

Fernerkundungstechnik zum Erkennen und Überwachen von Öl auf der Meeresoberfläche der Nord- und Ostsee

LARS TUFTE, OLAF TRIESCHMANN, THOMAS HUNSÄNGER & ULRICH BARJENBRUCH,
Koblenz

Keywords: remote sensing, oil spill, water pollution, SLAR, SAR, IR/UV, Microwave Radiometer, Laser Fluorosensor

Zusammenfassung: Zur Überwachung der Nord- und Ostsee hinsichtlich Meeresverschmutzungen wurde in der Bundesrepublik Deutschland ein modernes Beobachtungssystem entwickelt. Die flugzeuggestützte Überwachung mit ihren zwei Do 228-212 Flugzeugen ist der wesentliche Bestandteil des Systems. Bei den Verunreinigungen handelt es sich größtenteils um Ölverschmutzungen von Schiffen oder Offshore-Anlagen. Die Flugzeuge sind mit Seitensicht radar (SLAR), IR/UV Zeilenscanner, Mikrowellenradiometer (MWR), Laserfluorosensor (LFS) und Foto- und Video-Kameras ausgerüstet. Das Seitensicht radar (Weitbereichssensor) ermöglicht die großräumige Entdeckung von möglichen Ölverschmutzungen. Der IR/UV Zeilenscanner, das MWR und der LFS dienen als Nahbereichssensoren zur qualitativen und quantitativen Bestimmung der Verschmutzung. Als Ergänzung zur flugzeuggestützten Überwachung wurde der Einsatz von SAR-Satelliten (RADARSAT-1 und ENVISAT ASAR) untersucht. Die Nutzung von SAR-Satelliten stellt eine sinnvolle Ergänzung der flugzeuggestützten Ölüberwachung dar. Eine alleinige Überwachung durch die Nutzung von Satellitendaten ist aber aufgrund der temporalen Auflösung, der limitierten Sensorausstattung und der fehlenden juristischen Beweissicherung nicht empfehlenswert, jedoch ergänzen sich die Eigenschaften der satelliten- und flugzeuggestützten Ölüberwachung zu einem effizienten Überwachungssystem.

Summary: *Remote sensing techniques for the detection and surveillance of oil on the sea surface in the North Sea and Baltic Sea.* To conduct marine pollution monitoring a modern surveillance system was established in Germany. The aerial surveillance as the most important part of the system consists of two Do 228-212 aircraft. Most of the pollution are oil spills from vessels and oil rigs. The aircraft are equipped with a SLAR, an IR/UV scanner, a microwave radiometer (MWR), a laser fluorosensor (LFS) and cameras. The SLAR (long range sensor) is used to detect possible oil spills. The IR/UV scanner, the MWR and the LFS are used to classify and quantify the pollution. As a supplement to the aerial surveillance the employment of SAR satellites (RADARSAT-1 and ENVISAT ASAR) was investigated and the results are promising. Due to the temporal resolution, the limited sensors and the lack of possibility to collect evidence the exclusive use of satellite data for oil spill monitoring is not recommendable, but the complementary use of satellite- and airborne surveillance can lead to an efficient surveillance system.

1 Einleitung

Zur Überwachung der Nord- und Ostsee in Hinsicht auf Meeresverschmutzungen wurde in der Bundesrepublik Deutschland ein modernes Beobachtungssystem entwickelt. Der wesentliche Bestandteil dieses Systems ist die flugzeuggestützte Überwachung. Auftraggeber der Luftüberwachung ist das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW). Die Luftüberwachung dient zur Ortung und Analyse von Verschmutzungen sowie der Einsatzsteuerung von Bekämpfungsschiffen. Zusätzlich kann sie wichtige Beweise für die Strafverfolgung von Verursachern illegaler Einleitungen liefern. Hauptaugenmerk ruht auf der Überwachung von Verschmutzungen, die vom Schiffsverkehr in der Nord- und Ostsee und den Offshore-Anlagen in der Nordsee ausgehen. Größtenteils handelt es sich dabei um Ölverschmutzungen.

Für die Überwachung werden 2 Fairchild/Dornier Do 228-212 Flugzeuge eingesetzt. Die maximale Flugdauer beträgt 5,5 h. Daraus ergibt sich bei einer mittleren Reisegeschwindigkeit von 360 km/h eine maximale Reichweite von ca. 2000 km.

Beide Flugzeuge sind mit zahlreichen Sensoren ausgestattet. Dies sind ein Seitensicht-radar (Side-Looking Airborne Radar, SLAR) für die großräumige Erkennung von möglichen Ölverschmutzungen sowie ein kombinierter Infrarot/Ultraviolett (IR/UV) Zeilenscanner zur Bestimmung der Ausdehnung. Ergänzt wird die Ausrüstung durch ein Mikrowellenradiometer (MWR) und einen Laserfluorosensor (LFS) zur detaillierteren Untersuchung der Verschmutzung. Foto- und Video-Kameras dienen der Identifizierung des Verursachers der Verschmutzung und der Beweissicherung. Ein Flugzeug ist zusätzlich mit einer vorwärtsgerichteten Infrarotkamera mit Laserilluminator ausgerüstet.

Ausgehend von der Beschreibung der Anforderungen an die operationelle Überwachung (Kapitel 2) werden die Sensoren in Kapitel 3 beschrieben. Dabei wird spezielles Augenmerk auf das MWR und den LFS gelegt, da diese beiden Instrumente nicht zu

den allgemein bekannten Fernerkundungssensoren gehören. Derzeit wird die Einsatzmöglichkeit von SAR-Satelliten (RADAR-SAT-1 und ENVISAT ASAR) zur Ergänzung der flugzeuggestützten Ölüberwachung im Rahmen des EU geförderten OCEANIDES Projektes untersucht. Erste Ergebnisse hierzu werden in Kapitel 4 beschrieben.

2 Operationelle Anforderungen an die Luftüberwachung

Die Überwachung der Nord- und Ostsee bezüglich Ölverschmutzungen (illegal oder durch einen Unfall eingeleitet) erstreckt sich auf die Deutsche Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ) in der Nord- und Ostsee und zum Teil auf angrenzende Gebiete der Nachbarstaaten, die im Rahmen von Abkommen überwacht werden. Sie muss möglichst unabhängig von den optischen Sichtverhältnissen und den Wetterverhältnissen sein und wechselnde Einsatzpläne ermöglichen. Sie sollte für mögliche Verursacher von Verschmutzungen keine vorhersehbaren Lücken bieten. Die entdeckte Ölverschmutzung soll mit einer Genauigkeit lokalisiert, klassifiziert und quantifiziert werden, die bei einem möglichem entdeckten Verursacher eine gerichtsverwertbare Beweislage für die Strafverfolgung ermöglicht. Bei der Bekämpfung/Beseitigung von Ölverschmutzungen sollen Informationen bezüglich der größten Öflächen mit der Position der größten Schichtdicke zum Zwecke der Einsatzkoordination der Bekämpfungsschiffe ermittelt und weitergegeben werden.

Aus den beschriebenen Anforderungen ergibt sich als Sensorplattform zwangsläufig ein Flugzeug, da sich nur hiermit die entsprechende Flexibilität und Reichweite erzielen lässt. Folgende allgemeine Anforderungen an die Sensoren lassen sich aus den beschriebenen operationellen Anforderungen ableiten:

- großräumige Überwachung der Seegebiete mit einem Weitbereichssensor (SLAR) zur Entdeckung von Strukturen, die auf mögliche Ölverschmutzungen hinweisen,

- anschließende Untersuchung der Ausdehnung, der Dicke und des Typs der Ölverschmutzung mit Nahbereichssensoren (IR/UV, MWR, LFS) und
- Einsatz von Kameras zur Beweissicherung (Idealerweise unabhängig vom Tageslicht).

3 Sensoren zur Ölüberwachung

Abb.1 zeigt einen Längsschnitt durch ein Do 228 Flugzeug der Luftüberwachung und die Anordnung der Sensoren. Im folgenden Kapitel werden das SLAR, der IR/UV Zeilenscanner, das MWR und der LFS näher beschrieben.

3.1 Das Seitensicht radar (Side-Looking Airborne RADAR, SLAR)

Der dominante Mechanismus für die Rückstreuung des Radarsignals von der Meeresoberfläche bei einem Einfallswinkel größer 20° ist die Bragg-Streuung (ULABY et al. 1982). Voraussetzung hierfür sind Kapillarwellen auf der Wasseroberfläche, welche durch den Wind gebildet werden. Mineralöl auf der Meeresoberfläche dämpft diese Kapillarwellen (ALPERS & HÜHNERFUSS 1989, MOUCHOT & GARELO 1998). Die Dämpfung führt zu einer Abnahme der Radarrückstreuung, die im Bild als dunkle Stellen sichtbar wird (Abb. 2). Aber auch natürliche Oberflächenfilme, wie sie zum Beispiel von Plankton oder Tieren produziert werden, zeigen starke wellendämpfende Eigenschaften

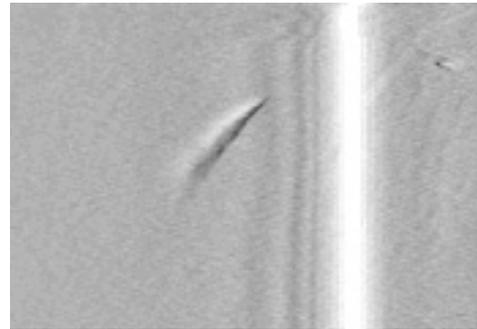


Abb. 2: Ölverschmutzung im SLAR-Bild (weißer Streifen ist die Flugbahn).

ten und können somit vergleichbare Strukturen im Bild erzeugen (GADE et al. 1998). Weitere natürliche Phänomene, die zu einer Reduzierung der Radarrückstreuung führen können, sind lokale Windveränderungen (Windabschattungen), Variationen in der Bodentopographie oder aufsteigendes kaltes Wasser.

Das Seitensicht radar (aktiver Sensor) dient zur weiträumigen Erkennung von möglichen Ölverschmutzungen auf der Meeresoberfläche. Der Sensor sendet quer zur Flugrichtung zu beiden Seiten Mikrowellenimpulse im X-Band (9,4 GHz) mit einer unter dem Flugzeug montierten zylindrischen Antenne aus. Die ausgesandten Mikrowellenimpulse des Radars werden von den Kapillarwellen der Meeresoberfläche, aber auch von Schiffen und anderen Installationen auf der Meeresoberfläche (z.B.

Längsschnitt durch das Meßflugzeug Do228LM1 mit der Meßbausrüstung

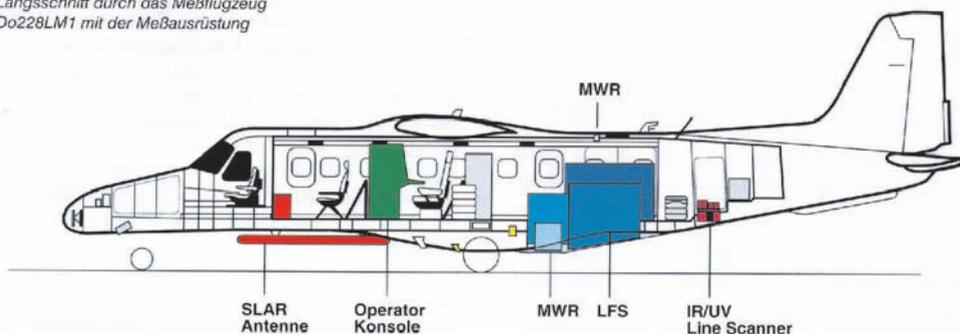


Abb. 1: Längsschnitt durch eine Do 228 der Luftüberwachung.

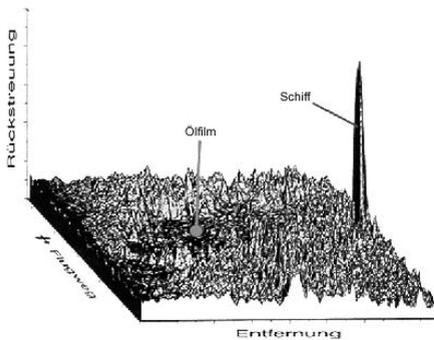


Abb. 3: Entfernungskorrigiertes Rückstreuprofil einer SLAR-Messung beim Flug über ölverschmutzter Seeoberfläche.

Bojen) mit unterschiedlicher Intensität rückgestreut (Radarecho). Durch Laufzeitunterschiede aufgrund unterschiedlicher Entfernungen quer zur Flugrichtung und aufgrund der Vorwärtsbewegung des Flugzeugs erfolgt eine zweidimensionale Abtastung der Oberfläche (Abb. 3). Das Seitensicht radar deckt einen Bereich von ca. 30 km links und rechts der Flugbahn ab. Die räumliche Auflösung beträgt ungefähr $60\text{ m} \times 30\text{ m}$ (parallel bzw. senkrecht zur Flugrichtung).

Das Seitensicht radar kann bei Tag und Nacht sowie unabhängig von den Wetterverhältnissen (z. B. Wolken) eingesetzt werden, so lange der Start des Flugzeugs möglich ist.

3.2 Infrarot/Ultraviolett Zeilenscanner (IR/UV Scanner)

Der Infrarot/Ultraviolett Zeilenscanner (IR/UV Scanner) tastet die Meeresoberfläche zeilenweise unterhalb des Flugzeuges ab. Bei einer Flughöhe von 300 m verfügt der Scanner über eine Streifenbreite von 500 m mit einer räumlichen Auflösung von 3,5 m. Daher wird der Sensor als Nahbereichssensor bezeichnet.

Der UV-Kanal (320–380 nm) erfasst das von der Meeresoberfläche reflektierte Sonnenlicht. Aufgrund der kurzen Wellenlänge können bereits sehr dünne Ölfilme mit einer Schichtdicke von weniger als $0,1\ \mu\text{m}$ nach-

gewiesen werden. Allerdings lassen sich aus den Daten des UV-Kanals keine quantitativen Aussagen über die Schichtdicke einer Ölverschmutzung ableiten. Die Nutzung des UV-Kanals ist nur tagsüber bei Sonnenlicht und bei guten Sichtverhältnissen möglich.

Der IR-Kanal ($8,5\text{--}12,5\ \mu\text{m}$) erfasst die thermale Emission der Meeresoberfläche. Ölverschmutzungen ab einer Schichtdicke von $10\ \mu\text{m}$ können entdeckt werden. Aufgrund des geringeren Emissionsvermögens des Öls im Vergleich zum Wasser erscheint das Öl im Allgemeinen kälter als die Wasseroberfläche. Dieser Effekt ist aber nicht eindeutig, da Ölverschmutzungen mit einer Schichtdicke größer $0,5\ \text{mm}$ das Sonnenlicht absorbieren und an Sonnentagen somit wärmer als die umgebene Wasseroberfläche erscheinen können. Absolute Informationen über die Schichtdicke können aus dem IR-Kanal nicht gewonnen werden. Der IR-Kanal misst unabhängig vom Tageslicht. In der Nacht kann es aber durch die Abkühlung des Wassers und des Öls zu einer erneuten Umkehrung der Temperaturgegensätze kommen. Zwar wird die UV- und IR-Strahlung durch Wolken unterdrückt, jedoch sind die Flugzeuge in der Lage, unterhalb der Wolkendecke zu fliegen.

3.3 Mikrowellenradiometer (MWR)

Das Mikrowellenradiometer (MWR) ist ein passiver Nahbereichssensor. Es erfasst zeilenweise die von der Meeresoberfläche emittierte elektromagnetische Strahlung der drei Frequenzen 18,7 GHz, 36,5 GHz und 89 GHz. Bei einer Flughöhe von 300 m erzielt man eine räumliche Auflösung von 5 m mit einer Streifenbreite von ca. 500 m. Der Sensor ist aufgrund der geringen atmosphärischen Absorption der Mikrowellen weitgehend unabhängig von den Wetterverhältnissen (Durchdringung von Wolken und Nebel) und bei Dunkelheit einsetzbar.

Der Aufbau des MWR ist in Abb. 4 dargestellt. Die zeilenweise Abtastung der Meeresoberfläche erfolgt durch zwei um eine gemeinsame Achse rotierende parabolische Primärreflektoren (10 Umdrehungen pro Sekunde), welche über zwei Planreflektoren

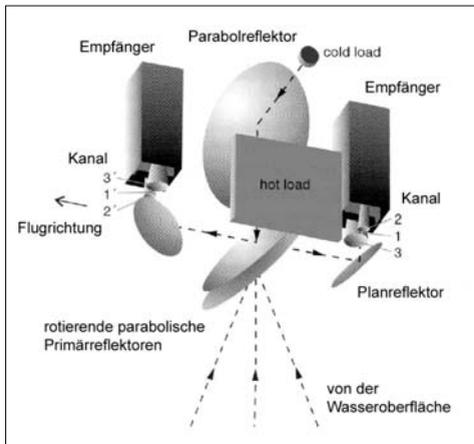


Abb. 4: Prinzipieller Aufbau des Mikrowellenradiometers.

die elektromagnetische Strahlung auf zwei baugleiche dreikanalige Empfängergruppen fokussiert. Die Kalibrierung der Empfänger erfolgt periodisch bei jeder vollständigen Umdrehung im „Hot/Cold“-Verfahren. Eine Absorbermatte bei Umgebungstemperatur dient als warme Kalibrierquelle („Hot-Load“) und ein baugleicher dritter Parabolreflektor in Kombination mit einem gekühlten Schwarzkörper als „Cold-Load“. Zu Korrekturzwecken (insb. bei Regen und Regenwolken) wird mit einem einkanaligen 89 GHz Radiometer (Zenitradiometer) der Atmosphärenzustand erfasst.

Zur quantitativen Bestimmung der Ölverschmutzung auf der Wasseroberfläche werden wellenlängenabhängige Interferenzphänomene bei Schichtdicken in μm - bzw. mm-Bereich, vergleichbar dem optischen „Farbschillern“ von sehr dünnen Ölfilmen, genutzt. Das modulare Mehrkanal-Radiometer ermöglicht eine eindeutige Bestimmung von Schichtdicken im Bereich von 0,05–2,5 mm.

Entscheidend für die Bestimmung ist die Differenz der Helligkeitstemperatur der Wasseroberfläche T_b^w und der Öloberfläche T_b^o gegeben durch (BROWN et al. 1998):

$$\Delta T_b = T_b^o - T_b^w = (e_o - e_w)(T_w - T_b^{sky})$$

e_o und e_w sind das Emissionsvermögen von Öl bzw. Wasser, T_w ist die Wassertemperatur und T_b^{sky} ist die Helligkeitstemperatur des Himmels.

Die Kurve der Helligkeitstemperatur oszilliert in Abhängigkeit von der Schichtdicke und erlaubt somit keine eindeutige Beziehung zur Schichtdicke herzustellen (Abb. 5). Aufgrund dieser Problematik kann eine eindeutige Schichtdickenbestimmung nur durch die Nutzung von mehreren Frequenzen erfolgen.

Die Schichtdicke ist somit eine Funktion der Helligkeits-Temperaturdifferenzen in den 3 Kanälen:

$$d = f(\Delta T_b^{18.7\text{GHz}}, \Delta T_b^{36.5\text{GHz}}, \Delta T_b^{89\text{GHz}})$$

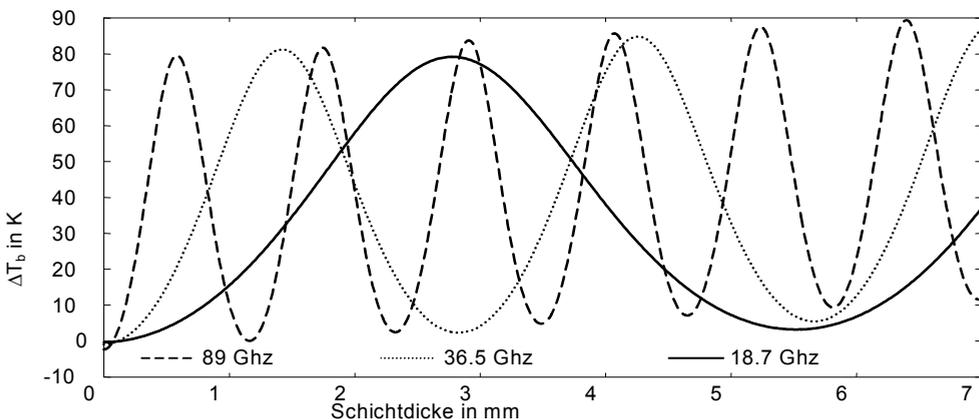


Abb. 5: Differenz der Helligkeitstemperaturen einer Wasser/Öl-Oberfläche mit einer Wasseroberfläche in Abhängigkeit von der Schichtdicke für die im MWR eingesetzten Frequenzen.

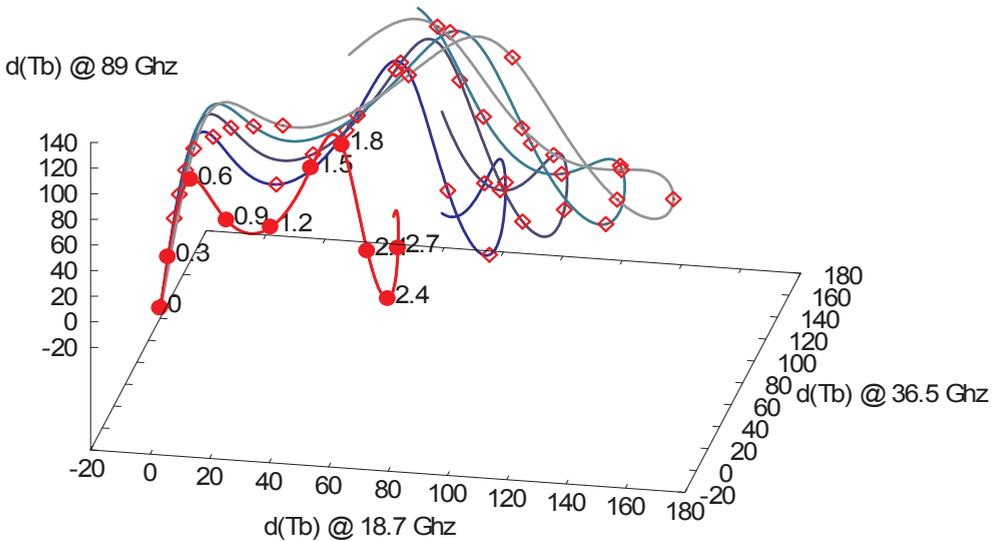


Abb. 6: 3-D Darstellung der Helligkeitstemperaturdifferenzen in den 3 MWR Kanälen für Schichtdicken von 0 mm–3 mm. Die unterschiedlichen Kurven unterscheiden sich im Anteil des Wassers in der Wasser/Öl-Emulsion (0% Rot monoton bis 20% ansteigend).

Tab. 1: Spezifikationen der Hochleistungslaser.

	XeCl Excimer	Farbstoff
Wellenlänge	308 nm	382 nm
Pulsenergie	150 mJ	20 mJ
Pulslänge	20 ns	15 ns
Strahl-divergenz	5 mrad	3 mrad
Wiederholrate (max/mittel)	200 Hz/110 Hz	20 Hz/20 Hz

In einer dreidimensionalen Darstellung (Abb. 6) kann ein eindeutiger Wert für die Schichtdicke gefunden werden.

Diese Methode ist unempfindlich gegen den Anteil von gelöstem Wasser in der Wasser/Öl-Emulsion, die sich nach der Ausbringung des Öls auf die Meeresoberfläche bildet.

3.4 Laserfluorosensor (LFS)

Ein Laserfluorosensor sendet durch Hochleistungslaser erzeugte intensive Lichtimpulse zur Anregung einer substanzspezifi-

schen Fluoreszenz aus. Dadurch kommt es in der oberen Wassersäule zur Emission von Streu- (aufgrund von elastischer- und Raman-Streuung) und Fluoreszenzlicht, das mit einem Teleskop im Flugzeug erfasst und mit einer Detektoreinheit aufgezeichnet werden kann. Laserfluorosensoren können für zahlreiche hydrographische Fragestellungen eingesetzt werden (siehe z. B. MEASURES 1984).

Für die Luftüberwachung werden 2 Hochleistungslaser mit den in Tab. 1 aufgeführten Spezifikationen eingesetzt.

Der Xenonchloride (XeCl) Excimer-Laser dient zur Analyse von Öl, Huminstoffen (Gelbstoffen) und organischen Verunreinigungen. Der Farbstoff-Laser dient zur Anregung der Chlorophyll Fluoreszenz für die Bestimmung von Phytoplankton bzw. Algen (REUTER et al. 1997).

Das vom Teleskop (Typ Schmidt-Cassegrain, Apertur 20 cm) erfasste Streu- und Fluoreszenzlicht wird durch eine zwölfkanalige Detektoreinheit (Photo Multiplier) aufgezeichnet. Die Wellenlängenselektion erfolgt durch dichroitische Strahlenteiler und Interferenzfilter. Jeder Kanal hat eine Bandbreite von 10 nm. Die Spektralkanäle

Tab. 2: Spektralkanäle und Charakteristika der Detektoreinheit.

Wellenlänge [nm]	Charakteristik
344	Wasser Basislinie Raman-Streuung bei Anregung mit 308 nm
330/365/382	Basislinie Raman-Streuung, Öl und Gelbstoff Fluoreszenz
440	Wasser Basislinie Raman-Streuung bei Anregung mit 382 nm
410/470	Basislinie Raman-Streuung, Öl und Gelbstoff Fluoreszenz
500/550/600/650	Öl und Gelbstoff Fluoreszenz
685	Chlorophyll Fluoreszenz

wurden in Hinblick auf die Raman-Streuung und die Erkennung von Öl und organischen Substanzen gewählt (Tab. 2).

Mineralöl besteht aus einer große Anzahl unterschiedlicher Kohlenwasserstoffe mit sehr unterschiedlichen fluoreszenzspektroskopischen Eigenschaften. Aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung von Mineralöl variieren die Fluoreszenzspektren in ihrer Form und der Intensität. Natürliche Substanzen, wie zum Beispiel Fischöl, zeigen ähnlich markante aber von Mineralöl verschiedene Spektren und können somit von Mineralöl unterschieden werden. Die Klassifizierung des Öls bezüglich des Öltyps erfolgt durch den Vergleich mit gemessenen Laborspektren (HENGSTERMANN & REUTER 1992).

Die Bestimmung der Schichtdicke im Bereich 0,1–20 μm kann durch die charakteristische Ramanstreuung des Wassers in der Säule bestimmt werden. Diese wird, in Abhängigkeit vom Öltyp, durch Absorption durch das Öl gedämpft. Die Dämpfung ist ein direktes Maß für die Schichtdicke.

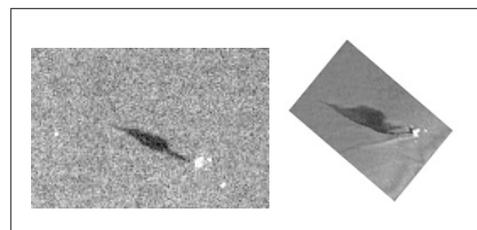
4 Kombinerter Einsatz von flugzeug- und satellitengestützten Fernerkundungsdaten für die Ölüberwachung

Für die Ölüberwachung wird in zunehmendem Maße zusätzlich auch auf Satellitendaten zurückgegriffen. Mehrere Firmen bieten einen operationellen Service an (AL-KHUDHAIRY 2002). Zum Einsatz kommen Satelliten mit Radarsensoren (SAR, Synthetic Aperture Radar) wie zum Beispiel RADARSAT-1 (www.rsi.ca) oder ENVISAT (envisat.esa.int). Neben den schon beim Seitensichtradar beschriebenen Vorteilen (Wetterunabhängigkeit, Tag/Nacht Einsatzfähigkeit) bieten die Satelliten eine große räumliche Abdeckung bei ausreichend hoher räumlicher Auflösung (siehe Tab. 3).

Abb. 7 zeigt den Vergleich zwischen zwei Beobachtungen einer Ölverschmutzung von einer Bohrinsel mit dem Seitensichtradar und mit RADARSAT-1. Der Zeitunter-

Tab. 3: Räumliche Abdeckung und Auflösung von RADARSAT-1 u. ENVISAT ASAR (ESA 2002, RSI 1999).

	RADARSAT-1 ScanSAR Narrow	ENVISAT ASAR Wide Swath
Räumliche Abdeckung	300 km \times 300 km	400 km \times 400 km
Räumliche Auflösung	50 m	150 m

**Abb. 7:** Vergleich der Bilder einer Ölverschmutzung vom Seitensichtradar des Flugzeugs (Rechts) und vom RADARSAT-1 Satellit (Links) (RADARSAT-1 data copyright Canadian Space Agency/agence spatiale canadienne 2003, processed and distributed by KSAT).

Tab. 4: Informationen zu dem im SAR- und SLAR Bild entdeckten Ölfilm.

	RADARSAT-1 SAR	Flugzeug SLAR
Datum/ Uhrzeit	15.7.2003 17:19 UTC	15.7.2003 19:24 UTC
Position	55° 29' 02'' N 5° 03' 25'' O	55° 28' 18'' N 5° 06' 00'' O
Länge × Breite	8,1 km × 0,8 km	6,6 km × 1,6 km
Volumen	keine Angaben	16,47 m ³

schied zwischen den beiden Aufnahmen ist kleiner als 2 Stunden (Tab. 4).

Die Position von in Satellitendaten entdeckten Ölverschmutzungen können an ein Überwachungsflugzeug übermittelt werden, um eine Mengenbestimmung und Klassifizierung des Öls mit Hilfe der Sensoren an Bord durchzuführen.

Die Überwachung mit Flugzeugen und Radarsatelliten hat jeweils spezifische Vor- und Nachteile, wobei sie sich gut ergänzen (Tab. 5).

Im Rahmen des EU-geförderten OCEANIDES Projektes (intelligence.jrc.cec.eu.int/marine/oceanides/oceanides.html) wird die Einsatzmöglichkeit von Satellitendaten in Kombination mit der flugzeuggestützten Überwachung untersucht. Neben dem wichtigen Aspekt der Genauigkeit der Ölerkennung in Satellitendaten ist die Betrachtung

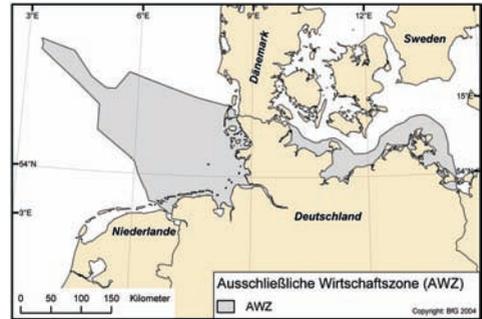


Abb. 8: Ausschließliche Wirtschaftszone der Bundesrepublik Deutschland.

der temporalen und räumlichen Abdeckung der Ausschließlichen Wirtschaftszone der Bundesrepublik Deutschland (AWZ, Abb. 8) ein wichtiges Kriterium.

Bei einer angenommenen Streifenbreite des Seitensichtradars von 60 km wird die AWZ in der Nordsee, in Abhängigkeit von der gewählten Flugroute, zu ca. 35%–60% (Mittelwert 55%) abgedeckt. Für die AWZ in der Ostsee beträgt die räumliche Abdeckung mehr als 90%. Im Jahr 2002 wurden zum Beispiel 346 Nordsee-Einsätze und 190 Ostsee-Einsätze von der Luftüberwachung durchgeführt.

Eine über 95%ige Abdeckung der Ostsee wird nur von 30 RADARSAT-1 und 52 ENVISAT ASAR Szenen pro Jahr erreicht. Mit den beiden vorhandenen Satelliten lassen sich ähnliche jährliche Flächenabdeckungen erreichen. Jedoch ergibt die zeitliche Vertei-

Tab. 5: Vor- und Nachteile der Überwachung mit Flugzeugen und Radarsatelliten (TRIESCHMANN et al. 2003).

Flugzeug	Radarsatellit:
<ul style="list-style-type: none"> + hohe räumliche Auflösung + direkte vor Ort Kontrolle (Verifikation) + Klassifizierung des Öls + Bestimmung der Schichtdicke + Beweissicherung + Flugroute bestimmbar 	<ul style="list-style-type: none"> + große räumliche Abdeckung + können Ölalarm für die Flugzeuge geben + 24 h Betrieb + unabhängig vom Wetter (Flugwetter) + Schiffsrouten können weiträumig überwacht werden + liefert langfristige statistische Daten
<ul style="list-style-type: none"> – geringe räumliche Abdeckung – hohe Kosten 	<ul style="list-style-type: none"> – geringere räumliche Auflösung – geringere Genauigkeit – derzeit geringe Wiederholrate – derzeit noch hohe Kosten pro Satellitenszene – feste Aufnahmezeiten

Tab. 6: Eigenschaften der einzelnen Sensoren bzw. Satelliten.

	Visuelle Beobachtung	SLAR	UV	IR	MWR	LFS	RADARSAT ScanSAR Narrow	ENVISAT ASAR Wide Swath
Streifenbreite (Flugzeug Flughöhe von 300 m)	ca. ± 3 km	± 30 km	± 250 m			± 75 m	300×300 km	400×400 km
Klassifizierung	Nein	Nein				Ja	Nein	Nein
Sensitiv für Schichtdicke des Öls	Nein	Nein	$> 0,1 \mu\text{m}$	$> 0,1 \mu\text{m}$	$50 \mu\text{m} - 2,5 \mu\text{m}$	$0,1 \mu\text{m} - 20 \text{mm}$	Nein	Nein
Räumliche Auflösung	Hoch	$60 \text{m} \times 30 \text{m}$	$3,5 \text{m}$	$3,5 \text{m}$	$> 5 \text{m}$	10m Pixelabstand	50m	150m
Entdeckung von Unterwasseröl	Nein	Nein				Ja	Nein	Nein
Bei Dunkelheit nutzbar	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Schichtdickenbestimmung	Erscheinung des Öls	Nein			$50 \mu\text{m} - 2,5 \text{mm}$	$0,1 \mu\text{m} - 20 \mu\text{m}$	Nein	Nein
Messgeometrie	Visuell	Zeilenweise, 20 Hz				Konisch, 5 Hz	Bild zeilenweise	Bild zeilenweise
Nutzungseinschränkungen	Nein	Nein	Wolken	Wolken	Nein	Wolken, Flughöhe	Nein	Nein

lung der Satellitenüberflüge Überwachungs-lücken von mehreren Tagen.

Der Einsatz von Satellitendaten ist eine sinnvolle Ergänzung der flugzeuggestützten Luftüberwachung und kann zu einer Erhöhung der Abdeckung und einer Effizienzsteigerung der Ölüberwachung führen. Eine Ablösung der Luftüberwachung durch die Nutzung von Satellitendaten ist aufgrund der genannten Vorteile/Fähigkeiten der Luftüberwachung (siehe Tab. 5) und der mangelnden temporalen Abdeckung der Seegebiete augenblicklich nicht möglich.

5 Zusammenfassung

Die Kombination der Sensordaten der Flugzeuge ermöglicht eine sehr leistungsfähige Ölüberwachung. Während das Seitensicht-radar des Flugzeuges als Weitbereichsensor mögliche Ölverschmutzungen in einem großräumigen Bereich erfassen kann, sind die Nahbereichsensoren in der Lage, die Menge, die Qualität und den Typ zu bestimmen. Mit Hilfe des IR/UV Sensors kann die räumliche Ausdehnung der Ölverschmutzung erfasst werden. Besonders im UV-Ka-

nal ist die maximale räumliche Ausdehnung der Ölverschmutzung klar erkennbar. Ausgehend von dieser Abgrenzung kann die Schichtdicke durch die Kombination der drei Frequenzen des MWR bestimmt werden. Der LFS dient zur Bestimmung des Öltyps und der Messung von geringen Schichtdicken. Tab. 6 fasst die Eigenschaften der flugzeug- und satellitengestützten Sensoren zusammen. Die wichtigsten sensorspezifischen Merkmale der einzelnen Sensoren sind farblich hervorgehoben.

Die Nutzung von SAR-Satellitendaten stellt eine sinnvolle Ergänzung der flugzeuggestützten Ölüberwachung dar. Eine alleinige Überwachung durch die Nutzung von Satellitendaten ist aber aufgrund der temporalen Auflösung, der limitierten Sensorausstattung und der fehlenden juristischen Beweissicherung nicht empfehlenswert.

6 Danksagung

Diese Arbeit wurde unterstützt vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW). Das OCEANIDES Projekt (EVK2-CT-2002-00177) wird durch

die EU gefördert (EESD-ENV-2002GMES).

Das Marinefliegergeschwader 3 „Graf Zeppelin“ führt den operationellen Betrieb der Flugzeuge durch und bedient die Sensorik im Flug. Das Havariekommando koordiniert den operationellen Einsatz der Luftüberwachung. Wir bedanken uns bei beiden Institutionen für die große Unterstützung.

Die Sensorik ist von Fa. Optimare GmbH hergestellt worden.

Die im Artikel geäußerten Meinungen entsprechen nicht zwangsläufig denen des BMVBW oder der EU-Kommission.

7 Literatur

- AL-KHUDHAIRY, D. H. A., 2002: Marine oil pollution. Technologies and methodologies for detection and early warning. – 192 S., European Commission IPSC, Ispra, Italy.
- ALPERS, W. & HÜHNERFUSS, H., 1989: The damping of ocean waves by surface films: A new look at an old problem. – *Journal of Geophysical Research* **94** (C5): 6251–6265.
- BROWN, E. R., McMAHON, O. B., MURPHY, T. J., HOGAN, G. G., DANIELS, G. D. & HOVER, G., 1998: Wide-band radiometry for remote sensing of oil films on water. – *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **46** (12): 1989–1996.
- ESA, 2002: ASAR Product handbook. – 543 S., ESA.
- GADE, M., ALPERS, W., HÜHNERFUSS, H., MASUKO, H. & KOBAYASHI, T., 1998: Imaging of biogenic and anthropogenic ocean surface films by the multifrequency/multipolarization SIR-C/X-SAR. – *Journal of Geophysical Research* **103** (C9): 18851–18866.
- HENGSTERMANN, T. & REUTER, R., 1992: Laser Remote sensing of pollution of the sea: a quantitative approach. – *EARSel Advances in Remote Sensing* **1**: 52–60.
- MEASURES, R. M., 1984: Laser remote sensing: fundamentals and applications. – 524 S., Wiley & Sons, New York.
- MOUCHOT, M.-C. & GARELLO, R., 1998: SAR for Oceanography. – In: HENDERSON, F. M. & LEWIS, A. J. (Hrsg.): Principles and applications of imaging radar. – **2**: 631–675, John Wiley & Sons, New York.
- REUTER, R., WILLKOMM, R., ZIELINSKI, O. & MILCHERS, W., 1997: Hydrographic laser fluorosensing: status and perspectives. – In: STEEL, J. H., BEHRENS, H. W. A., BORST, J. C., DROPPERT, L. J. & VAN DER MEULEN, J. P. (Hrsg.): Operational oceanography. The challenge for European co-operation. – 251–258, Elsevier, Amsterdam.
- RSI, 1999: RADARSAT user guide. 113 S., RSI.
- TRIESCHMANN, O., HUNSÄNGER, T., TUFTE, L. & BARJENBRUCH, U., 2003: Data assimilation of an airborne multiple remote sensor system and of satellite images for the North- and Baltic Sea. In: – BOSTATER JR., C. R. & SANTOLERI, R. (Hrsg.): Remote sensing of the ocean and sea ice 2003. – *SPIE* **5233**: 51–60, Bellingham, WA.
- ULABY, F. T., MOORE, R. K. & FUNG, A. K., 1982: Microwave remote sensing: Active and passive. Volume II: Radar remote sensing and surface scattering and emission theory. – Artech House, Norwood, MA.

Anschrift der Autoren:

Dipl.-Geogr. LARS TUFTE

Dr. OLAF TRIESCHMANN

Dipl.-Ing. THOMAS HUNSÄNGER

Dr. habil. ULRICH BARJENBRUCH

Bundesanstalt für Gewässerkunde

Am Mainzer Tor 1, D-56068 Koblenz

Tel.: 0261-1306 5413, Fax: 0261-1306 5363

e-mail: tufte; trieschmann; hunsaenger;

barjenbruch@bafg.de

Manuskript eingereicht: Mai 2004

Angenommen: Juli 2004