

**NAREF-Boje**

PRAKLA-SEISMOS Report 4 / 75



# Die NAREF-Boje



Die NAREF-Boje im Hafen von Heligoland  
The NAREF buoy in the harbour of Heligoland

**NAREF ist eine Abkürzung für NAVigations-REFerenz.** Damit ist dieses Bojenkonzept eindeutig in die Kategorie der Navigationsbojen eingestuft. Von den vielen für Navigationszwecke eingesetzten Bojenarten, wie Heulbojen, Markierungsbojen, Warn- und Bakenbojen unterscheidet sie sich, abgesehen von ihrem hochmodernen elektronischen Eingeweide, auch durch das vorgesehene Einsatzgebiet, die Tiefsee, in der man wegen des großen Verankerungsaufwandes nur ungerne Bojen setzt.

Dieses Bojenkonzept wurde von uns vorgeschlagen, um die besonders schwierigen Navigationsaufgaben zu lösen, die ein Tiefsee-Forschungsschiff, wie z. B. das deutsche FS "Valdivia", in Gegenden antrifft, die jenseits der Reichweite landgebundener Radionavigationsketten liegen und deren große Wassertiefe eine Koppelnavigation nach dem Sonar-Dopplerverfahren nicht zuläßt. Dies ist z. B. bei der Manganknollenprospektion im Südpazifik der Fall.

Zwar gibt es das hochmoderne Satellitennavigationssystem mit globaler Reichweite. Die Umlaufbahnen der Satelliten liegen jedoch relativ niedrig und laufen über die Erdpole. Dadurch ist nur dann sporadisch eine Ortsinformation möglich, wenn ein Satellit in gutem Sichtwinkel für das Schiff über dem Horizont durchläuft. Es sind zwar 6 Satelliten im Umlauf, die in Polnähe am häufigsten und am Äquator am seltensten auftauchen; sie sind jedoch nicht in ihren Umläufen synchronisiert. Es kann vorkommen, daß die Durchgänge sich zeitweilig häufen, daß aber auch oft für sehr lange Zeit kein brauchbarer Durchgang erfolgt. In Äquatornähe liegt die mittlere Zeit zwischen zwei Durchgängen zwar unter zwei Stunden, aber ein Schiff muß auch manchmal 6-8 Stunden auf einen brauchbaren Satelliten-Durchgang warten. Ein Forschungsschiff braucht aber jederzeit eine genaue Standortinformation; deshalb ist zur Überbrückung der Lücken zwischen den Satellitendurchgängen ein Koppelnavigationssystem erforderlich, dessen auflaufender Fehler für die Zeitintervalle zwischen brauchbaren Satellitendurchgängen möglichst gering ist.

Für Forschungsaufgaben im Bereich der Festlandsockel mit Wassertiefen bis zu etwa 300 m ist das auf unseren Schiffen PROSPEKTA und EXPLORA installierte Sonar-Dopplernavigationssystem gut für die Ergänzung des Satellitenverfahrens geeignet. Bei größeren Wassertiefen ist das Sonar-Bodenecho aber zu schwach, so daß nur noch gegen eine immer vorhandene Streustrahlung vom Wasser her gemessen werden kann. Durch den Stromversatz und die Bewegung von Fisch und Planktonenschwärmen wird die Sonarmessung aber dann zu ungenau.

In der bisherigen Phase der Tiefseemessungen des FS "Valdivia" konnte die Satellitennavigation noch durch eine in das von uns entwickelte INDAS-System integrierte Loran-C-Radionavigations-Empfangsanlage gestützt werden, obwohl bereits weit außerhalb der normalen Reichweite der Hawaii-Kette gearbeitet wurde. Die Entfernungen zu dieser südlichsten Loran-C-Kette werden jedoch mit wachsendem Arbeitsfortschritt immer größer, so daß auch hier auf längere Sicht keine brauchbare Hilfe mehr zu erwarten ist.

So lag, wegen Mangels an natürlichen Inseln im Südpazifik, der Gedanke nahe, eine künstliche Insel als Navigationsträger zu schaffen, z.B. in Form einer Boje. Für Navigationszwecke sucht man im allgemeinen jedoch einen ortsfesten Bezugspunkt, den eine Insel ja darstellt. Bojen hängen aber nur an einem oder mehreren dünnen Ankerseilen. Die erwarteten Wassertiefen sind größer als 5000 m; daher muß man einen recht großen Abdriftfehler (Schwojkreis) in Kauf nehmen, oder man müßte die Boje an drei bis vier Punkten - und daher sehr aufwendig verankern. Diese große Wassertiefe läßt auch bei Sonartranspondern keine brauchbaren Reichweiten erwarten. Transponder (Kurzwort, zusammengesetzt aus **transmit** = senden und **respond** = antworten) werden direkt auf dem Meeresgrund aufgestellt und beispielsweise vielfach zur sog. dynamischen Positionierung von schwimmenden Bohrinselfen eingesetzt.

Das NAREF-Konzept läßt einen beträchtlichen Schwojkreis der Navigations-Boje um den Verankerungspunkt zu und erfordert damit kein aufwendiges Verankerungssystem. Voraussetzung ist allerdings, daß die zeitliche Änderung der Abdrift gering ist. Dies ist in den vorgesehenen Einsatzgebieten - den Passatwindzonen - zu erwarten, wo relativ konstante Wind- und Strömungsverhältnisse über längere Zeiträume vorherrschen. Eine ausreichend genaue Positionsbestimmung wird dadurch erreicht, daß die tatsächliche Bojenposition durch Rückwärtseinmessung der Boje vom Schiff aus während der sporadisch aufgenommenen Satellitendurchgänge laufend verfolgt und aufdatiert wird: Zwischen den Satellitendurchgängen dient die Boje also unter Berücksichtigung der ermittelten Abdrift zur genauen Bestimmung der Schiffposition. Hiermit ist ersichtlich, daß das NAREF-Konzept auf einer wechselweisen Positionsbestimmung von Boje und Schiff beruht. Wenn das Schiff eine der verhältnismäßig seltenen Positionsinformationen durch die Satellitennavigation erhält, wird die gespeicherte Bojenposition aufdatiert. ansonsten bestimmt das Schiff seine Position relativ zur Boje.

Unser Konzeptvorschlag für die NAREF-Boje wurde von den an der Tiefseeforschung mit dem FS "Valdivia" beteiligten Gruppen positiv aufgenommen. Die "Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt" (GKSS) erhielt zu Ende 1973 den Auftrag vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), die Entwicklung eines solchen Navigationssystems zu veranlassen. In zahlreichen Vorbesprechungen zwischen PRAKLA-SEISMOS, GKSS, verschiedenen Bojenherstellern und -Spezialisten, bei denen es im wesentlichen um geeignete Trägerbojen, Verankerungen und Stromversorgungsanlagen ging, nahm das Entwicklungsvorhaben schließlich konkrete Formen an.

Im September 1974 erhielt PRAKLA-SEISMOS den Auftrag zur Entwicklung und Herstellung der elektronischen Einrichtungen, welche zur Realisierung eines Versuchsmusters des NAREF-Systems auf Schiff und Boje nötig waren. Den Zuschlag für die Lieferung der Trägerboje mit Stromversorgung und Verankerung erhielt die Fa. Hagenuk in Kiel. In einer ersten Ausbaustufe sollte die elektronische Ausrüstung im wesentlichen nur eine Überprüfung des Verankerungssystems und des Bojenverhaltens im Einsatzgebiet ermöglichen.

Die elektronische Ausrüstung der Boje (siehe Figuren 1 und 2) besteht aus einem 60-W-Grenzwellensender, welcher eine Folge von zwei verschiedenen Trägerfrequenzen im Bereich zwischen 1,6 und 2 MHz ausstrahlt. Diese Trägerfrequenzen werden entsprechend unserem ANA-Verfahren von einem hochstabilen Atomfrequenznormal stabilisiert. Die abgestrahlte Antennenspannung wird zusätzlich phasenstabilisiert, um den Einfluß der Verstimmung der Antenne durch wechselnde Neigungswinkel der Boje auszuschalten.

Zur Meßwertübertragung können die Trägerfrequenzen zusätzlich mit Hilfsträgern phasenmoduliert werden. Zunächst ist nur ein Hilfsträger installiert, welcher einen zu geringen Ladezustand der Versorgungsbatterien signalisiert. Unterschreitet dann aber die Batteriespannung einen gewissen Mindestwert, so wird der Sender automatisch so lange außer Betrieb gesetzt, bis wieder ein ausreichender Ladezustand erreicht ist.



Fig. 1  
Frontansicht des NAREF-Empfängers  
Front view of the NAREF receiver

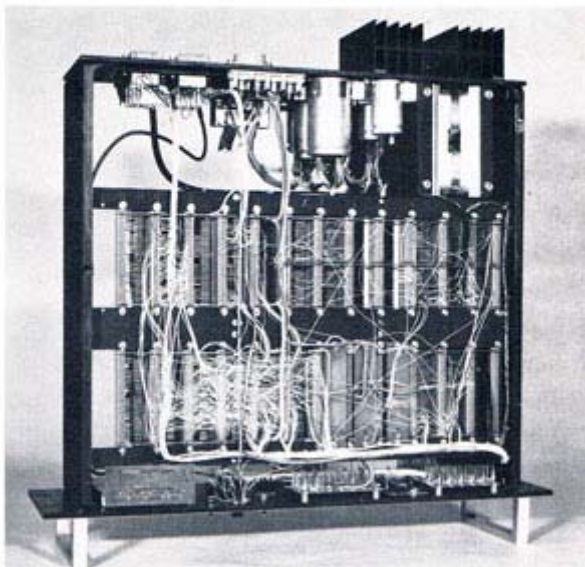


Fig. 2  
Ansicht des NAREF-Empfängers von unten  
NAREF receiver, view from below

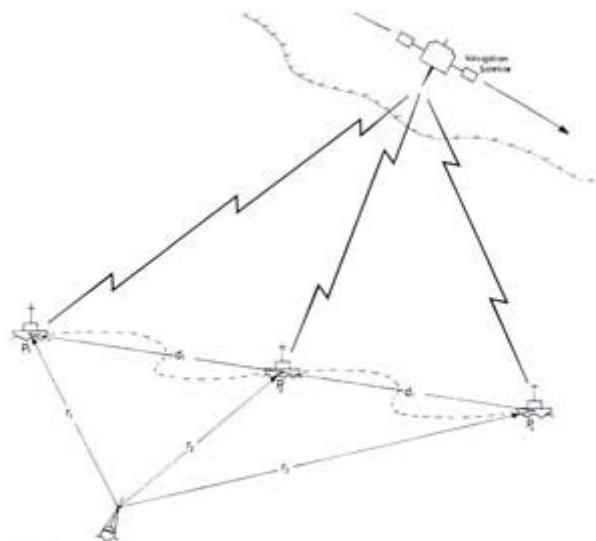
In einer zweiten Ausbaustufe ist die Installation eines zusätzlichen Empfangssystems für das OMEGA-Navigationsverfahren geplant. Um eine einzige Antenne wechselseitig zum Aussenden der ANA-Trägerfrequenzen und zum Empfang der OMEGA-Signale verwenden zu können, ist die Ansteuerstufe für den Bojensender so ausgelegt, daß dieser im gleichen Zeitrhythmus getastet werden kann, wie die weltweit verteilten OMEGA-Stationen. Damit können die Sendezeiten der Boje so gelegt werden, daß sie mit denen für den Ort ungeeigneten OMEGA-Sendern zusammenfallen und somit die Antenne jeweils zum Empfang der für das Einsatzgebiet geeigneten OMEGA-Sender frei ist.

Für das Meßschiff wurde ein Navigationsempfänger entwickelt, von dem die Trägerfrequenzen des Bojensenders aufgenommen werden; ihre Phase wird mit der eines Signales der gleichen Frequenz verglichen, das von einem ebenfalls installierten Atomfrequenznormal stammt. Aus diesen Phasenmessungen wird eine Laufzeitinformation abgeleitet, deren Mehrdeutigkeit durch Messungen bei zwei verschiedenen Trägerfrequenzen verringert wird. Ein eingebauter Redundanzrechner bringt etwaige Standliniensprünge sofort zur Anzeige (Standlinie = Kreis mit dem Radius Sender/Schiff, mit dem Sender als Mittelpunkt). Das Hilfsträgersignal für die Batterieüberwachung wird dekodiert und läßt ein Blinksignal aufleuchten, wenn die Versorgungsspannung der Boje einen bestimmten Wert unterschritten hat.

Die Fa. Hagenuk lieferte die Boje mit Batterien, zwei Windgeneratoren zur Batterieladung, einer 5-m-Stabantenne, Befehrerung und Radarreflektor sowie das Verankerungssystem.

In der ersten Ausbaustufe liefert die Bojenelektronik bereits eine wesentliche Information: die Einweg-Radiolaufzeitmessung vom Bojensender zum Schiffsempfänger mit einer Reichweite von über 200 km. Diese kann zur Verfolgung und Aufdatierung der Bojenposition nach einem Schema ausgewertet werden, das die Figur 3 zeigt.

Während der Meßfahrt erhält das Schiff für die Punkte P1 P2 und P3 Positionsbestimmungen durch Auswertung von Satellitendurchgängen. Die durch Laufzeitmessung erhaltenen Entfernungen der Boje zu diesen Punkten sind  $r_1$   $r_2$  und  $r_3$ . Die Strecken  $d_1$  und  $d_2$  lassen sich von den Satellitenpositionen ableiten. Durch Trilaterationsrechnung mit  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $d_1$ , sowie  $r_2$ ,  $r_3$   $d_2$  und  $r_1$ ,  $r_3$ ,  $(d_1 + d_2)$  kann die Bojenposition zu den Satellitenortungen dreifach überbestimmt werden. Eine mindestens dreifache Überbestimmung ist allerdings notwendig, da der Gleichlauf der Atomfrequenznormale nicht völlig genau ist, wodurch sich ein Entfernungsmeßfehler mit statistischem Gang ergibt, welcher als zusätzliche Unbekannte in die Rechnung eingeht.



**Fig. 3**  
**Schema für die Verfolgung und Aufdatierung**  
**der Bojenposition**  
**Scheme for tracing and updating the buoy's position**

In der Praxis erhält man nun laufend Satellitenpositionen, so daß auch die Positionierungsungenauigkeit des Satellitensystems über eine Vielzahl von Meßpunkten ausgemittelt werden kann. Die Verbindungslinien zwischen den Punkten P1, P2 und P3 brauchen keinesfalls gerade zu sein. Das Schiff kann einen beliebigen Kurs fahren, es muß nur wirklich Fahrt machen, damit die Strecken  $d_1$   $d_2$  usw. brauchbare Werte für die Rechnung annehmen. Zwischen den Positionsbestimmungen durch Satelliten stehen die zur Boje gemessenen Entfernungen für das Schiff als zusätzliche Navigationshilfe zur Verfügung. Zur Ortsbestimmung reicht jedoch eine gewonnene Standlinie allein nicht aus (die Position des Schiffes ist der Schnittpunkt von zwei Standlinien). Allerdings kann diese in vielen Fällen mit der Standlinie einer Landstation gepaart werden. So ist z.B. im Südpazifik oft noch ein Sender der Loran-C Kette von Hawaii gut zu empfangen, während alle anderen wegen ihrer ungünstigen Einfallswinkel für eine Ortsbestimmung ausfallen. Hier kann die NAREF-Boje bei geeigneter Position von großem Nutzen sein. Um Ortsbestimmungen nur mit der Boje zu ermöglichen, kann auch die Funkpeilanlage zur Richtungsbestimmung mitbenutzt werden. Aus der Entfernung Boje/Schiff und dem Peilrichtungswinkel kann die Position des Schiffes relativ zur Boje bestimmt werden. Wegen der Unschärfe bei der Peilrichtungsmessung und der typisch geringeren Empfindlichkeit des Funkpeilempfängers ist die Anwendbarkeit dieses Verfahrens jedoch auf Entfernungen bis 30 km begrenzt.

In der zweiten Ausbaustufe soll die mit dem OMEGA-Radionavigationsverfahren erzielbare Genauigkeit mittels der NAREF-Boje soweit verbessert werden, daß das Verfahren auch in der Tiefseeforschung eingesetzt werden kann.

OMEGA ist ein Weitbereichsnavigationssystem, welches in der augenblicklichen Ausbaustufe schon kurz vor dem angestrebten Ziel einer weltweiten Bedeckung steht. Es arbeitet im sog. VLF (Very Low Frequency)-Bereich trägerfrequenzen übertragen. Auf dem Schiff werden die Wellenlängen bis zu 30 km, deren Größenordnung bereits in die des Abstandes der ionosphärischen Schichten (70-90 km) zur Erdoberfläche fällt. Der Zwischenraum zwischen Erde und Ionosphäre wirkt dann wie ein Wellenleiter und es ergeben sich Wellenausbreitungsformen, wie man sie bei Hohlleitern im Mikrowellenbereich kennt.

Normalerweise werden vom OMEGA-Sender zwei Ausbreitungsformen angeregt (Fig. 4), die erwünschte primäre und eine unerwünschte sekundäre Form. Diese beiden Formen überlagern sich wechselseitig und führen zu Instabilitäten in der empfangenen Phasenlage. Die Phasenstabilität ist auch von einer konstanten Höhe der ionosphärischen Schichten abhängig; diese Höhe wechselt jedoch mit der Sonneneinstrahlung. Schließlich werden

sporadische Anomalien durch Sonneneruptionen und durch die sogenannte Polkappenabsorption verursacht. All dies führt dazu, daß das OMEGA-Verfahren durch Wellenausbreitungsanomalien in seiner Genauigkeit stark eingeschränkt wird.

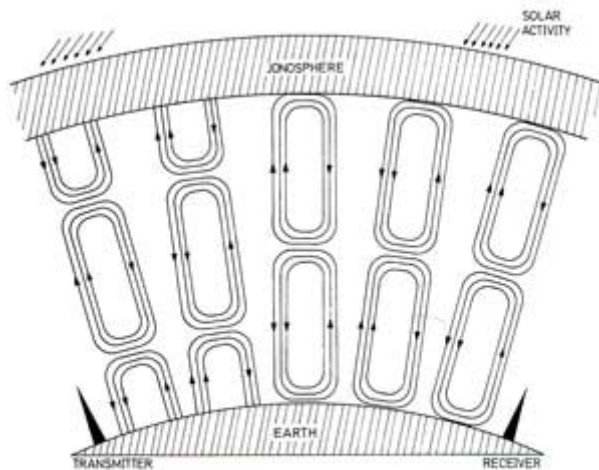


Fig. 4 Wellenausbreitungsformen von einem OMEGA-Sender  
Wave propagation modes from an OMEGA transmitter

Werden für die normalen Ausbreitungsschwankungen abhängig von der Sonneneinstrahlung im Ausbreitungsweg Korrekturen angebracht, so kommt man auf Ortungsfehler von ein bis drei Seemeilen. Dieser Fehler kann weitgehend kompensiert werden, wenn möglichst dicht bei dem Meßfahrzeug eine ortsfeste Empfangsstation ihre OMEGA-Meßwerte übermittelt und zur Positionsbestimmung nur die Differenz der Meßwerte zwischen ortsfestem und beweglichem Empfänger ausgewertet wird. Damit schaltet man die Ausbreitungsanomalien aus, welche sich auf dem Teil des Wellenweges ergeben, der für beide Empfangsstationen gemeinsam ist. Diese Navigationsart wird Differential-OMEGA genannt; sie führt zu Verbesserungen der Ortungsgenauigkeit um den Faktor 5 bis 20, abhängig vom Abstandsverhältnis Schiff-Feststation zu Schiff-Sendestation. Je näher also die Feststation zum Schiff liegt, desto besser ist das Ortungsergebnis.

In Figur 5 sind schematisch die Navigationshilfen der NAREF-Boje mit Differential-OMEGA dargestellt. Außer der Laufzeitinformation  $D$ , deren Auswertbarkeit im wesentlichen bereits beschrieben wurde, werden beispielsweise von der Boje drei Laufzeitwerte  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  zu drei OMEGA-Sendern ermittelt und zum Schiff mittels zusätzlicher Hilfsträgerfrequenzen übertragen. Auf dem Schiff werden die Werte  $d_1$ ,  $d_2$  und  $d_3$  gemessen und die Differenzwerte  $d_1 - d_1 = \delta_1$ ,  $d_2 - d_2 = \delta_2$  und  $d_3 - d_3 = \delta_3$  gebildet. Aus den Werten  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  und  $\delta_3$  wird die Entfernung vom Schiff zur Boje bestimmt. Da  $\delta_1$ , bis  $\delta_3$  im Allgemeinen wesentlich kleiner sind als die Werte  $d_1$ , bis  $d_3$ , können sich hier ionosphärische Ausbreitungsanomalien viel weniger auswirken.

Im März 1975 erfolgte auf der Insel Helgoland der Einbau der Bojenelektronik in den von Hagenuk gelieferten Bojekörper. Da die Fertigung beider Geräteeinheiten gut abgestimmt war, ging eine Funktionsprobe reibungslos vonstatten. Die Antennenabstimmung erfolgte bei geschleppter Boje im Hafenbecken. Auch hierbei gab es keine Schwierigkeiten. Jedoch wurde als hinderlich empfunden, daß Helgoland und Hawaii zwar den Anfangsbuchstaben und das hohe Preisniveau, aber nicht das gute Wetter gemeinsam haben. Wegen schlechten Wetters mußte zunächst auf die vor Helgoland vorgesehene Verankerung der Boje verzichtet werden. Es wurde lediglich eine Empfangskontrolle im Hafenbereich durchgeführt. Den eindrucksvollsten Nachweis für gute Abstrahlung unserer Sendeleistung erbrachte ein Engländer, welcher mit einem Kontrollempfänger im Hafen von Helgoland eifrig nach einem "Störsender" suchte, welcher eine Decca-Hi-Fix-Station, die auf der anderen Seite der Insel im Frequenzbereich unserer Boje arbeitete, aus der Synchronisation brachte

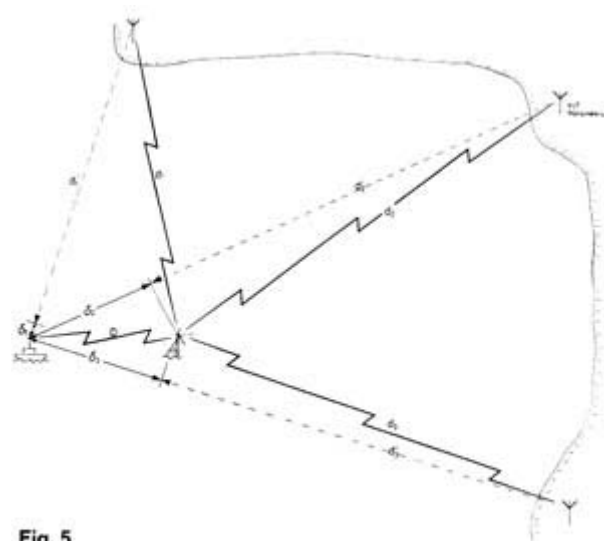


Fig. 5 Schema für die Navigationshilfen der NAREF-Boje mit Differential-OMEGA  
Scheme for Navigation with the NAREF buoy using differential OMEGA

Noch im gleichen Monat konnte dann ein Reichweitentest durchgeführt werden. Die Verankerung der Boje vor Helgoland hatte geklappt und der Empfänger wurde in einem Landfahrzeug an verschiedene Punkte der nordfriesischen Küste gebracht, um die Empfangsfeldstärken bei unterschiedlichen Entfernungen zu kontrollieren. Angefahren wurden Punkte dicht an der See in St. Peter-Ording, auf Sylt und Fano sowie in Blävandshuk. Die Entfernungen zur Boje lagen zwischen 50 und 160 km. Die Meßergebnisse lassen auf erzielbare Reichweiten von mehr als 200 km über See schließen.

Einige Schwierigkeiten gab es mit den Windflügeln der Windgeneratoren; beim Abstimmen der Antenne mußten sie vorsorglich festgebunden werden, um eine nicht vorgesehene Funktion als „Fleischhackmaschine“ zu unterbinden. Nachdem gleich anfangs durch unglückliches Anschlagen an eine Hafenmole ein Flügel beschädigt und später beide Generatoren ihres Flügelschmuckes beraubt wurden, war während der Reichweitemessung keine Batterieladung möglich. Um zukünftig derartige Schäden zu verhindern, wurde eine Schutzkonstruktion um den Flügelaußenradius angebracht. In der Zwischenzeit wurde die Boje nach Hawaii gebracht. Sie soll dort unter Einsatzbedingungen, wie sie bei einer Tiefseeverankerung vorliegen, getestet und endgültig abgenommen werden. Dieser Akt soll, nach dem Einlaufen der "Valdivia" in Honolulu, noch in diesem Jahr erfolgen.



**Reichweitentest für das NAREF-Bojen-Signal an der nordfriesischen Küste durch F. Sender**  
**Range test for the NAREF buoy signal along the North Frisian coast by F. Sender**

#### **F. Sender**