur Antennenblickrichtung verlaufen. Grundsätzlich sollten alle (Bragg-) Wellen durch den Oberflächenfilm gleichermaßen gedämpft werden, unabhängig von ihrer Laufrichtung, was durch die Meßdaten auch bestätigt wird (Eine Abweichung von diesem Sachverhalt kann nur eintreten, wenn das Wellenfeld stark gerichtet ist oder ein stark gerichteter Erzeugungsprozeß der Braggwellen durch den Oberflächenfilm unterdrückt wird, was aber unter den vorherrschenden experimentellen Bedingungen nicht der Fall war).

Die Unabhängigkeit der Meßdaten von der Polarisation ergibt sich aus der Tatsache, daß die Eindringtiefe der Mikrowellen in das Wasser mit einem Zehntel der Radarwellenlänge (bei Zentimeterwellen also  $10^{-3}$  m) wesentlich größer ist als die Schichtdicke des Oberflächenfilms (bei einer Moleküllage etwa  $10^{-9}$  m). Die dielektrischen Eigenschaften der Wasseroberfläche und somit die Streukoeffizienten (siehe (3.5)) werden durch die Anwesenheit eines Oberflächenfilms demnach nicht beeinflusst, so daß – Bragg-Streuung vorausgesetzt – keine Unterschiede in den Dämpfungsverhältnissen bei unterschiedlichen Polarisationen zu erwarten sind.

## 5.2 **Verschiedene gelöste Substanzen vor Helgoland**

Nach Abschluß der ersten Meßreihe über dem OLA-Film westlich von Sylt wurde eine zweite Meßkampagne über einer Gruppe von Oberflächenfilmen gestartet, die nordöstlich der Insel Helgoland ausgebracht worden waren. Es handelte sich hierbei wieder um einen reinen OLA-Film (der zur Referenz ausgebracht worden war) sowie um vier weitere Oberflächenfilme, die jeweils aus sowohl in *n*-Hexan als auch in Etha-

nol gelöstem OLA sowie Palmitinsäuremethylester (PME – siehe Tabelle 3.1) bestanden. Grund für das Ausbringen auch in gelöster Form waren Ergebnisse von *Hühnerfuss et al.* [1994], die gezeigt hatten, daß die Verwendung eines speziellen Substanzgemisches („KOFF“ –eine Beschreibung der Zusammensetzung findet sich bei *Hühnerfuss et al.* [1994]) in gelöster Form zu einer deutlich stärkeren Dämpfung führt. Die meteorologischen und ozeanographischen Bedingungen während dieser Meßreihe sind der Tabelle 5.2, die Mengen der verwendeten Substanzen und Lösungsmittel sowie die Anordnung der Oberflächenfilme der Tabelle 5.3 zu entnehmen. Auf das Ausbringen von PME in purer Form wurde von vornherein verzichtet, da aus früheren Experimenten bekannt war, daß eine derartige Substanz, wenn sie (in Form gefrorener Würfel) pur auf die Wasseroberfläche ausgebracht wird, *keine* Dämpfung des Radarsignals verursacht [*Hühnerfuss et al.*, 1994].

Die gelösten Oberflächenfilme wurden ausschließlich in flüssiger Form von Bord eines kleinen Schiffes aus ausgebracht, da dies aus Sicherheitsgründen von einem Helikopter aus nicht geschehen konnte. Einzig der pure OLA-Film wurde nach dem Ausbringen in flüssiger Form noch durch Abwerfen gefrorener Substanzwürfel vergrößert. Diese zweite Meßreihe bestand aus insgesamt 50 Überflügen, während derer die Oberflächenfilme einzeln (mit bzw. gegen den Wind, *downwind* resp. *upwind*) sowie gemeinsam (quer zum Wind, *crosswind*) vermessen wurden. Im folgenden werden die Ergebnisse dieser zweiten Meßreihe betrachtet, wird also untersucht, inwieweit sich die Substanzen in ihrer Dämpfung voneinander unterscheiden und welche Auswirkungen die unterschiedlichen Lösungsmittel auf das Dämpfungsverhalten haben.

<i>Zweiter Meßflug am 18. April 1994 vor Helgoland</i>	
<b>Position</b>	54° 17' N / 8° 00' E
<b>Zeitraum [MESZ]</b>	10:31 – 11:56
<b>Windgeschwindigkeit [m/s]</b>	4
<b>Windrichtung [°N]</b>	10
<b>sign. Wellenhöhe [m]</b>	1.5
<b>Wellenlaufrichtung [°N]</b>	135
<b>Lufttemperatur [°C]</b>	6.1
<b>Wassertemperatur [°C]</b>	7
<b>Gezeitenströmung [m/s]</b>	0.3 – 0.2
<b>Gezeitenrichtung [°N]</b>	270 – 200

Tabelle 5.2: Meteorologische und ozeanographische Bedingungen während des zweiten Meßfluges mit dem HELISCAT am 18. April 1994 vor Helgoland.

<i>Position (von W nach O)</i>	<i>Substanz</i>	<i>Lösungsmittel</i>	<i>Mengen (Subst./Lösgrsm.)</i>
1	OLA	–	120 l / –
2	OLA	<i>n</i> -Hexan	14 l / 50 l
3	OLA	Ethanol	14 l / 45 l
4	PME	<i>n</i> -Hexan	14 l / 50 l
5	PME	Ethanol	7 l / 100 l

Tabelle 5.3: Anordnung sowie Mengen und Lösungsmittel der Oberflächenfilme am 18. April 1994 vor Helgoland.

### 5.2.1 Vergleich zwischen gelösten und ungelösten Substanzen

In Abbildung 5.3 sind die Meßergebnisse der Überflüge über den drei OLA-Filmen dargestellt, wobei Abbildung 5.3a die Ergebnisse für pures, Abbildung 5.3b die für in Ethanol gelöstes und Abbildung 5.3c die für in *n*-Hexan gelöstes OLA beinhaltet (da die gemessenen Dämpfungsmaxima teilweise oberhalb von 30 dB liegen, wurde die Ordinate bei einigen Abbildungen dieses Abschnitts bis 35 dB erweitert). Wie schon bei den Ergebnissen des ersten Fluges (westlich von Sylt) gab es auch hier keine Unterschiede zwischen den einzelnen Flugrichtungen, weshalb auf eine detaillierte Darstellung in dieser Hinsicht verzichtet wird. Ebenso wurden wieder keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Polarisierungen festgestellt. Einige Unterschiede zu den Ergebnissen des ersten Fluges fallen jedoch sofort auf:

- Der pure OLA-Film zeigt, vor allem bei mittleren und kurzen Bragg-Wellenlängen (also im C-, X- und Ku-Band) ein stärkeres Dämpfungsverhalten, als es vor Sylt gemessen wurde.
- Die gemessenen Dämpfungsverhältnisse unterscheiden sich praktisch nicht für die drei OLA-Filme – eventuell sind die Meßwerte des in Ethanol gelösten OLA bei mittleren Bragg-Wellenlängen (C-Band) etwas höher; ein Eindruck, der aber auch durch die geringere Datenausbeute in diesem Fall verursacht sein kann.
- Alle drei Filme zeigen eine größere Streuung der Daten, wiederum vor allem bei kurzen und mittleren Bragg-Wellenlängen.

Um den dritten Unterschied, die größere Streuung der Daten, etwas genauer zu betrachten, sind in Abbildung 5.4 sämtliche über den drei OLA-Filmen gewonnenen Daten zusammen dargestellt, wobei in diesem Fall nach dem Einfallswinkel unterschieden wurde, d.h., die Daten wurden unterteilt nach (effektiven) Einfallswinkeln oberhalb bzw. unterhalb von 35° (da während der gesamten HELISCAT-Meßflüge nur mit den nominellen Einfallswinkeln 23°, 33° und 43° gearbeitet wurde und von denjenigen Daten, die bei 23° gewonnen wurden, ein großer Teil die Qualitätskriterien

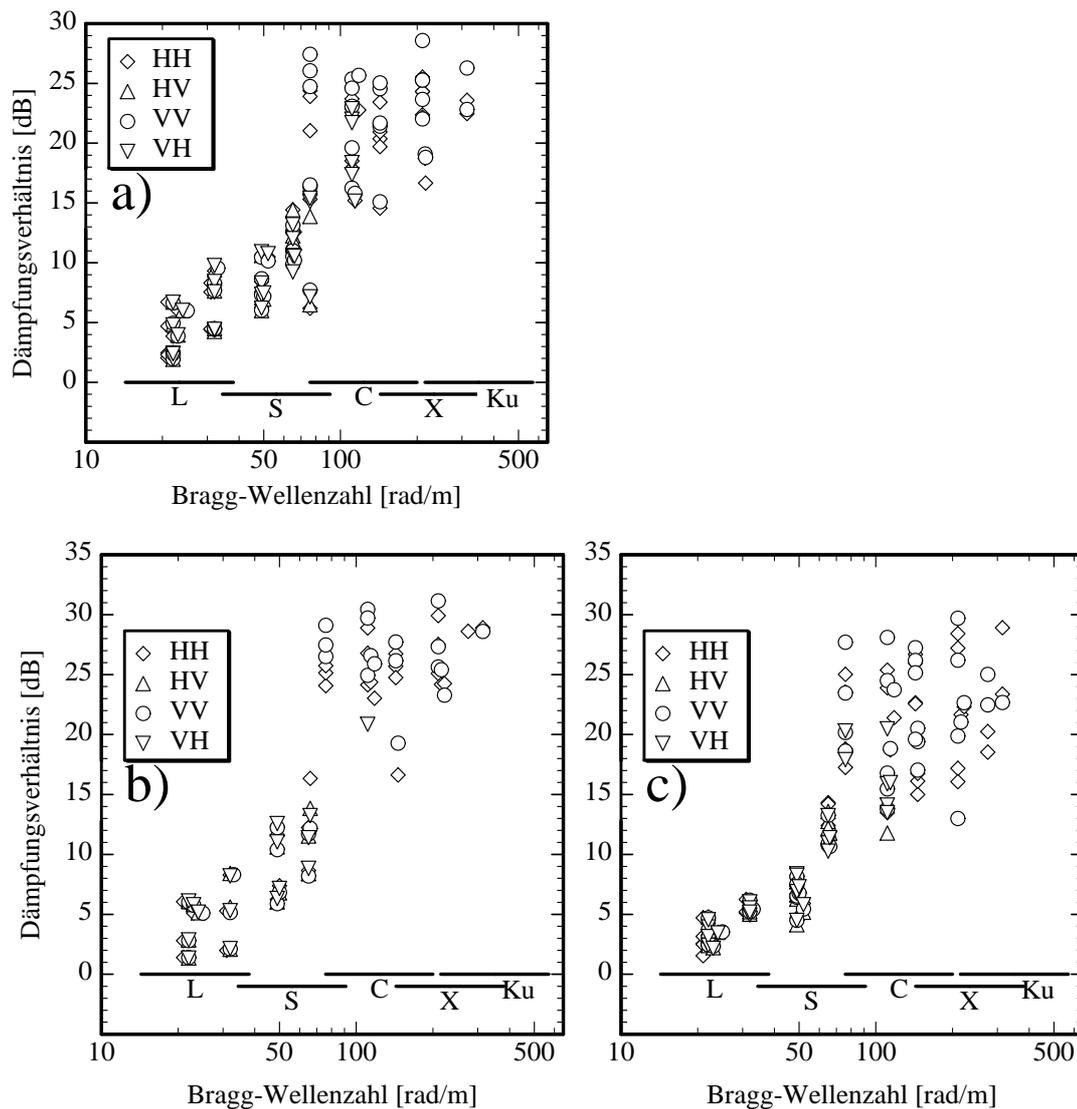


Abbildung 5.3: Mit dem HELISCAT gemessene Dämpfungsverhältnisse der drei OLA-Filme vor Helgoland am 18. April 1994. Die Werte stammen von a) purem, b) in Ethanol gelöstem und c) in *n*-Hexan gelöstem OLA.

(siehe Abschnitt 4.1) nicht erfüllte, wird hier im wesentlichen zwischen den nominellen Einfallswinkeln  $33^\circ$  und  $43^\circ$  unterschieden).

Aus Abbildung 5.4 sind zwei Unterschiede zwischen den Daten zu erkennen, die bei niedrigen und höheren Einfallswinkeln gewonnen wurden:

- Die große Streuung der Daten bei mittleren und kurzen Bragg-Wellenlängen rührt von den Überflügen mit kleinen nominellen Einfallswinkeln her ( $\vartheta < 35^\circ$ ), während die Meßwerte, die bei einem nominellen Einfallswinkel von  $43^\circ$  gewonnen wurden ( $\vartheta \geq 35^\circ$ ), bei diesen Wellenlängen deutlich geringer streuen.

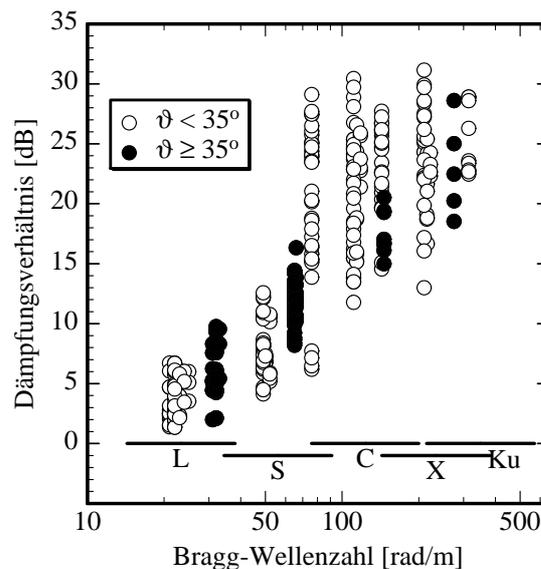


Abbildung 5.4: Sämtliche mit dem HELISCAT über den drei OLA-Filmen am 18. April 1994 vor Helgoland aufgenommenen Dämpfungsverhältnisse, unterteilt nach den Einfallswinkeln der Mikrowellen..

- Die hohen Dämpfungsverhältnisse, die den Unterschied zu den Meßwerten, die vor Sylt gewonnen wurden, ausmachen, wurden hauptsächlich bei niedrigen nominellen Einfallswinkeln gewonnen. Der Vergleich mit Abbildung 5.1 zeigt, daß die bei großem Einfallswinkel gewonnenen Werte nur unwesentlich höher liegen als die vor Sylt (bei sämtlichen Einfallswinkeln) gewonnenen.

Diese Unterschiede sind insofern überraschend, als sie nur bei den Ergebnissen dieses Überfluges auftreten (vgl. den vorigen sowie die nächsten Abschnitte). Eine mögliche Erklärung liegt in der Tatsache, daß ausschließlich bei den Meßflügen vor Helgoland unter einem nominellen Einfallswinkel von  $43^\circ$  und bei niedriger Windgeschwindigkeit gemessen wurde (3.5 – 4 m/s). Ein Vergleich mit früheren HELISCAT-Ergebnissen [Wismann et al., 1996b] führt zu keiner Bestätigung, da dort weder eine nach Einfallswinkeln getrennte Auswertung vorliegt noch derart hohe Dämpfungsverhältnisse gemessen wurden.

### 5.2.2 Vergleich zwischen verschiedenen Substanzen

In Abbildung 5.5 sind die über den gelösten PME-Filmen gewonnenen Dämpfungsverhältnisse dargestellt, wobei das Lösungsmittel in Abbildung 5.5a Ethanol und in Abbildung 5.5b *n*-Hexan ist. Die Ergebnisse dieser Überflüge sind zum Teil mit den im vorigen Abschnitt vorgestellten vergleichbar:

- Im Falle von PME führt erst das Ausbringen in gelöster Form zu meßbaren Dämpfungsverhältnissen, also zu veränderten physiko-chemischen Eigenschaften [Hühnerfuss et al., 1994].

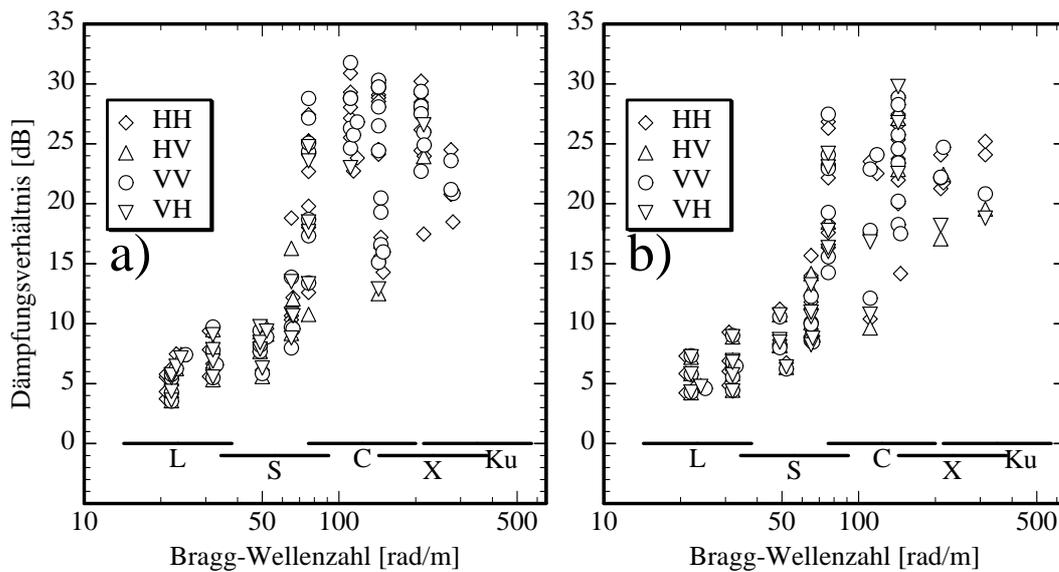


Abbildung 5.5: Dämpfungsverhältnisse, die mit dem HELISCAT am 18. April 1994 vor Helgoland über gelösten PME-Filmen gewonnen wurden. Lösungsmittel sind a) Ethanol und b) *n*-Hexan.

- Die Dämpfungsverhältnisse, die über den mit Hilfe verschiedener Lösungsmittel ausgebrachten PME-Filmen gewonnen wurden, sind nahezu identisch.
- Abbildung 5.6 zeigt ebenfalls die Unterscheidung zwischen nominellen Einfallswinkeln oberhalb und unterhalb von  $35^\circ$ , was wiederum zu einer Aufteilung in weniger resp. stärker streuende Meßwerte einerseits und in niedrigere resp. höhere Dämpfungswerte andererseits führt.
- Der Vergleich zwischen sämtlichen über PME (Abbildung 5.6) mit sämtlichen über OLA (Abbildung 5.4) aufgenommenen Meßwerten zeigt, daß sich die beiden Substanzen bei kurzen Bragg-Wellenlängen in ihrem Dämpfungsverhalten praktisch nicht unterscheiden. Leichte Unterschiede sind nur bei großen Bragg-Wellenlängen, also im L- und S-Band, zu erkennen.

Die Angleichung der gemessenen Dämpfungswerte von verschiedenen Substanzen unter diesen Bedingungen (d.h. beim Ausbringen von PME in gelöster Form sowie bei niedriger Windgeschwindigkeit) ist ebenfalls ein Ergebnis, das nicht durch die von *Wismann et al.* [1996b] erzielten Meßergebnisse bestätigt wird (deren Meßergebnisse zeigen, bei vergleichbarer Windgeschwindigkeit, Unterschiede zwischen den einzelnen – reinen – Substanzen). Offensichtlich werden diejenigen Unterschiede, die nach der Theorie zwischen PME und OLA zu erwarten sind (vgl. Abbildung 3.1), durch die Einflüsse der Lösungsmittel aufgehoben.

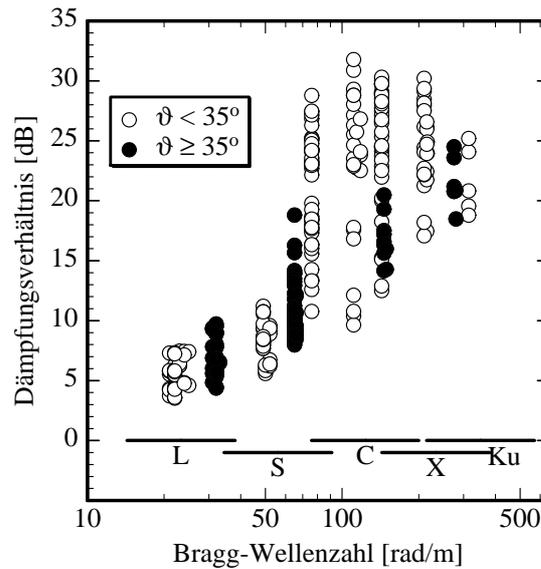


Abbildung 5.6: Sämtliche mit dem HELISCAT am 18. April über den beiden gelösten PME-Filmen vor Helgoland aufgenommenen Dämpfungsverhältnisse, unterteilt nach den Einfallswinkeln der Mikrowellen.

### 5.2.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Notwendigkeit, am 18. April 1994 als Referenz auch einen reinen OLA-Film vor Helgoland auszubringen, zeigt sich in der Diskussion der über OLA gewonnenen Ergebnisse: Die gemessenen Dämpfungsverhältnisse sind in diesem Fall grundsätzlich höher als die zuvor während der Meßkampagne vor Sylt gemessenen, was – da die übrigen ozeanographischen und meteorologischen Bedingungen im wesentlichen gleich waren – auf die niedrigere Windgeschwindigkeit zurückgeführt werden muß.

Eine mögliche Erklärung liefert die Betrachtung von Abbildung 3.2 und Abbildung 5.7 bzw. der Gleichung (3.18), in der die Quellterme, also auch der Energieeintrag durch den Wind berücksichtigt sind. Wie schon in Abschnitt 3.2 beschrieben, reicht der Energieeintrag durch den Wind bei mittleren und niedrigen Windgeschwindigkeiten (wie sie bei den beiden vorliegenden Meßreihen am 18. April 1994 mit 5 m/s resp. 3.5–4 m/s vorherrschten) nicht aus, um die viskose Energiedissipation bei kurzen Wellenlängen auszugleichen. Zu erwarten ist also, daß die gemessenen Dämpfungsverhältnisse bei mittleren Bragg-Wellenzahlen (also in dem Wellenzahlbereich, wo sich Windeintrag und viskose Dissipation etwa ausgleichen) ansteigen, und zwar um so deutlicher, je niedriger die Windgeschwindigkeit ist. Aus Abbildung 5.7 ist zu erkennen, daß dieser Bereich – bei einer Windgeschwindigkeit von 4 m/s und einer Reduktion der Schubspannungsgeschwindigkeit über dem Oberflächenfilm um 30% – für PME und OLA zwischen 15 und 30 rad/m liegt. Unterhalb dieser Grenze ist wegen des Windeintrages mit einer Reduktion der gemessenen Dämpfungsverhältnisse zu rechnen, bei größeren Bragg-Wellenzahlen (also auch jenseits des Maximums der

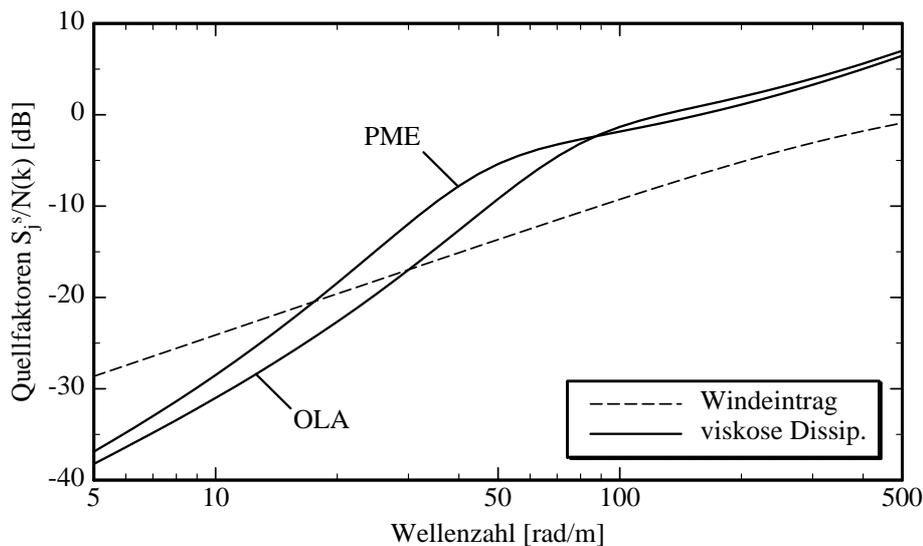


Abbildung 5.7: Darstellung der Quellfaktoren für Energieeintrag durch den Wind ( $\beta_s$  – vorausgesetzt wurde eine Windgeschwindigkeit von 4 m/s sowie eine Reduktion der Schubspannungsgeschwindigkeit um 30%) sowie viskose Energiedissipation ( $2\Delta_{s,c_g}$ ) für filmbedeckte Wasseroberfläche unter den Windbedingungen des Meßfluges vor Helgoland am 18. April 1994. Dargestellt sind die theoretischen Kurven sowohl für OLA als auch für PME (vgl. Abbildung 3.1).

Marangoni-Dämpfung) weiterhin mit hohen Dämpfungsverhältnissen, da auch in diesem Bereich der Energieeintrag durch den Wind zu gering ist, um auf direktem Wege Wellen zu erzeugen. Da hier die viskose Dissipation allerdings relativ abnimmt (die theoretische Kurve für die Marangoni-Dämpfung also abfällt), ist mit einem schwächer ansteigenden – eventuell gleichbleibenden – Verlauf der gemessenen Dämpfungskurven zu rechnen. Der Vergleich mit sämtlichen mit dem HELISCAT am 18. April 1994 über den künstlichen Oberflächenfilmen gewonnenen Daten zeigt, daß diese Erklärung zur Interpretation der Meßwerte sehr gut herangezogen werden kann.

Durch diese Überlegungen kann zwar erklärt werden, daß PME und OLA – obwohl unterschiedliche Marangoni-Dämpfungskurven liefernd – praktisch dieselben gemessenen Dämpfungsverhältnisse zeigen, zu einer Erklärung der Tatsache, daß PME erst in gelöster Form zu meßbaren Dämpfungsverhältnissen führt, reichen sie allerdings nicht. Bei PME (Palmitinsäuremethylester) handelt es sich um eine Substanz, die einen *flüssig-kondensierten* Film ausbildet, d.h., die Filmmoleküle sind dicht gepackt, und die hydrophoben Ketten wechselwirken stärker miteinander. Ein aus OLA (Oleylalkohol) bestehender Oberflächenfilm ist *flüssig-expandiert*, d.h. die Filmmoleküle sind weniger dicht gepackt, und ihre Wechselwirkung ist dementsprechend schwächer. Durch das Ausbringen dieser Substanzen in gelöster Form wird nun der Molekülabstand vergrößert (und daher die Morphologie verändert) und die Wechselwirkung der Filmmoleküle untereinander abgeschwächt, ein Effekt, der bei PME deutlicher ins Gewicht fällt und daher bei diesen Filmen zu einer Veränderung der physiko-chemischen Eigenschaften und zu meßbaren Dämpfungsverhältnissen führt.

Die Morphologie und dadurch das Dämpfungsverhalten von OLA wird durch das Ausbringen in gelöster Form nur geringfügig verändert, da die Wechselwirkung der Filmmoleküle ohnehin schwächer ist.

Eine genaue Betrachtung sämtlicher vor Helgoland gewonnener Daten zeigt, daß sich die Aussage, die gemessenen Dämpfungsverhältnisse seien bei einem nominellen Einfallswinkel von  $43^\circ$  kleiner als bei  $33^\circ$ , hauptsächlich auf die C-Band-Daten stützt. Im L- und S-Band ist die Streuung der Daten vergleichbar, im X-Band liegen nur wenige verwertbare Datensätze vor, im Ku-Band sogar kein einziger (diese Aussagen gelten gleichermaßen für OLA und PME). Insgesamt ist die Datenausbeute bei einem Einfallswinkel von  $43^\circ$  wesentlich geringer, was einerseits an der geringen Anzahl an Überflügen mit diesem Einfallswinkel liegt (neun von insgesamt 50) und andererseits daran, daß nach der Bragg-Streutheorie die rückgestreute Radarleistung zu höheren Einfallswinkeln hin abnimmt [Valenzuela, 1978], das Signal-zu-Rausch-Verhältnis also schlechter wird. Unter diesen Umständen erfüllen weniger Datensätze die Qualitätskriterien, und das maximale zu messende Dämpfungsverhältnis wird kleiner. Da die rückgestreute Radarleistung mit abnehmender Windgeschwindigkeit ebenfalls abnimmt (vgl. Abschnitt 3.1), wird dieser Effekt verstärkt bei niedrigen Windgeschwindigkeiten auftreten. Es kann demnach ein systembedingtes Ergebnis sein, daß niedrigere Dämpfungsverhältnisse gemessen wurden und daß die Streuung der Daten geringer ist.

Überhaupt muß bei der Diskussion der gemessenen Dämpfungsverhältnisse – speziell bei großen Bragg-Wellenzahlen – berücksichtigt werden, daß die technischen Einschränkungen nicht die Messung beliebig hoher Dämpfungsverhältnisse zulassen. Das HELISCAT weist zwar ein relativ hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis auf, trotzdem stößt es bei Dämpfungsverhältnissen von über 30 dB an seine Grenzen.

### 5.3 Natürliche Oberflächenfilme vor Amrum

Im April 1994, also auch zur Zeit der Meßkampagnen am 18. April, fand im Raum der Deutschen Bucht eine Blüte der Planktonart *phaeocystis globosa* statt, die zu einer Bedeckung der Wasseroberfläche mit natürlichen Oberflächenfilmen führte. Die mittlere Windgeschwindigkeit war am 18. April 1994 während des Vormittages von Werten um 5 m/s auf 3.5 m/s abgesunken, und unter diesen Bedingungen ist die Bildung derartiger Oberflächenfilme möglich [Hühnerfuss et al., 1977].

Aus diesem Grund wurde ein dritter Meßflug über den natürlichen Oberflächenfilmen im Seegebiet westlich von Amrum gestartet, um erstmals einen mit dem HELISCAT aufgenommenen Datensatz zu erhalten, der den direkten Vergleich mit Meßwerten erlaubt, die unter gleichen Randbedingungen über künstlichen Oberflächenfilmen aufgenommen wurden. Die meteorologischen und ozeanographischen Bedingungen finden sich in Tabelle 5.4. Insgesamt fanden in diesem Testgebiet zwar nur sechs Überflüge statt, wegen der zum Teil großen Ausdehnung der Oberflächenfilme liegt aber dennoch ein Datensatz von hinreichendem Umfang vor.

<i>Zweiter Meßflug am 18. April 1994 vor Amrum</i>	
<b>Position</b>	54° 27'–54° 30' N / 8° 12'–8° 18' E
<b>Zeitraum [MESZ]</b>	12:04 – 12:18
<b>Windgeschwindigkeit [m/s]</b>	3.5
<b>Windrichtung [°N]</b>	0
<b>sign. Wellenhöhe [m]</b>	1.5
<b>Wellenlaufrichtung [°N]</b>	135
<b>Lufttemperatur [°C]</b>	6.5
<b>Wassertemperatur [°C]</b>	7
<b>Gezeitenströmung [m/s]</b>	0.2
<b>Gezeitenrichtung [°N]</b>	180

Tabelle 5.4: Meteorologische und ozeanographische Bedingungen während des zweiten Meßfluges mit dem HELISCAT am 18. April 1994 vor Amrum.

In Abbildung 5.8 ist eine typische Zeitserie dargestellt, die mit dem C-Band des HELISCAT bei VV-Polarisation und einem nominellen Einfallswinkel von 33° während des ersten Überfluges über diese Oberflächenfilme aufgenommen wurde. Im Zuge der automatischen Qualitätskontrolle während der Datenprozessierung wurde ein kurzer Ausschnitt der Zeitserie bei einer relativen Flugzeit von ca. 10 s unterdrückt,

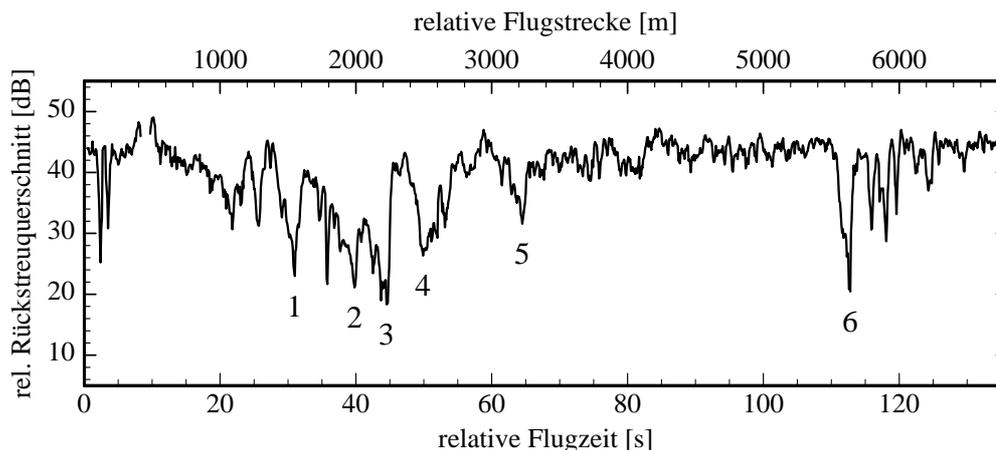


Abbildung 5.8: Zeitserie des relativen Radar-Rückstreuequerschnitts, die am 18. April 1994 mit dem HELISCAT über natürlichen Oberflächenfilmen vor Amrum aufgenommen wurde (Run 85). Dargestellt ist die Zeitserie des C-Bandes bei VV-Polarisation und einem nominellen Einfallswinkel von 33°.

was allerdings keine Auswirkung auf die Meßergebnisse hat. Insgesamt sechs Bereiche filmbedeckter Wasseroberfläche wurden hier definiert, wobei an der unterschiedlichen Tiefe der Absenkungen deutlich zu erkennen ist, daß es Bereiche unterschiedlich starker Dämpfung gibt. Wegen dieser Unterschiede wird bei der Betrachtung der Meßwerte aus diesen Überflügen zwischen Filmen starker, mittlerer und schwacher Dämpfung unterschieden.

### 5.3.1 Vergleich zwischen Filmabschnitten unterschiedlicher Dämpfung

Um einen Vergleich sowohl der einzelnen natürlichen Oberflächenfilme untereinander als auch – im nächsten Abschnitt – mit den künstlichen Oberflächenfilmen zu ermöglichen, wurden die (sehr heterogenen) Meßergebnisse in drei Klassen aufgeteilt, wobei die maximale gemessene Dämpfung ausschlaggebend war. Je nachdem, ob das maximale Dämpfungsverhältnis oberhalb von 25 dB, zwischen 20 dB und 25 dB oder unterhalb von 20 dB lag, wurden die Meßergebnisse den Filmklassifizierungen *stark dämpfend*, *mäßig dämpfend* und *schwach dämpfend* zugeordnet (wobei sich die Attribute „stark“, „mäßig“ und „schwach“ – natürlich – nur auf diese Filme beziehen). Da kaum brauchbare Ergebnisse im Ku-Band und nur wenige im X-Band erzielt wurden (mit Ausnahme der schwach dämpfenden Filme), entspricht diese Unterteilung der Berücksichtigung der C-Band-Dämpfungswerte.

Abbildung 5.9 zeigt die Ergebnisse sämtlicher Überflüge über den natürlichen Oberflächenfilmen, aufgeteilt in die drei Klassen (dabei wurde wegen der extrem hohen Dämpfungsmaxima der stark dämpfenden Filme in Abbildung 5.9a die Skalierung der Ordinate wieder bis 35 dB erweitert).

Abbildung 5.9a stellt vom qualitativen Verlauf her, verglichen mit den bisher vorgestellten Meßergebnissen, keine Überraschung dar: Die gemessenen Dämpfungsverhältnisse steigen mit wachsender Bragg-Wellenzahl an. Bemerkenswert ist aber, daß auch bei niedrigen Wellenzahlen, also im L- und S-Band, mit Werten von teilweise über 10 dB relativ hohe Dämpfungsverhältnisse gemessen wurden. Offensichtlich werden auch Wasserwellen einer größeren Wellenlänge (10 bis 30 cm) von den natürlichen Oberflächenfilmen stärker gedämpft.

Daß diese stärkere Dämpfung im L- und S-Band eine grundsätzliche Eigenschaft der überflogenen natürlichen Oberflächenfilme ist, wird in Abbildung 5.9b und Abbildung 5.9c deutlich, wo die gemessenen Dämpfungsverhältnisse in diesem Wellenzahlbereich ebenfalls stets oberhalb von 5 dB liegen. In diesen beiden Darstellungen wird aber auch ein anderes Merkmal des Dämpfungsverhaltens dieser Oberflächenfilme deutlich, denn die Meßwerte fallen oberhalb von ca. 100 rad/m wieder ab. Dieser Trend ist sowohl in Abbildung 5.9b, also für mäßig dämpfende Filme, als auch in Abbildung 5.9c, also für schwach dämpfende Filme, zu erkennen (bei Abbildung 5.9c sei darauf hingewiesen, daß der Effekt durch diejenigen Daten abgeschwächt wird, die während des Überfluges Nr. 85 über Film Nr. 4 (siehe Abbildung 5.8) aufgenommen wurden: Diese Werte liegen im X-Band nur knapp unter 20 dB und sind somit den schwach dämpfenden Filmen zugeordnet worden, verfälschen aber den Gesamteindruck zu höheren Werten). Der Rückgang der Dämpfungsverhältnisse vom C- zum X-

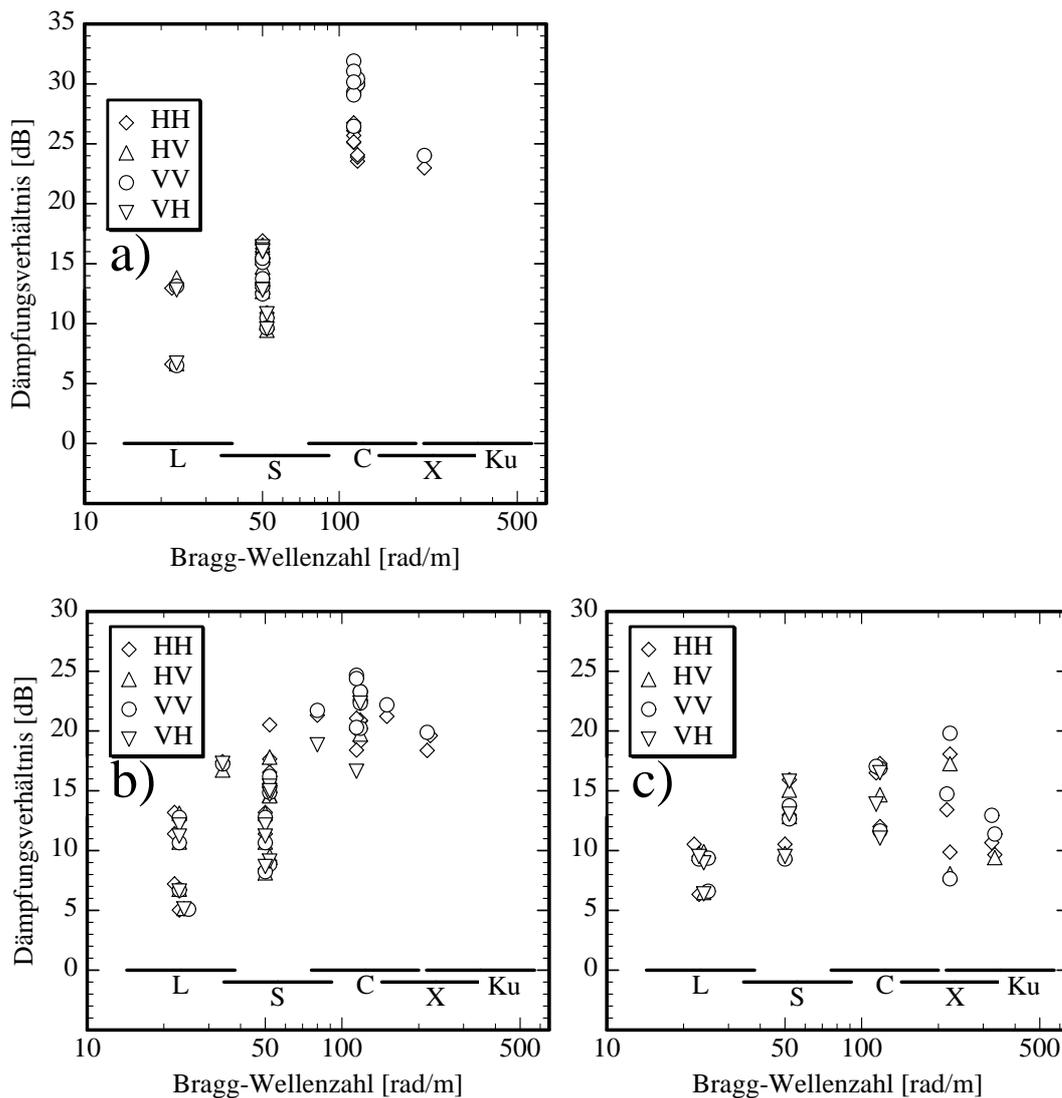


Abbildung 5.9: Sämtliche über den natürlichen Oberflächenfilmen vor Amrum am 18. April 1994 mit dem HELISCAT ermittelten Dämpfungsverhältnisse, unterteilt nach a) stark dämpfenden, b) mäßig dämpfenden und c) schwach dämpfenden Filmen.

Band ist für die mäßig und schwach dämpfenden Filme mit jeweils etwa 5 dB ungefähr gleich, wird aber im Fall der schwach dämpfenden Filme durch die Ku-Band-Daten (die nur für diese Filme brauchbare Resultate lieferten) in seiner Deutlichkeit noch verstärkt.

### 5.3.2 Vergleich mit den künstlichen Oberflächenfilmen

Von besonderem Interesse ist nun der Vergleich zwischen den natürlichen Oberflächenfilmen und den künstlichen, die eben diese Oberflächenfilme nachbilden soll-

ten. Durch diesen Vergleich soll überprüft werden, inwieweit die beispielsweise vor Helgoland gewonnenen Daten repräsentativ sind für Oberflächenfilme natürlichen Ursprungs. Die wesentlichen Unterschiede der Meßwerte, die über beiden Filmarten gewonnen wurden, sind die eben hervorgehobenen Eigenschaften dieser Meßreihen:

- Die relativ hohen Dämpfungsverhältnisse, die im L- und S-Band über den natürlichen Oberflächenfilmen gemessen wurden, stellen einen Unterschied zu sämtlichen an diesem Tag überflogenen künstlichen Oberflächenfilmen dar. Auch die stark dämpfenden Oberflächenfilme, die - pur oder in gelöster Form - vor Helgoland ausgebracht worden waren, zeigten in diesem Wellenzahlbereich nicht derart starke Dämpfungen (siehe Abbildung 5.4 und Abbildung 5.6).
- Im Gegensatz zu den künstlichen Filmen wurde über den natürlichen Oberflächenfilmen ein ausgeprägtes Maximum im Dämpfungsverhalten gemessen. Dabei handelt es sich nicht um eine systembedingte Charakteristik der Meßwerte (d.h. um einen derartigen Verlauf der maximal aufzuzeichnenden Dämpfungsverhältnisse, also der Signal-zu-Rausch-Verhältnisse), sondern um tatsächliche Dämpfungseigenschaften der überflogenen Oberflächenfilme.

Auf der anderen Seite sind auch einige Gemeinsamkeiten zwischen den Meßwerten der unterschiedlichen Oberflächenfilme bemerkenswert:

- Die Meßwerte der stark dämpfenden natürlichen Oberflächenfilme sind im mittleren und oberen Wellenzahlbereich (C- und X-Band) mit denjenigen von OLA und PME, die vor Helgoland gewonnen wurden, vergleichbar.
- Nahezu alle Messungen über den natürlichen Oberflächenfilmen wurden unter einem nominellen Einfallswinkel von  $33^\circ$  durchgeführt, beim letzten Überflug (Nr. 90) wurde der Einfallswinkel auf  $23^\circ$  verkleinert. Der Vergleich mit den künstlichen Oberflächenfilmen soll sich daher auf diejenigen Werte konzentrieren, die dort unter den geringen Einfallswinkeln ( $\vartheta < 35^\circ$ ) gewonnen wurden (siehe Abbildung 5.4 und Abbildung 5.6). Gerade mit diesen Meßwerten wird bei den stark dämpfenden Filmen eine besonders gute Übereinstimmung bei mittleren und großen Bragg-Wellenzahlen erreicht (C- und X-Band).

### 5.3.3 Diskussion der Ergebnisse

Der Datensatz, der am 18. April 1994 über den natürlichen Oberflächenfilmen westlich von Amrum gewonnen wurde, stellt eine wertvolle Bereicherung der gesamten mit dem HELISCAT gewonnenen Daten dar. Er ermöglicht eine erste Abschätzung, inwieweit die sowohl an diesem Tag als auch während früherer Meßkampagnen gewonnenen Daten [z.B. *Alpers et al.*, 1991, 1992; *Hühnerfuss et al.*, 1994; *Wismann et al.*, 1996b] auf die natürlichen Verhältnisse übertragen werden können.

Die Klassifizierung in drei unterschiedlich stark dämpfende Filmbereiche (mit in sich konsistenten Meßergebnissen) zeigt, daß eine einfache Unterscheidung zwischen natürlichen und künstlichen Oberflächenfilmen in dieser Form weder sinnvoll noch möglich ist. Offensichtlich werden im Falle der stark dämpfenden Filme frühere Untersuchungen bestätigt, nach denen Verbindungen mit langkettigen Alkylketten (C16

und C18) Hauptbestandteile der natürlichen Oberflächenfilme sind [z.B. *Hühnerfuss et al.*, 1982; *Hühnerfuss*, 1986] : Stark dämpfende natürliche Oberflächenfilme zeigen ein ähnliches Dämpfungsverhalten wie die vor Helgoland ausgebrachten PME (C16) und OLA (C18), ersteres allerdings nur in gelöster Form.

Die höheren Dämpfungswerte bei niedrigen Bragg-Wellenzahlen (L- und S-Band) deuten darauf hin, daß diese Art von Oberflächenfilmen, auch bei relativ geringer räumlicher Ausdehnung, die langen Wellen stärker dämpft. Weiterhin ließe der Rückgang der Dämpfungskurven auf extrem niedrige Dämpfungseigenschaften bei großen Wellenzahlen schließen, was aber unwahrscheinlich ist (speziell im Vergleich mit sämtlichen übrigen Meßwerten).

Es kann aber auch nicht ausgeschlossen werden, daß auch die Zwischenräume zwischen den (sowohl in den Zeitserien als auch während der Überflüge visuell vom Helikopter aus zu erkennenden) Oberflächenfilmen mit einer schwachen, „submonomolekularen“ Schicht oberflächenaktiven Materials bedeckt gewesen sind (der Begriff „submolekular“ bedeutet, daß die Konzentration der Filmmoleküle an der Wasseroberfläche noch nicht groß genug ist, um einen monomolekularen Film zu bilden). Zweierlei Resultate einer derartigen Bedeckung wären zu erwarten: Einerseits würden die gemessenen Kontraste zwischen filmbedeckter und „filmfreier“ Wasseroberfläche niedriger ausfallen (das mag den Rückgang der Dämpfungskurve bei großen Wellenzahlen erklären) und andererseits wäre, wegen der Bedeckung einer mehrere Quadratmeter großen Fläche mit mehr oder weniger kompakten Oberflächenfilmen, auch mit einer Dämpfung von Braggwellen größerer Wellenlänge zu rechnen, die über nichtlineare Wellenwechselwirkung Energie an die kürzeren Komponenten verlore[n] [Alpers und *Hühnerfuss*, 1989]. Die hier vorgestellten Resultate scheinen diese Hypothese zu bestätigen.

Das Auftreten unterschiedlich stark dämpfender Filmbereiche kann aber, neben der eben beschriebenen Filmbedeckung der Zwischenräume und dem daraus resultierenden teilweise geringeren Kontrast, als Ursache auch einen unterschiedlichen Entstehungszeitpunkt der einzelnen Filmbereiche haben. Die Ergebnisse aus Abschnitt 5.1.1 haben gezeigt, daß dieselbe Substanz in den ersten Minuten der Ausbreitung des Oberflächenfilmes ein sich änderndes Dämpfungsverhalten zeigt. Auch für natürliche Oberflächenfilme ist ein derartiges Verhalten zu erwarten, so daß niedrige gemessene Dämpfungsverhältnisse auch auf frisch entstandene Oberflächenfilme hindeuten können (die Windgeschwindigkeit hatte sich im Laufe des Vormittages von Werten um 5 m/s auf etwa 3.5 m/s verringert, was die Vermutung stärkt, daß die vor Amrum aufgefundenen natürlichen Oberflächenfilme gerade erst entstanden waren). In diesem Fall wäre also die unterschiedliche Morphologie der Oberflächenfilme für die beobachteten Unterschiede verantwortlich.

Schließlich kommt aber auch schlicht als Ursache eine unterschiedliche Zusammensetzung der natürlichen Oberflächenfilme für das unterschiedliche Dämpfungsverhalten in Frage. Grund hierfür kann nicht nur eine ungleichmäßige Verteilung des die Oberflächenfilme produzierenden Planktons sein, sondern auch eine Vermischung unterschiedlicher Wassermassen sowie zeitlich und räumlich variierende Strömungs-

felder des Wasserkörpers. Derartige Effekte können zu einer ungleichmäßigen Planktonblüte führen.

Wichtigstes Ergebnis dieser Untersuchungen scheint aber die Tatsache zu sein, daß die natürlichen Oberflächenfilme – in den Bereichen schwacher bis mäßiger Dämpfung – ein Dämpfungsverhalten zeigen, daß sich von den künstlichen Oberflächenfilmen unterscheidet. Inwieweit auch Unterschiede zu nicht-biogenen Oberflächenfilmen (wie beispielsweise Mineralöl) auftreten, sollte nun in einer dritten Meßkampagne während der zweiten SIR-C/X-SAR-Mission untersucht werden.

#### 5.4 Oberflächenfilme bei hoher Windgeschwindigkeit

Nach den erfolgreichen Meßkampagnen im April fand während der zweiten Weltraum-Mission, die ursprünglich für den August 1994 geplant war, ein weiteres großes Oberflächenfilm-Experiment in der Deutschen Bucht, westlich von Sylt, statt. Die meteorologischen und ozeanographischen Bedingungen während dieses Experimentes sind in Tabelle 5.5, die Anordnung, Art und Mengen der Substanzen und Lösungsmittel in Tabelle 5.6 zu finden. Da etwa zum Zeitpunkt des Shuttle-Überfluges eine Wetterfront das Testgebiet überquerte, stieg die Windgeschwindigkeit von moderaten Werten auf über 10 m/s an, so daß das Experiment bei hoher Windgeschwindigkeit stattfand.

Nachdem die Meßergebnisse vom April gezeigt hatten, daß das Ausbringen in gelöster Form teilweise zu drastischen Änderungen des Dämpfungsverhaltens führen kann, wurden neben dem (Standard-) OLA-Film wieder mehrere Oberflächenfilme in

<i>Meßflug am 06. Oktober 1994 vor Sylt</i>	
<b>Position</b>	54° 58' N / 7° 45' E
<b>Zeitraum [MEZ]</b>	10:58 – 11:51
<b>Windgeschwindigkeit [m/s]</b>	12
<b>Windrichtung [°N]</b>	210
<b>sign. Wellenhöhe [m]</b>	1.5
<b>Wellenlaufrichtung [°N]</b>	235
<b>Lufttemperatur [°C]</b>	11.0
<b>Wassertemperatur [°C]</b>	12
<b>Gezeitenströmung [m/s]</b>	0.3 – 0.2
<b>Gezeitenrichtung [°N]</b>	105 – 90

Tabelle 5.5: Meteorologische und ozeanographische Bedingungen während des Meßfluges mit dem HELISCAT am 06. Oktober 1994 vor Sylt.

<i>Position (von W nach O)</i>	<i>Substanz</i>	<i>Lösungsmittel</i>	<i>Mengen (Subst./Lösgrsm.)</i>
1	Leichtöl (Diesel)	–	100 l / –
2	Schweröl (Ifo 180)	–	200 l / –
3	OLA	–	220 l / –
4	OLME	–	60 l / –
5	TOLG	–	160 l / –
6	OLME	<i>n</i> -Hexan	20 l / 60 l
7	OLME	Ethanol	20 l / 60 l
8	TOLG	<i>n</i> -Hexan	20 l / 60 l

Tabelle 5.6: Anordnung sowie Mengen und Lösungsmittel der Oberflächenfilme am 06. Oktober 1994 vor Sylt.

gelöster Form ausgebracht, wobei in diesem Fall mit Ölsäuremethylester und Triolein (OLME resp. TOLG – siehe Tabelle 3.1) zwei weniger stark dämpfende Substanzen verwendet wurden (Abbildung 3.1). Zum Vergleich wurden beide Substanzen zusätzlich auch in purer Form auf die Wasseroberfläche ausgebracht, so daß insgesamt sechs simulierte biogene Oberflächenfilme im Testgebiet waren (siehe Tabelle 5.6 – da TOLG in Ethanol nur schwer löslich ist, wurde diese Substanz nur in *n*-Hexan gelöst).

Neben der Untersuchung von Radarsignaturen, die von unterschiedlichen biogenen Substanzen verursacht wurden, war ein weiterer Aspekt des gesamten Meßprogrammes die Untersuchung von Radarsignaturen, die von Mineralölfilmen verursacht werden. Aus diesem Grund wurden zusätzlich zu den eben beschriebenen biogenen Oberflächenfilmen auch zwei Mineralölfilme von Bord des Ölbekämpfungsschiffes *MS Scharhörn* aus auf die Wasseroberfläche ausgebracht, wobei der eine aus Schweröl (technische Bezeichnung *Ifo 180*) und der andere aus Leichtöl (Dieselöl) bestand. Um den Bedenken, die von Umweltschutzverbänden publik gemacht wurden, Rechnung zu tragen, wurden die Mengen dieser beiden (mutmaßlich gefährlichen) Substanzen allerdings auf ein Mindestmaß reduziert. Von vornherein war zudem durch den Einsatz von zwei Ölbekämpfungsschiffen dafür gesorgt, daß die durch Mineralöl bedingten Umweltbelastungen im Testgebiet so gering wie möglich gehalten wurden.

Durch einen Defekt in der zentralen Spannungsversorgung des HELISCAT waren an diesem Tag keine Messungen simultan zum Überflug der Raumfähre möglich, sondern konnten erst (nach der Reparatur) mit etwa zweistündiger Verspätung durchgeführt werden. Da das Dieselöl unter diesen Wetterbedingungen sehr schnell verdunstet, war zu diesem Zeitpunkt der Leichtöl-Film schon von der Wasseroberfläche verschwunden. Über ihm konnten demnach ebensowenig Messungen mit dem HELISCAT durchgeführt werden wie über den beiden biogenen Filmen, die aus gelö-

stem OLME bestanden (Nr. 7 und 8 in Tabelle 5.6) und die vom Hubschrauber aus nicht mehr eindeutig zu identifizieren waren.

#### 5.4.1 Vergleich innerhalb der biogenen Substanzen

Durch die sowohl technischen als auch witterungsbedingten Einschränkungen konnten nur über insgesamt vier künstlichen biogenen Oberflächenfilmen Messungen mit dem HELISCAT durchgeführt werden. Außerdem waren durch den späten Zeitpunkt der HELISCAT-Messungen die Oberflächenfilme zu diesem Zeitpunkt nicht mehr homogen auf der Wasseroberfläche verteilt, sondern vielmehr durch den anhaltend starken Wind schon teilweise aufgerissen (Zudem war die *MS Scharhorn* zu Beginn der Meßkampagne zum Zwecke eigener Messungen durch den reinen OLA-Film gefahren, was zu einem zusätzlichen Durchmischen von Filmsubstanz und Wasser führte). Daher wurde wieder eine Unterscheidung zwischen Filmabschnitten vorgenommen, die verschieden starke gemessene Dämpfungsverhältnisse verursachten. Es ist davon auszugehen, daß diese Unterschiede darauf zurückzuführen sind, daß nicht die gesamte Wasseroberfläche gleichmäßig mit der Filmsubstanz bedeckt war (wie es bei den Oberflächenfilm-Experimenten im April 1994 der Fall war) und daß kleine Löcher im Film zu einer Reduktion der gemessenen Dämpfungsverhältnisse führten. Die Unterscheidung zwischen Bereichen verschieden starker Dämpfung bedeutet demnach nicht, daß das Dämpfungsvermögen der oberflächenaktiven Substanz zwischen diesen Filmabschnitten variierte, sondern bezieht sich auf die Unterschiede in der Reduktion des mittleren Radar-Rückstreuequerschnitts..

In Abbildung 5.10 sind die Dämpfungsverhältnisse gezeigt, die mit dem HELISCAT am 06. Oktober 1994 über dem reinen OLA-Film vor Sylt gemessen wur-

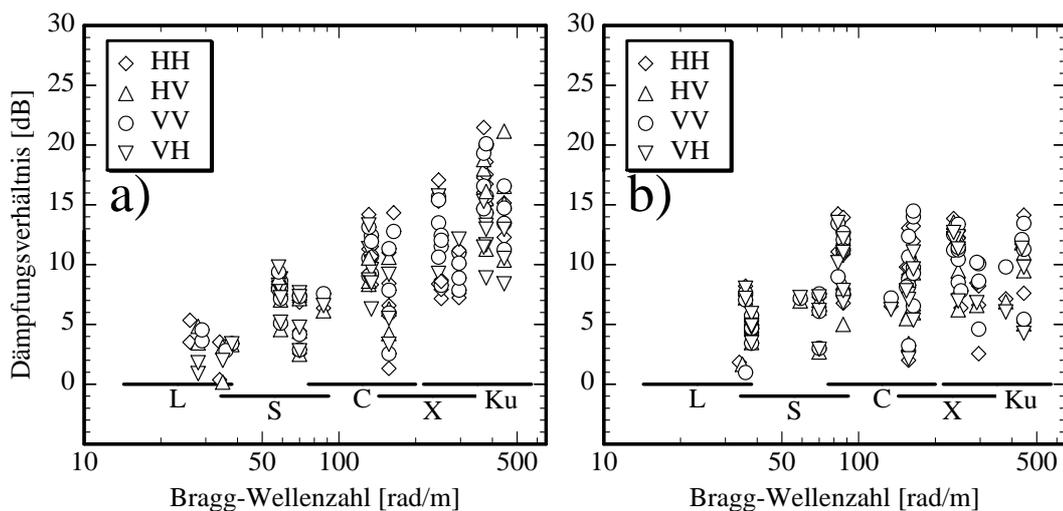


Abbildung 5.10: Über OLA (pur) am 06. Oktober 1994 vor Sylt mit dem HELISCAT gemessene Dämpfungsverhältnisse, unterteilt nach a) stark dämpfenden und b) schwach dämpfenden Abschnitten.

den. Die Aufteilung nach stark dämpfenden (Abbildung 5.10a) und schwach dämpfenden (Abbildung 5.10b) Abschnitten erfolgte wieder unter Berücksichtigung der maximalen Dämpfungsverhältnisse, wobei hier zwischen Werten oberhalb und unterhalb von 15 dB getrennt wurde (Eine weitere Unterteilung in „mäßig dämpfend“ ist hier nicht sinnvoll, da diese Abschnitte qualitativ dasselbe Dämpfungsverhalten zeigen wie die stark dämpfenden). Sowohl der gesamte Datensatz als auch die beiden Teile zeigen einige markante Merkmale:

- Insgesamt zeigen die Daten eine große Streuung (was bei einer derart hohen Windgeschwindigkeit auch nicht überrascht).
- Wiederum wurden weder eine Abhängigkeit von der Blickrichtung des Radars (relativ zur Windrichtung) noch von der Polarisation gemessen.
- Während bei den stark dämpfenden Abschnitten von OLA ein monoton ansteigender Verlauf der Dämpfungsverhältnisse vorliegt, zeigen die schwach dämpfenden Abschnitte einen derartigen Anstieg nur bei niedrigen Wellenzahlen. Oberhalb von etwa 80 rad/m sind die Meßwerte konstant oder fallen sogar leicht ab (Hier läßt sich wegen der großen Streuung keine eindeutige Aussage vornehmen).
- Die Dämpfungsverhältnisse im Bereich niedriger Wellenzahlen (L- und S-Band) sind, wie auch schon bei den beiden OLA-Filmen vom April 1994, niedriger als diejenigen, die über den natürlichen Oberflächenfilmen vor Amrum gemessen wurden.
- Auch für die stark dämpfenden Abschnitte von OLA sind die gemessenen Dämpfungsverhältnisse niedriger als die im April 1994 vor Sylt (bei einer Windgeschwindigkeit von 5 m/s) gemessenen. Sie sind somit auch deutlich niedriger als die vor Helgoland gemessenen Werte (bei 3.5 – 4 m/s).

Diese Ergebnisse sind in keiner Weise überraschend, bestätigen sie doch die Hypothesen, die nach Auswertung sämtlicher Daten der Meßkampagnen im April 1994 aufgestellt wurden (vgl. die Abschnitte 5.1, 5.2 und 5.3). Da die ersten beiden Ergebnisse, also der Hinweis auf die große Streuung und die Unabhängigkeit von Polarisation und Antennenblickrichtung auf sämtliche an diesem Tag überflogene Oberflächenfilme gelten, werden sie im folgenden nicht mehr explizit herausgestellt.

In Abbildung 5.11 sind die Meßergebnisse der Überflüge über dem reinen OLME-Film dargestellt. Die Daten sind wieder nach – relativ – stark dämpfenden (Abbildung 5.11a) und schwach dämpfenden (Abbildung 5.11b) Abschnitten unterteilt, wobei die Grenze für diese Unterscheidung als 8 dB gewählt wurde (Wegen der insgesamt niedrigeren Meßwerte wurde die Grenze hier – in dB – halb so groß gewählt). Mit Rücksicht auf die schwächeren Dämpfungseigenschaften von OLME (siehe Abbildung 3.1) zeigt sich auch hier dieselbe Tendenz wie zuvor schon für OLA:

- Die stark dämpfenden Abschnitte von OLME zeigen einen monotonen Anstieg der Dämpfungsverhältnisse mit der Bragg-Wellenzahl. Bei den schwach dämpfenden Abschnitten ist im Bereich mittlerer und hoher Wellenzahlen (ab 80 rad/m) ein konstanter Verlauf der Dämpfungskurve zu beobachten.

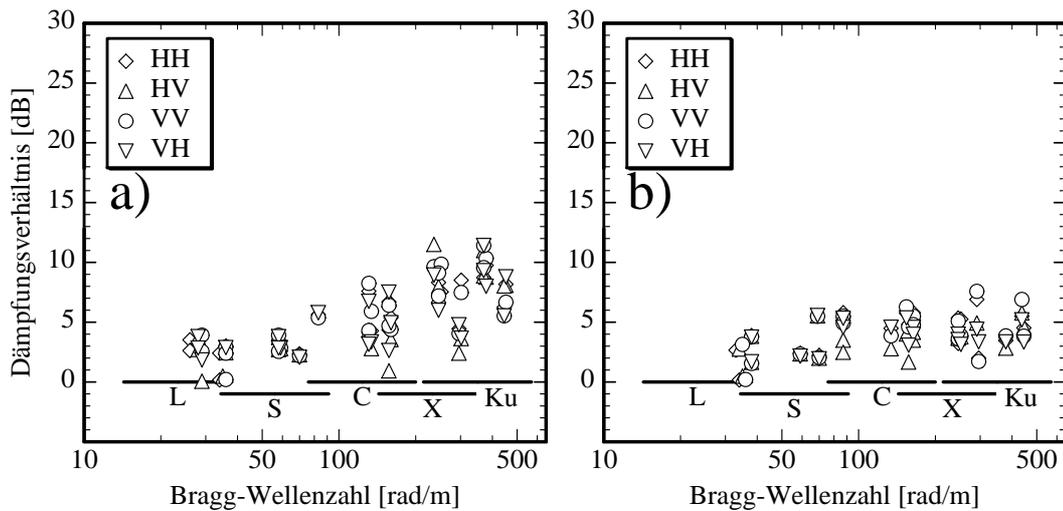


Abbildung 5.11: Über purem OLME am 06. Oktober 1994 vor Sylt mit dem HELISCAT gemessene Dämpfungsverhältnisse, unterteilt nach a) stark dämpfenden und b) schwach dämpfenden Abschnitten.

Bei der Untersuchung der Meßergebnisse, die über dem puren TOLG-Film gewonnen wurden, ist eine feinere Unterteilung in die drei Dämpfungsklassen „stark“, „mäßig“ und „schwach“ sinnvoll, um den Trend zwischen diesen Filmabschnitten zu verdeutlichen. In Abbildung 5.12 ist diese Unterscheidung dargestellt (Die Grenzen wurden hier als 15 dB und 10 dB gewählt), und die Ergebnisse unterstreichen diejenigen, die über OLA und OLME gewonnen wurden:

- Auch bei TOLG ist für die stark dämpfenden Abschnitte ein monotonen Ansteigen der Dämpfungsverhältnisse zu beobachten.
- Der Übergang von stark zu mäßig dämpfenden Filmabschnitten zeigt, daß ein Abflachen der Dämpfungskurve bei mittleren Bragg-Wellenzahlen einsetzt (etwa bei 150 rad/m – bei höheren Wellenzahlen bleiben die Dämpfungsverhältnisse konstant).
- Die schwach dämpfenden Filmabschnitte zeigen schließlich den erwarteten Dämpfungsverlauf: Ein Anstieg bis zu mittleren Bragg-Wellenzahlen (C-Band – ob nun etwa 80 rad/m oder weiterhin 150 rad/m, läßt sich wegen der Streuung der Meßwerte nicht bestimmen) und bei größeren Wellenzahlen etwa konstante Werte.
- Insgesamt fällt bei den über purem TOLG gewonnenen Meßwerten auf, daß die Streuung der Daten deutlich geringer ist als sie für OLA und OLME gemessen wurde. Diese geringere Streuung bestätigt den optischen Eindruck, der während der Messungen vom Helikopter aus gewonnen wurde, daß nämlich der TOLG-Film während dieses Experimentes den kompaktesten Oberflächenfilm darstellte.

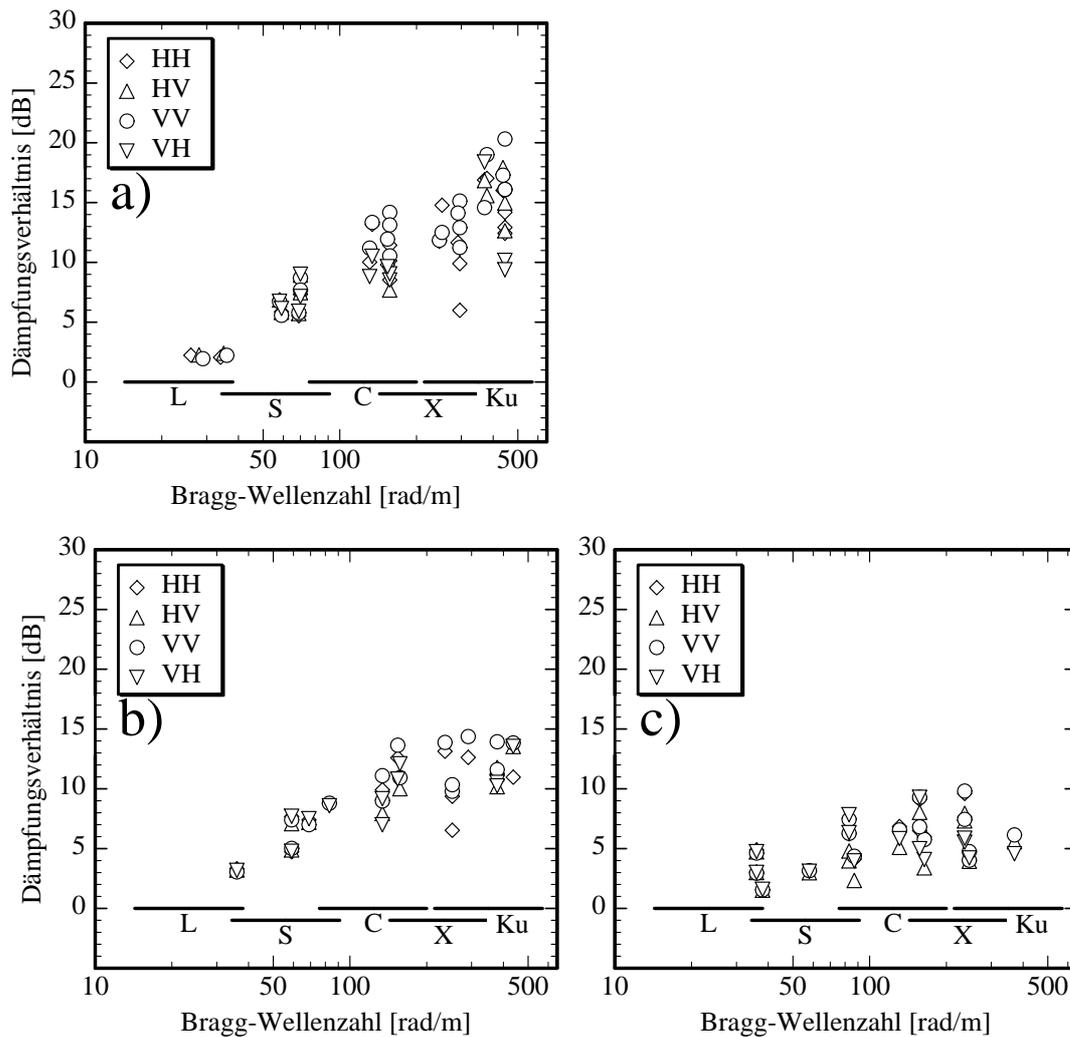


Abbildung 5.12: Sämtliche am 06. Oktober 1994 über dem reinen TOLG-Film mit dem HELISCAT gemessenen Dämpfungsverhältnisse, unterteilt nach a) stark, b) mäßig und c) schwach dämpfenden Filmabschnitten (siehe Text).

Der Trend, der sich über den drei in purer Form auf die Wasseroberfläche ausgebrachten Oberflächenfilmen zeigt, wird demnach durch die feinere Aufteilung der Meßdaten für TOLG noch bestätigt. Es ist anzunehmen, daß eine gleiche Unterteilung denselben Trend auch für OLA ergeben hätte. Wegen der stärkeren Streuung der Daten (Ursache war die starke Inhomogenität des OLA-Films, die wiederum durch die *MS Scharhörn* verursacht worden war) kann der Trend durch eine feinere Unterteilung allerdings nicht sichtbar gemacht werden.

Von den drei in gelöster Form ausgebrachten Oberflächenfilmen war über den gesamten Verlauf der HELISCAT-Messungen nur das in *n*-Hexan gelöste TOLG eindeutig visuell zu identifizieren, so daß dessen Meßwerte die einzigen unter diesen Windbedingungen über einem gelösten Oberflächenfilm gewonnenen Daten darstellen. In Abbildung 5.13 sind sämtliche gemessenen Dämpfungsverhältnisse, wieder in

die drei Dämpfungsklassen unterteilt, dargestellt. Die Grenzen für die Unterteilung liegen (wie beim puren TOLG) bei 15 dB und 10 dB.

Die Datenausbeute über dem gelösten TOLG ist insgesamt relativ gering – trotzdem werden auch in diesem Fall die zuvor gemachten Aussagen bestätigt, die den Trend zwischen den verschiedenen Dämpfungsklassen beschreiben:

- Diejenigen Daten, die über dem in *n*-Hexan gelösten TOLG gewonnen wurden, sind in guter Übereinstimmung mit den über purem TOLG gemessenen Werten (Bei TOLG handelt es sich, wie bei OLA, um einen *flüssig expandierten* Film).
- Bei stark dämpfenden Filmabschnitten steigt auch das Dämpfungsverhältnis von in *n*-Hexan gelöstem TOLG monoton mit der Bragg-Wellenzahl an.

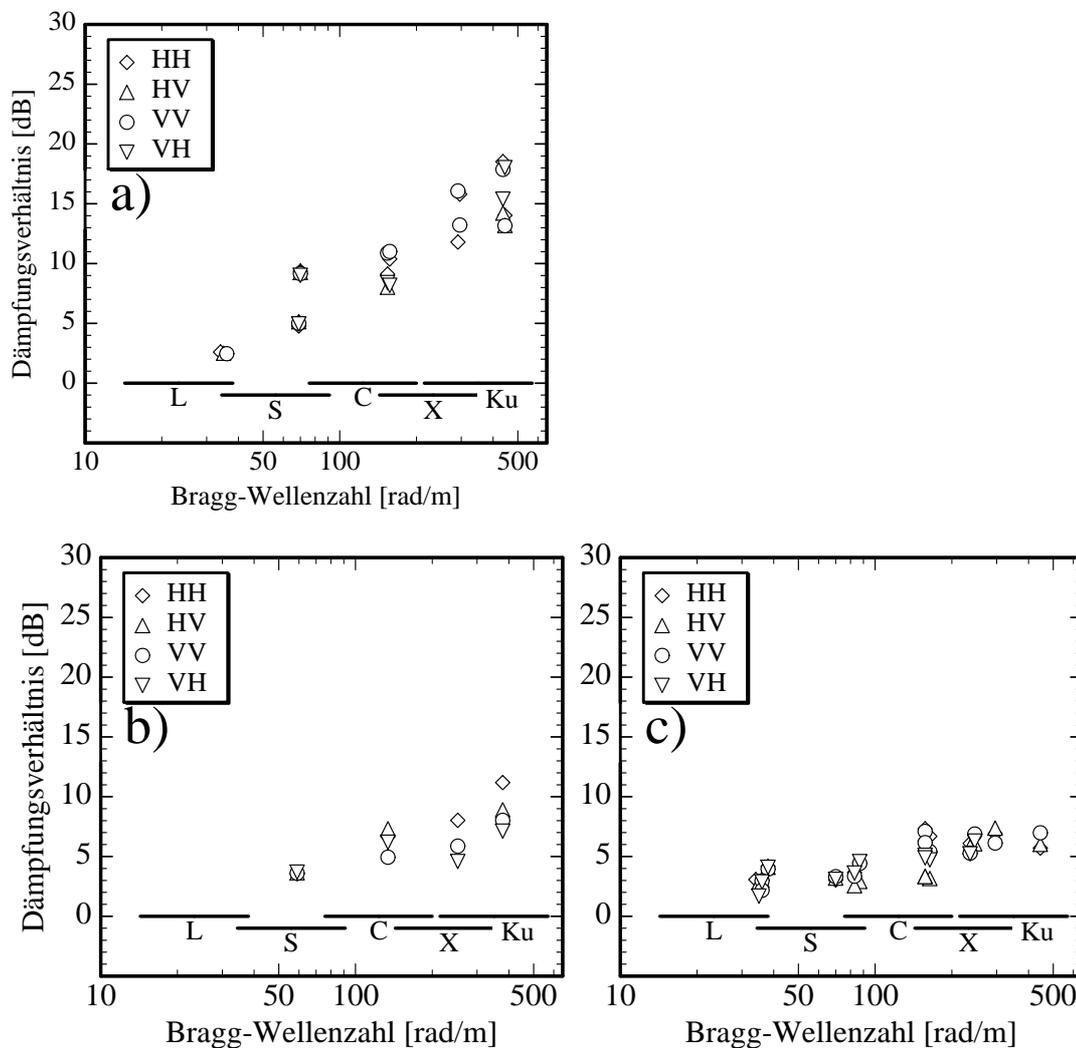


Abbildung 5.13: Sämtliche am 06. Oktober 1994 über dem in *n*-Hexan gelösten TOLG mit dem HELISCAT gemessenen Dämpfungsverhältnisse, unterteilt nach a) stark, b) mäßig und c) schwach dämpfenden Filmabschnitten (siehe Text).

- Bei mäßig dämpfenden Filmabschnitten flacht die Dämpfungskurve ab. Ob der leichte Anstieg bei großen Bragg-Wellenzahlen (Ku-Band) signifikant ist, kann (vorerst) aufgrund der geringen Datenausbeute nicht gesagt werden.
- Bei den schwach dämpfenden Filmabschnitten von in *n*-Hexan gelöstem TOLG ist ein (leichter) Anstieg nur bis zu 150 rad/m zu messen, bei größeren Wellenzahlen bleibt das gemessene Dämpfungsverhältnis konstant.

Der Vergleich sämtlicher über den simulierten biogenen Oberflächenfilmen gewonnener Meßergebnisse zeigt, daß auch im Fall hoher Windgeschwindigkeiten eine Unterteilung in unterschiedlich stark dämpfende Filmbereiche vorgenommen werden kann, die zu qualitativ gleichwertigen Aussagen für die jeweiligen Filmabschnitte führt.

#### 5.4.2 Vergleich zwischen Mineralöl und biogenen Substanzen

Durch den verspäteten Beginn der HELISCAT-Messungen und die hohe Windgeschwindigkeit waren nicht von sämtlichen vor Sylt ausgebrachten Oberflächenfilmen Meßdaten zu gewinnen. Neben den beiden aus gelöstem OLME bestehenden Filmen war auch der Leichtöl- (Dieselöl-) Film vom Helikopter aus nicht mehr zu identifizieren, so daß hier keine Meßflüge durchgeführt wurden (Wie allerdings die SAR-Aufnahmen in Abschnitt 6.2 zeigen werden, war auch unmittelbar nach dem Ausbringen keine meßbare Reduktion des Radar-Rückstreuquerschnittes festzustellen). Aus diesem Grunde müssen sich die Untersuchungen zum Vergleich zwischen biogenen Substanzen und Mineralöl auf den Schwerölfilm (*Ifo 180*) beschränken.

Abbildung 5.14 zeigt die über dem Schwerölfilm gewonnenen Daten, abermals unterteilt in die drei Dämpfungsklassen „stark“ (maximale Dämpfung oberhalb von 20 dB – Abbildung 5.14a), „mäßig“ (maximale Dämpfung zwischen 15 dB und 20 dB – Abbildung 5.14b) und „schwach“ (maximale Dämpfung kleiner als 15 dB – Abbildung 5.14c). Die charakteristischen Eigenschaften der Meßwerte sowie die Unterschiede zu den biogenen Oberflächenfilmen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Meßdaten zeigen eine relativ geringe Streuung. Das gilt nicht nur für die Bereiche starker und schwacher Dämpfung, wo weniger Daten vorliegen, sondern auch für Bereiche mäßiger Dämpfung.
- Grundsätzlich steigen die Meßwerte mit zunehmender Bragg-Wellenzahl monoton an, und zwar nicht nur bei den stark dämpfenden, sondern auch bei den mäßig und schwach dämpfenden Filmabschnitten.

Durch diese Daten werden die von *Wismann et al.* [1996a] während des *SAMPLEX '92*-Experimentes über verschiedenen Mineralölfilmen erzielten Ergebnisse bestätigt. Auch dort wurden Messungen mit dem HELISCAT über Schweröl durchgeführt, wobei die Windgeschwindigkeiten während der Meßflüge zwischen 6 m/s und 10 m/s lagen, also niedriger waren als im vorliegenden Fall. Trotz dieser Unterschiede in der Windgeschwindigkeit (die den vorigen Abschnitten nach das Dämpfungsverhalten signifikant beeinflussen können) besteht eine sehr gute Übereinstimmung der Meßwerte, die am 06. Oktober 1994 über den stark dämpfenden Abschnitten gewon-

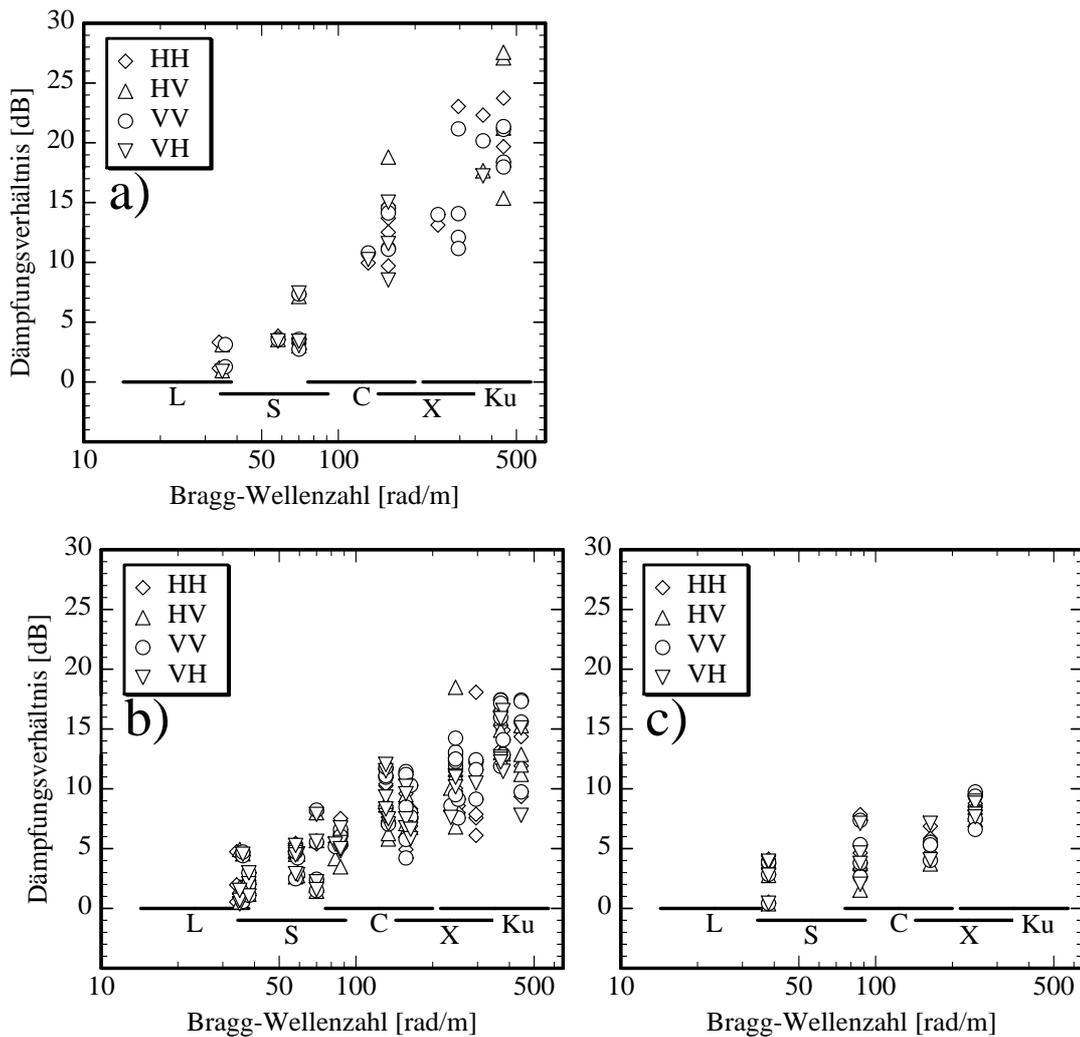


Abbildung 5.14: Sämtliche über dem Schweröl (*Ifo 180*) am 06. Oktober 1994 vor Sylt mit dem HELISCAT gemessenen Dämpfungsverhältnisse, unterteilt nach a) stark, b) mäßig und c) schwach dämpfenden Filmbereichen.

nen wurden, mit denjenigen des *Major Spills*, eines großen, ebenfalls stark dämpfenden Mineralölfilms. Die vorliegenden Meßwerte der Bereiche mäßiger und schwacher Dämpfung lassen sich demnach mit denjenigen vergleichen, die über schwerem resp. leichtem Heizöl gewonnen wurden.

Der Vergleich mit den biogenen Substanzen fällt ebenso deutlich aus:

- Im Bereich starker Dämpfung liegen die über dem Mineralölfilm gemessenen Dämpfungswerte deutlich höher als die über den vergleichbaren Abschnitten biogener Filme gemessenen Werte.
- Im Bereich mäßiger und schwacher Dämpfung wurden über dem Mineralölfilm zwar jeweils keine deutlich höheren Dämpfungsverhältnisse gemessen, doch

unterscheiden sich die Dämpfungskurven wegen ihres monotonen Anstiegs qualitativ von denjenigen, die über den biogenen Substanzen gemessen wurden.

#### 5.4.3 Vergleich mit den im April gewonnenen Daten

Da nur OLA in allen drei hier beschriebenen Experimenten mit dem HELISCAT als Oberflächenfilm vorhanden war, soll sich ein Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Meßkampagnen in erster Linie auf die gemessenen Dämpfungsverhältnisse dieser Substanz konzentrieren. Für diesen Vergleich werden noch einmal die wesentlichen Merkmale der Meßwerte, die über den drei OLA-Filmen gewonnen wurden, herausgestellt:

- Während der Messungen am 18. April 1994 vor Sylt herrschte eine mittlere Windgeschwindigkeit (5 m/s). Die Meßwerte (Abbildung 5.2b) zeigen einen monotonen Anstieg mit der Bragg-Wellenzahl, wobei ab ca. 80 rad/m die Steigung etwas geringer ausfällt. Die Streuung der Meßdaten ist gering.
- Die Windgeschwindigkeit während der Messungen am 18. April 1994 vor Helgoland war mit 3.5–4 m/s etwas niedriger als zuvor bei den Messungen vor Sylt. Die Meßdaten (Abbildung 5.3a) steigen wiederum monoton mit der Bragg-Wellenzahl an, wobei sie bis etwa 80 rad/m mit denen des ersten Meßfluges vor Sylt nahezu übereinstimmen (teilweise sind sie etwas größer). Oberhalb dieser Wellenzahl streuen sie mehr, liegen aber deutlich höher als die vor Sylt gemessenen Werte.
- Die stark dämpfenden Bereiche des OLA-Films, der am 06. Oktober 1994 bei einer Windgeschwindigkeit von 12 m/s vor Sylt überflogen wurde, zeigen ebenfalls einen monotonen Verlauf der Dämpfungskurve (Abbildung 5.10a) und eine größere Streuung der Daten. Die Steigung der Meßdaten mit der Bragg-Wellenzahl ist geringer als sie im April gemessen wurde, und das Dämpfungsverhalten kann nicht in zwei Wellenzahlbereiche unterhalb und oberhalb von etwa 80 rad/m unterteilt werden.
- Die schwach dämpfenden Abschnitte des OLA-Films bei hoher Windgeschwindigkeit zeigen eine ebenso starke Streuung der Meßwerte und legen erneut eine Unterteilung in zwei Wellenzahlbereiche nahe: Unterhalb von ca. 80 rad/m steigt die Dämpfungskurve monoton, bei größeren Bragg-Wellenzahlen bleibt sie nahezu konstant.

Die Aufzählung dieser Ergebnisse macht deutlich, daß, mit Ausnahme der stark dämpfenden Abschnitte bei hoher Windgeschwindigkeit, eine Unterteilung der Dämpfungskurven in zwei Abschnitte sinnvoll ist. Daß die Unterscheidungsgrenze von 80 rad/m nicht systembedingt ist, zeigt der Vergleich mit den beiden TOLG-Filmen bei hoher Windgeschwindigkeit am 06. Oktober 1994 (Abbildung 5.12 und Abbildung 5.13):

- Auch für die beiden TOLG-Filme (pur und gelöst) kann eine Unterteilung der Dämpfungskurven in zwei Wellenzahlbereiche vorgenommen werden, jedoch bei etwa 150 rad/m, also einer anderen (höheren) Bragg-Wellenzahl.

Um diesen Effekt erklären zu können, müssen die theoretischen Dämpfungskurven (Abbildung 3.1) betrachtet werden. Ein Vergleich mit ihnen zeigt, daß es sich bei den Grenzen um genau diejenigen Wellenzahlen handelt, bei denen die (relative) Marangoni-Dämpfung ihr Maximum hat. Der Verdacht, die Grenzen seien eine Auswirkung der für die Unterteilung in stark, mäßig und schwach dämpfende Abschnitte gewählten Grenzwerte für die Dämpfungsverhältnisse, kann durch zwei Argumente entkräftet werden:

- Eine gleichartige Unterteilung im Falle des Schweröls (Abbildung 5.14) führt zu keiner sichtbaren Aufteilung der Dämpfungskurven (siehe vor allem Abbildung 5.14c).
- Für die beiden im April 1994 aufgenommenen Datensätze kann ebenso eine Grenze bei etwa 80 rad/m festgelegt werden, bei der sich der Verlauf der Dämpfungskurven ändert. In beiden Fällen ist aber keinerlei Unterteilung in unterschiedlich stark dämpfende Abschnitte vorgenommen worden.

Für die Dämpfungskurven, die am 06. Oktober 1994 bei hoher Windgeschwindigkeit über dem OLME-Film gemessen wurden, kann eine derartige Unterteilung nicht vorgenommen werden, da die Meßwerte insgesamt wesentlich geringer sind (bei OLME handelt es sich um eine schwach dämpfende Substanz, siehe Abbildung 3.1).

#### 5.4.4 Diskussion der Ergebnisse

Die HELISCAT-Messungen am 06. Oktober wurden mehr als zwei Stunden nach dem Ausbringen der Oberflächenfilme durchgeführt. Bei den vorherrschenden Windverhältnissen (12 m/s) waren die Filme nach dieser Zeit zum Teil schon nicht mehr vollständig an der Wasseroberfläche (die beiden gelösten OLME-Filme und der Leichtöl-Film); zumindest muß aber damit gerechnet werden, daß sie bei diesen Wetterbedingungen teilweise aufgerissen waren (aus diesem Grund zeigen die Meßdaten eine größere Streuung). Da aber auch die Messungen im April 1994 über einen größeren Zeitraum stattfanden (während dessen sich die gemessenen Dämpfungsverhältnisse – von anfänglichen Effekten abgesehen – nicht mehr verändert haben), ist ein Vergleich zwischen sämtlichen Daten zulässig. Der sehr komplexe Datensatz wird nun, unter Einbeziehung der Ergebnisse der vorherigen Abschnitte, diskutiert, wobei die Untersuchung des gemessenen Dämpfungsverhaltens die unterschiedliche Windgeschwindigkeit, die Unterschiede zwischen den einzelnen biogenen Substanzen sowie den Vergleich zwischen dem Mineralöl und den biogenen Substanzen umfaßt. Schließlich wird eine Möglichkeit vorgestellt, die Reduktion des Wellenbrechens quantitativ zu erfassen und in die Diskussion der Ergebnisse einzubeziehen.

#### VERGLEICH DER MESSERGEBNISSE FÜR OLA BEI UNTERSCHIEDLICHEN WINDGESCHWINDIGKEITEN:

Die Ergebnisse der Meßflüge am 06. Oktober 1994 zeigen, daß die Oberflächenfilme in Bereiche unterschiedlich starker Dämpfung (d.h. unterschiedlich hoher Dämpfungskurven) unterteilt werden können, was mehrere Ursachen haben kann:

- Der Energieeintrag durch den Wind ist in diesen Bereichen unterschiedlich, was seine Ursache ebenfalls in einer unterschiedlich dichten Filmbedeckung haben kann (die wiederum nicht zwangsläufig zu einem anderen spezifischen Dämpfungsverhalten führen muß).
- Das spezifische Dämpfungsverhalten der Substanz ist in den Filmabschnitten unterschiedlich. Grund hierfür kann eine veränderte Morphologie sein, was wiederum durch Wind- und Welleneinflüsse verursacht wird.
- Auch die anderen Quellterme in Gleichung (3.18), also das Wellenbrechen und die nichtlineare Wellenwechselwirkung, ändern sich, wenn die Filmbedeckung nicht mehr homogen ist.

Es ist anzunehmen, daß die Wahrheit in einer Kombination dieser Ursachen liegt – da sich die Diskussion der bisherigen Meßergebnisse aber hauptsächlich auf eine Betrachtung der Quellterme für Energieeintrag durch den Wind sowie viskose Dissipation konzentrierten, soll hier vorerst in ähnlicher Weise fortgefahren werden, bevor auch eine Reduktion des Wellenbrechens berücksichtigt wird.

Für die qualitative Diskussion der Meßdaten soll zuerst davon ausgegangen werden, daß, bei gleichbleibendem Dämpfungsverhalten des Oberflächenfilmes, der Energieeintrag durch den Wind in den Bereichen unterschiedlich starker Dämpfung variiert. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse des SAXON-FPN-Experimentes [S. Stolte, pers. Mitteilung] (vgl. Abschnitt 3.2.2)] und derer von Wei und Wu [1992] scheint es realistisch, neben der „starken“ Reduktion der Schubspannungsgeschwindigkeit auf 70% (also dem bisher verwendeten Wert) von einer „schwachen“ Reduktion auf 90% auszugehen. Konsequenterweise wird auch eine „mäßige“ Reduktion auf 80% definiert.

In Abbildung 5.15 sind wieder die Faktoren der Quellterme für die viskose Dissipation ( $2\Delta_s c_g$ ) und für den Energieeintrag durch den Wind ( $\beta_s$ ) für eine filmbedeckte Wasseroberfläche dargestellt, wobei für den Windeintrag eine Reduzierung der Schubspannungsgeschwindigkeit durch die Filmbedeckung auf Werte von 90%, 80% und 70% des Wertes über einer filmfreien Wasseroberfläche angenommen wurde (also Reduktionen um 10%, 20% und 30%). Dieser unterschiedliche Energieeintrag durch den Wind hat bei den Substanzen OLA und TOLG Auswirkungen auf das Verhältnis der betrachteten Quellfaktoren im Bereich mittlerer bis großer Wellenzahlen:

- Bei einer Reduktion der Schubspannungsgeschwindigkeit auf 90% ist der Faktor für den Windeintrag bei mittleren und großen Wellenzahlen um mindestens 3.5–5 dB größer als der für die viskose Dissipation.

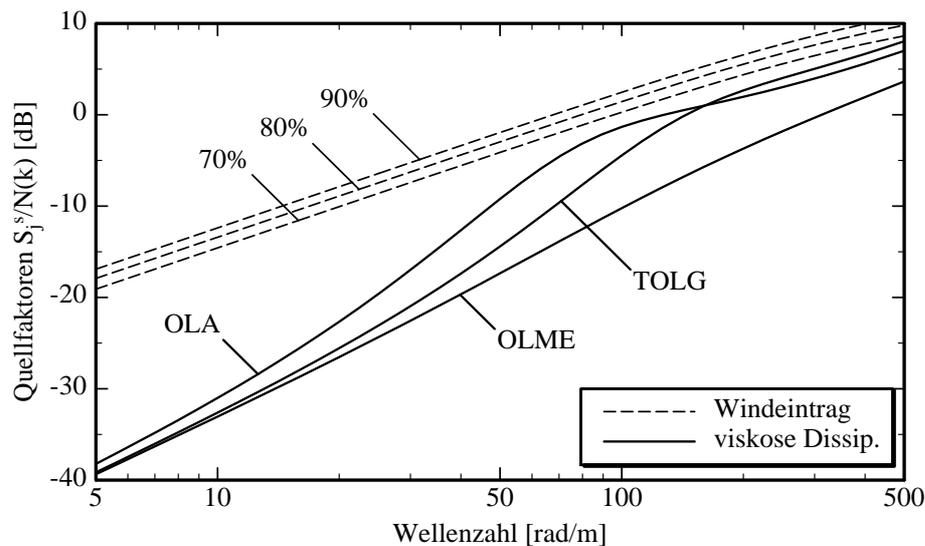


Abbildung 5.15: Faktoren der Quellterme bei Filmbedeckung und einer Windgeschwindigkeit von 12 m/s. Für den Quellfaktor des Windeintrages ( $\beta_s$ ) wurden Reduktionen der Schubspannungsgeschwindigkeit auf 90%, 80% und 70% angenommen (siehe Text). Dargestellt sind auch die Quellfaktoren der viskosen Dissipation ( $2\Delta_{c_g}$ ) für die im Experiment ausgebrachten Substanzen OLA, OLME und TOLG (siehe Tabelle 3.1).

- Bei einer Reduktion auf 70% beträgt dieser Unterschied ab Wellenzahlen, bei denen die theoretischen Kurven ihr Maximum erreichen, nur noch etwa 1–3 dB.
- Bei einer Reduktion auf 80% liegt dieser Unterschied zwischen den beiden vorherigen, also etwa 3–4 dB.

Unter Berücksichtigung der Diskussion der Meßergebnisse aus Abschnitt 5.2 ist demnach für die stark dämpfenden Bereiche (mit einer Reduktion auf 70%) zu erwarten, daß die gemessenen Dämpfungsverhältnisse mit der Bragg-Wellenzahl ansteigen. Ein sprunghafter Anstieg bei mittleren Wellenzahlen tritt deshalb nicht auf, weil die viskose Dissipation im betrachteten Wellenzahlbereich nicht größer ist als der Windeintrag. Wegen des nur geringen Unterschiedes beider Quellfaktoren bei mittleren und großen Wellenzahlen kann man jedoch davon ausgehen, daß in diesem Bereich die durch den Wind zugeführte Energie fast vollständig dissipiert. Der hochfrequente Teil des Wellenspektrums ist zwar nicht – wie im Falle niedriger Windgeschwindigkeit – durch die starke Marangoni-Dämpfung vom niederfrequenten Teil „energetisch abgeschnitten“ (vgl. Abschnitt 5.2.3), doch es ist anzunehmen, daß der nur geringe Unterschied zwischen den Quellfaktoren eine ähnliche (wenn auch gemäßigte) Wirkung hat.

Bei den mäßig dämpfenden Abschnitten (mit einer Reduktion auf 80%) sollte die gemessene Dämpfungskurve nur bis zu mittleren Wellenzahlen deutlich ansteigen. Ab diesem Bereich, wo der Unterschied zwischen den Quellfaktoren etwa gleich bleibt, ist die Vermutung zulässig, daß eine Art Gleichgewicht im Dämpfungsverhalten eintritt:

Der Energieeintrag durch den Wind ist in diesem Fall groß genug, um ständig einen Ausgleich für die viskos gedämpften Wasserwellen zu liefern. Daher ist mit gleichbleibenden Dämpfungswerten (bzw. für OLA mit einem leichten Rückgang) zu rechnen, wenn der Unterschied zwischen Windeintrag und Dissipation in diesem Bereich etwa gleich bleibt (bei OLA vergrößert er sich wieder etwas).

Bei den schwach dämpfenden Abschnitten (Reduktion auf 90%) schließlich ist damit zu rechnen, daß wegen des über den gesamten Wellenzahlbereich deutlich größeren Windeintrages das Ansteigen der Dämpfungskurve schon bei niedrigeren Werten (allerdings bei der gleichen Wellenzahl) endet. Auch in diesem Fall sollten die gemessenen Dämpfungswerte bei größeren Wellenzahlen gleich bleiben.

Mit dem Ansatz, den Windeintrag über den unterschiedlichen Filmbereichen zu variieren, kann demnach vor allem das Abflachen der gemessenen Dämpfungskurven in Bereichen des Maximums der Marangoni-Dämpfung (siehe Abbildung 3.1) erklärt werden. Der Versuch, die gemessenen Werte auch quantitativ zu erfassen, wird zu einem späteren Zeitpunkt unternommen.

#### VERGLEICH DER MESSERGEBNISSE FÜR UNTERSCHIEDLICHE BIOGENE SUBSTANZEN:

Für den aus OLME bestehenden Oberflächenfilm ist der Energieeintrag durch den Wind im gesamten Wellenzahlbereich deutlich größer als die viskose Dissipation (unabhängig von der Reduktion der Schubspannungsgeschwindigkeit), wodurch der über den gesamten Wellenzahlbereich monotone Anstieg der gemessenen Dämpfungskurve erklärt werden kann. Die Unterteilung in stark und schwach dämpfende Filmbereiche kann hier nur einen Unterschied in der Steigung der Dämpfungskurve bewirken. Das leichte Abflachen der Dämpfungskurve für die schwach dämpfenden Filmabschnitte kann, ebenso wie bei den anderen biogenen Substanzen, durch den Verlauf der Dämpfungskurve (vgl. Abbildung 3.1) erklärt werden.

Der Vergleich mit den gewonnenen Meßdaten für OLA und TOLG (Abbildung 5.11 resp. Abbildung 5.12) bestätigt die aufgrund der Betrachtung der Quellfaktoren aufgestellten Hypothesen. Offensichtlich lassen sich qualitative Unterschiede in den gemessenen Daten allein mit Hilfe des veränderten Energieeintrages durch den Wind erklären. Da aber, wie oben beschrieben, auch eine veränderte Dämpfungseigenschaft des Oberflächenfilms für die gemessenen Unterschiede verantwortlich sein kann, soll im folgenden auch dieser Punkt betrachtet werden.

Die theoretischen Dämpfungskurven (Abbildung 3.1) beruhen auf Meßdaten, die ohne Windeinwirkung entstanden sind, repräsentieren aber die besten derzeit zur Verfügung stehenden Werte für den viskosen Quellterm bei Filmbedeckung. Es ist sehr wahrscheinlich, daß im Falle eines winderzeugten Wellenspektrums Änderungen im spezifischen Dämpfungsverhalten auftreten, die vor allem die kurzen Wellen betreffen (wo sich die Windeinflüsse am meisten auswirken). Es ist außerdem anzunehmen, daß sich diese Beeinflussung durch das Windfeld bei hohen Windgeschwindigkeiten noch verstärken wird. Diese Annahmen stehen in Einklang mit dem von *Cini et al.* [1987] gemachten Ansatz für die Marangoni-Dämpfung, nach dem der Dilatationsmodul abhängig ist von der Frequenz der Wasserwellen.

Auch die Betrachtung morphologischer Filmeigenschaften führt zu dem Schluß, daß sich die Dämpfungseigenschaften ändern können, da sich die Auswirkungen der Schubspannungsgeschwindigkeit und die molekulare Struktur an der (filmbedeckten) Wasseroberfläche gegenseitig beeinflussen können.

Eine Unterteilung in unterschiedlich stark dämpfende Filmbereiche durch eine Variation der Dämpfungskurven muß aber – soweit der qualitative Verlauf der Kurven nicht wesentlich geändert wird – zu denselben Ergebnissen führen, da bei obiger Diskussion der Meßergebnisse das *Verhältnis* zwischen Windeintrag und viskoser Dissipation betrachtet wurde. Ob nun der Windeintrag verringert oder die viskose Dämpfung vergrößert wird, muß sich in den Meßergebnissen in gleicher Art und Weise auswirken.

#### **DISKUSSION DER MESSERGEBNISSE FÜR DEN SCHWERÖLFILM:**

Die Argumente für die Diskussion derjenigen Dämpfungskurven, die am 06. Oktober 1994 über den vier biogenen Oberflächenfilmen gemessen wurden, sollen nun dazu dienen, das Dämpfungsverhalten des Schweröls bei hoher Windgeschwindigkeit zu charakterisieren. Dessen gemessene Dämpfungskurven zeigen in allen drei Filmbereichen, also bei starker, mäßiger und schwacher Dämpfung, einen monotonen Anstieg, was einen Unterschied zu den Dämpfungskurven der biogenen Substanzen bedeutet. Ein Vergleich mit den Dämpfungskurven, die bei den Messungen am 18. April 1994 vor Sylt über purem OLA gewonnen wurden, deutet außerdem darauf hin, daß im Bereich großer Wellenzahlen der Windeintrag stets kleiner ist als die viskose Dissipation.

In Abbildung 5.16 sind wieder die Faktoren der Quellterme des Windeintrages bei Reduktion der Schubspannungsgeschwindigkeit auf 90%, 80% und 70% dargestellt. Die beiden unteren Kurven zeigen die Quellfaktoren der viskosen Dissipation sowohl für eine filmfreie als auch für eine filmbedeckte Wasseroberfläche, wobei von rein viskoser Dämpfung ausgegangen wurde (vgl. (3.12)) Für die Viskosität einer filmbedeckten Wasseroberfläche wurde hier der doppelte Wert einer filmfreien Wasseroberfläche (bei 20°C) eingesetzt, ein willkürlicher Wert, der einerseits die Veränderung mit der Viskosität verdeutlichen und andererseits eine Überprüfung der qualitativen Beschreibung des Dämpfungsverhaltens von Schweröl ermöglichen soll. Bei diesem Wert für die Viskosität ( $\eta = 0.002 \text{ Pa s}$ ) ist – der bisherigen Diskussion der Meßwerte folgend – ein mit der Wellenzahl steigender Verlauf der gemessenen Dämpfungsverhältnisse zu erwarten. Der Unterschied der rein viskosen Dissipation zur Marangoni-Dämpfung besteht vor allem darin, daß ihre Kurve im Bereich mittlerer Wellenzahlen nicht abflacht (vgl. Abbildung 5.15). Gerade durch dieses Abflachen wird aber bei den biogenen Substanzen das Abflachen der gemessenen Dämpfungskurven verursacht, da ab einer bestimmten Wellenzahl der Unterschied zwischen den beiden Quellfaktoren gleich bleibt (oder sich nur unwesentlich ändert). Aus diesem Grund ist für die Dämpfungskurven des Schweröls – rein viskose Dämpfung vorausgesetzt – in sämtlichen Filmbereichen mit einem monotonen Anstieg zu rechnen.

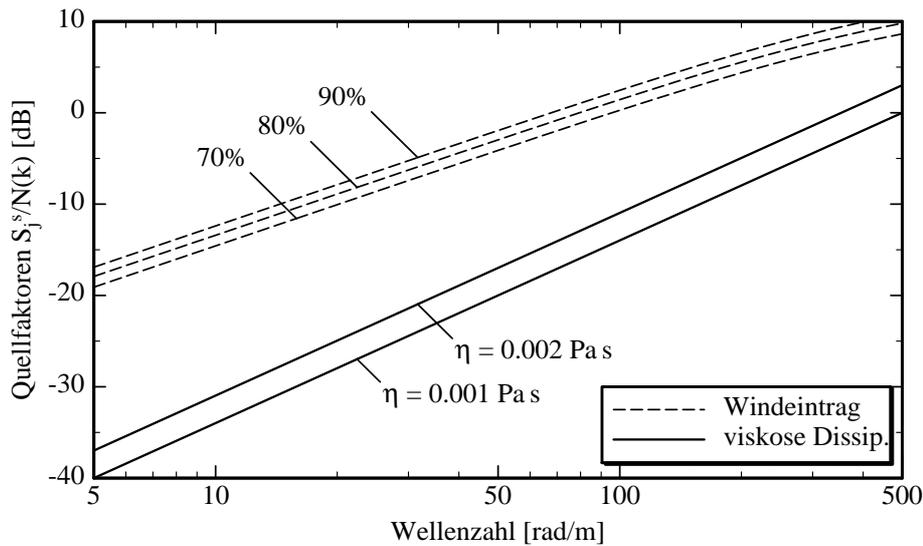


Abbildung 5.16: wie Abbildung 5.15. Dargestellt sind hier die Quellfaktoren für die viskose Dissipation ( $2\Delta_{c_g}$ ) für filmfreie ( $\eta = 0.001 \text{ Pa s}$ ) und mit einem viskosen Film bedeckte Wasseroberfläche ( $\eta = 0.002 \text{ Pa s}$  – siehe Text).

Der gewählte Wert für die Viskosität ist, wie bereits erwähnt, willkürlich. Da allerdings auch beim Mineralöl (und erst recht nach einer längeren Zeitdauer) von einem sehr dünnen Oberflächenfilm ausgegangen werden kann, sollte sich die mittlere Viskosität, also diejenige des gesamten Flüssigkeitskörpers, der für die viskose Dissipation verantwortlich ist, nicht deutlich ändern. Es zeigt sich, daß mit der in dieser Arbeit vorgestellten Diskussion der Meßdaten auch die gemessenen Dämpfungsverhältnisse von Schweröl qualitativ erklärt werden können.

Da die Messungen mit dem HELISCAT zu einem relativ späten Zeitpunkt stattfanden, ist auch davon auszugehen, daß bereits eine witterungsbedingte Veränderung der physiko-chemischen Eigenschaften („Verwitterung“) des Schweröls stattgefunden hatte. Dieser Prozeß wurde bereits von *Alpers und Hühnerfuss* [1988] vorgeschlagen und basiert auf der Annahme, daß auch Mineralölfilm einen Anteil oberflächenaktiven Materials enthalten können, so daß mit einem Angleichen der gemessenen Dämpfungskurven für das Mineralöl an die für die biogenen Substanzen (d.h. mit einem Abflachen bei großen Wellenzahlen) zu rechnen ist. Dieser Effekt kann auch die Ähnlichkeit der Dämpfungskurven für die stark dämpfenden Abschnitte von OLA, TOLG und Schweröl erklären, doch ist schon aufgrund der obigen Diskussion, die auf dem Verhältnis der Quellfaktoren für Windeintrag und viskose Dissipation beruht, mit vergleichbaren Dämpfungskurven zu rechnen.

**EINBEZIEHUNG DES WELLENBRECHENS IN DIE DISKUSSION DER MEßERGEBNISSE:**

Bei der bisherigen Diskussion der Meßergebnisse vom 06. Oktober 1994 wurden die Quellterme für die Dissipation durch Wellenbrechen und für die nichtlineare Wellenwechselwirkung außer acht gelassen. Wie in Abschnitt 5.2 gezeigt wurde, muß bei niedrigen bis mittleren Windgeschwindigkeiten (wo der Energieeintrag durch den Wind nicht ausreicht, um die viskose Dissipation auszugleichen) ein Transfer spektraler Energie von Wellen niedriger zu denen großer Wellenzahl erfolgen, damit die Forderung nach einer ausgeglichenen Strahlungsbilanz (3.14) erfüllt ist (durch die Glättung der Wasseroberfläche ist damit zu rechnen, daß diese Transfer vorwiegend nicht durch Wellenbrechen sondern vielmehr durch nichtlineare Wellenwechselwirkung stattfindet). Demnach ist nur im Fall hoher Windgeschwindigkeit (also bei einem hinreichend großen Energieeintrag durch den Wind) die Annahme zulässig, daß der Quellterm der Dissipation durch Wellenbrechen gegenüber demjenigen der nichtlinearen Wellenwechselwirkung auch bei filmbedeckter Wasseroberfläche dominiert.

Nach Abbildung 5.15 und Abbildung 5.16 ist der Energieeintrag durch den Wind bei schwach, mäßig und stark dämpfenden Filmabschnitten größer als die viskose Dissipation, der erste Faktor in Gleichung (3.18) bleibt also positiv. (Hier sei darauf hingewiesen, daß die Wahl der Werte für die Reduktion der Schubspannungsgeschwindigkeit – trotz einiger Messungen bei filmbedeckter Wasseroberfläche [Mitsuyasu und Honda, 1986; Gade, 1992; Wei und Wu, 1992; S. Stolte, pers. Mitteilung] – willkürlich war. Im Prinzip sind auch – ebenso willkürliche – Reduktionen auf beispielsweise 90%, 70% und 50% möglich, so daß der Windeintrag bei stark dämpfenden Bereichen der biogenen Filme kleiner ist als die viskose Dissipation.) Um der Forderung, daß das Verhältnis der spektralen Energiedichten insgesamt positiv sein muß, gerecht zu werden, muß daraufhin auch der zweite Faktor positiv sein, was ebenso zu dem Schluß führt, daß sowohl bei filmfreier als auch bei filmbedeckter Wasseroberfläche der Quellterm des Wellenbrechens größer ist als derjenige der nichtlinearen Wellenwechselwirkung (– oder umgekehrt. Davon ist aber, vor allem bei filmfreier Wasseroberfläche, nicht auszugehen). Wegen des stärkeren Energieeintrages durch den Wind ist nun also auch eine qualitative Betrachtung des zweiten Faktors sinnvoll:

Von Donelan und Pierson [1987] wird für den Quellterm des Wellenbrechens das Produkt der spektralen Wirkungsdichte mit einer Exponentialfunktion vorgeschlagen:

$$S_{br} = \alpha \left( k^4 \Phi(k) \right)^n \omega N(k) \quad . \quad (5.1)$$

$\alpha$  und  $n$  sind Funktionen der Wellenzahl (die von der Art des Wellenbrechens abhängen) und werden durch Anpassung an Meßwerte im Ku-Band bestimmt.  $\Phi$  ist die spektrale Energiedichte der Wasserwellen, für die hier durch Wahl eines anderen Buchstabens (anstelle von  $\Psi$ ) verdeutlicht werden soll, daß es sich nicht um das Spektrum handelt, daß in (3.18) eingeht. Setzt man dafür die von Phillips [1985] vorgeschlagene Form ein,

$$\Phi(k) \propto \sqrt{\frac{|\cos\varphi| u_*^2}{g k^7}}, \quad (5.2)$$

so erhält man für ein konstantes  $n = 3$  einen Ausdruck, der dem von *Phillips* [1988] für den durch spontanes Brechen verursachten Anteil am Radar-Rückstreuquerschnitt vorgeschlagenen entspricht (siehe Abschnitt 3.1.2). Man kann nun den Exponenten  $n$  als von der Filmbedeckung abhängig annehmen (was, da das Wellenbrechen in Gegenwart des Oberflächenfilms reduziert wird, mit Sicherheit zulässig ist). Weiterhin wird angenommen, daß die Quellterme für nichtlineare Wellenwechselwirkung im Fall hoher Windgeschwindigkeit gegenüber denen des Wellenbrechens zu vernachlässigen sind [Donelan und Pierson, 1987]. Der zweite Faktor in (3.18) nimmt somit eine einfache Form an:

$$\frac{S_{nl}^0 - S_{br}^0}{S_{nl}^s - S_{br}^s} \approx A(\varphi, n_0, n_s) \cdot k^{\frac{n_0 - n_s}{2}}, \quad (5.3)$$

mit

$$A(\varphi, n_0, n_s) \propto \frac{\alpha_0}{\alpha_s} \cdot m^{-n_s - 1} \cdot u_*^{n_0 - n_s} \sqrt{\frac{|\cos\varphi|}{g}}^{n_0 - n_s}.$$

Dabei wurde vorausgesetzt, daß die Funktion  $A$  neben den Exponenten bei filmfreier und filmbedeckter Wasseroberfläche,  $n_0$  resp.  $n_s$ , nur vom Azimutwinkel  $\varphi$  zwischen Blickrichtung des Radars und Wellenlaufrichtung abhängt. Das Verhältnis der Schubspannungsgeschwindigkeiten,  $m = u_*^{(s)}/u_*^{(0)}$ , ist in den hier betrachteten Fällen 0.7, 0.8 und 0.9. Gleichung (5.3) ermöglicht es nun, Abschätzungen der gemessenen Dämpfungskurven in Abhängigkeit von der Dämpfungscharakteristik und der Windgeschwindigkeit vorzunehmen:

- Bei niedrigen Windgeschwindigkeiten dominiert, wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, der erste Faktor in (3.18), ist also das Verhältnis von Windeintrag zu viskoser Dissipation von Bedeutung. Da ab mittleren Wellenzahlen ( $k \approx 100$  rad/m) wegen der größeren viskosen Dissipation ein Energiedefizit herrscht, muß ein nichtlinearer Energietransfer von langen zu kurzen Wellen stattfinden. Die gemessenen Dämpfungskurven steigen ab diesen Wellenzahlen drastisch an (Abbildung 5.3).
- Bei mittleren Windgeschwindigkeiten wächst der zweite Faktor in (3.18) an. Es ist nicht anzunehmen, daß die Vereinfachung (5.3) bereits zulässig ist, daß also der Quellterm für Wellenbrechen im gesamten betrachteten Wellenzahlbereich größer ist als derjenige der nichtlinearen Wellenwechselwirkung. Sobald aber bei filmfreier Wasseroberfläche das Wellenbrechen stärker wird, kann ein Übergang zur Vereinfachung (5.3) stattfinden. Grund hierfür ist einerseits die Tatsache, daß die nichtlineare Wellenwechselwirkung im Bereich hoher Wellenzahlen immer noch gering ist (der Energietransfer erfolgt ja von niedrigen Wellenzahlen aus

„in Richtung“ der großen Wellenzahlen, und zwar über den Bereich starker viskoser Dämpfung hinweg!), und andererseits, daß mit dem Eintreten des Wellenbrechens außerhalb der Oberflächenfilme auch mit einem – wenn auch nicht so starken – Einsetzen innerhalb der Filme gerechnet werden muß. In der Darstellung der Meßwerte, die bei mittlerer Windgeschwindigkeit über OLA gewonnen wurden (Abbildung 5.2), ist zu erkennen, daß die Dämpfungskurve bei der für OLA typischen Grenzwellenzahl ( $k \approx 80 \text{ rad/m}$ ) einen Knick hat: Der starke (und offensichtlich von der Windgeschwindigkeit unabhängige) Anstieg unterhalb dieser Grenze wird abgelöst durch einen linearen Anstieg bei mittleren und großen Wellenzahlen.

- Bei hohen Windgeschwindigkeiten dominieren die windinduzierten Effekte, d.h. der Energieeintrag durch den Wind einerseits und die Dissipation durch Wellenbrechen andererseits (man beachte die Abhängigkeit des Wellenbrechens von der Schubspannungsgeschwindigkeit in (5.3)). Gewinnen die Quellfaktoren für den Windeintrag und das Wellenbrechen an Bedeutung, so ist zu erwarten, daß die Dämpfungskurve im gesamten Bereich (bei doppelt logarithmischer Darstellung) linear ansteigt, wobei die Steigung abhängig ist von der Reduktion des Wellenbrechens durch den Oberflächenfilm: Bei starker Reduktion ist nach (5.3) wegen des größeren Unterschiedes der beiden Exponenten  $n_0$  und  $n_s$  ein steilerer Anstieg der Dämpfungskurve zu erwarten, bei schwacher Reduktion dementsprechend ein schwacher. Im zweiten Fall dominiert das Verhältnis zwischen Windeintrag und viskoser Dissipation (also der erste Faktor in (3.18)), so daß sich die spezifischen Dämpfungseigenschaften der Filmsubstanz in einem Abflachen der Dämpfungskurve auswirken können („können“ deshalb, da dafür der Unterschied zwischen den beiden Quellfaktoren nur gering sein darf – bei großen Unterschieden liefert der erste Faktor in (3.18) wegen der Dominanz des Windeintrages nur einen konstanten Beitrag).

Durch diese Überlegungen können offensichtlich sämtliche während beider Missionen mit dem HELISCAT gewonnenen Meßdaten interpretiert werden. Für den Fall hoher Windgeschwindigkeit ist zudem auch ein quantitativer Vergleich der Meßergebnisse mit theoretischen Kurven möglich, die sich aus Simulationen unter Verwendung von (5.3) ergeben. Um diese Simulationen zu ermöglichen, wurden folgende vereinfachende Annahmen gemacht:

Der Parameterisierung von *Donelan und Pierson* [1987] folgend, wurde das Verhältnis  $\alpha_0/\alpha_s$  als Exponentialfunktion mit Exponenten  $n_0-n_s$ , allerdings mit konstanter Basis 2, angenommen (es ist sicherlich zulässig, von einer Reduktion dieses Parameters durch den Oberflächenfilm auszugehen). Der Exponent  $n_0$  wurde in Analogie zu dem von *Phillips* [1988] vorgeschlagenen Ausdruck (3.8) konstant gleich 3 gesetzt (was sich in direkter Weise nur auf das Verhältnis der Schubspannungsgeschwindigkeiten auswirkt, vgl. (5.4)). Die Schubspannungsgeschwindigkeit über filmfreier Wasseroberfläche wurde als 3.5% der Windgeschwindigkeit (hier also 42 cm/s) angenommen und der Azimutwinkel  $\varphi$  als  $0^\circ$  (ohnehin wird die Abhängigkeit des Wellenspektrums vom Kosinus des Azimutwinkels gewöhnlich durch eine Parameterisierung abgeschwächt [z.B. *Donelan und Pierson*, 1987]). Für die Quellfaktoren des Windeintrages und der

viskosen Dissipation wurden wieder die von *Plant* [1982] resp. von *Hühnerfuss* [1986] vorgeschlagenen Ausdrücke eingesetzt (siehe (3.13) und (3.16)), so daß sich das Verhältnis der Radar-Rückstreuquerschnitte über filmfreier und filmbedeckter Wasseroberfläche,  $\sigma^{(0)}/\sigma^{(s)}$ , nach (3.18) und (5.3) auf die folgende Form reduziert:

$$\frac{\sigma^{(0)}(k)}{\sigma^{(s)}(k)} \equiv \frac{\Psi_0(k)}{\Psi_s(k)} \approx \frac{\beta_s - 2\Delta_s c_g}{\beta_0 - 2\Delta_0 c_g} \cdot m^{\Delta n - 4} \left( 2u_* \cdot \sqrt{\frac{k}{g}} \right)^{\Delta n}. \quad (5.4)$$

Durch Variation der Reduktionen einerseits der Schubspannungsgeschwindigkeit und andererseits der Intensität des Wellenbrechens (also der Größen  $m$  und  $\Delta n = n_0 - n_s$ , siehe (5.3)) war es möglich eine Simulation der Dämpfungskurven für die unterschiedlichen Filmabschnitte vorzunehmen. Bei der Wahl dieser Parameter sollte berücksichtigt werden, daß beim Übergang von stark (über mäßig) zu schwach dämpfenden Filmabschnitten der Faktor  $m$  (möglichst von 0.7 über 0.8 zu 0.9) ansteigen und der Ausdruck für  $\Delta n$  kleiner werden sollte.

In Abbildung 5.17 bis Abbildung 5.21 sind nochmals die am 06. Oktober 1994 bei hoher Windgeschwindigkeit über den unterschiedlichen Oberflächenfilmen gewonnenen Dämpfungskurven dargestellt, es handelt sich also um dieselben Datensätze, die bereits in Abbildung 5.10 bis Abbildung 5.14 gezeigt wurden. In diesem Fall sind aber die theoretischen Kurven, also die Ergebnisse der Simulationen, hinzugefügt worden, wobei jeweils diejenige Kombination der Parameter  $m$  und  $\Delta n$  gewählt wurde, die zu

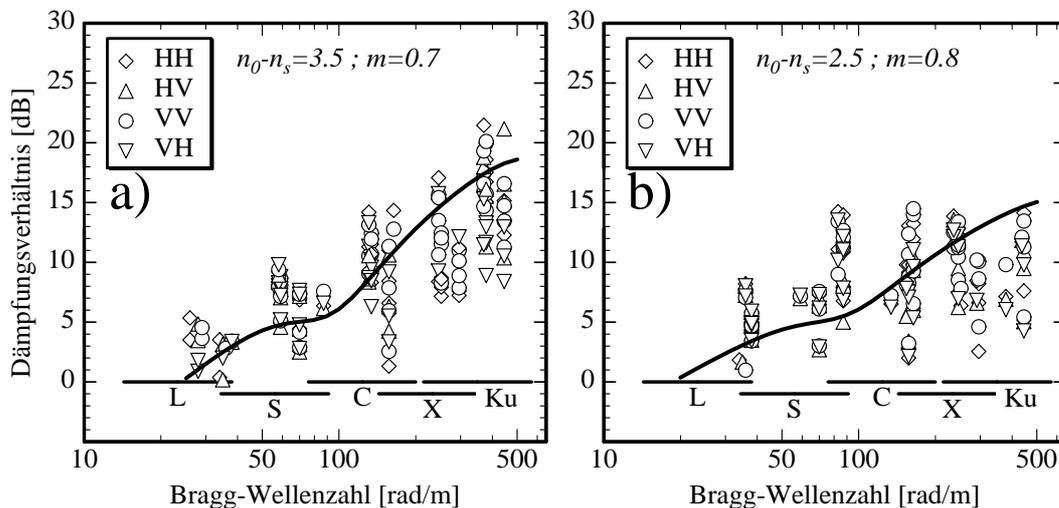


Abbildung 5.17: Gleicher Datensatz wie in Abbildung 5.10 (OLA) mit zugefügten theoretischen Kurven (nach (5.4)). Die Werte für die Simulationsparameter  $m$  (Reduktion der Schubspannungsgeschwindigkeit) und  $\Delta n = n_0 - n_s$  (Differenz der Exponenten für die Quellterme des Wellenbrechens) sind jeweils oben angeführt. Die Quellfaktoren für viskose Dissipation und Windeintrag wurden nach (3.12) und (3.13) mit den Werten aus Tabelle 3.1 sowie nach (3.16) berechnet.

einer möglichst guten Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Kurven führt.

Die Simulationen für OLA und OLME (Abbildung 5.17 resp. Abbildung 5.18) zeigen eine gute bis sehr gute Übereinstimmung mit den Meßwerten; einzig die mäßig dämpfenden Abschnitte von OLA können wegen der relativ hohen Dämpfungswerte bei ca. 90 rad/m nur schlecht simuliert werden. Ursache könnte wieder die Unterwirbelung der Substanz durch die *MS Scharhörn* sein, so daß Bereiche niedrigerer Dämpfung andere Ursachen haben als bei den übrigen Oberflächenfilmen.

Die Dämpfungskurven von OLME werden hingegen sehr gut durch die theoretischen Kurven nachgebildet, vor allem auch das Abflachen bei mittleren Wellenzahlen.

Abbildung 5.19 zeigt denselben Vergleich zwischen theoretischen Kurven und den über purem TOLG gewonnenen Meßwerten: In allen drei Fällen ist eine sehr gute Simulation der gemessenen Dämpfungskurven durch Wahl geeigneter Parameter möglich. Sowohl der leichte Knick bei stark dämpfenden Filmbereichen als auch das Abflachen bei den übrigen Filmbereichen werden durch die Simulation nachgebildet. Es zeigt sich, daß die Annahme, die Grenzwellenzahl, bei der das Abflachen der gemessenen Dämpfungskurve einsetzt, sei vom Maximum der Marangoni-Dämpfungskurve abhängig, offensichtlich richtig ist, denn das Abflachen der theoretischen Kurven wird durch eben dieses Maximum verursacht.

In Abbildung 5.20 sind die entsprechenden Vergleiche für in *n*-Hexan gelöstes TOLG dargestellt. Auch hier findet sich (bei geringfügiger Änderung der Simulationsparameter gegenüber den Werten für pures TOLG) eine gute Übereinstimmung zwischen Meßwerten und simulierten Kurven. Vor allem der „wellige“ Verlauf der gemessenen Dämpfungskurven kann exakt simuliert und somit als von den spezifischen Dämpfungseigenschaften der oberflächenaktiven Substanz abhängig gezeigt werden.

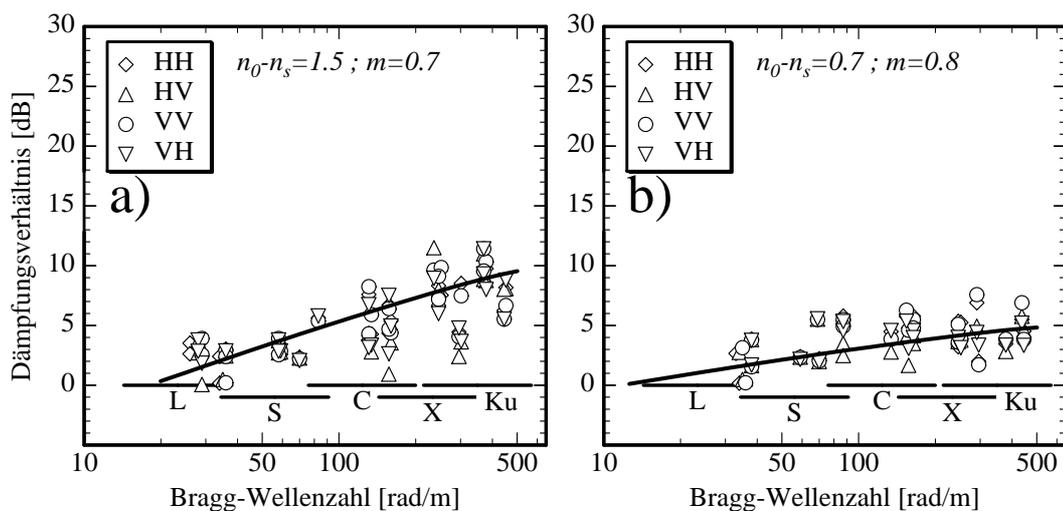


Abbildung 5.18: Wie Abbildung 5.17, nur für OLME (vgl. auch Abbildung 5.11).

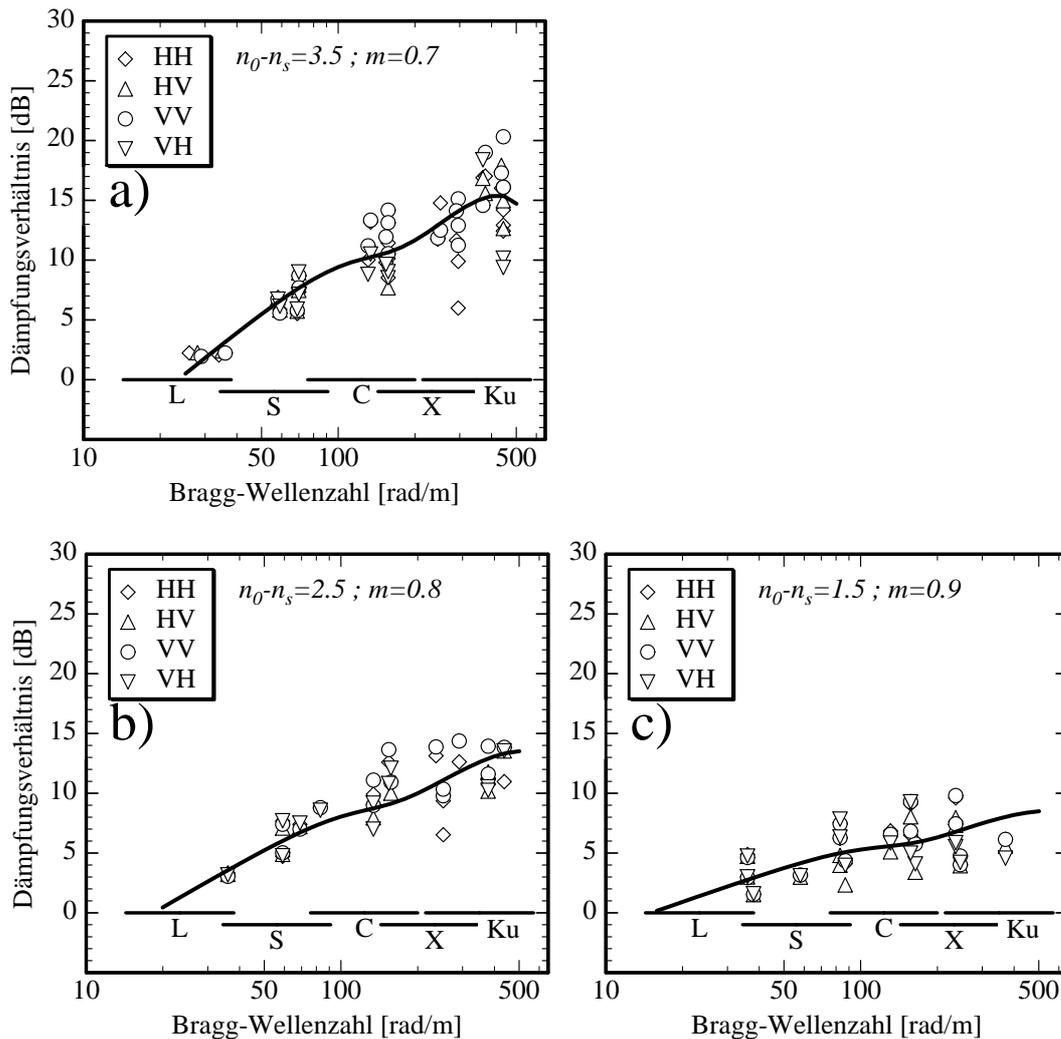


Abbildung 5.19: Wie Abbildung 5.17, nur für pures TOLG (vgl. auch Abbildung 5.12).

Die simulierten Kurven zeigen, bei hoher Reduktion der Schubspannungsgeschwindigkeit ( $m = 0.7$ ), einen leichten Rückgang ab ca. 500 rad/m (Abbildung 5.19 und Abbildung 5.20), der durch die Annäherung der beiden Quellfaktoren für Windeintrag und viskose Dissipation bedingt wird (siehe Abbildung 5.15). Da letztere bei großen Wellenzahlen ( $k > 500$  rad/m), unabhängig von der dämpfenden Substanz (und auch bei filmfreier Wasseroberfläche), größer wird als der Windeintrag, kann die Näherung (5.4) nur im betrachteten Wellenzahlbereich gültig sein.

Schließlich werden in Abbildung 5.21 auch die über dem Schweröl (*Ifo 180*) gewonnenen Meßwerte mit den Simulationsergebnissen verglichen. Auch hier zeigt sich, daß die theoretischen sehr gut mit den gemessenen Werten übereinstimmen: Bei allen Filmbereichen liefert auch die Simulation einen (in doppelt logarithmischer Darstellung) linearen Anstieg und zeigt nicht die für die biogenen Oberflächenfilme typische

Welligkeit der Meßkurven. Im übrigen ist die sehr gute Übereinstimmung auch ein Indiz für die Richtigkeit der angenommenen viskosen Dämpfung, speziell des Wertes für die Viskosität: Würde dieser Wert wesentlich vergrößert, so würden sich die Kurven der Quellfaktoren in Abbildung 5.16 schneiden, so daß – ab dieser Grenzwellenzahl – wieder mit einem überproportionalen Anstieg der Dämpfungskurve zu rechnen wäre. Ein derartiges Dämpfungsverhalten wäre demnach, auch bei hohen Windgeschwindigkeiten, bei sehr dicken Mineralölfilmen und einer daraus resultierenden großen Viskosität  $\eta$  zu erwarten (mit Rücksicht auf die Umwelt sollte diese Hypothese allerdings nicht experimentell überprüft werden).

Die vorgestellten Simulationsergebnisse zeigen, daß mit den beschriebenen Werten für die Reduktion des Windeintrages und des Wellenbrechens eine sehr gute Übereinstimmung mit den Meßergebnissen erreicht wird. Vor allem das Abflachen der Dämpfungskurven der biogenen Oberflächenfilme im Bereich mittlerer Wellenzahlen

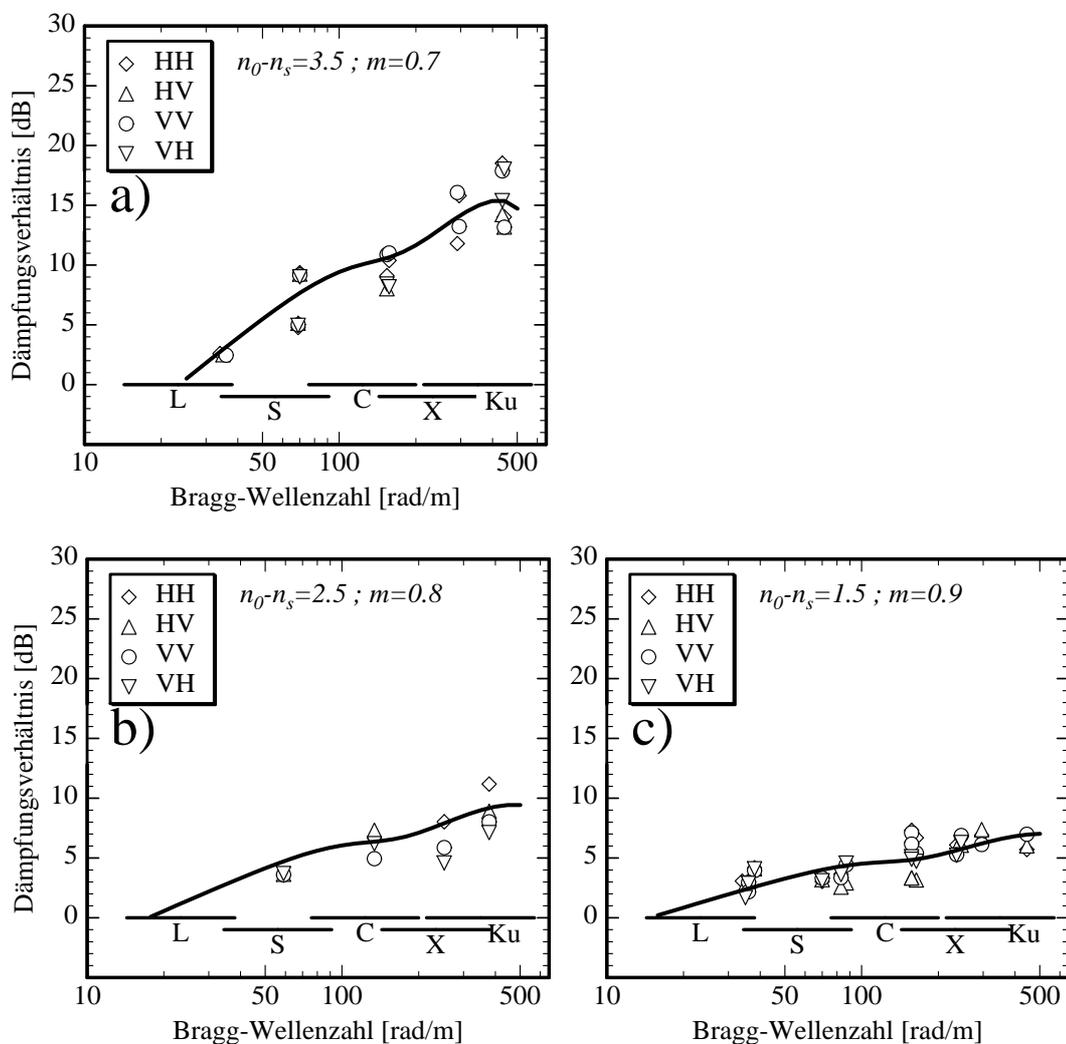


Abbildung 5.20: Wie Abbildung 5.17, nur für in  $n$ -Hexan gelöstes TOLG (vgl. auch Abbildung 5.13).

(und auf der anderen Seite das Fehlen eben dieses Abflachens beim Schweröl) wird durch die Verwendung der Näherung (5.4) offensichtlich richtig beschrieben. Trotzdem sei an dieser Stelle ausdrücklich betont, daß es sich bei der betrachteten Auswirkung auf das Wellenbrechen nur um den Vorschlag für eine – quantitative – Erfassung der gemessenen Effekte handelt. Wegen des Fehlens wichtiger Daten (beispielsweise der Schubspannungsgeschwindigkeit) wird nicht der Anspruch erhoben, daß die vorgestellten Annahmen und Vereinfachungen grundsätzlich gültig sind. Die Übereinstimmung der Meßwerte mit den theoretischen Kurven ist aber ein deutliches Indiz dafür, daß ein derartiger Lösungsansatz zu richtigen Resultaten führt.

Die Annahme, daß auch beim ersten Meßflug am 18. April 1994 vor Sylt (und im Prinzip auch beim zweiten Meßflug vor Helgoland) das Wellenbrechen eine größere Rolle spielte, als man beim Vergleich mit den Wetterbedingungen am 06. Oktober 1994

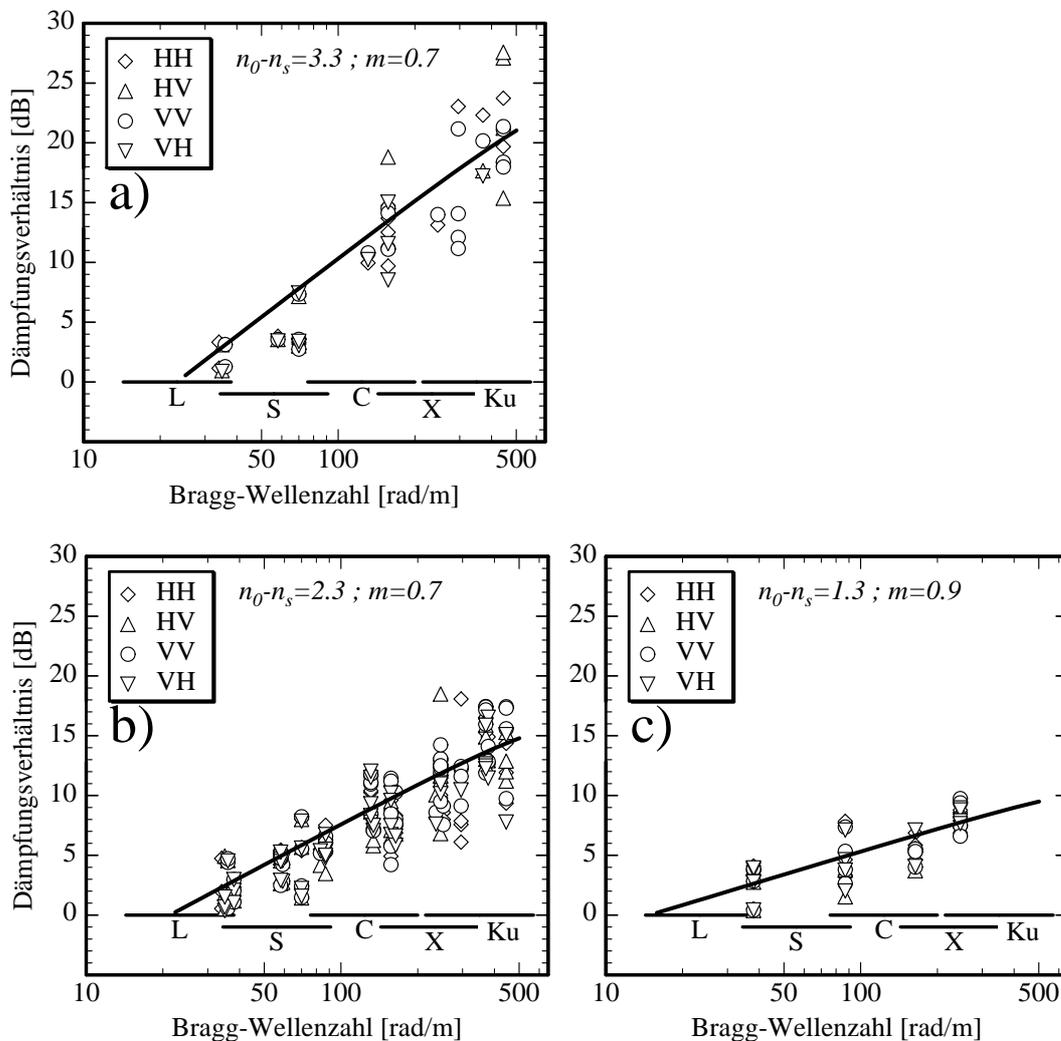


Abbildung 5.21: Wie Abbildung 5.17, nur für Schweröl (Ifo 180, vgl. auch Abbildung 5.14).

annehmen könnte, kann mit den vorherrschenden Randbedingungen begründet werden: Am Vortag der Meßflüge im April hatte die Windgeschwindigkeit Spitzenwerte von weit über 10 m/s erreicht, so daß auch nach Abflauen des Windes noch eine hohe signifikante Wellenhöhe gemessen wurde (vgl. Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2). Es ist anzunehmen, daß es unter diesen Umständen, vor allem wenn Wellenlaufriichtung und Gezeitenstromriichtung – wie im Fall der Messungen am 18. April 1994 vor Sylt – antiparallel verlaufen, zu einem hinreichenden Aufsteilen der langen Dünungswellen kommt, so daß der relative Anteil des Wellenbrechens vergrößert wird. Da jedoch keine sinnvolle Annahme über den Anteil dieses Wellenbrechens einerseits und über die Frage des Vorzeichens der beiden Faktoren in (3.18) andererseits gemacht werden kann, wurde von einer Simulation dieser Daten abgesehen.

Schließlich soll noch auf die Tatsache eingegangen werden, daß von *Ermakov et al.* [1986] sehr wohl ein deutliches Maximum in der Dämpfungskurve gemessen wurde. Die Messungen fanden, wie schon erwähnt, bei einer Windgeschwindigkeit von nur 1 m/s statt. Bei derart niedrigen Windverhältnissen ist auch bei filmfreier Wasseroberfläche der Energieeintrag durch den Wind geringer als die viskose Dissipation, so daß nicht mit rein winderzeugten Wellen zu rechnen ist (auch im Windwellenkanal wurde beispielsweise von *Gade* [1992] gemessen, daß erst bei höheren Windgeschwindigkeiten eine effektive Erzeugung von Wasserwellen stattfindet). Demnach ist bei diesen Messungen der Unterschied zwischen der viskosen Dissipation über filmfreier und filmbedeckter Wasseroberfläche gemessen worden, also die Funktion  $y(k)$  (vgl. (3.13)), was das Auftreten eines Maximums erklärt.

### 5.5 Zusammenfassung der HELISCAT-Ergebnisse

Während der beiden SIR-C/X-SAR-Missionen wurden mehrere Meßflüge mit dem Mehrfrequenz-Multipolarisations-Scatterometer HELISCAT der Universität Hamburg über unterschiedlichen Oberflächenfilmen und bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten durchgeführt, um die Auswirkungen des Dämpfungsverhaltens dieser Oberflächenfilme auf die rückgestreute Radarleistung zu untersuchen. Bei sämtlichen Meßflügen wurde die Substanz OLA (Oleylalkohol) auf der Meeresoberfläche ausgebracht, um so einerseits die Änderung des Dämpfungsverhaltens mit der Windgeschwindigkeit zu untersuchen und andererseits Referenzdaten für die übrigen Meßwerte zu erhalten.

Sämtliche mit dem HELISCAT gemessenen Dämpfungsverhältnisse zeigen weder eine Abhängigkeit von der Polarisation des Radars noch von seiner Blickriichtung relativ zur Windriichtung.

Der erste Meßflug wurde am 18. April 1994 vor Sylt bei mittlerer Windgeschwindigkeit (5 m/s) über einem OLA-Film durchgeführt. Wichtigstes Ergebnis der Messungen ist die Änderung des Dämpfungsverhaltens der oberflächenaktiven Substanz in den ersten Minuten nach dem Ausbringen, was mit Relaxationseffekten und einer sich verändernden Morphologie des Oberflächenfilms erklärt werden kann. Die gemessenen Dämpfungskurven zeigen eine geringe Streuung und einen monotonen Anstieg mit der (Bragg-) Wellenzahl.

Der zweite Meßflug wurde ebenfalls am 18. April 1994 über mehreren künstlichen Oberflächenfilmen bei Helgoland bei etwas niedrigerer Windgeschwindigkeit (4 m/s) durchgeführt. Diese Filme bestanden aus OLA und PME (Palmitinsäuremethylester) und waren pur (nur OLA) und in gelöster Form (OLA und PME, jeweils in Ethanol und *n*-Hexan) auf die Wasseroberfläche ausgebracht worden. Ergebnis dieser Messungen ist, daß das Ausbringen in gelöster Form auf PME einen weitaus größeren Einfluß hat, da die Wechselwirkung der Filmmoleküle untereinander in diesem Fall durch das Lösungsmittel wesentlich mehr beeinflusst wird als bei OLA. Die gemessenen Dämpfungskurven der einzelnen Substanzen unterscheiden sich untereinander (d.h. bei unterschiedlichen Lösungsmitteln) kaum, und es sind auch nur geringfügige Unterschiede zwischen den OLA- und PME-Filmen festzustellen.

Wichtigstes Merkmal dieser Meßergebnisse ist jedoch der sprunghafte Anstieg der gemessenen Dämpfungsverhältnisse bei mittleren Wellenzahlen (Grenzwellenzahlen, etwa 80 rad/m). Dieser Effekt wird mit dem sich ändernden Verhältnis der Quellfaktoren (also der linearen Faktoren der Quellterme aus der Strahlungsbilanz-Gleichung) begründet: Bei Wellenzahlen, die größer sind als die Grenzwellenzahl, überwiegt bei filmbedeckter Wasseroberfläche die viskose Dissipation gegenüber dem Windeintrag. Um die Forderung nach ausgeglichener Strahlungsbilanz einerseits und einem positiven Verhältnis der spektralen Energiedichten andererseits zu genügen, muß ein nichtlinearer Energietransfer von langen Wellen zu kurzen stattfinden, der allerdings das starke Energiedefizit bei großen Wellenzahlen nicht (zumindest nicht sofort) ausgleichen kann. Auf diese Weise kann erklärt werden, daß bei niedrigen Windgeschwindigkeiten extrem hohe Dämpfungsverhältnisse mit dem HELISCAT gemessen wurden.

Am 18. April 1994 wurden außerdem ausgedehnte natürliche Oberflächenfilme überflogen, die sich südwestlich von Amrum bei niedriger Windgeschwindigkeit (3.5–4 m/s) auf der Meeresoberfläche befanden. Bei deren Meßergebnissen ist eine Unterteilung in stark, mäßig und schwach dämpfende Filmbereiche sinnvoll. Sämtliche dieser Filmbereiche zeigen relativ hohe Dämpfungsverhältnisse, wobei vor allem die hohe Dämpfung bei niedrigen Wellenzahlen auffällt. Ein weiterer Effekt, der ausschließlich bei dieser Art von Oberflächenfilmen gemessen wurde, ist die Abnahme der gemessenen Dämpfungsverhältnisse bei großen Wellenzahlen, was vor allem bei den mäßig und schwach dämpfenden Filmbereichen auffällt. Als Erklärung für beide Effekte wird, da das spezifische Dämpfungsverhalten der natürlichen Oberflächenfilme nicht exakt bekannt ist, eine großflächige Filmbedeckung der Meeresoberfläche in diesem Seebereich angenommen, so daß es möglich ist, daß bei diesen Messungen weniger der Unterschied in der Radar-Rückstreuung zwischen filmfreier und filmbedeckter Wasseroberfläche, sondern vielmehr derjenige zwischen mehr und weniger stark filmbedeckter Wasseroberfläche gemessen wurde. Eine großflächige Filmbedeckung der Wasseroberfläche führt auch zu einer Dämpfung längerer Wellen, da diese über nicht-lineare Wellenwechselwirkung Energie an die kürzeren Wellen verlieren.

Am 06. Oktober 1994 wurden im Seegebiet westlich von Sylt bei hoher Windgeschwindigkeit (12 m/s) mehrere Oberflächenfilme überflogen, die einerseits aus biogenen Substanzen (neben purem OLA auch OLME (Ölsäuremethylester) und TOLG

(Triolein), jeweils pur und gelöst) und andererseits aus Mineralöl (Dieselöl und Schweröl) bestanden. Da die Messungen mit dem HELISCAT erst zu einem relativ späten Zeitpunkt stattfanden, konnten Meßdaten nur über den reinen Oberflächenfilm aus OLA, OLME, TOLG und Schweröl sowie über dem in *n*-Hexan gelösten TOLG gewonnen werden. Für sämtliche dieser Oberflächenfilme ist eine Unterteilung in stark und schwach dämpfende Filmabschnitte, mit Ausnahme der OLA- und OLME-Filme zusätzlich auch in mäßig dämpfende Abschnitte, möglich. Diese Unterteilung bezieht sich auf die unterschiedliche Reduktion des mittleren Radar-Rückstreuquerschnitts und nicht auf eine Änderung des spezifischen Dämpfungsverhaltens der oberflächenaktiven Substanz. Nur in den Bereichen starker Dämpfung ist davon auszugehen, daß keine kleinen Löcher im Oberflächenfilm (geringerer Ausdehnung als der Beleuchtungsfleck des HELISCAT) zu einer Reduktion der gemessenen Dämpfungsverhältnisse führen.

Die stark dämpfenden Abschnitte der biogenen Oberflächenfilme zeigen jeweils einen monotonen Anstieg des Dämpfungsverhaltens mit der (Bragg-) Wellenzahl, wobei dieser Anstieg im Bereich mittlerer Wellenzahlen etwas schwächer ausfällt. Beim Übergang zu mäßig dämpfenden Filmbereichen setzt im Bereich mittlerer Wellenzahlen ein Abflachen der gemessenen Dämpfungskurven ein, das beim Übergang zu schwach dämpfenden Filmbereichen stärker ausgeprägt ist und bei niedrigeren Dämpfungsverhältnissen einsetzt. Ein Maximum in den gemessenen Dämpfungskurven wurde in keinem Fall gemessen. Dieses unterschiedliche Dämpfungsverhalten kann qualitativ mit einer Änderung des (mittleren) Energieeintrages durch den Wind begründet werden, der sich bei den unterschiedlich stark dämpfenden Filmbereichen ändert. Diese Betrachtung stellt demnach die konsequente Fortsetzung der Diskussion der übrigen (am 18. April 1994 bei niedriger bis mittlerer Windgeschwindigkeit gewonnenen) Meßergebnisse dar.

Das Schweröl zeigt für alle drei Filmbereiche einen streng monotonen Anstieg der gemessenen Dämpfungskurven mit der Wellenzahl, also keinerlei Abflachen bei mittleren Wellenzahlen für mäßig und schwach dämpfende Filmabschnitte. Auch dieser Effekt kann mit Hilfe der beiden Quellfaktoren für den Windeintrag und die viskose Dissipation erklärt werden.

Wie schon beim OLA vor Helgoland beobachtet, zeigt auch TOLG keine nennenswerten Unterschiede in den Meßdaten des gelösten und des reinen Films. Dieser Effekt wird wiederum mit der ohnehin geringeren Wechselwirkung der Filmmoleküle untereinander erklärt, so daß das Ausbringen in gelöster Form bei diesen Substanzen keine wesentliche Änderung bewirkt (im Gegensatz zu PME).

Da bei der hohen Windgeschwindigkeit der Energieeintrag durch den Wind im gesamten betrachteten Wellenzahlbereich größer ist als die viskose Dissipation, können auch die Effekte, die durch die Reduktion des Wellenbrechens bedingt sind, berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck wurde eine Näherung für die mit dem HELISCAT gemessenen Dämpfungsverhältnisse entwickelt, mit deren Hilfe sämtliche bei hoher Windgeschwindigkeit gemessenen Dämpfungskurven in sehr guter Übereinstimmung simuliert werden konnten. Dabei werden auch die qualitativen Unterschiede, die zwischen den biogenen Filmen einerseits und dem Mineralöl andererseits

gemessen wurden, also das Abflachen der Dämpfungskurven einerseits und der streng monotone Anstieg andererseits, sehr gut nachgebildet. Diese Übereinstimmung zwischen Simulation und Meßwerten kann als Indiz für die Richtigkeit der bei der Herleitung dieser Näherung gemachten (qualitativen) Annahmen gewertet werden.

Für niedrige Windgeschwindigkeiten und Substanzen mit relativ hohen Dämpfungseigenschaften ist also zu erwarten, daß im mittleren Wellenzahlbereich ein sprunghafter Anstieg der gemessenen Dämpfungsverhältnisse auftritt, da in diesem Fall das Verhältnis von Windeintrag zu viskoser Dissipation den Verlauf der Dämpfungskurve bestimmt. Bei mittleren Windgeschwindigkeiten soll ab mittleren Wellenzahlen der Übergang zu einem linearen Anstieg (in doppelt logarithmischer Darstellung!) stattfinden, da nun die Reduktion des Wellenbrechens an Bedeutung gewinnt. Bei hohen Windgeschwindigkeiten ist für die biogenen Oberflächenfilme bei stark dämpfenden Filmbereichen mit einem linearen Anstieg der Dämpfungskurve zu rechnen (eventuell mit einer leichten Delle bei mittleren Wellenzahlen), bei mäßig und schwach dämpfenden Filmbereichen dagegen mit einem Abflachen der Dämpfungskurven resp. mit konstanten Dämpfungswerten bei großen Wellenzahlen. Wegen des unterschiedlichen Dämpfungsmechanismus beim Schweröl (der kein resonanzartiges spezifisches Dämpfungsverhalten zur Folge hat) tritt hier ein Abflachen bei mäßig und schwach dämpfenden Filmbereichen nicht auf, sondern nur ein schwächerer (streng monotoner) Anstieg der Dämpfungskurve.

## 6 Analyse von SAR-Aufnahmen verschiedener Testgebiete

Die umfangreichen Ergebnisse, die mit dem HELISCAT über den verschiedenen Oberflächenfilmen erzielt wurden, haben gezeigt, daß nicht nur die unterschiedlichen physiko-chemischen Eigenschaften der Substanzen eine Rolle spielen, sondern daß bei der Betrachtung der gemessenen Dämpfungsverhältnisse auch Randbedingungen wie beispielsweise die Windgeschwindigkeit berücksichtigt werden müssen. Anlaß für beide Meßkampagnen waren nun die beiden SIR-C/X-SAR Missionen, während derer sowohl im April als auch im Oktober 1994 SAR-Aufnahmen der Deutschen Bucht bei unterschiedlichen Radarfrequenzen und -polarisationen gemacht wurden. In diesem Kapitel werden diese Aufnahmen nun, vor dem Hintergrund der im vorigen Kapitel vorgestellten Ergebnisse, ebenfalls auf das gemessene Dämpfungsverhalten der unterschiedlichen Oberflächenfilme hin untersucht, wobei wegen der geringeren Anzahl an Radarfrequenzen einerseits und der jeweils einmaligen Überfliegung (und daher Aufnahme – *single shot*) andererseits ein weitaus geringerer Meßdatensatz für die beiden Experimente zur Verfügung steht. Dieses Manko wurde aber teilweise ausgeglichen durch die Analyse einer Vielzahl anderer SAR-Aufnahmen, die über unterschiedlichen Seegebieten der Welt aufgenommen worden sind und die sowohl natürliche als auch Mineralölfilme zeigen (Schließlich stellt, wie bereits in der Einleitung erwähnt, die breite Überdeckung der Seegebiete durch ein weltraumgestütztes SAR einen immensen Vorteil dar).

Die SAR-Bilder im L- und C-Band wurden vom Jet Propulsion Laboratory (JPL) bereits deckungsgleich geliefert. Zusätzlich mußte noch das X-SAR-Bild überlagert (*registriert*) werden, was mit Hilfe fertig gelieferter Programmmodule geschah. Auf diese Weise standen nun (je nach Betriebsart, vgl. Tabelle 6.1) bis zu neun deckungsgleiche SAR-Bilder der unterschiedlichen Kanäle für die Auswertung zur Verfügung (Das HELISCAT dagegen liefert, da sämtliche Polarisationen für alle Frequenzbänder zur Verfügung stehen, zwanzig Kanäle). Die Berechnung der Dämpfungsverhältnisse erfolgte, indem in einem SAR-Bild (typischerweise das X-SAR-Bild, da hier im allgemeinen die deutlichsten Kontraste auftreten) eine gerade Schnittlinie durch den Oberflächenfilm definiert wurde (*Scan*). Die Breite dieser Schnittlinie ist im Prinzip beliebig, es zeigte sich allerdings, daß eine Breite von drei Pixeln (bei einer Pixelgröße von 12.5 m entspricht das 37.5 m) zu guten Ergebnissen führt, da dadurch ein geeigneter Kompromiß zwischen möglichst guter räumlicher Auflösung einerseits und möglichst großer Mittelung andererseits erzielt wurde. Grundsätzlich wurde davon abgesehen, über das gesamte filmbedeckte Gebiet zu mitteln, da Oberflächenfilme im allgemeinen als inhomogen anzunehmen sind (man vergleiche die HELISCAT-Ergebnisse des letzten Kapitels) und eine Mittelung über ein zu großes räumliches Gebiet daraufhin zu falschen (zumindest zu *verfälschten*) Ergebnissen führen kann.

Wenn es die Form des Oberflächenfilms zuließ, wurden nun mehrere Schnittlinien in unterschiedliche Richtungen definiert, so daß für jedes Radarband (und jede Polarisation) mehrere Dämpfungsverhältnisse ermittelt wurden. Da es sich allerdings – anders als beim HELISCAT – nur um einen einzigen Einfallswinkel handelt, konnten auf diese Weise die Dämpfungsverhältnisse nur für drei Bragg-Wellenzahlen ermittelt

werden. Auch in diesem Fall wird, wegen der besseren Übersichtlichkeit, auf die Darstellung der Fehlerbalken verzichtet. Die Größe der berechneten Fehler liegt, wie beim HELISCAT, bei etwa 3–5 dB.

<i>Mission / Datatake</i>	<i>Seegebiet</i>	<i>Position</i>	<i>Datum</i>	<i>Zeit [UTC]</i>	<i>Ortszeit</i>	<i>Filmart</i>	<i>Mode</i>
SRL-1 / 47.10	Atlantik	42° 49' N / 26° 12' W	12.04.94	07:21	05:21	Mineralöl	13x
SRL-1 / 47.10	Nordsee	56° 47' N / 7° 24' E	12.04.94	07:28	09:28	natürlich	13x
SRL-1 / 65.10	Ostpazifik / Mexiko	13° 39' N / 96° 12' W	13.04.94	09:51	04:51	natürlich	16x
SRL-1 / 112.20	Ostsee	55° 22' N / 14° 36' E	16.04.94	07:41	09:41	natürlich	9x
SRL-1 / 112.20	Ostsee	55° 02' N / 16° 36' E	16.04.94	07:42	09:42	Mineralöl	13x
SRL-1 / 123.12	Persischer Golf	28° 23' N / 49° 34' E	16.04.94	23:42	17.04.94 / 03:42	Mineralöl	11x
SRL-1 / 136.00	Straße von Malacca	5° 00' N / 100° 15' E	17.04.94	18:47	18.04.94 / 02:47	Mineralöl	16x
SRL-1 / 143.30	Nordsee	54° 54' N / 7° 50' E	18.04.94	05:26	07:26	1. Exp.: OLA	13x
SRL-2 / 96.20	Nordsee	54° 58' N / 7° 45' E	06.10.94	08:12	09:12	2. Exp.: verschied.	16x

Tabelle 6.1: Auflistung sämtlicher SIR-C/X-SAR-Aufnahmen, die in der vorliegenden Arbeit Verwendung fanden, sowie deren Positionen, Aufnahmezeiten und die Art der abgebildeten Oberflächenfilme. Die Bedeutungen der einzelnen Betriebsarten (Modes) stehen in Tabelle 4.3. Zeitangaben einerseits in Weltzeit (UTC) und in lokaler Zeit.

Nach einer Betrachtung derjenigen Meßergebnisse, die aus den SAR-Aufnahmen beider Experimente gewonnen wurden, erfolgt die Vorstellung einer Auswahl von Ergebnissen, die die SAR-Aufnahmen einerseits von natürlichen Oberflächenfilmen in Nord- und Ostsee sowie vor der mexikanischen Pazifikküste und andererseits von Mineralölfilmen in der Ostsee sowie im Persischen Golf und in der Straße von Malacca lieferten. Mit Hilfe dieses breiten Datensatzes soll schließlich eine Abschätzung stattfinden, inwieweit die unterschiedlichen Dämpfungscharakteristika durch ein derarti-

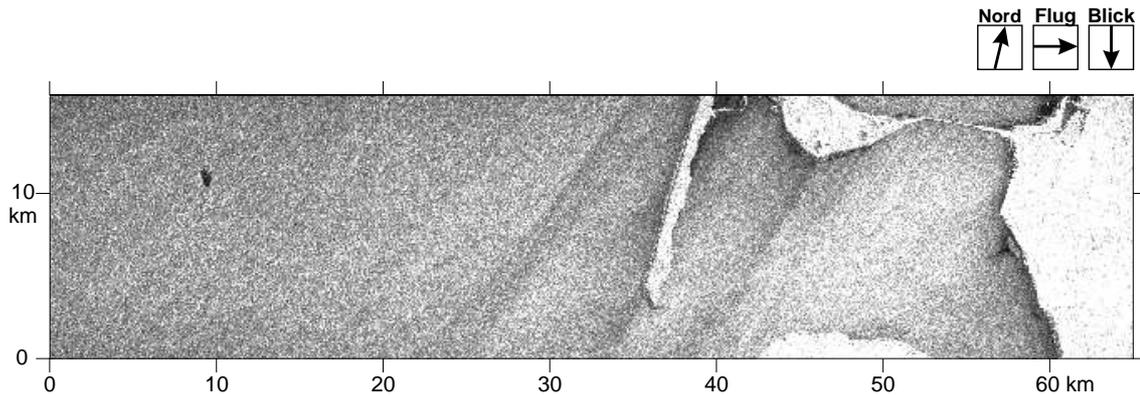


Abbildung 6.1: X-SAR-Aufnahme des ersten Oberflächenfilm-Experimentes am 18. April 1994 in der Deutschen Bucht. Am linken Rand ist der OLA-Film zu erkennen, am rechten Rand Sylt, Föhr und Teile des Festlandes. (© DLR, SRL-1, DT 143.30)

ges System erfaßt werden können. Eine Zusammenfassung der Daten der einzelnen SAR-Aufnahmen findet sich in Tabelle 6.1.

### 6.1 Erstes Oberflächenfilm-Experiment / April 1994

Der Überflug der Raumfähre *Endeavour* über die Deutsche Bucht am 18. April 1994 erfolgte um 07:26 MESZ, also etwa 20 Minuten nachdem der OLA-Film komplett ausgebracht worden war. Die Ergebnisse, die mit dem HELISCAT gewonnen wurden, zeigen, daß der Oberflächenfilm zu diesem Zeitpunkt fertig gespreitet war und demnach sein spezifisches Dämpfungsverhalten zeigte (vgl. Abschnitt 5.1.1). In Abbildung 6.1 ist die X-SAR-Aufnahme des Testgebietes dargestellt. Die Dimensionen der abgebildeten Aufnahme sind  $65 \text{ km} \times 16 \text{ km}$ , im rechten Bildteil sind die Südhälfte der Insel Sylt, der Hindenburgdamm mit dem angrenzenden Festland sowie die Nordspitze der Insel Föhr zu sehen. Im linken Bildteil ist in der oberen Bildmitte die Radarsignatur des OLA-Films als dunkler Fleck zu sehen (etwa 10 km vom linken Rand entfernt).

Die SAR-Aufnahmen wurden unter einem Einfallswinkel von  $35.6^\circ$  gemacht, die drei Bragg-Wellenzahlen für das L-, C- und X-Band sind demnach (vgl. (3.2))  $30.5 \text{ rad/m}$ ,  $129.2 \text{ rad/m}$  und  $234.1 \text{ rad/m}$  (Die Bragg-Wellenlängen sind demnach  $20.6 \text{ cm}$ ,  $4.9 \text{ cm}$  und  $2.7 \text{ cm}$ ). Da das X-Band am empfindlichsten auf Variationen des Windfeldes reagiert (nach Abschnitt 3.2.2 erfolgt der Energieeintrag durch den Wind vor allem bei großen Wellenzahlen), sind in diesem SAR-Bild diagonal laufende Streifen auf der Meeresoberfläche zu erkennen, die durch eben diese Variationen bzw. den Windschatten der Insel Sylt verursacht werden (Die – physikalische – Windrichtung war  $210^\circ$ , der Wind kam also aus  $30^\circ\text{N}$ !).

Abbildung 6.2 zeigt Ausschnittsvergrößerungen eines  $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$  großen Bildteils in allen drei Radarbandern, jeweils bei VV-Polarisation, um den direkten (optischen) Vergleich der Radarsignaturen zu ermöglichen. Die Graustufen wurden derart skaliert, daß die Helligkeit der filmfreien Wasseroberfläche in allen drei Fre-

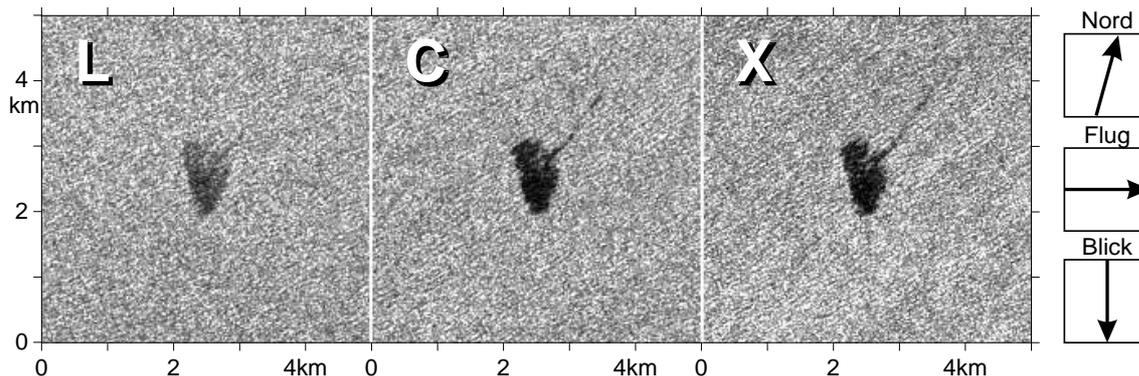


Abbildung 6.2: Vergrößerte Ausschnitte aus Abbildung 6.1, jedoch in allen drei Radarbändern, jeweils bei VV-Polarisation. Die jeweilige Größe der drei Ausschnitte ist  $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ , die mittlere Helligkeit der filmfreien Meeresoberfläche ist in den drei Ausschnitten gleich. Deutlich zu erkennen sind die unterschiedlichen Kontraste, die der OLA-Film verursacht. (© JPL, DLR; SRL-1, DT 143.30)

quenzbändern gleich ist. Auf den ersten Blick ist schon zu erkennen, daß der Kontrast im L-Band am geringsten ist, während er im C- und X-Band etwa gleich zu sein scheint (Natürlich ist diese „optische Analyse“ der SAR-Bilder keineswegs repräsentativ, es wird sich allerdings herausstellen, daß dieser erste Eindruck durch die Ergebnisse der Bildanalysen bestätigt wird).

### 6.1.1 Ergebnisse der Auswertung der SAR-Aufnahmen

In Abbildung 6.3 ist auf der linken Seite das X-SAR-Bild mit einer eingetragenen Schnittlinie (von 25 m Breite) abgebildet, auf der rechten Seite die entsprechenden rückgestreuten Radarleistungen der drei VV-Polarisationen entlang dieser Linie. Die drei Kurven wurden derart voneinander abgesetzt, daß der Unterschied der mittleren Radarleistung über filmfreier Wasseroberfläche zweier benachbarter Kurven 10 dB beträgt, es handelt sich also nicht mehr um den normierten Radar-Rückstreuquerschnitt (*normalized radar cross section, NRCS*). Auch dieser Abbildung ist zu entnehmen, daß die Reduktion des Radar-Rückstreuquerschnittes im L-Band deutlich geringer ausfällt als in den anderen Radarbändern (was allerdings bei den gesamten bisher vorgestellten Ergebnissen auch nicht überrascht). Außerdem fällt auf, daß die Ränder des OLA-Films im C- und X-Band wesentlich schärfer hervortreten als im L-Band. Die Struktur innerhalb des Oberflächenfilmes ist in allen drei Kurven vergleichbar (man beachte das lokale Absinken des Radar-Rückstreuquerschnitts bei einer Distanz von etwa 1.25 km), was darauf hindeutet, daß die Radarleistung hier offensichtlich noch nicht den Rauschuntergrund erreicht hat.

In Abbildung 6.4 sind die Dämpfungsverhältnisse dargestellt, die aus mehreren derartigen Schnittlinien ermittelt wurden. Um einen Vergleich mit den HELISCAT-Ergebnissen, die über demselben Oberflächenfilm erzielt wurden, zu vereinfachen, sind diese Dämpfungsverhältnisse zusätzlich als Punkte eingetragen. Beim Vergleich der beiden Datensätze muß berücksichtigt werden, daß das SIR-C/X-SAR nur für drei

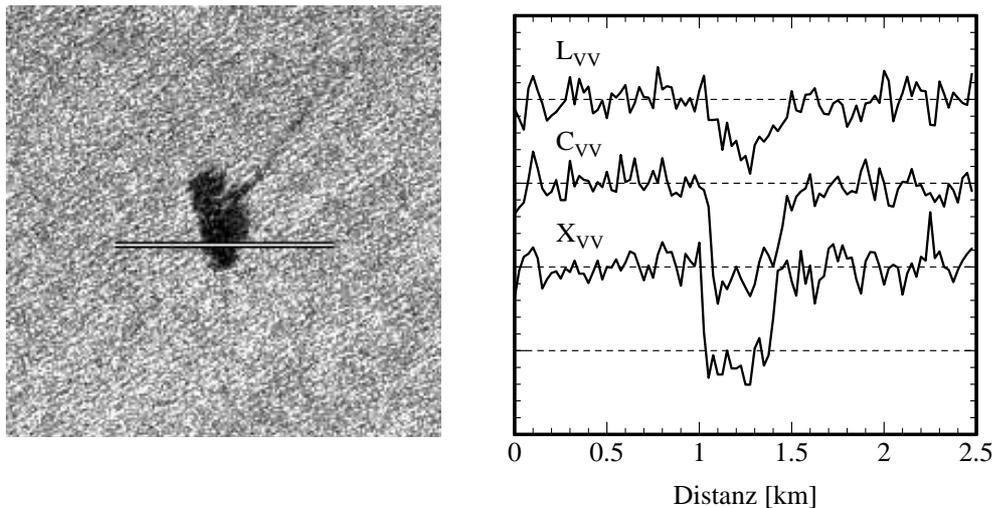


Abbildung 6.3: Darstellung einer Schnittlinie (Scan) durch ein SAR-Bild zur Ermittlung der Dämpfungsverhältnisse. Links: X-Band-SAR-Aufnahme des OLA-Films am 18. April 1994 vor Sylt mit eingezeichneter Schnittlinie, rechts: rückgestreute Radarleistung der drei VV-Polarisationen entlang dieser Linie; wegen der besseren Übersichtlichkeit sind die einzelnen Kurven gegeneinander versetzt; der Abstand der horizontalen Linien beträgt 10 dB.

Bragg-Wellenzahlen Dämpfungsverhältnisse liefern kann, was eine derart präzise Analyse des gemessenen Kurvenverlaufes erschwert, wenn nicht verhindert. Aber auch die wenigen Datenpunkte liefern einige interessante Ergebnisse:

- Die Streuung der Daten ist relativ gering. Eine signifikante Abhängigkeit der Dämpfungsverhältnisse von der Polarisation wurde auch in diesem Fall nicht festgestellt (diese Aussage kann sich freilich nur auf das L- und C-Band beziehen).
- Der monoton ansteigende Verlauf der gemessenen Dämpfungsverhältnisse mit der Bragg-Wellenzahl wird auch vom SIR-C/X-SAR gemessen, wobei er im Bereich großer Wellenzahlen (also im X-Band) abgeschwächt ist (einzelne Schnittlinien lieferten sogar einen leichten Rückgang der Dämpfungsverhältnisse im X-Band).
- Die Dämpfungsverhältnisse des L-Bandes zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den HELISCAT-Ergebnissen.
- Bei mittleren und großen Bragg-Wellenzahlen unterscheiden sich die Dämpfungsverhältnisse von denen, die mit dem HELISCAT gemessen wurden, wobei dieser Unterschied mit steigender Wellenzahl ebenfalls zunimmt (es handelt sich um etwa 4 dB im C-Band und etwa 8 dB im X-Band).

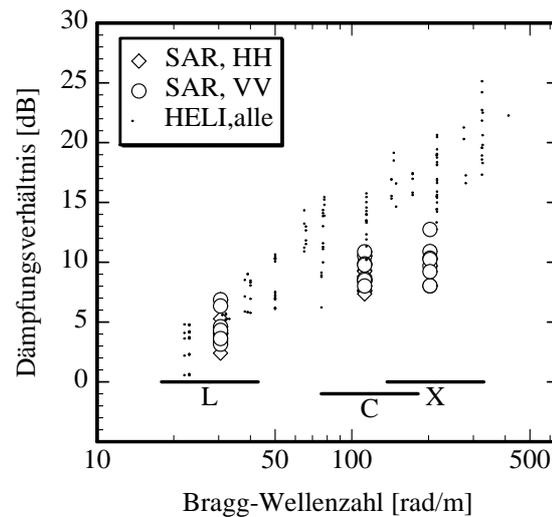


Abbildung 6.4: Dämpfungsverhältnisse des OLA-Films am 18. April 1994 vor Sylt, die aus Schnittlinien durch die SIR-C/X-SAR-Aufnahmen ermittelt wurden (siehe Text). Zum Vergleich sind sämtliche mit dem HELISCAT gemessenen Dämpfungsverhältnisse als Punkte eingetragen.

Beim Vergleich der beiden unterschiedlichen Datensätze muß im übrigen berücksichtigt werden, daß die Überflüge mit dem HELISCAT jeweils möglichst mittig über dem Oberflächenfilm erfolgten, so daß immer möglichst derselbe Abschnitt des OLA-Films vermessen wurde. Eine vergleichbare Auswertung der SIR-C/X-SAR-Aufnahmen ist freilich nicht möglich (bzw. führt zu jeweils identischen Ergebnissen); daher wurden die Schnittlinien räumlich etwas versetzt und/oder in ihrer Richtung verändert.

### 6.1.2 Diskussion der Ergebnisse

Die Tatsache, daß die Analyse der SAR-Aufnahmen qualitativ zu vergleichbaren Ergebnissen, also einem monotonen Anstieg der Dämpfungskurve, führt, läßt darauf schließen, daß das spezifische Dämpfungsverhalten des OLA-Films von beiden Systemen gemessen wurde. Da im vorigen Kapitel intensiv auf die unterschiedlichen Verläufe der (mit dem HELISCAT) gemessenen Dämpfungskurven eingegangen worden ist, kann hier auf eine derart exakte Betrachtung verzichtet werden. Gleiches gilt für die Betrachtung der unterschiedlichen Polarisationen, während eine Aussage über eine Abhängigkeit von der Blickrichtung des SARs relativ zur Windrichtung wegen der einmaligen Aufnahme nicht gemacht werden kann.

Wichtigstes Ergebnis sind allerdings die Unterschiede, die die gemessenen Dämpfungsverhältnisse der beiden Radarsysteme im C- und X-Band zeigen und die offensichtlich (wie sich auch im weiteren Verlauf dieses Kapitels zeigen wird) systembedingt sind. Für derartige Unterschiede kommen mehrere Ursachen in Frage:

- Das HELISCAT liefert zu hohe Dämpfungsverhältnisse, wobei dieser Fehler mit wachsender Bragg-Wellenzahl (nicht Radar-Wellenzahl!) zunimmt. Das kann seine Ursache einerseits in einem zu hohen Radar-Rückstreuquerschnitt über filmfreier und/oder andererseits in einem zu niedrigen über filmbedeckter Wasseroberfläche haben.
- Die SAR-Sensoren liefern zu niedrige Dämpfungsverhältnisse, ebenfalls desto deutlicher, je größer die Bragg-Wellenzahl ist (in diesem Fall kann keine Aussage über die Radar-Wellenzahl gemacht werden, da hier nur bei jeweils einem Einfallswinkel aufgenommen wurde). Entsprechend der Annahmen für das HELISCAT muß dann der Radar-Rückstreuquerschnitt über filmfreier Wasseroberfläche zu gering und/oder der über filmbedeckter Wasseroberfläche zu groß ausfallen.

Wie oben beschrieben, wurde das HELISCAT nicht absolut kalibriert, es liefert also keine Zeitserien des normierten Radar-Rückstreuquerschnitts. Da dieser aber für die Ermittlung von Dämpfungsverhältnissen auch nicht benötigt wird, kann hier keine Ursache für die gemessenen Unterschiede liegen. Das HELISCAT wurde für die Messung von Dämpfungsverhältnissen entwickelt und zeigt in allen Frequenzbereichen ein hinreichend großes Signal-zu-Rausch-Verhältnis, man darf also davon ausgehen, daß es repräsentative Meßdaten liefert.

Beim SAR handelt es sich, im Gegensatz zum HELISCAT, um ein abbildendes Radar. Der SAR-Abbildungsmechanismus kann also eine Ursache der beobachteten Unterschiede darstellen oder zumindest dazu beitragen. In der Tat spielt beispielsweise das nichtlineare *Velocity-Bunching*, das zu einer falschen Positionierung bestimmter sich bewegender Streuobjekte führt, bei der Abbildung von Ozeanwellen eine wichtige Rolle [z.B. *Alpers et al.*, 1981]. Da dieser Effekt allerdings von der Radarfrequenz unabhängig ist, kann er allein für das unterschiedliche Verhalten in den drei Radarbändern nicht verantwortlich gemacht werden. Es kann hingegen nicht ausgeschlossen werden, daß andere Abbildungsfehler des SARs zu einer Beeinflussung des gemittelten Radar-Rückstreuquerschnittes (über filmbedeckter Wasseroberfläche) und somit der resultierenden Dämpfungsverhältnisse führen.

Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis ist maßgeblich dafür verantwortlich, in welchem dynamischen Bereich eine Erfassung von Streuobjekten möglich ist. Die Anforderungen an das Systemrauschen des SIR-C/X-SAR waren mit -40 dB für das L-Band, -35 dB für das C-Band und -22 dB für das X-Band festgelegt worden [*Stofan et al.* 1995]. Die tatsächlichen Werte für das X-SAR liegen im Bereich der verwendeten Einfallswinkel (20° bis 55°) zwischen -40 dB und -30 dB [*Zink und Bamler*, 1995], während von *Freeman et al.* [1995] für das C-Band etwa -28 dB und für das L-Band etwa -36 dB angegeben werden (die genauen Werte seien jedoch abhängig von den Einstellungen für den jeweiligen Aufnahmestreifen). Berücksichtigt man diese Werte und setzt sie in Relation zu den aus den drei SAR-Aufnahmen (Abbildung 6.2) ermittelten mittleren Radar-Rückstreuquerschnitten (über filmfreier Wasseroberfläche), so erhält man Signal-zu-Rausch-Verhältnisse für das L-Band von etwa 21 dB, für das C-Band von etwa 12 dB und für das X-Band von 16 dB. Da das Radarsignal der filmfreien Wasseroberfläche nicht weiter als bis auf das Niveau des Systemrauschens reduziert werden kann,

stellen diese Werte somit die maximal zu ermittelnden Dämpfungsverhältnisse dar (für *diese* SAR-Aufnahmen – und unter Verwendung der ungenauen Angaben von *Freeman et al.* [1995]). Der Vergleich mit den berechneten Dämpfungsverhältnissen in Abbildung 6.4 zeigt, daß dieser Wert im X- und, vor allem aber, im C-Band fast erreicht wird, daß die niedrigeren Werte also in den unzureichenden Signal-zu-Rausch-Verhältnissen eine mögliche Ursache haben.

Für die Beantwortung der Frage, ob das rückgestreute Radarsignal im Systemrauschen verschwindet, mag die Betrachtung des *Polarisationsverhältnisses* herangezogen werden. Dabei handelt es sich um das Verhältnis der Radar-Rückstreuquerschnitte bei horizontaler und vertikaler Polarisation, also  $\sigma_{HH} / \sigma_{VV}$ . Das Verhältnis der entsprechenden SAR-Aufnahmen im L- und C-Band wurde berechnet, gemittelt und ist in Abbildung 6.5 dargestellt (das Polarisationsverhältnis im X-Band kann freilich nicht berechnet werden, da hier nur eine Polarisation vorliegt). Da nach der Bragg-Streutheorie der Radar-Rückstreuquerschnitt im L- und C-Band bei diesem Einfallswinkel bei horizontaler Polarisation kleiner sein muß als bei vertikaler [z.B. *Valenzuela*, 1978], liegen die berechneten Verhältnisse zwischen 0 und 1. In Abbildung 6.5 hebt sich der OLA-Film nur im C-Band deutlich gegenüber der umgebenden Wasseroberfläche ab, während er im L-Band nur schwer auszumachen ist. In beiden Radarbändern wird allerdings – wenn überhaupt – eine Änderung zu größeren Werten hin beobachtet. Von *Feindt* [1985] wurde dieses Verhältnis mit einem X-Band-Scatterometer im Windwellenkanal bei sauberer und filmbedeckter Wasseroberfläche gemessen. Im Gegensatz zu den hier vorgestellten Ergebnissen fand er heraus, daß sich dieses Verhältnis mit zunehmender Filmbedeckung zu kleineren Werten hin ändert, was von *Gade et al.* [1996b] mit Hilfe eines Drei-Skalen-Modells [*Romeiser*, 1993] qualitativ erklärt werden konnte. Die umgekehrte Änderung des Polarisationsverhältnisses im vorliegenden Fall kann demnach verschiedene Ursachen haben:

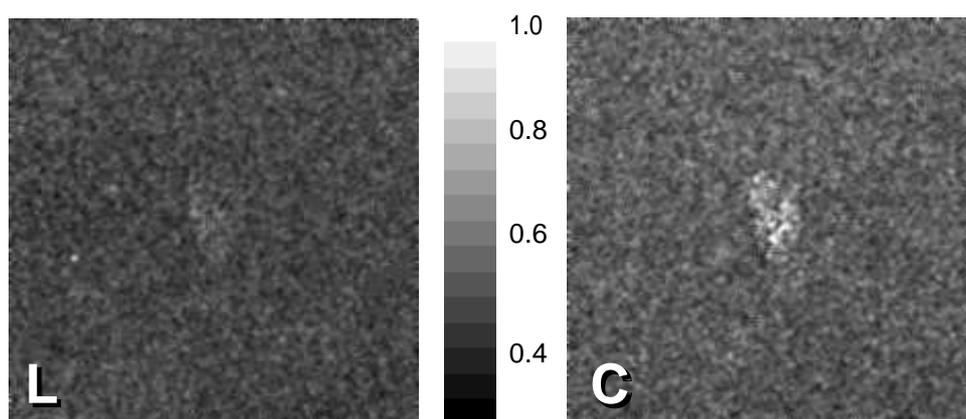


Abbildung 6.5: Graphische Darstellung der Polarisationsverhältnisse (also der Verhältnisse des Radar-Rückstreuquerschnitts bei HH- und VV-Polarisation) im L-Band (links) und C-Band (rechts) für den OLA-Film am 18. April 1994 vor Sylt. Gezeigt ist derselbe Ausschnitt wie in Abbildung 6.2.

- Im L- und C-Band erfolgt die Änderung des Polarisationsverhältnisses anders als im X-Band, also in umgekehrter Richtung.
- Die Ozeanoberfläche, speziell aber der Unterschied zwischen filmfreier und filmbedeckter Wasseroberfläche, wird durch ein SAR anders abgebildet, als es aufgrund der Bragg-Streutheorie zu vermuten wäre.
- Das horizontal polarisierte Radarsignal erreicht den Rauschuntergrund, während das vertikal polarisierte Signal weiter reduziert wird; das Polarisationsverhältnis ist daraufhin zu groß.

Der Vergleich mit den Zeitserien, die mit dem HELISCAT aufgenommen wurden, zeigt, daß eine deutliche Änderung des Polarisationsverhältnisses genau dann über filmbedeckter Wasseroberfläche auftritt, wenn die Daten die Qualitätskriterien *nicht* erfüllen, also der geforderte Mindestabstand zum Rauschen weniger als 3 dB beträgt. Diese Tatsache spricht dafür, daß auch beim C-Band des SIR-C/X-SAR ein zu geringes Signal-zu-Rausch-Verhältnis vorliegt, womit die zu geringen Dämpfungsverhältnisse im C-Band, und damit höchstwahrscheinlich auch im X-Band, zu erklären sind. Wie sich im weiteren Verlauf dieses Kapitels aber noch zeigen wird, kann hierin nicht die alleinige Ursache für den Unterschied in den vorgestellten Meßergebnissen liegen.

Zu den Differenzen zwischen den berechneten Dämpfungsverhältnissen des HELISCAT und des SIR-C/X-SAR kann auch das (externe) *Speckle*-Rauschen beitragen. Es handelt sich dabei um konstruktive und destruktive Interferenz rückgestreuter Mikrowellen, deren (gleichverteilter) Phasenunterschied durch die stochastischen Streuobjekte verursacht wird. Diese Interferenz führt, eben wegen ihrer stochastischen Natur, zu einem zusätzlichen Rauschen im Radarsignal, unabhängig von der Art des Radarsensors (also sowohl beim HELISCAT als auch bei einem SAR). Im Gegensatz zum Systemrauschen macht sich dieser Effekt also immer dann bemerkbar, wenn Radarstrahlen von der Meeresoberfläche rückgestreut werden. Wegen der geringen räumlichen Ausdehnung der Oberflächenfilme konnte teilweise nur über eine sehr begrenzte Anzahl von Auflösungszellen (*Pixeln*) gemittelt werden, so daß sich das *Speckle*-Rauschen nicht nur durch eine größere Varianz, sondern auch durch einen veränderten mittleren Radar-Rückstreuquerschnitt bemerkbar machen konnte. Demnach besteht durchaus die Möglichkeit, daß dieser Effekt zu einer künstlichen Reduktion der gemessenen Dämpfungsverhältnisse führen kann.

Schließlich müssen auch die unterschiedlichen Beleuchtungsflecke bzw. Auflösungszellen der beiden Radarsysteme verglichen werden. Während der Durchmesser des Beleuchtungsflecks beim HELISCAT im L-Band noch bei allen Einfallswinkeln größer ist als die Auflösungszelle des SIR-C/X-SAR, ist er im C-Band bei kleinen Einfallswinkeln und im X-Band bei sämtlichen Einfallswinkeln deutlich kleiner (vgl. Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2). *Plant et al.* [1994] fanden in ihren Messungen im X- und Ka-Band (10 und 35 GHz) keine Abhängigkeit des Radar-Rückstreuquerschnitts von der Größe des Antennenflecks, wohl aber eine Abhängigkeit der Varianz, die mit zunehmender Größe der beleuchteten Fläche abnimmt. Aus ihren Meßergebnissen berechnen sie Korrelationslängen in der Größenordnung der zehnfachen Mikrowellen-

länge, was demnach keine direkte Begründung der beobachteten Unterschiede zuläßt. Die mit wachsender Radarfrequenz kleiner werdenden Abmessungen des Beleuchtungsflecks beim HELISCAT stellen demnach zwar einen Unterschied zu der für die drei Radarfrequenzen konstanten Auflösungszelle beim SIR-C/X-SAR dar, bedeuten jedoch auch eine geringere räumliche Mittelung der rückgestreuten Radarleistung. Eine mögliche Ursache für die gemessenen Unterschiede in Verbindung mit der Größe der Auflösungszelle kann demnach nur unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Aufbereitung der empfangenen Mikrowellenleistung durch das SAR gesucht werden. Hier sind weitere Untersuchungen unter Einbeziehung beispielsweise eines flugzeuggetragenen SARs mit besserer räumlicher Auflösung nötig.

Oberflächenfilme können, vor allem bei hoher Windgeschwindigkeit und/oder starkem Wellengang, lokal aufreißen (oder zumindest ihre Dämpfungseigenschaften ändern). An diesen Stellen ändert sich dann das Verhältnis von Windeintrag zu viskoser Dämpfung, es kommt also zu einer stärkeren spektralen Energiezufuhr bei großen Wellenzahlen, was wiederum durch ein lokales Aufrauhren der filmbedeckten Wasseroberfläche sichtbar wird. Nur wenn die Auflösungszelle des Radars kleiner als diese „Löcher“ im Oberflächenfilm ist, sind sie als lokal reduzierte Dämpfung zu messen. Bei einer großen Auflösungszelle wird dieser Effekt allerdings verschmiert, so daß, im Mittel, das gemessene Dämpfungsverhältnis zu gering ausfällt. In der größeren Sensitivität des HELISCAT gegenüber Löchern im Oberflächenfilm ist also auch eine mögliche Ursache der Unterschiede in den Meßwerten gerade bei mittleren und großen Wellenzahlen (also im C- und X-Band) zu suchen.

Trotz der beobachteten Unterschiede und ihrer hier aufgezeigten möglichen Ursachen ist ein wichtiges Ergebnis dieses Abschnittes, daß der OLA-Film auch vom weltraumgestützten SIR-C/X-SAR erfaßt und sein (mit dem HELISCAT gemessenes) spezifisches Dämpfungsverhalten (qualitativ) bestätigt wurde. Ob eine derartige Bestätigung nun einmalig bei dem ersten Oberflächenfilm-Experiment (also bei den speziellen Bedingungen an diesem Tag) auftrat oder ob ein weltraumgestütztes SAR-System grundsätzlich in der Lage ist, spezifische Dämpfungscharakteristika zu erfassen, sollte während des zweiten – wesentlich umfangreicheren – Experimentes im Oktober 1994 untersucht werden.

## **6.2 Zweites Oberflächenfilm-Experiment / Oktober 1994**

Der Überflug der Raumfähre über die Deutsche Bucht am 06. Oktober 1994 erfolgte um 09:12 MEZ, also exakt zwei Stunden vor Beginn der Messungen mit dem HELISCAT (wegen technischer Schwierigkeiten mit der Spannungsversorgung des HELISCAT waren keine simultanen Messungen zusammen mit dem SIR-C/X-SAR möglich).

Unmittelbar vor diesem Überflug passierte eine atmosphärische Front das Testgebiet und ließ die Windgeschwindigkeit von etwa 6 m/s auf über 10 m/s ansteigen. In Abbildung 6.6 ist die X-SAR-Aufnahme des Testgebietes (mit den Dimensionen 65 km × 20 km) dargestellt. Die aus Südwesten kommende Front ist deutlich am helleren Bereich in der linken Bildhälfte zu erkennen (eine höhere Windgeschwindigkeit

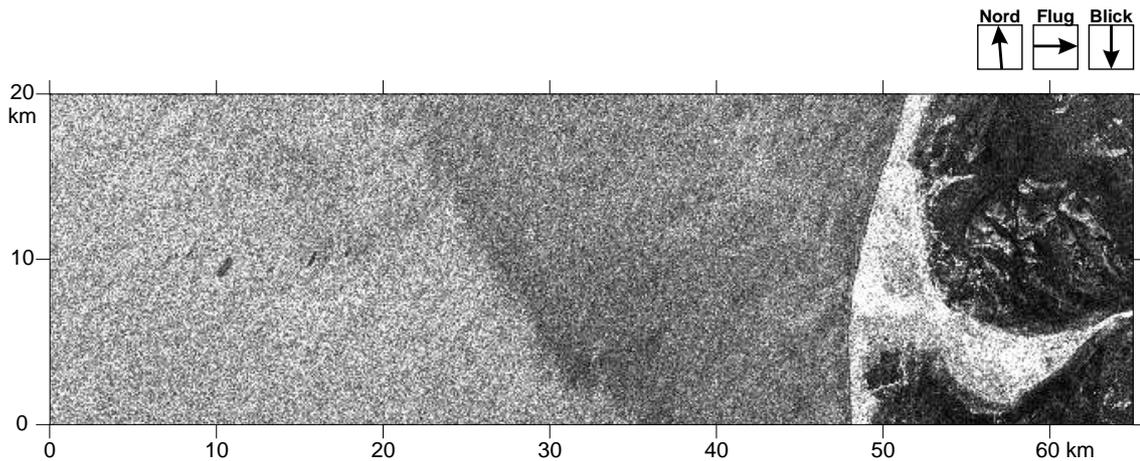


Abbildung 6.6: X-SAR-Aufnahme des zweiten Oberflächenfilm-Experimentes am 06. Oktober 1994 in der Deutschen Bucht. Deutlich zu erkennen ist der Bereich höherer Windgeschwindigkeit in der linken Bildhälfte. In diesem Bereich sind die Oberflächenfilme als kleine dunkle Flecken (zwischen 10 und 20 Kilometer vom linken Rand entfernt) zu erkennen. (© DLR, SRL-1, DT 143.30)

führt zu einer rauheren Wasseroberfläche und damit zu einem größeren Radar-Rückstreuquerschnitt). Abbildung 6.7 zeigt vergrößerte Ausschnitte der Szene in allen drei Radarbändern, jeweils bei VV-Polarisation. Auf Anhieb ist zu erkennen, daß in diesem Fall der Unterschied zwischen den drei Radarfrequenzen, vor allem zwischen dem L-Band einerseits und dem C- und X-Band andererseits, deutlich geringer ausfällt, als es beim ersten Oberflächenfilm-Experiment im April der Fall war (vgl. Abbildung 6.2).

Die SAR-Aufnahmen der Deutschen Bucht am 06. Oktober 1994 wurden unter einem Einfallswinkel von  $46.5^\circ$  gemacht, die drei Wellenzahlen für das L-, C- und X-Band sind demnach (vgl. (3.2))  $38.0 \text{ rad/m}$ ,  $161.0 \text{ rad/m}$  und  $291.7 \text{ rad/m}$  und die entsprechenden Bragg-Wellenlängen  $16.5 \text{ cm}$ ,  $3.9 \text{ cm}$  und  $2.2 \text{ cm}$ .

Wegen der hohen Windgeschwindigkeit während dieses Experimentes und dem großen zeitlichen Unterschiedes zwischen den SAR-Aufnahmen und den HELISCAT-Messungen kann nicht mehr davon ausgegangen werden, daß das Dämpfungsverhalten der einzelnen Oberflächenfilme, das beiden Datensätzen zugrunde liegt, vergleichbar ist. Es ist vielmehr anzunehmen, daß die rauhe See und der starke Wind sowohl zu einem Untermischen der Filmsubstanzen in den Wasserkörper als auch zu ihrer stärkeren Verdunstung (bzw. der Bildung von Aerosolen) führten. Aus beidem muß ein abgeschwächtes Dämpfungsvermögen resultieren, weshalb die Ergebnisse des HELISCAT – eine gleiche Abbildung der Oberflächenfilme vorausgesetzt – niedriger ausfallen müßten als die des SIR-C/X-SAR. Im folgenden Abschnitt wird sich allerdings zeigen, daß auch beim zweiten Oberflächenfilm-Experiment die Ergebnisse des SIR-C/X-SARs niedriger ausfallen als die HELISCAT-Ergebnisse.

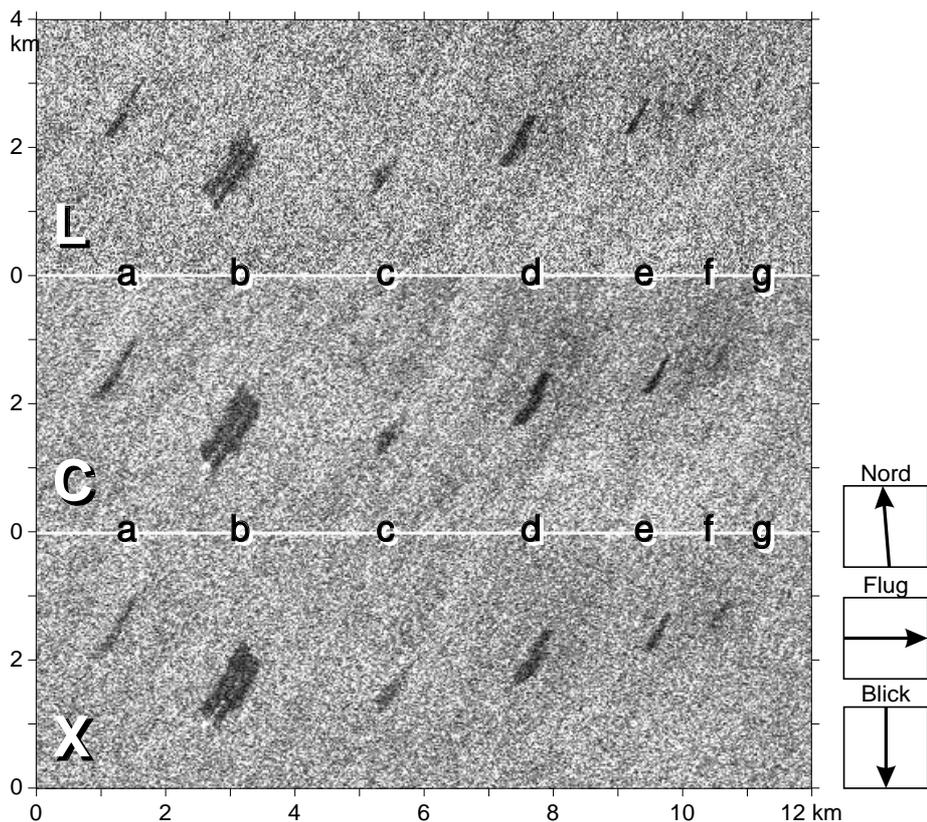


Abbildung 6.7: Vergrößerte Ausschnitte aus Abbildung 6.6, jedoch in allen drei Radarbändern, jeweils bei VV-Polarisation. Die jeweilige Größe der drei Ausschnitte ist  $12 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ , die mittlere Helligkeit der filmfreien Meeresoberfläche ist in den drei Ausschnitten gleich. Die Oberflächenfilme bestehen aus a) IFO 180 (Schweröl), b) OLA, c) OLME (pur), d) TOLG (pur), e) TOLG (in *n*-Hexan), f) OLME (in *n*-Hexan). Und g) OLME (in Ethanol). Letzterer ist nur äußerst schwer, der Dieselfilm überhaupt nicht zu erkennen. Der helle Fleck am südwestlichen Ende des OLA-Films ist die *MS Scharhörn*.  
(© JPL, DLR; SRL-2, DT 96.20)

### 6.2.1 Dämpfungsverhältnisse der Oberflächenfilme

Aus den SIR-C/X-SAR-Aufnahmen wurden auf dieselbe Art die Dämpfungsverhältnisse ermittelt, wie es bei den Aufnahmen des ersten Oberflächenfilm-Experimentes geschehen war und wie es im vorigen Abschnitt beschrieben wurde. Dabei zeigte sich von vornherein, daß der Diesel-Film in keiner der SAR-Aufnahmen zu identifizieren war. Schon während eines ersten (Kontroll-) Fluges, der gleichzeitig mit dem Überflug der Raumfähre stattfand, wurde festgestellt, daß dieser Oberflächenfilm vom Hubschrauber aus nur schwer auszumachen war. Dieselöl verdunstet relativ schnell von der Wasseroberfläche in die Atmosphäre, und da unter Berücksichtigung der Umwelt nur eine geringe Menge dieses Leichtöls auf der Wasseroberfläche ausgebracht worden war, konnte bei den vorherrschenden Wetterverhältnissen auch nicht mit einem längeren Verbleiben dieses Oberflächenfilms und somit mit verwertbaren

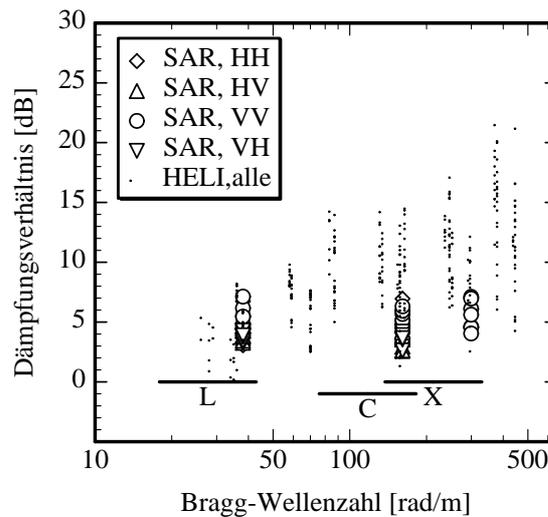


Abbildung 6.8: Dämpfungsverhältnisse des OLA-Films am 06. Oktober 1994 vor Sylt, die aus Schnittlinien durch die SIR-C/X-SAR-Aufnahmen ermittelt wurden. Zum Vergleich sind sämtliche mit dem HELISCAT gemessenen Dämpfungsverhältnisse als Punkte eingetragen.

Meßergebnissen gerechnet werden. Ähnliches gilt für das in Ethanol gelöste OLME: Wegen des Ausbringens in gelöster Form war nur eine geringe Menge dieser ohnehin schon schwach dämpfenden Substanz auf der Wasseroberfläche, und der resultierende Oberflächenfilm ist nur äußerst schwach am linken Rand der Abbildung 6.7 (in Verlängerung der anderen Oberflächenfilme) zu erkennen.

In Abbildung 6.8 sind die aus den SIR-C/X-SAR-Aufnahmen ermittelten Dämpfungsverhältnisse des OLA-Films dargestellt, wobei wieder zum Vergleich die Ergebnisse der HELISCAT-Messungen als Punkte zugefügt worden sind. Wiederum ist das Ergebnis dieses Vergleiches, daß die Meßergebnisse im L-Band sehr gut übereinstimmen, während sie im C- und X-Band voneinander abweichen, und zwar mit derselben Tendenz, die schon bei den Ergebnissen des ersten Oberflächenfilm-Experimentes zu erkennen war: Der Unterschied zwischen den (mittleren) Dämpfungsverhältnissen, die mit dem HELISCAT und aus den SAR-Aufnahmen ermittelt wurden, wächst vom C-Band zum X-Band (also zu größeren Bragg-Wellenzahlen hin) an. Insgesamt sind die Meßwerte bei den drei Bragg-Wellenzahlen etwa gleich groß, es ist mit steigender Bragg-Wellenzahl sogar ein leichter Rückgang zu beobachten. Die Werte der Kreuzpolarisationen, also HV und VH, im L- und C-Band liegen etwas niedriger als die der Kopolarisationen HH und VV (allerdings noch immer innerhalb der Fehlergrenzen). Die Prognose, daß wegen des späteren Meßzeitpunkts die Dämpfungsverhältnisse des HELISCAT niedriger ausfallen müssen als die des SIR-C/X-SAR, wird durch diesen Vergleich allerdings widerlegt: Wie schon beim ersten Oberflächenfilm-Experiment liegen die Dämpfungsverhältnisse, die mit dem HELISCAT gemessen wurden, im C- und X-Band höher.

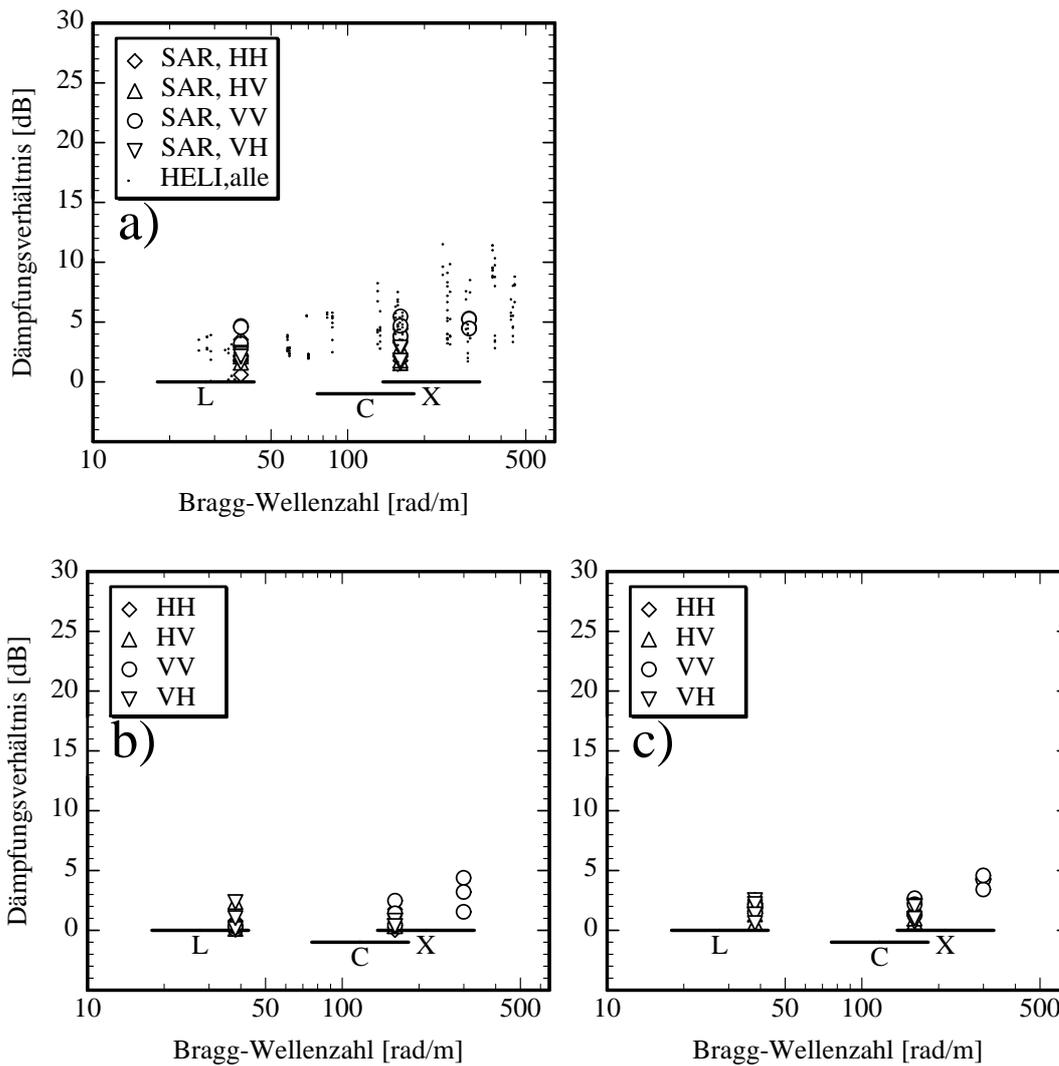


Abbildung 6.9: wie Abbildung 6.8, nur für OLME a) pur, b) in Ethanol und c) in *n*-Hexan gelöst. Nur für das pure OLME liegen Vergleichsdaten der HELISCAT-Messungen vor (siehe Text).

Die Ergebnisse für den (puren) OLME-Film sind in Abbildung 6.9a dargestellt. Wiederum zeigen die Meßergebnisse im L-Band eine bessere Übereinstimmung als im C- und X-Band, wobei der Unterschied zwischen beiden Datensätzen wegen der ohnehin niedrigeren Dämpfungsverhältnisse nicht so groß ausfallen kann wie im Falle des OLA-Films. Daß auch vom SIR-C/X-SAR ein Unterschied im Dämpfungsverhalten von OLA und OLME gemessen wird, macht der genaue Vergleich der Dämpfungsverhältnisse im L-Band deutlich: Diejenigen Unterschiede zwischen beiden Substanzen, die schon vom HELISCAT gemessen wurden, werden auch durch die Analyse der SAR-Aufnahmen ermittelt, die Meßdaten liegen also für OLME insgesamt etwas niedriger.

Da die SAR-Aufnahmen des Testgebietes zu einem relativ frühen Zeitpunkt stattfanden, ist auch eine Analyse der beiden (kleinen) Oberflächenfilme möglich, die aus gelöstem OLME bestanden. In Abbildung 6.9 sind auch die Ergebnisse dieser Bildanalysen dargestellt, wobei Abbildung 6.9b diejenigen für in Ethanol gelöstes und Abbildung 6.9c die für in *n*-Hexan gelöstes OLME zeigt. In beiden Fällen ist der unmittelbare Vergleich mit HELISCAT-Ergebnissen nicht möglich, da die Oberflächenfilme zum Zeitpunkt der HELISCAT-Messungen nicht mehr vorhanden waren. Eine Auswirkung der Art des Lösungsmittels auf das Dämpfungsverhalten ist nicht zu erkennen (dieses Ergebnis ist offensichtlich mit demjenigen vergleichbar, das mit dem HELISCAT am 18. April 1994 über den beiden gelösten OLA-Filmen vor Helgoland gewonnen wurde, vgl. Abschnitt 5.2.1). In beiden Fällen liefern die SAR-Aufnahmen im L- und C-Band mit Werten unterhalb von 3 dB nur geringfügige Dämpfungsverhältnisse, wogegen diese Werte im X-Band mit etwa 4 dB etwas größer sind. Der Vergleich mit dem puren OLME (Abbildung 6.9a) zeigt, daß die Meßwerte hier jeweils (d.h. in allen Radarbändern) um etwa 1–2 dB kleiner sind, daß die Tendenz des leichten monotonen Anstieges der Dämpfungsverhältnisse mit der Bragg-Wellenzahl allerdings weiterhin gemessen wird. Wie den SAR-Aufnahmen in Abbildung 6.7 allerdings zu entnehmen ist, sind beide Oberflächenfilme (speziell aber der am rechten Bildrand liegende) für eine sinnvolle Bildanalyse und eine damit verbundene aussagekräftige Statistik zu klein gewesen.

In Abbildung 6.10 sind die Dämpfungsverhältnisse sowohl für das pure (Abbildung 6.10a) als auch für das in *n*-Hexan gelöste TOLG (Abbildung 6.10b) dargestellt, wiederum im Vergleich mit den HELISCAT-Ergebnissen. Bei diesen Datensätzen taucht erstmals der Fall auf, daß die aus den SAR-Aufnahmen ermittelten Dämpfungsverhältnisse im L-Band teilweise, wenn auch geringfügig, größer sind, wobei die Werte im Mittel wiederum mit denen des HELISCAT übereinstimmen. Die große Streuung der Meßdaten im C-Band wird vor allem durch die Werte der Kreuzpolari-

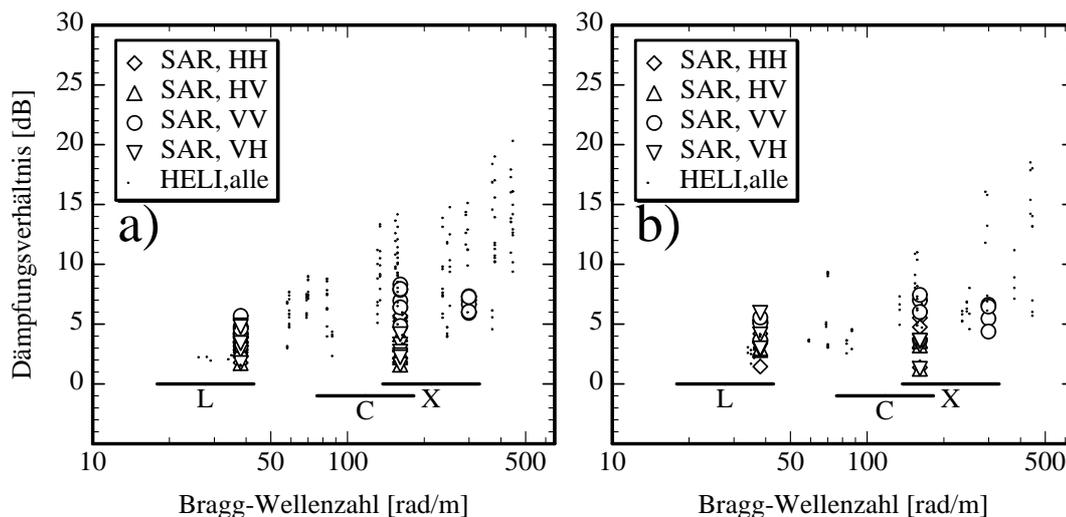


Abbildung 6.10: wie Abbildung 6.8, nur für a) TOLG pur und b) TOLG in *n*-Hexan gelöst.

sationen verursacht, der Vergleich der nur bei VV-Polarisation ermittelten Dämpfungsverhältnisse zeigt teilweise sogar ein leichtes Maximum im C-Band, dort allerdings nur bei VV-Polarisation. Berücksichtigt man für einen Vergleich nur die bei den entsprechenden Bragg-Wellenzahlen gewonnenen Ergebnisse der HELISCAT-Messungen, so wird auch für diese beiden Oberflächenfilme das qualitative Dämpfungsverhalten von TOLG durch die Analyse der SAR-Aufnahmen nachvollzogen: Die Ergebnisse beider TOLG-Filme unterscheiden sich untereinander nur geringfügig, und das Dämpfungsverhalten gleicht dem von OLA, wobei der Oleylalkohol wiederum etwas höhere Dämpfungsverhältnisse im L-Band zeigt.

Abbildung 6.11 zeigt schließlich diejenigen Dämpfungsverhältnisse, die durch die Bildanalyse für den Schwerölfilm gewonnen wurden, wiederum im Vergleich mit den HELISCAT-Ergebnissen. Auch in diesem Fall werden die Unterschiede zwischen den beiden Datensätzen bestätigt: Im L-Band sind die Dämpfungsverhältnisse vergleichbar, und ihre Abweichung nimmt zum C- und X-Band hin zu. Wiederum wird aber auch das vom HELISCAT gemessene Dämpfungsverhalten des Schweröls, nämlich ein mit der Bragg-Wellenzahl monotoner Anstieg, durch das SIR-C/X-SAR nachvollzogen, wenn dieser Anstieg auch nur sehr schwach ausfällt.

Sämtliche, aus den SAR-Aufnahmen des zweiten Oberflächenfilm-Experimentes gewonnenen Dämpfungsverhältnisse zeigen Gemeinsamkeiten, die offensichtlich für diesen Datensatz spezifisch sind:

- Grundsätzlich werden mit Maximalwerten von etwa 8 dB – vor allem im Vergleich zu den Ergebnissen des ersten Oberflächenfilm-Experimentes – relativ niedrige Dämpfungsverhältnisse gemessen.
- Die Streuung der Daten ist, vor allem im C-Band, groß, was hauptsächlich durch die Meßwerte der Kreuzpolarisationen (HV und VH) verursacht wird.
- Ein – leichter – Anstieg der Dämpfungsverhältnisse mit der Bragg-Wellenzahl ist

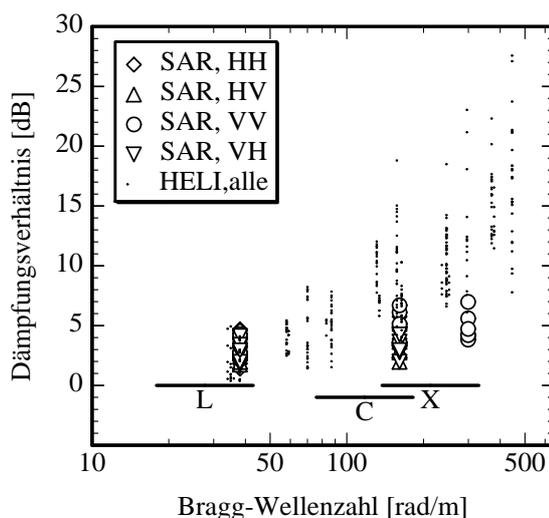


Abbildung 6.11: wie Abbildung 6.8, nur für das Schweröl IFO 180.

nur für OLME und das Schweröl zu beobachten. Für OLA ergibt sich ein leichtes Abfallen, für TOLG teilweise ein leichtes Maximum im C-Band bei VV-Polarisation.

- Die Dämpfungsverhältnisse stimmen nur im L-Band mit denen der HELISCAT-Messungen überein, während sie im C- und X-Band immer stärker von ihnen abweichen.
- Die mit dem HELISCAT gemessenen qualitativen Dämpfungscharakteristika können durch die Bildanalyse der SAR-Aufnahmen nachvollzogen werden, doch sind sie wegen der insgesamt wesentlich niedrigeren Werte nur schwach ausgeprägt.

Nachdem die Untersuchung der Polarisationsverhältnisse im L- und C-Band für die SAR-Aufnahmen des ersten Oberflächenfilm-Experimentes gezeigt hat, daß eine Hervorhebung des filmbedeckten Bereiches ein Indiz dafür sein kann, daß das Signal-zu-Rausch-Verhältnis unzureichend ist, sollen an dieser Stelle gleiche Betrachtungen angestellt werden. Abbildung 6.12 zeigt die graphischen Darstellungen der Polarisationsverhältnisse im L-Band (links) und C-Band (rechts) für den gesamten Bereich der Oberflächenfilme, also die in Abbildung 6.7 dargestellten Ausschnitte. In beiden Darstellungen als heller Punkt zu erkennen ist ausschließlich die *MS Scharhörn*, die sich während der SAR-Aufnahme am südwestlichen Rand des OLA-Films befand (Da ein derartiges – metallenes – Streuobjekt Mikrowellen ungeachtet ihrer Polarisation sehr gut reflektiert, ist auch mit einem Polarisationsverhältnis von ungefähr 1 zu rechnen).

Die Darstellung des Polarisationsverhältnisses im L-Band ist sowohl in der Tiefe des Grautons als auch im geringen Kontrast der Oberflächenfilme sehr gut vergleichbar mit derjenigen, die aus den SAR-Aufnahmen des Experimentes im April 1994 er-

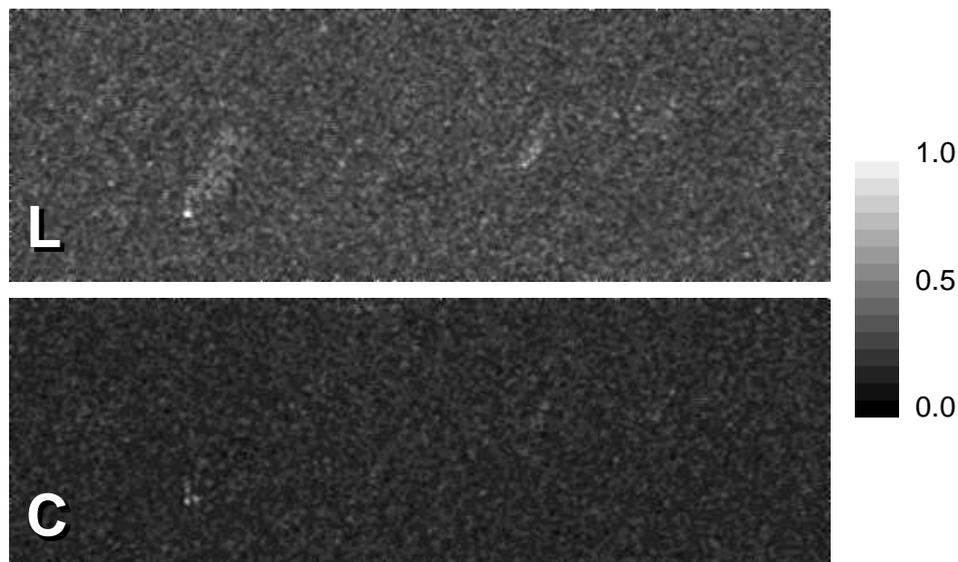


Abbildung 6.12: Graphische Darstellung der Polarisationsverhältnisse im L-Band (oben) und C-Band (unten) für die Oberflächenfilme am 06. Oktober 1994 vor Sylt (Die Ausschnitte sind dieselben wie in Abbildung 6.7).

halten wurde (vgl. Abbildung 6.5). Mit derselben Argumentation wie im vorigen Abschnitt kann man darauf schließen, daß auch in diesem Fall der Radar-Rückstreuquerschnitt im L-Band nicht das Rauschniveau erreicht hat.

Das Polarisationsverhältnis im C-Band zeigt in diesem Fall jedoch nicht den deutlichen Kontrast, der in Abbildung 6.5 zu sehen ist. Der deutlichere Unterschied der Dämpfungsverhältnisse, die mit dem HELISCAT einerseits und dem SIR-C/X-SAR andererseits ermittelt wurden (vgl. Abbildung 6.4 und Abbildung 6.8), kann demnach nicht darauf zurückgeführt werden, daß der Radar-Rückstreuquerschnitt im C-Band schneller das Rauschniveau erreicht hat.

Diese Vermutung wird bestätigt durch die Berechnung der mittleren Radar-Rückstreuquerschnitte über filmfreier Wasseroberfläche: Für das L-Band ergibt sich etwa -17 dB, für das C-Band -13 dB und für das X-Band -15 dB. Nach den Angaben von *Freeman et al.* [1995] und von *Zink und Bamler* [1995] ist das Signal-zu-Rausch-Verhältnis demnach im L-Band ungefähr 19 dB, im C-Band 15 dB und im X-Band 17 dB, also in allen Fällen deutlich größer als die gemessenen Dämpfungsverhältnisse.

## 6.2.2 Polarimetrische Untersuchungen

Die SIR-C/X-SAR-Aufnahmen des zweiten Oberflächenfilm-Experimentes am 06. Oktober 1994 wurden in der Betriebsart 16 gemacht, also im voll-polarimetrischen Mode (vgl. Tabelle 4.3). Aufnahmen in dieser Betriebsart erlauben es, (über die Berechnung des Polarisationsverhältnisses hinausgehende) polarimetrische Untersuchungen anzustellen, da sowohl im L- als auch im C-Band komplexe Daten sämtlicher Polarisierungen vorliegen. Nach den in Abschnitt 3.1.3 vorgestellten Grundlagen der Polarimetrie sind somit, durch Berechnung der Müller-Matrix, Rückschlüsse auf die Streueigenschaften des Zielobjektes möglich. Diese Tatsache wurde ausgenutzt, um die polare Signatur – und somit den Streumechanismus – der filmbedeckten mit der der filmfreien Wasseroberfläche zu vergleichen und nach eventuell vorhandenen Unterschieden zwischen den einzelnen Oberflächenfilmen zu suchen. Durch Untersuchung der Diagonalelemente der Müller-Matrizen zeigte sich, daß eine Ausschnittgrö-

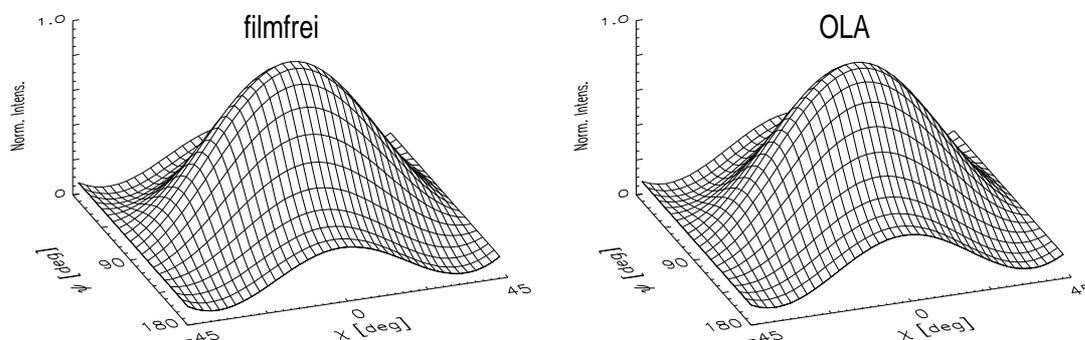


Abbildung 6.13: Kopolarisations-Signaturen im L-Band zweier Bildausschnitte gleicher Größe von filmfreier (links) und filmbedeckter (rechts) Wasseroberfläche. Es handelt sich um den OLA-Film (vgl. Abbildung 6.7).

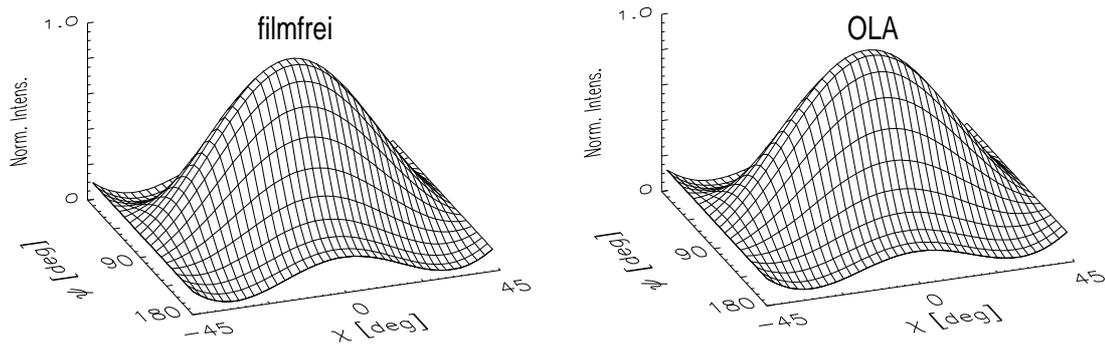


Abbildung 6.14: Wie Abbildung 6.13, nur für das C-Band.

ße von mindestens 25 Bildpunkten zu sinnvollen Ergebnissen führt (für die Diagonalelemente muß die Beziehung  $M_{11} = M_{22} + M_{33} + M_{44}$  gelten [z.B. Zebker und van Zyl, 1991] – diese Bedingung wird bei kleinen Bildausschnitten wegen des relativ hohen (Speckle-) Rauschanteils nicht erfüllt).

Abbildung 6.13 und Abbildung 6.14 zeigen derartige polare Signaturen, die jeweils von gleichen Bildausschnitten der L-Band- resp. C-Band-SAR-Aufnahmen von filmfreier und filmbedeckter Wasseroberfläche berechnet wurden. Qualitativ besteht zwischen den vier Signaturen kein Unterschied: Weder im L-Band noch im C-Band ist ein signifikanter Unterschied zwischen filmfreier und filmbedeckter Wasseroberfläche zu erkennen; die Polarisations-Signaturen haben jeweils die für die Rückstreuung an einer rauhen Oberfläche (d.h. für die Bragg-Streuung) typische Gestalt.

Untersuchungen der Rückstreumechanismen für horizontal und vertikal polarisierte Mikrowellen sind von Feindt [1985] im Windwellenkanal bei filmfreier und filmbedeckter Wasseroberfläche durchgeführt worden. Seinen Schlußfolgerungen nach tritt nur im filmbedeckten Fall Bragg-Streuung (sowohl bei HH- als auch bei VV-Polarisation) auf, während bei filmfreier Wasseroberfläche ebenso andere Streumechanismen – vor allem bei HH-Polarisation – eine Rolle spielen. Die Ergebnisse der hier vorgestellten Polarisationsanalyse scheinen diese Schlußfolgerung zu widerlegen, zumindest aber nicht zu unterstützen: Gerade bei den während des zweiten Oberflächenfilm-Experimentes vorherrschenden hohen Windgeschwindigkeiten wäre ein deutlicher Anteil eines anderen Streumechanismus und daraufhin auch ein Unterschied in den Polarisations-Signaturen der filmfreien und filmbedeckten Wasseroberfläche zu erwarten.

Das Polarisationsverhältnis  $\sigma_{HH} / \sigma_{VV}$  kann den Polarisations-Signaturen bei Werten des Elliptizitäts- und Orientierungswinkels von  $\chi = 0^\circ$  resp.  $\psi = 180^\circ$ , also an der dem Betrachter zugewandten Kantenmitte, entnommen werden (ein Elliptizitätswinkel von  $0^\circ$  bedeutet lineare Polarisation, ein Orientierungswinkel von  $180^\circ$  horizontale Orientierung; da die Polarisations-Signaturen durch Division durch den Maximalwert, also VV-Polarisation bei  $\chi = 0^\circ$  und  $\psi = 90^\circ$ , normiert sind, findet man für obige Werte das Polarisationsverhältnis). Hier zeigen sich bei einem genauen Vergleich zwischen den beiden Radarbändern die gleichen Unterschiede, wie sie schon

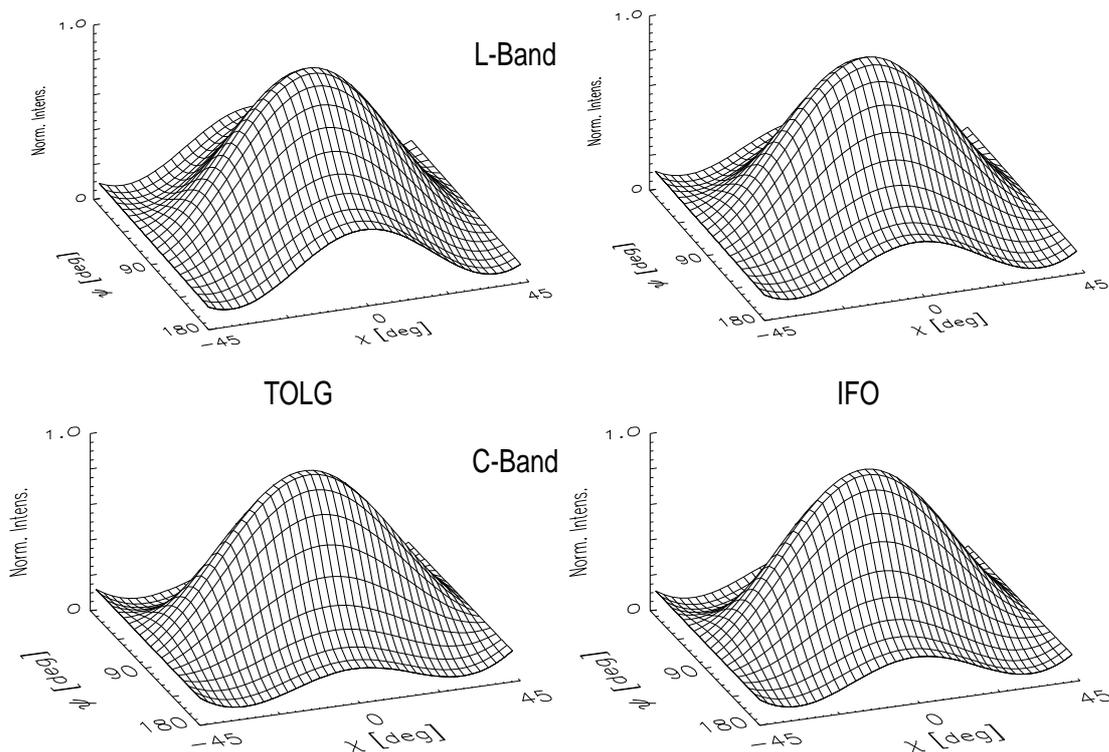


Abbildung 6.15: Kopolarisations-Signaturen im L-Band (oben) und C-Band (unten) zweier Bildausschnitte der mit purem TOLG (links) und Schweröl (rechts) bedeckten Wasseroberfläche (vgl. Abbildung 6.7).

durch die Abbildung 6.12 verdeutlicht wurden: Der Unterschied zwischen filmfreier und filmbedeckter Wasseroberfläche tritt im L-Band (etwas) deutlicher hervor als im C-Band, wobei das Polarisationsverhältnis bei filmbedeckter Wasseroberfläche etwas größer ausfällt als bei filmfreier.

Wenig überraschend ist aufgrund der bisherigen Ergebnisse der Polarisationsanalysen, daß auch die anderen Oberflächenfilme zu keiner qualitativen Veränderung der Polarisations-Signaturen führen. In Abbildung 6.15 sind als Beispiele die Kopolarisations-Signaturen von Bildausschnitten (gleicher Größe) der mit TOLG (linke Signaturen) und Schweröl (IFO 180, rechte Signaturen) bedeckten Wasseroberfläche jeweils im L-Band (oben) und C-Band (unten) gezeigt. Auch hier findet sich bei der Betrachtung der Polarisationsverhältnisse eine Bestätigung der Unterschiede in den Grauwerten in Abbildung 6.12: TOLG zeigt einen größeren Unterschied zwischen filmfreier und filmbedeckter Wasseroberfläche als das Schweröl (und ist daher in Abbildung 6.12 deutlicher von der umgebenden Wasseroberfläche zu unterscheiden).

Auf eine Darstellung der entsprechenden Kreuzpolarisations-Signaturen (d.h. die Polarisationsrichtungen von gesendeter und empfangener Strahlung sind um  $90^\circ$  gegeneinander gedreht) wird hier verzichtet, da auch sie – ebenso wie die Kopolarisations-Signaturen – für filmfreie und filmbedeckte Wasseroberfläche vergleichbar sind und daher keine neuen Informationen liefern.

### 6.2.3 Diskussion der Ergebnisse

Auch bei der Beurteilung derjenigen Ergebnisse, die die Bildanalyse der SAR-Aufnahmen des zweiten Oberflächenfilm-Experimentes ergab, zeigt sich, daß die zum Zeitpunkt des Shuttle-Überfluges vorherrschende hohe Windgeschwindigkeit eine wesentliche Rolle spielt. Die Auswirkungen auf die gemessenen Dämpfungsverhältnisse sind schon bei der Diskussion der HELISCAT-Ergebnisse im letzten Kapitel diskutiert worden. Da auch das SIR-C/X-SAR dieselbe Tendenz, nämlich eine Verringerung der Dämpfungsverhältnisse mit zunehmender Windgeschwindigkeit, erfaßt hat, kann hier auf eine ausführliche Diskussion dieses Effektes verzichtet werden.

Von Interesse ist allerdings der Betrag der Reduktion, den beide Systeme gemessen haben. Aus diesem Grund ist in Abbildung 6.16 der Vergleich zwischen den gemessenen Dämpfungsverhältnissen von OLA für beide Oberflächenfilm-Experimente, jeweils für das HELISCAT (links) und das SIR-C/X-SAR (rechts), dargestellt. Da vom SIR-C/X-SAR im X-Band nur Werte bei VV-Polarisation vorliegen, wurden jeweils nur Meßdaten dieser Polarisation verwendet. In jede Grafik zusätzlich eingetragen sind Regressionskurven, wobei bei den HELISCAT-Daten ein Polynom dritten Grades als einfachste Näherung (die zu einem sinnvollen Ergebnis führt) angenommen wurde. Da für das SIR-C/X-SAR nur zu drei Bragg-Wellenzahlen Daten vorliegen, mußte hier, um eine Parameteranpassung zu ermöglichen, der Grad des Polynoms auf 2 reduziert werden.

Die mit dem HELISCAT gemessenen Dämpfungsverhältnisse des zweiten Oberflächenfilm-Experimentes sind in mehr und weniger stark dämpfende Filmbereiche unterteilt worden, wobei nur für die Bereiche starker Dämpfung von einer vollständigen Bedeckung der Wasseroberfläche mit der oberflächenaktiven Substanz ausgegan-

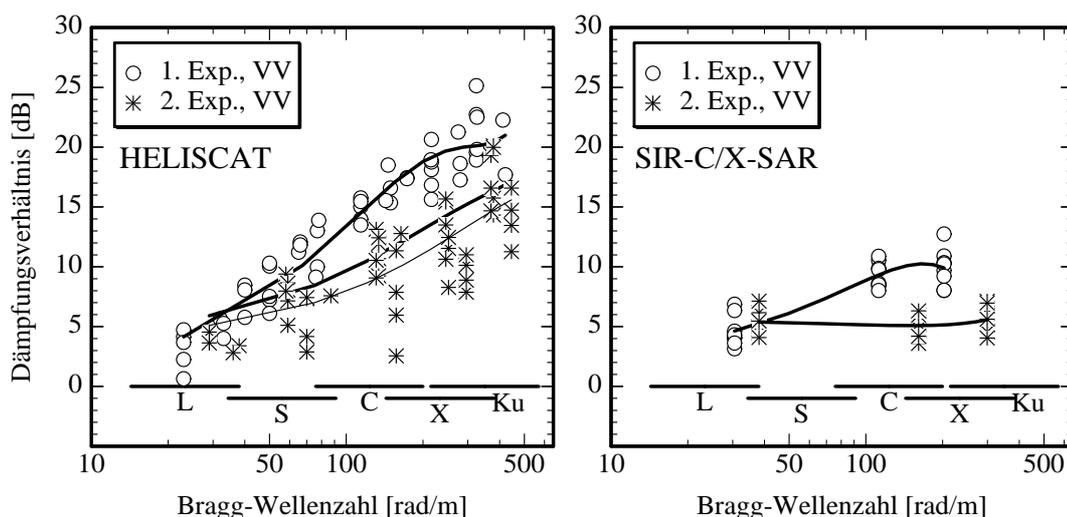


Abbildung 6.16: Vergleich zwischen den Reduktionen, die das HELISCAT und das SIR-C/X-SAR beim OLA-Film während beider Oberflächenfilm-Experimente gemessen haben. Zusätzlich eingetragen sind Näherungskurven (siehe Text).

gen werden kann (Abschnitt 5.4.1). Daher wurden in Abbildung 6.16 nur die Meßdaten der stark dämpfenden Filmbereiche aufgenommen (vgl. Abbildung 5.10a). Die Regressionskurven wurden sowohl für diesen gesamten Datensatz (die dünne, unterste Kurve) als auch nur für die Überflüge mit stärkster gemessener Dämpfung (mehr als 20 dB – die dicke, mittlere Kurve) berechnet und dargestellt. Beide Kurven unterscheiden sich durch einen konstanten Offset; das qualitative Dämpfungsverhalten ist demnach für beide Datengruppen gleich.

Weshalb die gesonderte Regression nur für die am stärksten dämpfenden Filmabschnitte sinnvoll ist, zeigt der Vergleich mit den Regressionskurven für die SIR-C/X-SAR-Ergebnisse: Vergleicht man nämlich jeweils die beiden dick eingetragenen Kurven, so zeigt sich, daß beide Systeme nahezu dieselben Unterschiede im Dämpfungsverhalten des OLA-Films gemessen haben (der Unterschied jeweils der beiden dicken Regressionskurven ist also gleich). Dieses Ergebnis ist insofern von besonderem Interesse, als es zeigt, daß sich zwar die absoluten Werte der von beiden Systemen gemessenen Dämpfungsverhältnisse unterscheiden, daß allerdings die relative Abnahme, die durch die veränderten Bedingungen bei beiden Experimenten verursacht wird, gleichermaßen erfaßt wurde. Dieses Ergebnis ist ein erneutes Indiz dafür, daß die Unterschiede in den Meßergebnissen des HELISCAT und des SIR-C/X-SAR systembedingt sind.

Die Regression der HELISCAT-Ergebnisse des zweiten Experimentes führt im Vergleich mit den Daten des ersten Experimentes dann zu guten (d.h. mit dem SIR-C/X-SAR vergleichbaren) Ergebnissen, wenn nur die am stärksten dämpfenden Abschnitte des OLA-Films berücksichtigt werden. In der Tat kann man nur (bzw. höchstens) bei diesen Filmabschnitten davon ausgehen, daß die Dämpfungseigenschaften von OLA – vor allem beim späteren Zeitpunkt der Messungen – noch voll ausgeprägt sind, daß das Dämpfungsverhalten des Oberflächenfilms also nicht lokal, beispielsweise durch Einflüsse des Windes und der Wellen, abgeschwächt ist. Konsequenterweise sollten nur diese Filmabschnitte mit dem OLA-Film des ersten Oberflächenfilm-Experimentes vergleichbar sein. Für den quantitativen Vergleich mit den Ergebnissen des SIR-C/X-SAR werden daher im folgenden vor allem diejenigen Meßergebnisse herangezogen, die über den jeweiligen stark dämpfenden Filmabschnitten gewonnen wurden.

Bei der Bildanalyse der SIR-C/X-SAR-Aufnahmen wurde nicht nach der Stärke der Dämpfung unterschieden; man kann also davon ausgehen, daß auch bei der Auswertung des zweiten Experimentes jeweils Bereiche starker Dämpfung ausgewählt wurden. Grund hierfür mögen die ohnehin insgesamt niedrigen Dämpfungsverhältnisse sein, die das SIR-C/X-SAR lieferte, so daß die Bereiche schwächerer Dämpfung bei der Bildanalyse nicht berücksichtigt wurden (wenn, wie mit dem HELISCAT gemessen, der Unterschied zwischen stark und schwach dämpfenden Filmbereichen größer ist als 5 dB, sollten letztere im SAR-Bild nicht zu identifizieren sein, da ja auch die stark dämpfenden Filmabschnitte Dämpfungsverhältnisse von nur etwa 5 dB zeigten).

Für die Diskussion der Unterschiede zwischen den Meßergebnissen, die das HELISCAT und das SIR-C/X-SAR über denselben Oberflächenfilmen erzielten, sind

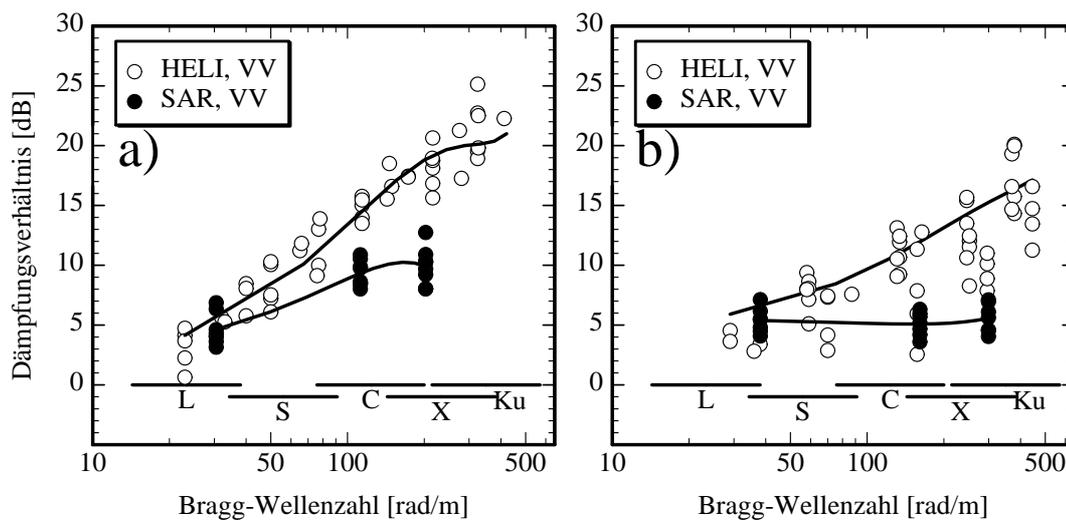


Abbildung 6.17: Vergleich zwischen den sowohl mit dem HELISCAT als auch mit dem SIR-C/X-SAR gemessenen Dämpfungsverhältnissen der OLA-Filme während beider Oberflächenfilm-Experimente in der Deutschen Bucht. a) 1. Experiment im April 1994, b) 2. Experiment im Oktober 1994.

ebenfalls Regressionskurven in der oben beschriebenen Weise berechnet und eingezeichnet worden. Abbildung 6.17 zeigt den Vergleich für die beiden puren OLA-Filme, die während beider Oberflächenfilm-Experimente sowohl mit dem HELISCAT als auch mit dem SIR-C/X-SAR überflogen wurden. Wiederum ist in die Darstellung der Ergebnisse des zweiten Experiments (Abbildung 6.17b) die Regressionskurven der HELISCAT-Ergebnisse für die maximal dämpfenden Filmabschnitte als (dicke) durchgezogene Linie eingezeichnet. Da dieselben Daten aufgetragen sind wie in Abbildung 6.16, sind auch die Schlußfolgerungen dieselben: Für die Bereiche besonders starker Dämpfung beim zweiten Experiment ist der Unterschied zwischen den Daten beider Systeme etwa gleich:

- Die Regressionskurven schneiden sich im Bereich der L-Band-Braggwellen (verlängert man die Kurven, so erhält man als Abszisse des Schnittpunktes etwa 20 rad/m).
- Der Unterschied zwischen den Regressionskurven nimmt zum C- und X-Band zu (4.4 dB bei 100 rad/m und etwa 8 dB bei 200 rad/m).

Der Vergleich zwischen den Dämpfungsverhältnissen, die mit beiden Systemen über dem puren OLME-Film gemessen wurden, ist in Abbildung 6.18 dargestellt. Wiederum wurde bei der Regression zwischen den besonders stark dämpfenden, den stark dämpfenden Filmabschnitten unterschieden (Auch hier zeigt sich, daß die Unterscheidung zwischen besonders stark und stark dämpfend keine wesentlichen Änderungen in der Regression ergibt, weshalb ja bei der Vorstellung dieses Datensatzes auch nur zwischen stark und schwach dämpfend unterschieden wurde). Die Unter-

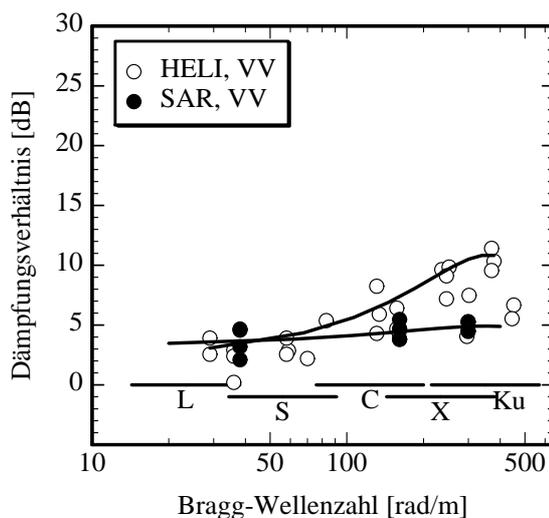


Abbildung 6.18: Vergleich zwischen den sowohl mit dem HELISCAT als auch mit dem SIR-C/X-SAR gemessenen Dämpfungsverhältnissen des (puren) OLME-Films während des zweiten Oberflächenfilm-Experimentes am 06. Oktober 1994.

schiede fallen in diesem Fall nicht so deutlich aus; sie lassen sich allerdings analog zu denen für OLA darstellen:

- Der Schnittpunkt beider Regressionskurven liegt bei einer größeren Bragg-Wellenzahl (etwa bei 45 rad/m) als für OLA. Es wurde schon beschrieben, daß die vom SIR-C/X-SAR gemessenen Dämpfungsverhältnisse im L-Band teilweise etwas größer sind als die vom HELISCAT gemessenen, was die Verschiebung des Schnittpunktes verursacht.
- Der Unterschied nimmt ebenfalls mit der Bragg-Wellenzahl zu: 2.9 dB im C-Band (bei 160 rad/m) und 5.5 dB im X-Band (bei 300 rad/m). Wiederum ist er im X-Band nahezu doppelt so groß (in logarithmischen Einheiten) als im C-Band.

Die Tatsache, daß beide Systeme ein unterschiedlich starkes Dämpfungsverhalten messen, legt den Schluß nahe, daß vom SIR-C/X-SAR nur schwach dämpfende Abschnitte gemessen wurden; die oben geführte Diskussion, vor allem in Verbindung mit den Daten des ersten Experimentes, scheint diese Vermutung allerdings zu widerlegen: Grundsätzlich werden vom SIR-C/X-SAR niedrigere Dämpfungsverhältnisse gemessen – auch ohne Vorhandensein von Filmabschnitten niedriger Dämpfung!

Als nächster Schritt werden nun diejenigen Daten verglichen, die von beiden Systemen über den beiden TOLG-Filmen gewonnen wurden. In Abbildung 6.19 sind die Ergebnisse der Regressionen dargestellt, wobei die Zuordnung der einzelnen Kurven wieder so gewählt ist wie in den beiden vorigen Abbildungen. Wie schon in der bisherigen Diskussion dieser Datensätze zeigt sich, daß die Ergebnisse für das pure und das in *n*-Hexan gelöste TOLG vergleichbar sind. Aus diesem Grund kann der Vergleich für die Regressionen auch für beide Oberflächenfilme gemeinsam vorgenommen werden:

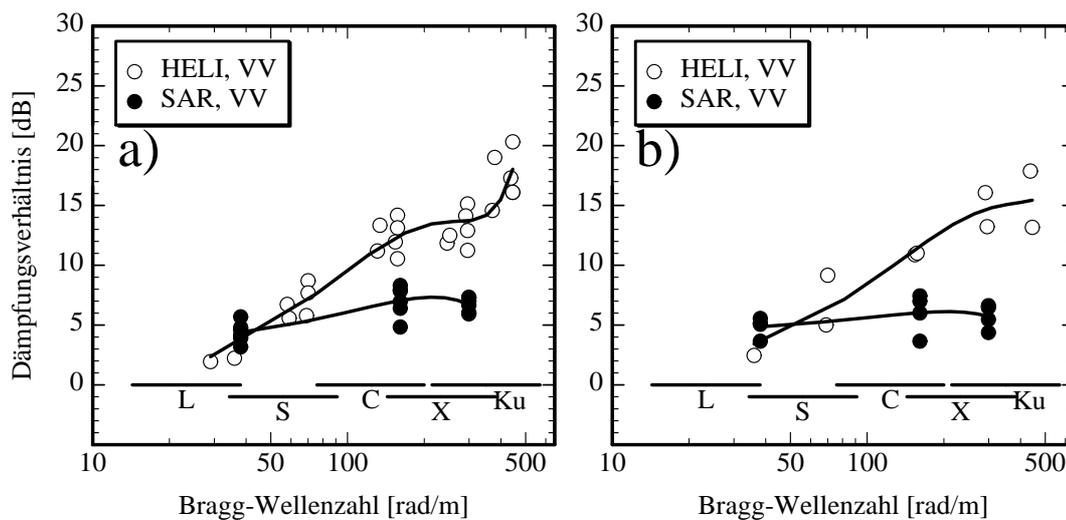


Abbildung 6.19: Wie Abbildung 6.18, nur für TOLG a) pur und b) in *n*-Hexan gelöst.

- Der Schnittpunkt der Regressionskurven liegt wiederum jeweils im L-Band, zwischen 43 rad/m und 52 rad/m. Letzterer Wert ist sicherlich deshalb zu höheren Bragg-Wellenzahlen verschoben, da für das gelöste TOLG nur ein geringer Datensatz zur Verfügung steht und die Regressionskurve daher im Bereich kleiner Wellenzahlen etwas zu gering ausfällt.
- Der Unterschied zwischen beiden Regressionskurven ist im C-Band gleich: 5.4 dB bei 161 rad/m. Im X-Band variiert er etwas: bei 300 rad/m liegt er für das pure TOLG bei 7.2 dB und für das gelöste bei 8.8 dB, ein Unterschied, der wiederum durch die geringe Datenausbeute für das gelöste TOLG begründet sein kann.

Es zeigt sich abermals, daß sich der Unterschied zwischen den Regressionskurven vom C- zum X-Band etwa verdoppelt. Aufgrund der Tatsache, daß hier nur Meßwerte für zwei Bragg-Wellenzahlen (d.h. für einen Einfallswinkel) verglichen werden können, kann nicht gesagt werden, wo exakt die Ursachen für diesen etwa doppelt so großen Unterschied liegen, bzw. von welchen Parametern dieser Unterschied abhängt. Es fällt jedoch auf, daß diese Verdoppelung unabhängig von der Art des biogenen Films zu sein scheint.

Für den letzten Vergleich zwischen den Meßdaten beider Systeme werden die gemessenen Dämpfungsverhältnisse des Schweröls herangezogen, die in Abbildung 6.20 dargestellt sind. Der Vergleich zwischen den Regressionskurven fällt hier folgendermaßen aus:

- Der Schnittpunkt beider Kurven liegt bei 49 rad/m, also wiederum im Bereich der L-Band-Braggwellen.
- Die entsprechenden Unterschiede im C- und X-Band sind 7.1 dB (bei 161 rad/m) und 10.5 dB (bei 300 rad/m). Der Unterschied verdoppelt sich in diesem Fall

nicht, was an den relativ niedrigen HELISCAT-Ergebnissen im X-Band liegen mag (Der Vergleich mit Abbildung 5.14a und Abbildung 5.21a zeigt, daß die Regressionskurve hier zu niedrig liegen kann. Berücksichtigt man sämtliche mit dem HELISCAT gewonnene Daten, so wird der Unterschied im X-Band größer ausfallen).

Die Ergebnisse des Vergleichs für den Schwerölfilm bestätigen, daß es offensichtlich systematische Unterschiede in den gemessenen Dämpfungsverhältnissen gibt. Am meisten fällt die Tatsache auf, daß sich das Verhältnis beider Regressionskurven bei sämtlichen Oberflächenfilmen zwischen dem C- und dem X-Band nahezu verdoppelt (ein Faktor 2 entspricht etwa 3 dB). Dieses Ergebnis zeigt, daß die Abbildung der Oberflächenfilme durch die beiden Systeme, unabhängig von der Art des Oberflächenfilms, unterschiedlich ist.

Da der Unterschied zwischen den Regressionskurven für beide Oberflächenfilm-Experimente gleich ausfällt, kann er nicht durch die Windgeschwindigkeit verursacht werden, denn diese war ja während beider Experimente stark unterschiedlich. Er kann auch nicht vom Einfallswinkel abhängen, denn er ist für beide Oberflächenfilm-Experimente gleich, obwohl die SAR Aufnahmen mit etwa  $36^\circ$  und  $47^\circ$  bei unterschiedlichen Einfallswinkeln aufgenommen wurden.

Völlig anderer Art ist die Untersuchung der SAR-Aufnahmen mit Hilfe der Polarisationsanalyse. Die Ergebnisse haben gezeigt, daß sowohl innerhalb als auch außerhalb der Oberflächenfilme Bragg-Streuung vorliegt, daß sich die Polarisations-Signaturen untereinander allerdings nur gering unterscheiden. Die biogenen Filme aus OLA und (purem) TOLG zeigen als einzige im L-Band ein zur filmfreien Meeresoberfläche unterschiedliches Polarisationsverhältnis. Aus den Ergebnissen der Polarisationsanalyse zu schließen, daß mit Hilfe einer derartigen Untersuchung die Unterscheidung zwischen biogenen und Mineralölfilmen möglich ist, ist schlechterdings nicht

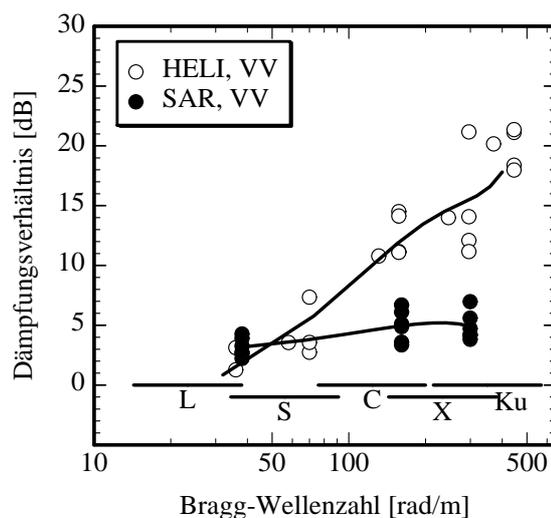


Abbildung 6.20: Wie Abbildung 6.18, nur für Schweröl (*Ifo 180*).

möglich. Offensichtlich treten Unterschiede in den Kopolarisations-Signaturen dann auf, wenn der Oberflächenfilm eine hinreichende Größe (und somit ein hinreichendes Dämpfungsvermögen) hat. Eine genaue Betrachtung von Abbildung 6.7 zeigt, daß OLA und das pure TOLG (Filme „b“ resp. „d“) die größten und kompaktesten Oberflächenfilme gebildet haben, während das Schweröl (Film „a“) relativ dünn und inhomogen erscheint.

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnisse werden durch diejenigen bestätigt, die von *Masuko et al.* [1995] in mehrerer Meßkampagnen während der beiden SIR-C/X-SAR-Missionen vor der Küste Japans gewonnen wurden. Für ihre Messungen wurde ebenfalls Oleylalkohol (OLA) an mehreren Tagen auf die Wasseroberfläche ausgebracht und die Signaturen, die mit Hilfe verschiedener Radarsensoren gewonnen wurden, verglichen. Erste Ergebnisse, die von *Masuko et al.* [1995] vorgestellt wurden, haben die im Rahmen der beiden Oberflächenfilm-Experimente in der Deutschen Bucht gewonnenen Ergebnisse bestätigt: Auch ihre Ergebnisse zeigen einen Rückgang des gemessenen Dämpfungsverhaltens mit zunehmender Windgeschwindigkeit.

Die Ergebnisse der SIR-C/X-SAR-Aufnahmen des zweiten Oberflächenfilm-Experimentes stellen demnach eine wichtige Ergänzung des bisherigen Datenmaterials dar, mit deren Hilfe die Systematik in den beobachteten Unterschieden aufgezeigt werden konnte. Für die weitere Untersuchung der Abbildung von Oberflächenfilmen durch Radarsensoren und die mögliche Klärung der aufgeworfenen Fragen werden allerdings weiterführende Vergleiche zwischen denjenigen Daten, die mit Hilfe eines Scatterometers gewonnen wurden, und denjenigen, die die Bildanalyse von SAR-Aufnahmen ergeben hat, nötig sein.

Wie einführend bereits erwähnt, wurden zusätzlich zu den hier vorgestellten SIR-C/X-SAR-Aufnahmen auch SAR-Aufnahmen mit den flugzeuggetragenen DOSAR der Firma Dornier durchgeführt. Dieser weitere Datensatz wurde allerdings erst zu einem sehr späten Zeitpunkt – weit nach Abschluß der HELISCAT-Messungen – gemacht, zu einem Zeitpunkt also, als die Oberflächenfilme nur noch lückenhaft an der Wasseroberfläche vorhanden waren (außerdem hatte das Einsammeln des Mineralöls schon begonnen). Das DOSAR liefert Aufnahmen mit einer Pixelgröße von etwa 2 m, also einer deutlich höheren Auflösung als das SIR-C/X-SAR. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung der vorliegenden Arbeit sind die DOSAR-Aufnahmen allerdings noch nicht ausgewertet, so daß keine Analyse und Diskussion dieses Datensatzes vorgenommen werden kann. Erste Ergebnisse zeigen aber, daß das gemessene Dämpfungsverhältnis im C-Band, bei VV-Polarisation, über dem Schwerölfilm etwa 4 dB beträgt, also mit dem vom SIR-C/X-SAR gemessenen vergleichbar ist. Eine genauere Analyse der DOSAR-Aufnahmen, vor allem von natürlichen Oberflächenfilmen, wird erst nach Abschluß der Datenprozessierung möglich sein.

### 6.3 Beispiele für natürliche Oberflächenfilme

Während sich die Messungen mit dem HELISCAT auf die beiden Oberflächenfilm-Experimente in der Deutschen Bucht beschränkten, sind mit dem SIR-C/X-SAR Oberflächenfilme an vielen unterschiedlichen Stellen der Weltmeere aufgenommen

worden. In diesem Abschnitt wird eine Auswahl von Ergebnissen vorgestellt, die durch die Bildanalyse von SAR-Aufnahmen von natürlichen Oberflächenfilmen gewonnen wurden. Wie bei der Beschreibung von Abbildung 2.1 bereits dargestellt, können Oberflächenfilme natürlichen Ursprungs häufig an ihrer Form identifiziert werden. Für die Berechnung von deren Dämpfungsverhältnissen wurden daher nur solche SIR-C/X-SAR-Aufnahmen ausgewählt, bei denen man von der Form der Oberflächenfilme mit großer Wahrscheinlichkeit auf deren natürlichen Ursprung schließen kann (es kann freilich nicht ausgeschlossen werden, daß sich trotzdem auch Mineralölfilme – wenn auch vereinzelt – auf den SAR-Aufnahmen befinden).

Natürliche Oberflächenfilme treten vorwiegend bei niedrigen Windgeschwindigkeiten und in Küstengebieten an der Meeresoberfläche auf [Hühnerfuss et al., 1977]. Da einerseits der Radar-Rückstreuquerschnitt von der Meeresoberfläche mit sinkender Windgeschwindigkeit abnimmt [Jones und Schroeder, 1978; de Loor, 1983; Feindt, 1985; Keller et al., 1992] und natürliche Oberflächenfilme (unter diesen Umständen) andererseits ein starkes Dämpfungsverhalten zeigen, ist das Signal-zu-Rausch-Verhältnis häufig nicht ausreichend, um realistische Dämpfungsverhältnisse zu messen. Aus diesem Grund konnten nur wenige SAR-Aufnahmen für die Berechnung der Dämpfungsverhältnisse Verwertung finden. Es wird sich allerdings im Verlauf dieses Abschnitts zeigen, daß das Signal-zu-Rausch-Verhältnis auch bei ihnen eine wichtige Rolle spielt.

Als Beispiele für die Abbildung natürlicher Oberflächenfilme wurden SAR-Aufnahmen der ersten SIR-C/X-SAR-Mission von der Nord- und Ostsee sowie vom östlichen Pazifik (vor der mexikanischen Küste) ausgewählt (vgl. Tabelle 6.1). Weitere Oberflächenfilme sind während beider Missionen beispielsweise im Mittelmeer, vor der Küste Japans, im Golf von Mexiko oder vor verschiedenen Bereichen der afrikanischen Küste aufgenommen worden.

### 6.3.1 Natürliche Oberflächenfilme in der Nordsee

Am 12. April 1994 wurden um 09:27 MESZ SIR-C/X-SAR-Aufnahmen des Seegebietes westlich der Nordspitze Dänemarks gemacht. Schon bei der Beschreibung der HELISCAT-Ergebnisse, die am 18. April 1994 südwestlich von Amrum gewonnen wurden, wurde darauf hingewiesen, daß zu der Zeit der ersten SIR-C/X-SAR-Mission eine Planktonblüte im Seegebiet der Nordsee stattfand. Diese Blüte bewirkte bei für sie günstigen Wetterverhältnissen eine Bedeckung großer Seeflächen mit natürlichen Oberflächenfilmen. Zum Zeitpunkt der SAR-Aufnahmen war die Windgeschwindigkeit in diesem Gebiet niedrig, also kleiner als 5 m/s (exakte Meldungen von genau dem beobachteten Gebiet liegen nicht vor; jedoch lassen Schiffsmeldungen, die etwa zur Aufnahmezeit in diesem Seegebiet gemacht wurden, darauf schließen, daß die Windgeschwindigkeit ungefähr 4 m/s betrug). Die SIR-C/X-SAR-Aufnahmen wurden unter einem Einfallswinkel von 32° gemacht, die Bragg-Wellenzahlen sind also 27.7 rad/m, 117.6 rad/m und 213.1 rad/m (und die Bragg-Wellenlängen demnach 22.6 cm, 5.3 cm und 2.9 cm).

Parallel zum Überflug der *Endeavour* und zur Aufnahme des SAR-Streifens fand eine Unterfliegung in diesem Seegebiet mit dem DOSAR statt. Deren Ergebnisse sind

zum Zeitpunkt der Fertigstellung der vorliegenden Arbeit zwar noch nicht fertig ausgewertet, sie werden aber Gegenstand weiterer Untersuchungen sein, die am Institut für Meereskunde der Universität Hamburg durchgeführt werden. Schon während dieser Unterfliegung konnte mit Hilfe des an Bord der Transall montierten Quicklook-Prozessors festgestellt werden, daß die Oberflächenfilme zu deutlichen Signaturen im X-Band führten [P. Fischer, pers. Mitteilung]. Da auch die SIR-C/X-SAR-Aufnahmen derartig deutliche Signaturen zeigen, wurden sie in Hinblick auf die gemessenen Dämpfungsverhältnisse hin ausgewertet.

Zur Darstellung der unterschiedlichen Abbildung der natürlichen Oberflächenfilme in den einzelnen Radarbändern sind in Abbildung 6.21 exemplarische Ausschnitte der Größe  $9 \text{ km} \times 7 \text{ km}$  für die drei Radarbänder, jeweils bei VV-Polarisation, gezeigt (die Dimensionen der gesamten zur Auswertung verwendeten SAR-Aufnahmen betragen  $71 \text{ km} \times 34 \text{ km}$ ). Deutlich zu erkennen ist die für natürliche Oberflächenfilme (bei niedriger Windgeschwindigkeit und Wasserströmung) typische Spiralgestalt der dunklen Signaturen (vgl. Abbildung 2.1). Um zuerst einige markante Einzelheiten in Abbildung 6.21 herauszustellen und da es sich teilweise um sehr feine Strukturen handelt, sind die Ausschnitte (relativ zu den bisherigen Abbildungen von SAR-Aufnahmen) größer dargestellt. Wiederum sind die Grauwerte der „filmfreien“ Wasseroberfläche aneinander angepaßt, so daß auch optische Abschätzungen des Radarkontrastes möglich sind (das Attribut „filmfrei“ kann hier nicht wörtlich genommen werden; vielmehr muß davon ausgegangen werden, daß mehr oder weniger der gesamte Bereich der Wasseroberfläche mit natürlichen Substanzen bedeckt ist, in Analogie zu den bisherigen Darstellungen wird dieser Begriff allerdings weiterhin benutzt).

Deutlichster Unterschied der drei SAR-Aufnahmen ist der geringere Kontrast im C-Band, während die großflächigen Filmabschnitte im L-Band am dunkelsten erscheinen. Aus den SAR-Aufnahmen berechnen sich mittlere Radar-Rückstreuquerschnitte der „filmfreien“ Wasseroberfläche als  $-16 \text{ dB}$  im L-Band,  $-17 \text{ dB}$  im C-Band und  $-25 \text{ dB}$  im X-Band. Daraus ergeben sich für die Signal-zu-Rausch-Verhältnisse etwa  $20 \text{ dB}$  im L-Band, etwa  $11 \text{ dB}$  im C-Band und  $12 \text{ dB}$  im X-Band [Freeman et al., 1995; Zink und Bamler, 1995]. In einem deutlich kleineren Signal-zu-Rausch-Verhältnis des C-Bandes kann demnach keine Begründung für die geringeren Kontraste liegen (immer unter der Voraussetzung, daß die Angaben für das Systemrauschen auch für diesen Aufnahmestreifen gelten).

Neben dem geringeren Kontrast im C-Band fallen aber bei einer genauen Betrachtung der Abbildung 6.21 weitere Details auf, an denen die Unterschiede in der Abbildung der Oberflächenfilme durch die drei Radarbänder deutlich werden und die im mittleren Ausschnitt mit Pfeilen markiert sind.

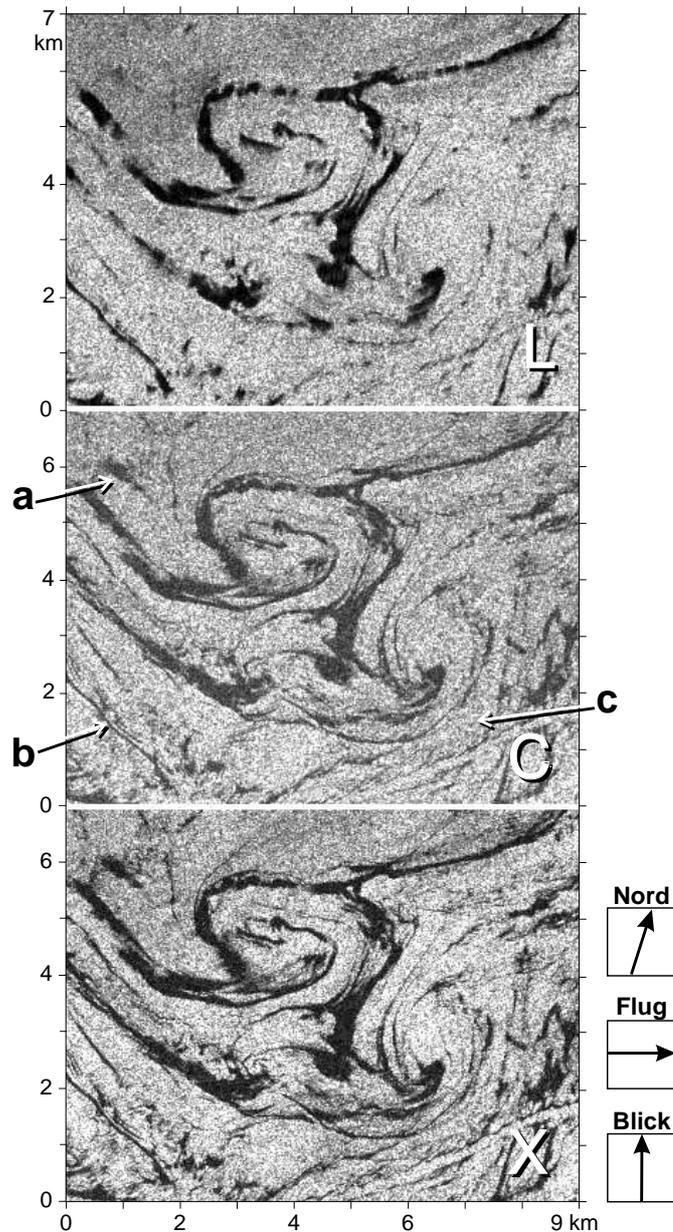


Abbildung 6.21: Ausschnitte aus den SIR-C/X-SAR-Aufnahmen von natürlichen Oberflächenfilmen im Gebiet der Nordsee, westlich der Nordspitze Dänemarks. Die Aufnahmen wurden im L-, C- und X-Band, jeweils bei VV-Polarisation gemacht. (© JPL, DLR, SRL-1, DT 47.10)

Markierung „a“ weist auf einen Fleck hin, der zwar im X-Band wieder dunkler abgebildet wird als im C-Band, der allerdings im L-Band nur sehr schwach auszumachen ist. Dadurch unterscheidet er sich erheblich von den benachbarten Flecken, die – was ja den oben beschriebenen Gesamteindruck ausmacht – im L-Band noch dunkler erscheinen als im X-Band. Eine exakte Ursache für diese drastischen Unterschiede kann hier nicht angegeben werden, da weder Filmsubstanz noch -alter bekannt sind.

Aus dem stark unterschiedlichen Dämpfungsverhalten kann aber in jedem Fall auf eine unterschiedliche Morphologie der Oberflächenfilme geschlossen werden, die ihre Ursache wiederum durchaus in einer anderen Filmsubstanz haben kann. Wie die Ergebnisse des zweiten Meßfluges mit dem HELISCAT am 18. April 1994 vor Helgoland allerdings gezeigt haben, kann auch dieselbe Substanz, bei unterschiedlichen Entstehungsmechanismen (also bei unterschiedlicher Art des Ausbringens), ein stark verändertes Dämpfungsverhalten zeigen. Bei einer genauen Betrachtung der drei Ausschnitte in Abbildung 6.21 finden sich auch weitere Filmabschnitte, die dieses unterschiedliche Dämpfungsverhalten zeigen, die aber mit großer Wahrscheinlichkeit natürlichen Ursprungs sind.

Markierung „b“ zeigt auf eine schmale dunkle, etwa in Ostwest-Richtung verlaufende Linie, die in allen drei Ausschnitten gleichermaßen gut zu erkennen ist. Bei einem Vergleich mit anderen Teilen der SAR-Aufnahmen stellt man fest, daß dunkle Linien dieser Breite sonst im L-Band weniger deutlich (oder überhaupt nicht) zu erkennen sind. In diesem Fall jedoch ist die Signatur des Oberflächenfilms im L-Band am breitesten, während das L-Band die anderen Oberflächenfilme eher mit geringerer Ausdehnung darstellt. Diese Beobachtungen lassen sicherlich noch weniger einen Schluß auf die Art des Oberflächenfilms zu als beim vorigen Beispiel. Als mögliche Ursache kommt hier die mechanische Einwirkung durch ein Schiff in Frage, das auf seiner Fahrt durch das filmbedeckte Gebiet eine Spur hinterlassen hat (dadurch ist dann auch die gradlinige Gestalt dieses Oberflächenfilms zu erklären). Im unteren rechten Viertel der Ausschnitte ist deutlich eine derartige Spur (*ship wake*) zu erkennen, deren Signatur in den drei Radarbändern ebenfalls unterschiedlich stark ausgeprägt ist.

Markierung „c“ schließlich zeigt ein Gebiet der Meeresoberfläche, das offensichtlich von einer gleichmäßigen Filmschicht bedeckt ist. Die Schiffsspur im X-Band, auf die eben schon hingewiesen worden ist, macht deutlich, daß der Radar-Rückstreuquerschnitt im X-Band etwas reduziert ist. Im C-Band ist diese Spur ebenfalls zu erkennen, im L-Band kaum. Wegen der großen Ausdehnung des filmbedeckten Bereiches ist jedoch damit zu rechnen, daß auch längere Braggwellen (wie die des L-Bandes) gedämpft werden, da sie über nichtlineare Wellenwechselwirkung Energie an die kürzeren Wellen verlieren [Alpers und Hühnerfuss, 1989].

In Abbildung 6.22 sind die berechneten Dämpfungsverhältnisse dargestellt, die die Bildanalyse der SAR-Aufnahmen ergab. Dabei sind in Abbildung 6.22a sämtliche Ergebnisse enthalten und in Abbildung 6.22b nur diejenigen, die den oben beschriebenen Filmabschnitten in Abbildung 6.21 entsprechen (daher auch nur in VV-Polarisation). Es zeigt sich, daß die Streuung sämtlicher Daten relativ groß ist, was nach der bisherigen Diskussion auch nicht überrascht, sondern vielmehr eine Bestätigung der Aussage ist, daß die Oberflächenfilme sehr inhomogen sind. Nur im X-Band erreichen einige Datenpunkte den (theoretischen) Wert des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses, man kann also davon ausgehen, daß das tatsächliche Dämpfungsvermögen der Oberflächenfilme teilweise noch größer ist als es die Meßergebnisse wiedergeben. Weder im L- noch im C-Band werden die theoretischen Werte für das Signal-zu-Rausch-Verhältnis jedoch erreicht, was zweierlei Ursachen haben kann:

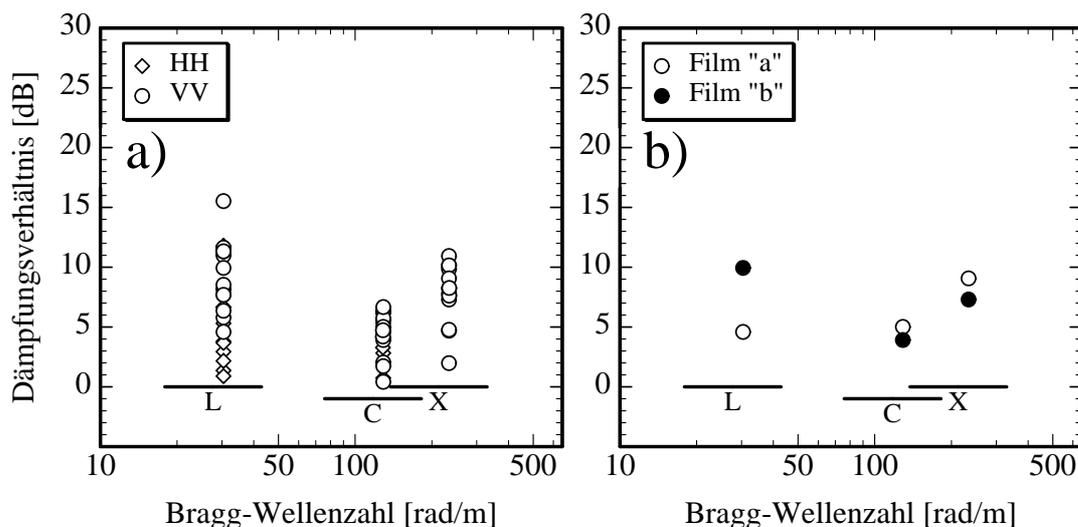


Abbildung 6.22: Darstellung der gemessenen Dämpfungsverhältnisse, die aus den SIR-C/X-SAR-Aufnahmen von natürlichen Oberflächenfilmen im Gebiet der Nordsee berechnet wurden: a) sämtliche Meßergebnisse, b) diejenigen Meßergebnisse für die im Text beschriebenen Filmabschnitte (vgl. Abbildung 6.21).

- Die von *Freeman et al.* [1995] angegeben Werte für das Systemrauschen liegen in diesem Fall höher, so daß das Signal-zu-Rausch-Verhältnis tatsächlich kleiner ist.
- Es handelt sich hier um „echte“ Dämpfungsverhältnisse, die nicht systembedingt verfälscht sind.

Im vorigen Abschnitt wurde zur Klärung dieser Frage die Betrachtung des Polarisationsverhältnisses vorgeschlagen. Die SIR-C/X-SAR-Aufnahmen sind im L-Band, bei HH-Polarisation, sehr durch Interferenzen gestört, so daß keine vernünftige Analyse des Polarisationsverhältnisses möglich ist (daher wird hier auf deren Darstellung verzichtet). Da sich die Oberflächenfilme aber – trotz Interferenzen – deutlich gegenüber der umgebenden Meeresoberfläche abheben, ist damit zu rechnen, daß zumindest bei HH-Polarisation im L-Band das Rauschniveau erreicht wird, was auch die deutlich niedrigeren Werte in Abbildung 6.22a erklärt. Im C-Band heben sich die Oberflächenfilme kaum von der umgebenden Meeresoberfläche ab, was ein Indiz dafür sein kann, daß hier noch nicht das Systemrauschen erreicht ist.

Es mag erstaunen, daß für den Film „a“ in Abbildung 6.22b im L- und C-Band etwa gleiche Dämpfungsverhältnisse gemessen wurden, der Film allerdings im Ausschnitt der SAR-Aufnahme im L-Band praktisch nicht zu erkennen ist. Dieser Effekt beruht auf der Angleichung der Grauwerte der „filmfreien“ Wasseroberfläche einerseits und der Grauwert-Skalierung andererseits. Da die Dynamik des rückgestreuten Radarsignals im L-Band sehr hoch ist, wird Film „a“ in der SAR-Aufnahme mit etwa demselben Grauwert abgebildet wie die umgebende Meeresoberfläche. Durch dieses Beispiel wird deutlich, daß eine optische Bildanalyse zu verkehrten Ergebnissen führen kann.

### 6.3.2 Natürliche Oberflächenfilme in der Ostsee

Während der beiden SIR-C/X-SAR-Missionen ist mehrfach auch das Gebiet der südlichen Ostsee aufgenommen worden. Vor allem während der ersten Mission im April 1994 waren auch hier, wie in der Nordsee, weite Flächen der Meeresoberfläche mit natürlichen Oberflächenfilmen bedeckt. Am 16. April 1994 um 09:41 MESZ wurden SIR-C/X-SAR-Aufnahmen vom Seegebiet nordöstlich der Insel Bornholm gemacht. Da die Oberflächenfilme dieselben Strukturen zeigen wie die in der Nordsee aufgenommenen und da bereits eine Aufnahme des ERS-1 von der südlichen Ostsee vorgestellt wurde, wird hier auf die Darstellung vergrößerten Ausschnitte verzichtet. Den Schiffsmeldungen zufolge war die Windgeschwindigkeit im interessierenden Bereich mit etwa 3–4 m/s etwas geringer als zuvor in der Nordsee. Diese SIR-C/X-SAR-Aufnahmen wurden unter einem Einfallswinkel von  $31^\circ$  gemacht, so daß nicht nur Art der Oberflächenfilme und Windgeschwindigkeit, sondern auch Bragg-Wellenzahlen und -längen nahezu mit denen der oben vorgestellten SAR-Aufnahmen übereinstimmen. Es ergeben sich daraufhin auch vergleichbare Werte für die Signal-zu-Rausch-Verhältnisse.

Die an mehreren Stellen der SAR-Aufnahmen durchgeführten Bildanalysen liefern eine qualitative Bestätigung der Ergebnisse des vorigen Abschnittes. In Abbildung 6.23 sind die gemessenen Dämpfungsverhältnisse dargestellt, und der Vergleich mit den Ergebnissen der Oberflächenfilme aus der Nordsee zeigt, daß sich die Daten sehr gut decken (da dieser Aufnahmestreifen in der Betriebsart 9 gemacht wurde, sind nur Aufnahmen in VV-Polarisation vorhanden (siehe Tabelle 4.3)).

- Die Streuung der Daten ist ebenfalls relativ groß, was wieder auf die Inhomogenität der Oberflächenfilme hindeutet.

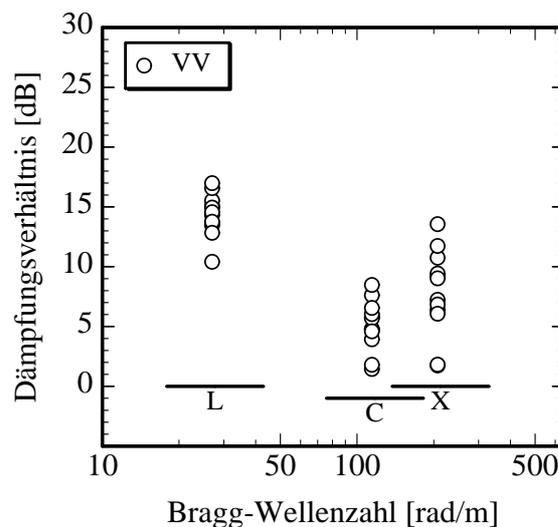


Abbildung 6.23: Dämpfungsverhältnisse von natürlichen Oberflächenfilmen in der Ostsee, die durch die Bildanalyse von SIR-C/X-SAR-Aufnahmen des Seegebietes nordöstlich von Bornholm stammen.

- Wiederum werden die größten Dämpfungsverhältnisse im L-Band gemessen, die kleinsten im C-Band (da hier keine Oberflächenfilme der Art wie Film „a“ in den Aufnahmen von der Nordsee untersucht wurden, zeigt Abbildung 6.23 ausschließlich relativ große Dämpfungsverhältnisse im L-Band).
- Die Meßergebnisse sind insgesamt – und zwar in allen Radarbändern – etwas größer als die der Oberflächenfilme in der Nordsee.

Der Vergleich der Dämpfungsverhältnisse, die aus den SIR-C/X-SAR-Aufnahmen von natürlichen Oberflächenfilmen in der Nord- und Ostsee berechnet wurden, zeigt dieselbe Tendenz zwischen den einzelnen Radarbändern, klärt allerdings nicht die Frage, ob es sich nun um „echte“ Werte oder systembedingte Reduzierungen der tatsächlichen Dämpfungsverhältnisse handelt.

### 6.3.3 Natürliche Oberflächenfilme im östlichen Pazifik

Der Golf von Mexiko sowie der Ostpazifik vor der Küste Mexikos sind während beider SIR-C/X-SAR-Missionen mehrfach überflogen und SAR-Aufnahmen von unterschiedlichen Oberflächenfilmen gemacht worden. Wegen der gegenüber den Verhältnissen in Nord- und Ostsee unterschiedlichen Randbedingungen stellen diese Seegebiete eine wichtige Ergänzung bei der Untersuchung von Radarsignaturen unterschiedlicher Oberflächenfilme dar.

In Abbildung 6.24 sind 12 km × 12 km große Ausschnitte aus SAR-Aufnahmen des östlichen Pazifiks, genauer dem Seegebiet vor dem Golf von Tehuantepec, dargestellt. Um den Vergleich mit den übrigen SAR-Aufnahmen zu ermöglichen (oder zu erleichtern), sind wieder Aufnahmen in den drei Radarbändern und jeweils bei VV-Polarisation dargestellt. Die SAR-Aufnahmen wurden unter einem steilen Einfallswinkel von  $24.6^\circ$  gemacht, die Bragg-Wellenzahlen im L-, C- und X-Band sind demnach 21.8 rad/m, 92.4 rad/m und 167.4 rad/m (und die entsprechenden Bragg-

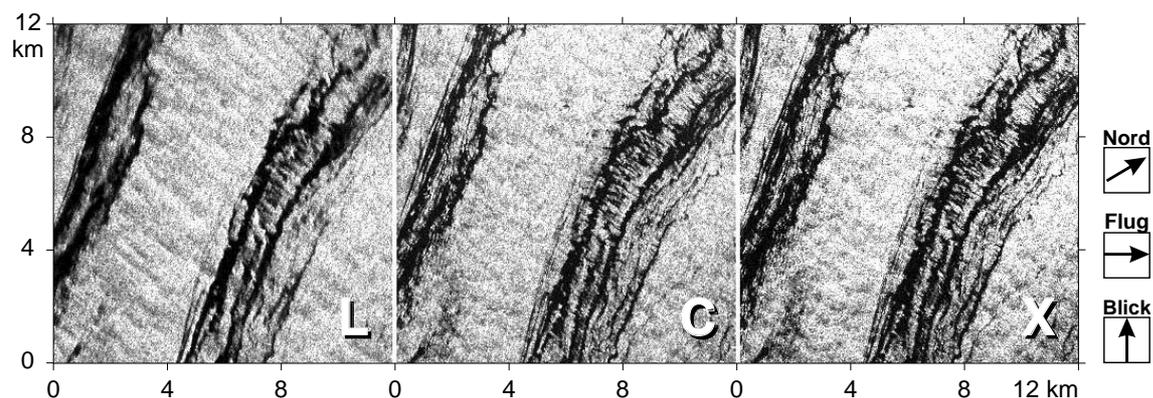


Abbildung 6.24: SIR-C/X-SAR-Aufnahmen von natürlichen Oberflächenfilmen im östlichen Pazifik, vor der mexikanischen Küste. Dargestellt sind die drei Aufnahmen im L-, C- und X-Band, jeweils bei VV-Polarisation.

(© JPL, DLR, SRL-1, DT 112.20)

Wellenlängen 28.8 cm, 6.8 cm und 3.8 cm). Wiederum dürfte die Windgeschwindigkeit in diesem Seegebiet zum Zeitpunkt der SAR-Aufnahmen kleiner gewesen sein als 5 m/s.

Die Aufnahmen in Abbildung 6.24 zeigen eine deutliche parallele Orientierung der Oberflächenfilme, die durch die Meeresströmung in diesem Seegebiet verursacht sein dürfte (entlang der mexikanischen Pazifikküste verlaufen die Ausläufer des pazifischen Äquatorial-Gegenstroms). Wiederum ist der Grauwert der „filmfreien“ Wasseroberfläche in den drei Ausschnitten angeglichen. In diesem Fall zeigt die SAR-Aufnahme im C-Band vergleichbare Kontraste wie die im L- und X-Band. Außerdem werden sämtliche Filmabschnitte in den drei Radarbändern gleichermaßen kontrastreich abgebildet; Unterschiede zwischen den drei Ausschnitten fallen vor allem in bezug auf die „filmfreie“ Wasseroberfläche auf, auf der atmosphärische Einflüsse (also Modulationen des Windfeldes) unterschiedlich deutlich abgebildet werden.

Die Ergebnisse der Bildanalysen sind in Abbildung 6.25 dargestellt. Es ergibt sich das mittlerweile bei der Betrachtung von Radarsignaturen natürlicher Oberflächenfilme gewohnte Bild:

- Der maximale Kontrast zwischen „filmfreier“ und filmbedeckter Wasseroberfläche wird im L-Band gemessen, der minimale im C-Band.

Auffallend im Vergleich zu den bisher vorgestellten Aufnahmen ist jedoch die deutlich geringere Streuung der Daten. Aus der Berechnung der mittleren Radar-Rückstreuquerschnitte der „filmfreien“ Wasseroberfläche von -13 dB, -11 dB und -15 dB im L-, C- und X-Band ergeben sich theoretische Signal-zu-Rausch-Verhältnisse von etwa 23 dB, etwa 17 dB und 24 dB, also relativ große Werte, die vor allem durch den kleinen Einfallswinkel bedingt sind.

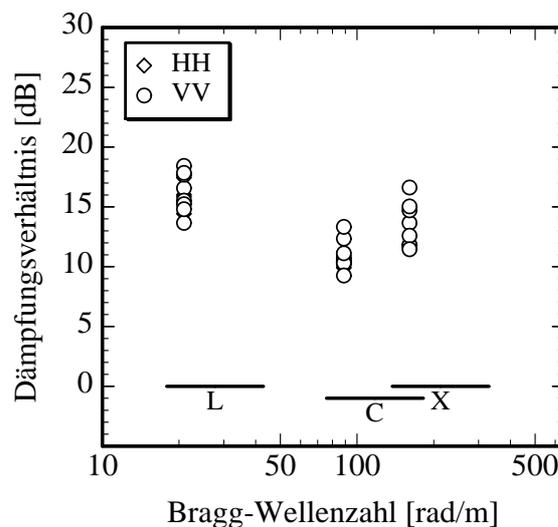


Abbildung 6.25: Dämpfungsverhältnisse der natürlichen Oberflächenfilme vor der mexikanischen Pazifikküste, die durch die Bildanalyse der SIR-C/X-SAR-Aufnahmen erzielt wurden.

Bei der Berechnung der gemessenen Dämpfungsverhältnisse stellte sich heraus, daß die Oberflächenfilme relativ zerfranst sind, so daß die Kurven für den Radar-Rückstreuquerschnitt eine größere Varianz zeigen. Die Mittelung in der bei sämtlichen SAR-Aufnahmen angewandten Art (also entlang der Schnittlinien) muß demnach etwas niedrigere Werte für die Dämpfungsverhältnisse liefern, da über die „Löcher“ in den Oberflächenfilmen hinweg gemittelt wurde. Da natürliche Oberflächenfilme aber, wie bereits erwähnt, eine starke Inhomogenität zeigen, ist grundsätzlich mit dieser Einschränkung zu rechnen.

### 6.3.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Auswertung der SAR-Aufnahmen von unterschiedlichen natürlichen Oberflächenfilmen hat in den drei vorgestellten Fällen vergleichbare Ergebnisse geliefert:

- Die Daten zeigen eine große Streuung, die durch die Inhomogenität der Oberflächenfilme (bzw. durch Bereiche unterschiedlichen Dämpfungsverhaltens) erklärt werden können.
- Die größten Dämpfungsverhältnisse werden im L-Band gemessen. Hier zeigt sich vor allem ein Unterschied zu denjenigen Dämpfungsverhältnissen, die bei der Bildanalyse für die beiden Oberflächenfilm-Experimente in der Deutschen Bucht berechnet wurden.
- Die niedrigsten Dämpfungsverhältnisse wurden im C-Band gemessen. Da das C-Band im allgemeinen auch das niedrigste Signal-zu-Rausch-Verhältnis aufweist, kann die Ursache also rein systembedingt sein.
- Im X-Band sind die gemessenen Dämpfungsverhältnisse vergleichbar mit denjenigen, die über dem OLA-Film beim ersten Oberflächenfilm-Experiment vor Sylt gemessen wurden.
- Insgesamt decken sich nur die Meßdaten im L-Band mit denen, die mit dem HELISCAT über natürlichen Oberflächenfilmen (im April 1994 vor Amrum) gemessen worden sind. Daß eine Übereinstimmung der Meßdaten nur im L-Band vorliegt, bestätigt die Vergleiche der Meßdaten beider Oberflächenfilm-Experimente.

Vor allem für die SAR-Aufnahmen der natürlichen Oberflächenfilme in der Nordsee wurde bereits erwähnt, daß auch in den „filmfreien“ Gebieten der Wasseroberfläche mit einer leichten Filmbedeckung zu rechnen ist. In diesem Fall wird also nicht das absolute Dämpfungsverhalten der Oberflächenfilme gemessen sondern nur der relative Unterschied zwischen Bereichen unterschiedlich starker Filmbedeckung. So sind Dämpfungskurven vorstellbar, deren Unterschiedlichkeit durch die in diesem Abschnitt vorgestellten Dämpfungsverhältnisse wiedergegeben wird.

Parallel zu den SAR-Aufnahmen der natürlichen Oberflächenfilme in der Nordsee fand am 12. April 1994 eine Unterfliegung mit dem DOSAR der Firma Dornier statt. Erste Analysen dieser SAR-Aufnahmen lieferten für die Diskussion des hier vorgestellten Datensatz wichtige Ergebnisse:

- Zwischen den in den Ausschnitten der SAR-Aufnahmen erkennbaren Oberflächenfilmen größerer Ausdehnung (vgl. Abbildung 6.21) befinden sich auch kleinere Filmabschnitte mit Ausdehnungen von nur wenigen Metern. Die höhere Auflösung des DOSARs ermöglicht die Identifikation dieser kleinen Filmabschnitte, während das SIR-C/X-SAR darüber hinwegmittelt.
- Auch mit dem DOSAR wurden im C- und X-Band Dämpfungsverhältnisse gemessen, die mit den hier vorgestellten vergleichbar sind. Da das Signal-zu-Rausch-Verhältnis beim DOSAR für die Messung auch größerer Dämpfungsverhältnisse hinreichend groß ist [P. Fischer, pers. Mitteilung], können diese Ergebnisse als eine (vorläufige) Bestätigung derjenigen des SIR-C/X-SAR gewertet werden. Hier wird eine weiterführende Bildanalyse sämtlicher mit dem DOSAR aufgenommenen natürlichen Oberflächenfilme für weitere Klarheit sorgen.

Mit dem HELISCAT sind am 18. April 1994 auch Messungen über natürlichen Oberflächenfilmen durchgeführt worden. Die Ergebnisse (Abschnitt 5.3) zeigen als Unterschied zu den künstlichen biogenen Oberflächenfilmen vor allem ein deutlich größeres Dämpfungsverhalten im L-Band. Diese Unterschiede werden durch die Analyse der SIR-C/X-SAR-Aufnahmen bestätigt. Nicht bestätigt werden allerdings die wesentlich größeren Dämpfungsverhältnisse, die das HELISCAT im C-Band gemessen hat (vgl. Abbildung 5.9). Der Unterschied kann darin begründet sein, daß es sich bei dem Seegebiet vor Amrum, das mit natürlichen Oberflächenfilmen bedeckt war, um eine kleinere Fläche handelt als bei den mehrere tausend Quadratkilometer großen Gebieten in der Nord- und Ostsee sowie im östlichen Pazifik. Außerdem liegen von keinem der betrachteten Seegebiete Proben der natürlichen Substanzen vor, so daß nicht geklärt werden kann, ob es sich um Substanzen unterschiedlichen Dämpfungsvermögens handelt.

Die Aufnahmen des DOSARs über natürlichen Oberflächenfilmen sind bereits mehrfach erwähnt worden. Auch vom ERS-1 liegen zahlreiche SAR-Aufnahmen, die natürliche Oberflächenfilme zeigen, vor. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis beim SAR des ERS-1 (und folgerichtig auch beim mittlerweile gestarteten ERS-2) ist häufig zu gering, um zuverlässige Aussagen über die Dämpfung der C-Band-Braggwellen zu machen (ERS-1 und ERS-2 arbeiten jeweils nur mit einem C-Band-SAR bei VV-Polarisation). Zur unterstützenden Untersuchung, beispielsweise im Vergleich mit DOSAR-Aufnahmen desselben Seegebietes, kann aber auf diesen Datensatz zurückgegriffen werden.

Die Inhomogenität der Oberflächenfilme sowie ihr zerfasertes Erscheinen auf der Meeresoberfläche führt dazu, daß die Methode, Dämpfungsverhältnisse mit Hilfe von geraden Schnittlinien zu berechnen, nicht immer verlässliche Ergebnisse liefert. Andere Auswertungsmethoden, die auf einer Texturerkennung beruhen, können eine Hilfe sein, die filmbedeckten Gebiete von den filmfreien zu separieren. Von *Barni et al.* [1995] ist beispielsweise ein Algorithmus zur Erkennung von Ölfilmen in SAR-Aufnahmen auf der Basis der *Fuzzy-Logik* vorgeschlagen worden. Ähnliche Verfahren werden bereits bei der Analyse von Röntgenaufnahmen eingesetzt (beispielsweise zur Tumorerkennung). Operationelle Systeme, die ERS-1-SAR-Aufnahmen für die Erkennung von Ölfilmen benutzen, arbeiten zur Zeit schon mit einer automatischen Textu-

rererkennung [Wahl et al., 1994; Sloggett und Jory, 1995], können aber wegen des einzelnen Aufnahmekanals keine vergleichenden Untersuchungen durchführen. Wenn die für die unterschiedlichen Oberflächenfilme charakteristischen Dämpfungseigenschaften (in den einzelnen Radarbändern und bei den unterschiedlichen Polarisationen) besser bekannt sind, kann in Zukunft mit Hilfe derartiger Techniken die Detektion von Mineralölfilmen verbessert werden. Bei der für die vorliegende Arbeit verwendeten Auswertungstechnik ist die Auswahl filmbedeckter (und filmfreier) Seegebiete subjektiv, was sich negativ auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse auswirken kann.

Zur Klärung der Frage, ob das rückgestreute Radarsignal im Systemrauschen untergeht, können die zugehörigen Histogramme herangezogen werden (Abbildung 6.26 und Abbildung 6.27). Hebt sich das Radarsignal vom Rauschuntergrund ab, so ist zu erwarten, daß die Meßwerte einer  $\chi^2$ -Verteilung unterliegen (die bei hinreichend großer Anzahl an Freiheitsgeraden gut durch eine Normalverteilung angenähert wird). Durch den Rauschuntergrund kann diese Verteilung beeinflusst („verbogen“) werden, wenn er zu dicht am Erwartungswert der Verteilung liegt, wenn das mittlere rückgestreute Radarsignal also zu schwach ist (da das Systemrauschen die Minimalgrenze der Meßwerte darstellt, würde das natürlich für jede beliebige Verteilung gelten).

In Abbildung 6.26 sind als Beispiele die Histogramme der drei in Abbildung 6.21 dargestellten Bildausschnitte der natürlichen Oberflächenfilme in der Nordsee dargestellt. Wegen einer besseren Übersichtlichkeit ist die linke untere Ecke im eingefügten Ausschnitt nochmals vergrößert. Das X-Band zeigt bei sehr niedrigen Werten für den Radar-Rückstreuquerschnitt einen abrupten Rückgang der Anzahl der Meßwerte (man

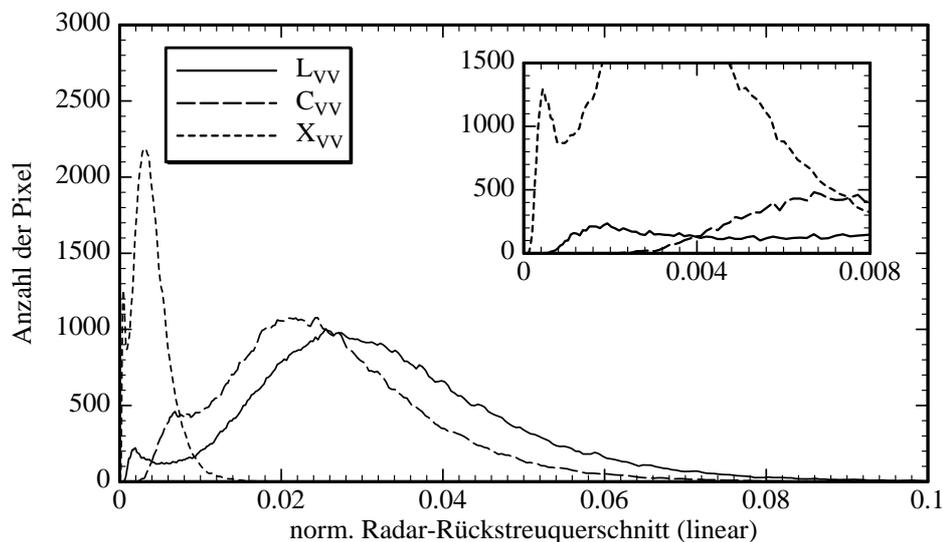


Abbildung 6.26: Histogramme der drei in Abbildung 6.21 dargestellten Ausschnitte von SAR-Aufnahmen natürlicher Oberflächenfilme in der Nordsee. Zusätzlich in das Diagramm eingetragen ist eine Vergrößerung des äußerst linken Teils, also des Bereiches für sehr niedrigen Radar-Rückstreuquerschnitt.

beachte den vergrößerten Ausschnitt). Dieser Effekt ist in dieser Deutlichkeit weder beim L- noch beim C-Band zu erkennen, trotzdem läßt der Verlauf der Verteilung der gemessenen Daten darauf schließen, daß auch in diesen beiden Radarbändern der Rauschuntergrund fast erreicht ist. Der Vergleich mit theoretischen Verteilungskurven liefert ebenfalls keine eindeutige Aussage über die Güte der Daten (zum Vergleich wurde – hier nicht dargestellt – die Summe zweier  $\chi^2$ -Verteilungen an die Daten angepaßt). Diese Analysen bestätigen jedoch die Abschätzungen, die bereits mit Hilfe der Angaben für das Systemrauschen und der mittleren Radar-Rückstreuquerschnitte getroffen wurden.

Abbildung 6.27 zeigt ebenfalls Histogramme, wobei hier die in Abbildung 6.24 dargestellten Ausschnitte zugrunde liegen. In diesem Fall ist der deutliche Rückgang der Anzahl der Meßwerte sowohl im X- als auch im L-Band zu erkennen. Für das C-Band ist die Abschätzung wiederum weniger einfach, aufgrund des höheren Rauschuntergrunds kann allerdings auch hier eine Verzerrung der Verteilung vorliegen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind keine weiterführenden statistischen Untersuchungen der Verteilungen der gemessenen Radar-Rückstreuquerschnitte vorgenommen worden; die hier exemplarisch vorgestellten Histogramme zeigen jedoch, daß mit Hilfe weiterführender Statistik zusätzliche Erkenntnisse über die Güte der gewonnenen Daten zu erhalten sind. Zukünftige Untersuchungen müssen hier weiteren Aufschluß darüber geben, inwieweit eine Verknüpfung von Kenntnissen des typischen Dämpfungsverhaltens einerseits mit einer Qualitätskontrolle der Meßdaten andererseits für die Klassifizierung von Oberflächenfilmen von Bedeutung sein kann.

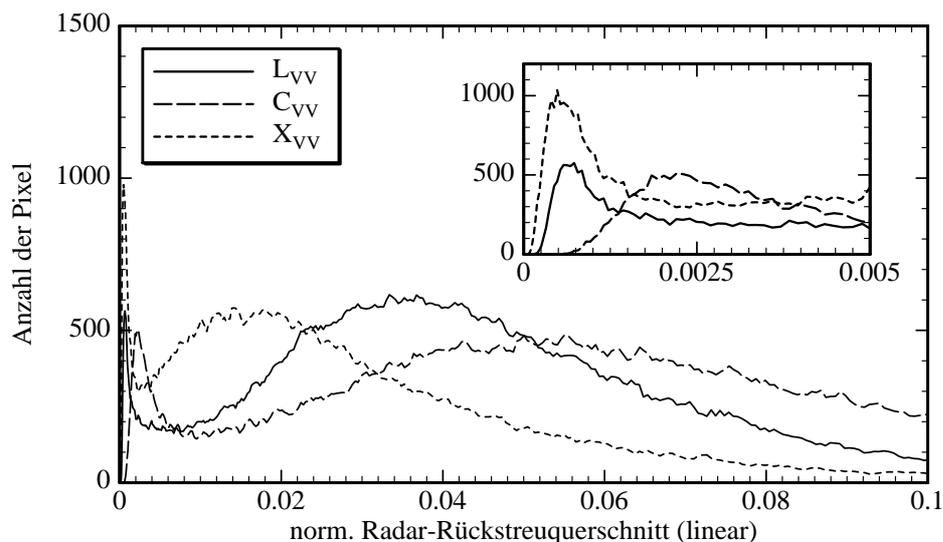


Abbildung 6.27: wie Abbildung 6.26, jedoch für die in Abbildung 6.24 dargestellten Ausschnitte von SAR-Aufnahmen natürlicher Oberflächenfilme im östl. Pazifik.

## 6.4 Beispiele für Mineralölfilme

Während beider SIR-C/X-SAR-Missionen sind nicht nur SAR-Aufnahmen von natürlichen Oberflächenfilmen gemacht worden sondern auch von Mineralölfilmen, teilweise sogar unmittelbar während oder nach dem Ablassen vom Schiff aus. Während die natürlichen Oberflächenfilme, wie beschrieben, vorwiegend bei niedrigen Windgeschwindigkeiten und in Küstengewässern an der Wasseroberfläche anzutreffen sind, liegt es in der Natur der Sache, daß Mineralölfilme grundsätzlich überall und bei jedem Wetter anzutreffen sein können (es ist sogar eher anzunehmen, daß eine Meeresverschmutzung bei rauher See und fernab der Küstengewässer durchgeführt wird, da so die Gefahr, entdeckt zu werden, geringer ist). In diesem Abschnitt werden einige Beispiele für derartige Verschmutzungen vorgestellt, wobei in einem Fall die Verschmutzung unmittelbar beobachtet wurde.

### 6.4.1 Inhomogener Mineralölfilm in der Ostsee

Während der ersten SIR-C/X-SAR-Mission im April 1994 wurden im Aufnahmestreifen (*Data take*) 112.20 SAR-Aufnahmen nicht nur von natürlichen Oberflächenfilmen in der Ostsee gemacht (vgl. Abschnitt 6.3.2), sondern es wurden, unweit dieses Gebietes, auch die Radarsignaturen eines Mineralölfilms aufgezeichnet. Die Ausschnitte der SAR-Aufnahmen in den drei Radarbändern sind in Abbildung 6.28 dargestellt, jeweils bei VV-Polarisation (in diesem Aufnahmestreifen wurden Aufnahmen ausschließlich bei VV-Polarisation gemacht). Der Oberflächenfilm hatte eine maximale Ausdehnung von etwa  $8 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ , die gesamte filmbedeckte Fläche betrug etwa  $15 \text{ km}^2$ . Der lokale Einfallswinkel dieser SAR-Aufnahmen (speziell des gewählten Ausschnittes) ist  $32^\circ$ , die Bragg-Wellenzahlen im L-, C- und X-Band daher  $27.7 \text{ rad/m}$ ,  $117.6 \text{ rad/m}$  und  $213.1 \text{ rad/m}$  und die entsprechenden Bragg-Wellenlängen  $22.6 \text{ cm}$ ,  $5.3 \text{ cm}$  und  $2.9 \text{ cm}$ . Die Windgeschwindigkeit in diesem Seegebiet, die sich aus Schiffsmeldungen ungefähr zur Aufnahmezeit herleiten läßt, erreichte etwa  $3 \text{ m/s}$ . Als

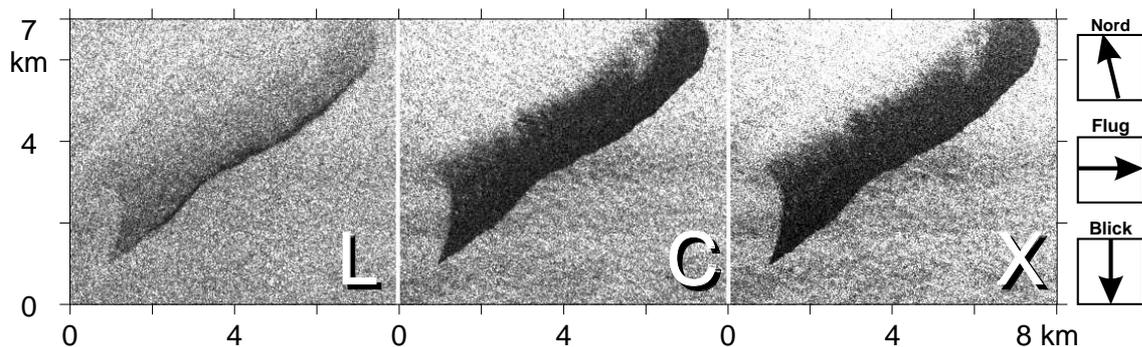


Abbildung 6.28: SIR-C/X-SAR-Aufnahmen eines Mineralölfilms in der südlichen Ostsee, aufgenommen am 16. April 1994. Dargestellt sind Ausschnitte der SAR-Aufnahmen in den drei Radarbändern, jeweils bei VV-Polarisation.

(© JPL, DLR, SRL-1, DT 112.20)

theoretische Signal-zu-Rausch-Verhältnisse wurden 20 dB, 10 dB und 14 dB (im L-, C- und X-Band) berechnet.

Deutlich zu erkennen ist der wesentlich geringere Kontrast im L-Band, während sich der Mineralölfilm sowohl im C- als auch im X-Band deutlich von der umgebenden Wasseroberfläche abhebt (daß es sich hierbei nicht allein um eine Auswirkung der Grauwert-Skalierung handelt, wird die nachfolgende Betrachtung der gemessenen Dämpfungsverhältnisse zeigen). Ebenso markant ist der inhomogene Kontrast, den dieser Oberflächenfilm im L-Band verursacht: Während er an seiner Südkante stärker geschwärzt ist, nimmt diese Schwärzung (und damit der Radarkontrast) nach Norden hin stetig ab. Beobachtungen während HELISCAT-Messungen über Mineralölfilmen in der Deutschen Bucht [Wismann *et al.*, 1996a] haben gezeigt, daß eine derartige Inhomogenität auf Einwirkungen des Windes zurückgeführt werden kann: Während dieser Messungen wurde die Filmsubstanz durch den Wind (die Windgeschwindigkeit war 7–9 m/s) zum leeseitigen Ende gedrückt und verursachte dort eine stärkere Dämpfung der Oberflächenwellen (und somit der gemessenen Dämpfungsverhältnisse). Schiffsmeldungen zufolge lag die Windgeschwindigkeit in diesem Seegebiet am Vortag oberhalb von 10 m/s und flaute während der Nacht ab; die Annahme, daß die beobachtete Inhomogenität durch Einflüsse des Windes verursacht wurde, ist also zulässig. Da in diesem Fall keine exakten Wettermeldungen vorliegen, kann nicht geklärt werden kann, ob die beobachtete Inhomogenität auf denselben Effekt zurückgeführt werden kann wie der von Wismann *et al.* [1996a] beschriebene.

Die Ergebnisse der Bildanalysen sind in Abbildung 6.29 dargestellt, wobei die Schnittlinien für die in Abbildung 6.29a dargestellten Ergebnisse über die gesamte Breite des Mineralölfilms verteilt wurden und in Abbildung 6.29b nur entlang des dicken Endes gemittelt wurde. Die Ergebnisse bestätigen (in diesem Fall) den optischen

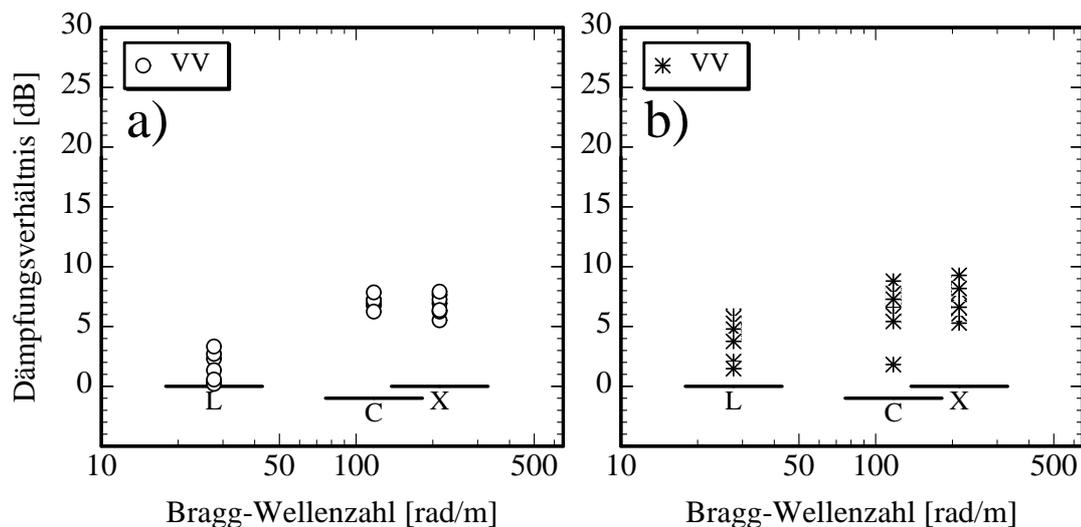


Abbildung 6.29: Dämpfungsverhältnisse des inhomogenen Mineralölfilms in der Ostsee am 16. April 1994, gemessen über a) die gesamte Filmbreite, b) nur den dickeren Rand (siehe Text).

Eindruck des Dämpfungsvermögens: Am dicken Ende des Oberflächenfilms zeigt sich im L-Band ein stärkeres Dämpfungsverhalten, während das C- und X-Band, von einer größeren Streuung der Daten abgesehen, in beiden Teilabbildungen gleichbleibende Dämpfungsverhältnisse liefern.

Ein weiteres interessantes Ergebnis sind die – über den gesamten Mineralölfilm – vergleichbaren Dämpfungsverhältnisse im C- und X-Band. Sowohl die über die gesamte filmbedeckte Fläche verteilten Schnittlinien als auch die auf das dicke Ende beschränkten zeigen, daß der Radar-Rückstreuquerschnitt in beiden Bändern etwa gleichermaßen reduziert wird. Hier liegt ein wesentlicher Unterschied zu den im vorigen Abschnitt untersuchten natürlichen Oberflächenfilmen.

Um die Inhomogenität dieses großflächigen Mineralölfilms und ihre Auswirkungen auf das lokale Dämpfungsverhalten zu untersuchen, wurden am westlichen Ende des Oberflächenfilms (also entlang der geschwungenen Kante an seinem linken Ende in Abbildung 6.28) parallele Schnittlinien mit einem jeweiligen Abstand von etwa 250 m definiert. Mit ihrer Hilfe soll der Wechsel im Dämpfungsverhalten zwischen dem dünnen Filmbereich (die obere Kante in Abbildung 6.28) und dem dicken Streifen (die untere Kante) untersucht werden. Abbildung 6.30 zeigt die Ergebnisse dieser Analyse, wobei die Größe der Kreise vom dünnen zum dicken Ende hin zunimmt (die größten Kreise entsprechen also dem Dämpfungsvermögen an der Seite mit größter Filmdicke, die kleinsten dem bei der geringsten Filmdicke). Um die Unterschiede besser hervorzuheben, wurde eine andere, vergrößerte Skalierung gewählt.

Abbildung 6.30 sind zwei Ergebnisse zu entnehmen:

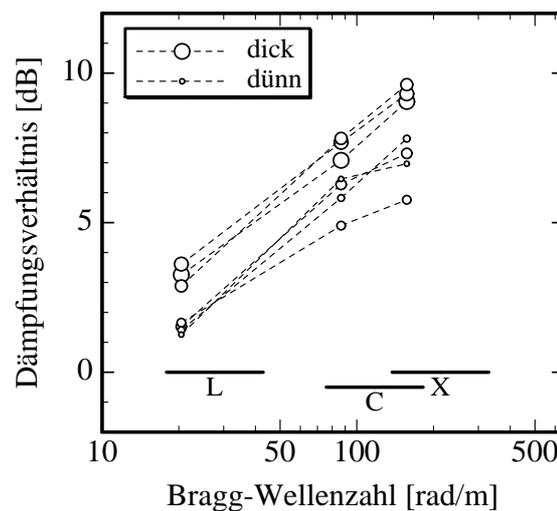


Abbildung 6.30: Dämpfungsverhalten des inhomogenen Mineralölfilms in der Ostsee. Die Größe der Symbole gibt die relative Position innerhalb des Films an (relativ zur Filmdicke, siehe Text). Man beachte die gegenüber den übrigen Grafiken unterschiedliche Skalierung.

- Das Dämpfungsvermögen nimmt, wie bereits in Abbildung 6.29 dargestellt, zum dicken Ende des Mineralölfilms hin zu: Die großen Symbole liegen in allen Radarbändern deutlich höher als die kleinen (dieser Sachverhalt wurde in Abbildung 6.29 wegen der unterschiedlichen Skalierung für das C- und X-Band weniger deutlich).
- Im Bereich der dicken Filmschicht (also für die drei größten Symbole) läßt sich das Dämpfungsverhalten sehr gut durch eine Gerade annähern. Im Bereich einer dünnen Filmschicht zeigen die Daten einen leichten Rückgang in der Steigung zwischen dem C- und dem X-Band.

Beide Effekte werden allerdings durch die hier gewählte Darstellung verstärkt, so daß sie in Abbildung 6.29 in dieser Deutlichkeit nicht aufgefallen sind. Das Abflachen der gemessenen Dämpfungskurven für den dünnen Filmbereich kann wiederum mit der von *Alpers und Hühnerfuss* [1988] geäußerten Vermutung erklärt werden, daß ein Anteil oberflächenaktiver Substanzen für dieses Dämpfungsverhalten verantwortlich ist (wegen der höheren Streitgeschwindigkeit dieser Substanzen ist außerdem damit zu rechnen, daß ihr Anteil am dünnen Ende des Mineralölfilms größer ist als am dicken Ende).

Unweit des hier vorgestellten Mineralölfilms wurde ein weiterer großflächiger Oberflächenfilm von den SIR-C/X-SAR-Sensoren erfaßt, der aufgrund seiner Gestalt allerdings nicht eindeutig als Mineralölfilm klassifiziert werden konnte, dessen Dämpfungsverhalten aber mit dem in diesem Abschnitt vorgestellten vergleichbar ist.

#### 6.4.2 Mineralölfilm in einem Regengebiet im Atlantik

Daß mit Hilfe eines weltraumgestützten SARs Umweltsünder auf frischer Tat aufgespürt werden können, macht ein Beispiel aus dem Nordatlantik deutlich, der am 12. April 1994 von der *Endeavour* überflogen wurde. Auf den Ausschnitten der SIR-C/X-SAR-Aufnahmen, die in Abbildung 6.31 dargestellt sind, ist ein Mineralölfilm, der gerade durch Ablassen von Öl von einem Schiff aus entsteht, als lange dunkle Linie zu erkennen. Das Schiff selber ist als heller Punkt am Westende des Ölfilms in der rechten unteren Bildecke zu sehen. Da es sich hier um denselben Aufnahmestreifen handelt, der auch die SAR-Aufnahmen der natürlichen Oberflächenfilme in der Nordsee lieferte, stimmen Einfallswinkel, Bragg-Wellenzahl und -länge mit den dort angegebenen überein (wenn man von geringfügigen Unterschieden durch einen etwas anderen lokalen Einfallswinkel absieht). Aus den Werten für den mittleren Radar-Rückstreuquerschnitt (über filmfreier Wasseroberfläche am Oberrand der Ausschnitte) berechnen sich maximale Werte für das Signal-zu-Rausch-Verhältnis von 22 dB (L-Band), 18 dB (C-Band) und 21 dB (X-Band). Schiffsmeldungen über die Wetterverhältnisse im aufgenommenen Seegebiet liegen in diesem Fall nicht vor. Anhand der Signaturen bzw. der Werte für die mittleren Radar-Rückstreuquerschnitte ist allerdings zu vermuten, daß die Windgeschwindigkeit größer war als 5 m/s.

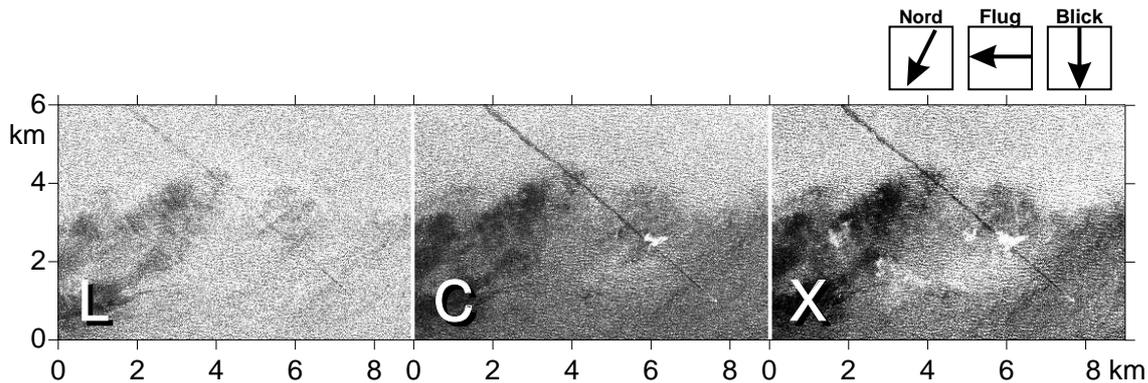


Abbildung 6.31: Ausschnitte von SIR-C/X-SAR-Aufnahmen eines Seegebietes im Nordatlantik. Der vor allem im C- und X-Band zu erkennende dunkle Streifen wird durch frisch entsorgtes Mineralöl verursacht (das Schiff ist als heller Punkt am westlichen Ende des Ölfilms zu erkennen). (© JPL, DLR; SRL-1, DT 47.10)

Zum Zeitpunkt der SAR-Aufnahmen war die Sonne gerade aufgegangen (Sonnenaufgang war um 07:09 UTC), ein großer Teil des erkennbaren Oberflächenfilms ist demnach bei Dunkelheit bzw. in der Morgendämmerung entsorgt worden. Außerdem befand sich an dieser Stelle des Nordatlantiks zu diesem Zeitpunkt gerade ein starkes Regengebiet: Die helle Signatur in der rechten Bildmitte, die vor allem im X-Band zu erkennen ist, wird durch starken Regen verursacht, der auf der Meeresoberfläche kleine (Ring-) Wellen erzeugt [vgl. *Melsheimer et al.*, 1996]. Unter diesen Bedingungen ist die Besatzung des Schiffes offensichtlich davon ausgegangen, daß ihre Umweltverschmutzung nicht aufzuspüren sei. Dieses Beispiel macht den großen Vorteil aktiver Radarverfahren bei der Ölüberwachung deutlich: Optische Verfahren hätten bei dieser Tageszeit und bei diesen Wetterbedingungen versagt.

Die Ergebnisse der Bildanalysen sind in Abbildung 6.32 dargestellt, wobei die Dämpfungsverhältnisse an unterschiedlichen Stellen des Mineralölfilms gemessen wurden:

- In einer Entfernung von etwa 6 km hinter dem Schiff, wo sich der Mineralölfilm an der Wasseroberfläche bereits ausgebreitet hat. In diesem Gebiet ist die Windgeschwindigkeit offensichtlich etwas größer als weiter nördlich (man beachte die unterschiedlichen Grauwerte der filmfreien Wasseroberfläche in Abbildung 6.31). Diese Ergebnisse sind in Abbildung 6.32a dargestellt.
- Unmittelbar hinter dem Schiff, wo der Mineralölfilm noch nicht fertig gespreitet ist und wo sich noch Einflüsse des Schiffes (wie Turbulenzen in der oberen Wasserschicht) bemerkbar machen. In diesem Gebiet ist die Windgeschwindigkeit offensichtlich etwas niedriger, was am dunkleren Grauton in Abbildung 6.31 zu erkennen ist. Möglich ist auch eine Dämpfung der Oberflächenwellen durch den (weniger starken) Regen. Abbildung 6.32b zeigt diese Dämpfungsverhältnisse.

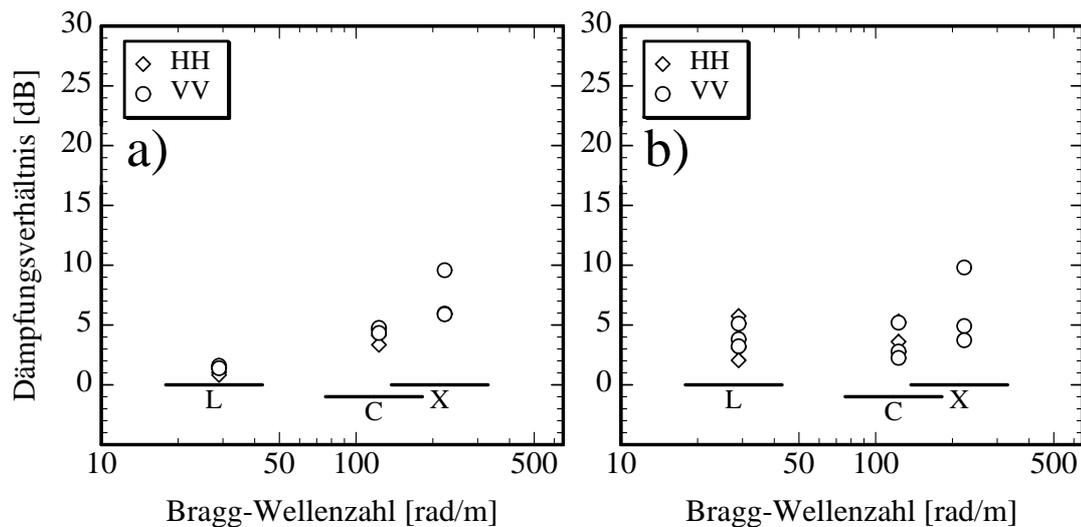


Abbildung 6.32: Dämpfungsverhältnisse des Mineralölfilms, der am 12. April 1994 im östlichen Atlantik aufgenommen wurde; a) etwa 6 km weit vom Schiff entfernt und b) direkt hinter dem Schiff gemessen.

Das Dämpfungsverhalten an beiden Stellen des Mineralölfilms unterscheidet sich vor allem bei niedrigen Bragg-Wellenzahlen, also im L-Band: Während in einer größeren Entfernung vom Schiff hier nur geringe Dämpfungsverhältnisse gemessen wurden, sind diese unmittelbar hinter dem Schiff mit denen des C-Bands vergleichbar. Ursache hierfür ist vermutlich, daß durch die Turbulenzen, die in der Schiffsspur erzeugt werden, auch längere Oberflächenwellen gedämpft werden. Nach einigen Minuten sind diese Turbulenzen dann abgeklungen, so daß nur noch die viskose Dämpfung des Oberflächenfilms eine Rolle spielt (natürlich sind überall sämtliche Quellterme von Bedeutung).

Das in einer hinreichenden Entfernung vom Schiff gemessene Dämpfungsverhalten bestätigt wiederum die Ergebnisse des Mineralölfilms in der Ostsee (Abbildung 6.29): Die Dämpfungsverhältnisse steigen mit der Bragg-Wellenzahl an; sie fallen im C-Band etwas niedriger aus, was mit der höheren Windgeschwindigkeit zu erklären ist (vgl. Kapitel 5). Auch in diesem Fall wurde keine signifikante Abhängigkeit der gemessenen Dämpfungsverhältnisse von der Polarisierung festgestellt.

Untersuchungen der Polarisationsverhältnisse im L- und C-Band zeigten keine sichtbaren Unterschiede zwischen filmfreier und filmbedeckter Wasseroberfläche. Nach der in Abschnitt 6.1.2 geführten Diskussion ist das auch nicht zu erwarten, da die theoretischen Signal-zu-Rausch-Verhältnisse in beiden Radarbändern wesentlich größer sind als die Reduktionen des Radar-Rückstreuquerschnitts durch den Oberflächenfilm.

### 6.4.3 Mineralölfilme im Persischen Golf

Während der ersten SIR-C/X-SAR-Mission wurden SAR-Aufnahmen des Persischen Golfs gemacht, auf denen in großen Gebieten große Ölfilme zu erkennen sind. Die Verladung von Mineralöl sowie der rege Schiffsverkehr führen dazu, daß in diesem Seegebiet häufig Mineralölfilme an der Meeresoberfläche anzutreffen sind. Mehrere dieser Aufnahmen wurden ebenfalls in Hinblick auf das Dämpfungsverhalten der Oberflächenfilme hin untersucht.

Auf eine Darstellung der Ausschnitte der SIR-C/X-SAR-Aufnahmen wird hier verzichtet, da sie keine neuen Informationen liefern. Der Einfallswinkel dieses Aufnahmestreifens (123.12) war  $34.71^\circ$ , ist also vergleichbar mit denen der bisher vorgestellten SAR-Aufnahmen von Mineralölfilmen. Die Bragg-Wellenzahlen sind 29.8 rad/m, 126.4 rad/m und 229.0 rad/m und die entsprechenden Bragg-Wellenlängen 21.1 cm, 5.0 cm und 2.7 cm. Der Aufnahmestreifen wurde in der Betriebsart 11x gemacht, es liegen also im L- und C-Band nur Daten horizontaler Polarisation vor (siehe Tabelle 4.3). Für diese Aufnahme liegen ebenfalls keine exakten Wetterdaten vor; aus den mittleren Radar-Rückstreuquerschnitten wird allerdings auf eine Windgeschwindigkeit unterhalb von 5 m/s geschlossen. Aus den mittleren Radar-Rückstreuquerschnitten über filmfreier Wasseroberfläche berechnen sich Signal-zu-Rausch-Verhältnisse von etwa 17 dB im L-Band, etwa 10 dB im C-Band und 17 dB im X-Band (dabei wurde für die horizontale Polarisation ein Systemrauschen der gleichen Intensität wie für vertikale Polarisation vorausgesetzt – eine Annahme, die bei der bisherigen Diskussion, auch in Ermangelung genauerer Daten, immer gemacht wurde).

Die in Abbildung 6.33 dargestellten Dämpfungsverhältnisse dieser Mineralölfilme bestätigen die Aussagen aus Kapitel 5 bzw. den in Abbildung 6.32 gezeigten Unterschied zwischen Gebieten mit unterschiedlich hoher Windgeschwindigkeit: Da die Windgeschwindigkeit im untersuchten Seegebiet zur Zeit der SAR-Aufnahmen relativ

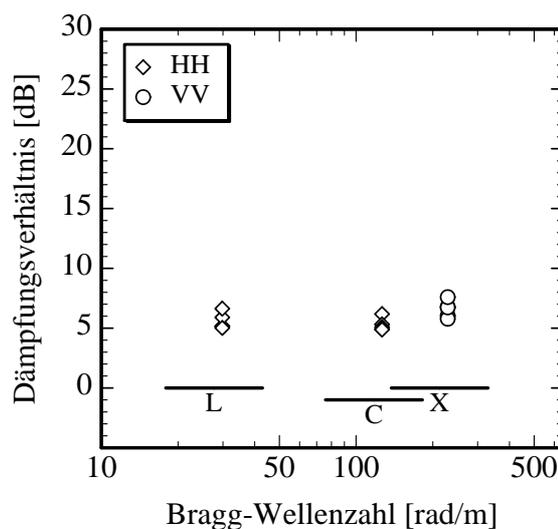


Abbildung 6.33: Dämpfungsverhältnisse für die Mineralölfilme im Persischen Golf.

niedrig war, liefert die Bildanalyse der L-Band-SAR-Aufnahme wieder niedrigere Dämpfungsverhältnisse, als es im Falle einer höheren Windgeschwindigkeit zu erwarten gewesen wäre. Offensichtlich gleichen sich die Dämpfungsverhältnisse im L- und C-Band bei sinkender Windgeschwindigkeit an, während das Dämpfungsverhältnis im X-Band stets größer bleibt.

#### 6.4.4 Mineralölfilme in der Straße von Malacca

Als abschließendes Beispiel für die Abbildung von Mineralölfilmen durch das SIR-C/X-SAR wurden Aufnahmen eines Seegebietes in der nördlichen Straße von Malacca zwischen Malaysia und Sumatra ausgewählt. Der in Abbildung 6.34 abgebildete Mineralölfilm (das Erscheinungsbild läßt auch hier auf Mineralöl schließen) wurde am 18. April 1994 (Ortszeit) südlich der Insel Pinang aufgenommen.

Die drei Ausschnitte der SIR-C/X-SAR-Aufnahmen sind jeweils  $7 \text{ km} \times 7 \text{ km}$  groß, die Ausdehnung des Mineralölfilms ist etwa  $4.3 \text{ km}^2$ . Diese SAR-Aufnahmen wurden unter einem relativ steilen Einfallswinkel von ungefähr  $20^\circ$  gemacht, so daß die Bragg-Wellenzahlen mit  $16.2 \text{ rad/m}$ ,  $68.6 \text{ rad/m}$  und  $124.3 \text{ rad/m}$  recht klein und die Bragg-Wellenlängen mit  $38.8 \text{ cm}$ ,  $9.2 \text{ cm}$  und  $5.2 \text{ cm}$  recht groß sind (jeweils im L-, C- und X-Band). Damit ist die Bedingung für Bragg-Streuung (vgl. Abschnitt 3.1.1) gerade noch erfüllt, so daß die gewonnenen Daten (eventuell mit den zu diskutierenden Abstrichen) für die Auswertung herangezogen werden können. Auch in diesem Fall zeigen starke Signaturen im X-Band (nicht in den hier dargestellten Ausschnitten), daß es in diesem Seegebiet zum Zeitpunkt der SAR-Aufnahmen zu starken Regenfällen kam (die Regenzellen befinden sich allerdings in einer Entfernung von etwa  $25 \text{ km}$  von dem Mineralölfilm, so daß nicht davon auszugehen ist, daß sein Dämpfungsverhalten durch starke Regenschauer beeinflusst wird). Zuverlässige Angaben über die genaue Windgeschwindigkeit liegen nicht vor, es wird eine moderate Windgeschwindigkeit von etwa  $5 \text{ m/s}$  angenommen. Die theoretischen Signal-zu-Rausch-

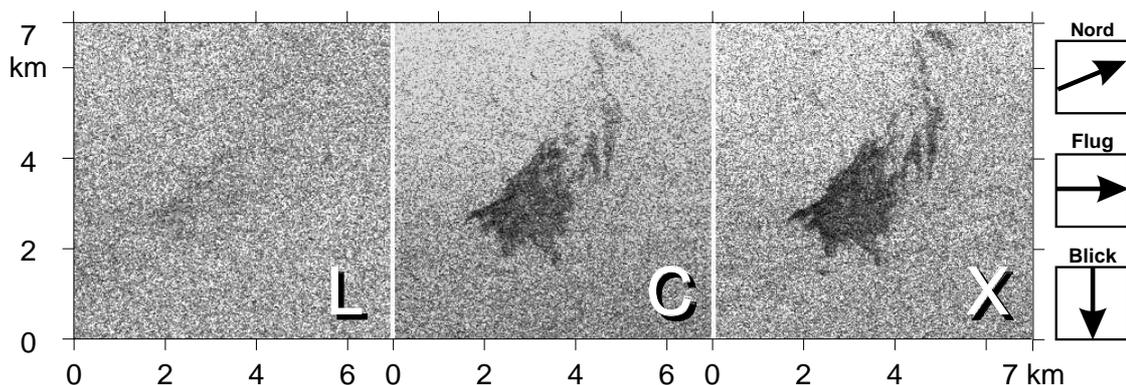


Abbildung 6.34: Ausschnitte aus SIR-C/X-SAR-Aufnahmen eines Seegebietes in der nördlichen Straße von Malacca. Vor allem im C- und X-Band (jeweils bei VV-Polarisation) ist der große Mineralölfilm zu erkennen.

Verhältnisse im L-, C- und X-Band berechnen sich zu etwa 29 dB, etwa 25 dB und 37 dB (die Werte sind wegen des niedrigen Einfallswinkels extrem hoch).

Bei der Betrachtung der drei Ausschnitte in Abbildung 6.34 fällt auf, daß der Mineralölfilm wiederum im L-Band kaum zu erkennen ist, was hier nicht auf eine ungeeignete Skalierung der Grauwerte zurückgeführt werden kann (da es keine stärker dämpfenden Filmabschnitte wie beispielsweise in Abbildung 6.21 gibt). Dieser Eindruck wird durch die in Abbildung 6.35 dargestellten Dämpfungsverhältnisse bestätigt:

- Bei VV-Polarisation sind die gemessenen Dämpfungsverhältnisse im L-Band sehr gering, während sie zum C- und X-Band hin monoton ansteigen.
- Im C-Band liegen die Dämpfungsverhältnisse bei den Kreuzpolarisationen wieder unterhalb derer für die Kopolarisationen. Im L-Band tritt der umgekehrte Effekt auf.
- Insgesamt werden relativ niedrige Dämpfungsverhältnisse gemessen (die Maximalwerte im X-Band liegen noch unterhalb von 6 dB).

Der monotone Anstieg der Dämpfungsverhältnisse mit der Bragg-Wellenzahl tritt offensichtlich bei fast allen Oberflächenfilmen dieser Art auf. Er läßt sich, wie bereits beschrieben, mit der viskosen Dämpfung durch das Mineralöl erklären.

Die Dämpfungsverhältnisse der Kreuzpolarisationen im C-Band sind auch bei den natürlichen Oberflächenfilmen im östlichen Pazifik bereits niedriger ausgefallen als diejenigen der Kopolarisationen (vgl. Abschnitt 6.3.3). Da der Einfallswinkel auch bei dem dortigen Aufnahmestreifen mit  $23.5^\circ$  relativ klein war, kann es sich um einen Effekt handeln, der in der Aufnahmegeometrie begründet ist.

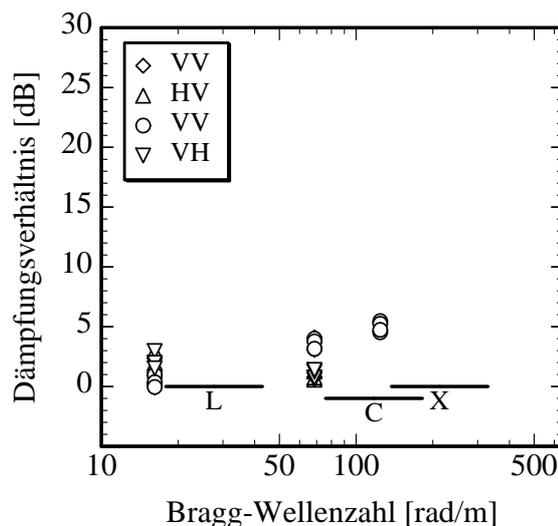


Abbildung 6.35: Dämpfungsverhältnisse für den in Abbildung 6.34 gezeigten Mineralölfilm in der nördlichen Straße von Malacca.

Bei derart niedrigen Einfallswinkeln spielen auch andere Streumechanismen als die Bragg-Streuung eine Rolle (vor allem die spekulare Reflexion [Valenzuela, 1978]), die zu veränderten Dämpfungsverhältnissen führen können (der Anteil an spekularer Reflexion sollte zu einer Reduktion der gemessenen Dämpfungsverhältnisse führen, da die geglättete Wasseroberfläche diese Art der Rückstreuung verstärken muß). Diese Überlegungen können die insgesamt niedrigeren Meßwerte erklären.

Unweit des in Abbildung 6.34 gezeigten Films wurde ein weiterer Mineralölfilm geringerer Ausdehnung vom SIR-C/X-SAR aufgenommen. Auf die Darstellung dieses Oberflächenfilms wird verzichtet, in Abbildung 6.36 sind jedoch die gemessenen Dämpfungsverhältnisse gezeigt.

Beim Vergleich der beiden Mineralölfilme (bzw. der gemessenen Dämpfungsverhältnisse in Abbildung 6.35 und Abbildung 6.36) fällt auf, daß dieser zweite Oberflächenfilm, vor allem im C- und X-Band, deutlich größere Werte bewirkt als der erste, oben vorgestellte. In diesem Fall ist, da sich der zweite Film an der dem SAR abgewandten Seite der Aufnahme befindet, der Einfallswinkel etwas größer ( $22^\circ$ , die Bragg-Wellenzahlen sind also  $19.7 \text{ rad/m}$ ,  $83.7 \text{ rad/m}$  und  $151.6 \text{ rad/m}$  und die Bragg-Wellenlängen  $31.8 \text{ cm}$ ,  $7.5 \text{ cm}$  und  $4.1 \text{ cm}$ ). Dadurch kann wiederum der Anteil spekularer Reflexion geringer sein, was, der obigen Argumentation folgend, zu größeren Werten für die Dämpfungsverhältnisse führen muß.

Der Anstieg der gemessenen Dämpfungsverhältnisse vom C- zum X-Band fällt beim zweiten Mineralölfilm nicht mehr so deutlich aus wie beim ersten. Ob dieser Effekt durch den etwas größeren Einfallswinkel bedingt ist oder ob – was wahrscheinlicher ist – ein anderes Dämpfungsverhalten (und bei derselben Filmsubstanz eine veränderte Morphologie) vorliegt, konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht geklärt werden. Hier können zukünftige Messungen einen weiteren Aufschluß über die

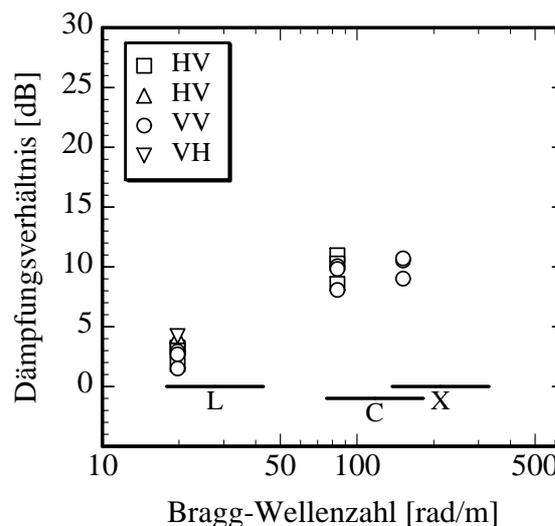


Abbildung 6.36: Dämpfungsverhältnisse eines weiteren Mineralölfilms in der nördliche Straße von Malacca (siehe Text).

Abbildung von Oberflächenfilmen durch ein SAR geben.

#### 6.4.5 Polarimetrische Untersuchungen

Insgesamt liegen zum Zeitpunkt der Fertigstellung der vorliegenden Arbeit nur wenige voll-polarimetrische SIR-C/X-SAR-Aufnahmen von Oberflächenfilmen vor. Wesentliche Ergebnisse sind bereits in Abschnitt 6.2.2 vorgestellt worden, auf eine Darstellung sämtlicher weiterer polarer Signaturen wird daher verzichtet.

Während der ersten SIR-C/X-SAR-Mission wurde im Gebiet des östlichen Pazifik, in unmittelbarer Nachbarschaft zu den in Abbildung 6.24 gezeigten natürlichen Oberflächenfilmen, die Signatur eines langgestreckten Oberflächenfilms aufgenommen, der höchstwahrscheinlich aus Mineralöl bestand (eine genaue Aussage ist hier nicht möglich, da die eindeutigen Kriterien, die in den übrigen Fällen zu einer Unterscheidung zwischen natürlichen Oberflächenfilmen und Mineralölfilmen führten, nicht erfüllt sind). Für diesen Oberflächenfilm sind Kopolarisations-Signaturen sowohl

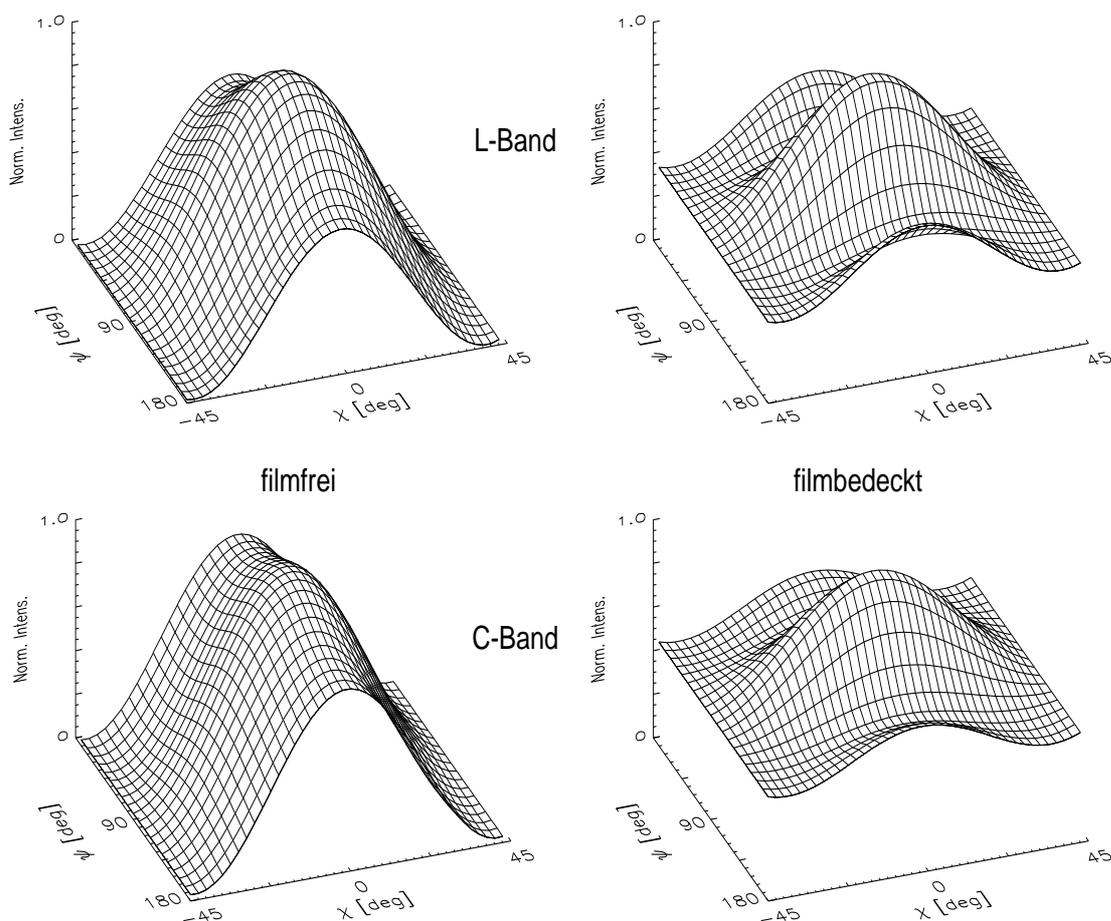


Abbildung 6.37: Kopolare Signaturen im L-Band (oben) und C-Band (unten) zweier Bildausschnitte einer filmfreien (links) und mit einem Oberflächenfilm bedeckten (rechts) Wasseroberfläche im östlichen Pazifik.

für filmbedeckte als auch für filmfreie Wasseroberflächen berechnet worden und sind in Abbildung 6.37 dargestellt. Die Unterschiede zu den in Abbildung 6.13 bis Abbildung 6.15 dargestellten Kopolarisations-Signaturen, die die SIR-C/X-SAR-Aufnahmen des zweiten Oberflächenfilm-Experimentes ergeben haben, sind offensichtlich:

- Für die filmfreie Wasseroberfläche ist das Polarisationsverhältnis (also die „Öffnung“ der Kopolarisations-Signatur an der dem Betrachter zugewandten Seite) wesentlich größer. Das deutet auf einen höheren Anteil an spekularer Reflexion hin, der in diesem Fall, bei einem lokalen Einfallswinkel von  $24.6^\circ$ , auftritt.
- Für die filmbedeckte Wasseroberfläche haben die Kopolarisations-Signaturen im Prinzip dieselbe Gestalt wie bei den Oberflächenfilmen in der Deutschen Bucht mit Ausnahme des „Podestes“, also des Abstandes, mit dem die Signatur über dem Untergrund „schwebt“. Ein derart vergrößerter Abstand ist mit einem höheren Rauschanteil im Radarsignal zu erklären.
- Der Vergleich der Polarisations-Signaturen für die beiden Radarbänder zeigt, daß sowohl der Anteil an spekularer Reflexion über filmfreier Wasseroberfläche als auch der Rauschanteil über filmbedeckter Wasseroberfläche jeweils im C-Band größer sind.

Auch in diesem Fall wird auf die Darstellung der Kreuzpolarisations-Signaturen verzichtet.

#### 6.4.6 Diskussion der Ergebnisse

Eine erste Diskussion der Ergebnisse erfolgte, wegen der unterschiedlichen Aufnahmen (und daher auch Mineralölfilme), schon teilweise bei der Vorstellung der einzelnen SAR-Aufnahmen. Es lassen sich aber einige Gemeinsamkeiten für die Abbildung von Mineralölfilmen durch das SIR-C/X-SAR herausstellen:

- Es wurde in allen Fällen ein Anstieg der gemessenen Dämpfungsverhältnisse mit der Bragg-Wellenzahl gemessen. Dieser Anstieg ist durch die rein viskose Dämpfung des Mineralöls zu erklären. Die Meßergebnisse mit dem HELISCAT (Abschnitt 5.4.4) haben gezeigt, daß für einen rein viskos dämpfenden Oberflächenfilm ein linearer Anstieg der Dämpfungskurve (in doppelt logarithmischer Darstellung) zu erwarten ist.
- Die Stärke dieses Anstieges ist abhängig von der Dicke der Filmschicht. Dieses – einsichtige – Ergebnis zeigt, daß die theoretischen Ansätze für eine Erklärung der gemessenen Dämpfungsverhältnisse richtig sind.
- Bei dünnen Filmbereichen ist der Anstieg zwischen den Meßdaten vom C- und X-Band geringer. Das Dämpfungsverhalten gleicht sich demnach dem der biogenen Substanzen an, die während der beiden Oberflächenfilm-Experimente in der Deutschen Bucht vom SIR-C/X-SAR aufgenommen wurden. Ursache hierfür kann eine *Verwitterung* der Filmsubstanz sein, so daß ein Anteil an oberflächen-

aktiven Substanzen für dieses Dämpfungsverhalten sorgt [Alpers und Hühnerfuss, 1988].

- Die Dämpfungsverhältnisse zeigen dieselbe Windabhängigkeit, die auch schon vom HELISCAT für biogene Oberflächenfilme gemessen wurde: Bei einer höheren Windgeschwindigkeit werden niedrigere Werte gemessen. Diese Abhängigkeit ist in Kapitel 5 bereits theoretisch erklärt worden. Da allerdings für die vorgestellten SAR-Aufnahmen im allgemeinen keine exakten Daten über die Wetterverhältnisse zum Zeitpunkt der Aufnahme vorliegen, können die Abschätzungen hier auch nur grob und qualitativ bleiben.
- Teilweise ist eine Abhängigkeit des gemessenen Dämpfungsverhaltens von der Polarisierung zu beobachten. Da sich diese Abhängigkeit aber vor allem auf den Unterschied zwischen Kreuz- und Kopolarisationen beschränkt, kann die Ursache hierfür systembedingt sein oder an der Aufnahmegeometrie liegen. In jedem Fall wurde keinerlei derartige Abhängigkeit, weder mit dem HELISCAT noch mit dem SIR-C/X-SAR, während der beiden Oberflächenfilm-Experimente in der Deutschen Bucht (bei größerem Einfallswinkel und höherer Windgeschwindigkeit) gemessen.

Von besonderem Interesse ist nun der Vergleich zwischen den natürlichen Oberflächenfilmen in der Ostsee und dem „benachbarten“ Mineralölfilm, deren Ergebnisse in Abbildung 6.23 resp. Abbildung 6.29 dargestellt sind, da die Dämpfungsverhältnisse unter weitgehend gleichen Rahmenbedingungen ermittelt wurden. Die Unterschiede fallen sofort ins Auge:

- Während das L-Band für den Mineralölfilm Dämpfungsverhältnisse von nicht mehr als 6 dB mißt, liegen die entsprechenden Werte für die natürlichen Oberflächenfilme alle oberhalb von 10 dB. Es gibt keinerlei Überlappen zwischen den beiden Meßwert-Gruppen. Hier zeigt sich eine deutliche Bestätigung der HELISCAT-Ergebnisse über natürlichen Oberflächenfilmen in der Deutschen Bucht (Abschnitt 5.3) und über Mineralölfilmen [Wismann *et al.*, 1996a]. Wiederrum wird bestätigt, daß die Meßwerte vom HELISCAT und vom SIR-C/X-SAR im L-Band vergleichbar sind.
- Im C-Band stimmen die gemessenen Dämpfungsverhältnisse für beide Filmarten – von der größeren Streuung der Daten bei den natürlichen Oberflächenfilmen abgesehen – teilweise überein. Bei den natürlichen Oberflächenfilmen werden allerdings mitunter auch geringere Dämpfungsverhältnisse gemessen als beim Mineralölfilm.
- Im X-Band liegen die gemessenen Dämpfungsverhältnisse des Mineralölfilms am unteren Rand der Meßwert-Gruppe, die für die natürlichen Oberflächenfilme gemessen wurde (wenn man den einen, sehr niedrigen Meßwert in Abbildung 6.23 als Ausreißer interpretiert). Für das Mineralöl werden demnach vom SIR-C/X-SAR im X-Band ebenfalls niedrigere Dämpfungsverhältnisse gemessen, wenn der Unterschied auch nicht so deutlich ausfällt wie im L-Band.

Die für beide Filmarten gleichen Werte, die im C-Band gemessen wurden, können durch ein zu niedriges Signal-zu-Rausch-Verhältnis erklärt werden: In einem solchen Fall müssen sämtliche Dämpfungsverhältnisse etwa gleich sein. Da die von *Freeman et al.* [1995] angegebenen Werte für das Systemrauschen – wie bereits erwähnt – nicht zwangsläufig auch für diese Aufnahmen gültig sind, kann nicht ausgeschlossen werden, daß die Gleichheit der Meßwerte in diesem Fall systembedingt ist. Sollte es sich allerdings um „echte“ Dämpfungsverhältnisse handeln, so wäre das insofern bemerkenswert, als die Satelliten ERS-1 und ERS-2, mit deren Hilfe ja unter anderem auch Ölverschmutzung detektiert werden soll, gerade mit einem C-Band-SAR ausgestattet sind.

Die vorgestellten Ergebnisse der Polarisationsanalyse bestätigen, daß bei steilen Einfallswinkeln und niedriger Windgeschwindigkeit andere Streumechanismen als Bragg-Streuung eine Rolle spielen können. Sie zeigen allerdings auch, daß das Systemrauschen unter diesen Bedingungen einen relativ hohen Anteil am Gesamtsignal haben kann.

Radarmessungen über Mineralölfilmen wurden auch von anderen Autoren sowohl in Feldexperimenten [*Johnson und Croswell*, 1982; *Neville et al.*, 1984; *Singh et al.*, 1986] als auch im Labor [*Soofi et al.*, 1980] durchgeführt.

Die Unterschiede im Kontrast in L- und X-Band-SAR-Aufnahmen von Mineralölfilmen, die in der vorliegenden Arbeit gezeigt wurden, sind in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von *Neville et al.* [1984]. Der Rückgang der gemessenen Dämpfungsverhältnisse im C- und X-Band bei großen Einfallswinkeln, der von *Johnson und Croswell* [1982] und von *Singh et al.* [1986] gemessen worden ist, kann durch den vorliegenden Datensatz allerdings nicht bestätigt werden. *Wismann et al.* [1996a] erklären das durch systembedingte Limitationen bei den Messungen, also durch ein zu niedriges Signal-zu-Rausch-Verhältnis bei großen Einfallswinkeln. Ein weiterer Vorschlag kam bereits von *Alpers und Hühnerfuss* [1988], die einen Anteil oberflächenaktiver Substanzen innerhalb des Mineralölfilms für die Marangoni-Dämpfung verantwortlich machten.

Die Meßdaten von *Soofi et al.* [1980] bestätigen den Rückgang der Dämpfungsverhältnisse im X- und Ku-Band mit steigender Windgeschwindigkeit. Ferner finden sie ebenfalls ein geringeres Dämpfungsverhalten für Kerosin als für Schweröl, was durch die Ergebnisse für den Mineralölfilm in der Ostsee (und durch diejenigen von *Wismann et al.* [1996a]) bestätigt wird. Insgesamt scheinen ihre Ergebnisse weder einen Anstieg mit der Bragg-Wellenzahl noch einen Rückgang zu bestätigen. Da die Messungen allerdings in einem Windwellenkanal von weniger als 5 m (Windwirk-) Länge und einer Wassertiefe von nur 15 cm durchgeführt wurden, ist zu bezweifeln, ob dieser Datensatz auf Verhältnisse auf dem offenen Meer zu übertragen ist.

### 6.5 Zusammenfassung der SAR-Ergebnisse

SIR-C/X-SAR-Aufnahmen sowohl von den beiden Oberflächenfilm-Experimenten in der Deutschen Bucht als auch von unterschiedlichen Oberflächenfilmen natürlichen Ursprungs sowie von Mineralölfilmen wurden auf die Frage hin ausgewertet, inwieweit der gemessene Kontrast in den SAR-Aufnahmen von den Randbedingungen (z.B. die Windgeschwindigkeit) und von der Filmsubstanz abhängt.

Signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Polarisierungen (so die SAR-Aufnahmen in der entsprechenden Betriebsart gemacht wurden) konnten nicht festgestellt werden. Eine Ausnahme hiervon scheinen nur Mineralölfilme in der Straße von Malacca darzustellen, die unter einem steilen Einfallswinkel aufgenommen wurden. Im Bereich mittlerer Einfallswinkel sind jedoch keine derartigen Unterschiede zu beobachten.

Es zeigte sich, daß die mit dem HELISCAT gemessenen Unterschiede zwischen den Signaturen des OLA-Films bei mittlerer und hoher Windgeschwindigkeit (5 m/s und über 10 m/s) auch vom SIR-C/X-SAR erfaßt wurden. Ein genaues Studium des gemessenen Dämpfungsverhaltens (wie es mit den HELISCAT-Ergebnissen erfolgte) ist mit den Daten des SIR-C/X-SAR-Systems allerdings wegen der geringeren Anzahl an Datenpunkten nicht möglich.

Der Vergleich sämtlicher mit dem HELISCAT gemessener Dämpfungsverhältnisse mit denjenigen, die die Bildanalyse der SIR-C/X-SAR-Aufnahmen geliefert hat, zeigt, daß die Daten nur im L-Band, also bei niedrigen Bragg-Wellenzahlen, übereinstimmen. Der Unterschied zwischen beiden Ergebnissätzen wächst dagegen mit größeren Bragg-Wellenzahlen, also zum C- und X-Band hin. Als Ursache hierfür wurde die unterschiedliche Aufnahmegeometrie beider Systeme (also der wesentlich kleinere Beleuchtungsfleck des HELISCAT bei hohen Frequenzen) vorgeschlagen. Gerade bei den kurzen Bragg-Wellenlängen machen sich Änderungen im Energieeintrag durch den Wind, wie sie durch lokales Aufreißen des Oberflächenfilms entstehen können, stärker bemerkbar und können so – bei hinreichend guter räumlicher Auflösung – im Radarsignal erkannt werden. Ist die Auflösung hingegen schlechter, so führt die Mittelung über dieses Gebiet zu einer effektiven Reduktion der gemessenen Dämpfungsverhältnisse. Neueste Ergebnisse, die mit dem flugzeuggetragenen DOSAR erzielt wurden, lassen allerdings darauf schließen, daß auch bei kleineren Auflösungszellen ein SAR wesentlich niedrigere Dämpfungsverhältnisse liefert als das HELISCAT.

SIR-C/X-SAR-Aufnahmen von natürlichen Oberflächenfilmen in Nord- und Ostsee sowie im östlichen Pazifik zeigen jeweils größte Dämpfungsverhältnisse im L-Band, was durch die Messungen mit dem HELISCAT über natürlichen Oberflächenfilmen in der Deutschen Bucht bestätigt wird.

Im C-Band wird mit dem SIR-C/X-SAR über natürlichen Oberflächenfilmen ein Minimum der Dämpfung gemessen. Es ist wahrscheinlich, daß dieses Minimum seine Ursache in einem unzureichenden Signal-zu-Rausch-Verhältnis hat. Wiederum scheinen allerdings erste Ergebnisse des DOSAR darauf hinzudeuten, daß auch bei einem größeren Signal-zu-Rausch-Verhältnis im C-Band Dämpfungsverhältnisse derselben Größenordnung gemessen werden, wie sie die Bildanalyse der SIR-C/X-SAR-

Aufnahmen ergab. Die relativ niedrigen Dämpfungsverhältnisse, die im C-Band gemessen wurden, stehen in deutlichem Kontrast zu den HELISCAT-Ergebnissen, wo über – anderen – natürlichen Oberflächenfilmen ein Maximum der Dämpfung im C-Band gemessen wurde. Ursache hierfür kann ebenfalls die unterschiedliche Abbildung der Oberflächenfilme durch die beiden Systeme sein. Die Analyse der SAR-Aufnahmen über natürlichen Oberflächenfilmen zeigte jedoch auch, daß diese Filme große Unterschiede im lokalen Dämpfungsvermögen zeigen können, so daß die Unterschiede zwischen den Meßdaten vom HELISCAT und vom SIR-C/X-SAR auch ihre Ursache in einem unterschiedlichen Dämpfungsvermögen der Oberflächenfilme haben kann.

Im X-Band werden vom SIR-C/X-SAR wiederum größere Dämpfungsverhältnisse gemessen, was (wenn man die insgesamt niedrigeren Werte berücksichtigt, die das SIR-C/X-SAR liefert) konsistent ist mit den HELISCAT-Ergebnissen.

Mehrere SIR-C/X-SAR-Aufnahmen von Mineralölfilmen in verschiedenen Seegebieten wurden ausgewertet. Sie zeigen einen eindeutigen Trend im Dämpfungsverhalten, nämlich ein Ansteigen der gemessenen Dämpfungsverhältnisse mit der Bragg-Wellenzahl. Dieser Anstieg ist, wie bereits für die biogenen Oberflächenfilme in der Deutschen Bucht gemessen, von der Windgeschwindigkeit abhängig, nimmt also mit steigender Windgeschwindigkeit ab.

Unterschiede in den Dämpfungskurven für denselben Mineralölfilm wurden ebenfalls bei verschiedenen Filmdicken gemessen: In Bereichen einer dicken Filmschicht ist das Dämpfungsverhalten insgesamt etwas größer, während in Bereichen dünner Filmdicken vor allem im L-Band kaum ein Kontrast zur umgebenden filmfreien Wasseroberfläche zu erkennen ist. Diese Ergebnisse bestätigen diejenigen früherer HELISCAT-Messungen [Wismann *et al.*, 1996a].

Es wurde gezeigt, daß die Polarisationsanalyse keine unterschiedlichen Ergebnisse für die einzelnen Oberflächenfilme vor Sylt lieferte, sondern daß es nur geringfügige Unterschiede im Polarisationsverhältnis (also dem Verhältnis der Radar-Rückstreuquerschnitte bei horizontaler und vertikaler Polarisation) gibt. Die Polarisations-Signaturen zeigen, daß im Bereich mittlerer Einfallswinkel auch bei hoher Windgeschwindigkeit die Bragg-Streuung dominiert. Bei steilen Einfallswinkeln spielt die spekulare Reflexion eine größere Rolle.

Wegen der zum Teil starken Dämpfungseigenschaften der Oberflächenfilme spielt das Signal-zu-Rausch-Verhältnis in den SIR-C/X-SAR-Aufnahmen eine große Rolle, denn relativ niedrige gemessene Dämpfungsverhältnisse können auf diese systembedingten Einschränkungen zurückzuführen sein. Als Untersuchungen für ein hinreichend großes Signal-zu-Rausch-Verhältnis wurde einerseits die Betrachtung des Polarisationsverhältnisses vorgeschlagen, da die HELISCAT-Messungen gezeigt hatten, daß dieses Verhältnis sich vor allem dann deutlich ändert, wenn kein genügender Abstand des rückgestreuten Radarsignals zum Systemrauschen mehr besteht. Konsequenterweise konnten ähnliche Rückschlüsse für die SAR-Aufnahmen im L- und C-Band von beiden Oberflächenfilm-Experimenten gemacht werden. Als andere Möglichkeit wurde eine Betrachtung der Histogramme ausgewählter Ausschnitte der SIR-

C/X-SAR-Aufnahmen vorgeschlagen. Es wird behauptet, daß diese Methode, wenn die statistischen Eigenschaften der Auflösungszellen in SAR-Aufnahmen mit den spezifischen Dämpfungseigenschaften der Oberflächenfilme verknüpft werden, zu sinnvollen Abschätzungen über die Güte der verwendeten SAR-Aufnahmen führen kann.

## 7 Ergebnisse der Messungen im Windwellenkanal

Die umfangreichen Untersuchungen, die mit Hilfe der HELISCAT-Daten einerseits und der SIR-C/X-SAR-Aufnahmen andererseits angestellt wurden, sind ergänzt worden durch Labormessungen, die am Windwellenkanal der Universität Hamburg durchgeführt worden sind.

In ausgedehnten Meßreihen wurde die Wellendämpfung monomolekularer Oberflächenfilme mit Hilfe des Wellendrahts und der Lasersonde einerseits und des X- und Ka-Band-Scatterometers andererseits untersucht [Gade, 1992; Gade et al., 1996b]. Einige Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in diesem Kapitel berücksichtigt. In einer zweiten Meßkampagne [Gade et al., 1996a] wurde die Erzeugung gebundener (*parasitärer*) und frei propagierender Rippelwellen, die sowohl an den Wellenkämmen längerer Dezimeterwellen als auch direkt durch den Wind entstehen, untersucht.

Diejenigen Ergebnisse, die für die Interpretation der Meßergebnisse der Radarsensoren über Oberflächenfilmen von Bedeutung sind, werden in diesem Kapitel zusammengefaßt. Für eine genauere Beschreibung der Ergebnisse sei auf die oben angeführten Literaturstellen verwiesen.

Für die Betrachtung dieser Meßergebnisse wird eine Unterteilung der Wasserwellen in drei Klassen vorgenommen:

- Kleinskalige Rippelwellen von der Größenordnung einiger Millimeter bis zu wenigen Zentimetern. Diese Wellen sind als Braggwellen für die Radar-Rückstreuung im X- und Ka-Band verantwortlich.
- Wellen mittlerer Wellenlänge, in der Größenordnung mehrerer Zentimeter bis einiger Dezimeter. Diese Wellen erzeugen, wenn sie steil genug sind, die (kleinen) Rippelwellen.
- Lange Wellen in der Größenordnung von Metern und länger. Diese Wellen sorgen indirekt, über eine Modulation der Wellen mittlerer Wellenlänge, für eine zusätzliche Modulation der Rippelwellen.

Von Bedeutung für die in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse sind die ersten beiden Klassen, also die kleinskaligen Rippelwellen und die Wellen mittlerer Wellenlänge. Sie werden im folgenden der Einfachheit halber als *Rippelwellen* resp. als *Dezimeterwellen* bezeichnet.

Im ersten Abschnitt wird anhand der Meßdaten die Erzeugung gebundener Rippelwellen durch mechanisch erzeugte Dezimeterwellen und ihre Auswirkungen auf den Radar-Rückstreuquerschnitt gezeigt. Im zweiten Abschnitt wird der Fall winderzeugter Dezimeter- und Rippelwellen bei filmfreier und im dritten Abschnitt bei filmbedeckter Wasseroberfläche betrachtet, bevor die Resultate im vierten Abschnitt zusammengefaßt und der Zusammenhang zu den in den vorigen Kapiteln vorgestellten Meßergebnissen hergestellt wird. Eine Diskussion der Meßergebnisse erfolgt, da sie innerhalb dieses Kapitels aufeinander aufbauen, jeweils im Anschluß an ihre Vorstellung.

### 7.1 Erzeugung gebundener Rippelwellen

In Abschnitt 3.4 wurde die Theorie der Erzeugung gebundener Rippelwellen an den Kämmen längerer Schwerewellen (also Dezimeterwellen) bereits vorgestellt. Um die Auswirkungen der Steilheit der Dezimeterwellen auf die Erzeugung der Rippelwellen zu untersuchen, wurden mit Hilfe der Wellenklappe und des Wellenfolgers (vgl. Abbildung 4.2) Dezimeterwellen im Frequenzbereich zwischen 2 Hz und 5 Hz, jeweils mit wachsenden Amplituden, erzeugt. Mit dem Wellendraht und der Lasersonde wurden das Amplituden- resp. das Neigungsspektrum gemessen und mit den beiden Scatterometern der mittlere Radar-Rückstreuquerschnitt.

In Abbildung 7.1 sind die mit der Lasersonde (in Längsrichtung des Windwellenkanals) gemessenen Neigungsspektren für vier verschiedene Amplituden von Dezimeterwellen einer Frequenz von 4 Hz dargestellt. Bei den niedrigen Amplituden (bei diesem Versuchsaufbau unterhalb von etwa 0.2 cm) ist das Spektrum diskret, besteht also nur aus der Grundfrequenz und den Harmonischen. Erreicht die Amplitude der Dezimeterwellen einen Schwellenwert (d.h. die Steilheit der Wellen ist hinreichend groß), so beginnen sie zu brechen, und es werden Rippelwellen an den Wellenkämmen erzeugt. Da sich die Frequenz dieser Rippelwellen entlang des Wellenprofils der Dezimeterwellen ändert [Longuet-Higgins, 1963], wird bei den großen Amplituden ein kontinuierliches Neigungsspektrum gemessen. Diese Beobachtungen stehen in Einklang mit den Resultaten von Chang *et al.* [1978], die für Frequenzen der Dezimeter-

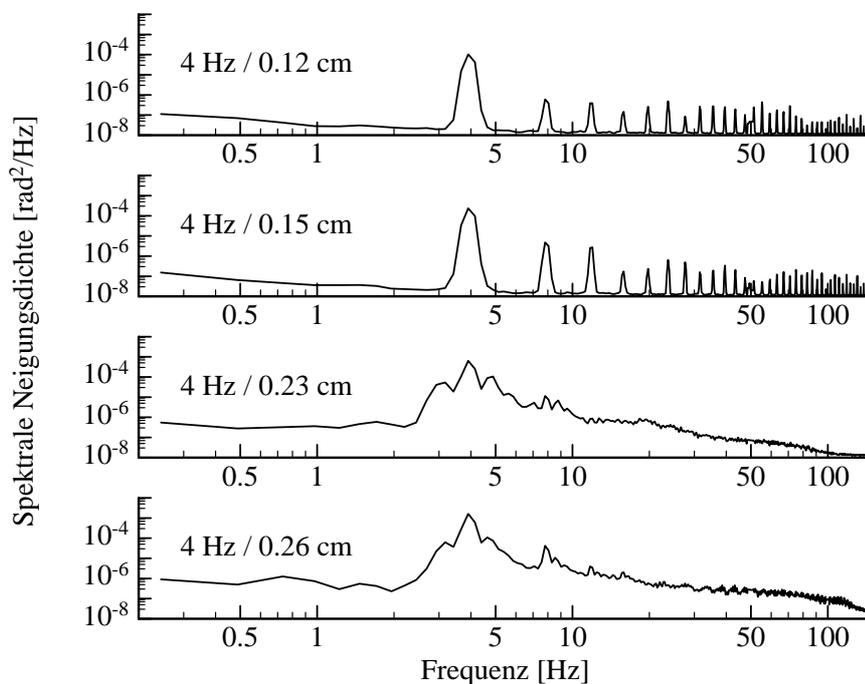


Abbildung 7.1: Neigungsspektren, die mit der Lasersonde im Windwellenkanal bei gleichzeitiger Erzeugung von Dezimeterwellen der Frequenz 4 Hz und unterschiedlicher Amplituden gemessen wurden.

wellen zwischen 3.55 Hz und 5.26 Hz Kapillarwellen mit Frequenzen bis 300 Hz gemessen haben. Der Effekt der Erzeugung von Rippelwellen wurde in den hier beschriebenen Versuchen für Frequenzen der Dezimeterwellen von 3–5 Hz gemessen, allerdings nicht – zumindest nicht in dieser Deutlichkeit – bei einer Frequenz der Dezimeterwellen von 2 Hz. In diesem Fall fehlt das gleichmäßige Ausklingen des Neigungsspektrums im Bereich hoher Frequenzen (auf eine zusätzliche Darstellung der Neigungsspektren in diesem Fall wird hier verzichtet).

Die Meßergebnisse lassen erwarten, daß der Radar-Rückstreuquerschnitt für Dezimeterwellen mit Frequenzen von 3–5 Hz sowohl im X- als auch im Ka-Band sprunghaft ansteigt, wenn der Schwellenwert der Amplitude erreicht ist (an den intrinsischen Frequenzen der Braggwellen von 9.1 Hz für das X-Band und 61.8 Hz für das Ka-Band steigt die spektrale Energiedichte erst beim Übergang zum kontinuierlichen Spektrum an). Im Gegensatz dazu darf dieser Effekt bei einer Frequenz von 2 Hz nicht so stark ausgeprägt sein. In Abbildung 7.2 ist der Radar-Rückstreuquerschnitt im X- und Ka-Band als Funktion der mittleren Wellenamplitude dargestellt, wobei die Frequenz der Dezimeterwelle im oberen Diagramm 2 Hz und im unteren 4 Hz beträgt. Bei Wellenamplituden, die kleiner sind als der Schwellenwert der 4 Hz-Dezimeterwelle (unteres Diagramm), zeigen beide Scatterometer einen relativ niedrigen Radar-Rückstreuquerschnitt (der Radar-Rückstreuquerschnitt des Ka-Bands ist bei kleinen

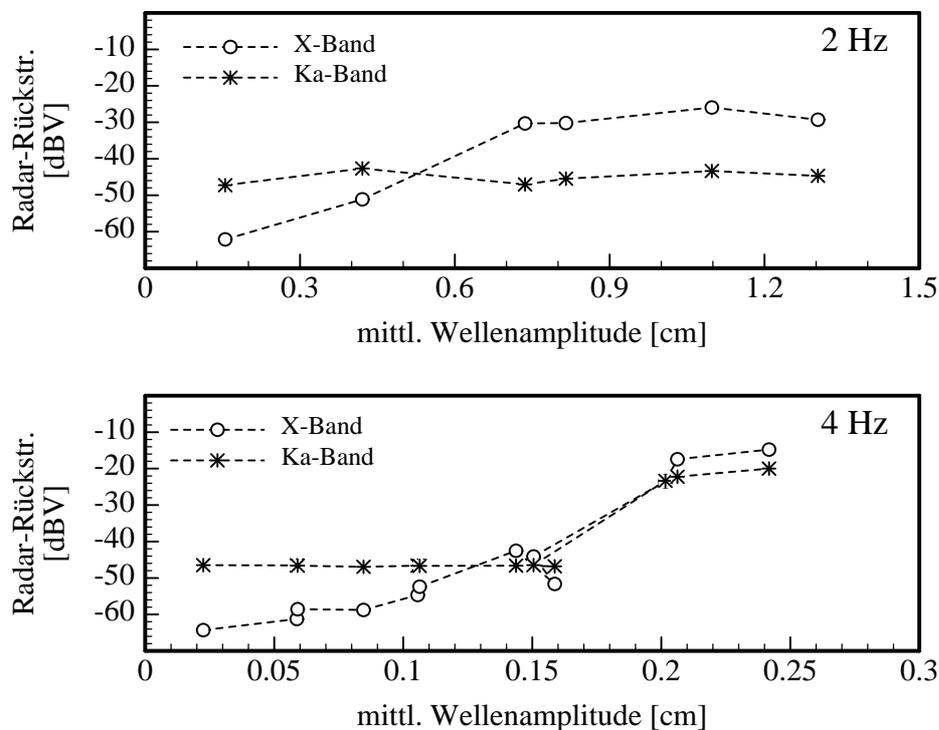


Abbildung 7.2: Im Windwellenkanal gemessene relative Radar-Rückstreuquerschnitte im X- und Ka-Band als Funktion der mittleren Amplituden der Dezimeterwellen einer Frequenz von 2 Hz (oben) und 4 Hz (unten).

Amplituden wegen des höheren Systemrauschens größer als der des X-Bands). Bei Erreichen des Schwellenwertes für die Amplitude steigt der Radar-Rückstreuquerschnitt jeweils um etwa 20 dB an. Dieser Effekt ist für die 2-Hz-Dezimeterwelle nicht zu beobachten (oberes Diagramm): Hier zeigt das Ka-Band praktisch keine Abhängigkeit von der mittleren Wellenamplitude, während das X-Band einen nur leichten Anstieg, nicht aber ein Schwellenverhalten der Meßwerte zeigt. Diese Ergebnisse stehen in Einklang mit der Interpretation der Neigungsspektren (Abbildung 7.1).

Man kann diesen Ergebnissen entnehmen, daß die Erzeugung von Rippelwellen an den Kämmen der Dezimeterwellen nur bei Wellen geeigneter Wellenlängen (bzw. Frequenz) geschieht. Die langen 2-Hz-Dezimeterwellen mit einer Wellenlänge von 39 cm sind offensichtlich zu lang, um Rippelwellen erzeugen zu können, d.h. die lokale Krümmung an den Wellenkämmen reicht für diesen Effekt nicht aus.

Da es sich bei beiden Scatterometern um kohärente Radarsensoren handelt, konnten neben den Radar-Rückstreuquerschnitten auch die Dopplerspektren aufgezeichnet werden. Anhand dieser Spektren sollte nun Aufschluß darüber gewonnen werden, ob die für die Radar-Rückstreuung verantwortlichen Rippelwellen gebunden, also – auch nach ihrem Entstehen – an die Dezimeterwellen gebunden seien oder ob sie frei auf der Wasseroberfläche propagieren.

In Abbildung 7.3 sind die Dopplerspektren im X-Band für Dezimeterwellen der vier Frequenzen dargestellt. Die Amplitude der Wellen war in allen Fällen jeweils größer

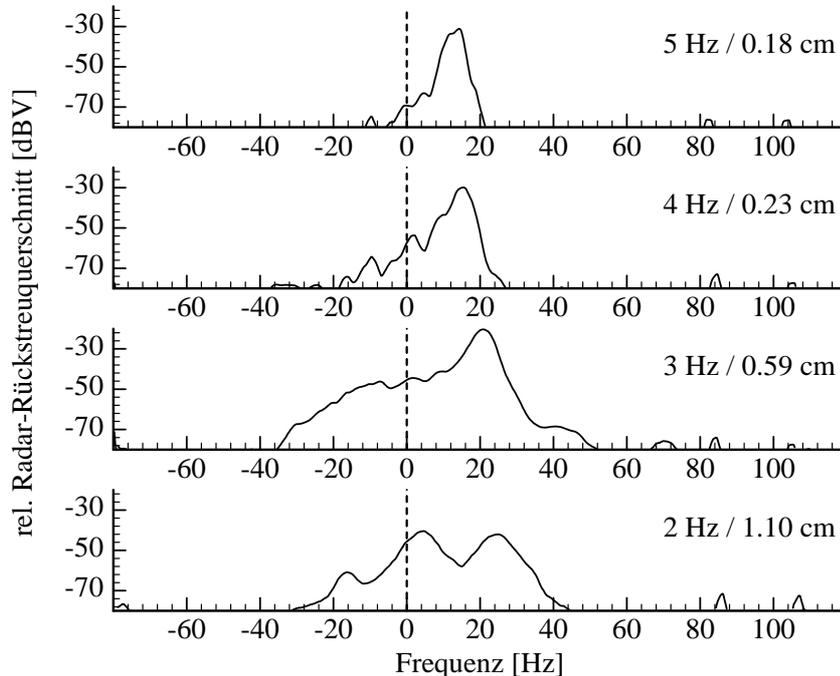


Abbildung 7.3: Mit dem X-Band gemessene Dopplerspektren für mechanisch erzeugte Dezimeterwellen unterschiedlicher Frequenz. Die Amplituden sind jeweils größer als der Schwellenwert.

ßer als der Schwellenwert (bzw. bei den 2 Hz-Dezimeterwellen hinreichend groß), so daß an den Wellenkämmen Rippelwellen erzeugt wurden.

Für die gemessene Dopplerfrequenz  $f_D$  gilt der Zusammenhang

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \cdot k_B \cdot c \quad , \quad (7.1)4$$

wobei  $k_B$  die Bragg-Wellenzahl der Rippelwellen und  $c$  die Geschwindigkeit dieser Streuobjekte ist. Tritt keine zusätzliche Geschwindigkeitskomponente, beispielsweise eine Oberflächendrift, auf, so ist das bei frei propagierenden Braggwellen deren Phasengeschwindigkeit  $c_p = \omega_B / k_B$  (mit  $\omega_B$  als Kreisfrequenz der Braggwellen), so daß in diesem Fall die gemessene Dopplerfrequenz mit der (intrinsischen) Frequenz der Braggwellen übereinstimmen muß.

Die X-Band-Braggwellen haben eine Frequenz von 9.1 Hz, so daß zu erwarten ist, daß, wenn die Braggwellen mit ihrer eigenen Phasengeschwindigkeit propagieren, bei dieser Frequenz auch das Maximum im Dopplerspektrum liegt. Die gemessenen Maxima bei Frequenzen von 3–5 Hz in Abbildung 7.3 liegen allerdings jeweils bei größeren Werten, die Braggwellen propagieren also offensichtlich nicht frei. Im Falle der 2 Hz-Dezimeterwelle wurde, neben dem zu hohen Frequenzen verschobenen Maximum, ein zusätzliches bei einer Frequenz gemessen, die kleiner ist als die Frequenz der Braggwellen. Offensichtlich gibt es in diesem Fall zwei Arten von Rippelwellen, die sich jeweils mit einer anderen Geschwindigkeit fortbewegen.

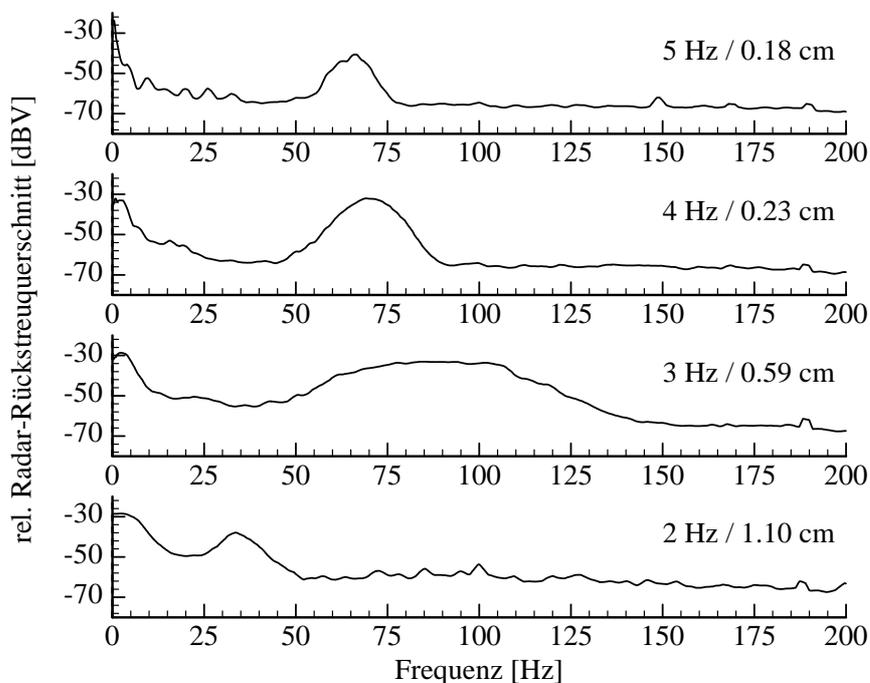


Abbildung 7.4: Wie Abbildung 7.3, jedoch für das Ka-Band.

Die Meßergebnisse für das Ka-Band (Abbildung 7.4) sind weitestgehend vergleichbar: Die intrinsische Frequenz der Braggwellen ist hier 61.8 Hz, die gemessenen Maxima in den Dopplerspektren liegen allerdings für die 3 Hz-, 4 Hz- und 5 Hz-Dezimeterwellen oberhalb dieses Wertes (und zwar wächst die Differenz wiederum mit abnehmender Frequenz der Dezimeterwellen). Im Falle der 2 Hz-Dezimeterwellen wurde nur ein Maximum bei (zu) kleinen Frequenzen gemessen, das offensichtlich dem bei niedrigen Frequenzen im X-Band-Dopplerspektrum entspricht. Für das X-Band wurde dort allerdings noch ein zweites Maximum gemessen, das für das Ka-Band fehlt. Dieser Effekt deutet erneut darauf hin, daß an den Wellenkämmen der 2 Hz-Dezimeterwellen keine (gebundenen) Ka-Band- wohl aber X-Band-Braggwellen erzeugt werden.

Es soll nun geklärt werden, ob es sich bei den für die jeweilige Radar-Rückstreuung verantwortlichen Braggwellen tatsächlich um gebundene Wellen handelt, die an die Dezimeterwellen gekoppelt sind, sich also mit der Phasengeschwindigkeit bewegen. In Abbildung 7.5 sind die gemessenen Dopplerverschiebungen (also die Schwerpunkte der Dopplerspektren im Bereich des Maximums) als Funktion der Frequenz der Dezimeterwellen aufgetragen (oberes Diagramm). Zum besseren Vergleich sind aus diesen Verschiebungen nach (7.1) die mittleren Geschwindigkeiten der Braggwellen berechnet und in der unteren Grafik dargestellt worden. In beiden Diagrammen bezeichnen die gestrichelten Kurven die theoretischen Dopplerverschiebungen resp.

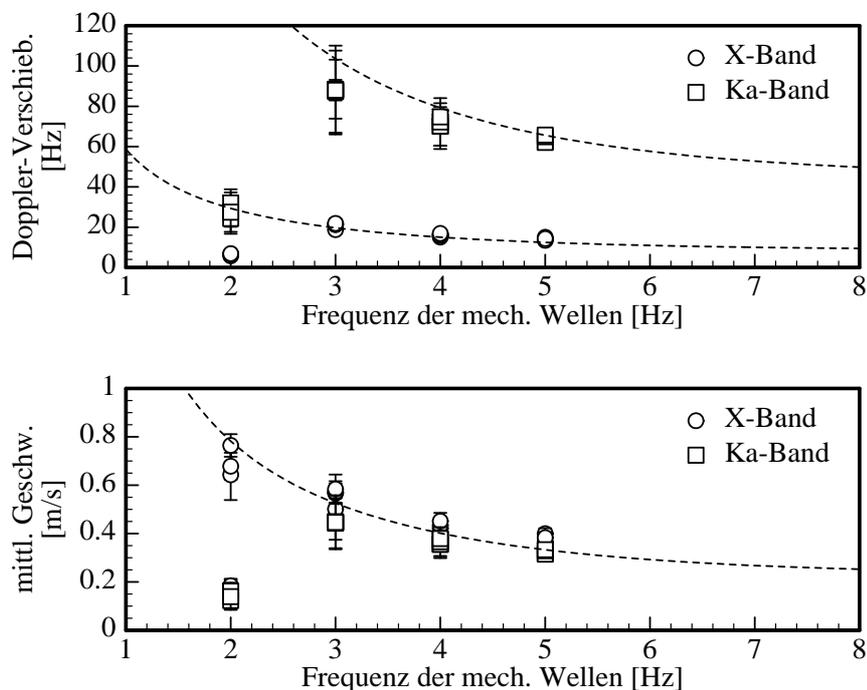


Abbildung 7.5: Gemessene Dopplerverschiebungen im X- und Ka-Band (oben) und daraus berechnete mittlere Geschwindigkeit der Streuobjekte (unten) als Funktionen der Frequenz der Dezimeterwellen.

mittleren Geschwindigkeiten, die unter der Annahme berechnet wurden, daß sich die Braggwellen mit der Phasengeschwindigkeit der Dezimeterwellen fortbewegen.

Die Ergebnisse für beide Radarbänder bestätigen die Vermutung, daß für Dezimeterwellen zwischen 3 Hz und 5 Hz die an den Kämmen erzeugten Braggwellen gebunden sind, also auf den Dezimeterwellen „mitreiten“. Bei einer Frequenz von 2 Hz trifft das nur noch für einen Teil der X-Band-Braggwellen zu. Dieser Anteil sorgt für den leichten Anstieg des Radar-Rückstreuquerschnitts bei Erreichen des Schwellenwertes für die Amplitude, vgl. Abbildung 7.2. Der übrige Teil der X-Band-Braggwellen, wie auch sämtliche Ka-Band-Braggwellen, propagieren mit einer wesentlich geringeren Geschwindigkeit (etwa 15 cm/s). Diese Meßwerte können in Verbindung gebracht werden mit der Orbitalgeschwindigkeit der Dezimeterwellen (etwa 12–15 cm/s), mit der sich die turbulente Störung am Wellenkamm bewegt [Kwoh und Lake, 1985]. Das Auftreten des zweiten Maximums bei niedrigeren Frequenzen kann demnach mit Streuobjekten innerhalb dieser Turbulenz erklärt werden.

## 7.2 Winderzeugte Rippelwellen

Um die Ergebnisse, die mit mechanisch erzeugten Dezimeterwellen gewonnen wurden, mit dem Fall eines Windwellenfeldes zu vergleichen, wurden Daten, die bei Referenz-Windgeschwindigkeiten im Bereich zwischen 1.5 m/s und 10 m/s aufgenommen. Dabei war die Wasseroberfläche zunächst filmfrei und wurde im weiteren Verlauf der Messungen mit monomolekularen Oberflächenfilmen belegt (siehe nächster Abschnitt).

Die Ergebnisse des vorigen Abschnitts haben gezeigt, daß die Erzeugung gebundener Rippelwellen nur bei Dezimeterwellen mit Frequenzen oberhalb von 2 Hz beobachtet wurde (und daß bei dieser niedrigsten Frequenz allerdings nur im X-Band ein Teil der Braggwellen an die Dezimeterwellen gebunden war). Die Frequenz der dominanten, winderzeugten Wellen wurde nun als Schwerpunkt im Amplitudenspektrum (im Bereich des Maximums) berechnet sowie über die Dispersionsrelation deren Wellenlänge. Die Ergebnisse, jeweils als Funktion der Referenz-Windgeschwindigkeit, sind in Abbildung 7.6a dargestellt und in Abbildung 7.6b und c jeweils die mittleren Auslenkungen der Wasseroberfläche sowie deren Neigung.

Bei einer Referenz-Windgeschwindigkeit von 4 m/s ist die Frequenz der dominanten Welle noch 3 Hz, bei 5 m/s nur noch etwa 2.6 Hz, bei 9 m/s schließlich 2 Hz. In diesem Bereich steigt die mittlere Auslenkung monoton an, während die mittlere Neigung etwa konstant bleibt. Nach den Ergebnissen des vorigen Abschnitts ist demnach zu erwarten, daß bis zu einer Referenz-Windgeschwindigkeit von etwa 5 m/s der Radar-Rückstreuquerschnitt im X- und Ka-Band durch gebundene Rippelwellen (als Braggwellen beider Radarbänder) erzeugt wird, während das bei höheren Windgeschwindigkeiten nur noch für das X-Band gilt.

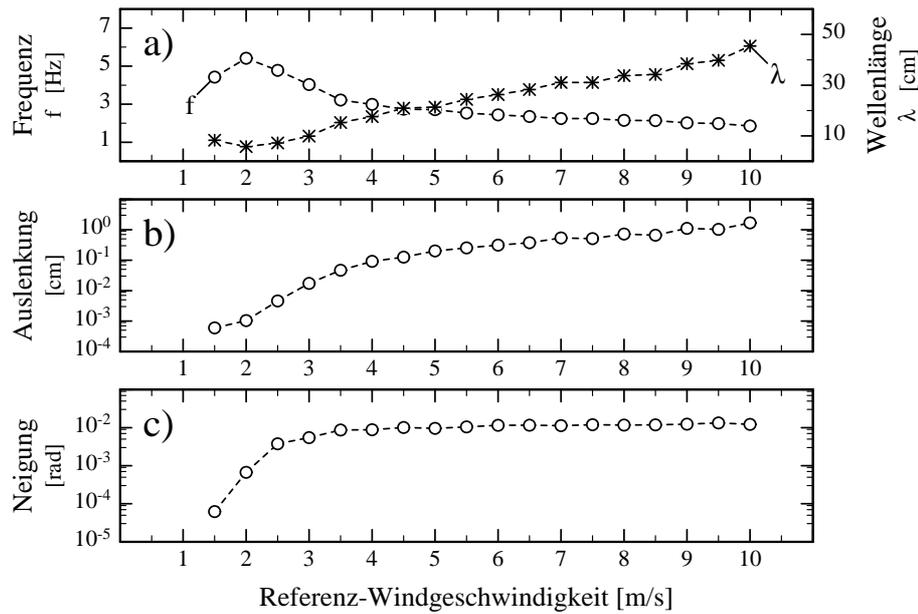


Abbildung 7.6: Windabhängigkeit a) der Frequenz  $f$  und Wellenlänge  $\lambda$  der dominanten Wellen, b) ihrer mittleren Amplitude und c) ihrer mittleren Neigung.

In Abbildung 7.7 sind die Dopplerspektren im X-Band für Referenz-Windgeschwindigkeiten zwischen 2 m/s und 8 m/s dargestellt. Im Vergleich mit den Dopplerspektren, die bei mechanisch erzeugten Dezimeterwellen gewonnen wurden (Abbildung 7.3), zeigen sich einige Gemeinsamkeiten und Unterschiede:

- Durch die windinduzierte Oberflächendrift [Wu, 1975; Tokuda und Toba, 1982] wird die Geschwindigkeit der Braggwellen zusätzlich erhöht, so daß sie nicht mehr allein mit ihrer Phasengeschwindigkeit (oder der der dominanten Welle) propagieren. Das resultiert in einem zusätzlichen Beitrag zur Dopplerverschiebung.
- Während die Dopplerspektren bei mechanisch erzeugten Dezimeterwellen in sämtlichen Fällen deutlich ausgeprägte, schmale Maxima zeigen, ist dies bei den Windwellen nicht der Fall. Schon bei 4 m/s tritt eine zusätzliche Verbreiterung auf, die offensichtlich durch ein zweites spektrales Maximum verursacht wird. Bei 8 m/s setzt sich das Dopplerspektrum (im Bereich positiver Frequenzen) aus zwei Maxima zusammen, die etwa gleich groß sind (die Verbreiterung dieser Maxima erschwert eine klare Unterscheidung allerdings).
- Für die 5 Hz-Dezimeterwelle ist das Dopplerspektrum sehr gut vergleichbar mit dem für eine Referenz-Windgeschwindigkeit von 2 m/s. Der Vergleich mit Abbildung 7.6 bestätigt, daß bei dieser Windgeschwindigkeit die Frequenz der dominanten Welle tatsächlich bei 5 Hz liegt (5.4 Hz bei 2 m/s und 4.8 Hz bei 2.5 m/s).

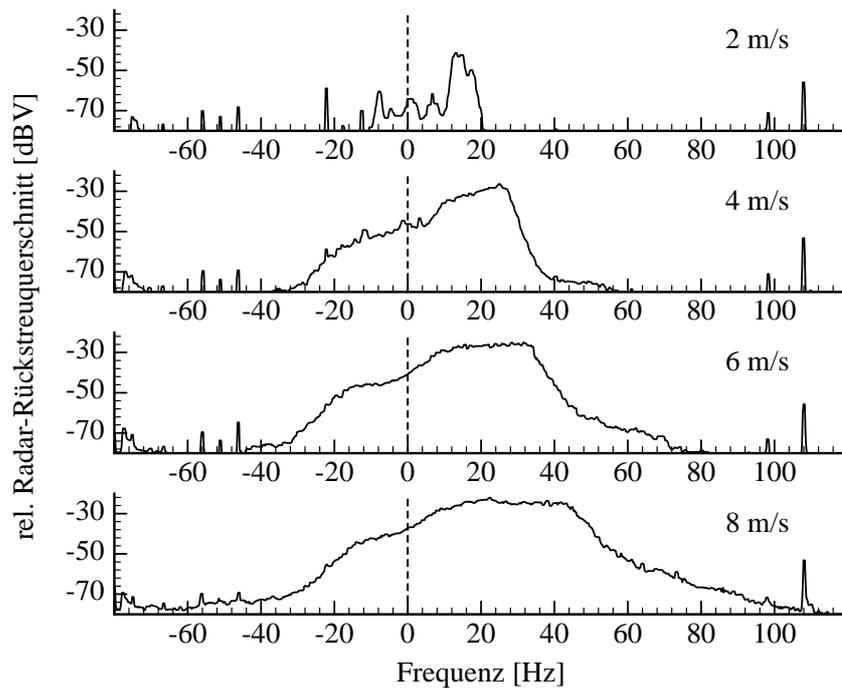


Abbildung 7.7: Dopplerspektren im X-Band bei mehreren Referenz-Windgeschwindigkeiten.

- Von der Verbreiterung abgesehen, gleichen sich die Dopplerspektren für mechanisch erzeugte Wellen von 3 Hz und winderzeugte Wellen bei einer Referenz-Windgeschwindigkeit von 4 m/s wiederum, auch im Bereich negativer Frequenzen (also für vom Radar weg propagierende Braggwellen).
- Völlig unterschiedlich hingegen sind die Dopplerspektren bei einer 2-Hz-Dezimeterwelle und bei einer Referenz-Windgeschwindigkeit von 8 m/s, obwohl die Frequenz der dominanten Welle in diesem Fall etwa 2.2 Hz beträgt. Hier scheinen andere Mechanismen der Erzeugung der Rippelwellen zu wirken.

In Abbildung 7.8 sind die entsprechenden Dopplerspektrum für das Ka-Band dargestellt. Der Vergleich mit den Spektren für mechanisch erzeugte Dezimeterwellen fällt hier ähnlich aus wie für das X-Band:

- Wiederum tritt eine zusätzliche Dopplerverschiebung durch die windinduzierte Oberflächendrift auf. Die Dopplerspektren sind bei winderzeugten Wellen ebenfalls zusätzlich verbreitert.
- Die Übereinstimmung der Dopplerspektren bei einer mechanischen Dezimeterwelle von 5 Hz und einer Referenz-Windgeschwindigkeit von 2 m/s ist wiederum sehr gut. Bei den entsprechenden Dopplerspektren für eine 3-Hz-Dezimeterwelle und für eine Referenz-Windgeschwindigkeit von 4 m/s sind, vor allem bei Frequenzen unterhalb von 50 Hz, deutliche Unterschiede zu erkennen, die durch Spiegelung der Werte für negative Frequenzen hervorgerufen

sein können. Ebenfalls möglich ist ein „echtes“ Maximum bei diesen Frequenzen, das ähnlich demjenigen ist, das bei mechanisch erzeugten Dezimeterwellen einer Frequenz von 2 Hz auftraten.

- Es ist kein zweites Maximum im Spektrum zu erkennen, zumindest nicht in der Deutlichkeit, wie es für das X-Band möglich war. Ursache hierfür kann neben der Tatsache, daß dieses Maximum eben nicht existiert, auch die größere Verbreiterung in den Dopplerspektren sein.

Diese Ergebnisse bestätigen diejenigen, die im vorigen Abschnitt für mechanisch erzeugte Dezimeterwellen vorgestellt worden sind: Wegen der guten Übereinstimmung sowohl der X-Band- als auch der Ka-Band-Dopplerspektren im Bereich von Windgeschwindigkeiten bis etwa 4 m/s mit denjenigen für Dezimeterwellen zwischen 3 Hz und 5 Hz kann man erwarten, daß bei niedrigen Windgeschwindigkeiten ebenfalls gebundene Rippelwellen erzeugt werden, die für die Radar-Rückstreuung verantwortlich sind. Bei höheren Windgeschwindigkeiten sollte das demnach nur noch im X-Band teilweise der Fall sein (für das Ka-Band ist eine genaue Aussage aufgrund der in diesem Abschnitt vorgestellten Dopplerspektren schwierig; berücksichtigt man jedoch die Ergebnisse des vorigen Abschnitts, so liegt der Verdacht nahe, daß die Braggwellen des Ka-Bands bei hohen Windgeschwindigkeiten nicht an die dominanten Wellen gebunden sind).

Zur Überprüfung dieser Vermutungen sind in Abbildung 7.9 die gemessenen Dopplerverschiebungen als Funktion der Referenz-Windgeschwindigkeit dargestellt

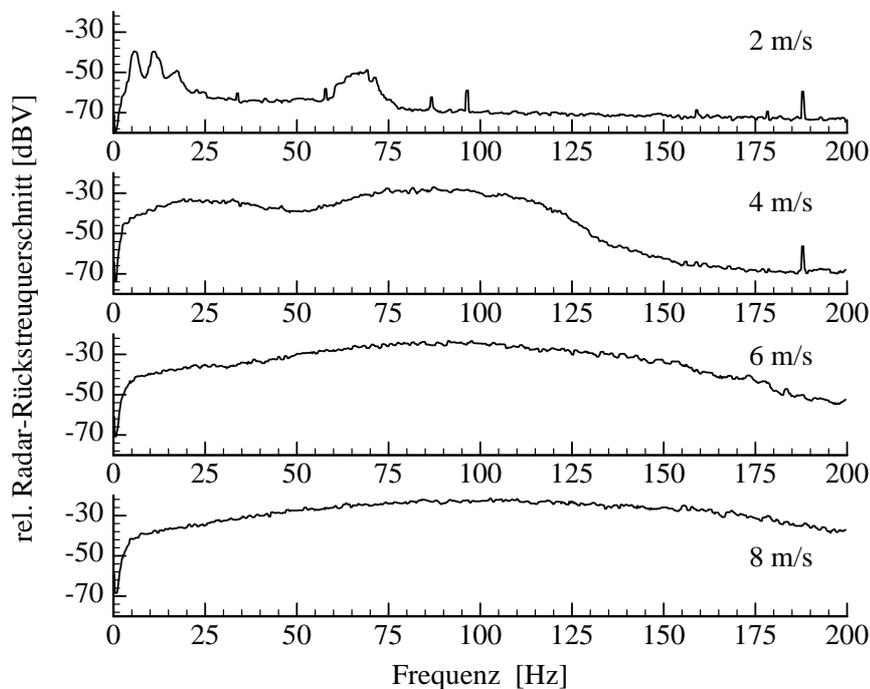


Abbildung 7.8: Wie Abbildung 7.7, jedoch für das Ka-Band.

(Die Berechnung erfolgte wiederum als Schwerpunkt des Spektrums im Bereich seines Maximums). Die Fehlerbalken, die zusätzlich eingetragen sind, ergeben sich konsequenterweise aus der Berechnung der zweiten Momente dieser Verteilungen (wiederum im Bereich des Maximums). Um den Vergleich mit theoretischen Werten zu erleichtern, sind jeweils als gestrichelte Kurven diejenigen Dopplerverschiebungen eingetragen, die sich für gebundene Braggwellen ergeben, und als durchgezogene Linien diejenigen für frei propagierende Braggwellen. Bei der Berechnung der theoretischen Kurven wurde ebenfalls die windinduzierte Oberflächendrift berücksichtigt. Nach *Ebuchi et al.* [1992] kann für die Geschwindigkeit der Streuzentren in (7.1), wenn sie sich mit der Phasengeschwindigkeit dominanter Schwerewellen bewegen, der folgende Ausdruck eingesetzt werden:

$$c = \frac{g}{\omega_{dom}} + 0.2 \cdot u_* \quad . \quad (7.2)$$

Hier ist  $\omega_{dom} = 2\pi f_{dom}$  die Kreisfrequenz der dominanten Schwerewelle,  $g$  die Erdbeschleunigung und  $u_*$  die Schubspannungsgeschwindigkeit. Der zweite Ausdruck auf der rechten Seite ist die *effektive Driftgeschwindigkeit* [Tokuda und Toba, 1982]. Die Schubspannungsgeschwindigkeit ist durch Messung von Windprofilen über einer

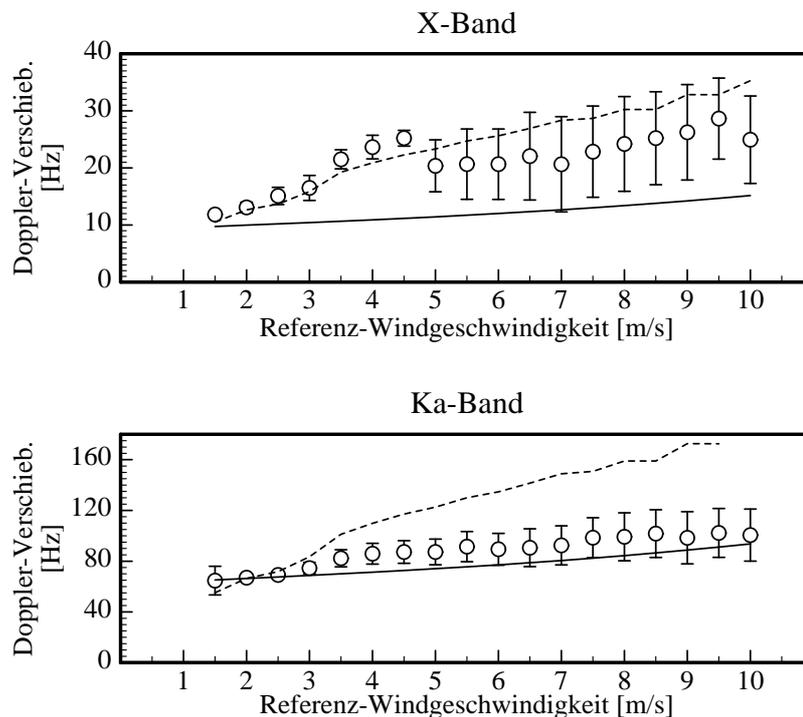


Abbildung 7.9: Windabhängige Dopplerverschiebungen im X- und Ka-Band. Zum Vergleich sind die theoretischen Kurven für Braggwellen eingezeichnet, die an die dominanten Wellen gebunden sind (gestrichelt) bzw. die frei propagieren (durchgezogen). Ebenfalls berücksichtigt wurde die Oberflächendrift (siehe Text).

filmfreien und filmbedeckten Wasseroberfläche im Windwellenkanal als Funktion der Referenz-Windgeschwindigkeit  $U$  bestimmt worden [Gade, 1992; und zitierte Literatur]. Für die filmfreie Wasseroberfläche gilt demnach:

$$u_* = 0.059 \cdot U - 0.0008 \cdot U^2 + 0.0003 \cdot U^3 \quad . \quad (7.3)$$

Durch Kombination von (7.1), (7.2) und (7.3) kann demnach die theoretische Dopplerverschiebung für gebundene Rippelwellen und, durch Einsetzen der Phasengeschwindigkeit der Braggwellen für den ersten Term auf der rechten Seite von (7.2), für frei propagierende Rippelwellen berechnet werden.

Die in Abbildung 7.9 gezeigten Ergebnisse sind unterschiedlich für das X- und das Ka-Band:

- Im X-Band folgen die gemessenen Dopplerverschiebungen bis zu einer Referenz-Windgeschwindigkeit von 4.5 m/s mit sehr guter Übereinstimmung der theoretischen Kurve für gebundene Rippelwellen. Die Tatsache, daß die Meßwerte (mit zunehmender Windgeschwindigkeit immer weiter) oberhalb der theoretischen Kurve liegen, kann mit einer zu kleinen theoretischen Oberflächendrift begründet werden. Offensichtlich stimmt die von Tokuda und Toba [1982] vorgeschlagene effektive Driftgeschwindigkeit und/oder die berechnete Schubspannungsgeschwindigkeit nicht exakt. Als mögliche zusätzliche Driftkomponente kommt auch die durch den ständigen Zustrom an Frischwasser in den Windwellenkanal verursachte leichte Strömung zum leeseitigen Ende hin in Frage.
- Ab einer Referenz-Windgeschwindigkeit von 5 m/s weichen die gemessenen Dopplerverschiebungen für das X-Band deutlich nach unten von dieser Kurve ab. Aufgrund der bisherigen Ergebnisse und deren Diskussion kann daraus geschlossen werden, daß der Radar-Rückstreuquerschnitt in diesem Bereich der Windgeschwindigkeit sowohl von gebundenen als auch von frei propagierenden Braggwellen verursacht wird. Dieses Ergebnis ist in sehr guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen bei mechanisch erzeugten Dezimeterwellen.
- Für das Ka-Band ist die Aufteilung der Meßwerte nicht in dieser Deutlichkeit möglich. Bis etwa 4.5 m/s zeigen sie zwar ein qualitativ ähnliches Verhalten wie die theoretische Kurve für gebundene Wellen (die Kurve ist zwischen 2 m/s und 3.5 m/s leicht nach links, danach leicht nach rechts gekrümmt), sie weichen aber deutlich von ihr ab. Berücksichtigt man, daß die Oberflächendrift eher als zu klein gewählt angenommen werden muß, so fällt dieser Unterschied sogar noch größer aus. Wegen der Breite des Maximums in den Dopplerspektren kann man daher darauf schließen, daß auch in diesem Bereich der Windgeschwindigkeit ein Teil der Radar-Rückstreuung von gebundenen, der überwiegende Teil jedoch von frei propagierenden Rippelwellen verursacht wird.
- Bei höheren Windgeschwindigkeiten stimmen die Meßwerte für das Ka-Band wesentlich besser mit der theoretischen Kurve für frei propagierende Rippelwellen überein, als sie dies für das X-Band tun. Dieser Sachverhalt ist eine Bestätigung der Annahme, daß, wenn die Frequenz der dominanten Welle hinrei-

chend klein (diese also hinreichend lang) ist, die Ka-Band-Braggwellen frei propagieren.

*Ebuchi et al.* [1987; 1992] haben in ihren Messungen mit winderzeugten Wellen im Windwellenkanal festgestellt, daß sich die für die Radar-Rückstreuung im X-Band (9.6 GHz) verantwortlichen Rippelwellen im Bereich von Windgeschwindigkeiten zwischen 3.8 m/s und 13.7 m/s mit der Phasengeschwindigkeit der dominanten Wellen bewegen. Obwohl ihre Ergebnisse für die Dopplerverschiebung gerade bei hohen Windgeschwindigkeiten etwas unterhalb des theoretischen Wertes für gebundene Rippelwellen liegen, scheinen sie den in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Ergebnissen zu widersprechen. Einige Anmerkungen dazu:

Die Windwirklänge war bei den Experimenten von *Ebuchi et al.* [1987; 1992] jeweils 10.5 m, im vorliegenden Fall 15.5 m. Da das Wellenspektrum in beiden Fällen nicht voll ausgebildet war, kann es sein, daß die Ergebnisse stark abhängig sind vom Meßort und somit der Windwirklänge.

*Ebuchi et al.* [1987; 1992] benutzten kein kohärentes X-Band-Scatterometer, mußten ihre Rückschlüsse also aus den Zeitserien für den Radar-Rückstreuquerschnitt ziehen. Es ist davon auszugehen, daß die hier vorgestellten Ergebnisse bessere Rückschlüsse auf die Natur der Braggwellen zulassen. Im übrigen muß der Schluß der Autoren, daß nämlich die Braggwellen im X-Band *grundsätzlich* gebunden seien, angezweifelt werden, weil er im Kontrast zu zahlreichen Messungen für die Radar-Rückstreuung relevanter Parameter steht.

### 7.3 **Filmbedeckte Wasseroberfläche**

Für die Diskussion der Meßwerte, die mit dem SIR-C/X-SAR und – vor allem – mit dem HELISCAT über Oberflächenfilmen gewonnen wurden, ist zuerst einmal vorausgesetzt worden, daß sich die Braggwellen frei bewegen, also unabhängig sind von der Amplitude der längeren Dezimeterwellen. Aus diesem Grund ist die Betrachtung derjenigen Meßergebnisse, die im Windwellenkanal mit dem X- und Ka-Band bei filmbedeckter Wasseroberfläche gewonnen wurden, von besonderem Interesse.

Von *Gade* [1992] sind zahlreiche Experimente am Windwellenkanal durchgeführt worden, in denen die Auswirkung einer filmbedeckten Wasseroberfläche sowohl auf Amplituden- und Neigungsspektren als auch auf die Radar-Rückstreuquerschnitte und die Dopplerverschiebungen im X- und Ka-Band untersucht wurden. In den Experimenten wurde die Substanz in einer Distanz von 5.5 m vom Windeintritt, also 10 m vor dem Meßort, mit Hilfe einer Glaspipette in stark verdünnter Form (75 mMol/l Ethanol) auf die Wasseroberfläche aufgetropft. Aus diesem Datensatz wurden einige Resultate verwendet, um die bisher vorgestellten Ergebnisse mit denen einer filmbedeckten Wasseroberfläche zu vergleichen.

Messungen von Windprofilen über filmbedeckter Wasseroberfläche hatten zum Ergebnis, daß zwischen der Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*^{(s)}$  und der Referenz-Windgeschwindigkeit  $U$  in guter Näherung ein linearer Zusammenhang, unabhängig von der oberflächenaktiven Substanz, besteht [*Gade*, 1992]:

$$u_*^{(s)} = 0.038 \cdot U \quad . \quad (7.4)$$

Abbildung 7.10 zeigt diejenigen X-Band-Dopplerspektren, die bei mit OLA bedeckter Wasseroberfläche im Windwellenkanal aufgezeichnet wurden (als Beispiel für die Untersuchungen bei filmbedeckter Wasseroberfläche wurde der Oleylalkohol, OLA, gewählt, da diese Substanz auch bei den Oberflächenfilm-Experimenten in der Deutschen Bucht eine wichtige Rolle gespielt hat). Bei einer Referenz-Windgeschwindigkeit von 2 m/s wurden praktisch keine Wellen erzeugt, so daß hier auf die Darstellung des zugehörigen Dopplerspektrums verzichtet und statt dessen dasjenige für 10 m/s dargestellt wurde. Im Vergleich mit der filmfreien Wasseroberfläche fallen einige Merkmale auf:

- Die vier in Abbildung 7.10 dargestellten Dopplerspektren entsprechen qualitativ paarweise denjenigen aus Abbildung 7.7, die jeweils bei niedrigerer Windgeschwindigkeit aufgenommen wurden (mit Ausnahme desjenigen, für eine Referenz-Windgeschwindigkeit von 8 m/s). Dieser Effekt ist mit der veränderten Schubspannungsgeschwindigkeit zu erklären (vgl. *Gade* [1992]), die bei filmbedeckter Wasseroberfläche auf 60% bis 80% reduziert wird und die nach (3.16) den Windeintrag und somit das Wellenwachstum bestimmt.

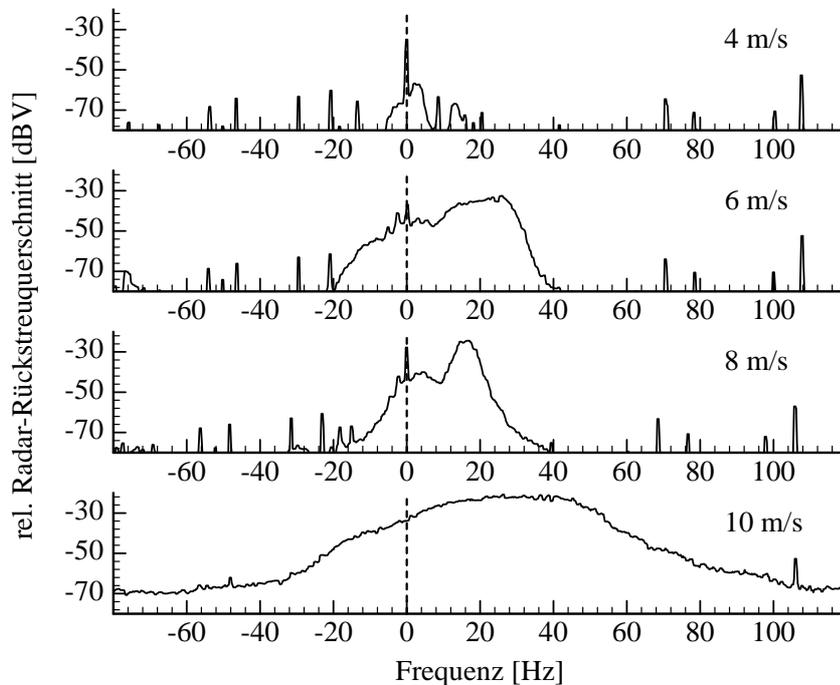


Abbildung 7.10: Im X-Band gemessene Dopplerspektren für einige Windgeschwindigkeiten bei mit OLA bedeckter Wasseroberfläche.

- Bei einer Referenz-Windgeschwindigkeit von 8 m/s ist das Dopplerspektrum bei filmbedeckter Wasseroberfläche stark unterschiedlich zu dem entsprechenden bei filmfreier Wasseroberfläche: Das Maximum bei einer höheren Frequenz, das in Abbildung 7.7 zu erkennen ist, fehlt, so daß in diesem Fall nur ein (einzelnes) relativ scharfes Maximum bei etwa 16 Hz auftritt.
- Bei einer Referenz-Windgeschwindigkeit von 10 m/s ist der Oberflächenfilm aufgerissen, so daß sich das gemessene Dopplerspektrum nur unwesentlich von dem bei einer filmfreien Wasseroberfläche (in Abbildung 7.7 nicht gezeigt) unterscheidet.

Die entsprechenden Dopplerspektren für das Ka-Band sind in Abbildung 7.11 dargestellt. Hier ergeben sich, in Ergänzung zu den Merkmalen, die für das X-Band hervorgehoben wurden, einige Ergänzungen:

- Bei einer Referenz-Windgeschwindigkeit von 4 m/s ist noch kein Signal im Dopplerspektrum zu erkennen. In diesem Fall werden zwar erste X-Band-Braggwellen erzeugt, aber Wellen kürzerer Wellenlänge noch nicht (bzw. sie werden durch den Oberflächenfilm vollständig gedämpft).
- Bei einer Referenz-Windgeschwindigkeit von 8 m/s ist wiederum nur ein Maximum bei einer relativ niedrigen Frequenz zu beobachten. Zusätzlich dazu ist allerdings am hochfrequenten Ende dieses Maximums, bei einer Frequenz von etwa 120 Hz, ein weiteres, kleines Maximum zu erkennen, das wiederum mit gebundenen Rippelwellen in Verbindung gebracht werden kann. Da der Unter-

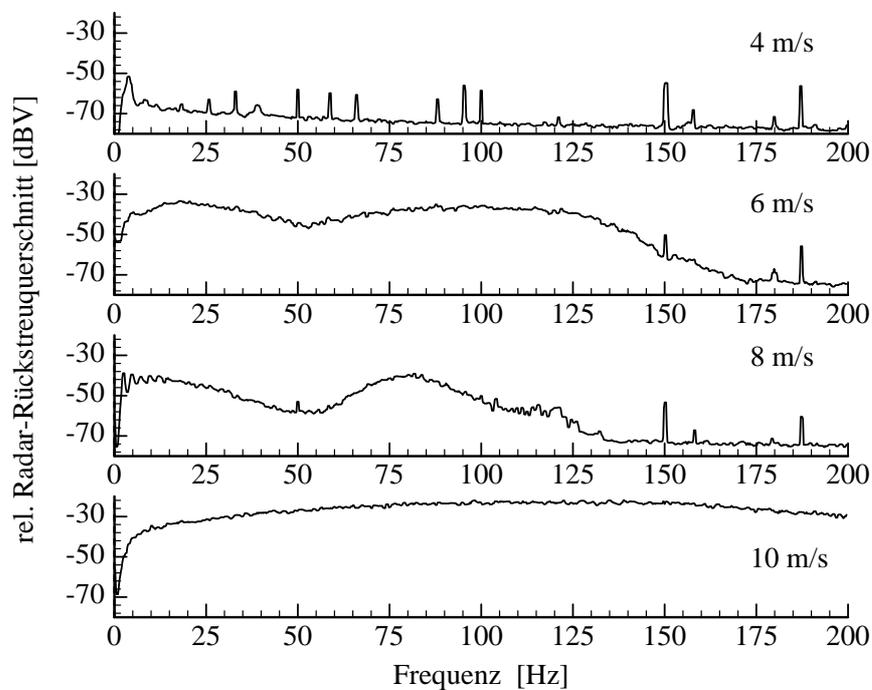


Abbildung 7.11: wie Abbildung 7.10, jedoch für das Ka-Band.

schied zwischen beiden Maxima allerdings über 15 dBV beträgt, wird es weder einen signifikanten Beitrag zum Radar-Rückstreuquerschnitt noch zur mittleren Dopplerverschiebung liefern.

Auf eine Diskussion der einzelnen Radar-Rückstreuquerschnitte und ihrer Abhängigkeit von Radarfrequenz, Substanz, Windgeschwindigkeit und vom Ort des Auftropfens wird hier verzichtet. Es wird auf *Gade* [1992] und *Gade et al.* [1996b] verwiesen.

In Abbildung 7.12 sind die Ergebnisse der (Schwerpunkts-) Berechnungen der mittleren Dopplerverschiebungen für die mit OLA bedeckte Wasseroberfläche dargestellt. Da erst bei einer Referenz-Windgeschwindigkeit von 4.5 m/s ein Radar-Rückstreuquerschnitt gemessen wurde, sind die Daten erst ab dieser Windgeschwindigkeit dargestellt.

Die Meßergebnisse für das X-Band zeigen die Entstehung des Wellenspektrums auf:

- Bei einer Referenz-Windgeschwindigkeit von 5 m/s sind erste, frei propagierende Braggwellen durch den Wind erzeugt worden.
- Steigt die Referenz-Windgeschwindigkeit auf 6 m/s, so werden auch die längeren Dezimeterwellen erzeugt, an deren Kämmen wiederum Rippelwellen ent-

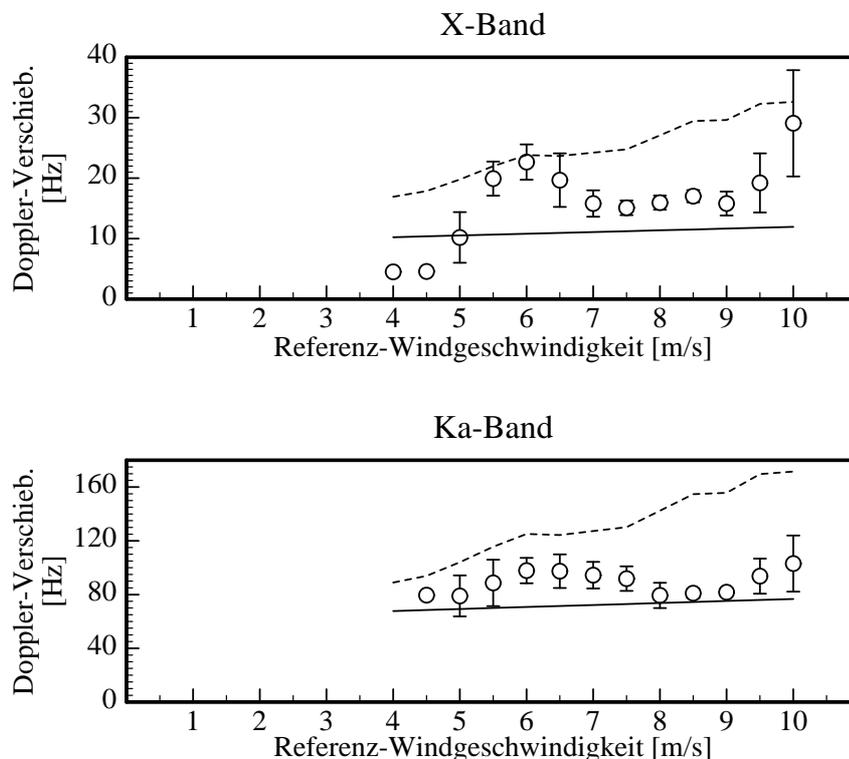


Abbildung 7.12: Wie Abbildung 7.9, jedoch für die mit OLA bedeckte Wasseroberfläche.

stehen. Die gemessene Dopplerverschiebung stimmt mit dem theoretischen Wert für gebundene Rippelwellen überein. Die Frequenz der dominanten Wellen ist hier zwar mit 2.7 Hz schon relativ niedrig, offensichtlich aber noch groß genug, damit bei filmbedeckter Wasseroberfläche gebundene Rippelwellen erzeugt werden können.

- Ab etwa 7 m/s wird der Radar-Rückstreuquerschnitt hauptsächlich von frei propagierenden Rippelwellen verursacht. Der Vergleich mit den Meßergebnissen in Abbildung 7.9 (und die Dopplerspektren in Abbildung 7.10) zeigt, daß bei filmbedeckter Wasseroberfläche im Bereich höherer Windgeschwindigkeiten offensichtlich kaum gebundene Rippelwellen auftreten.
- Bei 10 m/s reißt der Oberflächenfilm (zumindest lokal) auf, so daß sich die Verhältnisse dem Fall einer filmfreien Wasseroberfläche annähern.

Die Meßergebnisse für das Ka-Band zeigen diese Entwicklung nicht derart deutlich, doch ist sie, wie im Falle einer filmfreien Wasseroberfläche, auch hier zu erkennen:

- Im Bereich mittlerer Windgeschwindigkeiten, also bis 7.5 m/s, wird der Radar-Rückstreuquerschnitt im Ka-Band sowohl von gebundenen als auch von frei propagierenden Rippelwellen verursacht.
- Im Bereich zwischen 8 m/s und 9 m/s handelt es sich offensichtlich ausschließlich um frei propagierende Rippelwellen.
- Die Annäherung an die theoretische Kurve für gebundene Rippelwellen ist bei einer Referenz-Windgeschwindigkeit von 10 m/s nicht so deutlich wie im X-Band. Das läßt darauf schließen, daß der Erzeugungsmechanismus dieser Rippelwellen anders auf das lokale Aufreißen des Oberflächenfilms reagiert als es für die längeren X-Band-Braggwellen der Fall ist.

Die Ergebnisse dieser Diskussion werden bestätigt durch Beobachtungen während der Messungen, wo sich zeigte, daß die Dezimeterwellen durch den OLA-Film bei Referenz-Windgeschwindigkeiten fast vollständig gedämpft waren. Dieser Effekt, daß das Dämpfungsverhalten der oberflächenaktiven Substanz abhängig von der Windgeschwindigkeit ist, kann zurückgeführt werden auf die Morphologie des Oberflächenfilms.: Die Verhältnisse im Windwellenkanal (diese Aussage muß freilich auf die Rahmenbedingungen dieser Meßreihen beschränkt bleiben) scheinen bei Referenz-Windgeschwindigkeiten zwischen 7 m/s und 9 m/s die für eine effektive Dämpfung von Dezimeterwellen günstigste Voraussetzungen zu bieten, ein Effekt, der von *Gade* [1992] für unterschiedliche oberflächenaktive Substanzen beobachtet wurde. Konsequenterweise wurde bei diesen Windgeschwindigkeiten die größte Reduktion des Radar-Rückstreuquerschnitts gemessen.

Die Meßergebnisse, die bei einer Bedeckung der Wasseroberfläche mit OLA gewonnen wurden, stellen nur ein Beispiel für den allgemeinen Fall eines Oberflächenfilms dar. Es zeigt sich, daß das gemessene Dämpfungsverhalten in starkem Maße vom Ort abhängig ist, an dem die Substanz auf die Wasseroberfläche getropft wird (bzw. von dessen Abstand sowohl zum Windeintritt als auch vom Meßort). Ebenso sei

nochmals darauf hingewiesen, daß es sich bei Experimenten im Windwellenkanal immer um Ergebnisse handelt, die nicht ohne weiteres auf die Verhältnisse des offenen Meeres zu übertragen sind.

#### **7.4 Zusammenfassung der Meßergebnisse**

Die Messungen, die am Windwellenkanal der Universität Hamburg durchgeführt worden sind, stellen eine wichtige Ergänzung zu den Feldmessungen während der beiden Oberflächenfilm-Experimente in der Deutschen Bucht dar. Es wurden Messungen der Oberflächenauslenkung und -neigung mit Wellendraht resp. Lasersonden, vor allem aber des Radar-Rückstreuquerschnitts und der Dopplerverschiebung im X- und Ka-Band durchgeführt. Da es sich um kohärente Radarsensoren handelt, konnten aus der berechneten mittleren Dopplerverschiebung Rückschlüsse auf die Geschwindigkeit gezogen werden, mit der sich die Rippelwellen bewegen.

Es wurde gezeigt, daß mechanisch erzeugte Dezimeterwellen mit Frequenzen zwischen 3 Hz und 5 Hz an ihren Kämmen kleinskalige Rippelwellen erzeugen, wenn ihre Amplitude einen Schwellenwert überschritten hat (der Schwellenwert ist abhängig von der Frequenz bzw. Wellenzahl der Dezimeterwellen). Diese Rippelwellen sind an die Dezimeterwellen gebunden und bewegen sich daher mit deren Phasengeschwindigkeit und nicht mit ihrer eigenen. Sie sind verantwortlich für einen deutlichen Anstieg des Radar-Rückstreuquerschnitts im X- und Ka-Band beim Erreichen des Schwellenwertes für die Amplitude.

Dieser Effekt bleibt hingegen bei längeren (mechanisch erzeugten) Dezimeterwellen einer Frequenz von 2 Hz in dieser Deutlichkeit aus. Hier steigt der Radar-Rückstreuquerschnitt nur im X-Band nach Erreichen des Schwellenwertes etwas an, während das Ka-Band einen gleichbleibend niedrigen Radar-Rückstreuquerschnitt zeigt. Untersuchungen der mittleren Dopplerverschiebung zeigten, daß der Radar-Rückstreuquerschnitt im X-Band teilweise auf gebundene Rippelwellen zurückzuführen ist, während die Dopplerverschiebungen im Ka-Band auf keinen derartigen Anteil schließen lassen.

Sowohl im X- als auch im Ka-Band kann ein Teil der rückgestreuten Radarleistung in Verbindung gebracht werden mit Turbulenzen am Wellenkamm der Dezimeterwellen, die sich mit deren Orbitalgeschwindigkeit bewegen. Dieser Effekt wird besonders deutlich im Falle der 2 Hz-Dezimeterwellen.

Die Experimente mit winderzeugten Wasserwellen bestätigten diejenigen Ergebnisse, die mit mechanisch erzeugten Dezimeterwellen gewonnen wurden, vor allem im X-Band. Im Bereich von Windgeschwindigkeiten, bei denen die Frequenz der dominanten Wellen größer ist als etwa 2.5 Hz (d.h. bis zu einer Referenz-Windgeschwindigkeit von ungefähr 4.5 m/s), stimmen die gemessenen mittleren Dopplerverschiebungen im X-Band sehr gut mit theoretischen Werten für gebundene Rippelwellen überein. Bei höheren Windgeschwindigkeiten wurde aus der Verbreiterung des Maximums im Dopplerspektrum einerseits und aus der mittleren Dopplerverschiebung andererseits geschlossen, daß der Radar-Rückstreuquerschnitt im X-

Band sowohl von gebundenen als auch von frei propagierenden Rippelwellen verursacht wird.

Für das Ka-Band ist keine derart eindeutige Klassifizierung möglich. Bei niedrigen Windgeschwindigkeiten zeigen die gemessenen mittleren Dopplerverschiebungen denselben qualitativen Verlauf wie die theoretische Kurve für gebundene Rippelwellen. Aus dieser Tatsache sowie aus den Meßergebnissen mit mechanisch erzeugten Dezimeterwellen wird geschlossen, daß für den Radar-Rückstreuquerschnitt im Ka-Band im Bereich niedriger Referenz-Windgeschwindigkeiten sowohl gebundene als auch frei propagierende Rippelwellen verantwortlich sind. Das gilt auch für den Fall höherer Windgeschwindigkeiten, wobei die Meßergebnisse darauf schließen lassen, daß hier vor allem frei propagierende Rippelwellen dominieren.

Weiterhin wurde untersucht, inwiefern sich diese Ergebnisse ändern, wenn die Wasseroberfläche mit einem Oberflächenfilm bedeckt ist (vorgestellt wurde als Beispiel Oleylalkohol, OLA, da diese Substanz bei beiden Oberflächenfilm-Experimenten in der Deutschen Bucht auf der Meeresoberfläche ausgebracht worden war). Da in diesem Fall Oberflächenwellen (im Windwellenkanal) erst bei einer Referenz-Windgeschwindigkeit von 4.5 m/s erzeugt werden, können Aussagen nur über den Bereich von Windgeschwindigkeiten gemacht werden, die größer sind als dieser Schwellenwert.

Anhand der gemessenen mittleren Dopplerverschiebungen im X-Band konnte die Entstehung des Wellenspektrums nachvollzogen werden: Bei einer Windgeschwindigkeit, die nur wenig über dem Schwellenwert liegt, werden nur (frei propagierende) kurze Rippelwellen erzeugt. Steigt die Windgeschwindigkeit weiter, so werden auch längere Dezimeterwellen erzeugt, die dann ihrerseits wiederum an ihren Kämmen die kurzen, gebundenen Rippelwellen erzeugen. Offensichtlich werden in diesem Bereich mittlerer Windgeschwindigkeiten (um 6 m/s) keine frei propagierenden X-Band-Braggwellen erzeugt, bzw. die existierenden schnell gedämpft.

Bei wiederum höheren Windgeschwindigkeiten ist die Situation genau umgekehrt, die Amplitude der Dezimeterwellen ist zu gering, um an ihren Kämmen Rippelwellen zu erzeugen, so daß der Radar-Rückstreuquerschnitt im X-Band hauptsächlich von frei propagierenden Braggwellen erzeugt wird.

Erreicht die Referenz-Windgeschwindigkeit schließlich 10 m/s, so reißt der Oberflächenfilm lokal auf, und es findet ein Übergang zu der Situation einer filmfreien Wasseroberfläche statt.

Die gemessenen mittleren Dopplerverschiebungen im Ka-Band lassen wiederum keine derart eindeutigen Aussagen zu. Man kann aber erneut anhand ihres qualitativen Verlaufs darauf schließen, daß bis zu einer Referenz-Windgeschwindigkeit von 7.5 m/s auch gebundene Rippelwellen zum Radar-Rückstreuquerschnitt beitragen. Bei höheren Windgeschwindigkeiten werden Folgerungen wie für das X-Band gezogen.

Die Ergebnisse, die die Messungen im Windwellenkanal geliefert haben, lassen sich nicht ohne weiteres auf die Verhältnisse des offenen Meeres übertragen. Ein wichtiges Ergebnis ist jedoch, daß durch Bedeckung der Wasseroberfläche mit einem monomolekularen Oberflächenfilm unter bestimmten Bedingungen nur eine Art der

für den Radar-Rückstreuquerschnitt verantwortlichen Rippelwellen auftritt (also nur die gebundenen oder nur die frei propagierenden). Ein derartiger Mechanismus taucht weder in der Theorie der Marangoni-Dämpfung auf (vgl. Abschnitt 3.2.1) noch bei der quantitativen Diskussion derjenigen HELISCAT-Ergebnisse, die während des zweiten Oberflächenfilm-Experimentes in der deutschen Bucht gewonnen wurden (Abschnitt 5.4.4). Hier müssen weitere Studien, beispielsweise die Messung des kleinskaligen Ozeanwellenspektrums vor Ort oder die Einbeziehung der Dopplerverschiebung in die Auswertung der HELISCAT-Daten (was wegen der unzureichenden Auflösung in den Dopplerspektren bisher nicht möglich ist), zu einer verbesserten Theorie über die Dämpfung von Ozeanwellen durch Oberflächenfilme und somit zu einem besseren Verständnis der gemessenen Dämpfungsverhältnisse beitragen.

## 8 Fazit und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Ergebnisse eines umfangreichen Datensatzes vorgestellt, den die Messung des von einer filmbedeckten Wasseroberfläche rückgestreuten Radarsignals ergab. Dabei wurden während der beiden Oberflächenfilm-Experimente in der Deutschen Bucht Messungen sowohl mit dem HELISCAT als auch SIR-C/X-SAR-Aufnahmen gemacht, so daß erstmals der Vergleich zwischen der Abbildung von Oberflächenfilmen durch diese Radarsensoren möglich war.

Den vollständigsten Datensatz lieferten die Messungen mit dem HELISCAT (wenn man einmal davon absieht, daß beim zweiten Oberflächenfilm-Experiment keine gleichzeitigen Messungen mit dem SIR-C/X-SAR möglich waren). Dessen Ergebnisse wurden denn auch für eine genauere, qualitative Interpretation und, bei den Daten des zweiten Oberflächenfilm-Experimentes (wo die Windgeschwindigkeit relativ hoch war), für die Entwicklung eines Modells zur quantitativen Interpretation der gemessenen Dämpfungskurven verwendet. Mit Hilfe dieses Modells konnte das mit dem HELISCAT bei hoher Windgeschwindigkeit gemessene Dämpfungsverhalten der Oberflächenfilme in guter Übereinstimmung mit den Meßdaten simuliert werden.

Es zeigte sich, daß eine Unterscheidung verschiedener Oberflächenfilme anhand ihrer Radarsignaturen offensichtlich bei hoher Windgeschwindigkeit nicht – oder nur schwer – möglich ist, da das für die einzelnen Oberflächenfilme typische Dämpfungsverhalten dann von der Reduktion des Wellenbrechens oder des Energieeintrages durch den Wind in seiner Wirkung übertroffen wird.

Ungeklärt blieb die Frage nach der Ursache für die unterschiedliche Abbildung der Oberflächenfilme durch das HELISCAT einerseits und das SIR-C/X-SAR andererseits. Es ist zwar zu vermuten, daß das Signal-zu-Rausch-Verhältnis, das beim SIR-C/X-SAR im allgemeinen deutlich geringer ist als beim HELISCAT, zu diesen Unterschieden beiträgt, auf diese Weise können aber nicht die grundsätzlich niedrigeren, mit dem SIR-C/X-SAR gemessenen Dämpfungsverhältnisse erklärt werden. Hier sind weitere Vergleiche, möglichst von simultan mit einem SAR und dem HELISCAT aufgenommenen Daten, nötig.

Mit dem flugzeuggetragenen DOSAR der Firma Dornier konnten während des zweiten Oberflächenfilm-Experimentes nur zu einem späten Zeitpunkt SAR-Aufnahmen des Testgebietes gemacht werden, so daß der unmittelbare Vergleich zwischen dem DOSAR und dem SIR-C/X-SAR einerseits und dem HELISCAT und beiden SARs andererseits nicht möglich war. Zumindest ersteres sollte für die in der nördlichen Nordsee aufgenommenen natürlichen Oberflächenfilme, die von beiden SAR-Sensoren etwa gleichzeitig aufgenommen wurden, möglich sein. Dieser Vergleich ist insofern vielversprechend, als er zur Klärung der Frage herangezogen werden kann, ob die Größe der Auflösungszelle des SARs für die unterschiedliche Abbildung der Oberflächenfilme verantwortlich ist. Der Vergleich zwischen HELISCAT-Daten und Aufnahmen eines flugzeuggetragenen SARs bleibt zukünftigen Meßkampagnen vorbehalten.

Bei dem umfangreichen Datensatz, der mittlerweile mit dem HELISCAT über verschiedenen biogenen Oberflächenfilmen sowie über Mineralölfilmern gewonnen wurde [Wismann *et al.*, 1996a, 1996b; Hühnerfuss *et al.*, 1994; 1996], besteht weiterhin ein Bedarf an Messungen über natürlichen Oberflächenfilmen. Es liegt in der Natur dieser Oberflächenfilme (und wurde durch die Bildanalyse der SIR-C/X-SAR-Aufnahmen bestätigt), daß sie sehr inhomogen sind, weshalb intensivere Studien (bzw. ein umfangreicherer Datensatz) nötig sind, um ihr Dämpfungsverhalten zu erforschen.

Grundlegend für die Interpretation der Meßdaten sind die theoretischen Dämpfungskurven für die unterschiedlichen oberflächenaktiven Substanzen. Von Hühnerfuss [1986] wurde eine Anpassung der Parameter an Meßdaten, die im Windwellenkanal mit Wasserwellen im Frequenzbereich unterhalb von 3 Hz gewonnen wurden, durchgeführt. Die daraus resultierenden theoretischen Kurven bedürfen weiterhin einer Bestätigung durch Labormessungen im Frequenzbereich (mindestens) bis 10 Hz. Ebenso sollten auf diese Weise theoretische Dämpfungskurven für natürliche Oberflächenfilme und Mineralölfilmern gewonnen werden, die zur Interpretation der zahlreichen Meßergebnisse benötigt werden.

In mindestens einem der vorgestellten Fälle lag die filmbedeckte Wasseroberfläche während der SIR-C/X-SAR-Aufnahme in einem Regengebiet (der Mineralölfilm im Atlantik, vgl. Abschnitt 6.4.2). Erste Untersuchungen über die Beeinflussung des Oberflächenfilms durch Regen liegen zwar schon vor [Green und Houk, 1979], es bedarf aber weiterer Studien, um nicht nur die Beeinflussung der Dämpfungseigenschaften des Oberflächenfilms durch den Regen, sondern auch die Auswirkungen auf den Radarkontrast zu erforschen. Auch hier können Messungen im Windwellenkanal unterstützende Ergebnisse liefern.

Die Frage, ob weltraumgestützte SAR-Systeme in der Lage sind, natürliche Oberflächenfilme von Mineralölfilmern zu unterscheiden, kann auch mit Hilfe des vorliegenden Datensatzes nicht abschließend beantwortet werden. Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, daß bei niedriger Windgeschwindigkeit (wie bei den SIR-C/X-SAR-Aufnahmen über der Ostsee) die natürlichen Oberflächenfilme nicht nur aufgrund ihrer Gestalt von Mineralölfilmern zu unterscheiden sind, sondern auch – vor allem im L-Band – ein anderes Dämpfungsverhalten zeigen. Zur weiteren Untersuchung dieses Dämpfungsverhaltens sind allerdings zusätzliche Messungen mit einem SAR-System, das ein höheres Signal-zu-Rausch-Verhältnis aufweist, nötig (bzw. entsprechende SIR-C/X-SAR-Aufnahmen). Bei hohen Windgeschwindigkeiten wird sich die Frage in dieser Form nicht stellen, da natürliche Oberflächenfilme dann normalerweise nicht an der Wasseroberfläche anzutreffen sind, wohl aber Mineralölfilmern. Die Ergebnisse des zweiten Oberflächenfilm-Experimentes haben allerdings gezeigt, daß, bei Anwesenheit beider Filmarten, diese aufgrund ihrer Dämpfungscharakteristiken mit einem SAR-System nicht (und mit dem HELISCAT nur schwer) zu unterscheiden sind.

In jedem Fall konnte aber gezeigt werden, daß die Kombination von Informationen, die aus der Analyse von multifrequenten Multipolarisations-SAR-Aufnahmen gewonnen wurden, zusätzliche Erkenntnisse über die Art des beobachteten Oberflächenfilms geben kann.

## 9 Danksagung

Prof. Dr. Werner Alpers war Betreuer und Aufgabensteller der vorliegenden Arbeit. Ihm verdanke ich die Möglichkeit der Teilnahme an internationalen Tagungen und der damit verbundenen Präsentation der Ergebnisse.

PD Dr. Heinrich Hühnerfuß hat den Fortgang der Untersuchungen mit ständigem Interesse verfolgt. Bei ihm möchte ich mich für viele wertvolle Ratschläge und für Hilfen bei der Interpretation der Meßergebnisse bedanken.

Dr. Volkmar Wismann hat das HELISCAT entwickelt und gebaut sowie dessen Einsatz während der Meßkampagnen geleitet. Seine sorgfältige Datenauswertung sowie seine Erfahrung in der Interpretation der Meßergebnisse waren eine große Hilfe für die Analyse der HELISCAT-Daten.

Dr. Philipp A. Lange bin ich dankbar für die technische Unterstützung während der Messungen am Windwellenkanal der Universität Hamburg sowie für viele wissenschaftliche und freundschaftliche Hilfen während der gesamten Zeit.

Für wertvolle Hilfen bei der Datenanalyse sowie für wichtige Beiträge zu Inhalt und Form der vorliegenden Arbeit möchte ich mich bei Dr. Mingquan Bao, Dr. Eva Bauer, Rainer Burkert, Renko Buß, Christian Melsheimer, Dr. Roland Romeiser, Dr. Ralf Schmidt und Christoph Staabs bedanken.

Bei der Prozessierung der umfangreichen Datensätze waren Asmus Michelsen, Ramon Franck, Jürgen Gerdes, Mark Keßler, Michael Kim, Gerd Tanck und Susanne Ufermann, vor allem aber Dmitri Gamarnik eine große Hilfe.

Dem Rest der Forschungsgruppe Satellitenozeanographie am Institut für Meereskunde der Universität Hamburg danke ich für das nette Betriebsklima während der ganzen Zeit.

Mein Dank gilt Heike Dannhauer, die bei der Vor- und Nachbereitung sämtlicher Experimente sowie in den Zeiten großen öffentlichen Interesses an ihnen eine große Unterstützung war. Bei der Durchführung der Experimente haben außerdem Robert Gatermann, Volker Neumann und Johannes Simon-Kutscher geholfen.

Für die reibungslose und unbürokratische Unterstützung bei der Abwicklung der zahlreichen Bestellungen von SIR-C/X-SAR-Aufnahmen bedanke ich mich bei Hartmut Runge (DLR, Oberpfaffenhofen) und bei Benjamin Holt (JPL, Pasadena, CA).

Die Oberflächenfilm-Experimente in der Deutschen Bucht konnten nur deshalb erfolgreich durchgeführt werden, weil von vielen Stellen wichtige Hilfen kamen. Hier sind vor allem die Mitglieder der Firma Helicopter-Service Wasserthal in Hamburg, speziell Uwe Lahrman und Oliver Hillebrandt, zu nennen. Bei den Angestellten der Sonderstelle des Bundes für Ölunfälle / See, Küste (SBÖ) in Cuxhaven, speziell bei den Herren Schroh, Hetebück und Schmidt bedanke ich mich für die intensive Unterstützung bei der Planung und Durchführung der Experimente. Ebenfalls an deren erfolgreichen Verlauf waren die Besatzungen der MS Aade (Kpt. Rów) und der MS Regulus

(Kpt. Jakobs) sowie die Jungs vom Marineflieger-Geschwader (MFG) 3 in Nordholz beteiligt.

Peter Fischer von der Firma Dornier in Friedrichshafen stellte erste Ergebnisse von Messungen mit dem DOSAR zur Verfügung, die wichtige Impulse für die Interpretation der hier vorgestellten Meßergebnisse lieferten. Gemeinsam mit ihm wurde eine intensive Zusammenarbeit zwischen Dornier und der Uni Hamburg initiiert.

Dr. William J. Plant vom Applied Physics Laboratory der Universität von Washington in Seattle, WA, hat wichtige Impulse für die Interpretation derjenigen Meßergebnisse geliefert, die am Windwellenkanal gewonnen wurden.

Für den Austausch von Informationen über die Experimente und deren Meßergebnisse möchte ich mich bei Dr. Harunobu Masuko vom Communications Research Laboratory in Tokyo, Japan, bedanken.

Dr. Stanislav A. Ermakov vom Institut für Angewandte Physik der Akademie der Wissenschaften Rußlands in Nizhny Novgorod, Rußland, hat das Ka-Band für die Messungen am Windwellenkanal zur Verfügung gestellt und Vorschläge zu Messungen und deren Auswertung gegeben.

Besonders herzlich bedanke ich mich bei Martina Michel für ihre ständige Geduld und große Unterstützung, die vor allem in der Zeit des Zusammenschreibens der vorliegenden Arbeit von großer Bedeutung waren. Mein Dank gilt auch meinen Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglicht und meine Promotion mit ständigem Interesse verfolgt haben.

Mit Sicherheit habe ich noch jemanden vergessen...

Diese Arbeit wurde gefördert durch die Fraunhofer Gesellschaft/München (Vertrag T/RF35/L0013/L1309, SAXON-FPN) sowie durch das (ehemalige) Bundesministerium für Forschung und Technologie/Bonn (Vertrag BMFT 01 QS 90160).

## 10 Literaturverzeichnis

- Alpers, W.R., D.B. Ross und C.L. Rufenach, On the detectability of ocean surface waves by real and synthetic aperture radar, *J. Geophys. Res.*, 86, 6481–6498, 1981.
- Alpers, W. und H. Hühnerfuss, Radar signatures of oil films floating on the sea surface and the Marangoni effect, *J. Geophys. Res.*, 93, 3642–3648, 1988.
- Alpers, W. und H. Hühnerfuss, The damping of ocean waves by surface films: a new look at an old problem, *J. Geophys. Res.*, 94, 6251–6265, 1989.
- Alpers, W., V. Wismann, R. Theis, H. Hühnerfuss, N. Bartsch, J. Moreira und J.D. Lyden, The damping of ocean surface waves by monomolecular sea slicks measured by airborne multi-frequency radars during the SAXON-FPN experiment, *Proceed. Intern. Geosci. and Remote Sens. Sympos. 1991*, 1991.
- Alpers, W., H. Hühnerfuss, R. Theis, V. Wismann, P.A. Lange und S.A. Ermakov, Detection and classification of organic surface films by means of multifrequency radar techniques, *Proceed. Intern. Geosci. and Remote Sens. Sympos. 1992*, 1992.
- Barni, M., M. Betti und A. Mecocci, A fuzzy approach to oil spill detection on SAR images, *Proceed. Intern. Geosci. and Remote Sens. Sympos. 1995*, 157–159, 1995.
- Bock, E.J. und N.M. Frew, Static and dynamic response of natural multicomponent oceanic films to compression and dilation: laboratory and field observations, *J. Geophys. Res.*, 98, 14599–14617, 1993.
- Chang, J.H., R.N. Wagner und H.C. Yuen, Measurement of high frequency capillary waves on steep gravity waves, *J. Fluid Mech.*, 86, 401–413, 1978.
- Cini, R. und P.P. Lombardini, Damping effect of monolayers on surface wave motion in a liquid, *J. Colloid Interface Sci.*, 65, 387–389, 1978.
- Cini, R., P.P. Lombardini und H. Hühnerfuss, Remote sensing of marine slicks utilizing their influence on wave spectra, *Int. J. Remote Sensing*, 4, 101–110, 1983.
- Cini, R., P.P. Lombardini, C. Manfredi und E. Cini, Ripples damping due to monomolecular films, *J. Colloid Interface Sci.*, 119, 74–80, 1987.
- Crapper, G.D., Non-linear capillary waves generated by steep gravity waves, *J. Fluid Mech.*, 40, 149–159, 1970.
- De Loor, G.P., Tower-mounted radar backscatter measurements in the North Sea, *J. Phys. Res.*, 88, 9785–9791, 1983.
- Donelan, M.A. und W.J. Pierson Jr., Radar scattering and equilibrium ranges in wind-generated waves with application to scatterometry, *J. Geophys. Res.*, 92, 4971–5029, 1987.

- Ebuchi, N., H. Kawamura und Y. Toba, Fine structure of laboratory wind-wave surfaces studied using an optical method, *Bound.-Layer Meteor.*, 39, 133–151, 1987.
- Ebuchi, N., H. Kawamura und Y. Toba, Statistical properties of microwave backscattering from laboratory wind-wave surfaces, *J. Oceanogr.*, 48, 139–154, 1992.
- Ermakov, S.A., A.M. Zujkova, A.R. Panchenko, S.G. Salashin, T.G. Talipova und V.I. Titov, Surface film effect on short wind waves, *Dyn. Atmos. Oceans*, 10, 31–50, 1986.
- Feindt, F., Radar-Rückstreuexperimente am Wind-Wellen-Kanal bei sauberer und filmbedeckter Wasseroberfläche im X-Band (9.8 GHz), Dissertation, Univ. Hamburg, 223 Seiten, 1985.
- Freeman, A., M. Alves, B. Chapman, J. Cruz, Y Kim, S. Shaffer, J. Sun, E. Turner und K. Sarabandi, SIR-C data quality and calibration results, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 33, 848–857, 1995.
- Gade, M., Untersuchungen zur Wellendämpfung von monomolekularen Oberflächenfilmen mit Hilfe von Wellendraht-, Laser- und Radarsonden, Diplomarbeit, Univ. Hamburg, 96 Seiten, 1992.
- Gade, M. und W. Alpers, The German surface film experiments during the two SIR-C/X-SAR missions, *EARSeL Newsletters* 3/95, 1995.
- Gade, M. und W. Alpers, First results of the German surface film experiments during the two SIR-C/X-SAR missions, in *Progress in Environmental Remote Sensing Research and Application*, E. Parlow (Hrsg.), Balkema, Rotterdam/Niederlande, 484 Seiten, 1996.
- Gade, M., S.A. Ermakov, P.A. Lange und W. Alpers, Wind-wave tank measurements of short gravity-capillary waves and their modulation by long surface waves, unveröffentl. Manuskript, 1996a.
- Gade, M., W. Alpers, H. Hühnerfuss und P.A. Lange, Wind-wave tank measurements of wave damping and radar cross sections in the presence of monomolecular surface films, unveröffentl. Manuskript, 1996b.
- Gade, M., W. Alpers, M. Bao und H. Hühnerfuss, Measurements of the radar backscattering over different oceanic surface films during the SIR-C/X-SAR campaigns, *Proceed. Intern. Geosci. and Remote Sens. Sympos.* 1996, 1996c.
- Gade, M., W. Alpers, H. Hühnerfuss und V. Wismann, Radar signatures of different oceanic surface films measured during the SIR-C/X-SAR missions, *Proceed. EARSeL Sympos.* 1996, 1996d.

- GESAMP (IMO/FAO/UNESCO/WMO/WHO/IAEA/UN/UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution), Impact of oil and related chemicals and wastes on the marine environment, *Rep. Stud. GESAMP (50)*, 180 Seiten, 1993.
- Green, T. und D.F. Houk, The removal of organic surface films by rain, *Limnol. Oceanogr.*, 24(5), 966–970, 1979.
- Grüner, K., R. Reuter und H. Smid, A new sensor for airborne measurements of maritime pollution and of hydrographic parameters, *GeoJournal*, 24.1, 103–117, 1991.
- Hasselmann, K., Grundgleichungen der Seegangsvorhersage, *Schiffstechn. Z.*, 191–195, 1960.
- Hönig, D., D.A. Overbeck und D. Möbius, Morphology of pentadecanoic acid monolayers at the air/water interface studied by BAM, *Adv. Mater.*, 4, 419–424, 1992.
- Hühnerfuss, H., Molecular aspects of organic surface films on marine waters and the modification of water waves, *Chim. Ind. (Milan)*, 65, 97, 1983.
- Hühnerfuss, H., The molecular structure of the system water/monomolecular surface film and its influence on water wave damping, Habilitationsschrift, Univ. Hamburg, 245 Seiten, 1986.
- Hühnerfuss, H., P.A. Lange, J. Teichert und H. Vollmers, A wind wave tunnel for the investigation of artificial slick wave damping and drift, *Meer Mar. Tec.*, 7, 23–26, 1976.
- Hühnerfuss, H., W. Walter und G. Kruspe, On the variability of surface tension with mean wind speed, *J Phys. Oceanogr.*, 7, 567–571, 1977.
- Hühnerfuss, H. und W.D. Garrett, Experimental sea slicks: their practical applications and utilization for basic studies of air-sea-interactions, *J. Geophys. Res.*, 86, 439–447, 1981.
- Hühnerfuss, H., P.A. Lange und W. Walter, Wave damping by monomolecular surface films and their chemical structure. Part I: Variation of the hydrophobic part of carboxylic acid esters, *J. Mar. Res.*, 40, 209–225, 1982.
- Hühnerfuss, H., W. Alpers, O. Fäst, P.A. Lange, A. Loffet, K. Richter, R.C. Schriel, N. Skou und F. Witte, The discrimination between crude oil spills and monomolecular sea slicks by airborne remote sensors, in: *The Archimedes 2 experiment, JRC report*, 167–177, 1987.
- Hühnerfuss, H., A. Gericke, W. Alpers, R. Theis, V. Wismann und P.A. Lange, Classification of sea slicks by multifrequency radar techniques: new chemical insights and their geophysical implications, *J. Geophys. Res.*, 99, 9835–9845, 1994.

- Hühnerfuss, H., W. Alpers, H. Dannhauer, M. Gade, P.A. Lange, V. Neumann und V. Wismann, Natural and man-made sea slicks in the North Sea investigated by a helicopter-borne 5-frequency radar scatterometer, *Int. J. Remote Sensing*, in Druck, 1996.
- Hunter, K.A. und P.S. Liss, Organic sea surface films, in *Marine Organic Chemistry: Evolution, Composition, Interactions and Chemistry of Organic Matter in Sea Water*, E.K. Duursma und R. Dawson (Hrsg.), Elsevier, New York, 1981.
- Jet Propulsion Laboratory, SIR-C/X-SAR Mission Overview, *JPL Publication 93-29*, 202 Seiten, 1993.
- Johnson, J.W. und W.F. Crosswell, Characteristics of 13.9 GHz radar scattering from oil films on the sea surface, *Radio Sci.*, 17, 611–617, 1982.
- Jones, W.L. und L.C. Schroeder, Radar backscatter from the ocean: dependence on friction velocity, *Bound.-Layer Meteor.*, 13, 133–149, 1978.
- Jordan, R.L., B.L. Honeycutt und M. Werner, The SIR-C/X-SAR synthetic aperture radar system, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 33, 829–839, 1995.
- Kasilingam, D., Measuring the thickness of oil slicks using polarimetric radar signatures, *Proceed. Progr. in Electromagn. Res. Sympos. '94*, 493, 1994.
- Keller, M.R., W.C. Keller und W.J. Plant, A wave tank study of the dependence of X band cross sections on wind speed and water temperature, *J. Geophys. Res.*, 97, 5771–5792, 1992.
- Keydel, W. und H. Öttl, Notwendigkeit und Nutzen des X-SAR-Space-Shuttle-Experiments, *DFVLR-Mitt. 88-29*, 38 Seiten, 1988.
- Koopmann, G., Was bedeutet das MARPOL-Abkommen für die Nordsee?, *DHI / Ozeanographie 1985/86*, Hamburg, 54–56, 1987.
- Kwoh D.S. und B.M.Lake, The nature of microwave backscattering from water waves, in *The Ocean Surface*, Y.Toba and H.Mitsuyasu (Hrsg.), 249–256, D.Reidel Publishing Company, 1985.
- Lange, P.A., B. Jähne, J. Tschiersch und I. Ilmberger, Comparison between an amplitude-measuring wire and a slope-measuring laser water wave gauge, *Rev. Sci. Instrum.*, 651–655, 1982.
- Lean, G. und D. Hinrichsen, *WWF Atlas of the Environment*, Helicon Publishing Ltd, Oxford, England, 1992.
- Lobemeier, P., Wire probe for measuring high frequency sea waves, *J. Phys.*, E 14, 1407, 1981.

- Longuet-Higgins, M.S., The generation of capillary waves by steep gravity waves, *J. Fluid Mech.*, 52, 725–751, 1963.
- Longuet-Higgins, M.S. und R.P. Cleaver, Crest instabilities of gravity waves, *J. Fluid Mech.*, 1993.
- Longuet-Higgins, M.S., R.P. Cleaver und M.J.H. Fox, Crest instabilities of gravity waves II, *J. Fluid Mech.*, 1994.
- Lucassen-Reynders, E.H. und J. Lucassen, Properties of capillary waves, *Adv. Colloid Int. Science*, 2, 347–395, 1969.
- Macklin, J.T., Modelling of the visibility of sea-surface films in radar images as a function of wind speed, *Proceed. Intern. Geosci. and Remote Sens. Sympos. 1995*, 1367–1368, 1995.
- Masuko, H., T. Kobayashi, K. Okamoto und W. Alpers, Observation of artificial slicks with SIR-C/X-SAR around Japan, *Proceed. Intern. Geosci. and Remote Sens. Sympos. 1995*, 227–229, 1995.
- Melsheimer, C., W. Alpers und M. Gade, Investigation of multi-frequency/multi-polarization radar signatures of rain cells, derived from SIR-C/X-SAR data, *Proceed. Intern. Geosci. and Remote Sens. Sympos. 1996*, 1996.
- Mitsuyasu, H. und T. Honda, The effects of surfactant on certain air-sea interaction phenomena, in *Wave Dynamics and Radio Probing of the Ocean Surface*, O.M. Phillips und K. Hasselmann (Hrsg.), Plenum, New York, 95–115, 1986 National Research Council, Oil in the Sea. Inputs, Fates and Effects, *National Academic Press*, Washington, D.C., 601 Seiten 1985.
- Neville, R.A., V. Thomson, L. Gray und R.K. Hawkins, Observation of two test oil spills with a microwave scatterometer and a synthetic aperture radar, in *Remote Sensing for the Control of Marine Pollution*, J.M. Masin (Hrsg.), Plenum, 257–266, 1984.
- Onstott, R. und C. Rufenach, Shipboard active and passive microwave measurement of ocean surface slicks off the southern California coast, *J. Geophys. Res.*, 97, 5315–5323, 1992.
- Pellemans, A.H.J.M., W.G. Bos, H. Konings und R.W. van Swol, Oil spill detection on the North Sea using ERS-1 SAR data, *BCRS Report 94-30*, Netherlands Remote Sensing Board (BCRS), 53 Seiten, 1995.
- Phillips, O.M., *The dynamics of the upper ocean*, Cambridge Univ. Press, 1977.
- Phillips, O.M., Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves, *J. Fluid Mech.*, 156, 505–531, 1985.

- Phillips, O.M., Radar returns from the sea surface – Bragg scattering and breaking waves, *J. Phys. Ocean.*, 18, 1065–1074, 1988.
- Plant, W.J., A relationship between wind stress and wave slope, *J. Geophys. Res.*, 87, 1961–1967, 1982.
- Plant, W.J., E.A. Terray, R.A. Petitt Jr. und W.C. Keller, The dependence of microwave backscatter from the sea on illuminated area: Correlation times and lengths, *J. Geophys. Res.*, 99, 9705–9723, 1994.
- Romeiser, R., Eine verbesserte Theorie zur Modulation der Radar-Rückstreuung von der Meeresoberfläche auf der Basis eines Drei-Skalen-Modells, Dissertation, Univ. Hamburg, 118 Seiten, 1993.
- Romeiser, R., A. Schmidt und W. Alpers, A three-scale composite surface model for the ocean wave–radar modulation transfer function, *J. Geophys. Res.*, 99, 9785–9802, 1994.
- Saxton, J.S. und J.A. Lane, Electrical properties of sea water, in *Wireless Engineer*, Vol. 29, Dorset House, London, 269 Seiten, 1952.
- Singh, K.P., A.L. Gray, R.K. Hawkins und R.A. O’Neil, The influence of surface oil on C- and Ku-band backscatter, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, GE-24,738–744, 1986.
- Sloggett, D.R. und I.S. Jory, An operational, satellite-based, European oil slicks monitoring system, in *Sensors and Environmental Applications of Remote Sensing*, Askne (Hrsg.), Balkema, Rotterdam, 1995.
- Soofi, K.V., R.K. Moore, S. Gogieni, Y.S. Kim und Y.S. Yu, Wave tank measurements of contrast between clean and pollutant-covered water radar returns, Technischer Bericht, Univ. of Kansas, Rem. Sens. Lab., 55 Seiten, 1980.
- Stofan, E.R., D.L. Evans, C. Schmultius, B. Holt, J.J. Plaut, J. van Zyl, S.D. Wall und J. Way, Overview of results of spaceborne imaging radar-C, X-band synthetic aperture radar (SIR-C/X-SAR), *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 33, 817–828, 1995.
- Tokuda, M. und Y. Toba, Statistical characteristics of individual waves in laboratory wind waves. II. Self-consistent similarity regime, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 38, 8–14, 1982.
- Tseng, W.Y. und L.S. Chiu, AVHRR Observations of Persian Gulf oil spills, *Proceed. Intern. Geosci. and Remote Sens. Sympos. 1994*, 779–782, 1994.
- Ulaby, F.T. und C. Elachi, *Radar Polarimetry for Geoscience and Applications*, Artech House, Norwood, 364 Seiten, 1990.
- Valenzuela, G.R., Theories for the interaction of electromagnetic and ocean waves – a review, *Boundary Layer Meorol.*, 13, 61–85, 1978.

- Vesecky, J., Surface film effects on the radar cross section of the ocean surface, *Proceed. Intern. Geosci. and Remote Sens. Sympos.* 1995, 1375–1377, 1995.
- Wahl, T., T. Anderssen und Å. Skølv, Oil spill detection using satellite based SAR; pilot operation phase, final report, *Internal Report Norwegian Defense Research Establishment*, 153 Seiten, 1994.
- Wei, Y. und J. Wu, In situ measurements of surface tension, wave damping, and wind properties modified by natural films, *J. Geophys. Res.*, 97, 5307–5313, 1992.
- Wismann, V., The 5-frequency multi-polarization scatterometer HELISCAT of the University of Hamburg for operation on a small helicopter, Technischer Bericht, Univ. Hamburg, 10 Seiten, 1994.
- Wismann, V., Messungen der Radarsignaturen von Oberflächenfilmen in der Nordsee mit dem HELISCAT der Universität Hamburg, Technischer Bericht, Institut für angewandte Fernerkundung, Wedel, 95 Seiten, 1995.
- Wismann, V., M. Gade, W. Alpers und H. Hühnerfuss, Radar signatures of marine mineral oil spills measured by an airborne multi-frequency radar, unveröffentl. Manuskript, 1996a.
- Wismann, V., W. Alpers, R. Theis und H. Hühnerfuss, The damping of short gravity-capillary waves by monomolecular sea slicks measured by an airborne multi-frequency microwave scatterometer, unveröffentl. Manuskript, 1996b.
- Wright, J.W., A new model for sea clutter, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, AP-16, 217–223, 1968.
- Wu, J., Wind induced drift currents, *J. Fluid Mech.*, 68, 49–70, 1975.
- Zebker, H.A. und J.J. van Zyl, Imaging radar polarimetry: a review, *Proceed. IEEE*, 79, 1583–1606, 1991.
- Zink, M. und R. Bamler, X-SAR radiometric calibration and data quality, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 33, 840–847, 1995.
- van Zyl, J.J., On the importance of polarization in radar scattering problems, Dissertation, California Institute of Technology, Pasadena, 152 Seiten, 1986.
- van Zyl, J.J., H.A. Zebker und C. Elachi, Imaging radar polarization signatures: Theory and observations, *Radio Sci.*, 22, 529–543, 1987.